

УДК 621.314

UDC 621.314

05.00.00 Технические науки

Technical sciences

ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГИИ БОРТОВЫХ СИСТЕМ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ: СОСТОЯНИЕ И ПЕРСПЕКТИВЫ**SOURCES OF ELECTRICAL ENERGY OF AIRCRAFT ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEMS: CONDITION AND PERSPECTIVES**

Попов Андрей Юрьевич

к.т.н., старший преподаватель,
aendrup@mail.ru*Краснодарское высшее военное авиационное училище имени героя советского союза А. К. Серова, Краснодар, Россия*

Popov Andrei Yuryevich

Candidate in Technical Sciences, senior lecturer,
aendrup@mail.ru*Krasnodar air force institute for pilots named after the Hero of the Soviet Union A. K. Serov, Krasnodar, Russia*

По принципу действия, генераторы бортовых систем электроснабжения не отличаются от аналогичных генераторов транспортных и стационарных систем, но имеют ряд особенностей: малый вес и габариты, большая плотность тока якоря, принудительное охлаждение (воздушное или жидкостное), высокая частота вращения ротора. В статье раскрываются основные требования, предъявляемые к генераторам летательных аппаратов, а также рассматриваются особенности конструкции и основные эксплуатационно-технические характеристики генераторов, применяемых в современных летательных аппаратах. Предлагается в качестве источников электроэнергии в бортовых системах электроснабжения использовать бесконтактные электрические машины: синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов и асинхронные генераторы с емкостным возбуждением. Для улучшения эксплуатационно-технических характеристик генераторов и бортовых систем электроснабжения в комплексе предлагается также отказаться от приводов постоянной частоты вращения, имеющего низкие показатели надёжности и КПД, использовать в качестве стабилизатора напряжения и частоты тока источника электроэнергии непосредственные преобразователи частоты. Рассмотрены особенности их работы, достоинства и недостатки. Улучшить характеристики бортовых систем электроснабжения можно за счет исследования электромагнитной совместимости основных функциональных элементов системы и применения бесконтактных электрических аппаратов, применяемых в системах защиты и управления, выполненных на базе силовых электронных приборов

According to its operating principles, generators of aircraft electric power supply systems do not differ from the similar generators of transporting and stationary systems, but have range of peculiarities: low weight and dimensions, high density of armature current, compulsory cooling (air and liquid), high frequency of rotor spinning. The article considers main requirements, imposed to generators of flight vehicle and the construction peculiarities and main physical and operational characteristics of generators applied in modern flight vehicles. It is suggested to use non-contact electrical machines as sources of electrical energy in the aircraft electric power supply systems: synchronous generators with impulses from permanent magnets and asynchronous generators with capacitive impulse. To improve physical and operational characteristics of generators and aircraft electric power supply systems it is suggested to refuse from permanent frequency spinning drivers which have low converters as stabilizer of voltage and frequency current of electrical energy source. The peculiarities of its operation are considered, its advantages and disadvantages. It is possible to improve characteristics of aircraft electric power supply systems by means of study of the electromagnetic compatibility of the main functional system elements and by means of application of non-contact electrical devices, applied in the guard and control systems, made on the basis of power and electronic devices

Ключевые слова: БОРТОВАЯ СИСТЕМА ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ, ЛЕТАТЕЛЬНЫЙ АППАРАТ, АСИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР, СИНХРОННЫЙ ГЕНЕРАТОР С ПОСТОЯННЫМИ МАГНИТАМИ, НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ

Keywords: AIRCRAFT ELECTRIC POWER SUPPLY SYSTEM, FLIGHT VEHICLE, ASYNCHRONOUS GENERATOR, SYNCHRONOUS GENERATOR WITH PERMANENT MAGNETS, DIRECT FREQUENCY CONVERTER

Doi: 10.21515/1990-4665-131-125

По принципу действия генераторы бортовых систем электроснабжения (БСЭ) не отличаются от аналогичных генераторов транспортных и стационарных систем, но имеют ряд особенностей: малый вес и габариты, большая плотность тока якоря, принудительное охлаждение (воздушное или жидкостное), высокая частота вращения ротора. В качестве источников, как правило, применяются бесконтактные синхронные генераторы переменного тока и коллекторные генераторы постоянного тока [1].

Генераторы всегда работают в комплекте с аппаратурой регулирования напряжения, защиты и управления. Выбор и использование на борту летательного аппарата (ЛА) определенного типа генератора электроэнергии, а также их количества зависит от многих факторов, основными из которых являются: используемый тип БСЭ, суммарная мощность потребителей электроэнергии по переменному и постоянному току, требуемое качество электроэнергии, условия эксплуатации, массогабаритные показатели, а также требования надежности.

Генераторы БСЭ работают в жестких условиях, резко отличающихся от условий эксплуатации генераторов общего назначения. Они работают при повышенных динамических нагрузках, произвольном положении в пространстве, широком изменении температуры, давления, влажности окружающей среды. Несмотря на столь трудные условия применения, генераторы ЛА должны иметь высокую надежность работы, минимальные массу и габариты.

Исходя из указанных условий эксплуатации, к электромеханическим генераторам электроэнергии ЛА предъявляются следующие требования [2, 3]:

– максимальная надежность и безопасность работы при жестких климатических условиях, механических нагрузках и вибрациях;

- высокая прочность (механическая, электрическая, термическая) и химическая стойкость;
- большая перегрузочная способность;
- малый вес и габариты на единицу мощности;
- высокие показатели КПД;
- высокая стабильность и точность поддержания параметров электроэнергии (амплитуды, частоты и формы генерируемого напряжения);
- простота и безопасность эксплуатации;
- низкая стоимость.

Эти требования обусловили следующие особенности конструкции современных авиационных генераторов [2, 4]:

- привод генераторов переменного тока осуществляется, как правило, через привод постоянной частоты вращения;
- ротор имеет большую частоту вращения;
- в рабочих обмотках создается большая плотность тока;
- повышенный тепловой режим работы.

Одним из методов повышения надежности электроснабжения бортовых систем является резервирование основных источников питания. В настоящее время на самолетах и вертолетах в соответствии с существующими требованиями должно предусматриваться не менее двух независимых систем (подсистем) электроснабжения. Для приемников, без которых невозможно обеспечить безопасность полетов, предусматривается двух- и трехкратное резервирование питания от основных источников и питание от специальных аварийных (резервных) источников [2, 5].

В связи с этим источники электроэнергии БСЭ делятся на три группы: первичные, вторичные и аварийные. Каждая группа содержит источники постоянного и переменного тока.

К первичным источникам относятся генераторы, работающие от привода, которыми являются авиадвигатели, вторичные источники – преобразователи электроэнергии первичных источников. Аварийными источниками электроэнергии являются аккумуляторные батареи.

Для питания бортового оборудования и систем ЛА в настоящее время применяется электроэнергия постоянного тока напряжением 27 В, переменного однофазного или трёхфазного тока с нейтральным проводом напряжением 208/115 В, частотой 400 Гц, переменного трёхфазного тока без нейтрального провода с линейным напряжением 36 В и частотой 400 Гц. Суммарная мощность генераторов на борту может составлять от 20 кВт для небольших самолётов или вертолётов и до 600 и более кВт - для тяжёлых ЛА [1].

Сегодня в истребительной авиации применяются бортовые генераторы переменного тока ГТ30НЖЧ12. На самолёте Су-27 используются два таких генератора, а на самолёте МиГ-29 – один. Мощность генератора 30 кВА, выходное трёхфазное напряжение переменного тока 208/120 В частотой 400 Гц. Стабилизация выходного напряжения осуществляется изменением тока возбуждения возбуждателя, находящегося на одном валу с генератором.

В качестве источников электроэнергии постоянного тока в ЛА применяются: генераторы серии ГСР-СТ-12/40 (мощностью 12 кВт) и аккумуляторные батареи серии 20НКБН-25.

Основными недостатками генераторов переменного и постоянного тока БСЭ является их низкий КПД (55–60 %), большая масса и габариты приводов постоянной частоты вращения генераторов, а также наличие щеточного контакта, что вместе с приводами значительно снижает их показатели надёжности.

Несмотря на то, что в основном БСЭ потребляют постоянный ток, из-за недостатков систем электроснабжения постоянного тока (низкие

показатели надёжности и КПД генераторов, сложность преобразования напряжения и реализация систем управления и защиты) перспективным направлением является применение в составе систем электроснабжения ЛА бесконтактных генераторов электроэнергии, основными преимуществами которых являются: повышенная надёжность и КПД, устойчивость работы при механических перегрузках (вибрации, тряски), повышенная перегрузочная способность, простота обслуживания.

Сегодня в составе БСЭ применяется бесконтактная электрическая машина – генераторы с вращающимися выпрямителями (СГВВ), генераторы с внутризамкнутым магнитопроводом и синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ).

СГПМ используются в качестве тахогенераторов и генераторов в электромашинных трехфазных преобразователях.

Недостатком СГПМ, применяемых в настоящее время в БСЭ, является требование стабильной частоты вращения ротора генератора. Это вызвано зависимостью частоты генерируемого напряжения от частоты вращения ротора. Для стабилизации частоты вращения ротора СГПМ применяется гидропривод и электромуфта. На эти элементы приходится основная доля отказов источников БСЭ. Кроме того, применение гидропривода и электромуфты увеличило массу генераторного узла в 2,5 раза, объем – в 1,4 и снизило показатели КПД и себестоимости [1, 2].

Разработка источников электроэнергии повышенной надёжности для БСЭ является задачей, требующей, с одной стороны, учета возрастающих требований со стороны бортовых потребителей электроэнергии, с другой стороны, широкого внедрения последних достижений в науке и технике. Кроме того, важное место при проектировании БСЭ отводится электромагнитной совместимости электрооборудования.

В настоящее время основными направлениями повышения надёжности источников электроэнергии БСЭ являются следующие [1, 2]:

1) улучшение эксплуатационно-технических характеристик (ЭТХ) синхронных генераторов с возбуждением от постоянных магнитов (СГПМ);

2) применение в качестве источника электроэнергии асинхронных генераторов с емкостным возбуждением (АГ);

3) улучшение ЭТХ устройств стабилизации параметров электроэнергии;

4) отказ от приводов постоянной частоты вращения и использование в качестве стабилизатора напряжения и частоты тока генераторов переменного тока непосредственных преобразователей частоты (НПЧ);

5) оптимизация структурно-схемных решений СБЭ (разработка рациональной структуры).

Ранее АГ не применялись в основном из-за двух причин: сложности стабилизации напряжения и большой массы конденсаторов возбуждения и компенсации реактивной мощности. Благодаря разработке малогабаритных с большой ёмкостью (сотни мкФ) конденсаторов, а также развитию силовой электроники, применяемой в устройствах управления и защиты, в настоящее время сняты ограничения по применению АГ как источников электроэнергии в автономных системах электроснабжения [2].

АГ и СГПМ имеют одноступенчатые устройства стабилизации напряжения. Улучшить их ЭТХ можно за счет исключения привода постоянной частоты вращения, а стабилизацию напряжения и частоты тока осуществлять НПЧ [6, 7].

Силовые электронные схемы НПЧ могут быть выполнены на биполярных транзисторах (IGBT) или управляемых тиристорах. Схемы НПЧ на биполярных транзисторах значительно усложняют алгоритм работы и конструкцию системы управления и защиты преобразователя; кроме того, стоимость транзисторов с изолированным затвором в 4–5 раз превышает стоимость тиристорных [8, 9].

Кроме возможности стабилизации выходного напряжения НПЧ обладают способностью стабилизации выходной частоты тока, а также способны изменять угол сдвига фаз на входе преобразователя независимо от угла сдвига фаз на его выходе.

В качестве стабилизаторов параметров электроэнергии АГ и СГПМ могут использоваться два типа НПЧ: с естественной коммутацией силовых электронных приборов (НПЧЕ) и с искусственной коммутацией, обеспечивающей регулирование угла сдвига фаз на входе преобразователя (НПЧР). Эти преобразователи обладают общим свойством: поток энергии может проходить через них в обоих направлениях. Кроме того, их системы управления осуществляют независимую друг от друга стабилизацию напряжения и частоты тока.

Качество выходного напряжения НПЧЕ и НПЧР от способа управления силовыми электронными ключами не зависит, а зависит от соотношения частоты тока на входе к частоте тока на выходе преобразователя. А поскольку частоты вращения приводных двигателей генераторов БСЭ могут составлять десятки тысяч оборотов в минуту, то массогабаритные характеристики выходных фильтров НПЧ будут несущественными, поскольку выходные фильтры будут нужны только для обеспечения непрерывности выходного тока [9].

Оригинальной системой генерирования электроэнергии автономным источником является система, состоящая из АГ и НПЧР.

Если на статорные обмотки АГ подается реактивная мощность, то он может генерировать активную мощность к присоединенной к нему внешней нагрузке. Потребность в реактивной мощности нагрузки и электрической машины должна обеспечиваться от внешних источников (конденсаторов, синхронных компенсаторов). Однако каждый из этих источников значительно ухудшает технические характеристики АГ.

Особенность работы НПЧР заключается в его способности изменять реактивную составляющую входного тока и ее знак. Поэтому НПЧР можно использовать в двух целях: во-первых, для преобразования мощности с повышенной и изменяющейся частотой, генерируемой АГ, в выходную мощность постоянной более низкой частоты и, во-вторых, для питания АГ регулируемой реактивной мощностью, т. е. для регулирования его возбуждения [2].

Блок конденсаторов возбуждения и компенсации реактивной мощности, кроме подавления коммутационных перенапряжений во время работы НПЧ, уменьшает также искажение токов генератора и улучшает форму кривой напряжения на его выводах. Таким образом, эти конденсаторы косвенно влияют на уменьшение искажения формы кривой выходного напряжения, которая формируется из участков кривых входного напряжения.

Важным вопросом является пуск АГ. Поскольку до пуска к АГ не приложено напряжение, то его конденсаторы сами по себе не смогут обеспечить требуемое начальное возбуждение. Однако асинхронные машины имеют некоторую остаточную намагниченность и даже если не имеют ее, это легко сделать путем введения только одного импульса тока в обмотку статора. Эта остаточная намагниченность обеспечивает начальное самовозбуждение естественным путем под действием положительной обратной связи. При вращении ротора в обмотке статора возникает небольшое напряжение благодаря остаточной намагниченности. Это напряжение создает некоторый ток через конденсаторы фильтров на входе, что в свою очередь увеличивает напряжение генератора. Когда напряжение на выводах генератора превысит какой-то установленный уровень, НПЧР включается в работу. Если желаемое напряжение генератора поддерживается замкнутой системой регулирования коэффициента сдвига НПЧР, то при пуске будет автоматически

установлено наибольшее возможное опережающее значение коэффициента сдвига, обеспечивающее быстрое завершение начального возбуждения генератора. По достижении требуемого напряжения на выводах АГ замкнутая система регулирования НПЧР непрерывно регулирует реактивную составляющую входного тока так, чтобы поддержать это напряжение.

Основным достоинством НПЧЕ, применяемых в качестве стабилизатора напряжения и частоты тока АГ, является относительно несложная силовая схема и система управления, а основным недостатком стабилизатора, выполненного на НПЧЕ, является то, что на входе преобразователя угол сдвига фаз постоянно отстающий, т.е. НПЧЕ для АГ является активно-индуктивной нагрузкой, что требует повышенной ёмкости конденсаторов, обеспечивающих его возбуждение.

Основным достоинством НПЧР является то, что на его входе ток опережает напряжение, а значит, преобразователь для АГ является активно-емкостной нагрузкой, что позволяет значительно уменьшить массу конденсаторов, применяемых для компенсации реактивной мощности, и практически их можно исключить из схемы автономного источника. Основными недостатками НПЧР как стабилизатора параметров электроэнергии являются: сложная силовая часть из-за применения блока искусственной коммутации, в состав которого входит блок реактивных элементов и силовые полупроводниковые ключи и, соответственно, усложнена система управления, обеспечивающая не только стабилизацию параметров электроэнергии, но и искусственную коммутацию силовых полупроводниковых приборов.

Улучшить ЭТХ бортовых систем электроснабжения можно за счет исследования электромагнитной совместимости основных функциональных элементов системы и применения бесконтактных

электрических аппаратов, используемых в системах защиты и управления, выполненных на базе силовых электронных приборов [4, 10].

Таким образом, применение в качестве стабилизатора параметров электроэнергии бесконтактных генераторов (АГ и СГПМ) НПЧ позволит улучшить ЭТХ источников электроэнергии переменного тока и БСЭ в комплексе.

Список литературы

1. Григораш О.В., Божко С.В., Попов А.Ю. и др. Автономные источники электроэнергии: состояние и перспективы. – Краснодар. – 2012. – 174 с.
2. Попов А.Ю. Асинхронный генератор с улучшенными эксплуатационно-техническими характеристиками для автономных систем электроснабжения: канд. техн. наук / дис.– Краснодар, 2012. – С. 157.
3. Птицын О.В., Григораш О.В. Генераторы переменного тока, состояние и перспективы // Электротехника. – 1994. – № 9. – С. 2 – 6.
4. Григораш О.В., Дацко А.В., Мелехов С.В. К вопросу электромагнитной совместимости узлов систем автономного электроснабжения // Промышленная энергетика. – 2001. – № 2. – С. 44–47.
5. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н. Системы автономного электроснабжения. – Краснодар. – 2001. – 333 с.
6. Атрощенко В.А., Григораш О.В. Непосредственные преобразователи частоты с улучшенными техническими характеристиками для систем автономного электроснабжения // Электротехника. – 1997. – № 11. – С. 56 – 60.
7. Григораш О.В., Божко С.В., Нефедовский В.А., Столбчатый Д.А. Непосредственные преобразователи частоты. – Краснодар. – 2008. – 148 с.
8. Григораш О.В., Новокрещенов О.В., Хамула А.А., Шхалахов Р.С. Статические преобразователи электроэнергии. – Краснодар. – 2006. – 264 с.
9. Григораш О.В., Степура Ю.П., Усков А.Е. Статические преобразователи и стабилизаторы автономных систем электроснабжения. – Краснодар. – 2011. – 188 с.
10. Григораш О.В., Богатырев Н.И., Курзин Н.Н., Тельнов Г.В. Электрические аппараты низкого напряжения. – Краснодар: КубГАУ. – 2000. – 313 с.

References

1. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Popov A.Ju. i dr. Avtonomnye istochniki jelektroenergii: sostojanie i perspektivy. – Krasnodar. – 2012. – 174 s.
2. Popov A.Ju. Asinhronnyj generator s uluchshennymi jekspluatacionno-tehnicheskimi harakteristikami dlja avtonomnyh sistem jelektrosnabzhenija: kand. tehn. nauk / dis.– Krasnodar, 2012. – S. 157.
3. Pticyn O.V., Grigorash O.V. Generatory peremennogo toka, sostojanie i perspektivy // Jelektrotehnika. – 1994. – № 9. – S. 2 – 6.
4. Grigorash O.V., Dacko A.V., Melehov S.V. K voprosu jelektromagnitnoj sovместимости uzlov sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija // Promyshlennaja jenergetika. – 2001. – № 2. – S. 44–47.

5. Grigorash O.V., Bogatyrev N.I., Kurzin N.N. Sistemy avtonomnogo jelektrosnabzhenija. – Krasnodar. – 2001. – 333 s.
6. Atroshhenko V.A., Grigorash O.V. Neposredstvennye preobrazovateli chastoty s uluchshennymi tehničeskimi harakteristikami dlja sistem avtonomnogo jelektrosnabzhenija // Jelektrotehnika. – 1997. – № 11. – S. 56 – 60.
7. Grigorash O.V., Bozhko S.V., Nefedovskij V.A., Stolbchatyj D.A. Neposredstvennye preobrazovateli chastoty. – Krasnodar. – 2008. – 148 s.
8. Grigorash O.V., Novokreshhenov O.V., Hamula A.A., Shhalahov R.S. Staticheskie preobrazovateli jelektrojenergii. – Krasnodar. – 2006. – 264 s.
9. Grigorash O.V., Stepura Ju.P., Uskov A.E. Staticheskie preobrazovateli i stabilizatory avtonomnyh sistem jelektrosnabzhenija. – Krasnodar. – 2011. – 188 s.
10. Grigorash O.V., Bogatyrev N.I., Kurzin N.N., Tel'nov G.V. Jelektricheskie apparaty nizmogo naprjazhenija. – Krasnodar: KubGAU. – 2000. – 313 s.