

Электропривод компрессора системы кондиционирования воздуха в концепции полностью электрифицированного самолета

// Compressor electric drive of air-conditioning system in the 'all electric aircraft' concept //

Волокитина Е.В., к.т.н., Власов А.И., к.т.н.,
Копчак А.Л., Малюгин А.А., Хохлов О.В.
ОАО «Электропривод», г. Киров

В статье приведены материалы технического предложения по электроприводу системы кондиционирования воздуха полностью электрифицированного самолета.

Ключевые слова: система кондиционирования воздуха, электропривод, вентиляторный электродвигатель постоянного тока, блок управления.

В настоящее время на самолетах нового поколения возрастает процент потребителей электрической энергии благодаря все возрастающим возможностям силовых электроприводов.

Совершенствование систем летательных аппаратов за счет введения регулируемого электропривода обеспечивает повышение эффективности приводной системы, т. к. в данном случае потребляемая мощность пропорциональна необходимой мощности на выходном звене.

Решающим фактором в повышении топливной эффективности авиадвигателя для полностью электрифицированного самолета является устранение отбора воздуха (от компрессора), используемого для систем жизнеобеспечения, кондиционирования и противообледенительной системы [1].

Одной из наиболее энергоёмких самолетных систем является система кондиционирования воздуха (СКВ), осуществляющая обогрев или охлаждение кабины экипажа и пассажирского салона; вентиляцию кабины экипажа и пассажирского салона; обогрев

In the article the materials of a technical proposal relating to the electric drive of air-conditioning system of the 'all electric aircraft' are examined.

Keywords: air-conditioning system, electric drive, BLDC, control unit.

подпольного пространства; наддув гермокабины и автоматическое поддержание в ней заданного давления; обдув изнутри стекол кабины экипажа. Мощность, отбираемая от силовой установки современных магистральных самолётов гражданской авиации на обеспечение функционирования СКВ, может достигать 500 кВт и более. Следует отметить, что указанная мощность заметно превышает мощность, необходимую для СКВ (рис. 1),

а значения параметров отбираемого от авиадвигателей воздуха (температуры и давления) существенно выше требуемых для СКВ значений [2].

При использовании автономных компрессоров, приводимых во вращение от регулируемых электродвигателей, мощность электропривода на всех режимах будет в точности соответствовать той величине, которая необходима для функционирования СКВ. Исследования показали, что электрификация СКВ позволит обеспечить:

- снижение потерь мощности до 30 %;
- сокращение массы трубопроводной системы и агрегатов на 20-30 %;
- сокращение расхода топлива на 1-2 % [2];
- упрощение конструкции авиадвигателя и снижение стоимости его обслуживания [3].

В рамках НИР «Исследования в обеспечение создания системы электропитания, системы запуска мар-

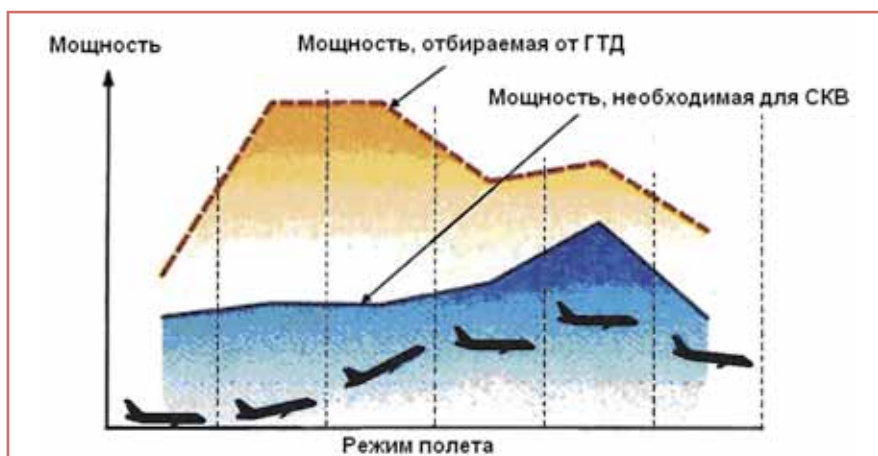


Рис. 1. Изменение мощности сжатого воздуха на различных режимах полета.

Таблица 1. Технические требования к электроприводу СКВ.

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальное напряжение питания постоянного тока, В	540
Диапазон регулирования частоты вращения электропривода, об/мин	35000-60000
Мощность, развиваемая электроприводом при максимальной частоте вращения, кВт, не менее	86
Повышенная температура окружающей среды, °С:	
- рабочая	70
- предельная	85
Пониженная температура окружающей среды, °С:	
- рабочая	минус 55
- предельная	минус 55
Режим работы	продолжительный
Исполнение электродвигателя	корпусное

шевых двигателей и электроприводов системы кондиционирования воздуха полностью электрифицированного самолета» ОАО «Электропривод» для ФГУП «НИИАО» (г. Жуковский) разработало техническое предложение «Электропривод системы кондиционирования воздуха ЭП СКВ».

Технические требования, которые предъявлялись к электроприводу СКВ, приведены в таблице 1.

Вентильный электродвигатель постоянного тока (ВДПТ) является базовой частью ЭП СКВ, электромеханическая часть которого содержит синхронную электрическую машину с постоянными магнитами, а управляющая часть – инвертор, конструктивно входящий в состав блока управления (БУ-СКВ).

Однозначный выбор ВДПТ обусловлен рядом конструктивных и технико-эксплуатационных преимуществ по сравнению с существующими типами электрических машин, к числу которых можно отнести:

- высокие энергетические показатели;
- бесконтактность;
- большую перегрузочную способность по моменту;
- высокое быстродействие;
- практически неограниченный диапазон регулирования частоты вращения и возможность регулирования частоты вращения по различным законам;
- лучшие массогабаритные показатели при прочих равных условиях;
- большой срок службы.

Синхронная электрическая машина с постоянными магнитами

Согласно данным таблицы 1 электродвигатель СКВ должен развивать мощность не менее 86 кВт при максимальной частоте вращения 60000 об/мин. Фактически это максимальная мощность, которую должен развивать электродвигатель СКВ. Для снижения массогабаритных показателей следует проектировать электродвигатель так, чтобы требуемая мощность была близка к предельной мощности электродвигателя $P_{пред}$. Предельная мощность $P_{пред}$ – это максимальная мощность, которую при заданных технологических условиях можно получить от электрической машины данного типа [4].

Анализируя основное расчетное уравнение синхронной электрической машины можно показать, что предельная мощность электрической машины $P_{пред}$ пропорциональна третьей степени окружной скорости ротора $v_{дон}$, допускаемой его конструкцией [5]

$$P_{пред} = \frac{60^2 \cdot v_{дон}^3}{\pi \cdot n^2} \cdot \lambda \cdot \alpha_i \cdot k_o \cdot k_B \cdot A \cdot B_\delta \quad (1)$$

где n – частота вращения ротора, об/мин;

λ – относительная длина;

$a_p k_o k_B$ – коэффициенты полюсного перекрытия, обмотки, формы ЭДС;

A – линейная нагрузка;

B_δ – максимальное значение магнитной индукции в зазоре.

Согласно уравнению (1) чем больше частота вращения n (при заданной окружной скорости ротора $v_{дон}$), тем меньше предельная мощность $P_{пред}$. Это очевидно и с физической точки зрения, так как увеличение n при заданной $v_{дон}$ должно сопровождаться уменьшением размеров электрической машины.

Также из анализа уравнения (1) следует, что $P_{пред}$ электрической машины при заданной n зависит от конструктивной схемы ротора. Выбор конструктивной схемы, позволяющей повысить $v_{дон}$ на 25 %, ведет согласно (1) к увеличению $P_{пред}$ в 2 раза [5].

Повышение уровня электромагнитных нагрузок $A \cdot B_\delta$ также приводит к увеличению $P_{пред}$, но увеличение носит линейный характер.

Таким образом, спецификой проектирования высокоскоростных электрических машин, к которым относятся и электродвигатель СКВ, является взаимосвязь прочностных и электромагнитных параметров.

При повышенной частоте вращения (таблица 1) обеспечение требуемой мощности электродвигателя СКВ лимитируется допустимой температурой, определяемой классом изоляции обмотки и механической прочностью ротора.

В связи с этим при проектировании высокоскоростных электрических машин важным вопросом является расчет потерь и поиск пути их уменьшения. Проблемы снижения потерь и улучшения охлаждения возникают из-за уменьшения габаритов высокоскоростного электродвигателя по сравнению с электродвигателем, рассчитанным на меньшую частоту вращения, при одинаковом уровне мощности, а также в связи с возрастанием потерь в стали, в подшипниках, в меди и аэродинамических потерь.

В результате повышения частоты вращения возрастает частота перемагничивающего поля, а следовательно, возрастают и потери в стали

$$P_{cm} \equiv p_{y0} B^2 f^\beta \quad (2)$$

где p_{y0} – удельные потери в стали, Вт/кг;
 B – магнитная индукция в стали, Тл;
 f – частота перемагничивающего поля, Гц;

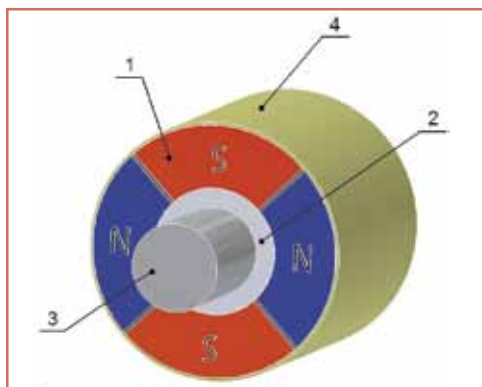


Рис. 2. Сборная конструкция ротора ВДПТ с радиальным намагничиванием постоянных магнитов:

1 – постоянные магниты в форме сегментов; 2 – магнитомягкая втулка; 3 – вал; 4 – бандаж.

β – показатель степени, зависящий от свойств стали.

В электродвигателе СКВ для снижения потерь в стали применена электротехническая сталь с минимальными удельными потерями в высокочастотных полях, а также снижен уровень индукции в элементах магнитной системы до 1,0 – 1,2 Тл.

В электродвигателе СКВ для обеспечения высокого быстродействия и улучшения массогабаритных показателей применена сборная конструкция магнитной системы с радиальным намагничиванием постоянных магнитов, имеющих форму сегментов (рис. 2). Данная магнитная система обеспечивает простоту и технологичность конструкции, малое значение индуктивных сопротивлений и, следовательно, высокую жесткость механической характеристики [6].

Для обеспечения требуемой механической прочности на высокой частоте вращения в качестве материала бандаж выбран специальный материал с высокими прочностными характеристиками. Данный материал в несколько раз превосходит по прочности титан, традиционно используемый в ВДПТ специального назначения, благодаря чему снижается требуемая толщина бандаж. Кроме того, выбранный материал является диэлектриком, что исключает потери на вихревые токи в бандаж.

При проектировании высокоскоростных электродвигателей, таких как для электропривода СКВ, возникают проблемы с выбором подшипников,



Рис. 3. Высокоскоростной подшипник SNR серии Machline.

обеспечивающих работу на высоких частотах вращения. В настоящее время в высокоскоростных электродвигателях применение находят бесконтактные подшипниковые опоры, такие как: газодинамические, газостатические, активные магнитные подшипники [5].

Основной недостаток магнитных, газостатических и газодинамических подшипников – недостаточная жесткость при вибрациях, имеющих место на самолете, при одновременном действии сил магнитного притяжения, имеющих место в электрических машинах.

В связи с этим в конструкции электродвигателя СКВ были заложены высокоскоростные сдвоенные радиально-упорные подшипники SNR серии Machline (рис. 3) с допустимой частотой вращения до 100000 об/мин производства Франции, обеспечивающие длительный режим работы с заданной частотой вращения [7].

Для получения приемлемых перегревов обмотки статора и для улучшения температурного режима в зонах подшипников была использована жид-

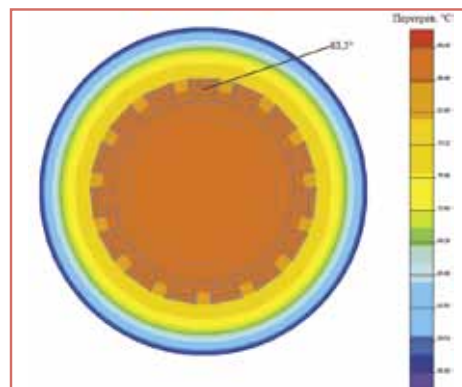


Рис. 4. Результаты моделирования теплового поля электродвигателя СКВ.

костная система охлаждения. В качестве охлаждающей жидкости используется масло, которое циркулирует по каналам в корпусе над пакетом статора и через подшипники поступает во внутреннюю полость электродвигателя, охлаждая ротор и лобовые части статора, и на сепараторы подшипников.

Для оценки перегревов активных частей электродвигателя СКВ при заданных параметрах охлаждения было проведено численное моделирование теплового поля в программе Elcut, которая представляет собой систему компьютерного моделирования различных физических процессов методом конечных элементов.

Результаты моделирования теплового поля электродвигателя СКВ показаны на рис. 4.

Как видно из рис. 4, максимальный перегрев обмотки электродвигателя составляет 83,3 °С, что является допустимым.

В таблице 2 приведены основные технические характеристики спроектированного электродвигателя СКВ.

Таблица 2. Основные технические характеристики электродвигателя СКВ.

Наименование параметра	Значение параметра
Номинальное напряжение питания инвертора, В	540
Потребляемый ток, А	220
Материал магнита	КС25ДЦ-240
Частота вращения, об/мин	60000
Полезная мощность, кВт	88
КПД	0,95
Коэффициент мощности $\cos\varphi$	0,97
Масса электродвигателя, кг	31
Габариты электродвигателя, мм	Ø206×405
Удельная мощность электродвигателя, кВт/кг	2,8
Режим работы	продолжительный



Рис. 5. Внешний вид электродвигателя СКВ.

На рис. 5 показан внешний вид электродвигателя СКВ.

Блок управления

Проведенные исследования показали, что наиболее целесообразной является бездатчиковая система с векторным управлением электродвигателем, основные преимущества которой заключаются в следующем:

- возможность обеспечения высоких энергетических показателей: высокий КПД блока управления, электродвигателя и электропривода в целом;

- высокая стабильность частоты вращения электродвигателя и жесткость механической характеристики при различных внешних возмущающих факторах;

- высокая надежность за счет отказа от применения каких-либо внешних датчиков. В блоке управления используется только датчик текущего значения тока.

При определении структуры электропривода за основу принимались следующие аспекты:

- энергетические показатели;
- показатели электромагнитной совместимости (ЭМС);

- высокий уровень защищенности как от внешних, так и от внутренних аварийных режимов благодаря встроенной системе контроля (ВСК);

- минимальные масса и габариты.

В состав блока управления БУ-СКВ (далее по тексту – блок) входят следующие функциональные модули:

- инвертор трехфазный – осуществляет коммутацию фаз электродвигателя. Со-

держит в своем составе транзисторные ключи, драйверы, датчики тока, устройство мягкого заряда силовых емкостей. Обеспечивает следующие виды контроля и защиты: защита от короткого замыкания; подавление коротких импульсов помех, которые могут привести к открыванию транзистора; формирование времени задержки переключения транзистора ("мертвое время"); защита от снижения напряжения и перенапряжения; защита от перегрева инвертора;

- устройство управления электроприводом – осуществляет формирование алгоритмов векторного управления электродвигателем, а также осуществляет следующие виды защиты: ограничение тока в фазах статора электродвигателя и времятоковую защиту; формирование слова состояния электропривода во внешние взаимодействующие системы;

- блок питания – преобразует входное напряжение бортовой сети 27 В в рабочие внутренние напряжения +3,3 В, 5 В, ±15 В, а также выдает сигнал готовности питания ГП;

- устройство интерфейсов – осуществляет прием, передачу и преобразование входных и выходных сиг-

налов и команд. Кроме того, осуществляет контроль работоспособности взаимодействующих систем.

В составе блока управления и контроля имеются все необходимые функции, обеспечивающие мониторинг входного напряжения бортовой сети и последовательность подачи и снятия питающих напряжений.

Предлагаемый метод бездатчикового управления с использованием математической модели основан на косвенном определении электрического положения ротора электродвигателя. Математическая модель реализует наблюдатель потокосцепления и вычисляет положение ротора путем измерения токов электродвигателя. В системе предполагается применение только датчиков обратной связи по току. Структурная схема наблюдателя приведена на рис. 6.

Метод связан с большим объемом вычислений в реальном масштабе времени и требует использования высокопроизводительных предметно-ориентированных микроконтроллеров. В качестве управляющего микроконтроллера выбран 32-битный процессор TMS320F28032 серии Piccolo компании «Texas Instruments», предназначенный для управления электродвигателями и обладающий высоким быстродействием.

При построении системы управления электропривода использован принцип подчиненного регулирования. Электродвигатель имеет двухконтурную систему регулирования, включающую в себя контуры регулирования частоты вращения и тока. В основу синтеза системы векторного управления электроприводом положены уравнения Парка-Горева для синхронного электродвигателя с возбуждением от постоянных магнитов в синхронной ортогональной системе координат d, q . Благодаря ориентации переменных по положению ротора обеспечивается возможность управлять электромагнитным моментом электродвигателя в канале регулирования составляющей тока I_q при оптимальном использовании электродвигателя по соотношению ток/момент.

Наблюдатель потокосцепления в блоке расчета частоты вращения и положения рассчитывает текущий

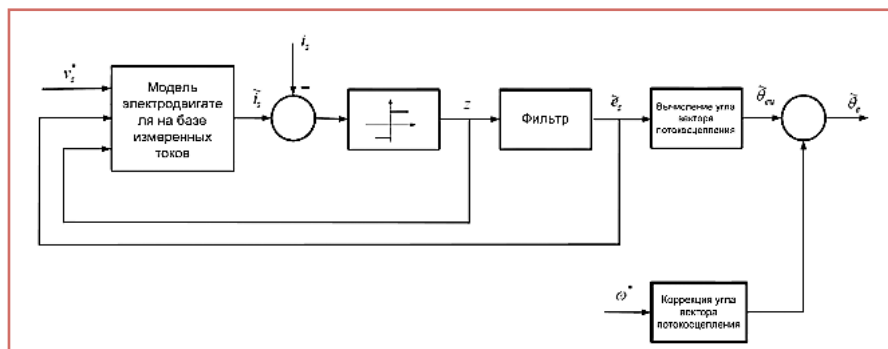


Рис. 6. Структурная схема наблюдателя потокосцепления.

угол положения ротора θ и формирует сигнал обратной связи по частоте вращения ω_r .

Компоненты результирующего вектора тока статора по осям d и q , соответственно, рассчитываются по уравнениям

$$\begin{aligned} I_d &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left[I_A \sin\left(\vartheta + \frac{\pi}{3}\right) + I_B \sin(\vartheta) \right] \\ I_q &= \frac{2}{\sqrt{3}} \left[I_A \cos\left(\vartheta + \frac{\pi}{3}\right) + I_B \sin(\vartheta) \right] \end{aligned} \quad (3)$$

где ϑ – угловое (электрическое) положение ротора.

Структурная схема ЭП СКВ показана на рис. 7.

В качестве элементной базы БУ-СКВ рассмотрены IGBT-модули фирм «Semikron», «Mitsubishi» и «Eupres». Продукция указанных производителей имеет промышленное исполне-

ние и при использовании их в БУ-СКВ приняты дополнительные средства защиты от внешних воздействующих факторов. Информационный анализ показал, что на сегодняшний день многие российские предприятия ведут ОКР по созданию ЭРИ для жестких условий эксплуатации и применения в технике специального назначения по программам импортозамещения. В дальнейшем планируется использование только отечественной элементной базы, разрешенной к применению в спецтехнике.

Надежность БУ-СКВ зависит от температурного режима работы силовых ключей, поскольку мощные IGBT-модули являются термически активными. Анализ значения рассеиваемой мощности показал, что для отвода тепла от трехфазного инвертора в БУ-СКВ целесообразно применение

принудительной конвекции теплоносителя (60-процентная смесь этиленгликоля с водой) в каналах радиатора.

Для оценки теплового состояния было проведено численное моделирование теплового режима модулей инвертора в программном пакете ANSYS (рис. 8).

По результатам расчета (рис. 8) температура полупроводникового перехода не превышает допустимого предела, следовательно, модули инвертора работают в нормальном тепловом режиме. Так, при расходе теплоносителя равного 35 л/мин, нагрев перехода составляет 84,5°C. При снижении расхода теплоносителя до 25 л/мин нагрев перехода составит 140°C, что также является приемлемым.

Конструктивно БУ-СКВ выполнен в нестандартном негерметичном корпусе, установленном на амортизаторы АПН-6. Модули инвертора расположены на боковой стенке, которая представляет собой радиатор жидкостного охлаждения. БУ-СКВ подключается к централизованной системе жидкостного охлаждения самолета.

Габаритные размеры БУ-СКВ (длина×ширина×высота) – 590×495×340 мм, а масса равна 38,5 кг. Внешний вид блока управления показан на рис. 9.

На этапе технического предложения была проведена ориентировочная оценка показателей надежности ЭП СКВ. Проведенный расчет показал, что наработка на отказ ЭП СКВ составила 22236 ч, что обусловлено

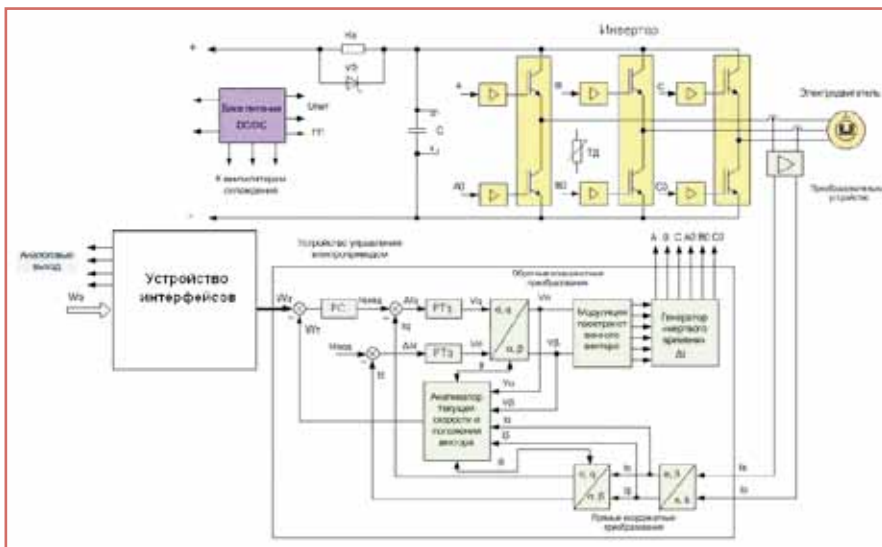


Рис. 7. Структурная схема ЭП СКВ.

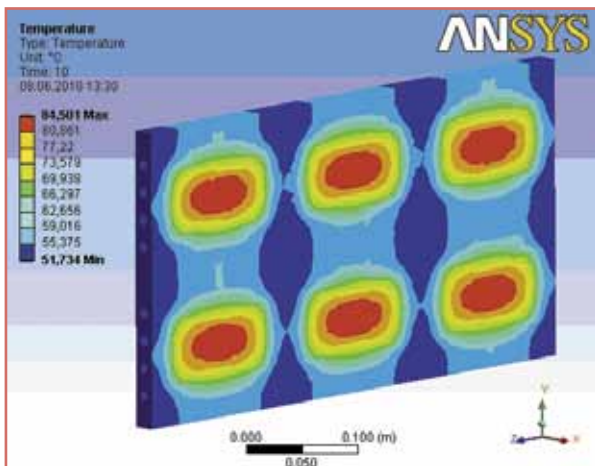


Рис. 8. Картина теплового поля радиатора при работе инвертора в длительном режиме.

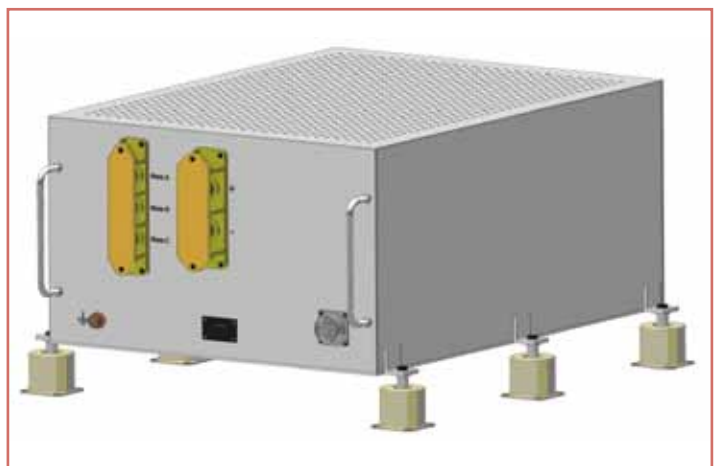


Рис. 9. Внешний вид блока управления.

использованием большого числа элементов силовой электроники.

Выводы

В рамках НИР «Исследования в обеспечение создания системы электроснабжения, системы запуска маршевых двигателей и электроприводов системы кондиционирования воздуха полностью электрифицированного самолета» ОАО «Электропривод» разработано техническое предложение по электроприводу системы кондиционирования воздуха ЭП СКВ, выполненного на базе ВДПТ мощностью 86 кВт с частотой вращения в диапазоне от 35000 до 60000 об/мин.

Литература:

1. Гарганеев А.Г., Харитонов С.А. Технико-экономические оценки создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием // Доклады ТУСУРа, № 2 (20), декабрь 2009 – С.179-184.
2. Воронович С., Каргопольцев В., Кутахов В. «Полностью электрический самолет». Современное состояние и перспективы развития. // Авиапанорама.-2009.-Март-Апрель. –С.14-17.
3. Отчет о НИР Оценка эффективности и реализуемости концепции «Полностью электрического самолета для перспективного БСМС» // ФГУП «ЦАГИ», Жуковский, 2006.
4. Балагуров В.А. Электрические генераторы с постоянными магнитами. / Балагуров В.А., Галтеев Ф.Ф. – М.: Энергоатомиздат, 1988.-280 с.
5. Ситин Д.А. Магнитные системы синхронных электрических машин с редкоземельными постоянными магнитами и повышенной частотой вращения: Автореф. дисс. ... канд. техн. наук.- Москва, 2009.- 24 с.
6. Ледовский А.Н. Электрические машины с высококоэрцитивными постоянными магнитами. – М.: Энергоатомиздат, 1985 – 168 с.
7. www.snr.com.ru

Волокитина Елена Владимировна – в 1981 году окончила Кировский политехнический институт по специальности «Электромеханика». В 2006 году защитила кандидатскую диссертацию на тему: «Исследование и разработка быстродействующего вентильного электропривода

органов управления новых самолетов». Доцент кафедры «Электрические машины и аппараты» Вятского государственного университета. Опыт работы в области вентильных электродвигателей – 25 лет, авиационного электропривода – 15 лет. В настоящее время работает ведущим конструктором, руководителем проекта ОАО «Электропривод». Автор 57 научных трудов. Награждена Дипломом лауреата Всероссийского конкурса «Инженер года-2011» по версии «Профессиональные инженеры».

Власов Андрей Иванович – родился в 1979 году. В 2002 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Кандидат технических наук. В 2010 году защитил диссертацию по теме: «Магнитоэлектрический стартер-генератор в системе электроснабжения самолетов нового поколения». 7 лет работает в области авиационных электрических машин. В настоящее время работает начальником конструкторского бюро ОАО «Электропривод». Имеет 16 научных трудов.

Копчак Андрей Леонидович – родился в 1983 году. В 2005 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электропривод и автоматика промышленных установок». Опыт работы в области авиационного электропривода – 5 лет. В настоящее время работает начальником конструкторского бюро ОАО «Электропривод». Имеет 3 печатных труда.

Малюгин Антон Александрович – родился в 1985 году. В 2008 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Опыт работы в области авиационных электрических машин – 3 года. В настоящее время работает инженером-конструктором ОАО «Электропривод».

Хохлов Олег Владимирович – родился в 1983 году. В 2005 году окончил Вятский государственный университет (ВятГУ) по специальности «Электромеханика». Опыт работы в области авиационного электропривода – 5 лет. В настоящее время работает инженером-конструктором 2 категории ОАО «Электропривод».

Volokinina Elena – in 1981 she graduated

from Kirov Polytechnic Institute, specialization is «Electromechanics». In 2006 she defended a candidate thesis, the theme is: «Research and development of quick-operating valve electric drive of new plains controllers». She is an associate professor of «Electric machines and equipment» department in Vyatskiy State University. Her job experience in the sphere of valve electric drivers is 25 years, aviation electric drivers – 15 years. At present she is working as a leading designer, project manager in JSC «Electroprivoд». She is the author of 57 scientific works. She is awarded to the laureate diploma of All-Russian competition «Engineer of the year 2011» according to the version «Professional Engineers».

Vlasov Andrey – was born in 1979. In 2002 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electromechanics». He is a candidate of Engineering. In 2010 he defended a thesis, the theme is: «Magnetoelectric starter-generator in the New generation plain power system». At present he is working as the Head of the Design Department in JSC «Electroprivoд». He is the author of 16 scientific works.

Kopchak Andrey – was born in 1983. In 2005 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electric drive and automation of production units». Job experience in the sphere of aviation electric drive is 5 years. At present he is working as the Head of the Design Department in JSC «Electroprivoд». He is the author of 3 printed works.

Malyugin Anton – was born in 1985. In 2008 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electromechanics». Job experience in the sphere of aviation electric machines – 3 years. At present he is working as a design engineer in JSC «Electroprivoд».

Hohlov Oleg – was born in 1983. In 2005 he graduated from Vyatskiy State University (VyatGU), specialization is «Electromechanics». Job experience in the sphere of aviation electric drive is 5 years. At present he is working as a design engineer of the second category in JSC «Electroprivoд».