

УДК621.314

**НЕПОСРЕДСТВЕННЫЙ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬ ЧАСТОТЫ
ДЛЯ СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРНОЙ СИСТЕМЫ
МАРШЕВОГО ДВИГАТЕЛЯ****М.А. Жарков, В.Е. Сидоров, Е.Б. Преображенский,
М.В. Балагуров, Р.Ю. Дубкова, С.А. Харитонов***Новосибирский государственный технический университет*

В последние годы наблюдается бурный рост исследований и разработок, связанных с реализацией концепции «Более электрический самолет». Данная концепция подразумевает кроссплатформенную интеграцию всевозможных авиационных систем, таких как гидравлическая, топливная, система кондиционирования, система электроснабжения, вспомогательная силовая установка ВСУ, маршевый двигатель и другие. Также концепция предусматривает уход от гидравлических, пневматических и механических узлов к электрическим системам, которые обладают меньшими потерями на преобразование энергии и имеют более высокий уровень регулирования. На борту среднемагистральных самолетов уже появились системы генерирования электрической энергии переменной частоты и постоянной величины генерируемого напряжения, в качестве примера можно привести такие самолеты как Boeing-787, A-380 и новейший и перспективный отечественный самолет МС-21. В таких системах, в частности, используются синхронные генераторы с возбуждением от постоянных магнитов. В статье представлена стартер-генераторная система для маршевого двигателя летательного аппарата. Особенностью представленной системы является применение синхронного двигателя с постоянными магнитами (СДПМ) и полупроводникового преобразователя. Система с СДПМ позволяет использовать алгоритм наблюдателя на основе вычисления потокосцепления, благодаря которому появляется возможность отказаться от датчика скорости и датчика положения ротора, что уменьшает массогабаритные показатели и уменьшает количество информационных линий системы. Также наблюдатель предоставляет близкие к реальным значениям противоЭДС синхронной машины, что позволяет повысить эффективность использования магнитоэлектрического генератора в качестве стартера. В статье представлены результаты математического моделирования системы в стартерном режиме работы.

Ключевые слова: стартер, генератор, система электроснабжения, маршевый двигатель, летательный аппарат, синхронный генератор, полупроводниковый преобразователь.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-3-58-73

Введение

Современные тенденции проектирования электротехнического оборудования летательных аппаратов сопряжены с реализацией концепции «Более электрический самолет» [1–4], в частности большое внимание уделяется совмещению функций стартера и системы генерирования электрической энергии в одном агрегате, который получил название «стартер-генератор» [5, 6]. Данное техническое решение позволяет удовлетворить возрастающие требования к энергоэффективности и надежности авиационных систем.

Рассматриваемая в статье система представлена на рис. 1.

В состав стартер-генераторной системы, изображенной на рисунке, входят:

ВСУ – Вспомогательная силовая установка;

МЭГ – Магнитоэлектрический генератор;

© 2018 М.А. Жарков, В.Е. Сидоров, Е.Б. Преображенский,
М.В. Балагуров, Р.Ю. Дубкова, С.А. Харитонов

УВ – Управляемый выпрямитель;
 МПСУ УВ – Микропроцессорная система управления управляемым выпрямителем;
 ЗИ – Зависимый инвертор;
 МПСУ ЗИ – Микропроцессорная система управления зависимым инвертором;
 СДПМ – Синхронный двигатель с возбуждением от постоянных магнитов.

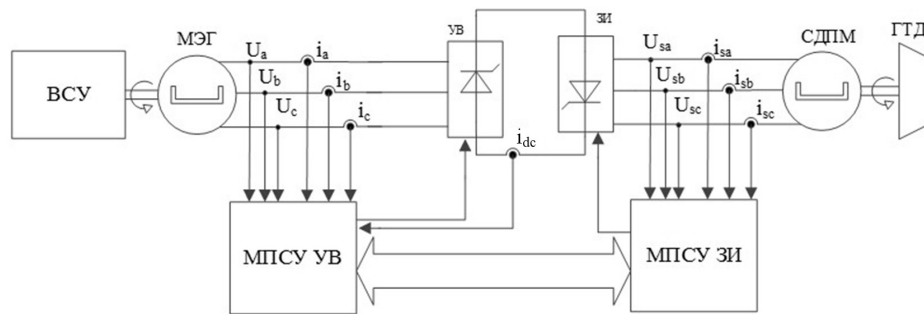


Рис. 1 – Структурная схема стартер-генераторной системы

Fig. 1 – Structural diagram of a starter-generator system

Авиационная вспомогательная силовая установка представляет собой относительно небольшой газотурбинный двигатель, который через редукторную систему приводит в движение генераторы и гидронасосы, необходимые для запуска маршевого двигателя и первоначального обеспечения электроэнергией бортового оборудования [7]. Источником электроэнергии системы является МЭГ [8], который приводится во вращение от ВСУ. Маршевый двигатель также представляет собой газотурбинный двигатель, имеющий собственный синхронный генератор с постоянными магнитами, предназначенный для обеспечения электроэнергией летательного аппарата во время полета. В рассматриваемой системе предлагается использовать СДПМ в качестве стартер-генератора [9], а для реализации режима стартера будет использован непосредственный преобразователь частоты (НПЧ), который позволит синхронному двигателю достигнуть необходимой скорости вращения за установленное время. НПЧ состоит из трехфазного тиристорного выпрямителя и зависимого тиристорного инвертора. МПСУ инвертора и выпрямителя имеют общий канал связи для синхронизации своей работы.

Данная система обладает следующими преимуществами: 1) высокая удельная мощность; 2) отсутствие датчиков скорости электрических машин для синхронизации систем управления зависимым инвертором; 3) отсутствие фильтров в звене постоянного тока; 4) отсутствие коммутирующих конденсаторов у зависимого инвертора.

Все эти особенности направлены на уменьшение массогабаритных показателей и увеличение энергоэффективности и надежности, что является неотъемлемыми требованиями при построении авиационных систем.

1. Описание системы управления и алгоритмов

Система управления выпрямителем, как и инвертором, представляет классическую трехканальную систему импульсно-фазового управления (СИФУ) с диапазоном регулирования равным 120 эл. гр. СИФУ осуществляет синхронизацию с

питающей сетью (в случае управления выпрямителем) или напряжением двигателя (в случае управления инвертором). В системе управления выпрямителем (рис. 2) модулирующий сигнал (U_M) задается из двухконтурной системы регулирования. Внешний контур – это контур по скорости, задающий уставку на ток ДС-звена, а внутренний контур осуществляет регулирование тока I_{dc} .

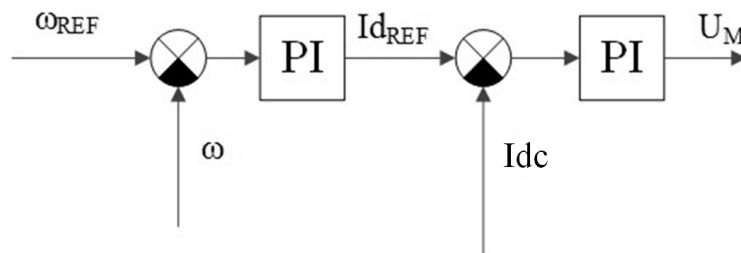


Рис. 2 – Структурная схема системы управления выпрямителем

Fig. 2 – Structural diagram of the rectifier control system

Процесс работы системы можно разделить на два этапа.

Режим асинхронно-частотного пуска

Этот режим является начальным в процессе разгона двигателя. В данном режиме синхронный двигатель разгоняется до 15 % от своей максимальной скорости.

Регулятор скорости в системе управления выпрямителя в этом режиме не работает. Работает только внутренний контур регулирования выходного тока выпрямителя с фиксированным заданием. Это дает возможность поддерживать постоянный момент двигателя и увеличивать действующее значение первой гармоники напряжения, прикладываемого к двигателю, что позволяет преодолеть противоЭДС машины во время разгона [10].

Данный режим осуществляет разгон синхронного двигателя, при котором, вектор подаваемого на двигатель напряжения не зависит от положения ротора и задает скорость вращения ротора двигателя. Принудительный режим обоснован тем, что для синхронизации СИФУ инвертора необходимо знать значение скорости машины и ее ЭДС, а как было отмечено выше, эти значения рассчитываются с помощью наблюдателя, работа которого затруднена на низких оборотах. Согласно алгоритму скорость вращения вектора напряжения линейно возрастает, постоянно опережая вектор ЭДС машины. Это отражено в векторной диаграмме в $d-q$ координатах (рис. 3).

Так как отсутствует фильтр в звене постоянного тока, присущий классическим схемам с выпрямителем, то напряжения звена постоянного тока, как и сам ток, периодически спадают до нуля при переключении тиристорov выпрямителя. В связи с этим СИФУ инвертора заполняет весь диапазон работы каждого тиристора, составляющий 120 эл. гр., короткими импульсами для повторного открытия тиристорov при обрыве тока.

Отсутствие коммутирующих конденсаторов инвертора привело к следующему алгоритмическому решению: для осуществления коммутации тиристорov инвертора кратковременно выключается выпрямитель, т. е. прекращается подача отпирающих импульсов. Во время такой паузы выпрямителя и происходит

переключение тиристорov, предотвращая таким образом короткое замыкание в стойке инвертора. Длительность паузы зависит от времени выключения тиристорov выпрямителя. Синхронизация работы СИФУ инвертора и выпрямителя происходит при помощи канала связи, реализованного на основе протокола CAN.

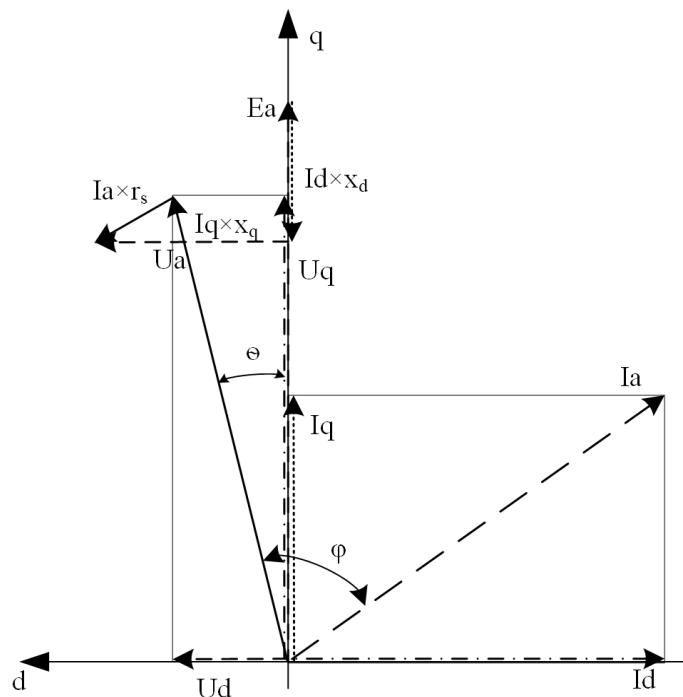


Рис. 3 – Векторная диаграмма пуска синхронного двигателя

Fig. 3 – Vector diagram of a synchronous motor start-up

Режим синхронного пуска

После достижения двигателем 15 % от максимальной скорости система переходит в замкнутый режим управления. Этот режим отличается тем, что в работу вступает наблюдатель, который рассчитывает значение скорости и восстанавливает ЭДС машины. СИФУ инвертора синхронизируется по полученной ЭДС, формируя вектор напряжения, совпадающий с вектором ЭДС, т. е. исключается дополнительная реактивная составляющая потребляемой мощности. Слежение за вектором ЭДС двигателя исключает факт опрокидывания машины. Система управления выпрямителем переходит в двухконтурное управление: внешний контур – регулирования скорости, внутренний – тока I_{dc} . Система управления выпрямителем использует значение скорости, получаемое от МПСУ инвертора, ПИ-регулятор формирует задание для внутреннего регулятора таким образом, чтобы на валу машины создавался момент, необходимый для обеспечения заданного темпа нарастания скорости [11]. После достижения заданной скорости система поддерживает ее на заданном уровне, регулируя ток двигателя, необходимый для преодоления момента нагрузки.

2. Описание наблюдателя

Как уже отмечалось, особенностью описываемой системы является отсутствие датчика скорости двигателя для синхронизации системы управления инвертором. Для получения значения скорости и угла поворота ротора используется математический алгоритм наблюдателя на основе вычисления потокосцепления [12].

Данный тип наблюдателей является пассивным, так как данный наблюдатель восстанавливает вектор состояния системы на основании полученных косвенных измерений. В активных методах наблюдения предполагают внесение в систему дополнительных возмущений, и реакция системы на эти возмущения позволяет оценить необходимый параметр системы [13].

В отличие от остальных типов наблюдателей наблюдатель на основе вычисления потокосцепления не обладает сложными математическими операциями в своей основе. Также данный наблюдатель восприимчив к зашумленности входных сигналов, как и остальные типы пассивных наблюдателей, наблюдатель на основе потокосцепления не имеет возможности работы на низких скоростях машины из-за низкого уровня напряжения статора машины [14].

Работа алгоритма наблюдателя основывается на вычислении мгновенных значений проекций вектора потокосцепления на оси α - β координат, используя выражения:

$$\Psi_{\alpha} = \int (U_{\alpha} - i_{\alpha} r_s) dt - L_s i_{\alpha} = \Psi_m \cos(\theta); \quad (1)$$

$$\Psi_{\beta} = \int (U_{\beta} - i_{\beta} r_s) dt - L_s i_{\beta} = \Psi_m \sin(\theta), \quad (2)$$

где r_s – известное значение активного сопротивления обмоток статора; L_s – индуктивность обмоток.

Для уменьшения переходного процесса и фильтрации шумов в сигналах токов и напряжений интеграторы вычисления проекций потокосцепления (1 и 2) охватим неглубокой отрицательной обратной связью. Отрицательная связь реализуется на основе ПИ-регуляторов с большой постоянной времени [15]. Тогда выражения потокосцепления в пространстве Лапласа примут следующий вид:

$$\Psi_{\alpha} = \left[\frac{1}{s} (U_{\alpha} - r_s i_{\alpha}) - L_s i_{\alpha} \right] \frac{T_{\Pi} s^2}{K_{\Pi} + K_{\Pi} T_{\Pi} s + T_{\Pi} s^2}; \quad (3)$$

$$\Psi_{\beta} = \left[\frac{1}{s} (U_{\beta} - r_s i_{\beta}) - L_s i_{\beta} \right] \frac{T_{\Pi} s^2}{K_{\Pi} + K_{\Pi} T_{\Pi} s + T_{\Pi} s^2}, \quad (4)$$

где K_{Π} – коэффициент пропорциональности ПИ-регулятора; T_{Π} – постоянная времени ПИ-регулятора; s – переменная преобразования Лапласа.

Для исключения влияния изменения амплитуды токов и напряжений машины приведем амплитуду проекций потокосцепления к единичному значению, разделив на модуль вектора потокосцепления:

$$\Psi'_{\alpha} = \frac{\Psi_{\alpha}}{\sqrt{\Psi_{\alpha}^2 + \Psi_{\beta}^2}}; \quad (5)$$

$$\Psi'_\beta = \frac{\Psi_\beta}{\sqrt{\Psi_\alpha^2 + \Psi_\beta^2}}. \quad (6)$$

Это позволит перейти в процессе вычисления скорости к безразмерным величинам.

Угол поворота ротора равен углу поворота вектора потокосцепления и может быть вычислен следующим образом:

$$\theta = \arctg\left(\frac{\Psi_\beta}{\Psi_\alpha}\right). \quad (7)$$

Разработка системы управления была направлена на использование ее с применением микроконтроллеров с относительно небольшими вычислительными мощностями, так как большинство микроконтроллеров не имеет в своем математическом аппарате функцию «арктангенс». Угол поворота ротора может быть вычислен с использованием следящего контура фазовой автоподстройки частоты (СКФАС).

Принцип работы СКФАС опирается на априорное условие, что вектор потокосцепления вычислен верно, если его проекция на мнимую ось вращающейся системы координат $d-q$ равна нулю:

$$\text{Im}(\Psi_m) \approx 0. \quad (8)$$

Используя преобразование, позволяющее перейти из системы координат $\alpha-\beta$ во вращающуюся систему $d-q$ координат, получим выражение для вычисления проекции вектора потокосцепления на мнимую ось:

$$\text{Im}(\Psi_m) = \Psi_\beta \cos(\theta) - \Psi_\alpha \sin(\theta). \quad (9)$$

Условие, определяемое выражением (9), будет выполняться, если разница между реальным углом поворота ротора и вычисляемым будет равна нулю [16]. Данное условие отслеживается с помощью ПИ-регулятора, формирующего в качестве своего выходного сигнала значение скорости вращения ротора:

$$\omega = \text{Im}(\Psi_m) K_s \left(1 + \frac{1}{T_s s}\right), \quad (10)$$

где K_s – коэффициент пропорциональности; T_s – постоянная времени интегрирования; s – переменная преобразования Лапласа. Интегрируя выражение (10), можно получить значение угла поворота ротора

$$\theta = \omega \frac{1}{s}. \quad (11)$$

Полученная структура наблюдателя изображена на рис. 4.

ЭДС машины вычисляется с использованием функции «синус» из полученного значения угла положения ротора.

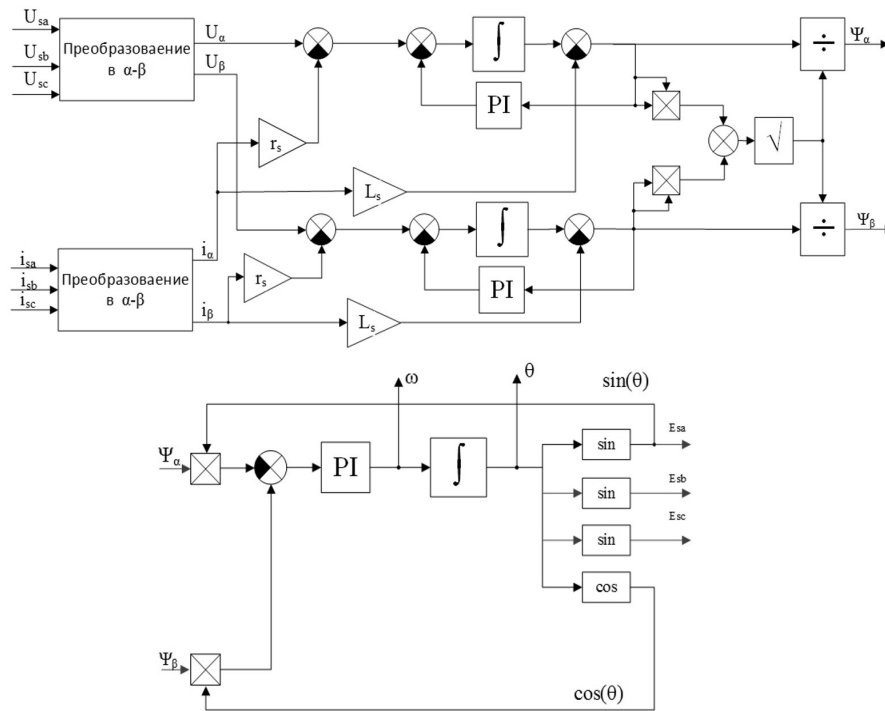


Рис. 4 – Структура наблюдателя вычисления угла поворота ротора на основе потокосцепления

Fig. 4 – The structure of the observer for calculating a rotation angle of the rotor based on the flux linkage

3. Моделирование

Моделирование проводилось в программном пакете PSIM, реализованная модель была максимально приближена к реальному устройству, в том числе была создана дискретная система управления на основе DLL-блока, с помощью которого реализуется имитация выполнения алгоритмов, написанных на языке программирования С.

Система рассчитывалась на работу синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов со следующими параметрами:

- номинальная мощность 100 кВт;
- максимальная мощность 150 кВт;
- номинальное действующее напряжение фазы 115 В;
- число фаз 3;
- частота напряжения 400 Гц;
- номинальная скорость вращения 24000 об/мин;
- число пар полюсов 1;
- момент инерции $0,014 \text{ кг} \cdot \text{м}^2$.

Система питается от МЭГ, входящего в состав вспомогательной силовой установки, с максимальной мощностью 150 кВт и качеством напряжения, регламентированным по ГОСТ 54073–2010. Тиристоры, входящие в состав силовой схемы, были выбраны типа ТБ243-500-15, исходя из расчета частоты переключения, максимально возможному среднему протекающему току и максимальному обратному напряжению.

На рис. 5 представлена имитационная модель силовой схемы преобразователя. Согласно принципу построения систем генерирования электрической энергии для летательных аппаратов существует необходимость в соединении нейтрали. Это приводит к протеканию через двигатель токов, кратных третьей гармонике, и дополнительному разогреву обмоток, но не влияет на создаваемый момент двигателя.

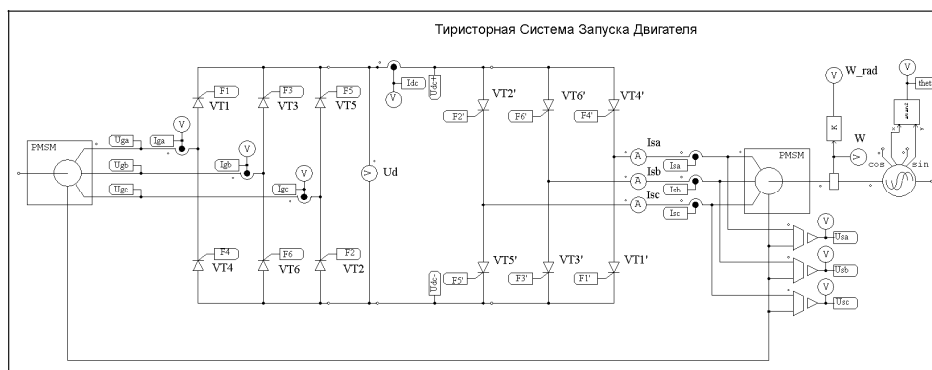


Рис. 5 – Математическая модель силовой части стартер-генераторной системы

Fig. 5 – A mathematical model of the power part of the starter-generator system

Для подтверждения корректной работы наблюдателя в модель силовой схемы добавлен датчик скорости и датчик положения ротора. Модель блоков МПСУ представлена на рис. 6. Блоки МПСУ и силовая схема соединены сигнальными линиями.

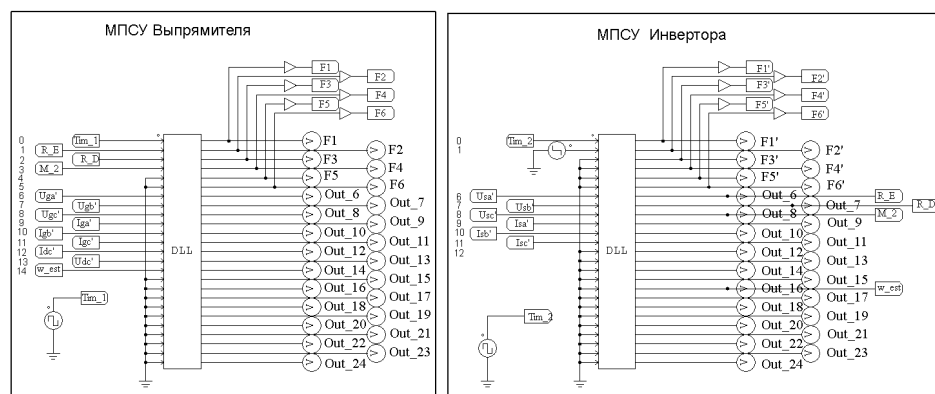


Рис. 6 – Математическая модель микропроцессорной системы управления

Fig. 6 – A mathematical model of the microprocessor control system

На рис. 7 представлена диаграмма изменения скорости машины во время ее разгона, а также диаграммы фазного тока машины и тока DC-звена.

В течение первых 1,8 секунды система работает в режиме принудительного разгона. При этом, как видно на диаграмме, скорость машины колеблется. Это связано с тем, что в режиме принудительного разгона система управления разомкнута, т.е. нет регулирования скорости, а также угла поворота вектора подаваемого напряжения, не зависит от угла поворота ротора. В связи с этим действующее значение тока синхронного двигателя возрастает с увеличением скорости.

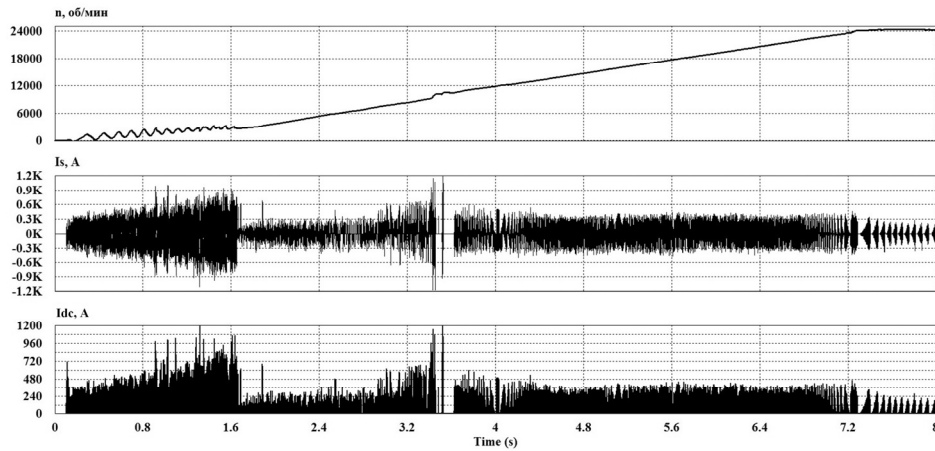


Рис. 7 – Осциллограммы изменения скорости вала машины, тока в DC-звене и фазного тока статора

Fig. 7 – Waveforms of the speed change of the machine shaft, the current in the DC link and the phase current of the stator

После достижения двигателем скорости вращения 2700 об/мин система переходит в замкнутый режим работы. К этому моменту времени наблюдатель пришел в устойчивое состояние и значение рассчитываемой скорости равно реальной скорости машины. СИФУ инвертора синхронизируется с ЭДС синхронного двигателя, восстановленной наблюдателем. Это существенно снижает уровень потребляемого тока. Как видно на диаграмме, действующее значение тока машины сохранится на постоянном уровне, который создает момент на валу, разгоняющий двигатель с заданным темпом.

За 7,3 секунды двигатель достигает заданной скорости 24 000 об/мин. Уровень потребляемого тока снижается до значения, необходимого для поддержания скорости.

На рис. 8 и 9 показаны диаграммы скорости, первой гармоники тока фазы двигателя и тока Idc при скорости 2100 и 24 000 об/мин соответственно.

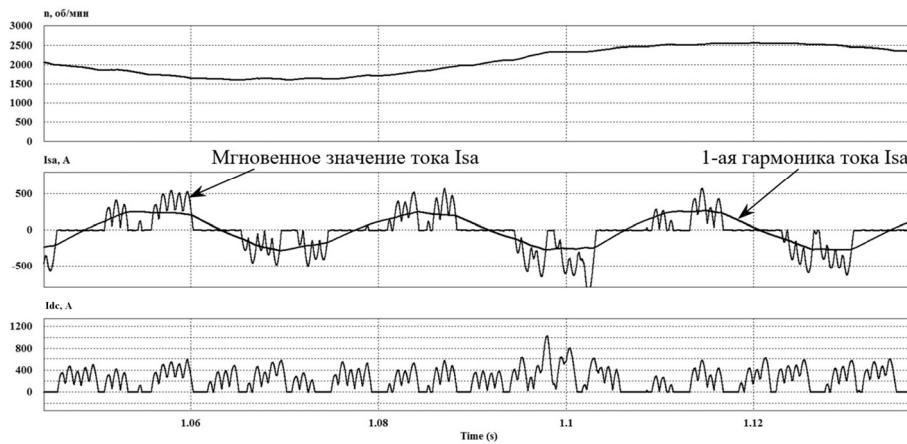


Рис. 8 – Осциллограммы фазного тока статора и тока DC-звена при скорости вала 2100 об/мин

Fig. 8 – Oscillograms of the phase current of the stator and the current of the DC link at a shaft speed of 2100 rpm

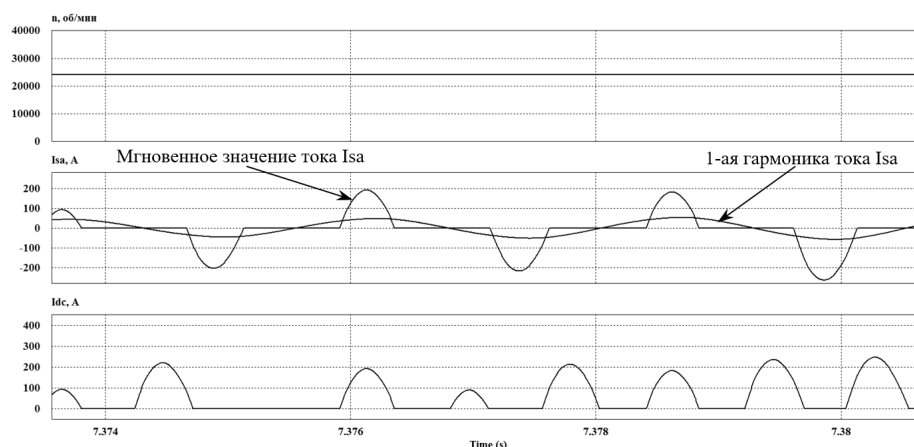


Рис. 9 – Осциллограммы фазного тока статора и тока DC-звена при скорости вала 24 000 об/мин

Fig. 9 – Oscillograms of the phase current of the stator and the current of the DC link at a shaft speed of 24,000 rpm

Из-за отсутствия фильтров в звене постоянного тока ток I_{dc} пульсирует с периодическими нулевыми паузами. Инвертор непосредственно передает ток I_{dc} в двигатель, в связи с этим ток фазы двигателя представляет из себя сложную форму. При выделении первой гармоники из формы тока видно, что амплитудное значение первой гармоники тока вполтину меньше амплитуды исходной формы тока.

При исследовании работы наблюдателя в генераторном режиме синхронной машины выяснилось, что наблюдатель с точностью 0,7 % рассчитывает значение угла поворота ротора и предельно точно фазу ЭДС машины, результаты показаны на рис.10. Восстановленная ЭДС машины имеет амплитуду, определяемую пользователем, и может быть задана любой величины.

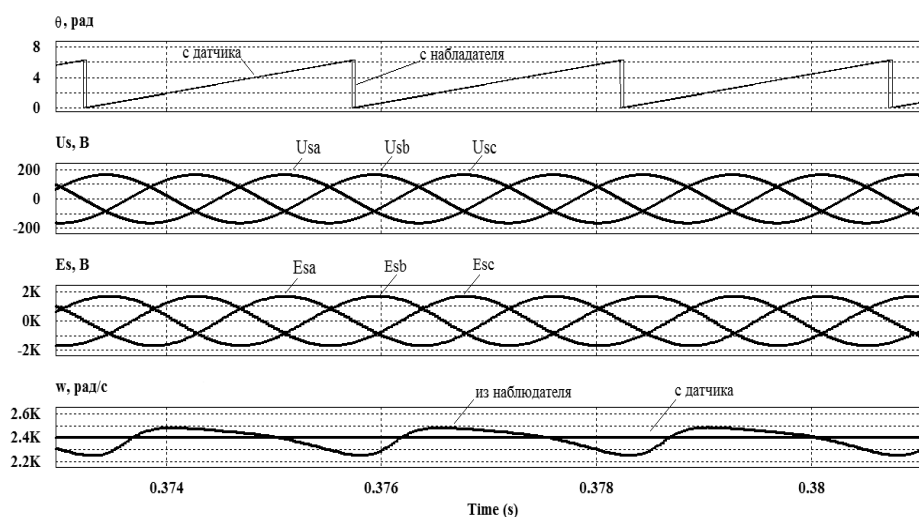


Рис. 10 – Осциллограммы работы наблюдателя

Fig. 10 – Oscillograms of the observer's work

Восстановленный сигнал скорости машины имеет пульсации величиной 9,7 % относительно средней величины. Пульсации связаны с использованием следящего контура фазовой автоподстройки частоты для вычисления скорости. Среднее значение получаемой скорости вычисляется с точностью 0,7 %. Полученная точность вычисления говорит о том, что параметры наблюдателя были вычислены верно.

При работе преобразователя с использованием наблюдателя СИФУ синхронизируется с ЭДС машины, полученной при помощи наблюдателя (рис. 11).

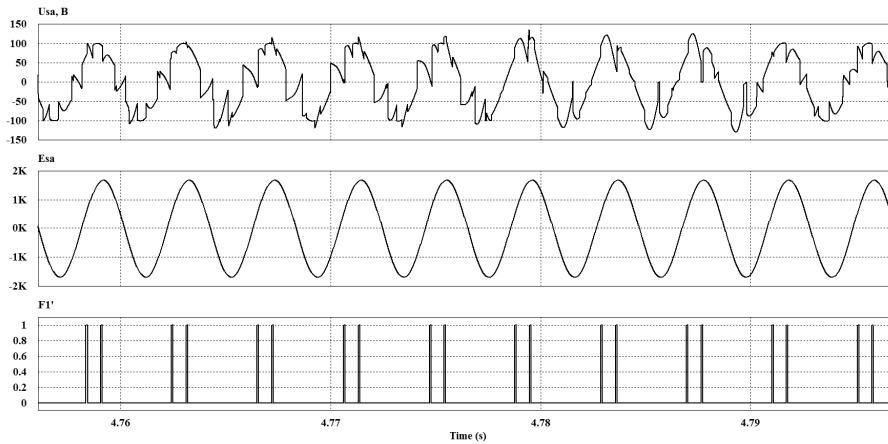


Рис. 11 – Осциллограммы синхронизации системы управления по ЭДС машины

Fig. 11 – Oscillograms of control system synchronization by means of the EMF machine

Это позволяет исключить влияние искажений и зашумленности напряжения, а также формировать вектор напряжения, синфазный с вектором ЭДС машины.

На рис.12 показаны диаграммы подаваемых импульсов на тиристоры инвертора (F'), выпрямителя (F), запрещающего импульса (F_D) и тока I_{dc} . Из диаграммы видно, что при переключении тириستоров инвертора подается запрещающий импульс в СИФУ выпрямителя, блокирующий импульсы выпрямителя. Ток I_{dc} спадает до нуля – это позволяет работающему тиристор инвертора выключиться, а следующему тиристор – включиться.

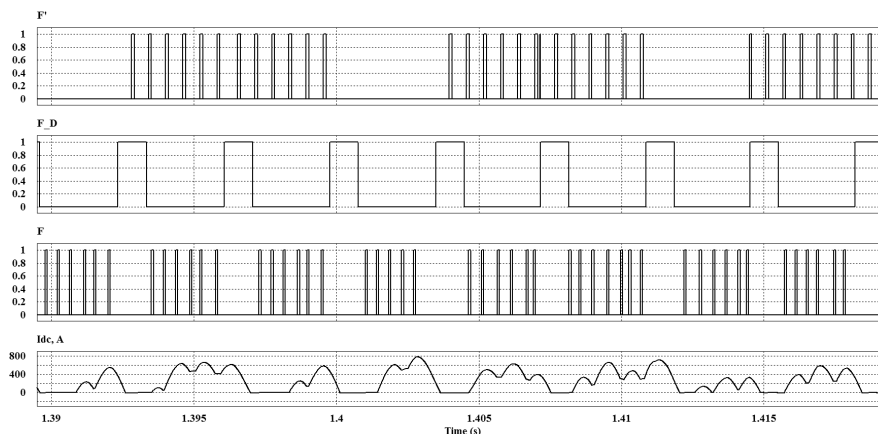


Рис. 12 – Импульсы управления при совместной работе выпрямителя и инвертора

Fig. 12 – Control impulses in simultaneous operation of the rectifier and inverter

Заключение

В данной работе показана возможность создания стартер-генераторной системы для маршевого двигателя летательного аппарата на основе синхронного двигателя с постоянными магнитами и полупроводникового преобразователя. Предложена и реализована система управления на основе наблюдателя, восстанавливающего ЭДС машины и угол положения ротора. Адаптивный наблюдатель на основе потокосцепления позволяет отказаться от датчика скорости и датчика положения ротора, что уменьшает массогабаритные показатели и уменьшает количество информационных линий системы. Также наблюдатель предоставляет близкие к реальным значения ЭДС синхронной машины, что дает возможность эффективно использовать магнитоэлектрический генератор. Реализованы алгоритмы системы управления и проведено математическое моделирование системы в стартерном режиме работы.

ЛИТЕРАТУРА

1. Электрооборудование летательных аппаратов. В 2 т. Т. 1: учебник для вузов / под ред. С.А. Грузкова. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 568 с.
2. **Волокитина Е.В.** Исследования по созданию системы генерирования и запуска маршевого двигателя в концепции полностью электрифицированного самолета. Ч. 1 // Электроника и электрооборудование транспорта. – 2011. – № 4. – С. 29–33.
3. Электрический самолет. Концепция и технологии / А.В. Лёвин, С.М. Мусин, С.А. Харитонов, К.Л. Ковелев, А.А. Герасин, С.П. Халютин; под ред. С.М. Мусина. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 388 с.
4. Электрический самолет: от идеи до реализации / А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалев. – М.: Машиностроение, 2010. – 288 с.
5. **Исмагилов Ф.Р.** Имитационная модель авиационного стартер-генератора // Авиакосмическое приборостроение. – 2014. – № 9. – С. 27–32.
6. Математическая модель системы запуска для трехкаскадного синхронного генератора с демпферной обмоткой / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, М.А. Жарков, В.С. Симин, П.А. Бачурин // Труды Международной шестнадцатой научно-технической конференции «Электроприводы переменного тока», 05–09 октября 2015 г. – Екатеринбург, 2015. – С. 153–158.
7. **Харитонов С.А.** Система «синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов – активный выпрямитель» (математическая модель) // Электротехника. – 2009. – № 12. – С. 33–41.
8. **Бут Д.А.** Бесконтактные электрические машины: учебное пособие для электромеханических и электроэнергетических специальностей вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1990. – 416 с.
9. **Харитонов С.А.** Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 536 с.
10. **Харитонов С.А.** Электромагнитные процессы в системе генерирования постоянного тока типа «магнитоэлектрический генератор – выпрямитель» при переменной частоте вращения вала генератора // Научный вестник НГТУ. – 1999. – № 1. – С. 133–162.
11. **Reshetnikov A.N.** Permanent magnet machine control of starter-generator // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013, Erlagol, Altai. – Novosibirsk, 2013. – P. 330–332. – doi: 10.1109/EDM.2013.6642007.
12. **Zharkov M.A., Kharitonov S.A., Simin V.S.** Electric starter mode of synchronous generator with permanent magnets // 14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013, Erlagol, Altai. – Novosibirsk, 2013. – P. 392–394. – doi: 10.1109/EDM.2013.6642021.

13. Applying the estimation system for synchronization of thyristor rectifier operating from the permanent magnet synchronous machine / V.E. Sidorov, D.V. Korobkov, M.A. Zharkov, M.V. Balagurov, A.G. Volkov // 18th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017, Erlagol, Altai. – Novosibirsk, 2017. – P. 579–583. – doi: 10.1109/EDM.2017.7981821.
14. **Yuan Q.** Sensorless control of permanent magnet synchronous motor with stator flux estimation // Journal of Computers. – 2013. – Vol. 8, N 1. – P. 108–112.
15. **Нос О.В.** Построение алгоритмов синхронизации трехфазных напряжений автономного инвертора и сети // Автометрия. – 2017. – Т. 53, № 4. – С. 66–73.
16. **Клиначев Н.В., Кулева Н.Ю., Воронин С.Г.** Определение углового положения ротора синхронного двигателя с возбуждением от постоянных магнитов // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. – 2014. – Т. 14, № 2. – С. 49–54.

DIRECT FREQUENCY CONVERTER FOR THE STARTER-GENERATOR SYSTEM OF THE MAIN PROPULSION ENGINE

**Zharkov M.A., Sidorov V.E., Preobrazhensky E.B.,
Balagurov M.V., Dubkova R.Yu., Kharitonov S.A.**

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

In recent years, there has been a rapid growth in research and development related to the implementation of the concept of "More Electric Aircraft" (MEA). This concept implies cross-platform integration of various aviation systems, such as hydraulic, fuel, air conditioning, power supply system, APU, main engine and others. Also, the concept provides for care from hydraulic, pneumatic and mechanical units to electrical systems that have less energy conversion losses, and have a higher level of process control. There are already systems for generating electric energy of variable frequency and constant voltage on board the medium-haul aircraft. This excludes devices that provide frequency stabilization of the system. Such aircraft as Boeing-787, A-380 and the newest Russian aircraft MC-21 are examples. In such systems, in particular, synchronous generators with permanent-magnet excitation are used. The article presents a starter-generator system for the aircraft flight engine. A feature of the presented system is the use of a synchronous motor with permanent magnets (PMSM) and a semiconductor converter. The system with PMSM allows the use of the adaptive observer algorithm based on flux linking, which makes it possible to abandon the speed sensor and the rotor position sensor. This reduces the weight and dimensions and reduces the number of information lines of the system. Also, the observer provides values of a synchronous machine close to real EMF, which makes it possible to effectively use a magnetoelectric generator. The article presents the results of mathematical modeling of the system in the starter mode of operation.

Keywords: starter, generator, power supply system, main engine, aircraft, synchronous generator, semiconductor converter.

DOI: 10.17212/1727-2769-2018-3-58-73

REFERENCES

1. Gruzskova S.A., ed. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov*. V 2 t. T. 1 [Electrical equipment of aircraft. In 2 vol. Vol. 1]. Moscow, MPEI Publ., 2005. 568 p.
2. Volokitina E.V. Issledovaniya po sozdaniyu sistemy generirovaniya i zapuska marshevoego dvigatelya v kontseptsii polnost'yu elektrifitsirovannogo samoleta. Ch. 1 [Investigations of the system of generating and starting of mid-flight engine in "all electric aircraft" concept. Pt. 1]. *Elektronika i elektrooborudovanie transporta – Electronics and electrical equipment of transport*, 2011, no. 4, pp. 29–33.

3. Levin A.V., Musin S.M., Kharitonov S.A., Kovalev K.L., Gerasin A.A., Khalyutin S.P. *Elektricheskii samolet. Kontseptsiya i tekhnologii* [Electric aircraft. The concept and technology]. Ufa, UGATU Publ., 2014. 388 p.
4. Levin A.V., Alekseev I.I., Kharitonov S.A., Kovalev L.K. *Elektricheskii samolet: ot idei do realizatsii* [Electric aircraft: from idea to realization]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2010. 288 p.
5. Ismagilov F.R. Imitatsionnaya model' aviatsionnogo starter-generatora [Simulation model of an aviation starter generator]. *Aviakosmicheskoe priborostroenie – Aerospace Instrument-Making*, 2014, no. 9, pp. 27–32.
6. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Zharkov M.A., Simin V.S., Bachurin P.A. [Mathematical model of the starter system for a three-stage synchronous generator with a damping cage]. *Trudy Mezhdunarodnoi shestnadsatoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii "Elektroprivody peremennogo toka"* [Proceeding of the sixteenth international scientific-technical conference "Alternating current electrical drives"], Ekaterinburg, 2015, pp. 153–158. (In Russian).
7. Kharitonov S.A. Sistema "sinkhronnyi generator s vzbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov – 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).
8. But D.A. *Beskontaktnye elektricheskie mashiny* [Non-contact electrical machines]. Moscow, Vysshaya shkola Publ., 1990. 416 p.
9. Kharitonov S.A. *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh generirovaniya elektricheskoi energii dlya avtonomnykh ob"ektov* [Electromagnetic processes in power generation systems for autonomous objects]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 536 p.
10. Kharitonov S.A. Elektromagnitnye protsessy v sisteme generirovaniya postoyannogo toka tipa "magnitoelektricheskii generator – vypryamitel'" pri peremennoi chastote vrashcheniya vala generatora [Electromagnetic processes in the system of generating a direct current of the type "magnetoelectric generator–rectifier" at a variable frequency of rotation of the generator shaft]. *Nauchnyi vestnik Novosibirskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta – Science bulletin of the Novosibirsk state technical university*, 1999, no. 1, pp. 133–162.
11. Reshetnikov A.N. Permanent magnet machine control of starter-generator. *14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013*, Erlagol, Altai, 2013, pp. 330–332. doi: 10.1109/EDM.2013.6642007.
12. Zharkov M.A., Kharitonov S.A., Simin V.S. Electric starter mode of synchronous generator with permanent magnets. *14th International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2013*, Erlagol, Altai, 2013, pp. 392–394. doi: 10.1109/EDM.2013.6642021.
13. Sidorov V.E., Korobkov D.V., Zharkov M.A., Balagurov M.V., Volkov A.G. Applying the estimation system for synchronization of thyristor rectifier operating from the permanent magnet synchronous machine. *The 18 International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices EDM 2017*, Erlagol, Altai, 2017, pp. 579–583. doi: 10.1109/EDM.2017.7981821.
14. Yuan Q. Sensorless control of permanent magnet synchronous motor with stator flux estimation. *Journal of Computers*, 2013, vol. 8, no. 1, pp. 108–112.
15. Nos O.V. Postroenie algoritmov sinkhronizatsii trekhfaznykh napryazhenii avtonomnogo invertora i seti [Construction of algorithms for synchronization of three-phase voltages of an autonomous inverter and a network]. *Avtometriya – Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2017, vol. 53, no. 4, pp. 66–73. (In Russian).
16. Klinachev N.V., Kuleva N.Yu., Voronin S.G. Opredelenie uglovogo polozheniya rotora sinkhronnogo dvigatelya s vzbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov [Rotor position estimation for permanent magnet synchronous motor]. *Vestnik YuUrGU. Seriya: Energetika – Bulletin of South Ural State University. Series: Power Engineering*, 2014, vol. 14, no. 2, pp. 49–54.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Жарков Максим Андреевич – родился в 1988 году, ведущий инженер-конструктор, Институт силовой электроники, НГТУ. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, электропривод. Опубликовано 20 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: maks.zharkoff@yandex.ru).

Zharkov Maksim Andreevich (b. 1988) – leading design engineer, Institute of Power Electronics, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronics, aircraft generating systems, and electric drive. He is the author of 20 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: maks.zharkoff@yandex.ru).



Сидоров Вадим Евгеньевич – родился в 1995 году, магистрант, НГТУ. Область научных интересов: электропривод, DC-DC преобразователи, силовая электроника. Опубликовано 3 научные работы. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: reksarph@gmail.com).

Sidorov Vadim Evgenievich (b. 1995) – master student, NSTU. His research interests are currently focused on electric drive, DC-DC converters, and power electronics. He is the author of three scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: reksarph@gmail.com).



Преображенский Евгений Борисович – родился в 1947 году, заведующий лабораториями кафедры электроники и электротехники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: силовая электроника, системы хранения и генерирования электрической энергии. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: preob@ngs.ru).

Preobrazhensky Evgeny Borisovich. – head of the laboratories, Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronics, power storage and generation systems. He is author of 50 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: preob@ngs.ru).



Балагуров Максим Владимирович – родился в 1990 году, ассистент, кафедра вычислительной техники, Новосибирский государственный технический университет. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, системы накопления электрической энергии. Опубликовано 22 научные работы. (Адрес: Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: balagurov@corp.nstu.ru).

Balagurov Maksim Vladimirovich (b. 1990) – assistant lecturer at the department of computer engineering, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronics, aircraft power generation systems and energy storage systems. He is the author of 22 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: balagurov@corp.nstu.ru).



Дубкова Регина Юрьевна – родилась в 1991 году, инженер 2 категории, Институт силовой электроники, НГТУ. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, непосредственные преобразователи частоты. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: sarakhanova_nstu@mail.ru).

Dubkova Regina Yurievna (b. 1991) – engineer, Institute of Power Electronics, NSTU. Her research interests are currently focused on power electronics, aircraft generating systems, and direct frequency converters. She is the author of 10 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sarakhanova_nstu@mail.ru).



Харитонов Сергей Александрович – родился в 1950 году, д-р техн. наук, профессор, заведующий кафедрой электроники и электротехники, директор Института силовой электроники Новосибирского государственного технического университета. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, непосредственные преобразователи частоты, системы накопления электрической энергии. Опубликовано более 300 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: Kharit1@yandex.ru).

Kharitonov Sergey Aleksandrovich (b. 1950) – Doctor of Science (Eng.), professor, head of the Department of Electronics and Electrical Engineering, Director of the Power Electronics Institute, Novosibirsk State Technical University. His research interests are currently focused on power electronics, aircraft generating systems, and direct frequency converters. He is the author of 300 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: Kharit1@yandex.ru).

Статья поступила 19 февраля 2018 г.

Received February 19, 2018

To Reference:

Zharkov M.A., Sidorov V.E., Preobrazhensky E.B., Balagurov M.V., Dubkova R.Yu., Kharitonov S.A. Neposredstvennyi preobrazovatel' chastoty dlya starter-generatornoi sistemy marsh-evogo dvigatelya [Direct frequency converter for the starter-generator system of the main propulsion engine]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2018, no. 3 (40), pp. 58–73. doi: 10.17212/1727-2769-2018-3-58-73.