СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД К СОЗДАНИЮ АВИАЦИОННЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ МАШИН ДЛЯ ГИБРИДНЫХ СИЛОВЫХ УСТАНОВОК В УСЛОВИЯХ ЭКОНОМИЧЕСКОГО КРИЗИСА

Введение. Последние события, связанные с распространением COVID 19, приводят к глобальным изменениям аэрокосмического рынка. Так согласно прогнозам компании Archery Strategy Consulting спрос на новые летательные аппараты (ЛА) в мире, после пандемии COVID 19, может снизиться на 40-60 % в последние 5 лет и составить вместо 8000 судов к 2024 году не более 3000 судов [1]. Кроме того, последствиями пандемии может быть снижение авиационного пассажиропотока (на 30–40 %) и авиационных грузоперевозок из–за изменения глобальной экономической ситуации (на 20–25 %).

Исходя из наихудшего сценария развития событий (снижение спроса на новые самолеты на 60 %, пассажиропотока на 40 % и грузоперевозок на 20–25 %) аэрокосмическим корпорациям, необходимо пересматривать свои направления развития. Но при этом, ограничения на выбросы и шум (традиционные проблемы авиастроителей) вряд ли будут отменены государственными регуляторами. Поэтому задача, которая появляется перед авиастроителями будет заключаться в минимизации вредных выбросов и шума, в условиях сложной экономической ситуации.

На рисунке 1 приведены основные вызовы, которые стоят перед авиастроительными корпорациями, а также пути их решения. Так как основной исследовательский объект в данной работе это электрические машины (ЭМ), то на рисунке 1 значительное внимание уделяется проблемам в области создания ЭМ.

На рисунке 1 к уже традиционным вызовам, таким как выбросы CO2, NOx и шум, добавлены вызовы, которые диктуются пандемией COVID 19. Наихудшие ограничения, создаваемые COVID 2019 описаны нами выше. Анализ литературы показал [2–5], что решение традиционных авиационных вызовов (шум, выбросы) может быть достигнуто пятью крупными направлениями: это использовании новых материалов (например, композитного фюзеляжа, композитного крыла); изменением аэродинамики

летательного аппарата, для повышения топливной эффективности ЛА; создание новых авиационных двигателей, с повышенной эффективностью; использование экологически чистого топлива или использованием ЛА с гибридной силовой установкой. В 2019 году авиапроизводители развивали практически все направления ответов на поставленные вызовы, в той или иной степени. В частности, считалось, что использование низкоуглеродного топлива позволит сократить выбросы углерода от ЛА на 80 % и планировалось к 2030 году нарастить поставки подобного топлива до 30 % [6]. Но учетом того, что низкоуглеродистое топливо значительно дороже керосина, а в условиях спада производства самолетов из–за COVID 2019, при условии спада авиаперевозок, стоимость авиаперевозок должна снижаться, для обеспечения функционирования рынка, поэтому использование более дорого топлива ЛА будет затруднительным.

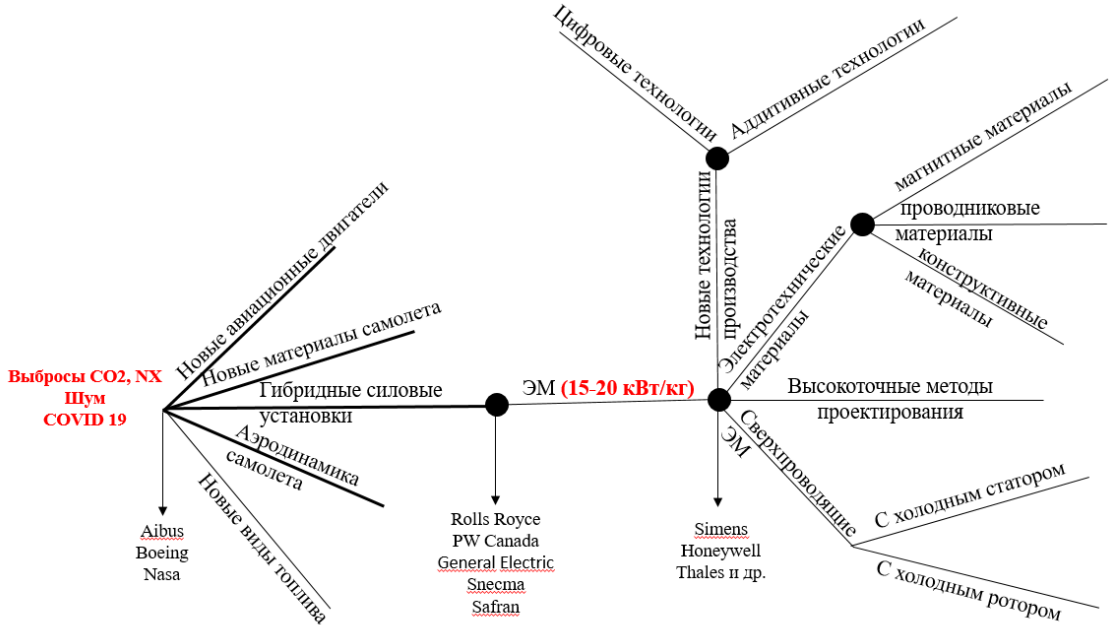

Рисунок 1. Вызовы перед авиастроительными корпорациями и пути их решения

Аналогичные проблемы, будут также ограничивать развитие авиационных двигателей, в связи со значительной дороговизной программ их создания (программа создания авиационного двигателя Trent-1000 составляет

3,2 млрд. $) и значительным циклом ввода новых авиационных двигателей в эксплуатацию.

Использование новых материалов в конструкции ЛА, также может быть значительно замедленно, из–за снижения поставок самолетов. Так, один из крупнейших производителей титана «ВСМПО–Авиависма» уже сократил объем производства на 30 % и восстановление рынка титана прогнозируется только в течении 2–3 лет. Можно предположить, что подобное снижение рынка возникнет и на других направлениях развития авиационных материалов.

Одним из выводов, который можно сделать из анализа сложившейся ситуации – авиастроительным корпорациям необходимо перемещаться в сектор более экономичных, маломестных самолетов, которые требуют минимальных затрат на обслуживание и ремонт и требуют минимальных экономических ресурсов на создание. К сегменту таких летательных аппаратов (ЛА) относятся ЛА с гибридной-силовой установкой (ГСУ), в качестве основного двигателя в которых используется электродвигатель.

Создание ЛА с ГСУ являлось до последнего времени перспективным трендом развития авиастроения. Ряд исследовательских программ предполагал, что в период 2030–2035 гг. будут созданы самолеты с гибридной силовой установкой на 50–70 посадочных мест с установленной единичной мощностью электрических машин 3–6 МВт [2–4]. Однако, в связи с описанной выше рыночной ситуацией в авиастроении из-за COVID 19, процессы создания коммерческих ЛА с ГСУ могут быть значительно ускорены, так как именно они позволят обеспечить минимизацию эксплуатационных затрат ЛА, снизить стоимость производственного цикла ЛА. ЛА с ГСУ могут быть реализованы с использованием разработанных ранее авиационных тепловых двигателей, без значительных вложений, а при этом стоимость технологического цикла создания электрических машин много ниже, чем стоимость создания новых авиационных двигателей, а временной диапазон

вывода на рынок новых электрических машин значительно ниже (и как будет показано далее он может быть еще ускорен), чем у авиационных двигателей.

Необходимо отметить, что в пользу использования ЛА с ГСУ говорит еще и тот факт, что практически всеми мировыми двигателестроительными корпорациям проводятся работы по созданию ГСУ и имеется опыт реализации проектов в данной сфере.

При этом основными проблемными задачами, для эффективного коммерческого использования ЛА с ГСУ остаются вопросы, связанные с создание высокомощных электрических машин (ЭМ), блоков силовой электроники и аккумуляторных батарей с максимальной плотностью энергии [7–9]. Для электрических машин данный показатель варьируется на уровне 15–20 кВт/кг.

Для ускорения процесса создания коммерческих ЛА с ГСУ, при минимизации финансовых вложений, очевидным становиться то, что процесс создания электрических машин, блоков силовой электроники и аккумуляторных батарей для ЛА с ГСУ должен быть значительно ускорен.

Поэтому целью данной работы является анализ трендов, способов повышения плотности энергии ЭМ ГСУ, при условиях сокращения временного цикла их создания и вывода на рынок.

В данной работе мы рассматриваем процесс создания электрических машин для ЛА с ГСУ на примере электрогенератора мощностью 400 кВт с частотой вращения 12000 об/мин, который создается нами совместно с ФГУП «ЦИАМ» для ЛА с ГСУ на 9–19 посадочных мест. Процесс рассматривается нами не только исходя из проектирования электрической машины, а охватывает все стадии создания: формирование технического задания, облика, технологий проектирования, создания экспериментальных образцов, технологий изготовления, стендовых испытаний и испытаний в составе объекта. Подобный комплексный анализ процесса создания электрических машин в литературе не представлен, что обеспечивает новизну наших исследований, а также их комплексность. На примере анализа данного

процесса мы определяем проблемные места в проектной, технической, технологической частях с точки зрения достижения максимальной плотности энергии при минимальных временных и финансовых затратах. На основе анализа современных трендов в области электромашиностроения и смежных отраслей, рассматриваются различные сценарии решения данных проблем и делаются выводы.

Работа структурирована следующим образом: в введении обоснована актуальность исследований и поставлена исследовательская задача. В разделе I описан комплексный обобщенный процесс создания ЭМ для ЛА с ГСУ на примере нашего опыта создания ЭМ для ЛА 9–14 мест. Выявлены наиболее проблемные места и определены возможные пути их решения. В разделе II описан процесс многодисциплинарного компьютерного моделирования и приведены конкретные расчётные данные создаваемого ЭМ, выявлены проблемные места и на основе анализа трендов развития электромашиностроения, предложены варианты их решения. В разделе III описан процесс создания экспериментального образца и приведены результаты экспериментальных исследований. На основе данных результатов также определяются проблемные места и предлагаются сценарии их решения. В разделе выводы приведено обсуждение полученных результатов, а также поставлены направления для дальнейших исследований.

I. Процесс создания ЭМ для ЛА с ГСУ на примере электрогенератора для ГСУ мощностью 400 кВт. На рисунке 2 приведен последовательный алгоритм создания, который характерен для любых экспериментальных или опытных ЭМ, к которым относятся ЭМ для ЛА с ГСУ. Для наглядности на этом же рисунке мы привели зависимость стоимости ошибки от этапа и вероятности ошибки от этапа выполнения.

Анализ рисунка 2 показывает, что максимальная стоимость ошибки создания ЭМ имеет место на этапе серийного производства, но при этом вероятность данной ошибки очень низкая так как ЭМ перед данным этапом проходит множество различных проверок.

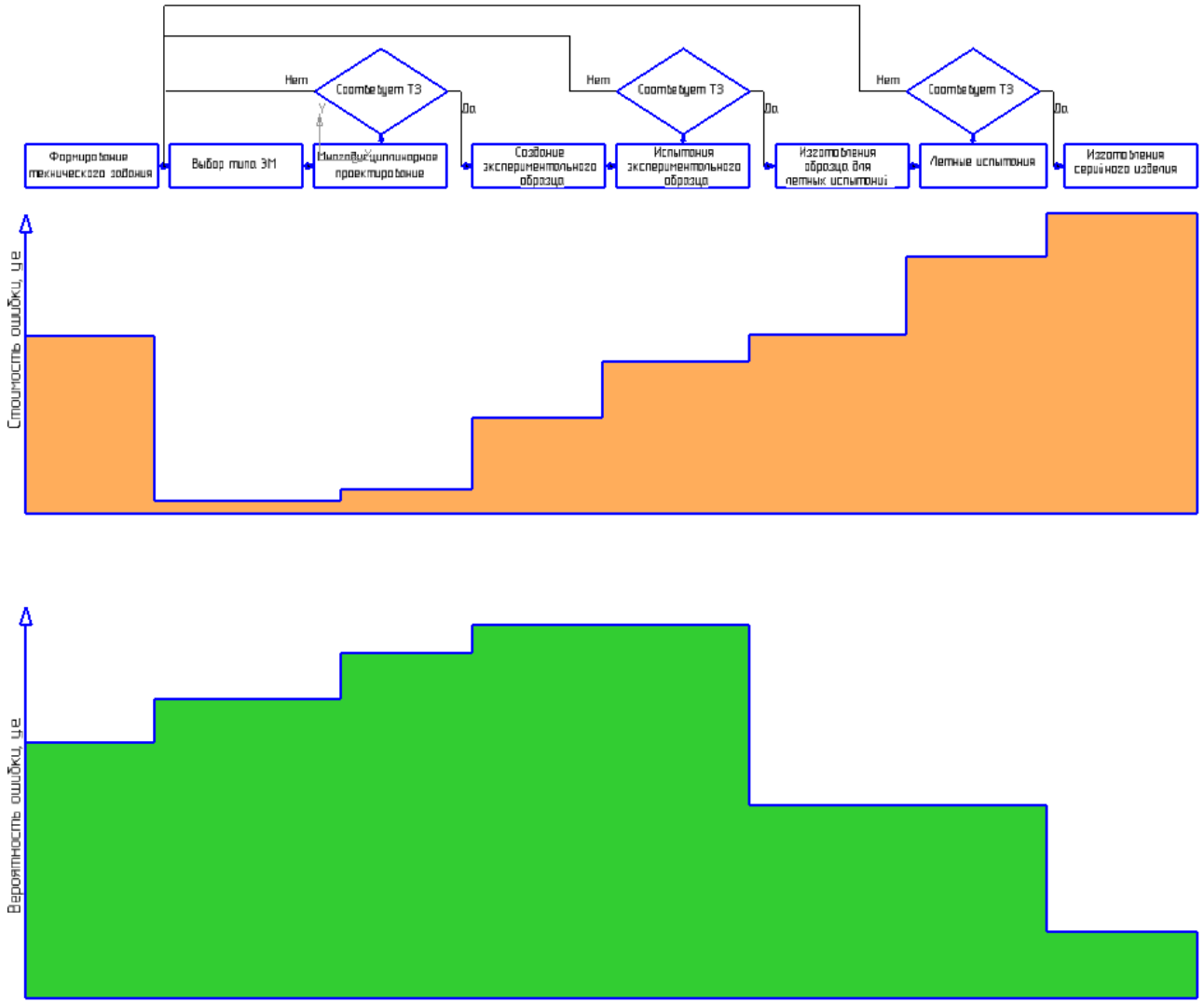

Рисунок 2–Процесс создания ЭМ для ЛА

При это соизмеряя вероятность ошибок и их стоимость, становиться очевидным, что наиболее критическими этапами являются этапы формирования ТЗ, многодисциплинарного моделирования, создания экспериментальных образцов и их испытаний.

Для эффективного управления процессов создания ЭМ рекомендуется применять основы теории FMEA. В данной работе, ввиду ограниченности объема, данные подходы не рассматриваются.

Важно отметить, что повышение плотности энергии ЭМ возможно несколькими путями, представленными на рисунке 1: это применение новых материалов, новых технологий, новых высокоточных расчётных методов (это позволит минимизировать коэффициенты запаса и тем самым повысить плотность энергии ЭМ) или благодаря использованию явления сверхпроводимости. Конструктивные схемы ЭМ на рисунке 1 не приведены, так как на данном этапе известные конструктивные схемы ЭМ изучены довольно глубоко, новые конструктивные схемы, которые приведены в различных современных публикациях являются в основном производными от известных. Электрические машины, основанные на явлениях сверхпроводимости в данной работе нами также не рассматриваются, в связи с тем, что по оценкам специалистов они являются далекой перспективой, а, следовательно, не соответствуют поставленным ограничениям максимально быстрого вывода на рынок.

Далее более детально анализируются данные шаги, на примере выполняемого нами проекта по создания ЭМ для ГСУ мощностью 400 кВт с частотой вращения ротора 12000 об/мин.

Шаг 1. Формирование технического задания. На данном этапе нашим заказчиком (ФГУП «ЦИАМ») были сформированы основные технические характеристики к создаваемой ЭМ. Технические характеристики и ограничения при проектировании представлены в таблице 1.

Необходимо отметить, что данный этап, хотя и имеет невысокую исследовательскую составляющую для создателей ЭМ, несет значительную

исследовательскую работу для создателей ГСУ и ЛА в целом. Временные затраты и риски на данном этапе не влияют напрямую на разработчиков ЭМ, но влияют на весь проект. Так как ограничения, указанные в техническом задании на ЭМ должны увязывать все системы ЛА и ГСУ в одно целое. Ошибка на данном этапе является причиной потери времени и может привести к невыполнению всего проекта. В условиях поставленных ограничений рынка, указанных выше, потери времени не допустимы. Поэтому, очевидно, что разработчик ЭМ на данном этапе должен очень плотно взаимодействовать с заказчиком работ.

Для минимизации ошибок на этапе формирования технического задания нашим исследовательским коллективом была разработана упрощенная имитационная модель ГСУ в программном комплексе AMESim. На рисунке 3 приведена структурная схема создаваемой ГСУ, на рисунке 4 модель, реализующая данную структурную схему. На разработанной модели были отработаны первоначальные параметры ГСУ, при совместной комплексной работе. Данные параметры легли в основу разработки технического задания на компоненты ГСУ. Необходимо отметить, что на этапе проектирования элементов каждый разработчик ГСУ создавал компьютерные модели компонентов и производились итерационные расчёты на обобщенной модели.

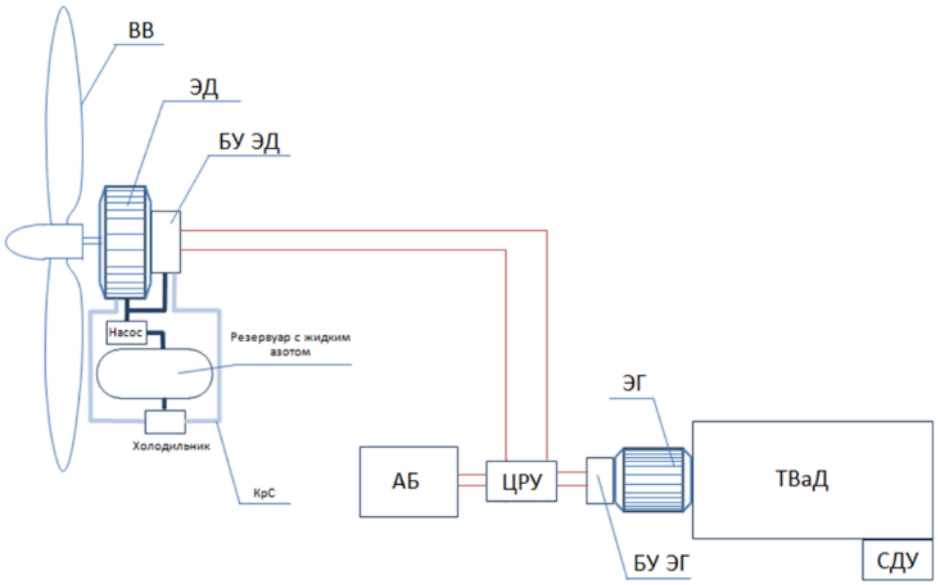

Рисунок 3 – Структурная схема демонстратора ГСУ
(ТВаД – турбовальный двигатель; СДУ – системы двигательной установки;

ЭГ – электрогенератор; БУ ЭГ – блок управления ЭГ; ЦРУ – центральное распределительное устройство; АБ – блок аккумуляторных батарей; ЭД – электродвигатель; БУ ЭД – блок управления ЭД; ВВ – воздушный винт).

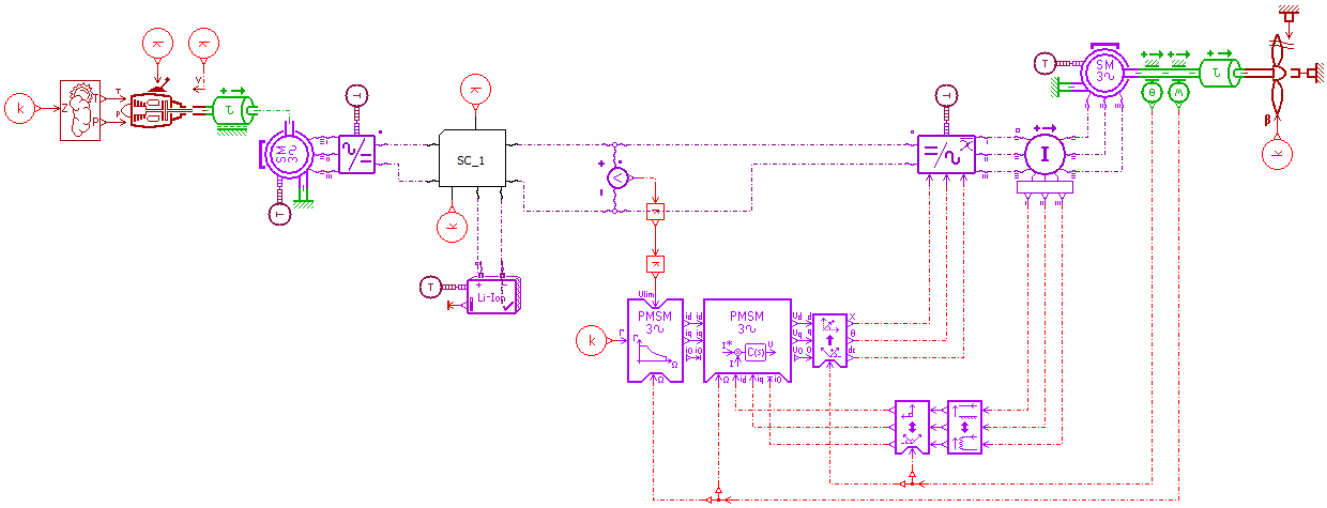

Рисунок 4 – Обобщенная имитационная модель ГСУ

Таблица 2. Исходные данные разрабатываемого генератора

Параметр	**Значение**
Мощность, кВт	400
Частота вращения, об/мин	12000
Тип нагрузки	Выпрямитель
Выпрямленное напряжение, В	800
Количество фаз	3
Удельная масса , кг/кВт	не более 0.25

Помимо данных требований, на создаваемый образец ЭМ были наложены требования к внешним воздействующим факторам, согласно КТ–160G.

Также на данном этапе, необходимо произвести анализ отказов элементов ГСУ и их последствий с целью определения критических элементов всей ГСУ и наложения на них требований по отказоустойчивости и надежности. В нашем проекте мы использовали методику, предложенную консорциумом организаций в рамках проекта HYPSTAIR. В данном проекте проводиться разработка летного демонстратора с ГСУ на базе 4-х местного легкого самолета Pipistrel Panthera. Среди других членов консорциума такие Siemens, Университет Марибора, Университет Пизы и MBVision.

Дерево отказов всей ГСУ здесь не приводиться ввиду ограниченности объема работы, но необходимо отметить, что данная операция также является одной из основных при формировании технического задания.

Шаг 2. Выбор типа электрической машины. Подходам к выбору типов ЭМ для ЛА посвящено множество работ [10–16]. Так, например, E. Ganev предлагает использовать метод ключевых преимуществ [10]. В работах [11, 12] предлагается на стадии проектирования ЭМ выбирать различные топологии исходя из их массогабаритных показателей, но при этом различные типы ЭМ не подвергаются оптимизации. В работе [13, 14] также выполняется выбор топологии ЭМ по массовым характеристикам, но уже с учетом того, что каждая топология подвергается отдельной оптимизации и сравниваются массогабаритные показатели оптимальных топологий. В [15, 16] выбор топологии ЭМ основан на трендах развития ЭМ и анализе созданных образцов ЭМ другими исследователями. То есть ЭМ выбирается исходя из предположения, что ЭМ с высококоэрцитивными постоянными магнитами (ВПМ) обладают минимальными массовыми характеристиками и поэтому рассматриваются только они. Также часто, определённый R&D центр имеет большую часть компетенций в области одного, какого–либо типа ЭМ и топология ЭМ выбирается исходя из имеющихся компетенций и опыта создания подобных ЭМ.

В условиях ограниченности времени на создание коммерческого продукта, а также с целью минимизации ошибки создания ЭМ с заданными характеристиками, наиболее рациональным видится именно подобный подход, основанный на компетенциях R&D центра, при условии достижения предлагаемого варианта ЭМ всем характеристикам, заданным в техническом задании.

Наш исследовательский коллектив обладает максимальными компетенциями в части создания ЭМ с постоянными магнитами, поэтому, после предварительных расчётов, нами была выбрана именно данная топология ЭМ для решения поставленной задачи.

II. Многодисциплинарное компьютерное моделирование ЭМ для ЛА с ГСУ на примере электрогенератора для ГСУ мощностью 400 кВт. После формирования технического задания и выбора типа ЭМ следующим этапом процесса создания ЭМ является формирование его конструктивной схемы и выполнение многодисциплинарного компьютерного моделирования.

Шаг 3. Многодисциплинарное компьютерное моделирование. На данном этапе формируются все основные технические решения, которые обеспечивают достижение заданных показателей ЭМ.

Так как основным требованием, предъявляемым к ЭМ для ГСУ ЛА является удельная мощность, то на этапе формирования конструктивного облика представляется целесообразным на основе аналитических методик определить первоначальный набор геометрических размеров ЭМ, с учетом требований технического задания и исходя из максимальной плотности энергии.

Для определения первоначального набора геометрических размеров ЭМ мы используем аналитическую методику, основанную на уравнении Арнольда [17]. Необходимо отметить, что при анализе плотности энергии масса ЭМ представляется в виде двух составляющих: массы активной части ЭМ и массы корпусных элементов, с учетом требований по внешним воздействующим факторам.

На основе технических требований и имеющегося опыты была сформирована конструктивная схема электрической машины, приведенная на рисунке 5.

Магнитопровод статора изготовлен из электротехнической стали 2421, с толщиной листа 0,18 мм. Количество полюсов ротора было выбрано исходя из условий минимизации потерь на вихревые токи в магнитопроводе статора и равнялось 8. Тип обмотки ЭМ - петлевая распределенная обмотка, с шагом 5. Критерий выбора обмотки - максимально возможные коэффициенты укорочения и распределения, а также минимальный вылет лобовой части.

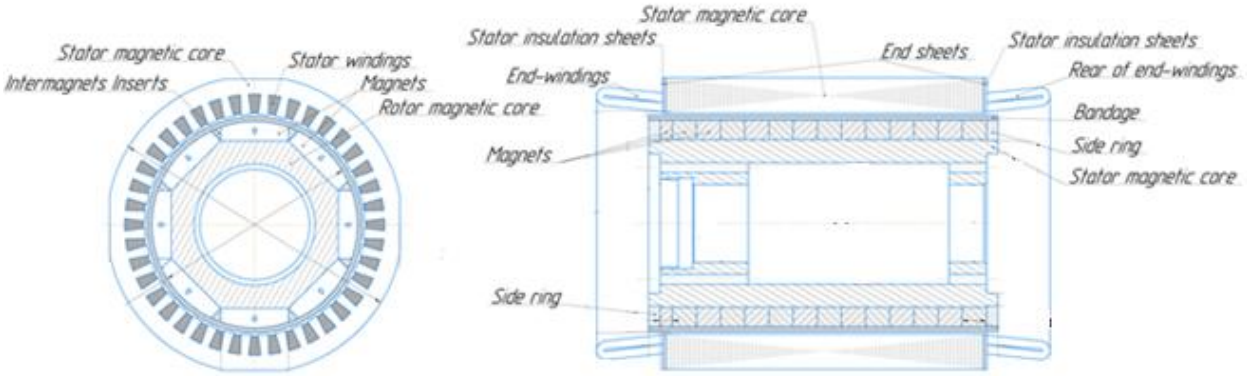

Рисунок 5– Эскиз конструктивной схемы ЭМ

Активная часть ротора состоит из постоянных магнитов имеющих трапецеидальную форму, магнитопровод ротора выполнен их стали 40Х. Материал ВПМ - S30M, максимальная рабочая температура 300 °С, Br=1,07 Тл, Hr=772 кА/м.

На внешний части с части ротора установлена бандажная оболочка с пределом прочности 1050 МПа. Толщина бандажной оболочки ротора принята 4 мм, исходя из механических расчётов, приведенных далее.

Во внутренней части статора расположен герметичный стакан, выполненный из стеклопластика, минимально возможная толщина, определенная в результате гидравлических расчётов, 1 мм, с учетом толщины бандажной оболочки и толщины герметичного стакана расстояние между ВПМ и расточкой статора составляет 6 мм.

В качестве хладагента для охлаждения статора мы используем масло с рабочей температурой 40 ºС. Тепловыделения ЭГ в масло ограничиваются на уровне 80–100 Ккал/мин. Это делается из–за того что масло после прохождения по ЭГ используется для смазки элементов теплового двигателя ГСУ, а дополнительный теплобменик для его охлаждения устанавливать нецелесообразно ввиду повышения массогабаритных показателей ГСУ. Для обеспечения надежного функционирования ЭГ провод ЭГ был выбран маслостойкий с полиамидной изоляцией (провод ПНЭТимид).

Поле формирования конструктивной схемы выполнятся многодисциплинарное проектирование ЭМ. Для выполнения данной задачи могут быть использованы алгоритмы, изложенные в работах [17–20]. Под многодисциплинарностью здесь понимается совместный анализ электромагнитных, тепловых и механических процессов в ЭМ. В таблице 2 приведены основные расчётные характеристики, полученные по результатам многодисциплинарного моделирования. Также в таблице 2 приведен теоретический расчёт создаваемого ЭМ при условии использовании в нем новейших материалов, свойства которых описаны нами в работе [21].

Таблица 2. Результаты электромагнитных расчетов ЭГ

Параметры	**Значение**	
	Созданный образец ЭМ с использованием традиционных технологий	Образец ЭМ с использованием новейших материалов и аддитивных технологий
Мощность на нагрузке, кВА	400	400
Частота вращения номинальная, об/мин	12 000	12000
Напряжение фазное/линейное, В	399/692	399/692
Выпрямленное напряжение	843,32	843,32
Частота перемагничивания, Гц	800	800
Ток фазы, А	388	410
КПД	0,97/0,98	0,95
Плотность тока основной обмотки, А/мм^2	14,13	16,73
Линейная нагрузка, А/м	61995,75	72157
Число пазов статора	48	48
Масса статора без обмотки, кг	29	17
Масса ротора (активная часть), кг	29,5	18
Масса обмотки статора, кг	7	2
Масса активной части ЭМ, кг	65,5	37
Масса корпусных изделий, кг	50,5	10
Полная масса ЭМ, кг	116	47

При выполнении задач многодисциплинарного компьютерного моделирования мы использовали взаимодействие программных комплексов Ansys Maxwell, Motor Cad, SolidWorks, Ansys Mechanical. В рамках многодисциплинарного моделирования были решены задачи определение

критических частот, прочности бандажной оболочки ротора, электромагнитных характеристик ЭМ и ее теплового состояния.

После проведения многодисциплинарного моделирования нами были уточнены параметры создаваемой ЭМ и проведено повторное функциональное моделирование на этапе 1. На этапе многодисциплинарного моделирования было доказано, что предлагаемая конструктивная схема ЭГ соответствует всем заданным в техническом задании характеристикам.

Анализируя процесс многодисциплинарного моделирования ЭМ можно выделить следующие проблемы, с которыми столкнулся наш исследовательский коллектив:

– погрешности теплового и электромагнитного моделирования ввиду зависимости тепловых, механических и электромагнитных процессов от множества технологических факторов и свойств материалов, которые практически невозможно учесть в компьютерной модели, они выявляются при создании экспериментальных образцов;

– проблемы, связанные с использованием новейших материалов при создании ЭМ, низкая доступность данных материалов и отсутствие их цифровых моделей;

– необходимость поиска компромисса между временем моделирования и точным учетом всех геометрических и технических особенностей ЭМ;

– необходимость множества расчетных итераций при моделировании для получения проектного облика ЭМ, который удовлетворял бы всем, заложенным в техническом задании требованиям.

Далее данные проблемы рассматриваются более детально и определяются возможные сценарии их решения с целью сокращения временных издержек и достижения заданных технических параметров.

Погрешности компьютерного моделирования, вносимые технологическими факторами. В таблице 3 мы привели некоторые технологические факторы, которые сложно учесть при компьютерном

моделировании и оценили степень их влияния на результаты многодисциплинарного моделирования.

Наиболее сложным фактором, который значительно влияет и на тепловые расчёты, и на характеристики ЭМ является коэффициент заполнения паза и плотность укладки обмотки. Задача создания компьютерных моделей ЭМ с учетом технологий, используемых на серийных конвейерах, решалась в ряде работ [22–25]. В основном данные работы были посвящены учету при проектировании и моделировании ЭМ автоматизированной технологии укладки обмотки. В работах [26–28] для учета изменения механических и электрических свойств меди при автоматизированной укладки обмотки. При этом, практически все данные работы, направленны на серийные ЭМ. ЭМ для ГСУ, с учетом задачи минимизации времени создания для выхода на рынок, как было отмечено выше, на стадии проектных работ, изготавливаются с использованием ручного труда, в частности обмотка укладывается вручную, и этот фактор практически невозможно учесть в компьютерной модели.

Для решения данной проблемы в работе [29] предполагается использование в качестве обмотки стержней. Это решение эффективно, только для ЭМ, у которых незначительная частота напряжения статора, и в которых влияние скин-эффекта незначительное.

Анализируя последние тренды в области электромашиностроения, мы пришли к выводу о том, что создание точных цифровых моделей ЭМ (в том числе экспериментальных образцов и единичных экземпляров серийных образцов) с учетом практически всех технологических особенностей может быть достигнуто благодаря использованию аддитивных технологий, которые в последнее время начинают находить широкое применение в электромашиностроение [30].

На данном этапе развития аддитивных технологий они используются для создания статоров ЭМ, обмоток ЭМ и постоянных магнитов [30]. При чем большинство компонентов ЭМ с помощью аддитивных технологий

изготавливаются отдельно. И лишь немногие исследовательские работы демонстрируют ЭМ, созданные с помощью аддитивных технологий.

Большинство исследователей отмечают, что использование аддитивных технологий позволит достичь минимизации массы ЭМ благодаря использованию многокомпонентных составов, таких как Co-Fe, Ni-Fe, нанокомпозитные магниты, металлы с пластиком.

Да, действительно использование в производстве ЭМ аддитивных технологий позволяет значительно повысить плотность их энергии [31–33]. Так, например, компанией Equipmake был разработан совместными усилиями с компанией Hieta, специализирующийся на 3D-печати различных элементов электродвигатель Ampere, способный выдавать до 295 лошадиных сил при массе 9,6 кг.

Использование аддитивных технологий в данной ЭМ позволило достичь нескольких преимуществ:

– материл ложиться только там, где он необходим, излишние металлические стенки отсутствуют;

– элементы системы охлаждения интегрированы с активной частью ЭМ, что позволяет значительно повысить эффективность охлаждения ЭМ и выполнить систему охлаждения как часть активных элементов.

Аналогичные преимущества от аддитивных технологий достигла компания HELV в разработанной ЭМ.

При этом явное преимущество, связанное с повышением точности многодисциплинарного проектирования ЭМ, которое могут обеспечить аддитивные технологии, другими исследователями не отмечалось. Хотя это может являться одним из решающих преимуществ для внедрения аддитивных технологий в производство ЭМ.

Очевидно, что создание 3D принтера способного обеспечить печать всей ЭМ с заведомо известными технологическими параметрами и особенностями разрешит проблему практически всех R&D центров в области создания ЭМ для ЛА ГСУ, ускорит процесс выхода на испытания данных образцов, а

позволит создавать точные цифровые компьютерные модели ЭМ, способные разрешить вопрос точного многодисциплинарного проектирования.

Таким образом, очевидно, что использование аддитивных технологий позволяет значительно повысить плотность энергии ЭМ как за счет технологических преимуществ, так и благодаря созданию высокоточных цифровых моделей ЭМ, которую в свою очередь обеспечат возможности по многокритериальной оптимизации массы и конструкции ЭМ. Кроме того, подобная интеграция цифрового моделирования с технологическим процессом создания образцов ЭМ позволит создавать цифровые двойники ЭМ для задач их диагностики и эксплуатации по остаточному ресурсу.

Для развития данного тренда, с целью повышения плотности энергии ЭМ для ЛА ГСУ, а также обеспечения высокоточного моделирования ЭМ, при минимальных временных затратах, представлялась бы целесообразным развитие кооперации разработчиков ЭМ с разработчиками 3D-принтеров, для создания 3D-принтеров способных печатать полностью образцы ЭМ.

При этом существует ряд сложно решаемых проблем при создании ЭМ, таких как:

- аддитивные технологии для производства ротора ЭМ пока сложно применимы. Это обусловлено сложностью обеспечения механической прочности ротора;

-обмотка, изготовленная с помощью аддитивных технологий, имеет пористые структуры, что обуславливает необходимость дополнительных исследований ее свойств;

-отсутствуют исследования, которые бы подтверждали эффективность постоянных магнитов, выполненных с помощью аддитивных технологий.

Очевидно, что данные проблемы требуют скорейшего решения для развития авиационных ЭМ.

Также очевидным преимуществом использования аддитивных является ускорение процесса внедрения технологий 4.0 в области создания ЭМ [34]. Это позволит повысить как ресурс ЭМ, так и их интеллектуальность [34].

Таблица 3. Влияние технологических параметров при изготовлении ЭМ на точность компьютерного моделирования

Технологический параметр	Тепловой расчёт	Электромагнитный расчёт	Механический расчет
Коэффициент заполнения паза, плотность намотки	Оказывает значительное влияние на результаты расчётов. Температура при различных коэффициентах заполнения и плотности намотки может разниться на 30–40 С	Практически не оказывает влияния	Практически не оказывает влияния
Шероховатость поверхностей, обработка поверхностей, посадка поверхностей	Оказывает значительное влияние на результаты расчётов. Так как посадка поверхностей значительно влияет на их коэффициенты теплопроводности, а шероховатости влияют на аэродинамические потери	Практически не оказывает влияния	Оказывает значительное влияние на механическую прочность бандажной оболочки
Обработка магнитопровода статора	Оказывает значительное влияние на результаты расчётов. Так как обработка магнитопровода влияет на потери в нем	Оказывает значительное влияние на результаты расчётов. Так как обработка магнитопровода влияет на потери в нем	Практически не оказывает влияния
Установка подшипниковых опор	Оказывает значительное влияние на результаты расчётов. Так как влияет на потери в подшипниковых узлах	Практически не оказывает влияния	Оказывает значительное влияние на результаты расчётов. Так как влияет на критические частоты ротора
Обеспечение соосности	Оказывает значительное влияние на результаты расчётов. Так как влияет на механические потери	Практически не оказывает влияния	Оказывает значительное влияние на результаты расчётов. Так как влияет на критические частоты ротора

Проблемы, связанные с использованием новейших материалов при создании ЭМ. Одним из основных путей повышения плотности энергии ЭМ является использование новых материалов (проводящих, магнитомягких, магнитотвердых). Перспективы развития материалов и их влияние на характеристики ЭМ исследовано в работах [21, 35–37].

В частности, в данных работах показано, что создание полностью композитных ЭМ может обеспечить снижение массы ЭМ практически в два раза при сохранении мощности. Применение новых магнитотвердых материалов обеспечит увеличение коэффициента полезного действия на 1–1,5 %. То есть развитие материалов, с учетом вышеуказанных перспектив применения аддитивных технологий, позволит, по нашим прогнозам, повысить удельную плотность, создаваемого нами ЭМ до 15 кВт/кг, результаты расчетов также приведены в таблице 2.

Расчёты ЭМ из новых материалов и технологий приведённые в таблице 2, выполнялись на основе описанной в разделе 3 многодисциплинарной компьютерной модели.

С помощью изменения свойств материалов в компьютерной модели были просчитан вариант ЭМ выполненный из композитных материалов с применением аддитивных технологий. Статор при расчетах рассматривался из Somalloy 700P, обмотка из CNT, охлаждение было сделано аналогично работе [38], бандаж выполнялся из композитных материалов с пределом прочности 2420 МПа, вал также был выполнен гибридным. Гибридный вал представляет собой комбинацию втулки из углеволокна и магнитопроводящих участков [39]. Геометрические размеры ЭМ оставались такими же как у ЭМ, выполненного из традиционных материалов. Однако у ЭМ из новых материалов, с применением новейших технологий был уменьшен внешний диаметр статора из–за отказа от внешних каналов охлаждения и трубу из стекловолокна. Охладительные трубки были размещены в пазах статора. При этом геометрические размеры статора остались неизменными, так как CNT позволяет выдерживать более высокие плотности тока. Подшипники у

исследуемых ЭМ оставались неизменными, использовались подшипники марки FAG с консистентной смазкой. Для смазки подшипников на испытательном стенде был организован дополнительный масляный канал.

Корпус ЭМ из традиционных материалов был выполнен из алюминия на токарном станке. Корпус ЭМ с использованием новых перспективных технологий был выполнен также из алюминия, но с использованием аддитивных технологий, что позволило минимизировать его геометрические размеры. Постоянные магниты в ЕМ из СМ рассматривались выполненными из металлического сплава SmCo и из PPM MQ1–12. При оценке ЕМ с постоянными магнитами из PPM MQ1–12 рассматривалась предложенная нами в [21] идея полностью композитного ротора со сборкой Хальбаха.

При этом, как и с аддитивными технологиями с использованием новых материалов существует ряд проблем, которые не позволяют их быстрое внедрение в создаваемые образцы ЭМ. В частности, к данным проблемам относятся:

– долгий цикл внедрения новых материалов в создание ЭМ. Это обусловлено тем, что новые материалы, получаемые в лабораториях, создаются в ограниченном количестве и предназначены только для исследовательских целей. Выход новых материалов на рынок, может составлять несколько лет. Например, подобную ситуацию можно наблюдать с проводами из углеродных нанотрубок. Первые упоминания к проводам из УНТ относятся в публикациях 2014, 2015 года [40, 41], но до настоящего времени они еще не нашли обширного применения в электромашиностроения. На практике известен только маломощный макет, разработанный группой профессора Пирхонена [40];

– отсутствие полных технических характеристик новых электротехнических материалов. Данная проблема ограничивает использование возможностей компьютерного моделирования ЭМ с применением новых материалов, снижает точность. Проблема заключается в том, что, например, при создании новых магнитомягких материалов

разработчики стремятся показать их электромагнитные свойств, но не приводят тепловые характеристики и т.д.

Проблемы необходимости поиска компромисса между временем моделирования и точным учетом всех геометрических и технических особенностей ЭМ и необходимости множества расчетных итераций при моделировании для получения проектного облика ЭМ, который удовлетворял бы всем, заложенным в техническом задании требованиям решаются благодаря применению методов оптимизации, которые изложены в работах [42-44].

В целом очевидно, что показанные проблемы, приводят к увеличению сроков проектирования ЭМ, снижению их технических характеристик и значительной расчетной погрешности. В конечном счете, указанные проблемы могут являться тормозящим элементом при создании коммерческих ЛА с ГСУ и поэтому научное сообщество и промышленность должны обратить особое внимание на указанные проблемные места.

III. Создание экспериментального образца и его испытания. После выполнения многодисциплинарных расчетов, мы перешли к созданию экспериментального образца ЭМ для ЛА с ГСУ.

Шаг 4. Создание экспериментального образца. Данный этап является одним из самых затратных с точки зрения времени и ресурсов. Вероятность ошибки, обусловленная проблемами, связанными с этапом многодисциплинарного проектирования, а также вероятность технологических ошибок на данном этапе, делают его одним из ответственных этапов во всей цепочке создания ЭМ в целом и ЭМ для ГСУ в частности.

Технологические ошибки на данном этапе обусловлены тем, что экспериментальные образцы ЭМ обычно создаются в исследовательских центрах, которые не имеют должных производственных компетенций, при создании экспериментальных образцов используются кооперации с другими предприятий, а также, зачастую отсутствует выходной контроль созданных образцов. Все эти проблемы обусловлены спецификой работы

исследовательских центров и экономической неэффективностью содержания ими собственных производственных участков.

Изготовление экспериментальных образцов у предприятий-заказчиков, также имеет определенные сложности, так требует написания технологического процесса, а кроме того, требует встраивания процесса создания образца в процесс серийного производства.

Одним из решений указанных проблем создание экспериментальных образцов было бы создание 3D-принтера способного обеспечить полную печать ЭМ и оснащение подобным оборудованием исследовательских центров. Очевидно, что это позволило свести к минимуму технологические ошибки и минимизировать погрешности компьютерных моделей, как было показано в предыдущем разделе.

При создании экспериментального образца ЭМ для ГСУ, создаваемого в рамках нашего проекта часть активных элементов ЭМ (ротор, корпусные изделия) изготавливались нами на партнерских предприятиях; статор и итоговая сборка ЭМ осуществлялась в ФГБОУ ВО «УГАТУ». При создании статора использовалась технология электроэрозионной резки листов с последующей склейкой. Суммарное время изготовления экспериментального образца составило 5 месяцев.

Также при изготовлении образца значительным коррективам подвергалась конструкция ротора ЭМ из-за отсутствия у предприятий партнёров ряда технологических возможностей, связанных с использованием композитных материалов.

Также в процессе сборки выполнялась доработка ряда узлов, изготавливаемых в ФГБОУ ВО «УГАТУ», ввиду невозможности предсказания ряда конструктивных элементов из–за неопределенности технологий. В частности, лобовые части из-за ручной намотки получились на 8 мм больше, нежели были рассчитаны на этапе компьютерного моделирования, что привело к необходимости увеличения корпуса.

Теоретические расчёты, проведенные нами, показали, что, если бы мы использовали аддитивные технологии с заведомо известными технологическими параметрами срок изготовления экспериментального образца составил бы не более 2,5-3 месяцев. При этом конструктивные изменения, вносимые нами и партнерскими организациями в процессе создания образца также бы отсутствовали.

На рисунке 6 приведен созданный нами экспериментальный образец ЭМ для ГСУ и блок его силовой электроники.

Рисунок 6–Экспериментальный образец ЭМ для ГСУ и блок его иловой электроники

Шаг 5. Испытания экспериментального образца. Основным этапом, заканчивающим процесс проектирования ЭМ являются стендовые испытания созданного образца и подтверждение его характеристик. Ошибки, связанные с выполнением самого этапа, маловероятны, но при этом на данном этапе выявляются все ошибки, которые были допущены на предыдущих этапах и не были выявлены ранее.

На данном этапе подтверждается правильность реализации процесса многодисциплинарного проектирования, правильность сборки ЭМ именно данный этап определяет необходимость возраста к предыдущим этапам. Поэтому данный этап создания ЭМ является критическим для всего рассматриваемого процесса.

На рисунке 7 показан опытный образец, созданной нами ЭМ на испытательном стенде.

Хотелось бы отметить, что само наличие испытательной базы также является критическим моментом, который определяет срок выполнения данного этапа. Это обусловлено тем, что не всегда у исследовательского центра имеется собственная испытательная с необходимыми параметрами и вопрос испытаний ЭМ должен начинать прорабатываться на первом этапе формирования ТЗ.

Рисунок 7– Опытный образец на испытательном стенде

Первоначальные испытания. Первоначальные испытания ЭМ осуществлялись на холостом ходу с целью проверки работоспособности созданного ЭМ на рабочих оборотах и выявления технологических ошибок сборки. После достижения рабочих частот вращения, созданный ЭМ проработал на холостом ходу 28 минут. После чего произошла аварийная ситуация, сопровождаемая появлением пламени на подшипниковом щите ЭМ, рисунок 8.

Стенд был оставлен, после чего была произведена разборка и дефектовка ЭМ. Результаты разбора ЭМ приведены на рисунке 9. Произведенный анализ показал, что в созданном ЭМ произошло межвитковое замыкание, которое возникло в результате технологической ошибки при укладке обмотки. При этом, из-за технологической ошибки статор созданной

ЭМ, как видно из рисунка 9 пришел в полную негодность. При этом ротор ЭМ остался целым.

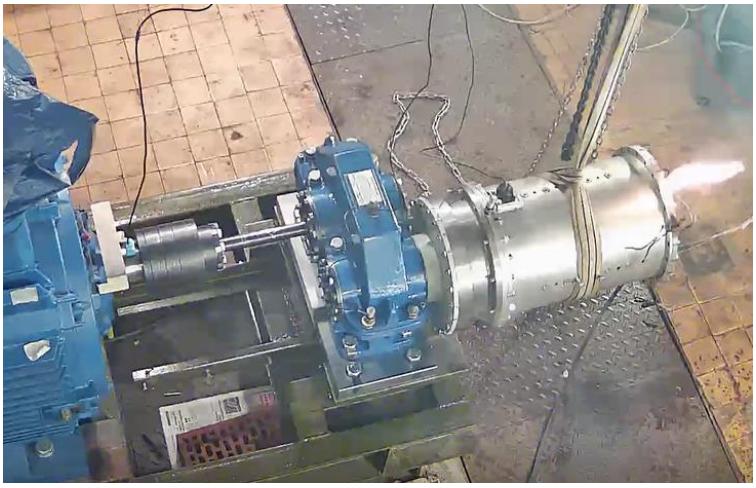

Рисунок 8–Аварийная ситуация, сопровождаемая появлением пламени на заднем щите ЭМ

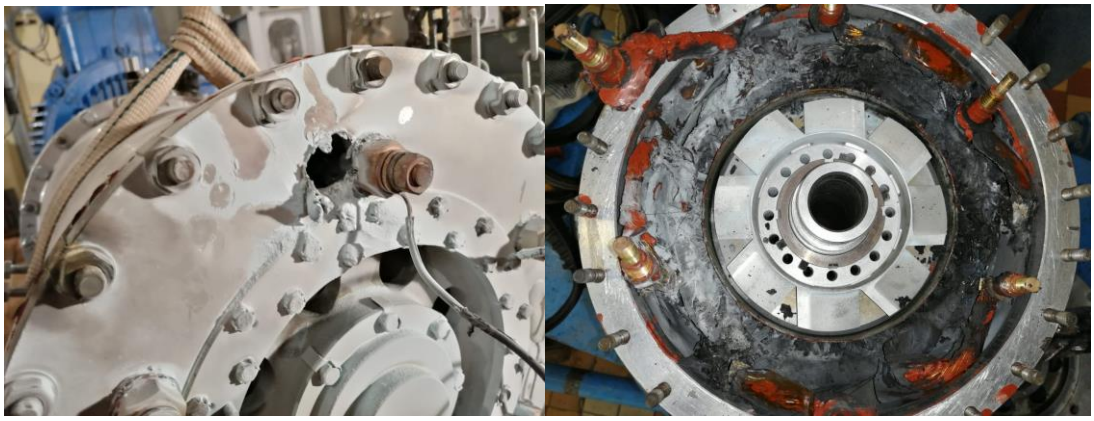

Рисунок 9–Разобранные элементы ЭМ после аварийной ситуации

На восстановление ЭМ для повторных испытаний, нами было потрачено около 3 недель.

Очевидно, что решением подобных проблем при создании ЭМ является введение полного контроля сборки экспериментальных образцов в исследовательских центрах, как на серийных предприятиях. Обычно, сборочный контроль в исследовательских центрах отсутствует.

Также путем решения проблем технологических ошибок могла являться автоматизация производства экспериментальных образцов и исключение человеческого фактора. А это возможно достигнуть, используя развитие аддитивных технологий, рассмотренных в предыдущих разделах работы.

Второй этап испытаний. После проведения повторной сборки образца ЭМ, с учетом полного контроля процесса укладки обмотки, были проведены повторные испытания. Изначально характеристики ЭМ оценивались без блока силовой электроники, ротор ЭМ был ступенчато был разогнан до 11760 об/мин, количество ступеней - 11, на каждой ступени ЭГ проработал не менее 10 минут. Хладагент ЭМ - трансформаторное масло.

На рисунке 10 показаны функции зависимости выпрямленного напряжения от частоты вращения ротора при работе без блока силовой электроники и сравнение данных результатов с расчетными данными. Анализ результатов расчётов и результатов эксперимента показывает, что расхождение расчетных данных и данных эксперимента составляет не более 8%.

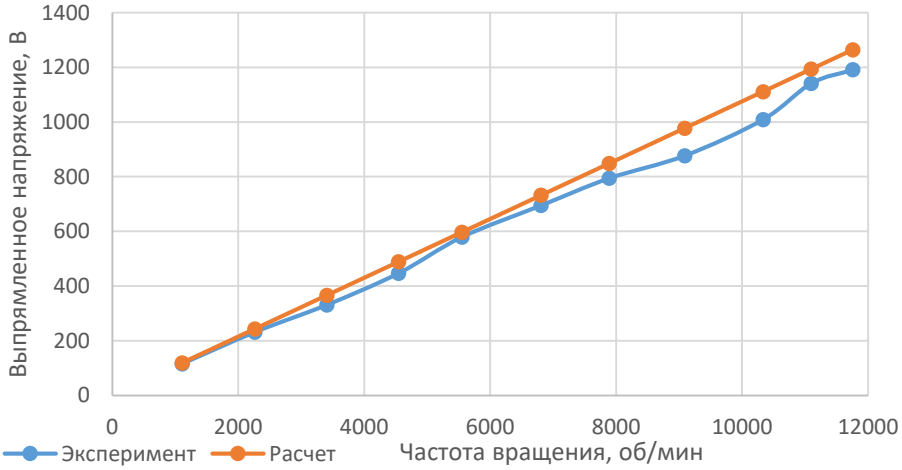

Рисунок 10– Функции зависимости выпрямленного напряжения от частоты вращения ротора в холостом режиме работы

Следующим этапом испытаний были экспериментальные исследования режимов работы ЭМ под нагрузкой совместно с блоками силовой электроники. Помещение при испытаниях было проветриваемое, нагрузка на ЭМ подавалась ступенчато.

Общее время испытаний (время, когда ротор находился во вращении) 1 час 50 минут. На момент окончания испытаний температура

магнитопровода статора не превышала 45 °С, обмоток не превышала 50 °С, вход хладагента в ЭМ составляло 39,7 °С, на выходе 40 °С.

Аналогичные испытания были проведены также на рабочих частотах вращения ЭГ (12000 об/мин) при нагрузке

На рисунке 11 показаны внешние расчетные и полученные экспериментально характеристики ЭГ (функции зависимости выпрямленного напряжения от времени).

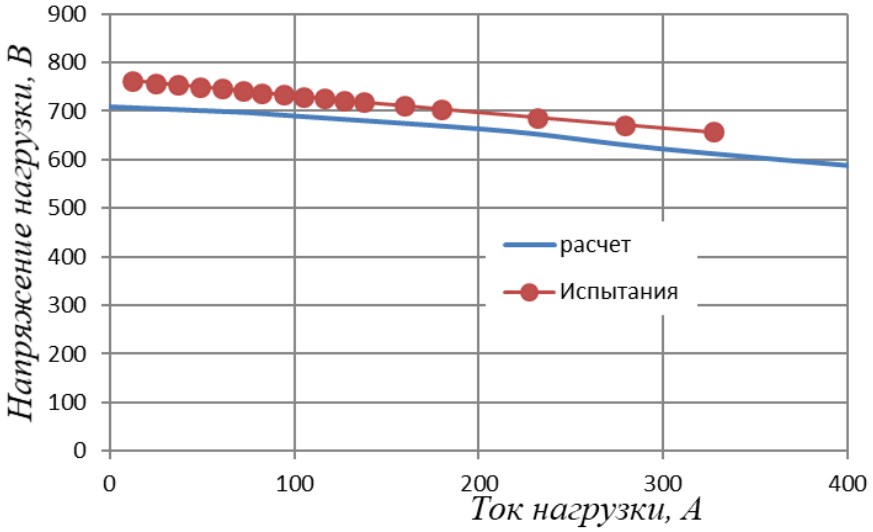

Рисунок 11– Внешняя характеристика ЭМ

Из рисунка 11 следует, что внешняя характеристика полученная экспериментально превышает по напряжению расчетную характеристику. Расхождение результатов многодисциплинарной модели и результатов испытаний составляет не более 10 %.

На рисунках 12, 13, 14 показаны осциллограммы линейного напряжения, фазного тока и выпрямленного напряжения от времени, для результатов расчета и экспериментальных данных.

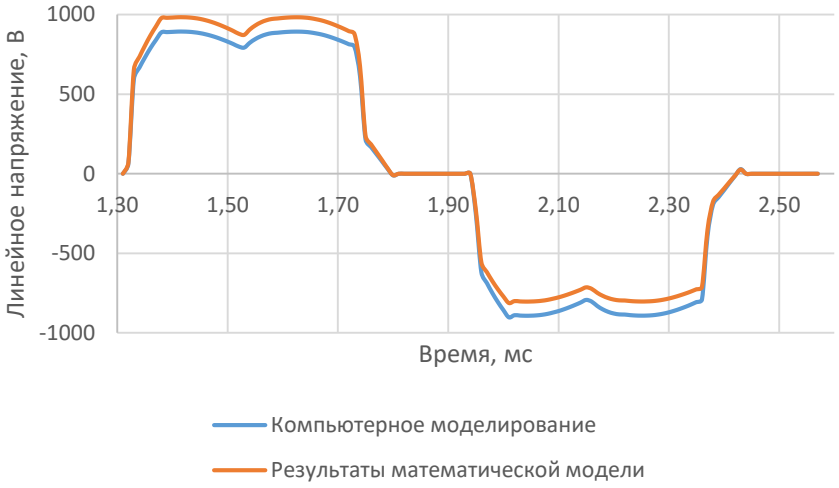

Рисунок 12– Осциллограмма линейного напряжения от времени

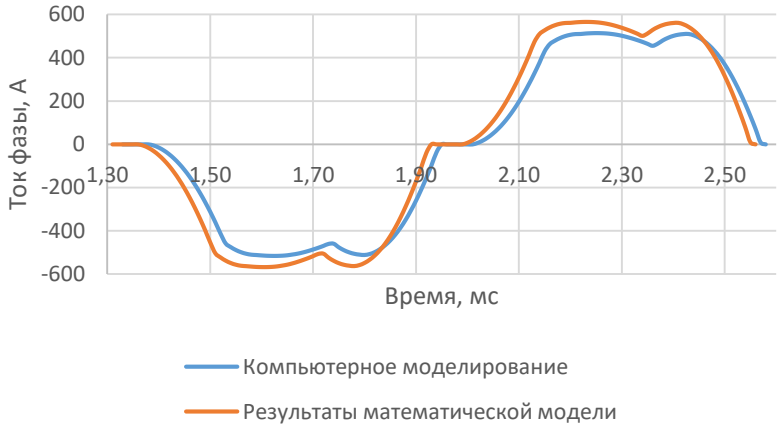

Рисунок 13– Осциллограмма фазного тока от времени

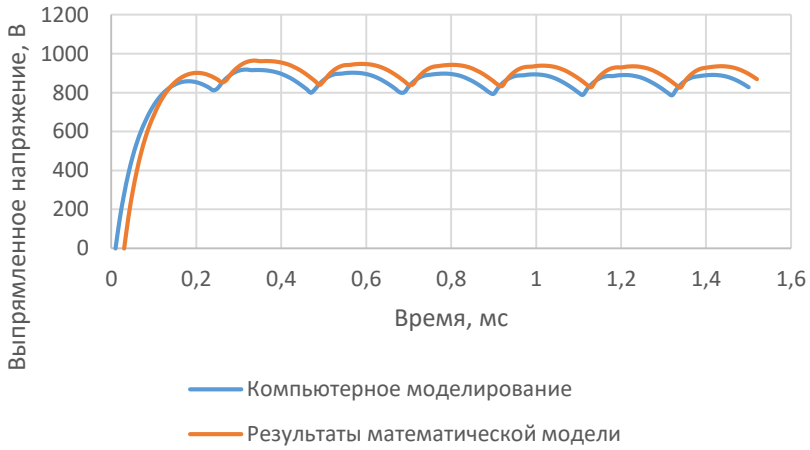

Рисунок 14– Осциллограмма выпрямленного напряжения от времени

Из рисунков 12, 13, 14 следует, что расхождение полученных экспериментальных результатов и результатов моделирования составляет не более 10 %.

Хотя подобное расхождение можно считать приемлемым [45-47] для исследовательского проекта, для проекта ЭМ с последующей установкой на борт, это величина не приемлемая и в целом созданный ЭМ не отвечает требованиям ТЗ по напряжению.

Поэтому на данном этапе нам пришлось вводить в многодисциплинарную модель корректирующие коэффициенты, дорабатывать обмоточные данные, созданной ЭМ. В итоге данная операция заняла еще 3 месяца.

После достижения ЭМ заданных характеристик, была проведена его примерка на летающую лабораторию ЯК-40, рисунок 15, рисунок 16.

Рисунок 15-Место установки созданного ЭМ на ЛА (слева) и место установки электроприводного винта (справа)

Рисунок 16-ЛА для испытаний созданного ЭМ

Летающая лаборатория, на которой планируется испытывать созданный ЭМ представляет собой ЛА с характеристиками, представленными в таблице 4.

Таблица 4. Характеристики ЛА с ГСУ

Грузоподъёмность	Грузоподъёмность: 3240 кг
Длина	Длина: 20,36 м
Размах крыла	Размах крыла: 25,0 м
Высота	Высота: 6,5 м
Площадь крыла	Площадь крыла: 70,0 м2
Масса пустого	Масса пустого: 9850 кг
Масса снаряжённого: 14265 кг	Масса снаряжённого: 14265 кг
Максимальная взлётная масса	Максимальная взлётная масса: 17200 кг
Силовая установка	2 турбореактивных двигателя АИ-25, один электродвигатель мощностью 500 кВт

Для испытаний на летающей лаборатории ЛА с ГСУ один из турбореактивных двигателей был заменен на двигатель ТВ2-117 с генератором мощностью 400 кВт, создание которого было описано в настоящем проекте. Два турбореактивных двигателя АИ-25 были сохранены, как резервные в случае отказа ГСУ на момент испытаний. Взлет данного ЛА запланирован на 2021 год.

Таким образом, как видно из представленных результатов допущенные ошибки при многодисциплинарном моделировании из-за невозможности учета технологических параметров и не достаточной точности многодисциплинарных моделей, а также ошибки, допущенные при сборке, могут привести к увеличению срока проекта на 8–12 месяцев, что в условиях поставленных ограничений скорости вывода на рынок новых летательных аппаратов с ГСУ недопустимо. При этом, весь срок проекта, с учетом установки на летающую лабораторию составил 3 года. Очевидно, что данный срок много меньше срока создания нового авиационного двигателя, что доказывает эффективность ЛА с ГСУ в сложившейся обстановке.

Также очевидно, что для ускорения процесса создания ЭМ и повышения точности моделирования, необходимо обеспечить учет технологических параметров и минимизацию технологических неопределенностей уже на этапе создания экспериментальных образцов.

Выводы. Проведённый анализ, показывает, что при создании ЭМ для ЛА с ГСУ существует ряд серьезных проблемных вопросов в процессе самого создания ЭМ, которые являются препятствием для системного создания ЭМ с высокой плотностью энергии в минимальные сроки. Эти препятствия свою очередь являются сдерживающим фактором создания экономичных, маломестных ЛА, которые требует авиационный рынок в связи с сложившейся ситуацией.

К таким проблемным вопросам относятся:

- невозможность создания точной цифровой модели ЭМ для ЛА с ГСУ из-за сложности учета технологических факторов. В особенности это касается создания экспериментальных и опытных образцов. Решением данного проблемного вопроса может быть развитие аддитивных технологий 3D печати в электромашиностроении;
- сложность выявления ошибок многодисциплинарного моделирования ЭМ и изготовления демонстрационных образцов до момента проведения стендовых испытаний;
- необходимость внедрения в процесс разработки ЭМ аддитивных технологий, способных разрешить предыдущие две проблемы. При этом аддитивные технологии позволят не только повысить плотность энергии ЭМ, но и точность цифровых моделей ЭМ, а также позволят перейти к технологии производства 4.0 в электромашиностроении;
- долгий цикл внедрения новых материалов в создание ЭМ. Это обусловлено тем, что новые материалы, получаемые в лабораториях, создаются в ограниченном количестве и предназначены только для исследовательских целей;

– отсутствие полных технических характеристик новых электротехнических материалов. Данная проблема ограничивает использование возможностей компьютерного моделирования ЭМ с применением новых материалов, снижает точность. Проблема заключается в том, что, например, при создании новых магнитомягких материалов разработчики стремятся показать их электромагнитные свойств, но не приводят тепловые характеристики и т.д.

Анализ процесса создания ЭМ для ЛА с ГСУ, позволяет сделать вывод, что решение всех указанных проблем, позволит практически в 2 раза сократить время проектирования ЭМ и минимизировать трудозатраты на исправление допущенных ошибок.

Дальнейшим направлением наших исследований будет являться оценка возможности виртуальных испытаний при создании ЭМ для ЛА с ГСУ, а также создание ЭМ с использованием аддитивных технологий и оценка их преимуществ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. http://www.archeryconsulting.fr/
2. S. Bhangu, K. Rajashekara, "Electric starter generators: Their integration into gas turbine engines", IEEE Ind. Appl. Mag., vol. 20, no. 2, pp. 14-22, Mar.–Apr. 2014.
3. Vincenzo Madonna ; Paolo Giangrande ; Michael Galea Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities // IEEE Transactions on Transportation Electrification, 2018, Vol. 4, Issue 3 ,
4. I. Moir, A. Seabridge, M. Jukes, "Electrical systems" in Civil Avionics Systems, New York, NY, USA:Wiley, pp. 235-290, 2013.
5. J. A. Rosero, J. A. Ortega, E. Aldabas, L. Romeral, "Moving towards a more electric aircraft", IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., vol. 22, no. 3, pp. 3-9, Mar. 2007.
6. www.aviationweek.com
7. R. Bojoi, A. Cavagnino, A. Tenconi, S. Vaschetto, "Control of shaft-line-embedded multiphase starter/generator for aero-engine", IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 1, pp. 641-652, Jan. 2016.
8. D. Gerling, M. Alnajjar, "Six-phase electrically excited synchronous generator for more electric aircraft", Proc. Int. Symp. Power Electron. Elect. Drives Automat. Motion, pp. 7-13, Jun. 2016.
9. J. B. Bartolo, M. Degano, J. Espina, C. Gerada, "Design and initial testing of a high-speed 45-kW switched reluctance drive for aerospace application", *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 64, no. 2, pp. 988-997, Feb. 2017.

10. E. Ganev, "High-performance electric drives for aerospace more electric architectures Part I – Electric machines", Proc. IEEE Power Eng. Soc. General Meeting, pp. 1-8, 2007.

11. D. Gerada, A. Mebarki, N.L. Brown, C. Gerada, A. Cavagnino, A. Boglietti, “High-Speed Electrical Machines: Technologies, Trends, and Developments,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 61, No. 6, pp.2946–2959, Jun. 2014

12. J.-P. Besnard, F. Biais, M. Martinez, "Electrical rotating machines and power electronics for new aircraft equipment systems", Proc. 25th Int. Congr. Aeronaut. Sci., pp. 1-9, Sep. 2006.

13. A. Nagorny, N. Dravid, R. Jansen, B. Kenny, "Design aspects of a high speed permanent magnet synchronous motor/generator for flywheel applications", Proc. IEEE Int. Conf. Elect. Mach. Drives, pp. 635-641, 2005.

14. J. F. Gieras, "High speed machines" in Advancements in Electric Machines (Power Systems), Berlin, Germany:Springer-Verlag, pp. 81-113, 2009.

15. C. Zwyssig, J. W. Kolar, S. D. Round, "Megaspeed drive systems: Pushing beyond 1 million r/min", IEEE/ASME Trans. Mechatronics, vol. 14, no. 5, pp. 564-574, 2009.

16. E. Ganev, "Selecting the best electric machines for electrical power generation systems", IEEE Electrific. Mag., vol. 2, no. 4, pp. 13-22, Dec. 2014.

17. N. Uzhegov, E. Kurvinen, J. Nerg, J. T. Sopanen and S. Shirinskii, “Multidisciplinary design process of a 6-slot 2-pole high-speed permanent-magnet synchronous machine,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 63, no. 2, pp. 784–795, Feb. 2016.

18. F. R. Ismagilov, N. Uzhegov, V. E. Vavilov, V. I. Bekuzin, V. V. Ayguzina, “Multidisciplinary design of ultra-high-speed electrical machines,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 33, no. 3, pp. 1203–1212, Feb. 2018.

19. N. Bernard, F. Martin, M. E. H. Zaim, “Design methodology of a permanent magnet synchronous machine for a screwdriver application,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 27, no. 3, pp. 624–633, 2012.

20. Hongwei Fang, Dan Wang, “A novel design method of permanent magnet synchronous generator from perspective of permanent magnet material saving,” IEEE Trans. Energy Convers., vol. 32, pp. 48–54, 2017.

21. Flur Ismagilov, Nikita Uzhegov, Vyacheslav Vavilov, Ildus Sayakhov Review of the Application of Composite Materials in Electrical Machines International Review of Electrical Engineering 15(1):31

22. A. Dobroschke, Flexible Automatisierungslösungen für die Fertigung wickeltechnischer Produkte. Zugl.: Erlangen-Nürnberg, Univ., Diss., 2011. Bamberg: Meisenbach, 2011.

23. J. Bönig, B. Bickel, M. Spahr, C. Fischer, and J. Franke, “Explicit dynamics process simulation of linear coil winding for electric drives production,” in Proceedings of 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 2014, pp. 1– 7.

24. J. Bönig, B. Bickel, M. Spahr, C. Fischer, and J. Franke, “Simulation of orthocyclic windings using the linear winding technique,” in Proceedings of 5th

International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 2015, pp. 1–6.

25. F. Sell-Le Blanc, E. Ruprecht, and J. Fleischer, “Material based process model for linear noncircular coil winding processes with large wire gauge: Investigation of wire material influences on the winding process and compensation approaches,” in Proceedings of 3rd International Electric Drives Production Conference (EDPC), Nuremberg, Germany, 2013, pp. 1–5.

26. F. Sell-Le Blanc, J. Fleischer, L. Li, and M. Krause, “Characterization of Process-Machine-Interaction for Coil Winding Processes using Multi Body Dynamics,” in Proceedings of 3rd CIRP Conference on Virtual Machining Process Technology (VMPT), Calgary, 2014, III.1..

27. J. Hofmann, A. Komodromos, J. Fleischer, and A. E. Tekkaya, “Optimization of the Linear Coil Winding Process by Combining New Actuator Principles on the Basis of Wire Forming Analysis,” in 2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC): Proceedings : 4 and 5 December 2018, Schweinfurt, Germany, Schweinfurt, Germany, 2018, pp. 1–6.

28. F. Sell-Le Blanc and J. Hagedorn, “Flexible Needle Winding Approaches for Distributed Stator Windings,” in Industrial Transcript of 6th International Electric Drives Production Conference.

29. P. Stenzel et al., “Needle winding for distributed round-wirewindings without the use of insulation disks,” in 4th International Electric Drives Production Conference (EDPC 2014): Sept. 30, 2014 - Oct. 1, 2014, Nuremberg, Germany ; [including] related conferences: E-Motive Forum of the German Machine Builders Association (VDMA), the Energy Transfer for Electric Vehicles Conference (E|TEV), Nuremberg, Germany, 2014, pp. 1–7.

30. Fan Wu, Ayman M. EL-Refaie, "Investigation of an Addtively-Manufactured Modular Permanent Magnet Machine for High Specific Power Design", Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE) 2019 IEEE, pp. 777-784, 2019.

31. E. M. Palmero D. Casaleiz, N.A. Jimenez, J. Rial, J. de Vicente, A. Nieto, R. Altimira, A. Bollero,, “Magnetic-Polymer Composites for Bonding and 3D Printing of Permanent Magnets,” IEEE Trans. Magn., pp. 1–4, 2018.

32. R. Domingo-Roca, J. C. Jackson, J. F. C. Windmill, “3D-printing polymer-based permanent magnets,” Mater. Des., vol. 153, pp. 120–128, Sep. 2018.

33. https://equipmake.co.uk/news/

34. A. Mayr et al., "Electric Motor Production 4.0 - Application Potentials of Industry 4.0 Technologies in the Manufacturing of Electric Motors", 2018 8th International Electric Drives Production Conference (EDPC), pp. 1-13, 2018.

35. A. Krings, A. Boglietti, A. Cavagnino, S. Sprague, “Soft Magnetic Material Status and Trends in Electric Machines,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 64, no. 3, pp. 2405-2414, Mar. 2017.

36. A. Schoppa, P. Delarbre, “Soft Magnetic Powder Composites and Potential Applications in Modern Electric Machines and Devices”, IEEE Trans. Magn., vol. 50, no. 4, pp. 1-4, Apr. 2014.

37. F. Ismagilov, W. Tong, V. Vavilov, D. Gusakov, V. Ayguzina, “High-speed Electrical Machine with Radial Magnetic Flux and Stator Core Made of Amorphous Magnetic Material. Technologies, Trends and Perspective of Development,” Progress In Electromagnetics Research C, vol. 86, pp. 69–82, Jan. 2018.

38. M. Schiefer, M. Doppelbauer, “Indirect slot cooling for high power density machines with concentrated winding,” in Proc. IEEE Int. Electric Machines and Drives Conf. (IEMDC), 2015, pp. 1820–1825

39. S. Koch, M. Peter, J. Fleischer, “Lightweight design and manufacturing of composites for high-performance electric motors,” in 1st CIRP Conf. on Composite Material Parts Manufacturing (CIRP-CCMPM), 2017, pp. 283–288

40. J. Pyrhönen, J. Montonen, P. Lindh, J. Vauterin, M. Otto, “Replacing copper with new carbon nanomaterials in electrical machine windings,” International Review of Electrical Engineering, vol. 10, no. 1, pp. 12-21, Feb. 2015.

41. A. Lekawa-Raus, J. Patmore, L. Kurzepa, J. Bulmer, K. Koziol, “Electrical properties of carbon nanotube based fibers and their future use in electrical wiring,” Advanced Functional Materials, vol. 24, no. 24, pp. 3661–3682, Mar. 2014.

42. G. Bramerdorfer, J. A. Tapia, J. J. Pyrhönen, A. Cavagnino, “Modern electrical machine design optimization: Techniques, trends, and best practices,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 10, pp. 7672–7684, Oct. 2018.

43. D. Golovanov, L. Papini, D. Gerada, Z. Xu, C.Gerada, “Multidomain optimization of high-power-density PM electrical machines for system architecture selection,” IEEE Trans. Ind. Electron., vol. 65, no. 7, pp. 5302–5312, July 2018.

44. H. Wang, Q. Geng, Z. Qiao, “Parameter tuning of particle swarm optimization by using Taguchi method and its application to motor design,” in IEEE Int. Conf. Inf. Sci. Technol., 722726, 2014.

45. J. R. Bart, B. A. Beutin, P. C. G. Morel, "Twin spool turbine engine with power take-off means on the low-pressure and high-pressure rotors and power take-off module for the turbine engine", Jun. 2009.

46. Eid, H. El-Kishky, M. Abdel-Salam, M. T. El-Mohandes, "On power quality of variable-speed constant-frequency aircraft electric power systems", IEEE Trans. Power Del., vol. 25, no. 1, pp. 55-65, Jan. 2010.

47. J. A. Weimer, "The role of electric machines and drives in the more electric aircraft", Proc. IEEE Int. Electr. Mach. Drives Conf. (IEMDC), vol. 1, pp. 11-15, Jun. 2003.