

УДК 621.341.572

Система генерирования электрической энергии постоянного тока на базе магнитоэлектрического генератора и активного выпрямителя*

**П.А. БАЧУРИН¹, А.В. ГЕЙСТ², Д.В. КОРОБКОВ³, Д.В. МАКАРОВ⁴,
А.Н. РЕШЕТНИКОВ⁵, С.А. ХАРИТОНОВ⁶**

¹ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, ассистент. E-mail: bach_rp@mail.ru

² 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель. E-mail: andrey.geist@gmail.com

³ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель. E-mail: kre@ngs.ru

⁴ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, младший научный сотрудник, кандидат технических наук. E-mail: rcreal2002@ngs.ru

⁵ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, старший преподаватель. E-mail: reshetnikov@ngs.ru

⁶ 630073, РФ, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20, Новосибирский государственный технический университет, доктор технических наук, профессор. E-mail: Kharitonov@corp.nstu.ru

Анализируется вариант построения автономной системы генерирования электрической энергии постоянного тока 270 В мощностью 120 кВт на базе магнитоэлектрического генератора и активного выпрямителя. Магнитоэлектрический генератор предназначен для преобразования механической энергии авиационного двигателя в электрическую. Достоинствами магнитоэлектрического генератора является то, что он имеет простую конструкцию, повышенный КПД и меньшие эксплуатационные расходы, но напряжение на выходе магнитоэлектрического генератора меняется в два раза, так как оно пропорционально частоте вращения вала генератора, которая, в свою очередь, имеет практический двойной диапазон изменения. В статье предлагается добиться стабилизации выходного напряжения активного выпрямителя за счет изменения фазы входного тока при двойном диапазоне изменения оборотов вала магнитоэлектрического генератора, а следовательно, и двойном диапазоне изменения входного напряжения активного выпрямителя. На низких оборотах с максимальной нагрузкой, когда входного напряжения недостаточно для формирования требуемого напряжения, путем формирования опережающего (емкостного) входного тока можно довозбудить генератор и поднять напряжение до требуемой величины. На высоких оборотах и холостом ходу путем формирования отстающего (индуктивного) тока снижается величина суммарного потокосцепления в зазоре генератора и его излишнее напряжение опускается до требуемой величины. С помощью анали-

* Статья получена 09 февраля 2015 г.

тического и имитационного моделирования определены основные энергетические характеристики в различных режимах работы системы с предложенным способом стабилизации выходного напряжения. Моделирование показало, что полная мощность генератора на 11 % превышает максимальную мощность нагрузки, а наилучшие энергетические показатели системы получились при частоте генератора 1000 Гц и диапазоне нагрузок 50...100 %, что по условиям расчетов соответствует крейсерской скорости самолета. В силу известных принципов работы полупроводникового преобразователя на базе инвертора напряжения существует возможность изменить направление потока мощности без применения дополнительного коммутационного оборудования, т. е. рассматриваемый активный выпрямитель в составе системы генерирования при наличии источника в звене постоянного тока может применяться для реализации электро-стартерного запуска.

Ключевые слова: система генерирования, автономная система, синхронная машина с постоянными магнитами, подмагничивающая и размагничивающая реакция якоря, стабилизация напряжения, активный выпрямитель, коэффициент мощности, энергетические показатели

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-2-43-58

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время фактически все бортовое оборудование летательного аппарата в той или иной степени является потребителем электроэнергии, при этом с развитием авиационно-космической техники повышается количество систем оборудования, потребляющих только электрическую энергию. Наряду с этим неуклонно увеличивается общее энергопотребление, что делает установленную мощность электростанций некоторых самолетов соизмеримой с мощностью подстанций небольших городов [1].

На существующих самолетах и вертолетах в основном применяются системы электроснабжения постоянного тока 27 В, переменного тока постоянной частоты 115/200 В 400 Гц и переменной частоты. В последнее время, с увеличением мощности потребителей, становится актуальным переход на системы электроснабжения постоянного тока с повышенным напряжением. Так, например, в структуре системы генерирования электрической энергии на борту самолета Boeing 787, в котором нашли свое применение самые последние достижения в области авиастроения, широко применяется система электроснабжения постоянного тока ± 270 В [2].

Вопрос о выборе типа систем электроснабжения перспективных летательных аппаратов достаточно широко обсуждается в течение многих лет, причем уже в 1970-х гг. отмечалась перспективность систем постоянного тока повышенного напряжения. Ожидается, что в наибольшей степени преимущества такой системы реализуются в самолетах с полностью электрифицированным оборудованием СПЭО (наиболее полно системы 270 В отвечают требованиям таких ответственных элементов СПЭО, как электромеханический привод и электронные системы управления).

Помимо этого, в качестве преимуществ такой системы электроснабжения над традиционными системами электроснабжения переменного тока отмечают следующее:

- снижение общей массы системы электроснабжения на 25 %;
- снижение массы электронных устройств контроля и управления на 40 %;
- улучшение качества электроэнергии (в частности, в переходных режимах);

- повышенный на 15 % КПД системы;
- исключение перерывов в питании [1].

В данной статье рассматривается система генерирования постоянного напряжения 270 В (СГПН-270В) мощностью 120 кВт на базе магнитоэлектрического генератора и активного выпрямителя. С помощью имитационного моделирования проверяется возможность применения в системе электро-снабжения стабилизации выходного напряжения активного выпрямителя (АВ) за счет изменения фазы входного тока.

1. СХЕМА СГПН-270В НА БАЗЕ МЭГ И АВ

Рассматриваемая система генерирования, состоящая из магнитоэлектрического генератора (МЭГ) и активного выпрямителя, показана на рис. 1.

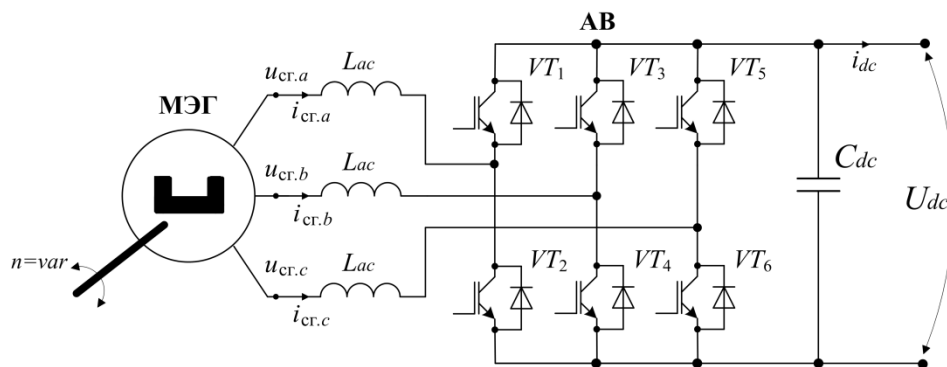


Рис. 1. Схема СГПН-270В на базе МЭГ и АВ

МЭГ предназначен для преобразования механической энергии авиационного двигателя в электрическую. Достоинствами МЭГ является то, что он имеет простую конструкцию, повышенный КПД и меньшие эксплуатационные расходы [9].

Особенность рассматриваемой системы от аналогичных, широко применяемых в авиации сейчас, заключается в отсутствии в звене передачи механической энергии от двигателя к генератору громоздких приводов постоянной частоты вращения. Это улучшает массогабаритные и эксплуатационные показатели, а также увеличивает КПД и надежность системы.

У данного варианта есть и важный недостаток: напряжение на выходе МЭГ меняется в два раза, так как оно пропорционально частоте вращения вала генератора, которая, в свою очередь, имеет практический двойной диапазон изменения. Этот недостаток компенсируется работой активного выпрямителя, выполняющего функции выпрямителя и стабилизатора выходного напряжения [7, 8, 13]. Стабилизация выходного напряжения достигается путем изменения глубины модуляции АВ и изменения фазы генерируемого входного тока относительно напряжения генератора.

Для получения лучших энергетических характеристик и массогабаритных показателей предлагается выбрать параметры генератора так, чтобы рабочая точка, соответствующая номинальной мощности с единичным входным $\cos(\varphi)$, находилась в середине диапазона изменения оборотов вращения. Тогда на низких оборотах с максимальной нагрузкой, когда входного напря-

жения недостаточно для формирования требуемого напряжения, путем формирования опережающего (емкостного) входного тока можно «довозбудить» генератор и поднять напряжение до требуемой величины. На высоких оборотах и холостом ходу путем формирования отстающего (индуктивного) тока снижается величина суммарного потокосцепления в зазоре генератора и его излишнее напряжение опускается до требуемой величины. Так достигается стабилизация выходного напряжения во всем диапазоне изменения частоты вращения вала генератора [7, 10].

Благодаря использованию широтно-импульсной модуляции (ШИМ) АВ может формировать входной ток синусоидальной формы, что является еще одним достоинством данной схемы. Но в этом есть и недостаток: из-за ШИМ появляются динамические потери в транзисторах и снижается КПД.

Применение в качестве АВ инвертора напряжения (ИН) с ШИМ на частоте ($\omega_{\text{ШИМ}}$), значительно большей частоты напряжения магнитоэлектрического генератора ($\omega_{\text{СГ}}$), позволяет реализовать ряд преимуществ, существенно влияющих на установленную мощность генератора в составе СГЭЭ [16, 20].

АВ на базе ИН с ШИМ позволяет следующее [15]:

- реализовать потребление практически синусоидального тока от МЭГ [6, 7, 11];
- регулировать коэффициент мощности потребляемой энергии от МЭГ [14, 19, 20];
- осуществлять глубокое регулирование выходного напряжения, включая возможность его повышения [12, 18].

Особенностью системы является то, что при изменении скорости вращения вала изменяется частота и величина ЭДС МЭГ, это значительно влияет на режимы работы АВ.

Исследование системы проводилось в два этапа:

- с помощью аналитической модели;
- посредством имитационного моделирования с помощью специализированного пакета программ PSIM.

2. АНАЛИТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ

Допущения:

- учитывая, что $\omega_{\text{ШИМ}} \gg \omega_{\text{СГ}}$, расчет ведется по основной гармонике напряжения СГ;
- напряжение $u_{dc} \approx U_{dc}$, т. е. пульсации отсутствуют;
- магнитная система СГ ненасыщенна.

Математическая модель электрических цепей магнитоэлектрического синхронного генератора (СГ) и входных цепей ИН во вращающейся синхронно с ротором системе координат (dq) при условии ориентации оси d по продольной оси СГ будет иметь вид [1]:

$$u = Ri + \frac{d}{dt}\psi + \omega\psi,$$

$$\psi = Li + \psi_f.$$

Выбрав в качестве переменных токи СГ и переходя к скалярной форме записи, получим

$$\begin{aligned} u_d &= i_d r_s + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q, \\ u_q &= i_q r_s + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \Psi_f, \end{aligned} \quad (1)$$

где U_d, U_q, i_d, i_q – напряжения и токи во входной цепи ИН; $L_d = L_f + L_s + L_{ad}$ и $L_q = L_f + L_s + L_{aq}$ – эквивалентные индуктивности СГ и фидера связи СГ с ИН; ω, Ψ_f – циклическая частота ЭДС СГ и потокосцепление, обусловленное постоянными магнитами.

Входные напряжения ИН (U_d, U_q) связаны с напряжениями в системе управления (U_{yd}, U_{yq}) соотношением вида

$$\begin{bmatrix} u_d & u_q \end{bmatrix}^t = k_U \begin{bmatrix} u_{yd} & u_{yq} \end{bmatrix}^t,$$

где коэффициент усиления ИН k_U определяется как

$$k_U = \begin{cases} U_n / 2U_{on} & \text{– при синусоидальной ШИМ,} \\ U_n / \sqrt{3}U_{on} & \text{– при SVPWM.} \end{cases}$$

Активная (P), реактивная (Q) и полная мощности (S) на входе ИН определялись с помощью известных соотношений [1]:

$$\begin{cases} P = \frac{3}{2}(u, i) = \frac{3}{2}(u_d i_d + u_q i_q), \\ Q = \frac{3}{2}[u, i] = \frac{3}{2}(u_d i_q - u_q i_d), \\ S = [P^2 + Q^2]^{\frac{1}{2}}. \end{cases} \quad (2)$$

Полагая $L_d \approx L_q$, $L_f = 0$ и вводя относительные единицы с базовыми величинами вида $\omega_6 = \omega_{\min}$ – минимальная циклическая частота ЭДС СГ, $U_6 = \omega_{\min} \Psi_f$, $S_6 = 3(U_6)^2 / 2\omega_6 L_d$, используя уравнения (1) и (2), получим

$$\frac{\left(u_d^* - \frac{\omega^*}{2} \operatorname{tg}(\varphi)\right)^2}{\left(\frac{\omega^*}{2 \cos(\varphi)}\right)^2} + \frac{\left(u_q^* - \frac{\omega^*}{2}\right)^2}{\left(\frac{\omega^*}{2 \cos(\varphi)}\right)^2} = 1, \quad (3)$$

где φ – угол сдвига между выходным напряжением и током СГ.

Соотношение (3) представляет собой уравнение окружности с центром в точке с координатами $(\operatorname{tg}(\varphi)\omega^*/2, \omega^*/2)$ и радиусом $R_2 = \omega^*/2\cos(\varphi)$.

Для случая, когда коэффициент мощности СГ равен единице (в предлагаемой модели это соответствует условию $\varphi = 0$), годограф напряжений U_d и U_q будет иметь вид, приведенный на рис. 2. Как следует из рис. 2, при условии $\cos(\varphi) = 1$ напряжение СГ должно существенно изменяться при изменении частоты вращения вала СГ. Для поддержания постоянства напряжения на нагрузке появится необходимость снижения глубины модуляции в ИН, что приведет к значительному снижению коэффициента искажений тока СГ [1] и, как следствие, к уменьшению коэффициента мощности СГ.

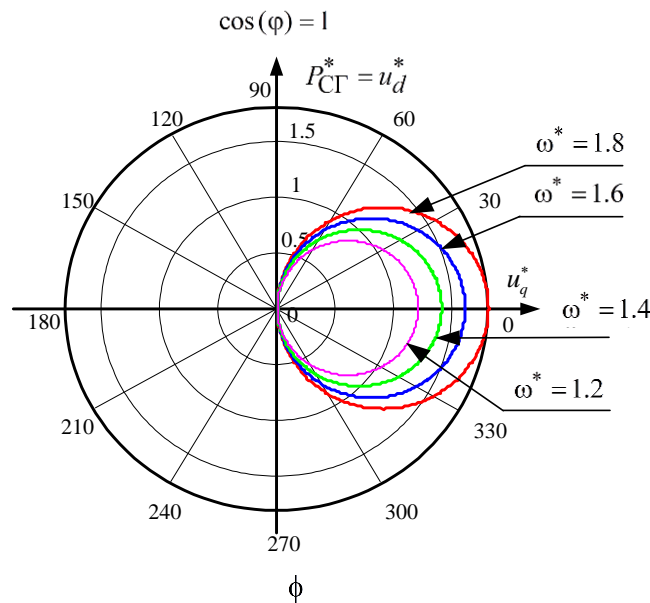


Рис. 2. Годограф напряжений U_d и U_q при $\cos(\varphi) = 1$

Для получения оптимальных энергетических характеристик и массогабаритных показателей системы предлагается выбрать параметры генератора так, чтобы рабочая точка, соответствующая номинальной мощности с $\cos(\varphi) = 1$, соответствовала бы крейсерской скорости самолета. Тогда на низких оборотах с максимальной нагрузкой, когда входного напряжения недостаточно для формирования требуемого напряжения, путем формирования опережающего (емкостного) входного тока можно «довозбудить» генератор и поднять напряжение до требуемой величины. На высоких оборотах и холостом ходу путем формирования отстающего (индуктивного) тока снижается величина суммарного потокосцепления в зазоре генератора и напряжение уменьшается до требуемой величины. Некоторые энергетические характеристики системы для такого выбора параметров приведены на рис. 3.

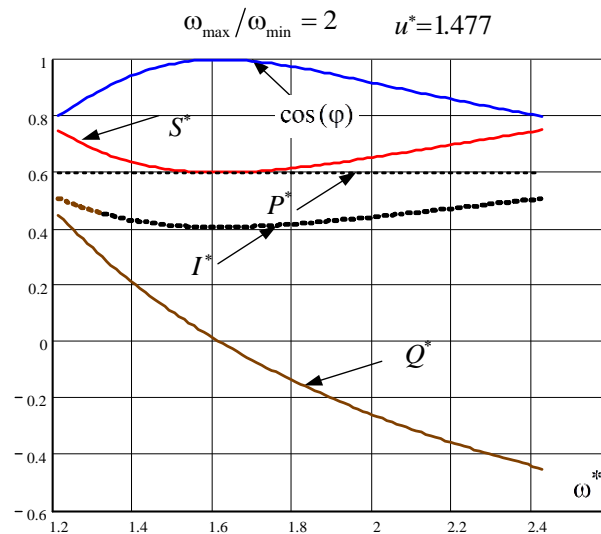


Рис. 3. Зависимость энергетических параметров СГ от частоты вращения вала

Данный способ выбора параметров был принят при проведении имитационного моделирования.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ ИМИТАЦИОННОГО МОДЕЛИРОВАНИЯ

Имитационное моделирование проводится с помощью специализированного пакета программ *PSIM*, предназначенного для моделирования устройств силовой электроники совместно с электромеханическими устройствами.

Основные электрические параметры системы генерирования.

1. Номинальная выходная мощность 120 кВт.
2. Номинальное выходное напряжение 270 В.
3. Требования к качеству выходного напряжения по ГОСТ Р 54073-2010.
4. Частота вращения вала СГ $n = 8000 \dots 16\,000$ об/мин, частота напряжения МЭГ $f_{\Gamma} = 800 \dots 1600$ Гц.
5. Распределение нагрузки в функции частоты вращения вала МЭГ:
 - 50 % от номинальной нагрузки (длительно) в диапазоне $n = 8000 \dots 10\,000$ об/мин;
 - 100 % от номинальной нагрузки (длительно) в диапазоне $n = 10\,000 \dots 16\,000$ об/мин;
 - 150 % от номинальной нагрузки (кратковременно) в диапазоне $n = 13\,000 \dots 16\,000$ об/мин.
6. Ток короткого замыкания кратностью не менее трех от номинального значения (кратковременно).

Упрощенную модель генератора с возбуждением от постоянных магнитов можно представить схемой замещения в виде последовательной *RLE*-цепи, так как в общем случае МЭГ является неявнополюсной машиной. На основании данных из предварительных расчетов МЭГ на соответствующую мощность и уровень выходного напряжения активное сопротивление фазы генератора

можно принять равным 20 мОм, индуктивность 20 мкГн, зависимость действующего значения фазной ЭДС генератора $E_{сг.rms}$ от частоты $f_{Г}$:

$$E_{сг.rms} = 0,121 f_{Г}.$$

В отличие от ранее рассмотренной схемы, показанной на рис. 1, при моделировании использовалась немного модифицированная схема, которая приведена на рис. 4. Изменения заключаются в том, что для распределения токовой нагрузки применен не один модуль АВ, а восемь параллельно включенных модулей, и, чтобы равномерно распределить токи, в каждом модуле установлены свои дроссели величиной 100 мкГн, к точке подключения дросселей каждой фазы подключен фильтровой конденсатор емкостью 0,1 мкФ [17]. Емкость конденсатора звена постоянного тока 9,9 мФ. Частота ШИМ 75 кГц. Анализ электромагнитных процессов в подобных модульных преобразователях рассмотрен в работе [5].

Для оценки КПД использована тепловая модель транзистора IXFN110N60P3 компании IXYS в пакете программ PSIM.

На рис. 5 приведены зависимости коэффициента мощности генератора от частоты генерируемого напряжения и мощности нагрузки. Как предполагалось, на номинальной нагрузке в середине диапазона изменения частоты генератора коэффициент мощности близок к единице, с уменьшением нагрузки и изменением частоты он уменьшается, при этом с уменьшением частоты генератора входной ток преобразователя опережает напряжение, а с увеличением частоты – отстает, что хорошо видно на эпюрах, показанных на рис. 6–8. На этих же эпюрах видно, что система формирует на выходе заданное напряжение величиной 270 В.

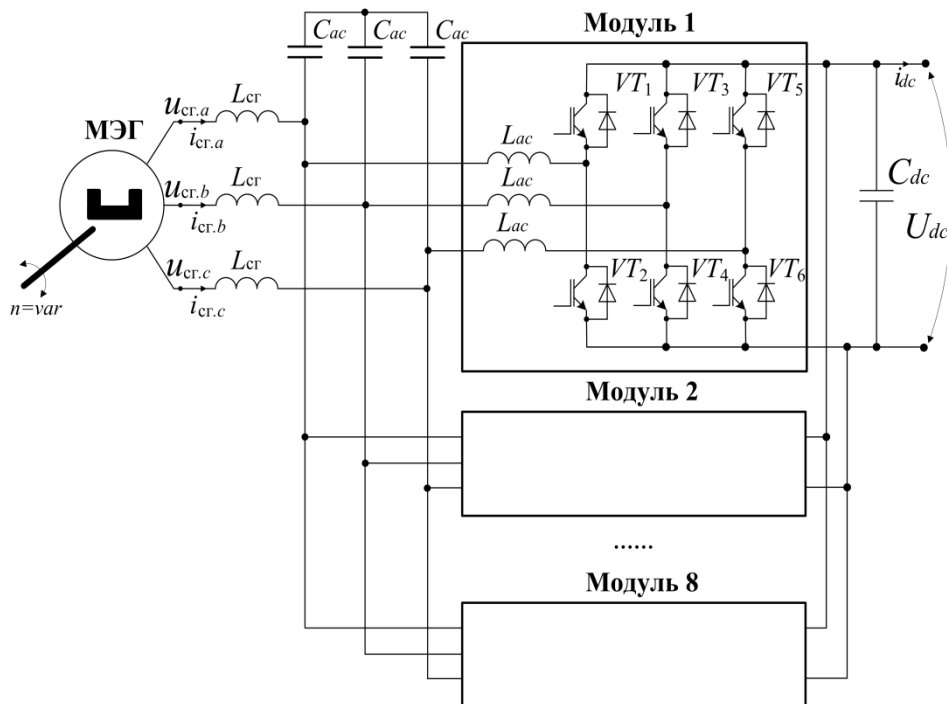


Рис. 4. Схема имитационной модели СГПН-270В на базе МЭГ и АВ

При снижении коэффициента мощности генератора увеличивается ток генератора, что приводит к увеличению токовой загрузки, как самого генератора, так и элементов АВ, в результате увеличиваются потери в системе и снижается КПД, что видно на рис. 9–11.

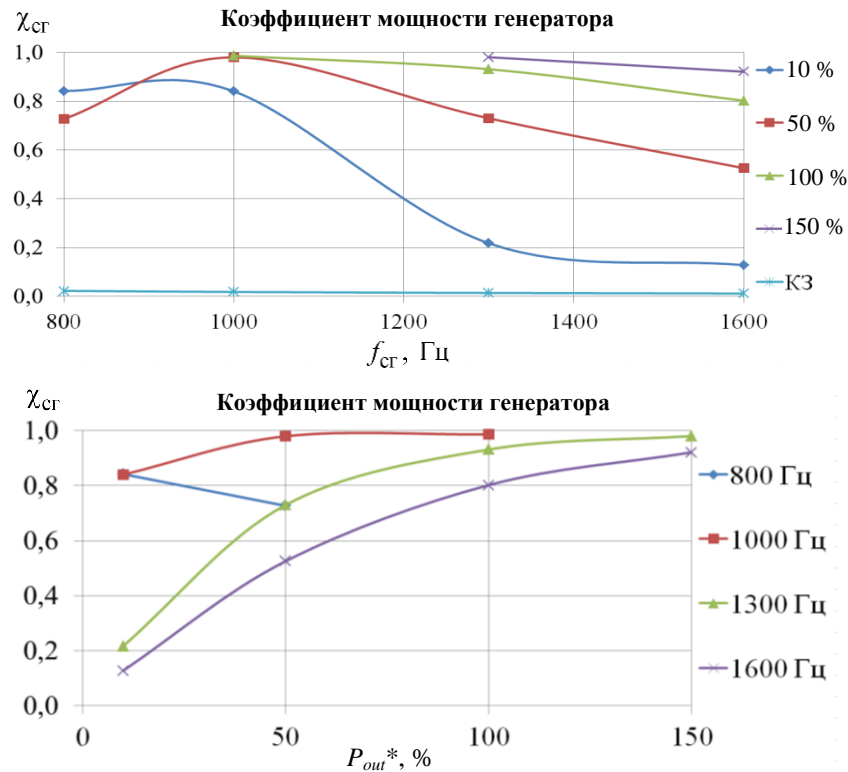


Рис. 5. Зависимости коэффициента мощности генератора от частоты генератора (вверху) и от разной мощности нагрузки (внизу)

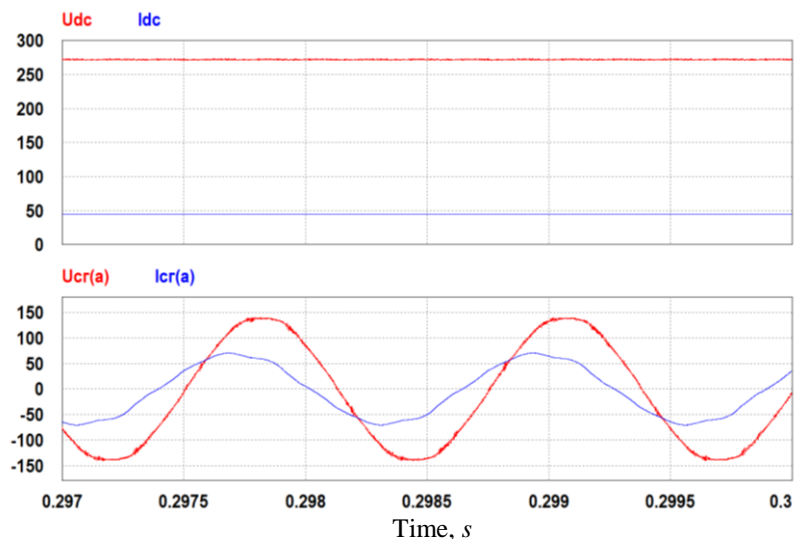


Рис. 6. Эпюры выходного напряжения и тока преобразователя (вверху) и напряжения и тока генератора (внизу) при 800 Гц (10 % нагрузки)

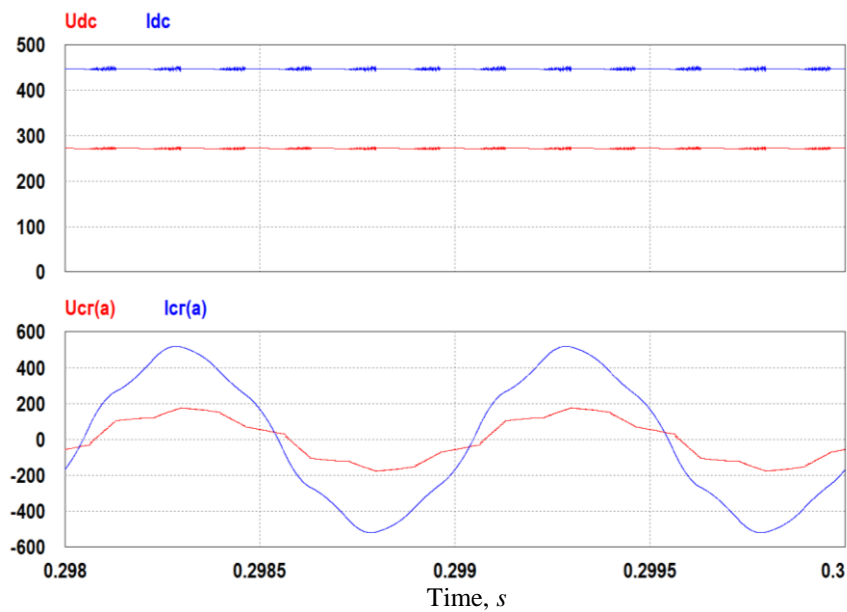


Рис. 7. Эпюры выходного напряжения и тока преобразователя (вверху) и напряжения и тока генератора (внизу) при 1000 Гц (100 % нагрузки)

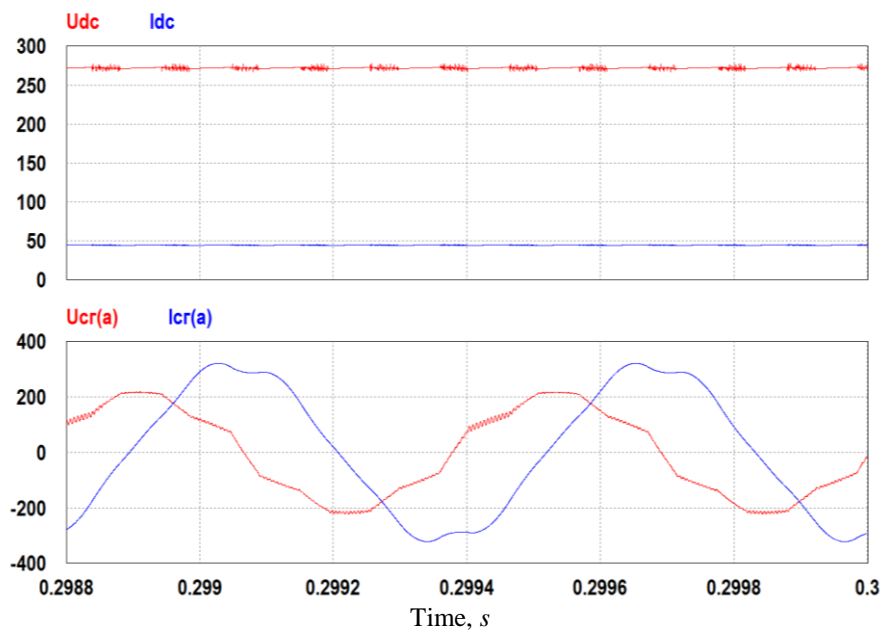


Рис. 8. Эпюры выходного напряжения и тока преобразователя (вверху) и напряжения и тока генератора (внизу) при 1600 Гц (10 % нагрузки)

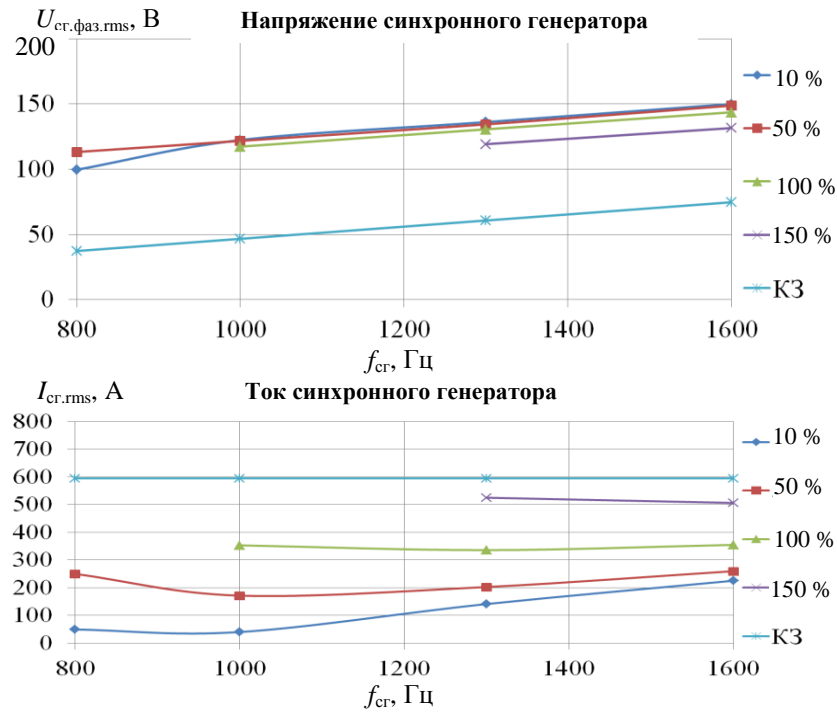


Рис. 9. Зависимости действующего значения фазного напряжения (вверху) на выходе генератора и его тока (внизу) от частоты при разной мощности нагрузки

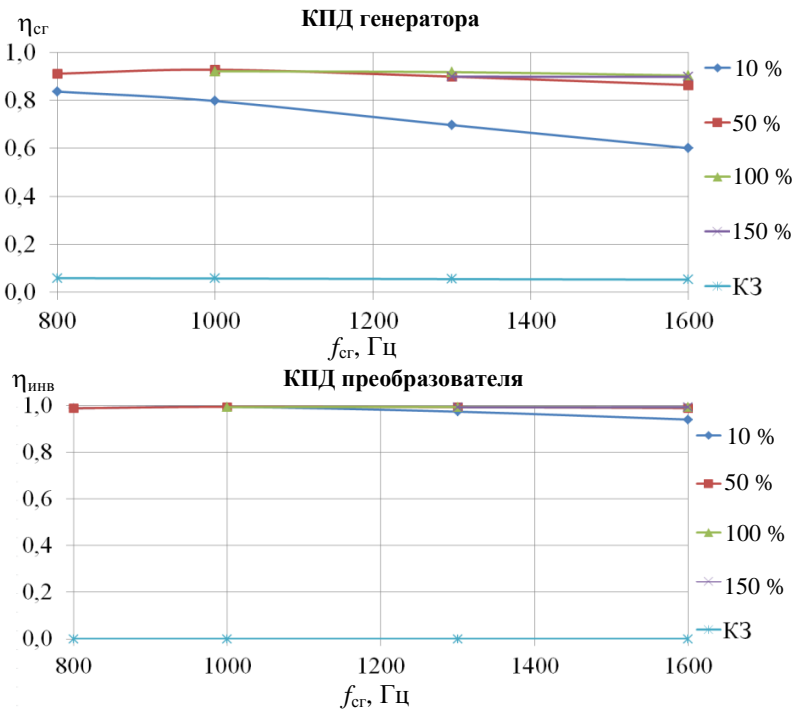


Рис. 10. Зависимости КПД генератора (вверху) и КПД АВ (внизу) от частоты при разной мощности нагрузки

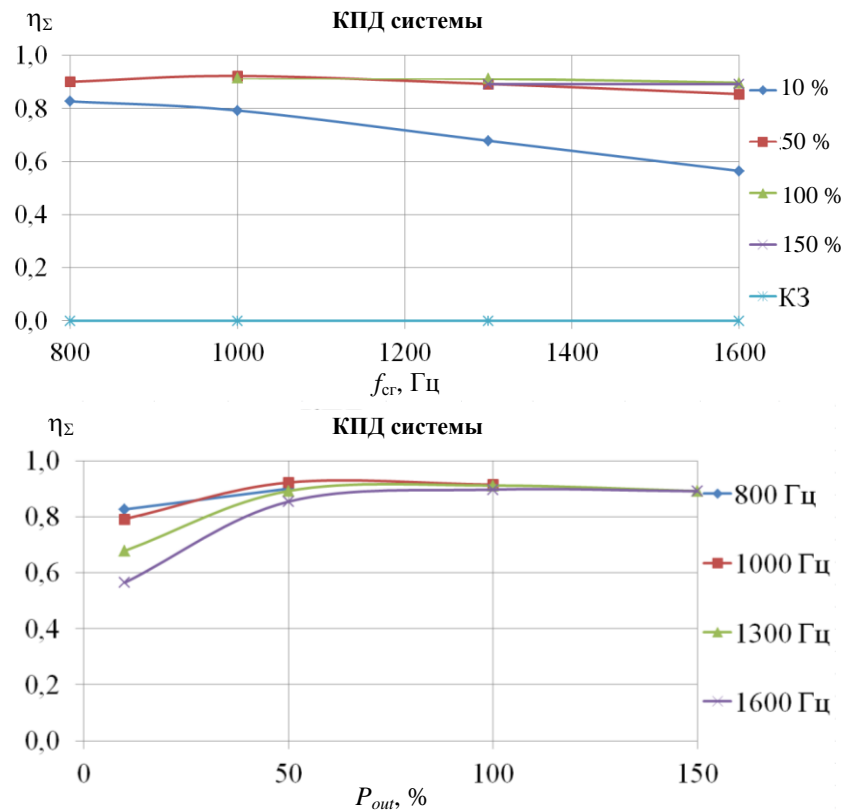


Рис. 11. Зависимости КПД СГПН-270В от частоты генератора (вверху) и от мощности нагрузки (внизу)

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Способ стабилизации выходного напряжения АВ за счет изменения угла формируемого входного тока может быть применим для авиационной системы генерирования постоянного тока.

2. Наилучшие энергетические показатели (входной коэффициент мощности, КПД) системы получились при частоте генератора 1000 Гц и диапазоне нагрузок 50...100 %, что по условиям расчетов соответствует крейсерской скорости самолета.

3. Максимальная полная мощность генератора равна 199,6 кВА, что на 11 % превышает максимальную мощность нагрузки (180 кВт).

4. При наличии источника в звене постоянного тока данная система может применяться в режиме электростартерного запуска.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Kharitonov S.A. An analytical analysis of a wind power generation system including synchronous generator with permanent magnets, active rectifier and voltage source inverter // Wind Power / Ed. by S.V. Muyeen. – First published. – Rijeka, Croatia: Intech, 2010. – Chap. 2. – P. 23–72. – doi: 10.5772/8358.

2. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов: в 2 т.: т. 1: Системы электроснабжения летательных аппаратов / С.А. Грузков, С.Ю. Останин, А.М. Сугробов, А.Б. Токарев, П.А. Тыричев. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 568 с.
3. Электрический самолёт: от идеи до реализации: монография / А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалёв. – М.: Машиностроение, 2010. – 288 с.
4. Электросистема самолета 787 // Мой сайт. – Дата публикации: 24.06.2013. – URL: http://andirrive.3dn.ru/news/ehlektrosistema_samoleta_787/2013-06-24-48 (дата обращения: 11.06.2015).
5. Дыбко М.А. Анализ электромагнитных процессов в модульном полупроводниковом преобразователе для статического компенсатора неактивной мощности // Доклады Академии наук высшей школы РФ. – 2013. – № 2 (21). – С. 98–109.
6. Нос О.В., Харитонов С.А. Система управления силовыми токами компенсации мгновенной неэффективной мощности // Электротехника. – 2015. – № 2. – С. 28–34.
7. Электрический самолет: концепция и технологии: монография / А.В. Лёвин, С.А. Харитонов, К.Л. Ковалёв, А.А. Герасин, С.П. Халютин, С.М. Мусин. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 388 с.
8. Бортовая система генерирования электроэнергии постоянного тока повышенного напряжения на базе синхронного генератора и выпрямителя / С.Ф. Коняхин, С.А. Харитонов, А.Н. Решетников, В.В. Машинский // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2014. – № 2. – С. 15–18.
9. Гарганеев А.Г., Харитонов С.А. Техничко-экономические оценки создания самолета с полностью электрифицированным оборудованием // Доклады Томского государственного университета систем управления и радиоэлектроники. – 2009. – Т. 2. – С. 179–184.
10. Авиационная система генерирования электроэнергии / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, С.Ф. Коняхин, А.В. Левин, Д.В. Макаров, М.М. Юхнин // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 1 (50). – С. 147–162.
11. Электроэнергетическая установка: патент на изобретение 2363090 Российская Федерация: МПК Н 02 Р 9/04 / Н.Н. Лаптев, С.А. Харитонов. – № 2008101266/09; заявл. 21.01.2008; опубл. 27.07.2009, Бюл. № 21. – 5 с.
12. Харитонов С.А. Синтез алгоритма управления полупроводниковыми преобразователями в мехатронной системе генерирования электрической энергии // Научный вестник НГТУ. – 2011. – № 3 (44). – С. 173–180.
13. Modeling of dual z-source inverter for aircraft power generation / A.S. Khlebnikov, S.A. Kharitonov, P.A. Bachurin, A.V. Geist, D.V. Makarov // The 12th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2011), Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2011. – Novosibirsk: IEEE, 2011. – P. 373–376. – doi: 10.1109/EDM.2011.6006976.
14. Sarakhanova R.Iu., Dubkov I.S., Kharitonov S.A. Vector control of cycloconverter with increased input power factor // The 15 International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014), Novosibirsk, Russia, 30 June – 4 July 2014. – Novosibirsk: IEEE, 2014. – P. 429–432. – doi: 10.1109/EDM.2014.6882564.
15. Брованов С.В., Харитонов С.А. Реализация векторной ШИМ в трехфазном трехуровневом выпрямителе // Электротехника. – 2008. – № 6. – С. 33–38.
16. Расчет электрических параметров системы генерирования электроэнергии нестабильной частоты и стабильного напряжения / А.В. Левин, С.Ф. Коняхин, М.М. Юхнин, С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, Д.В. Макаров // Авиационная промышленность. – 2013. – № 1. – С. 1–7.
17. Способ управления статическими стабилизированными источниками переменного напряжения, работающими параллельно на общую нагрузку: патент 2380820 Российская Федерация, МКИ⁶, Н 02 М 5/297, Н 02 Р 13/00, МКИ⁷, Н 02 М 7/493 / Н.И. Бородин, С.А. Харитонов; патентообладатель Государственное образовательное учреждение высшего профессионального образования «Новосибирский государственный технический университет». – № 2008118738/09; заявл. 12.05.2008; опубл. 27.01.2010, Бюл. № 3. – 17 с.
18. Векторный способ управления четырехквadrантным инвертором напряжения в составе системы генерирования электрической энергии переменного тока: патент на изобретение 2207698 Российская Федерация: МПК, Н 02 М 7/72, Н 02 Р 9/42, Н 02 Р 21/00 / С.А. Харитонов, А.А. Стенников, Н.Н. Лаптев. – № 2000120628/09; заявл. 01.08.2000; опубл. 27.06.2003, Бюл. № 18.
19. К вопросу стабилизации напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной частоте вращения / С.А. Харитонов, Б.Ф. Симонов, Д.В. Коробков, Д.В. Макаров // Физико-технические проблемы разработки полезных ископаемых. – 2012. – № 4. – С. 102–115.
20. Харитонов С.А. Система «синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов – активный выпрямитель» (математическая модель) // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 33–42.

Бачурин Пётр Александрович, ассистент кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: силовая электроника, системы генерирования электрической энергии для автономных объектов, Z-инвертор. Имеет 28 публикаций, 7 патентов. E-mail: bach_rp@mail.ru.

Гейст Андрей Викторович, старший преподаватель кафедры электроники и электротехники. Основные направления научных исследований: силовая электроника, многоуровневые инверторы напряжения. Имеет 23 публикации, 8 патентов. E-mail: andrey.geist@gmail.com.

Коробков Дмитрий Владиславович, заместитель директора Института силовой электроники Новосибирского государственного технического университета, главный конструктор направления полупроводниковых автономных систем электроснабжения ОАО СЭЛС и ОАО НИИ АСЭ, старший преподаватель кафедры электроники и электротехники Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: автономные системы электроснабжения, мехатронные системы с полупроводниковыми преобразователями. Имеет 49 публикаций, 9 патентов. E-mail: kpe@ngs.ru.

Макаров Денис Владимирович, кандидат технических наук, младший научный сотрудник кафедры вычислительной техники Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: силовая электроника, системы электроснабжения, цифровые системы управления. Имеет 32 публикации, 6 патентов. E-mail: rcreal2002@ngs.ru.

Решетников Александр Николаевич, старший преподаватель кафедры электроники и электротехники. Основные направления научных исследований: силовая электроника, стартер-генераторные системы для автономных объектов. Имеет 22 публикации. E-mail: reshetnikov@ngs.ru.

Харитонов Сергей Александрович, доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники, директор Института силовой электроники Новосибирского государственного технического университета. Основные направления научных исследований: силовая электроника, теория преобразования электрической энергии, системы генерирования электрической энергии для автономных объектов. Количество опубликованных работ – более 300. E-mail: Kharitonov@corp.nstu.ru.

A direct current power generation system based on a permanent magnet synchronous generator and an active rectifier*

*P.A. BACHURIN¹, A.V. GEIST², D.V. KOROBKOV³, D.V. MAKAROV⁴,
A.N. RESHETNIKOV⁵, S.A. KHARITONOV⁶*

¹ Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, assistant lecturer. E-mail: bach_rp@mail.ru

² Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, senior lecturer. E-mail: andrey.geist@gmail.com

³ Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, senior lecturer. E-mail: kpe@ngs.ru

⁴ Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, researcher. E-mail: rcreal2002@ngs.ru

⁵ Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, senior lecturer. E-mail: reshetnikov@ngs.ru

⁶ Novosibirsk State Technical University, 20, K. Marx Prospekt, Novosibirsk, 630073, Russian Federation, D.Sc. (Eng.), professor. E-mail: Kharitonov@corp.nstu.ru

* Received 09 February 2015.

The dc power generation system (270 V 120 kW) based on a permanent magnet synchronous generator and an active rectifier is analyzed. A permanent-magnet generator converts mechanical energy into electrical energy. The design simplicity, a higher efficiency and lower operation costs of a permanent magnet synchronous generator are among its advantages. But the output voltage of a permanent magnet synchronous generator varies as it is proportional to the rotation frequency of the generator shaft which in its turn has almost a double range of variation. The paper proposes to stabilize an active rectifier output voltage by changing an input current phase. The stabilization is necessary because the generator rotation frequency changes in a double range and, therefore, generator voltages change in a double range too. It is necessary to increase voltage to a required value by an armature magnetizing reaction at a low speed and a maximum load, and decrease the voltage by an armature demagnetizing reaction at a high speed and a minimum load. The main energy characteristics in various operation conditions with the proposed stabilization technique are obtained by analytical calculations and simulation. The simulation results of the power generation system show that the generator total power is higher by 11 % than the maximum load power and the best energy characteristics are obtained when the generator frequency is 1000 Hz and the load range is 50...100 %. This corresponds to the designed aircraft cruising speed. Owing to the known principles of a semiconductor converter operation based on the voltage source inverter there is an opportunity to change the power flow direction without using any additional switching equipment, i.e. the considered active rectifier in the power generation system can be used to implement a turbine start in the presence of a dc source.

Keywords: power generation system, off-line system, permanent magnet synchronous machine, magnetizing and demagnetizing armature reaction, constant-voltage regulation, active rectifier, power factor, power characteristics

DOI: 10.17212/1814-1196-2015-2-43-58

REFERENCES

1. Kharitonov S.A. An analytical analysis of a wind power generation system including synchronous generator with permanent magnets, active rectifier and voltage source inverter. *Wind Power*. Ed. by S.V. Mueyen. First published. Rijeka, Croatia, Intech, 2010, chap. 2, pp. 23–72. doi: 10.5772/8358
2. Gruzkov S.A., Ostanin S.Yu., Sugrobov A.M., Tokarev A.B., Tyrichev P.A. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov*. V 2 t. T. 1: *Sistemy elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov* [Electrical equipment of aircraft. In 2 vol. Vol. 1: Power supply systems of aircraft]. Moscow, MEI Publ., 2005. 568 p.
3. Levin A.V., Alekseev I.I., Kharitonov S.A., Kovalev L.K. *Elektricheskii samolet: ot idei do realizatsii* [Electric aircraft: from concept to implementation engineering]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 288 p.
4. *Elektrosistema samoleta 787* [Electric system Aircraft 787]. Available at: http://andirrive.3dn.ru/news/ehlektrosistema_samoleta_787/2013-06-24-48 (accessed 11.06.2015)
5. Dybko M.A. Analiz elektromagnitnykh protsessov v modul'nom poluprovodnikovom preobrazovatele dlya staticheskogo kompensatora neaktivnoi moshchnosti [Electromagnetic analysis in a modular power converter for a static synchronous compensator]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2013, no. 2 (21), pp. 98–109.
6. Nos O.V., Kharitonov S.A. Sistema upravleniya silovymi tokami kompensatsii mgnovЕННОЙ neeffektivnoi moshchnosti [A system to control power currents of ineffective instantaneous power compensation]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2015, no. 2, pp. 28–34. (In Russian)
7. Levin A.V., Kharitonov S.A., Kovalev K.L., Gerasin A.A., Khalyutin S.P., Musin S.M. *Elektricheskii samolet: kontseptsiya i tekhnologii* [Electric aircraft: conception and technologies]. Ufa, UGATU Publ., 2014. 388 p.
8. Konyakhin S.F., Kharitonov S.A., Reshetnikov A.N., Mashinskii V.V. Bortovaya sistema generirovaniya elektroenergii postoyannogo toka povyshennogo napryazheniya na baze sinkhronnogo generatora i vypryamitelya [Onboard high voltage dc electric power generation system based on synchronous generator and rectifier]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2014, no. 2, pp. 15–18.
9. Garganeev A.G., Kharitonov S.A. Tekhniko-ekonomicheskie otsenki sozdaniya samoleta s polnost'yu elektrifitsirovannym oborudovaniem [Technical and economic evaluation of all-electric aircrafts designing]. *Doklady Tomskogo gosudarstvennogo universiteta sistem upravleniya i radioel-*

elektroniki – *Proceedings of Tomsk state university of control systems and radioelectronics*, 2009, vol. 2, pp. 179–184.

10. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Konyakhin S.F., Levin A.V., Makarov D.V., Yukhnin M.M. Aviatcionnaya sistema generirovaniya elektroenergii [System generating electricity for aircraft]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2013, no. 1 (50), pp. 147–162.

11. Laptev N.N., Kharitonov S.A. Elektroenergeticheskaya ustanovka [Electric generating plant]. Patent RF, no. 2363090, 2009.

12. Kharitonov S.A. Sintez algoritma upravleniya poluprovodnikovymi preobrazovatelyami v mekhatronnoi sisteme generirovaniya elektricheskoi energii [Algorithm of control synthesis for semiconductor converters in mechatronics systems generating of electric energy]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 2011, no. 3 (44), pp. 173–180.

13. Khlebnikov A.S., Kharitonov S.A., Bachurin P.A., Geist A.V., Makarov D.V. Modeling of dual z-source inverter for aircraft power generation. *The 12th International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2011)*, Erlagol, Altai, Russia, 30 June – 4 July 2011, pp. 373–376. doi: 10.1109/EDM.2011.6006976

14. Sarakhanova R.Iu., Dubkov I.S., Kharitonov S.A. Vector control of cycloconverter with increased input power factor. *The 15 International Conference and Seminar on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (EDM 2014)*, Novosibirsk, Russia, 30 June – 4 July 2014, pp. 429–432. doi: 10.1109/EDM.2014.6882564

15. Brovanov S.V., Kharitonov S.A. Realizatsiya vektornoj ShIM v trekhfaznom trekhurovnevom vypryamitele [Vector PWM implementation in a three-phase, three-level rectifier]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2008, no. 6, pp. 33–38. (In Russian)

16. Levin A.V., Konyakhin S.F., Yukhnin M.M., Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Makarov D.V. Raschet elektricheskikh parametrov sistemy generirovaniya elektroenergii nestabil'noi chastoty i stabil'nogo napryazheniya [Calculation of electric parameters for a power generation system with frequency instability and voltage stability]. *Aviatcionnaya promyshlennost' – Aviation Industry*, 2013, no. 1, pp. 1–7.

17. Borodin N.I., Kharitonov S.A. Sposob upravleniya staticheskimi stabilizirovannymi istochnikami peremennogo napryazheniya, rabotayushchimi parallel'no na obshchuyu nagruzku [Method for control of static stabilised ac voltage sources, working in parallel for common load]. Patent RF, no. 2380820, 2010.

18. Kharitonov S.A., Stennikov A.A., Laptev N.N. Vektornyj sposob upravleniya chetyrekhkvadrantnym invertorom napryazheniya v sostave sistemy generirovaniya elektricheskoi energii peremennogo toka [Vector process for controlling four-quadrant voltage inverter incorporated in ac power generation system]. Patent RF, no. 2207698, 2003.

19. Kharitonov S.A., Simonov B.F., Korobkov D.V., Makarov D.V. K voprosu stabilizatsii napryazheniya sinkhronnogo generatora s postoyannymi magnitami pri peremennoi chastote vrashcheniya [Voltage stabilization in permanent-magnet synchronous generator with variable rotation frequency]. *Fiziko-tekhnicheskie problemy razrabotki poleznykh iskopaemykh – Journal of Mining Science*, 2012, no. 4, pp. 102–115. (In Russian)

20. Kharitonov S.A. Sistema «sinkhronnyi generator s vzbuzhdeniem ot postoyannykh magnetov – aktivnyi vypryamitel'» (matematicheskaya model') [Permanent-magnet synchronous generator-active rectifier system (mathematical model)]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2009, no. 12, pp. 33–42. (In Russian)