МИНИСТЕРСТВО ТРАНСПОРТА РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

(МИНТРАНС РОССИИ)

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ВОЗДУШНОГО ТРАНСПОРТА

(РОСАВИАЦИЯ)

ФГОУ ВО «САНКТ-ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ

УНИВЕРСИТЕТ ГРАЖДАНСКОЙ АВИАЦИИ»

**Научно-исследовательская работа**

По дисциплине «Электротехника и электроника»

На тему «Авиационное электротехническое оборудование:

от истоков создания к перспективам развития»

Выполнила:

Студентка 2 курса, учебной группы №107

Васюнина Анна

Преподаватель:

Лучников Игорь Владимирович

Санкт-Петербург

2022

Оглавление

[Введение 3](#_Toc100268701)

[1. История развития авиационного электрооборудования 4](#_Toc100268702)

[2. Классификация авиационного электрооборудования 7](#_Toc100268703)

[3. Требования к авиационному электрооборудованию 10](#_Toc100268704)

[4. Специальные и дополнительные требования к системам электроснабжения 12](#_Toc100268705)

[5. Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования 13](#_Toc100268706)

[Заключение 16](#_Toc100268707)

[Литература 17](#_Toc100268708)

# Введение

В современных условиях авиация является неотъемлемой частью человеческой жизни. По мере появления новых современных типов летательных аппаратов, изменения их технических требований менялся квалитативный и квантитативный состав систем авиационного электрооборудования, совершенствовались его характеристики.

**Актуальность работы:** в настоящее время нет такой области техники, где бы не применялось электричество. Это обусловлено преимуществами электрической энергии перед другими ее видами. Среди всех способов преобразования первичной механической энергии в электрическую, трансформация с помощью электрических машин реализуется с наибольшей эффективностью. При этом электроэнергия постоянного и переменного тока может быть получена в достаточно большом диапазоне мощностей и напряжений. Это обстоятельство предопределило широкое применение электрогенераторов в качестве бортовых источников электроэнергии на летательных аппаратах различного назначения. Следовательно, совершенствование авиационного электрооборудования наглядно определяет тесную взаимосвязь научно-технических проблем с социальными, экономическими, экологическими другими задачами современного общества.

Таким образом, электроэнергия является одним из основных видов энергии, используемой на борту летательных аппаратов. Потребителями электрической энергии являются практически все виды авиационного оборудования. Развитие системы электрооборудования происходило одновременно с развитием самой авиации.

Объем электрооборудования зависит от многих факторов. Важнейшие из них: назначение самолета; его величина; скорость, дальность и высота полета; тип авиадвигателя.

При помощи электрической энергии осуществляется запуск авиадвигателей; работа многочисленных механизмов, приборов, аппаратов и радиоустройств; обогрев и сигнализация; обеспечение жизнедеятельности человека на больших высотах.

Термин «авиационное оборудование» на современных летательных аппаратах объединяет большое количество разнообразных бортовых систем и комплексов. К ним относятся системы электроснабжения и системы электрооборудования планера и двигателя, внутренние и внешние светотехнические устройства, системы автоматического управления полетом, навигационные системы и пилотажно-навигационные комплексы, системы приборного оборудования, системы обеспечения жизнедеятельности экипажа, оптико-электронные системы и ряд других систем.

**Цель работы:** исследование создания и совершенствования авиационного электротехнического оборудования, тенденций перспективной системы электроснабжения летательных аппаратов.

Исходя из поставленной цели, необходимо решить следующие **задачи**:

̶ оценить масштабы применения электрической энергии в авиационной отрасли.

̶ провести анализ этапов развития авиационной электротехники и рассмотреть предпосылки для ее совершенствования.

̶ исследовать тенденции и перспективы развития авиационной электротехники.  
**Объект исследования** – авиационное электротехническое оборудование.  
**Предмет исследования** – текущее состояние, динамика, проблемы и перспективы развития авиационной электротехники.

# История развития авиационного электрооборудования

История авиационного электрооборудования может быть разделена на отдельные периоды.

Начальный (1869-1910 гг.) – это этап реализации первых замыслов и применения электроэнергии в энергетике авиации до начала практического использования его на воздушных судах. Первый концепт авиационного электрооборудования был разработан в 1869г. выдающимся русским электротехником А. Н. Лодыгиным. На его вертолете («электролете») предполагался комплекс двигателей и электрооборудования, включавший аккумулятор и созданной изобретателем лампы накаливания. Электроэнергия подавалась от аккумуляторов, гальванических батарей или поступала с земли по проводам. Тогда же были сконструированы некоторые малогабаритные и легкие виды электрооборудования, а именно - светильники и прожекторы. В прожекторах нашел свое применение легкий металл - алюминий.

Следующий период (1910-1930 гг.) – создание и развитие авиационного электрооборудования. На первых самолетах источником электроэнергии являлся аккумулятор, который служил для зажигания горючей смеси в авиадвигателях и для освещения техники. Затем на отдельных бортах появились генераторы. Так, в 1912г. для освещения, обогрева и радиосвязи на бомбардировщике «Илья Муромец» был установлен разработанный под контролем В. П. Вологдина генератор переменного тока (1000 Гц, 2 кВА). С 1919 года в авиации стали применять постоянное напряжение тока 8В, а с 1923г. - 12В. Генераторы вращались от ветрянки - собственного воздушного винта, насаженного на его вал. С 1926 г. от ветрянок стали переходить на привод от авиадвигателя. К данному периоду относится появление авиационных электрических приборов - стартеров, новых типов магнето, самолетных фар и светильников.

Очередной период (1930-1945 гг.) характерен стремительным потенциальным подъемом в процессе создания авиационного электрооборудования, определенно быстрым совершенствованием поршневой авиации. С увеличением нагрузки бортовой сети ее напряжение с 1933 года было повышено до 24 В.

В 1935-1937гг. на заводе имени «Пенсе» под управлением А.К. Голдобенкова были созданы первые образцы авиационных генераторов постоянного тока напряжением 27 В, мощностью 350, 500 и 1000 Вт и к ним вибрационные регуляторы напряжения.

В 1936 г. впервые при полетах на некоторых бомбардировщиках типа СБ была испытана однопроводная система электроснабжения. Уже с1938 г. она была принята в США, а в середине 40-х годов на воздушных бортах других стран.

Важным историческим моментом в формировании самолетного электроснабжения стал 1939г. На бомбардировщике Пе-2 впервые в авиации применили электропривод, что привело к повышению использования электроэнергии на самолетах. В 1943г. в широкое распространение получили угольные регуляторы напряжения. А в 1944г. начинают использоваться новые провода (типа БПВЛ) с хлорвиниловой изоляцией. К 1945г. для авиационного производства была разработана серия генераторов типа ГСР мощностью до 9 кВт, высотностью до 15-18 км с охлаждением путем продува.

В то время в инженерно-авиационном отделе еще не имелось инженеров по авиационному оборудованию, хотя механики и техники по данной специальности уже были. Все эти установки и устройства, включая радиотехнические комплексы, объединялись термином «спецобрудование».

В 1938 году ответной реакцией на развитие авиаоборудования явилось создание и внесение в реестр должности инженера авиационного полка по спецоборудованию в подчинении к которому были введены: техник по приборам, радиотехник, радиомеханик и техник по электрооборудованию.

С 1923 года началось обучение инженеров данного профиля для научно-исследовательских институтов и учебных заведений на кафедрах «Электротехника» и «Радиотехника» в ВВИА имени проф. Н.Е. Жуковского.

В начале 1941 года в ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского был создан факультет электроспецоборудования, который уже в конце 1941 года получил первый поток выпускников за счет переподготовки инженеров, окончивших гражданские ВУЗы; подобный факультет был создан в Ленинградской ВВИА им. А.Ф. Можайского (ныне Военная инженерно-космическая академия им. А.Ф. Можайского г. Санкт-Петербург).

Дальнейшее развитие (1946-1959 гг.) авиационной электротехники связано с практическим применением реактивных самолетов, что незамедлительно повлияло на электрооборудование авиадвигателей: стали ненужными магнето и непригодными для применения электроинерционные стартеры. Появились новые стартеры и стартер-генераторы с автоматическим управлением. Однако тяжелые самолеты продолжают выпускаться поршневыми двигателями. К таким образцам относились Ту-4 (1947 г.), для которых были созданы новые системы электроснабжения и электропривода, электрические механизмы и осветительные устройства. В дальнейшем эти комплексы получили широкое применение на других самолетах.

В 1956г. впервые в мире был сконструирован пассажирский реактивный самолет - Ту-104. Для старта его авиадвигателей был применен турбостартер, что коренным образом изменило электрическую часть системы запуска. С широким распространением тяжелых самолетов подобного типа росла и мощность их электросистемы. Стала ясной перспектива нового увеличения напряжения авиационной электросети. Для этого наиболее выгодной оказалась система трехфазного тока. Как следствие - разработаны самолетные системы 208/120В трехфазного тока и щеточные генераторы (типов СГС и СГО), работавшие на нефиксированной частоте. В середине 50-х годов появились надежные силовые кремниевые выпрямители, на базе которых началось производство бесщеточных генераторов переменного тока и статических преобразователей. По этому принципу к концу 50-х годов начинается выпуск серии агрегатов системы электроснабжения трехфазного тока 208/120В фиксированной частоты.

Таким образом уже в конце данного периода была разработана принципиально новая техническая база систем авиационного электрооборудования, основанная на полупроводниковой электронике.

Современный этап развития (примерно с 1960 года) связан с ростом производства реактивных самолетов, повышенной скоростью, дальностью и высотой полета, что отразилось и на увеличении мощности электросистемы. В дальнейшем это привело к полной перестройке систем электроснабжения, начавшейся с тяжелых воздушных судов. Для них в качестве стандарта был принят переменный трехфазный ток 208/120В постоянной частоты, разработаны принципиально новые бесконтактные генераторы трехфазного тока (серии ГТ), ППС и статические преобразователи рода тока. На самолете Ил-62 была реализована такая инновационная система электроснабжения, а затем применена и на других бортах (С. В. Ильюшина, А. Н. Туполева, П. О. Сухого).

На легких и средних судах сохранились электрические системы постоянного тока со щеточными генераторами и преобразователями. Но уже к началу семидесятых годов дальнейшее совершенствование щеточных генераторов постоянного тока стало технически невозможным. На смену им пришли бесконтактные генераторы (серии ГСБК) с бесконтактной системой управления. Они оказались более быстрыми, чем контактные, и получили большую мощность на единицу массы, продолжалось дальнейшее совершенствование систем постоянного тока, базирующееся на новой технической базе источников электроэнергии. В ходе рассматриваемого периода развития были изобретены новые герметичные коммутационные и защитные аппараты; электромеханизмы переменного тока; осветительные и светосигнальные устройства, система красного света в кабинах и маяках.

Таким образом, произошла квалитативная реконструкция авиационного электрооборудования, определившая направление его развития на последующие годы.

Важное значение в теоретической концепции конструкторских решений и разработке идей модернизации авиационного электрооборудования имели А. И. Бертинов, Д. Э. Брускин, М. М. Красношапка, Н. Т. Коробан, А. Н. Ларионов, В. Т. Морозовский, В. Д. Нагорский, К. Д. Рунов, И. М. Синдеев.

# Классификация авиационного электрооборудования

Классификация элементов электрооборудования осуществляется по следующим критериям:

- функциональный: по функциям электрооборудование летательных аппаратов подразделяют на агрегаты и системы. Агрегаты – это изделия, выполняющие конкретную задачу. Система же является комплексом агрегатов, электрически связанных между собой определенной связью и взаимодействующих в рамках выполнения единой цели.

- энергетический: весь комплекс авиационного электрооборудования подразделяется на две группы: потребители (или приемники) электроэнергии и система электроснабжения. Система электроснабжения летательного аппарата представляет собой сумму систем для выработки (или преобразования) и перераспределения электроэнергии. В такой системе имеется две части: первичная и вторичная.

Первичная система электроснабжения может быть основной и вспомогательной. Отличия: генераторы главной системы вращаются от маршевого двигателя самолета или от несущего винта вертолета; вспомогательная (резервная) система дополняет или заменяет основную при снижении, рулении или стоянке воздушного судна, те есть, когда его маршевые двигатели работают на малых оборотах или остановлены. Вспомогательная система питается от аккумуляторной батареи или автономной вспомогательной силовой установки (ВСУ).

Вторичная система электроснабжения представляет собой комплекс, питаемый преобразовательными устройствами от первичной системы. Соответственно в этих двух системах различают и источники электроэнергии: первичные (генераторы, батареи) и вторичные (инверторы, выпрямители, трансформаторы). Первичная система состоит из устройств генерации и распределения. К первым из них относятся источники электроэнергии и аппаратура управления, обеспечивающая автоматическую работу. В систему вторичного преобразования входят преобразователи и аппаратура их автоматического управления. Обе системы — первичная и вторичная — имеют установки распределения электроэнергии, состоящие из распределительных устройств (РУ) и сети, образованной проводами и сетевым оборудованием.

Существует три режима работы системы авиационного электроснабжения:

1) Обычный, при котором компоненты системы функционируют нормально, обеспечивая бесперебойное питание всех потребителей;

2) Нештатный, который возникает неожиданно при потере или ухудшении управления системой, - это временное, случайное явление, возникающее из-за выхода из строя элемента системы. Такой режим может быть кратковременным (например, сработала защита), после чего система возвращается к обычной, нормальной работе, или долговременным (система переходит в аварийный режим);

3) Аварийный, при котором система во время полета не выдает необходимой мощности или не обеспечивает нужного качества электроэнергии для потребителей. В этом случае потребители переключаются на остальные исправные системы или на аварийный комплекс - аварийную систему электроснабжения, питаемую от специальных аварийных источников электроэнергии: аккумуляторных батарей, преобразователей, генераторов собственных силовых установок (ВСУ).

Все электроустановки на летательных аппаратах в зависимости от характера их работы и взаимосвязи делят на источники и потребители электрической энергии, бортовую (электрическую) сеть и систему электрозажигания.

Источниками электроэнергии в авиации являются генераторы, преобразующие механическую работу вращения основного двигателя в электрическую энергию. Они представляют собой основной источник электроэнергии в самолете. Мощность отдельных генераторов и их количество зависят от типа самолета. Отдельный ряд авиационных генераторов СТГ используется также для раскрутки вала ТРД при запуске (поэтому такие генераторы называются стартер-генераторами).

Генераторы постоянного тока самолета допускают полуторакратную перегрузку в течение одной – двух минут и двукратную перегрузку в течение 10 секунд с перерывом в 1 час. Они рассчитаны на нормальное функционирование при температуре окружающего воздуха до +60°С и относительной влажности 98%. К авиационным генераторам постоянного тока предъявляются особые требования: максимальная надежность, высокая прочность, минимальные масса и габариты. Для достижения максимальной надежности и высокой прочности используют термостойкие изоляционные материалы, такие как стеклослюда, эпоксидный компаунд. Для сохранения магнитных свойств генератора при высоких температурах применяются специальные термомагнитные материалы. Для уменьшения веса и габаритов генераторов увеличивают их рабочие частоты вращения, которые составляют от 4000 до 9000 об/мин. При работе на земле поверхность пластин коллектора генератора покрывается тончайшей пленкой, состоящей из двух слоев: оксида меди и графита (полира), являющегося естественным смазывающим слоем между щеткой и коллектором. На высоте воздух разряжен, а здесь из-за низкого содержания кислорода и влаги такой слой не образуется. Для предотвращения чрезмерного износа щеток на большой высоте между щеткой и коллектором создается искусственный смазочный слой. Для этого щетки, используемые в авиационных генераторах, пропитывают веществами, создающими смазывающий слой.

Аккумуляторы, подключенные параллельно системе, используются как аварийный источник энергии при неработающем основном двигателе, а также как дополнительный источник энергии в периоды, когда от системы требуется большая мощность, чем мощность генератора. В основном применяются свинцово-кислотные аккумуляторы, допускающие высокие токи разряда (стартерный режим), что очень важно для пусковых электромеханизмов.

Распределение электрической энергии между потребителями реализуется через электросеть, состоящую из проводов, аппаратуры защиты и управления, сетевых вилок, а также коммутационных и распределительных устройств. Электроприводы преобразуют электроэнергию для разнообразных целей. Обычно такое преобразование осуществляется с помощью различных электродвигателей, передающих энергию исполнительным приборам через механические преобразователи движения. В соответствии с типом двигателя, преобразующего электрическую энергию в механическую, различают электродвигательный и электромагнитный приводы. Электромагнитный привод применяется главным образом в тех случаях, когда механизм имеет малый ход или требует малого угла поворота, без преодоления больших сил.

Применяемая электрическая энергия различается по роду тока, напряжению и частоте, поэтому электросистемы делятся на системы постоянного, переменного и смешанного тока.

В системах постоянного тока электроэнергия вырабатывается и распределяется преимущественно на постоянном токе, и только часть потребителей питается переменным током от преобразователей. В данных системах, когда несколько генераторов приводятся в действие авиационными двигателями, легко решается задача их параллельной работы; электродвигатели имеют большой пусковой момент, хорошие характеристики позволяют легко и широко регулировать скорость. В то же время преобразователи постоянного тока в такой системе тяжелые и ненадежные, коммутационные устройства сложны, высоки радиопомехи. При передаче электроэнергии большой мощности и низкого напряжения масса проводов и оборудования значительно увеличивается. На больших высотах двигатели и генераторы постоянного тока могут искрить, поэтому коллекторы и щетки быстро приходят в негодность. В связи с этим в последние годы наметился курс на перевод мощности с постоянного тока на переменный: к таким системам, в которых выработка и распределение электрической энергии осуществляется в основном на переменном токе, и лишь некоторые потребители запитываются постоянным током от выпрямителей. Следует отметить, что системы переменного тока облегчают преобразование электрической энергии из одного напряжения в другое.

Электрические системы, в которых производство и распределение электрической энергии осуществляется как на постоянном, так и на переменном токе, называются смешанными.

В настоящее время на отечественных самолетах установлен следующий стандарт напряжения:

а) Для систем постоянного тока - 27, 28В. На некоторых тяжелых самолетах принято стандартное напряжение 110 и 220В; для специальных целей (в радиоустановках) применяют постоянный ток напряжением 250, 750, 1100 и 2500В;

б) Для систем переменного тока - 26, 36, 115В. для однофазного тока и 208/120В. для трехфазного тока (на некоторых самолетах - 200/115В). Для индивидуальных установок применяют напряжения 5000, 10000 и 20000В.

Стандартная частота переменного тока составляет 400 Гц, и лишь в некоторых случаях используются частоты 125, 500 и 800 Гц.

Электрическая сеть летательного аппарата совершается по однопроводной, двухпроводной и смешанной схемам.

При однопроводной схеме от массы самолета изолирован только один (плюсовой) провод - второй (минусовой) провод представляет собой металлический корпус самолета. При такой схеме электроснабжения источник и все потребители должны быть подключены к корпусу летательного аппарата, а электроэнергия к каждому потребителю подводится по плюсовому проводу.

В двухпроводной сети каждый источник и приемник имеют два провода (плюс и минус). Сеть не подключена к корпусу самолета.

Смешанные сети имеют обобщенную сеть минусовых проводов, но без использования корпуса самолета.

Для бортовой сети низкого напряжения применяют провода типа ЛПРГС (лакированный провод, резиновый, гибкий, авиационный) и типа БПВЛ (бумажный провод, виниловый, лакированный).

Провода с резиновой изоляцией применяются для высоковольтной бортовой сети. Минимальное сечение проводов 0,35 мм2, максимальное -50 мм2.

Защита электрической сети от перегрузок или коротких замыканий осуществляется предохранителями и биметаллическими автоматическими выключателями (АЗС).

Основными источниками электроэнергии на самолетах, как уже было сказано, являются генераторы постоянного или переменного тока. Приведение генераторов во вращение может осуществляться от вала авиадвигателя, вспомогательной силовой установки, ветродвигателя (ветряка) с помощью скорости воздушного потока. В следствии перехода на переменный ток и роста мощности генераторов отмечается тенденция к применению для привода генераторов автономных двигателей.

Значительные улучшения весовых показателей электрических систем достигнуты за счет установки стартер-генераторов на ТРД и ТВД. Стартер-генератор представляет собой электрическую машину, соединенную с валом компрессора и функционирующую при работе реактивного двигателя как генератор электрической энергии, а при запуске двигателя - как стартер в двигательном режиме.

Для получения постоянного тока более высокого напряжения, чем штатное, в авиационных радиоустройствах применяют одноплечевые преобразователи (умформеры). Умформер объединяет в одном корпусе две электрические машины – двигатель постоянного тока, питаемый от бортовых систем, и генератор постоянного тока. Инверторы используются для преобразования постоянного тока бортовой сети в переменный ток.

# Требования к авиационному электрооборудованию

К электрооборудованию самолетов предъявляются требования по минимальному весу, размеру и стоимости; технологичности; максимальному удобству и безопасности в эксплуатации. Надежность должна быть на очень высоком уровне, что зависит от климатической, механической и электрической стойкости и стабильности генераторных установок.

Имеются и климатические требования. Для уменьшения влияния температурных перепадов и атмосферных явлений используется принудительный отвод тепла, коммутационная и защитная аппаратура размещается в герметичном корпусе, в котором поддерживается нормальное давление. Высота, на которую рассчитано электрооборудование самолета, определяется потолком самолета (это наибольшая высота, которой может достичь самолет за счет использования запаса кинетической энергии при уменьшении скорости полета до эволютивной, на которой ещё сохраняется управляемость летательным аппаратом). Эта высота может достигать 20-30 км.

Влага окружающей среды неизбежно приводит к коррозии металлов и образованию токопроводящих дорожек на электроизоляции, поэтому электрооборудование летательных аппаратов должно надежно работать при относительной влажности 95-98%, измеренной при температуре +40°С, а для тропических условий эксплуатации - до 100%. Стойкость авиационных материалов к влиянию озона достигается добавлением антиозонаторов – специальных химических веществ. Надежной защитой от солнечной радиации является использование лакокрасочных материалов, специальных добавок в материал изделий при производстве, укрытие самолетов чехлами при длительной стоянке, применение крытых ангаров. Классическим требованием к узлам электрооборудования летательных аппаратов является надежность их работы в диапазоне температур от -60 до +60° (или до +80°С).

Наиболее эффективный способ защиты от атмосферных воздействий и перепадов температуры наружного воздуха – размещение агрегатов в герметичных отсеках-салонах, в которых предусмотрено кондиционирование воздуха. Защита от атмосферных воздействий также возможна за счет герметизации агрегата – помещения его в специальный герметичный корпус. Современные сетевые и коммутационные устройства изготавливаются пылевлагозащищенными. На это указывает буква G в шифровке устройства. Герметичные устройства разборке и ремонту не подлежат.

Также летательные аппараты должны противостоять динамическим воздействиям. Динамическая сила F, действующая на агрегат при вибрации или ударе, приложена в центре агрегата и может действовать в направлении любой из осей самолета. При этом опасный участок находится в местах крепления, где создаются максимальные концентрации напряжений.

Величина динамической силы определяется по второму закону Ньютона: F=ma, где m — масса агрегата, а — максимальное ускорение, создаваемое динамическим воздействием на агрегат. Зная величину и направление силы F, можно разложить ее на составляющие по осям самолета и определить интересующую составляющую. Затем по приведенным в курсе теоретической механики уравнениям прочности находят необходимые сечения крепежных элементов: болтов, заклепок, лапок, полочек, скоб. Для обеспечения динамической стабильности используются вибро- и ударопрочные материалы, а все резьбовые соединения снабжены средствами предотвращения самоотвинчивания.

К оснащению воздушных судов, имеющих мощные ТРД, а также сверхзвуковых самолетов дополнительно предъявляются требования по устойчивости к звуковому воздействию.

Срок службы современных пассажирских самолетов достигает 25-30 тысяч часов. С этим сроком согласовывается срок службы статических элементов электрооборудования: щитов, коробов, светильников, электрических сетей.

# Специальные и дополнительные требования к системам электроснабжения

К авиационным комплексам электроснабжения применяются дополнительные специальные требования, такие как:

- Взрывобезопасность. Этим свойством должны обладать устройства, контактирующие с горючими материалами и их парами, например, двигатели топливных насосов. Такие приборы должны иметь герметичную конструкцию, исключающую возможность возникновения открытой дуги или искры.

- Огнестойкость. Аппараты и их система электроснабжения, эксплуатация которых необходима в аварийных условиях, должны быть огнестойкими, сохранять свою работоспособность в течение 5 минут при воздействии на их поверхность пламени с температурой 110°С. Это позволит устройству выполнять свои функции в случае пожара.

- Невоспламеняемость. Данное требование относится к теплоизоляционным материалам. Они не должны гореть или поддерживать горение при воздействии огня, искр или короткого замыкания электрической дуги. Допускается только обугливание на коротком участке контакта с огнем. Это требование особенно важно для монтажных проводов.

- Качество электропитания. Система питания самолета должна обеспечивать потребителей электрическим током определенного качества. Он характеризуется значениями частоты и напряжения, формой кривой напряжения и симметрией компонентов трехфазных систем.

# Тенденции и перспективы развития авиационного электрооборудования

В мире продолжается поиск принципиально новых подходов к построению энергосистемы летательных аппаратов в связи с отказом от использования вспомогательных гидро- и пневматических энергосистем и заменой их только на электрическую энергию, что, как известно, снижает потребляемую мощность, взлетную массу, упрощает бортовые системы, снижает стоимость эксплуатации, повышает экологичность. Поэтому основным направлением развития авиации является переход к концепции самолета с полным электрифицированным оборудованием (ПЭУ), что относится к летательным аппаратам с единой централизованной системой электроснабжения, обеспечивающей их энергетические потребности.

Массоэнергетические характеристики электрического комплекса самолета существенно зависят от величины напряжения и типа тока в централизованной сети. Что касается оборудования, использующего традиционные технологии, то на основании проведенного ряда исследований, было установлено, что масса распределительной сети, а также коммутационной и защитной аппаратуры уменьшается с повышением напряжения до уровня 350-400В, причем особенно эффективно снижается масса распределительной сети на постоянном токе. Таким образом, масса сети постоянного тока 270В, использующей корпус самолета в качестве обратного провода, примерно вдвое меньше массы стандартной сети переменного тока 115/200В, 400 Гц той же мощности.

Следует отметить, что концепция полностью электрического самолета базируется в основном на достижениях в области силовой электроники, а также на новых электротехнических материалах. Развитие данного направления связано со следующими тенденциями модернизации авиационной электротехники:

- значительное увеличение мощности авиационных систем электроснабжения до 200-300 кВт на канал; в то же время повышение мощности источников электроэнергии требует поиска новых идей как в конструкции традиционных электрических генераторов, так и в создании источников, работающих на других физических принципах (например, электрохимических генераторов);

- отказ от применения гидромеханических приводов постоянной скорости, что обуславливает переход на сети переменного тока плавающей частоты 380-800 Гц;

- переход от пневмотурбостарта авиационных двигателей к электростартеру, а в качестве стартера использование генератора в реверсивном режиме, что потребует разработки реверсивных транзисторных инверторов большой мощности;

- значительное увеличение количества потребителей бортовых электроприводов, что приведет к существенному усложнению конфигурации бортовой сети и заметному увеличению массы силовой и информационной проводки (это вызывает необходимость использования  
бесконтактной транзисторной аппаратуры постоянного и переменного тока с дистанционным управлением и встроенным контролем, совместимым с микропроцессорной системой управления нагрузками);

- значительное увеличение длины электропроводящих сетей, что делает актуальным повышение точности стабилизации напряжения первичных источников напряжения и способствует уменьшению его общей массы (в настоящее время на больших самолетах длина проводов составляет несколько сотен километров, а их масса – несколько тонн);

- дальнейшее развитие силовой электроники и микроэлектроники, что позволит в будущем отказаться от систем вторичного электроснабжения и, при необходимости, позволит использовать преобразователи электрической энергии, встроенные в приемник.

Сегодня почти вся электроэнергия, необходимая для полета самолета, вырабатывается синхронными генераторами, приводимыми в движение маршевыми авиационными двигателями, в основном это трехступенчатые бесщеточные синхронные генераторы, мощность которых уже достигала 250 кВт при частоте вращения от 12 до 24 тыс. об/мин. Кроме того, генераторы выполняют еще и функции стартеров авиационных маршевых двигателей.

Масса генераторов мощностью 200-300 кВт может быть 40-60 кг, при этом тепловые потери составят 20-40 кВт. Дальнейшее уменьшение массы и габаритов генераторов возможно за счет использования магнитных материалов, например, аморфных сплавов, имеющих значительно меньшие потери при перемагничивании. Особые требования предъявляются к системе

интенсивного жидкостного охлаждения, являющейся неотъемлемой частью конструкции летательного аппарата. Для самолетов с длительными режимами полета наиболее целесообразна система охлаждения с передачей тепла к топливу через промежуточный теплоноситель.

Суммируя вышеперечисленные особенности, можно сформулировать основные тенденции развития авиационной электроэнергетики:

- значительное увеличение мощности источников электрической энергии на борту самолета;

- появление гибридных и электрических силовых установок;

- увеличение требуемых видов электрической энергии (напряжения, частоты и т.п.);

- увеличение количества потребителей электрической энергии с импульсно-периодическим характером потребления.

Учитывая сформулированные тенденции, а также необходимость выбора наиболее эффективных конструкторских решений, можно определить пути и перспективы развития авиационной электротехники, в основе которых лежит решение ряда оптимизационных задач по некоторому обобщенному критерию эффективности.

В совокупности эффективность электроэнергетической системы (ЭЭС) определяется суммой параметров, которые можно условно объединить в группы (эксплуатационные, экономические, технические, технологические и др.). Определение конкретных требований к ЭУР является задачей главного конструктора самолета.

Эффективность электроэнергетической системы можно оценить на основе структурно-функционального принципа - эффективности каждого элемента с оптимальной (с точки зрения снижения потерь) структурой. Одним из элементов ЭЭС является удельная мощность. Для генераторов этот показатель достигает 0,15-0,2 кг/кВт; для статических преобразователей (выпрямители, инверторы и др.) - до 0,3-0,5 кг/кВт.

Важным критерием оценки потенциальной эффективности проектируемого летательного аппарата является суммарная энергоемкость запасенной на борту энергии. При этом основная конкуренция возникает между углеводородным топливом и электрохимическими источниками энергии. Из электрохимических систем наибольшей теоретической энергоемкостью обладают следующие в порядке убывания:

- литий-воздух = 13000 Втч/кг (без учета массы окислителя);

- литий-фтор = 6300 Втч/кг;

- натриево-серная (комнатная температура) = 1500 Втч/кг;

- литий-ионный = 500-800 Втч/кг;

- свинцово-кислотный = 160 Втч/кг.

Для сравнения - теплота сгорания бензина составляет 11600 Втч/кг.

Не менее важной задачей для авиационной электротехники по-прежнему является разработка автономных исполнительных приводов управления и механизации крыла, где используются два основных типа устройств электропривода, различающихся по принципу действия, общей основой для которых является двигатель с постоянными магнитами:

- электрогидростатический (ЭГСП) с гидравлическим редуктором;

- электромеханический (ЭМЗ) с механической коробкой передач.

В ЭГСП электродвигатель и наклонный насос установлены в одном корпусе с общим радиатором и охлаждаются рабочей жидкостью, находящейся в баке, являющемся конструктивным элементом привода. Электромеханические приводы большой мощности в настоящее время могут использоваться на летательных аппаратах для работы устройств, не

требующих высоких динамических характеристик (малая фазовая задержка). Для более широкого использования ЭМП необходимо пройти достаточно долгий путь по их совершенствованию в следующих аспектах:

- решение проблемы снижения массы электродвигателя с редуктором примерно вдвое до уровня (0,3-0,4 кг/кВт);

- повышение надежности механической коробки передач;

- решение проблем возможного возникновения люфтов при функционировании.

Наличие на современном магистральном самолете более 500 автоматических выключателей, использование не менее 1000 контакторов, реле и концевых выключателей представляет иной подход к системе распределения электрической энергии и требует создания специальных распределительных устройств.

В настоящее время очевидно, что разработать систему распределения электроэнергии для перспективных систем электроснабжения (СЭС переменного тока напряжением 200/115 В, переменной частоты или СЭС постоянного тока напряжением 270 В) с использованием контактных коммутационных элементов и тепловых автоматических выключателей – практически невозможно. Поэтому необходимо реализовать систему автоматического управления вторичным распределением электроэнергии с использованием бесконтактных устройств автоматической защиты и коммутации, микропроцессорных средств и сетевых технологий при организации обмена информацией между элементами системы.

# Заключение

Таким образом, производство полностью электрического воздушного судна с электрическими двигательными установками возможно при улучшении массогабаритных характеристик силовой установки, в первую очередь, высокомоментного бесколлекторного электродвигателя для вращения воздушного винта. Это возможно при использовании нанотехнологий и создании на их основе постоянных магнитов с удельной энергией до 400-450 кДж/м3 при сохранении этих свойств до температуры 300-3500 С и дальнейшем развитии торцевых вентильных двигателей с установкой магнитов по системе Гальбаха (тангенциально-радиальная схема), что уже позволяет добиться удельной массы электродвигателей в пределах 0,12-0,15 кг/кВт.

Следовательно, перспективными направлениями развития авиационного электрооборудования можно считать следующие:

- значительное увеличение интеграции электрооборудования с силовой установкой вплоть до замены его на электрическое;

- децентрализация производства и потребления электроэнергии (как по типу, так и по расположению выбранных центров управления нагрузкой);

- применение единых интеллектуальных систем управления электроснабжением и электропотреблением.

И, как показывает практика, не все технологии еще исчерпаны: в Новосибирске испытали самолет с первым в мире сверхпроводниковым электродвигателем. 5 февраля 2021 года на ВПП аэродрома Сибирского НИИ Авиации имени С. А. Чаплыгина показали его пробег по ВПП. Это совместный проект СибНИА, компании «СуперОкс» (созданной для разработки технологии производства высокотемпературных сверхпроводящих проводов второго поколения), Фонда перспективных исследований, Института П.И. Баранова, Центрального института авиационного моторостроения им. Н.Е. Жуковский.

Это первый шаг к созданию электрического самолета. Мир предсказывал появление такой авиации только в 2030 году. На сегодняшний день подобного двигателя, который показали сегодня в Новосибирске, нет больше нигде. И здесь мы впереди планеты всей. Это значительный прорыв. Проект стартовал в 2016 году. Участники проекта акцентировали внимание на том, что данный самолет — это летающая лаборатория. Он был сделан с целью отработки технологии использования на борту большого количества электрической энергии. Основная задача этой летающей лаборатории — выбрать наиболее оптимальный вариант преобразования электрической энергии в тяговый двигатель. Поэтому есть достаточно мощный генератор, который должен сначала все скопировать, сгенерировать в аккумулятор, затем должен реализовать энергию через этот электродвигатель с максимальным КПД. Это серьезная научная задача.

После этого запуска специалисты изучат параметры, сделают выводы, на основе которых создадут методики для инженеров.

По данным СибНИА, решение об использовании самолета Як-40 было принято в 2018 году. Для его оснащения электродвигателем два из трех маршевых двигателей были заменены на современные с большой тягой. Усовершенствована конструкция планера. «Результатом работ, которые планируется завершить в 2022 году, станут летные испытания демонстратора гибридной силовой установки», — сообщили в Авиационном институте.

Подобные технологии можно будет использовать и в других видах техники, где требования не такие жесткие, как в авиации. Например, в судостроении, железнодорожном и автомобильном транспорте.

# **Литература** 1. Барвинский А. П. Электрооборудование самолетов: издание 2. М.: Книга по Требованию, 2012. - 324 с.

2. **Балагуров В.А.** Лекции по курсу «Проектирование электрооборудования самолетов и автомобилей»: учеб. Пособие. Москва. - 41с.

3. Лёвин А.В., Мусин С.М., Харитонов С.А., Ковалёв К.Л., Герасин А.А., Халютин С.П. Электрический самолёт: концепция и технологии. Уфа: УГАТУ, 2014. 388 с.

4. Жмуров Б.В., Халютин С.П. Структурно-функциональное моделирование электроэнергетических систем самолета // Проблемы безопасности полетов. 2009. № 6. С. 45-53.  
5. Жмуров Б.В., Халютин С.П., Корнилов С.В. Развитие структурно-функционального моделирования электроэнергетических систем самолета // Проблемы безопасности полетов. 2009. № 8. С. 53-62.  
6. Титов А.А., Халютин С.П. Метод предельных состояний для нахождения напряжения и тока в линейной электрической цепи // Информационно-измерительные и управляющие системы. 2008. Т. 6. № 11. С. 31-41.  
7. Отчет № 202-08-VIII. Исследования по повышению уровня электрификации самолетов в обеспечение их конкурентоспособности по эксплуатационным характеристикам. М.: НИИАО, 2008.

8. Потёмкин А.В., Горшков П.С., Халютин С.П. Методика синтеза структурных схем системы электроснабжения воздушных судов / Труды международного симпозиума «Надежность и качество». 2013. Т. 1. С. 318-321.  
9. Системы электроснабжения летательных аппаратов (Учебник) / под ред. С.П. Халютина. - М.: ВВИА им. проф. Н.Е. Жуковского, 2010. - 428 с.

10. Халютин С.П., Жмуров Б.В., Тюляев М.Л. [и др.]. Системы электроснабжения летательных аппаратов. М.: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2010. 11. Халютин С.П., Жмуров Б.В., Старостин И.В., Тюляев М.Л. Моделирование сложных электроэнергетических систем летательных аппаратов. М.: ВУНЦ ВВС «ВВА», 2010.