
ЭЛЕКТРОТЕХНИКА

ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЕ КОМПЛЕКСЫ И СИСТЕМЫ (05.09.03)

УДК 621.314.57

DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-43-50

Бортовая система электроснабжения для электрических самолетов

С.И. Вольский, Н.В. Кузнецов, М.В. Юлдашев, Д.А. Сорокин, Р.В. Юлдашев

Создание электрических самолетов, в которых помимо отсутствия пневматических и гидравлических трансмиссий, будет использоваться электрическая тяга — одно из перспективных направлений в авиационной технике. В качестве примера приведен проект электрического самолета X-57 Maxwell, разрабатываемого NASA, оснащенного 14-ю тяговыми электрическими двигателями. С учетом недостаточной энергетической эффективности современных аккумуляторных батарей рассмотрена аккумуляторно-генераторная система электроснабжения для электрических самолетов. В ней тягу самолета обеспечивают электрические двигатели, а источником электрической энергии являются аккумуляторные батареи с магнитоэлектрическими генераторами. При этом ротор генератора вращает вспомогательный двигатель внутреннего сгорания, работающий в экономном режиме работы. Предложена силовая схема активного выпрямителя с двухполярным выходным напряжением +270 В, обеспечивающая синусоидальную форму кривой фазного тока магнитоэлектрического генератора и коэффициент мощности, близкий к единице. В системе управления активного выпрямителя использована модернизированная фазовая автоподстройка частоты (Enhanced Phase-Locked Loop), позволяющая исключить применение датчиков положения ротора генератора. Для определения областей устойчивости и выявления нежелательных скрытых аттракторов в анализируемой аккумуляторно-генераторной системе электроснабжения предложено применять специальные аналитико-численные вычислительные процедуры на базе модификаций методов функций Ляпунова. Настоящая работа представляет интерес для разработчиков как авиационных, так и наземных автономных систем электроснабжения с двухполярным напряжением 270 В постоянного тока, к которым предъявляются повышенные требования по улучшению массогабаритных и энергетических показателей.

Ключевые слова: магнитоэлектрический генератор, трехфазный активный выпрямитель, фазовая автоподстройка частоты, EPLL, устойчивость, скрытые аттракторы, электрический самолет.

Для цитирования: Вольский С.И., Кузнецов Н.В., Юлдашев М.В., Сорокин Д.А., Юлдашев Р.В. Бортовая система электроснабжения для электрических самолетов // Вестник МЭИ. 2021. № 2. С. 43—50. DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-43-50.

On-Board Power Supply System for Electric Aircraft

S.I. Volskiy, N.V. Kuznetsov, M.V. Yuldashev, D.A. Sorokin, R.V. Yuldashev

The development of electric aircraft, the design of which will use, apart from doing away with pneumatic and hydraulic transmissions, electric propulsion, is one of promising lines in aviation technology. As an example, the project of the X-57 Maxwell electric aircraft developed by NASA, which is equipped with 14 propulsion electric motors, is given. In view of insufficient energy efficiency of existing storage batteries, a combined storage battery-and-generator power supply system for electric aircraft is considered. In the considered system, the aircraft propulsion is provided by electric motors, which are powered by storage batteries in combination with permanent magnet generators. The generator shaft is rotated by an auxiliary internal combustion engine, which operates in an economical mode. The power circuit of an active rectifier producing the +270 V DC bipolar output voltage is proposed, with which the permanent magnet generator operates with a sinusoidal phase current waveform and a close-to-unity power factor. The active rectifier control system uses an

enhanced phase-locked loop, which eliminates the need to use generator rotor position sensors. For determining the stability domains and revealing undesirable hidden attractors in the considered storage battery-and-generator power supply system, it is proposed to use special analytical-numerical computation procedures based on modifications of Lyapunov's functions methods. The article will be of interest for developers of both aircraft and ground-based self-contained electric power supply systems with a bipolar 270 V DC voltage that must meet stringent requirements for improvement of their mass-and-dimensions and power performance characteristics.

Key words: permanent magnet generator, three-phase active rectifier, enhanced phase locked loop frequency control, stability, hidden attractors, electric aircraft.

For citation: Volskiy S.I., Kuznetsov N.V., Yuldashev M.V., Sorokin D.A., Yuldashev R.V. On-Board Power Supply System for Electric Aircrafts. Bulletin of MPEI. 2021;2:43—50. (in Russian). DOI: 10.24160/1993-6982-2021-2-43-50.

Введение

В настоящее время авиационные компании ведут разработки по созданию перспективных электрических самолетов, в которые, помимо отсутствия пневматических и гидравлических трансмиссий, будет включена электрическая тяга. В 2016 г. впервые состоялся полет спроектированного компанией Siemens электрического спортивно-пилотажного самолета Extra 330LE, способного поднять двух человек, включая пилота. Представленный аппарат массой 1000 кг оснащен электрическим двигателем мощностью 260 кВт и массой 50 кг, 14-ю блоками литий-ионных аккумуляторных батарей и может находиться в воздухе в течение 20 мин. К 2030 г. компания Siemens планирует разработать и внедрить региональный электрический самолет с возможностью перевозки 100 пассажиров на расстояние 1000 км.

В сентябре 2017 г. британская авиакомпания EasyJet объявила, что через десять лет выведет на линии электрический региональный лайнер с дальностью полета 540 км и вместимостью 180 пассажиров.

Переход на электрическую тягу открывает перспективы создания принципиально новых распределенных силовых установок самолетов [1], которые за счет обдува большим количеством винтов обеспечат требуемую подъемную силу при малой площади крыла. На крейсерском участке полета винты будут тянуть от маршевых электрических двигателей.

В качестве примера приведем разрабатываемый NASA проект электрического самолета X-57 Maxwell (рис. 1) с 14-ю тяговыми электрическими двигателями, размещенными вдоль крыла. Все моторы работают только во время взлета и посадки. На крейсерском участке задействованы лишь два маршевых двигателя, расположенных на концах крыльев. Подобное размещение двигателей позволяет снизить негативное влияние вихрей, возникающих в указанных местах.

Особое место при разработке электрических самолетов занимает система электроснабжения (СЭС).

Аккумуляторно-генераторная система электроснабжения электрического самолета

В качестве первичного источника электрической энергии в СЭС электрических самолетов возможно использование аккумуляторных батарей (АКБ). Однако на сегодняшний день самые лучшие современные АКБ

по энергетическим и экономическим параметрам более чем на порядок уступают углеводородному топливу. При этом нет уверенности, что в обозримом будущем произойдет революция в области электрических аккумуляторных технологий. По оптимистическим прогнозам, к 2030 г. самые перспективные АКБ улучшат свои показатели не более, чем в 2...3 раза.

В связи с этим до создания и широкого внедрения эффективных АКБ в качестве переходного решения целесообразно применять аккумуляторно-генераторные системы электроснабжения (АГСЭС). В предлагаемых системах тягу самолета обеспечат электрические двигатели, а источником электрической энергии станут АКБ с электрогенераторами, ротор которых будет вращать вспомогательный двигатель внутреннего сгорания (ДВС).

Данное решение вызвано следующими факторами. Известно, что при взлете и в ходе полета у самолета возникают различные по характеру энергетические потребности. При взлете на создание электрической тяги требуется максимальная мощность (длительность полета — несколько минут). На крейсерском участке (длительность — нескольких часов) на создание электрической тяги уходит в 4...5 раз меньше мощности.

На рисунке 1 в качестве примера представлены обобщенные зависимости мощности потребления P и затрачиваемой электрической энергии E от времени полета регионального самолета с электрической тягой.

Как следует из рис. 1, мощность потребления P при взлете (от 0 до t_1) более чем в три раза превышает мощность потребления на крейсерском участке (от t_1 до t_2).

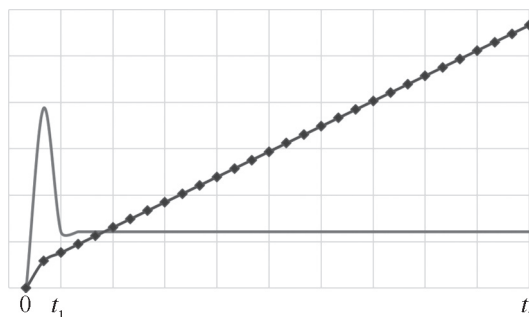


Рис. 1. Обобщенные зависимости мощности потребления P (—) и затрачиваемой электрической энергии E (◆) от времени полета регионального самолета:

0 — t_1 , t_1 — t_2 — длительности взлета и крейсерского участка полета

При этом расход электрической энергии E при взлете в 9 раз ниже расхода электрической энергии на крейсерском участке.

В связи с этим предложен следующий алгоритм функционирования АГСЭС. Во время взлета на электрическую тягу самолета приходится примерно 70% электрической энергии от АКБ и 30% — от электрогенераторов со вспомогательным ДВС. На крейсерском участке полета потребность в номинальной мощности с учетом подзаряда АКБ обеспечивается электрогенераторами со вспомогательным ДВС. В таком случае АКБ функционируют лишь малое время (только при взлете) и, соответственно, имеют вполне приемлемые массу и габариты. Электрогенераторы со вспомогательным ДВС задействованы на длительном крейсерском участке в одном и том же (самом экономически выгодном) режиме и, соответственно, также будут обладать наилучшими массогабаритными показателями и минимальным потреблением углеводородного топлива.

Подобное решение позволяет найти эффективный компромисс между возможностью АКБ отдавать за короткое время максимальную электрическую мощность и наилучшими удельными показателями электрогенераторов со вспомогательным ДВС при длительном функционировании в экономичных режимах работы.

Структурная схема аккумуляторно-генераторной системы электроснабжения

Исследование потенциального состава потребителей электрической энергии будущих самолетов позволяет сделать вывод о том, что перспективными являются СЭС с магистральным напряжением ± 270 В постоянного тока [2 — 6]. В структуру системы генерирования электрической энергии на борту самолета Boeing 787 уже входит ± 270 В постоянного тока.

На базе анализа технической литературы [3 — 11] и научно-исследовательских работ, проводимых под руководством ОАО «Объединенная авиастроительная корпорация» по проблеме полностью электрического самолета, в которых принимали участие ведущие предприятия (ОАО «ПКО «Теплообменник», ФГУП «НИИАО», ОАО «Электропривод», ОАО «Аэроэлектромаш», АО «АКБ Якорь» и т. п.), разрабатывающие отдельные системы и агрегаты электроэнергетических комплексов самолетов, предложена структурная схема одного канала АГСЭС, изображенная на рис. 2,

В представленной АГСЭС в качестве электромеханического генератора использован магнитоэлектрический генератор (МЭГ), ротор которого вращает вспомогательный ДВС. Выбор МЭГ связан с тем, что он имеет простую конструкцию, высокие массогабаритные показатели, повышенный КПД и малые эксплуатационные расходы. При этом, из-за отсутствия обмоток на роторе, он практически не имеет ограничений по частоте вращения вала и может функционировать

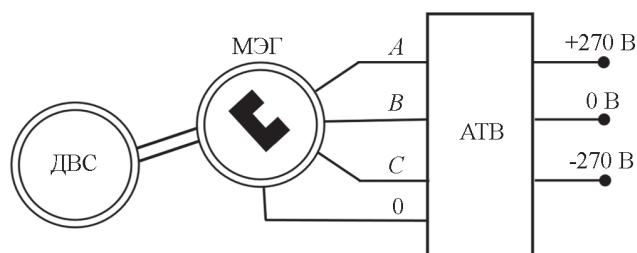


Рис. 2. Структурная схема одного канала АГСЭС:

ДВС — двигатель внутреннего сгорания; МЭГ — магнитоэлектрический генератор с возбуждением от постоянных магнитов; A, B, C — фазы; АТВ — трехфазный активный выпрямитель

в широком диапазоне температур эксплуатации. К его достоинству также следует отнести малые переходные и сверхпереходные реактансы.

Для повышения фазного напряжения МЭГ, формирования и стабилизации выходного двухполярного напряжения на уровне ± 270 В применен трехфазный активный выпрямитель (АВ), одновременно выполняющий функцию корректора мощности, благодаря чему фазный ток МЭГ имеет синусоидальную форму с минимально возможным количеством высших гармонических составляющих.

Применение АВ в АГСЭС позволяет:

- исключить переразмеривание и повысить КПД МЭГ за счет практически синусоидального тока потребления;
- обеспечить высокое быстродействие благодаря АКБ и возможностям микропроцессорного управления, что существенно снизит всплески и провалы выходного напряжения при работе АГСЭС на импульсную и динамическую нагрузки;
- выполнять простую параллельную работу с другими каналами АГСЭС и «горячее резервирование» за счет простого контроля уровня выходного напряжения и тока.

При этом АВ обеспечит практически любое качество выходного напряжения при любом характере нагрузки, имеет малые эксплуатационные расходы и не критичен к месту установки.

Таким образом, применение МЭГ совместно с АВ в перспективных АГСЭС позволяет достигнуть лучших массоэнергетических показателей при относительно низких эксплуатационных расходах и потенциально высокой надежности.

Силовая схема активного выпрямителя

С учетом проведенного анализа [12] для рассматриваемых АГСЭС в АВ целесообразно использование силовой схемы [13] (рис. 3). В ней ток в реакторах $L_1 \dots L_6$ любой фазы при нарастании протекает по одному диоду и транзистору, а при спаде — по двум диодам, что обеспечивает снижение потерь в силовых полупроводниковых приборах. Математические модели,

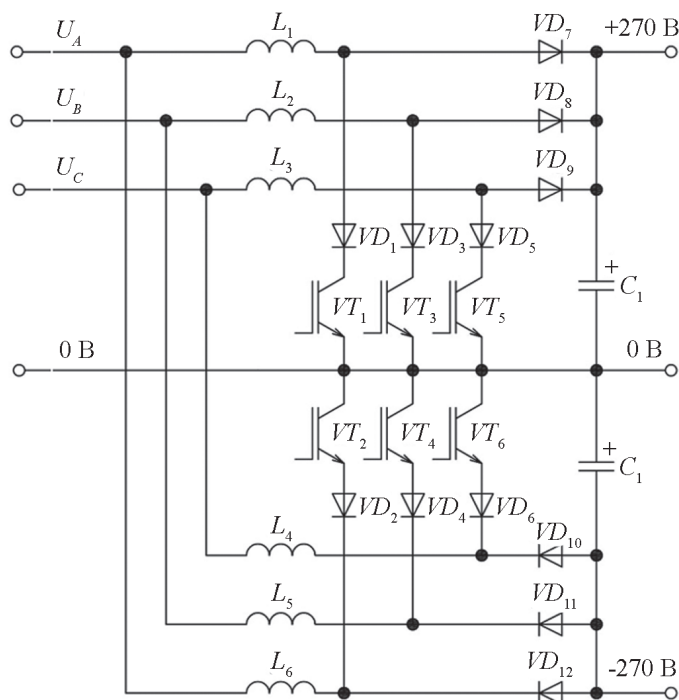


Рис. 3. Силовая схема АВ

блок-схема системы управления и функционирование выбранной силовой схемы АВ в штатных режимах работы и при наличии несимметричной двухполярной нагрузки подробно описаны в [14, 15]. Однако в указанных работах входное фазное напряжение поступает от промышленной сети, и его частота является постоянным параметром.

Частота вращения вала и, соответственно, частота и величина фазного напряжения МЭГ определяются требованием экономичного режима работы вспомогательного ДВС и зависят от подключенной нагрузки. В связи с этим система управления АВ должна в текущем времени осуществлять подстройку частоты коммутации транзисторов к частоте фазного напряжения МЭГ.

Подстройки частоты и синхронизации можно достичь с помощью схемы фазовой автоподстройки частоты (PLL), позволяющей не использовать датчик угла ротора МЭГ и устраняющей шум, увеличивая надежность. В настоящей работе использована Enhanced PLL (EPLL), специально созданная для работы совместно с МЭГ. По сравнению с классическим PLL, предлагаемая EPLL позволяет одновременно оценить выходную частоту и амплитуду входного сигнала [16 — 22]. Структурная схема EPLL дана на рис. 4.

Предложенная EPLL является нелинейной системой управления, состоящей из фазово-амплитудного детектора, подстраиваемого генератора и фильтра. Ее математическая модель описывается системой неавтономных дифференциальных уравнений, анализ которых — достаточно сложная задача. Используя идеи метода усреднения, аналогично [21], можно доказать,

что динамика EPLL асимптотически близка к динамике фазовой модели на рис. 5 и описывается следующей системой автономных дифференциальных уравнений:

$$\begin{aligned} \dot{x} &= \frac{1}{2} u \sin \theta_e; \\ \dot{v} &= \frac{\mu}{2} (-v + u \cos \theta_e); \\ \dot{\theta}_e &= \omega_{ref} - \omega_{VCO}^{free} - K_{VCO} \left(\frac{x}{\tau_1} + \frac{\tau_2}{2\tau_1} (u \sin \theta_e) \right), \end{aligned}$$

где $\mu > 0$ — коэффициент усиления обратной связи; u — амплитуда МЭГ; θ_e — разность фаз сигналов VCO и МЭГ; ω_{ref} — входная частота; $F(s) = (\tau_2 s + 1)/(\tau_1 s)$ — передаточная функция фильтра с начальными данными $x(0)$; ω_{VCO}^{free} — собственная частота VCO; $1/s$ — интегратор; $K_{VCO} > 0$ — коэффициент усиления.

Модель в пространстве фаз сигналов имеет следующие состояния равновесия, соответствующие состояниям равновесия исходной модели:

$$\begin{aligned} v_{eq1} &= u; x_{eq1} = \frac{\omega_{VCO}^{free}}{K_{VCO}}; \theta_{eq1} = 2\pi k; \\ v_{eq2} &= -u; x_{eq2} = \frac{\omega_{VCO}^{free}}{K_{VCO}}; \theta_{eq2} = \pi + 2\pi k, k \in Z. \end{aligned}$$

Применив обобщение метода Ляпунова для цилиндрического фазового пространства [18], можно доказать, что система стремится к стационарному состоянию для любого начального состояния системы,

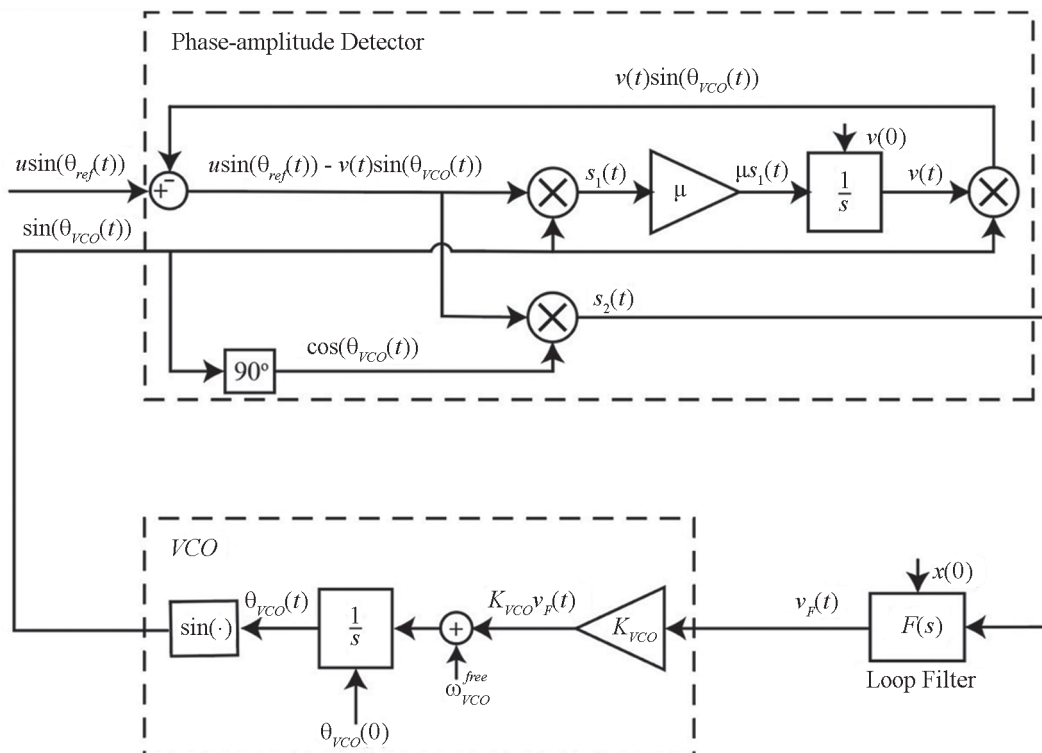


Рис. 4. Структурная схема EPLL

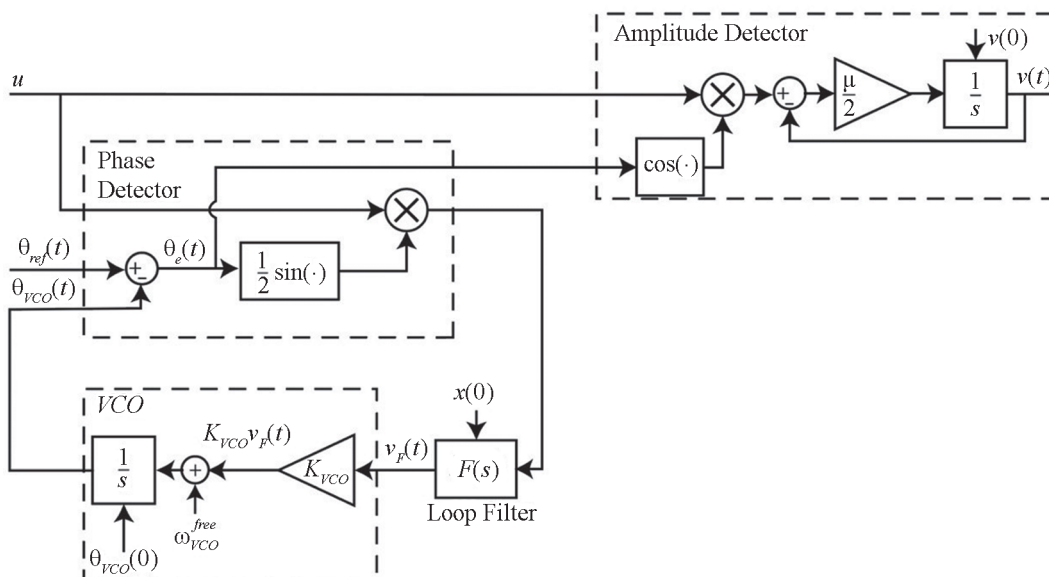


Рис. 5. Модель фазового контура

начальных сдвигов частоты и амплитуды. Таким образом, диапазон захвата (pull-in) рассмотренной EPLL — бесконечен. При этом скачок частоты, ведущий к проскальзыванию циклов (pull-out), ограничен и может быть оценен следующим образом:

$$\omega_{pull-out} \approx \sqrt{\frac{3}{2} \frac{K_0}{\tau_1}} + \frac{K_0^2 \tau_2}{3\tau_1^2}.$$

Таким образом, при меньших скачках частоты имеет место быстрая синхронизация без проскальзывания циклов.

Следует отметить, что достоверное моделирование и численный анализ устойчивости АГСЭС достаточно сложны. В общем случае потеря глобальной устойчивости в схемах на основе EPLL может привести к скрытым колебаниям [18], которые нельзя обнаружить небольшими изменениями стационарных состояний.

Для их поиска потребуются специальные аналитико-численные процедуры. Таким образом, на первом шаге необходимо аналитически оценить область параметров, соответствующих глобальной устойчивости и быстрой подстройке, а лишь затем проводить численную оптимизацию параметров внутри полученной области.

Заключение

Применение аккумуляторно-генераторных систем электроснабжения в самолетах с электрической тягой позволяет найти эффективный компромисс между возможностью АКБ отдавать в короткое время максимальную электрическую мощность и наилучшими удельными показателями электромеханических генераторов со вспомогательным ДВС

Литература

1. Макаров О. Вверх на электричестве: электросамолеты будущего // Популярная механика. 2018. № 1(183). С. 64—70.
2. Левин А.В., Алексеев И.И., Харитонов С.А., Ковалев Л.К. Электрический самолет: от идеи до реализации. М.: Изд-во Машиностроение, 2010.
3. Резников С.Б., Бочаров В.В., Кириллов В.Ю., Постников В.А. Электроэнергетическая и электромагнитная совместимость транспортного электрооборудования с высоковольтными цепями питания. М.: Изд-во «МАИ-Принт», 2010.
4. Бочаров В.В., Постников В.А., Резников С.Б., Харченко И.А. Энергоэкономичная комбинированная система электроснабжения с высоким качеством электроэнергии для концепции «полностью электрифицированного самолета» // Труды МАИ. 2012. № 58. С. 2—14.
5. Левин А.В., Мусин С.М., Харитонов С.А., Ковалев К.Л., Герасин А.А., Халютин С.П. Электрический самолет: концепция и технологии. Уфа: Изд-во УГАТУ, 2014.
6. Moir I., Seabridge A. Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration. N.-Y.: John Wiley&Sons Ltd., 2008.
7. Харитонов С.А. Система «синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов — активный выпрямитель» (математическая модель) // Электротехника. 2009. № 12. С. 33—42.
8. Бачурин П.А., Коробков Д.В., Харитонов С.А., Хлебников А.С. Система электропитания постоянного тока с магнитоэлектрическим генератором // Энергосбережение. Энергетика. Энергоаудит. 2016. № 3(146). С. 26—32.
9. Бачурин П.А. и др. Системы генерирования электрической энергии постоянного тока на базе магнитоэлектрического генератора и активного вы-

при длительном функционировании в экономичных режимах работы.

Использование МЭГ со вспомогательным ДВС совместно с АВ в АГСЭС улучшает массоэнергетические показатели при относительно низких эксплуатационных расходах и потенциально высокой надежности.

Модификация прямого метода Ляпунова для цилиндрического фазового пространства помогает качественно провести анализ глобальной устойчивости и оценить диапазон частот быстрой синхронизации применительно к предложенной АГСЭС.

Настоящая работа представляет технический интерес для разработчиков как авиационных, так и автономных наземных систем электроснабжения с двухполярным напряжением, в частности, на уровне 270 В постоянного тока.

References

1. Makarov O. Vverkh na Elektrichestve: Elektrosamolety Budushchego. Populyarnaya Mekhanika. 2018; 1(183):64—70. (in Russian).
2. Levin A.V., Alekseev I.I., Kharitonov S.A., Kovalev L.K. Elektricheskiy Samolet: ot Idei do Realizatsii. M.: Izd-vo Mashinostroenie, 2010. (in Russian).
3. Reznikov S.B., Bocharov V.V., Kirillov V.Yu., Postnikov V.A. Elektroenergeticheskaya i Elektromagnitnaya Sovmestimost' Transportnogo Elektrooborudovaniya s Vysokovol'tnymi Tsepyami Pitaniya. M.: Izd-vo «MAI-Print», 2010. (in Russian).
4. Bocharov V.V., Postnikov V.A., Reznikov S.B., Kharchenko I.A. Energoekonomichnaya Kombinirovannaya Sistema Elektrosnabzheniya s Vysokim Kachestvom Elektroenergii dlya Kontseptsii «Polnost'yu Elektrifitsirovannogo Samoleta». Trudy MAI. 2012;58:2—14. (in Russian).
5. Levin A.V., Musin S.M., Kharitonov S.A., Kovalev K.L., Gerasin A.A., Khalyutin S.P. Elektricheskiy Samolet: Kontseptsiya i Tekhnologii. Ufa: Izd-vo UGATU, 2014. (in Russian).
6. Moir I., Seabridge A. Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration. N.-Y.: John Wiley&Sons Ltd., 2008.
7. Kharitonov S.A. Sistema «Sinkhronnyy Generator s Vozbuzhdeniem ot Postoyannykh Magnitov — Aktivnyy Vypryamitel'» (Matematicheskaya Model'). Elektrotekhnika. 2009;12:33—42. (in Russian).
8. Bachurin P.A., Korobkov D.V., Kharitonov S.A., Khlebnikov A.S. Sistema Elektropitaniya Postoyannogo Toka s Magnitoelektricheskim Generatorom. Energosberezhenie. Energetika. Energoaudit. 2016;3(146):26—32. (in Russian).
9. Bachurin P.A. i dr. Sistemy Generirovaniya Elektricheskoy Energii Postoyannogo Toka na Baze Magnitoelektricheskogo Generatorsa i Aktivnogo Vypryamitel'

прямителя // Научный вестник НГТУ. 2015. № 2(59). С. 43—58.

10. **Волков А.Г.** Многозонные электронные конвертеры для автономных систем генерирования электрической энергии: дис. ... канд. техн. наук. Новосибирск: Новосибирский гос. техн. ун-т, 2016.

11. **Clements N., Venkataramanan G., Johns T.M.** Design Considerations for Stator Side Voltage Regulated Permanent Magnet AC Generator // Proc. Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, 2009. Pp. 2763—2770.

12. **Сорокин Д.А., Вольский С.И.** Сопоставительный анализ схемотехнических решений трехфазных преобразователей AC/DC // Электроника и электрооборудование транспорта (ЭЭТ). 2018. № 5. С. 10—15.

13. **Пат. № 192844 РФ.** Трехфазный преобразователь переменного тока в постоянный с повышенным коэффициентом мощности / Д.А. Сорокин, С.И. Вольский // Бюл. изобрет. 2019. № 28.

14. **Sorokin D., Volskiy S., Skorokhod Y.** Development of the Control System for Three phase Power Factor Corrector // Proc. Intern. Sci. and Techn. Conf. Smart Energy Syst. Nurnberg, 2019. Pp. 1813—1819.

15. **Сорокин Д.А., Вольский С.И.** Математическая модель трехфазного преобразователя переменного тока с двухполярной несбалансированной нагрузкой // Практическая силовая электроника. 2019. № 2(74). С. 2—7.

16. **Karimi-Ghartemani M.** Enhanced Phase-locked Loop Structures for Power and Energy Applications. N.-Y.: John Wiley&Sons. 2014.

17. **Karimi-Ghartemani M., Ooi B.T., Bakhshai A.** Application of Enhanced Phase-locked Loop System to the Computation of Synchrophasor // IEEE Trans. Power Delivery. 2011. No. 26(1). Pp. 22—32.

18. **Leonov G. e. a.** Hold-in, Pull-in, and Lock-in Ranges of PLL Circuits: Rigorous Mathematical Definitions and Limitations of Classical Theory // IEEE Trans. Circuits and Systems-I: Regular Papers. 2015. V. 62. No. 10. Pp. 2454—2464.

19. **Alexandrov K. e. a.** Pull-in Range of the PLL Based Circuits with Proportionally-integrating Filter // IFAC-Papers On-line. 2015. V. 48. No. 11. Pp. 720—724.

20. **Karimi-Ghartemani M. e. a.** A New Phase-locked Loop System for Three-phase Applications // IEEE Trans. Power Electronics. 2013. No. 28(3). Pp. 1208—1218.

21. **Leonov G.A., Kuznetsov N.V., Yuldashev M.V., Yuldashev R.V.** Analytical Method for Computation of Phase-detector Characteristic // IEEE Trans. Circuits and Systems II: Express Briefs. 2012. V. 59(10). Pp. 633—637.

22. **Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M.** Calculation of IGBT Power Losses and Junction Temperature in Inverter Drive // Proc. VIII Intern. Conf. Modelling, Identification and Control. Algiers, 2016. Pp. 768—773.

telya. Nauchnyy Vestnik NGTU. 2015;2(59):43—58. (in Russian).

10. **Volkov A.G.** Mnogozonnye Elektronnye Konvertory dlya Avtonomnykh Sistem Generirovaniya Elektricheskoy Energii: Dis. ... Kand. Tekhn. Nauk. Novosibirsk: Novosibirskiy Gos. Tekhn. Un-t, 2016. (in Russian).

11. **Clements N., Venkataramanan G., Johns T.M.** Design Considerations for Stator Side Voltage Regulated Permanent Magnet AC Generator. Proc. Energy Conversion Congress and Exposition. San Jose, 2009: 2763—2770.

12. **Sorokin D.A., Vol'skiy S.I.** Sopostavitel'nyy Analiz Skhemotekhnicheskikh Resheniy Trekhfaznykh Preobrazovateley AC/DC. Elektronika i Elektrooborudovanie Transporta (EET). 2018;5:10—15. (in Russian).

13. **Pat № 192844 RF.** Trekhfaznyy Preobrazovatel' Peremennogo Toka v Postoyannyy s Povyshennym Koeffitsientom Moshchnosti. D.A. Sorokin, S.I. Vol'skiy. Byul. Izobret. 2019;28. (in Russian).

14. **Sorokin D., Volskiy S., Skorokhod Y.** Development of the Control System for Three phase Power Factor Corrector. Proc. Intern. Sci. and Techn. Conf. Smart Energy Syst. Nurnberg, 2019:1813—1819.

15. **Sorokin D.A., Vol'skiy S.I.** Matematicheskaya Model' Trekhfaznogo Preobrazovatelya Peremennogo Toka s Dvukhpolyarnoy Nesbalansirovannoy Nagruzkoy. Prakticheskaya Silovaya Elektronika. 2019;2(74):2—7. (in Russian).

16. **Karimi-Ghartemani M.** Enhanced Phase-locked Loop Structures for Power and Energy Applications. N.-Y.: John Wiley&Sons. 2014.

17. **Karimi-Ghartemani M., Ooi B.T., Bakhshai A.** Application of Enhanced Phase-locked Loop System to the Computation of Synchrophasor. IEEE Trans. Power Delivery. 2011;26(1):22—32.

18. **Leonov G. e. a.** Hold-in, Pull-in, and Lock-in Ranges of PLL Circuits: Rigorous Mathematical Definitions and Limitations of Classical Theory. IEEE Trans. Circuits and Systems-I: Regular Papers. 2015;62;10: 2454—2464.

19. **Alexandrov K. e. a.** Pull-in Range of the PLL Based Circuits with Proportionally-integrating Filter. IFAC-Papers On-line. 2015;48;11:720—724.

20. **Karimi-Ghartemani M. e. a.** A New Phase-locked Loop System for Three-phase Applications. IEEE Trans. Power Electronics. 2013;28(3):1208—1218.

21. **Leonov G.A., Kuznetsov N.V., Yuldashev M.V., Yuldashev R.V.** Analytical Method for Computation of Phase-detector Characteristic. IEEE Trans. Circuits and Systems II: Express Briefs. 2012;59(10):633—637.

22. **Bouzida A., Abdelli R., Ouadah M.** Calculation of IGBT Power Losses and Junction Temperature in Inverter Drive. Proc. VIII Intern. Conf. Modelling, Identification and Control. Algiers, 2016:768—773.

Сведения об авторах:

Вольский Сергей Иосифович — доктор технических наук, профессор Московского авиационного института, генеральный директор ООО «Трансконвертер», e-mail: volsky-s@yandex.ru

Кузнецов Николай Владимирович — доктор физико-математических наук, профессор, заведующий кафедрой прикладной кибернетики Санкт-Петербургского государственного университета, заведующий лабораторией информационно-управляющих систем Института проблем машиноведения РАН, e-mail: nkuznetsov239@gmail.com

Юлдашев Марат Владимирович — доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, e-mail: maratyv@gmail.com

Сорокин Дмитрий Александрович — инженер-конструктор ООО «Трансконвертер», e-mail: sorokin@transconverter.ru

Юлдашев Ренат Владимирович — доктор физико-математических наук, профессор Санкт-Петербургского государственного университета, e-mail: renatyv@pm.me

Information about authors:

Volskiy Sergey I. — Dr.Sci. (Techn.), Professor of Moscow Aviation Institute, General Director of LLC «Transconverter», e-mail: volsky-s@yandex.ru

Kuznetsov Nikolay V. — Dr.Sci. (Phys.-math.), Professor, Head of Applied Cybernetics Dept., St. Petersburg State University, Head of Information and Control Systems Laboratory, Institute of Machine Science Problems of the Russian Academy of Sciences, e-mail: nkuznetsov239@gmail.com

Yuldashev Marat V. — Dr.Sci. (Phys.-math.), Professor of St. Petersburg State University, e-mail: maratyv@gmail.com

Sorokin Dmitriy A. — Design Engineer of LLC «Transconverter», e-mail: sorokin@transconverter.ru

Yuldashev Renat V. — Dr.Sci. (Phys.-math.), Professor of St. Petersburg State University, e-mail: renatyv@pm.me

Конфликт интересов: авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов

Conflict of interests: the authors declare no conflict of interest

Статья поступила в редакцию: 25.06.2020

The article received to the editor: 25.06.2020