

УДК 621.314.5

**Бачурин Петр Александрович**, асп., Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073, тел. +73833460866, E-mail: [bach\\_rp@mail.ru](mailto:bach_rp@mail.ru)

**Коробков Дмитрий Владиславович**, асс, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073, тел. +73833460866, E-mail: [kpe@ngs.ru](mailto:kpe@ngs.ru)

**Харитонов Сергей Александрович**, д-р, техн. наук, проф., заведующий кафедрой электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет, г. Новосибирск, Россия, пр. К. Маркса, 20, г. Новосибирск, Россия, 630073, тел. +73833460866, E-mail: [Kharit1@yandex.ru](mailto:Kharit1@yandex.ru), (orcid.org/0000-0001-6483-9460)

**Хлебников Алексей Сергеевич**, главный конструктор по направлению СЭС ОАО «Авиационное оборудование», г. Москва, Россия, ул. Ибрагимова, 29, г. Москва, Россия, 105318, тел. +7915-393-35-42, E-mail: [aleksey\\_khlebnikov@mail.ru](mailto:aleksey_khlebnikov@mail.ru)

### СИСТЕМА ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ ПОСТОЯННОГО ТОКА С МАГНИТОЭЛЕКТРИЧЕСКИМ ГЕНЕРАТОРОМ

*Анализируется вариант построения системы генерирования электрической энергии постоянного тока на базе магнитоэлектрического генератора и активного выпрямителя. Определены основные энергетические характеристики в различных режимах работы системы.*

**Ключевые слова:** магнитоэлектрический генератор, энергетические характеристики, стабилизация напряжения, активный выпрямитель.

**Bachurin Petr Aleksandrovich**, Ph. D. student, Novosibirsk state technical university, 20 K. Marksa str, Novosibirsk, 630092, Russia. Tel.: +7(383)346-08-64, E-mail: [bach\\_rp@mail.ru](mailto:bach_rp@mail.ru)

**Korobkov Dmitry Vladislavovich**, assistant, Novosibirsk state technical university, 20 K. Marksa str, Novosibirsk, 630092, Russia. Tel.: +7(383)346-08-64, E-mail: [kpe@ngs.ru](mailto:kpe@ngs.ru)

**Kharitonov Sergey Aleksandrovich**, Ph. D., Professor, head of the Department of electronics and electrical engineering. Novosibirsk state technical university, 20 K. Marksa str, Novosibirsk, 630092, Russia. Tel.: +7(383)346-08-64, E-mail: [Kharit1@yandex.ru](mailto:Kharit1@yandex.ru), (orcid.org/0000-0001-6483-9460)

**Khlebnikov Aleksey Sergeevich**, design manager of power generation systems, Aviation Equipment Holding, 29 Ibragimova street, Moscow, Russia, 105318, Tel. +7915-393-35-42, E-mail: [aleksey\\_khlebnikov@mail.ru](mailto:aleksey_khlebnikov@mail.ru)

### DIRECT CURRENT SUPPLY SYSTEM WITH MAGNETOELECTRICAL GENERATOR

*The dc power generation system based on permanent-magnet generator and active rectifier is considered. The main energy characteristics of generation system performance are obtained.*

**Keywords:** permanent-magnet generator, energy characteristics, constant-voltage regulation, active rectifier.

### Введение

В настоящее время фактически всё 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 самолётов соизмеримой с мощностью подстанций небольших городов [4].

На существующих самолётах и вертолётах в основном применяются системы электроснабжения постоянного тока 27 В, переменного тока постоянной частоты 115/200 В 400 Гц и переменного тока. 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 самолёта Boeing 787, в котором нашли свое применение самые последние достижения в области авиастроения, широко применяется система электроснабжения постоянного тока  $\pm 270$  В [4].

Вопрос о выборе типа систем электроснабжения перспективных летательных аппаратов достаточно широко обсуждается в течение многих лет, причём уже в 1970-х гг. отмечалась перспективность систем постоянного тока повышенного напряжения.

Ожидается, что в наибольшей степени преимущества такой системы реализуются в самолётах 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:

- снижение общей массы системы электроснабжения на 25%;
- снижение массы электронных устройств контроля и управления на 40%;
- улучшения качества электроэнергии (в частности, в переходных режимах);
- повышение КПД системы на 15%;
- исключение перерывов в питании [2,3].

В статье рассматривается система генерирования постоянного напряжения 270 В (СГПН-270В) мощностью 120 кВт на базе магнитоэлектрического генератора и активного выпрямителя (АВ). Рассматриваемая система генерирования, состоящая из магнитоэлектрического генератора (МЭГ) и активного выпрямителя (АВ), показана на рис. 1.

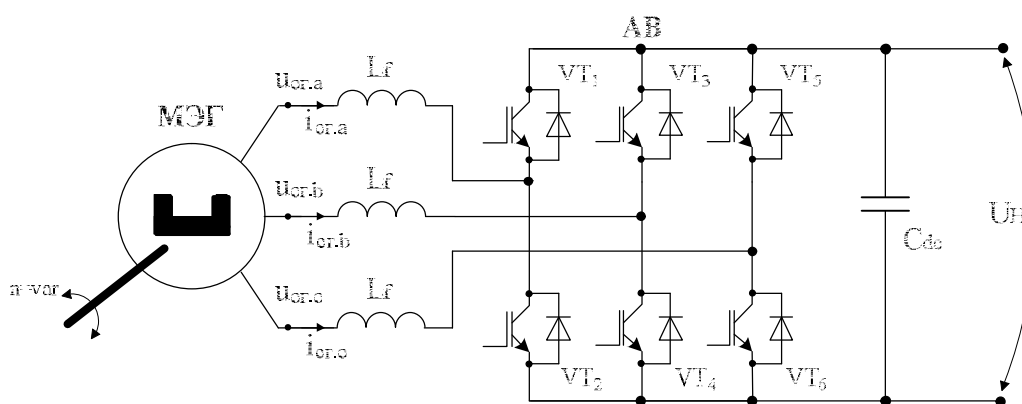


Рис. 1. Схема СГПН-270В на базе МЭГ и АВ.

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

АВ на базе ИН с ШИМ позволяет:

- реализовать потребление практически синусоидального тока от МЭГ;
- регулировать коэффициент мощности потребляемой энергии от МЭГ;
- осуществлять глубокое регулирование выходного напряжения, включая возможность его повышения.

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.

#### Аналитическая модель

Допущения:

- учитывая, что  $\omega_{ШИМ} \gg \omega_{СГ}$ , 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]:

$$u = R \cdot i + \frac{d}{dt} \psi + \omega \cdot \psi,$$

$$\psi = L \cdot i + \psi_f,$$

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

$$u_d = i_d \cdot r_s + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega L_q i_q,$$

$$u_q = i_q \cdot r_s + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega L_d i_d + \omega \Psi_f,$$
(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,  $\omega, \Psi_f$  – 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]:

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

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

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

где  $\varphi$  – угол сдвига между выходным напряжением и током СГ.

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

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, путём формирования опережающего (емкостного) входного тока можно «довозбудить» генератор и поднять напряжение до требуемой величины. На высоких оборотах и холостом ходу путём 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.

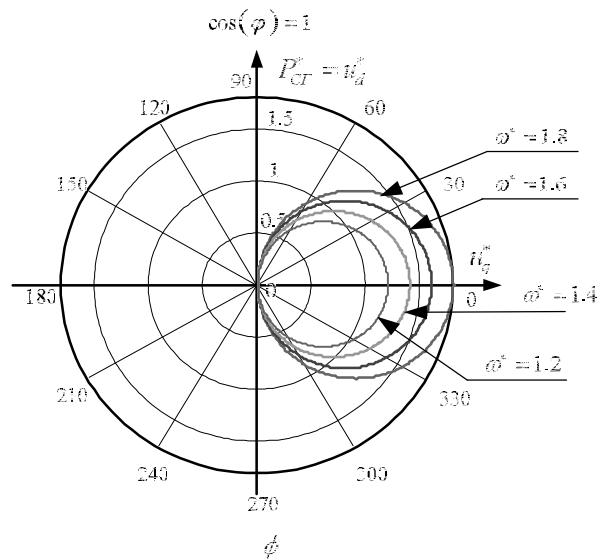


Рис. 2. Годограф напряжений  $u_d$  и  $u_q$  при  $\cos(\varphi) = 1$

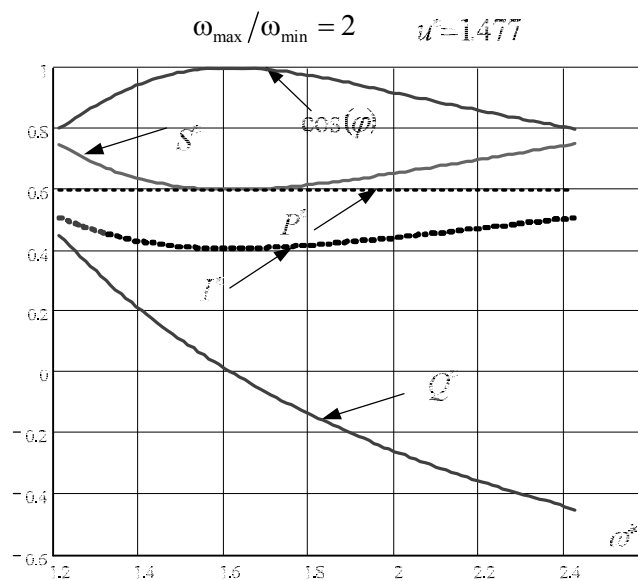


Рис. 3. Зависимость энергетических параметров СГ от частоты вращения вала

Данный способ выбора параметров был принят при проведении имитационного моделирования.

### Имитационное моделирование СГПН-270В на базе МЭГ и АВ

Имитационное моделирование проводится с помощью специализированного пакета программ PSIM. PSIM – программный пакет, предназначенный 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  $n = 8000 \div 16000$  об/мин, частота напряжения МЭГ  $f_G$ :  $800 \div 1600$  Гц.
5. Распределение нагрузки в функции частоты вращения вала МЭГ:
  - 50% от номинальной нагрузки (длительно) в диапазоне  $n = 8000 \div 10000$  об/мин;
  - 100% от номинальной нагрузки (длительно) в диапазоне  $n = 10000 \div 16000$  об/мин;
  - 150% от номинальной нагрузки (кратковременно) в диапазоне  $n = 13000 \div 16000$  об/мин.
6. Ток короткого замыкания кратностью не менее 3-х 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 от частоты  $f_G$ :

$$E_{CG.rms} = 0,121 \cdot f_G$$

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 загрузки применён не один модуль АВ, а 8 параллельно включённых модулей, и, чтобы равномерно распределить токи, в каждом модуле установлены свои дроссели величиной 100 мкГн, к точке подключения дросселей каждой фазы подключен фильтровой конденсатор ёмкостью 0,1 мкФ. Ёмкость конденсатора звена постоянного тока - 9,9 мФ. Частота ШИМ - 75 кГц.

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

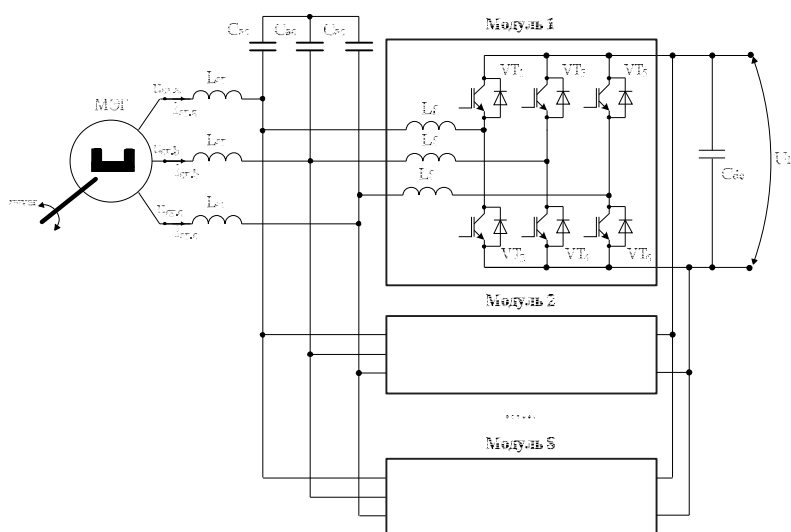


Рис. 4. Схема имитационной модели СГПН-270В на базе МЭГ и АВ.

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 – отстаёт, 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.

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.

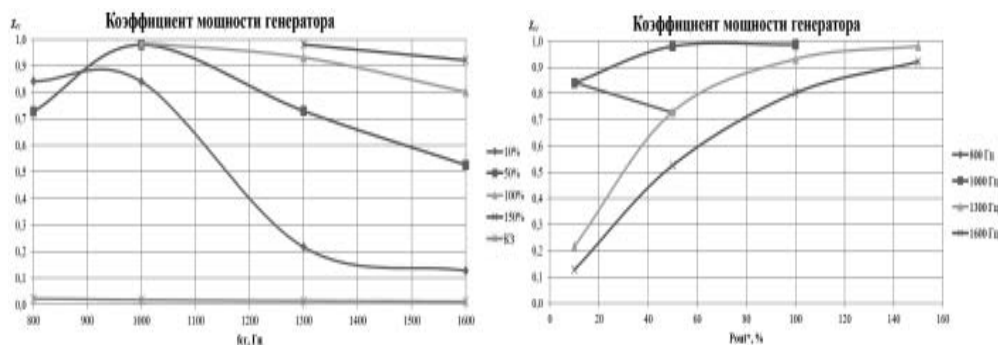


Рис. 5. Зависимости коэффициента мощности генератора от частоты генератора (слева) и от разной мощности нагрузки (справа)

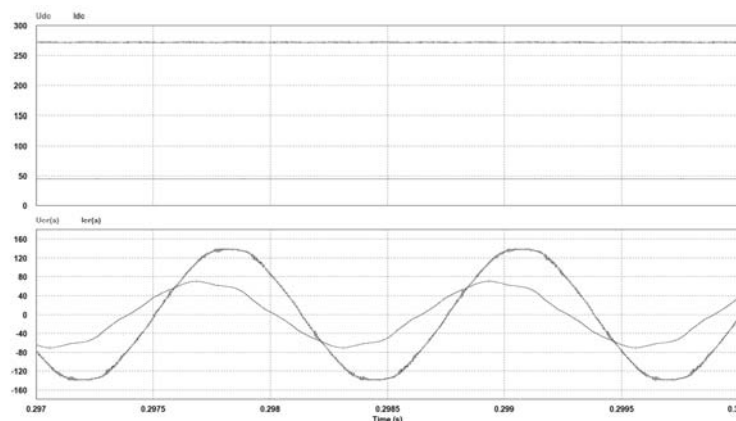


Рис. 6. Эпюры выходного напряжения и тока преобразователя (вверху) и напряжения и тока генератора (внизу) при 800 Гц 10% нагрузки

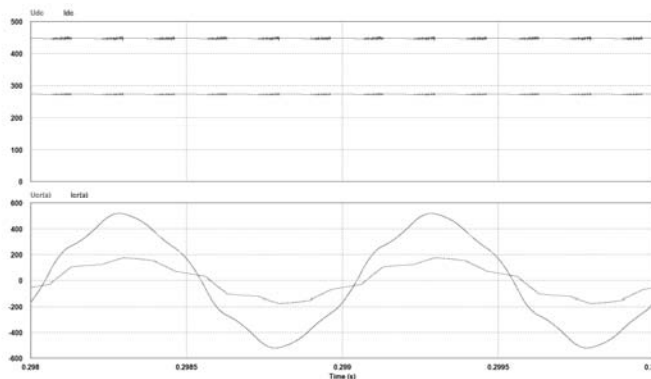


Рис. 7. Эпюры выходного напряжения и тока преобразователя (вверху) и напряжения и тока генератора (внизу) при 1000 Гц 100% нагрузки

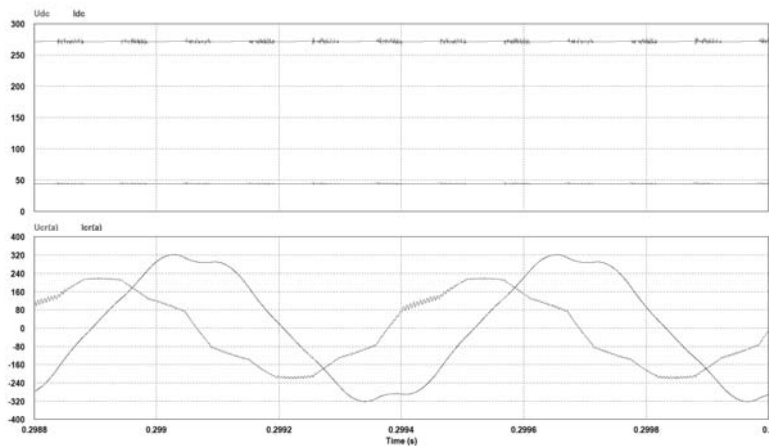


Рис. 8. Эпюры выходного напряжения и тока преобразователя (вверху) и напряжения и тока генератора (внизу) при 1600 Гц 10% нагрузки

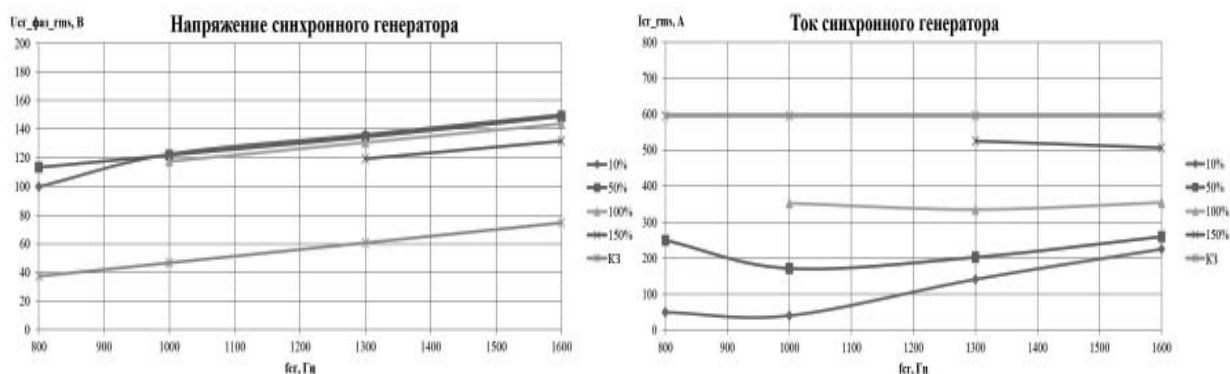


Рис. 9. Зависимости действующего значения фазного напряжения (слева) на выходе генератора и его тока (справа) от частоты при разной мощности нагрузки.

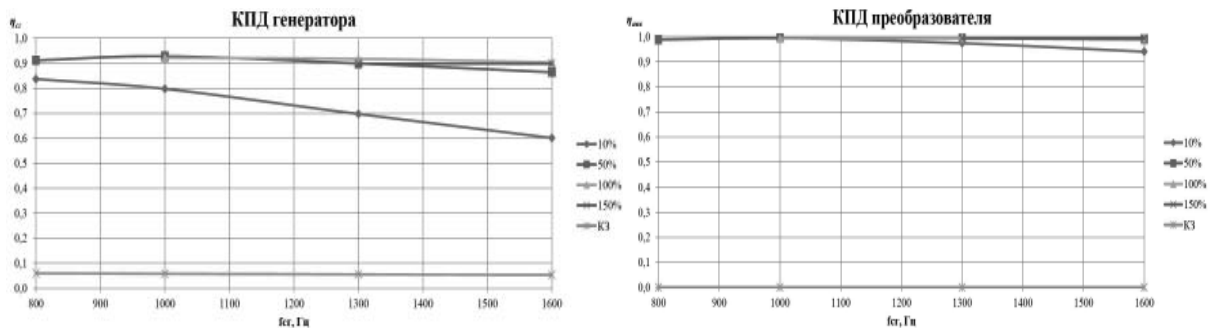


Рис. 10. Зависимости КПД генератора (слева) и КПД АВ (справа) от частоты при разной мощности нагрузки

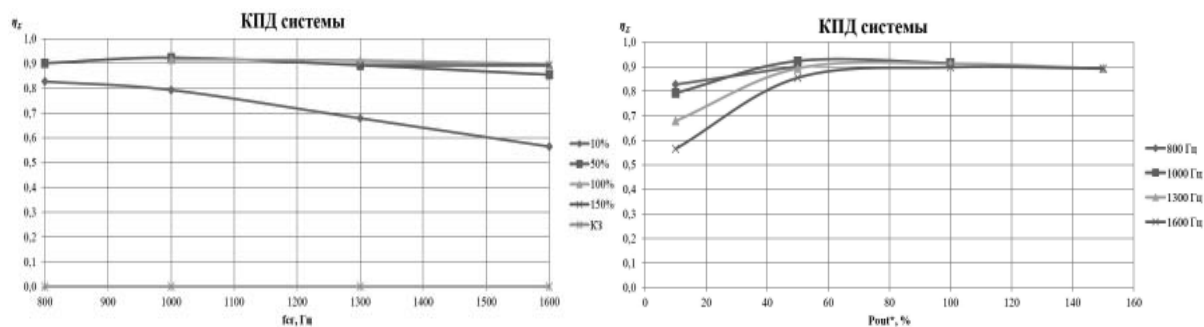


Рис. 11. Зависимости КПД СГПН-270В от частоты генератора (слева) и от мощности нагрузки (справа)

**Выводы**

1. Способ стабилизации выходного напряжения АВ за счёт 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%.
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 электростартёрного запуска.

**Список используемой литературы:**

1. S. Kharitonov. An Analytical Analysis of a Wind Power Generation System Included Synchronous Generator with Permanent Magnets, active rectifier and Voltage Source Inverter. Wind Power. Pp. 23-72 ISBN 978-953-7619-81-7. Editor by S.V. Muyeen, 2010 Intech, First published June 2010, Printed in India, p. 558.
2. Электрооборудование летательных аппаратов: учебник для вузов. В двух томах/ под редакцией С.А. Грузкова. – М. Издательство МЭИ, 2005 – Том 1. Системы электроснабжения летательных аппаратов. – 2005. – 568с.:ил.
3. Электрический самолёт: от идеи до реализации. Монография/ А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалёв// М.: Машиностроение, 2010. – 288с. с табл. и ил.
4. <http://www.boeing.ru/Новости/787-Updates/Электросистема-самолета-787>.

**References:**

1. S. Kharitonov. An Analytical Analysis of a Wind Power Generation System Included Synchronous Generator with Permanent Magnets, active rectifier and Voltage Source Inverter. Wind Power. Pp. 23-72 ISBN 978-953-7619-81-7. Editor by S.V. Muyeen, 2010 Intech, First published June 2010, Printed in India, p. 558.
2. S.A. Gruzkov. Aircraft electrical equipment, part 1: aircraft power generation systems [Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov, tom 1: sistemi elektrosnabzheniya letatel'nykh apparatov], publishing house of Moscow Institute of High-Power Engineering, 2005, p. 568.
3. A.V. Levin, I.I. Alekseev, S.A. Kharitonov, L.K. Kovalev. More electrical aircraft: from idea to realization [Elektricheskij samolet: ot idei do realizatsii], Moscow, Mashinostroenie, 2010, p. 288.
4. <http://www.boeing.ru/Новости/787-Updates/Электросистема-самолета-787>.

Поступила в редакцию 20.07 2014 г.