

УДК 621.314.58

М.А. Хорошев, С.А. Харитонов

Анализ динамических процессов в системе генерирования электрической энергии переменного тока переменной частоты для летательных аппаратов

Анализируются динамические процессы в системе электроснабжения переменного тока переменной частоты для летательного аппарата типа «синхронный генератор – полупроводниковый преобразователь». В качестве синхронного генератора выступает магнитоэлектрический генератор, роль полупроводникового преобразователя выполняет трехфазный транзисторный инвертор напряжения в обращенном режиме, подключенный параллельно. Предложена математическая модель системы генерирования электрической энергии во вращающейся системе координат $dq0$. Разработана структура системы регулирования напряжения на зажимах генератора и напряжения в звене постоянного тока инвертора. Получены передаточные характеристики для анализа устойчивости системы. Проведено имитационное моделирование динамических режимов работы системы при динамической нагрузке и изменении частоты генерируемого напряжения.

Ключевые слова: активный выпрямитель, синхронный генератор с постоянными магнитами, авиационная система электроснабжения, система замкнутого регулирования, динамический процесс, оптимальное управление.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-103-110

Стремление к улучшению технико-экономических показателей летательных аппаратов (ЛА) следующего поколения ставит перед авиационными специалистами целый ряд сложных задач, которые требуют новых методов построения бортовых энергетических систем. Так, наиболее перспективным направлением в данной области исследования является создание летательного аппарата с единой централизованной вторичной системой электроснабжения, обеспечивающей все энергетические потребности бортового оборудования. Данная концепция была выдвинута в результате исследований по улучшению энергетической эффективности летательных аппаратов и имеет название «Полностью электрический самолет» [1]. В отличие от устоявшейся методики создания бортовых энергетических систем, в которых используется три вида вторичных систем:

- гидравлическая система;
- система электроснабжения;
- пневматическая система,

в централизованной системе электрическая энергия будет применяться для питания наиболее энергоемких систем, которые традиционно использовали для своего функционирования гидравлическую и пневматическую энергию.

По оценкам специалистов, использование централизованной системы электроснабжения позволит [1]:

- снизить потребление топлива на 8–12%;
- снизить полную взлетную массу на 6–10%;
- снизить эксплуатационные расходы на 5–10%;
- увеличить средний налет на отказ на 5–6%;
- снизить стоимость жизненного цикла на 3–5%;
- снизить время технического обслуживания на 4–5%.

Однако стремление к созданию систем, в которых электрическое оборудование преобладает над оборудованием, работающим от других видов энергии, несет в себе ряд сложностей. Одной из таких проблем является поиск компромисса между жела-

нием уменьшить существующие массогабаритные показатели систем электроснабжения и улучшить качество генерируемой электрической энергии. По данному вопросу на сегодняшний день ведутся многочисленные дискуссии [2].

Постановка задачи

С постановкой концепций «Полностью электрический самолет» и «Более электрический самолет» повышение качества электрической энергии в системах электропитания летательных аппаратов стало одной из самых важных задач при проектировании летательных аппаратов. Более того, с ростом мощности электрооборудования ЛА возрастает необходимость в новых методах построения систем электроснабжения. На сегодняшний день широкий круг ученых и инженеров проводят исследования по дальнейшей электрификации бортового оборудования летательных аппаратов.

Так, мощность систем электропитания на отдельном летательном аппарате может достигать 1 МВт [1]. Нетрудно предположить, что потребители в такой системе могут быть самыми разнообразными – от тех, для кого качество электрической энергии не играет особой роли, до прецизионных устройств, перебои в электропитании для которых могут привести к некорректной работе или выходу их из строя.

Документом, регламентирующим качество электрической энергии на летательных аппаратах, является ГОСТ Р 540073–2010 «Системы электроснабжения самолетов и вертолетов» [3]. В этом документе описаны все разрешенные типы систем электропитания воздушных судов, регламентированы динамические процессы, возможные допуски по просадке и всплескам напряжения, типы нагрузок и т.д.

Среди типов систем электроснабжения воздушных судов большой интерес представляет новая система переменного тока переменной частоты

115/200 В, 380–800 Гц. Данная система была предложена в ходе усовершенствования электрического оборудования воздушных судов, при котором стабильность частоты питающего напряжения перестала быть критичным фактором [4, 5]. Предложенный тип системы электропитания открыл новые пути к созданию систем генерирования электрической энергии. Более того, развитие силовой электроники позволило создавать такие системы более гибкими, и большое количество исследований проводится в этом направлении на сегодняшний день.

Одним из способов построения такой системы является использование в своем составе синхронного генератора (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов. Особенность работы такого генератора заключается в том, что величина напряжения на его зажимах зависит от частоты вращения вала и нагрузки, поэтому в составе такой системы обязательно должен быть использован регулятор напряжения [6]. Учитывая высокий уровень развития технической базы современной силовой электроники, рациональнее всего в качестве регулятора напряжения использовать полупроводниковый преобразователь.

Схемы на базе синхронного генератора и полупроводникового преобразователя условно называют системами генерирования электрической энергии типа «СГ-ПП».

На рис. 1 изображена принципиальная схема системы генерирования электрической энергии (СГЭЭ) типа «СГ-ПП» переменного тока переменной частоты. Как видно из схемы, роль регулятора напряжения выполняет трехфазный инвертор в обращенном режиме [7].

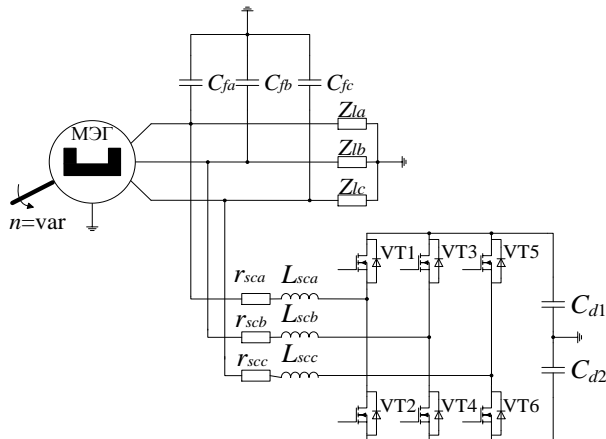


Рис. 1. Принципиальная схема СГЭЭ типа «СГ-ПП» переменной частоты

Регулирование напряжения на зажимах СГ происходит посредством генерирования синусоидального тока полупроводниковым преобразователем, сдвинутого по фазе на $\pi/2$ или $-\pi/2$ относительно генерируемого напряжения, вследствие чего, за счет реакции якоря, происходит увеличение или уменьшение суммарного магнитного потока синхронного генератора, как это показано в публикациях [7–9]. В публикации [10] предложен способ син-

хронизации системы управления при переменной частоте генерируемого напряжения. В статье рассмотрена разработка математической модели СГЭЭ переменного напряжения переменной частоты.

Теоретический анализ

Малосигнальная модель. Для анализа свойств СГЭЭ необходимо получить динамическую модель. Существует два основных способа представления преобразовательных импульсных систем как динамических объектов. Первый подход, в котором силовая часть, работающая с ШИМ или ЧИМ, рассматривается как дискретное звено, позволяет выявить особенности всей дискретной системы, в частности, определить границы устойчивости по точной модели. К сожалению, изначальное рассмотрение силовой части преобразователя как дискретного динамического звена приводит к большим математическим сложностям.

Второй подход представления силовой части импульсного преобразователя, работающего с любым типом ШИМ, с аналоговым или дискретным процессором в управляющей части, основан на замене силовой части как дискретного звена непрерывным. Такой подход оправдан, когда частота ШИМ значительно больше полосы пропускания непрерывной части системы. Помимо перехода к непрерывному звену, практически полезно и дальнейшее изменение – переход от нелинейного звена к линейному. Полученная таким образом модель является непрерывной и линейной, доступна для анализа динамических свойств известными методами [11].

Непрерывная модель СГЭЭ во вращающейся синхронно с ротором СГ системе dq -координат представлена уравнениями (1)–(5).

$$U_{sgd} = U_{dc} \frac{1}{2} M_d + r_{sc} I_{scd} + L_{sc} \frac{dI_{scd}}{dt} - \omega L_{sc} I_{scq}; \quad (1)$$

$$U_{sgq} = U_{dc} \frac{1}{2} M_q + r_{sc} I_{scq} + L_{sc} \frac{dI_{scq}}{dt} + \omega L_{sc} I_{scd}, \quad (2)$$

где U_{sgd} , U_{sgq} – напряжение на зажимах СГ по d - и q -координатам соответственно; r_{sc} – активное сопротивление дросселя ПП; L_{sc} – индуктивность дросселя ПП; I_{scd} , I_{scq} – ток ПП по d - и q -координатам соответственно; M_d , M_q – глубина модуляции по d - и q -координатам соответственно; ω – круговая частота генерируемого напряжения СГ; U_{dc} – напряжение в звене постоянного тока;

$$C_d \frac{dU_{dc}}{dt} = \frac{3}{4} (M_d I_{scd} + M_q I_{scq}), \quad (3)$$

где C_d – емкость в звене постоянного тока ПП.

$$E_d = U_{sgd} + r_{sg} I_{sgd} + L_{sg} \frac{dI_{sgd}}{dt} - \omega L_{sg} I_{sgq}; \quad (4)$$

$$E_q = U_{sgq} + r_{sg} I_{sgq} + L_{sg} \frac{dI_{sgq}}{dt} + \omega L_{sg} I_{sgd}, \quad (5)$$

где E_d , E_q – ЭДС от постоянных магнитов СГ по d - и q -координатам соответственно; r_{sg} – активное сопротивление обмотки статора СГ; L_{sg} – индуктив-

ность обмотки статора СГ; I_{sgd}, I_{sgq} – ток СГ по d - и q -координатам соответственно.

Следующий шаг на пути к анализу динамических свойств и синтезу системы управления – линеаризация системы уравнений.

Для проведения процедуры линеаризации, каждую переменную в системе уравнений (1)–(5) представим в виде суммы среднего значения и её бесконечно малого отклонения. Целью линеаризации является исключение нелинейных компонент из уравнений [12]. В результате получим систему уравнений (6)–(10):

$$\hat{u}_{sgd} = U_{dc} \frac{1}{2} \hat{m}_d + \hat{u}_{dc} \frac{1}{2} M_d + r_{sc} \hat{i}_{scd} + L_{sc} \frac{d\hat{i}_{scd}}{dt} - \omega L_{sc} \hat{i}_{scq}; \quad (6)$$

$$\hat{u}_{sgq} = U_{dc} \frac{1}{2} \hat{m}_q + \hat{u}_{dc} \frac{1}{2} M_q + r_{sc} \hat{i}_{scq} + L_{sc} \frac{d\hat{i}_{scq}}{dt} + \omega L_{sc} \hat{i}_{scd}, \quad (7)$$

где $\hat{u}_{sgd}, \hat{u}_{sgq}$ – малое отклонение напряжения на зажимах СГ по d - и q -координатам соответственно; \hat{u}_{cd} – малое отклонение напряжения в звене постоянного тока; $\hat{i}_{scd}, \hat{i}_{scq}$ – малое отклонение тока ПП по d - и q -координатам соответственно; \hat{m}_d, \hat{m}_q – малое отклонение глубины модуляции по d - и q -координатам соответственно.

$$Cd \frac{d\hat{u}_{dc}}{dt} = \frac{3}{4} (\hat{m}_d I_{scd} + M_d \hat{i}_{scd} + \hat{m}_q I_{scq} + M_q \hat{i}_{scq}); \quad (8)$$

$$\hat{e}_d = \hat{u}_{sgd} + r_{sg} \hat{i}_{sgd} + L_{sg} \frac{d\hat{i}_{sgd}}{dt} - \omega L_{sg} \hat{i}_{sgq}; \quad (9)$$

$$\hat{e}_q = u_{sgq} + r_{sg} \hat{i}_{sgq} + L_{sg} \frac{d\hat{i}_{sgq}}{dt} + \omega L_{sg} \hat{i}_{sgd}, \quad (10)$$

где \hat{e}_d, \hat{e}_q – малое отклонение ЭДС от постоянных магнитов СГ по d - и q -координатам соответственно; $\hat{i}_{sgd}, \hat{i}_{sgq}$ – малое отклонение тока СГ по d - и q -координатам соответственно.

Уравнения (6)–(8) отображают непрерывную линеаризованную динамическую модель ПП, уравнения (9), (10) – непрерывную линеаризованную динамическую модель СГ.

Полученная модель позволяет анализировать динамические процессы в «малом», протекающие в СГЭЭ переменной частоты. Параллельно с анализом динамики необходимым является построение замкнутой системы регулирования для стабилизации постоянного уровня напряжения в звене постоянного тока и амплитуды переменного напряжения на зажимах генератора.

Синтез системы замкнутого регулирования

Для построения системы регулирования воспользуемся принципом подчиненного регулирования. Синтезированная по такому принципу система представляет собой многоконтурную структуру с каскадным включением регуляторов.

Применительно к СГЭЭ переменной частоты с параллельно включенным активным выпрямителем напряжения система подчиненного регулирования содержит два двухконтурных канала управления. Первый канал содержит два последовательно включенных регулятора, где внешний контур – контур регулирования напряжения в звене постоянного тока, а внутренний – контур регулирования активного тока полупроводникового преобразователя. Второй канал также содержит два регулятора, где внешний отвечает за регулирование напряжения на зажимах генератора, а второй – за регулирование реактивного тока полупроводникового преобразователя.

На рис. 2 представлена структурная схема замкнутой системы регулирования СГЭЭ переменной частоты. В ней введена компенсация перекрестных связей токов координат d и q .

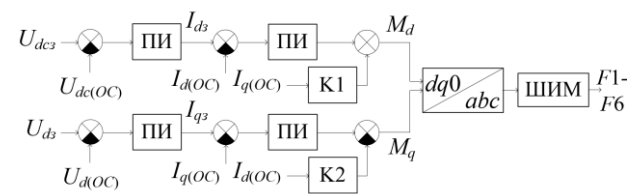


Рис. 2. Структурная схема замкнутой системы регулирования СГЭЭ переменной частоты: ПИ – пропорционально-интегральный регулятор; К1, К2 – коэффициенты перекрестных связей координат dq ; ШИМ – модуль широтно-импульсной модуляции

Для реализации данной структуры необходимо получить собственные передаточные функции для каждого контура регулирования, по построенным амплитудно- и фазочастотным характеристикам проанализировать их динамические свойства, для каждого контура ввести компенсирующие звенья для получения требуемых динамических параметров.

Частотные характеристики

Анализ динамических свойств системы удобно начать с полупроводникового преобразователя. Как видно из уравнений (6), (7), в выражении для напряжения d -координаты присутствует влияние тока q -координаты и наоборот. Данное взаимовлияние называется «перекрестная связь». Для того чтобы избавиться от взаимодействия компонент токов, необходимо в сигнал управления внести компенсационную связь. В таком случае сигнал управления изменится следующим образом:

$$M_d = M_d^* + \frac{2}{u_{dc}} \omega L_{sc} I_{scq}; \quad (11)$$

$$M_q = M_q^* - \frac{2}{u_{dc}} \omega L_{sc} I_{scd}. \quad (12)$$

Перепишем уравнения (6, 7) с учетом компенсации перекрестных связей.

$$\hat{u}_{scd} = u_{dc} \frac{1}{2} \left(\hat{m}_d + \frac{2}{u_{dc}} \omega L_{sc} \hat{i}_{scq} \right) + r_{sc} \hat{i}_{scd} - \omega L_{sc} \hat{i}_{scq} + \hat{u}_{dc} \frac{1}{2} \left(M_d^* + \frac{2}{u_{dc}} \omega L_{sc} I_{scq} \right) + L_{sc} \frac{d\hat{i}_{scd}}{dt}; \quad (13)$$

$$\hat{u}_{scq} = u_{dc} \frac{1}{2} (\hat{m}_q^* - \frac{2}{u_{dc}} \omega L_{sc} \hat{i}_{scd}) + r_{sc} \hat{i}_{scq} - \omega L_{sc} \hat{i}_{scd} + \hat{u}_{dc} \frac{1}{2} (M_q^* - \frac{2}{\hat{u}_{dc}} \omega L_{sc} I_{scd}) + L_{sc} \frac{d\hat{i}_{scq}}{dt}. \quad (14)$$

Из системы уравнений (13), (14) получим передаточную функцию «управление – ток» для каждой координаты базиса dq . Для этого все малые отклонения приравниваются к нулю, кроме компонент тока и сигнала управления.

$$G_{idmd}(s) = \frac{\hat{i}_{scd}}{\hat{m}_d} = -u_{dc} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{sL_{sc} + r_{sc}} \right), \quad (15)$$

$$G_{iqmq}(s) = \frac{\hat{i}_{scd}}{\hat{m}_q} = -u_{dc} \frac{1}{2} \left(\frac{1}{sL_{sc} + r_{sc}} \right). \quad (16)$$

Полученные передаточные функции отражают зависимость тока ПП при возмущении сигнала управления. Для известных параметров СГЭЭ можно построить амплитудно-частотную и фазо-частотную характеристики (АЧХ и ФЧХ).

Так как передаточные функции по каналу d и q одинаковы, проанализируем одну из них. Параметры модели сведены в таблицу.

Параметры модели

Параметр	Значение
Синхронный генератор	
Сопrotивление статорной цепи R_s , Ом	0,015
Продольная индуктивность L_{sgd} , Гн	$50 \cdot 10^{-6}$
Поперечная индуктивность L_{sgq} , Гн	$50 \cdot 10^{-6}$
Количество полюсов ротора	6
Номинальная частота генерируемого напряжения в указанном диапазоне оборотов, Гц	380–800
Номинальное напряжение генератора в указанном диапазоне оборотов, действующее фазное, В	106–213
Активный выпрямитель с идеальными ключами	
Частота коммутации f_{sw} , Гц	$100 \cdot 10^3$
Индуктивность в звене переменного тока L_{sc} , Гн	$250 \cdot 10^{-6}$
Емкость в звене постоянного тока C_d , Ф	$4 \cdot 10^{-3}$
Емкость в звене переменного тока C_f , Ф	$1 \cdot 10^{-4}$
Номинальная мощность нагрузки P , Вт	$100 \cdot 10^3$

Анализируя АЧХ и ФЧХ разомкнутой передаточной функции «управление – ток», можно сделать вывод, что амплитуда передаточной функции будет равна нулю на частоте около 1 МГц. Также видно, что коэффициент усиления на низких частотах имеет конечное значение. По форме ФЧХ видно, что в точке перегиба АЧХ фаза сигнала изменяется на 90° .

Классическим подходом к построению замкнутых систем регулирования является введение компенсирующих звеньев, изменяющих частотные характеристики передаточных функций. АЧХ и ФЧХ следует скорректировать таким образом, чтобы коэффициент единичного усиления был на частоте как минимум в 10 раз меньше частоты переключения ШИМ для обеспечения выполнения теоремы Котельникова, а фаза сигнала на частоте единичного усиления не уменьшалась меньше -180° для устойчивости системы.

Для полученной передаточной функции «управление – ток» введем компенсирующее пропорционально-интегральное звено вида:

$$G_{pi}(s) = K_{id} + \frac{1}{sT_{id}}, \quad (17)$$

где K_{id} – пропорциональный коэффициент усиления; T_{id} – постоянная времени интегрирующего звена.

Изменяя коэффициенты пропорционально-интегрального звена таким образом, чтобы единичное усиление передаточной функции было на частоте как минимум в 10 раз меньше, чем частота переключения ключей ПП, а также фаза сигнала на этой частоте не была меньше -180° , получаем скомпенсированную передаточную функцию «управление – ток». АЧХ и ФЧХ данной передаточной функции изображены на рис. 3.

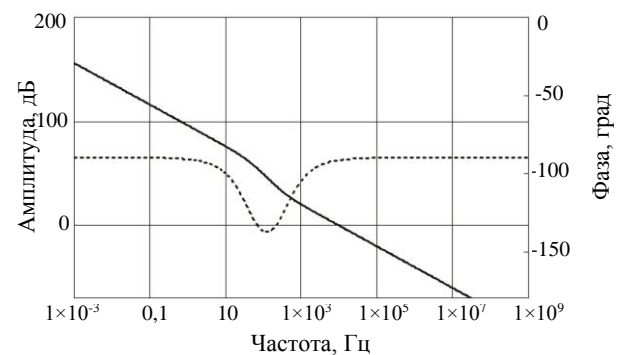


Рис. 3. АЧХ и ФЧХ передаточной функции ПП «управление – ток» с введенным пропорционально-интегральным звеном: — – АЧХ передаточной функции; - - - - ФЧХ передаточной функции

Переходная характеристика скомпенсированной передаточной функции изображена на рис. 4.

Показатели качества переходного процесса вписываются в критерии оценки таких систем [15].

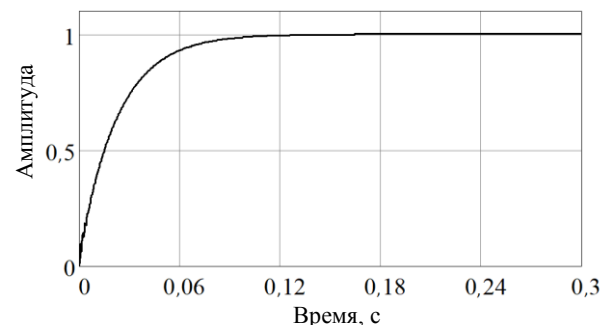


Рис. 4. Переходная характеристика передаточной функции «управление – ток» с введенным пропорционально-интегральным звеном

Следующая анализируемая передаточная функция отвечает за реакцию напряжения в звене постоянного тока при возмущении тока ПП по координате d .

На основе уравнения (8), разделяя каналы управления напряжением на зажимах генератора и напряжением в звене постоянного тока, получим передаточную функцию «напряжение ЗПТ – ток ПП»:

$$G_{udcid}(f) = \frac{\hat{u}_{dc}}{\hat{i}_{scd}} = \frac{3}{4C_d s}. \quad (18)$$

Полученная передаточная функция представляет собой интегрирующее звено.

Исходя из полученных частотных характеристик, можно сделать вывод о том, что система устойчива во всем диапазоне частот и для увеличения быстродействия имеет смысл ввести пропорциональное звено. Однако для уменьшения астатической ошибки следует ввести компенсирующее пропорционально-интегральное звено.

Полученные АЧХ и ФЧХ с компенсирующим звеном изображены на рис. 5.

Параметры пропорционально-интегрального звена выбираются таким образом, чтобы частота единичного усиления передаточной функции была как минимум в 10 раз меньше, чем частота единичного усиления передаточной функции «ток – управление», тем самым удовлетворяя принципам подчиненного регулирования [13, 14].

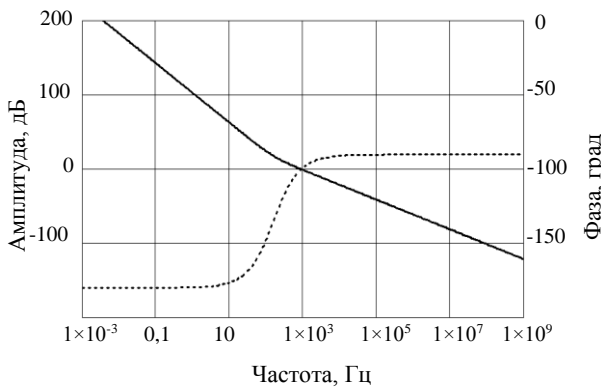


Рис. 5. АЧХ и ФЧХ передаточной функции «напряжение ЗПТ – ток ПП» с введенным пропорционально-интегральным звеном: — — АЧХ передаточной функции; ----- — ФЧХ передаточной функции

Переходная характеристика передаточной функции «напряжение ЗПТ – ток ПП» изображена на рис. 6.

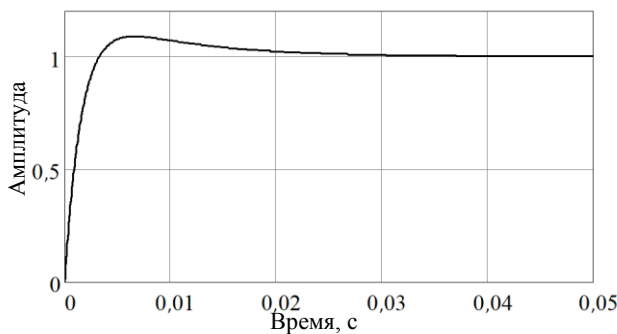


Рис. 6. Переходная характеристика передаточной функции «напряжение ЗПТ – ток ПП» с введенным пропорционально-интегральным звеном

Следующая передаточная функция, которая должна быть проанализирована, отвечает за отношение между напряжением на зажимах генератора и

током полупроводникового преобразователя по координате q . Выражение этой передаточной функции приведено в соотношении (19):

$$G_{udiq}(f) = \frac{\hat{u}_{sgd}}{\hat{i}_{scq}} = \frac{\omega L_{sg}(r_{sg} + sL_{sg})^2}{(r_{load} + sL_{load})(r_{sg} + sL_{sg}) + \dots} \dots \dots \frac{\dots}{+L_{sg}L_{load}\omega^2 + (r_{load} + sL_{load})^2} \dots \dots \frac{\dots}{\times(1 + (r_{sg} + sL_{sg})sC_f - L_{sg}C_f\omega^2)}. \quad (19)$$

В области малых частот АЧХ имеет конечный малый коэффициент усиления (меньше единицы).

АЧХ и ФЧХ передаточной функции «напряжение СГ – ток ПП» с компенсирующим пропорционально-интегральным звеном приведены на рис. 7.

Компенсирующее звено изменяет АЧХ таким образом, чтобы в области перехода через ноль форма кривой имела наклон 20дБ/дек. в обе стороны для увеличения устойчивости системы.

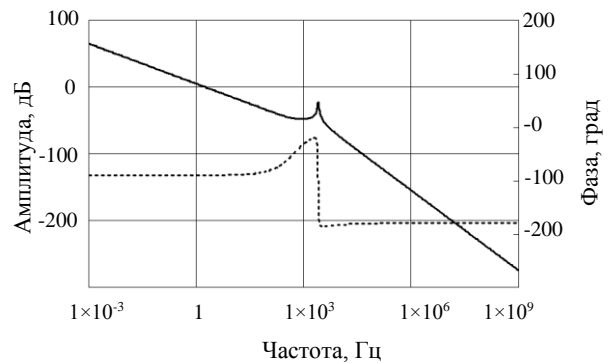


Рис. 7. АЧХ и ФЧХ передаточной функции «напряжение СГ – ток ПП» с введенным пропорционально-интегральным звеном: — — АЧХ передаточной функции; ----- — ФЧХ передаточной функции

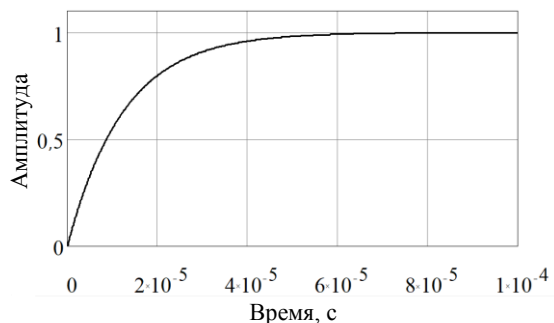


Рис. 8. Переходная характеристика передаточной функции «напряжение СГ – ток ПП» с введенным пропорционально-интегральным звеном

Имитационное моделирование

Имитационное моделирование проводится для дискретной модели, составленной в пакете прикладных программ математического моделирования PSIM.

Первый численный эксперимент проведен при набросе сигнала задания на ток q -координаты. На

рис. 9 показан переходной процесс в токе I_q . Как видно из осциллограммы, форма переходного процесса совпадает с переходной характеристикой, представленной на рис. 4.

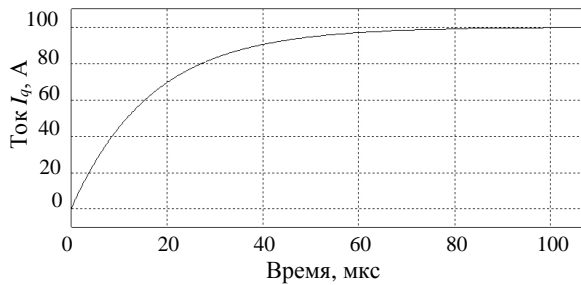


Рис. 9. Осциллограмма переходного процесса в токе I_q : задание на ток – 100 А; время регулирования – 100 мкс

Осциллограмма, представленная на рис. 10, демонстрирует переходной процесс напряжения в звене постоянного тока при набросе сигнала задания. Сравнивая формы переходного процесса и переходной характеристики, представленной на рис. 6, можно удостовериться в идентичности результатов.

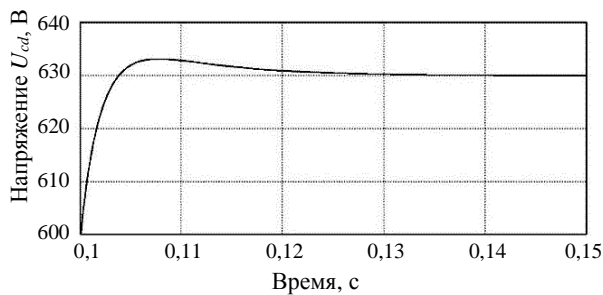


Рис. 10. Осциллограмма переходного процесса напряжения в звене постоянного тока u_{dc} при набросе задания: задание на напряжение – 630 В; время регулирования – 50 мс; перерегулирование – 10%

На рис. 11 представлена осциллограмма переходного процесса напряжения U_d на зажимах генератора при набросе задания. Полученный результат по форме переходного процесса аналогичен представленному на рис. 8.

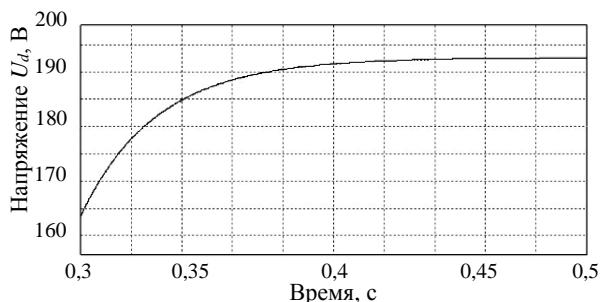


Рис. 11. Осциллограмма переходного процесса напряжения на зажимах генератора u_d при набросе задания: задание на напряжение – 193 В; время регулирования – 200 мс

Полученные осциллограммы переходных процессов полностью соответствуют рассчитанным параметрам.

Следующий эксперимент проведен для анализа динамических процессов в режиме стабилизации напряжения на зажимах генератора при сбросе и набросе нагрузки. На рис. 12 изображена осциллограмма переходного процесса.

Параметры переходного процесса при сбросе/набросе нагрузки

Сброс нагрузки со 160 до 10% от номинальной:

– время регулирования: 2,5 мс;

– пик напряжения: 260 В.

Наброс нагрузки с 10 до 160% от номинальной:

– время регулирования: 1,5 мс;

– пик напряжения: 40 В.

Также был проведен численный эксперимент при плавном изменении частоты генерируемого напряжения на зажимах СГ от минимального значения 360 Гц до максимального 380 Гц. Осциллограмма данного переходного процесса изображена на рис. 13.

Параметры переходного процесса при изменении частоты генерирования

Увеличение частоты с 360 до 720 Гц:

– время переходного процесса: 10 мс;

– время регулирования: 12 мс;

– пик напряжения: 180 В.

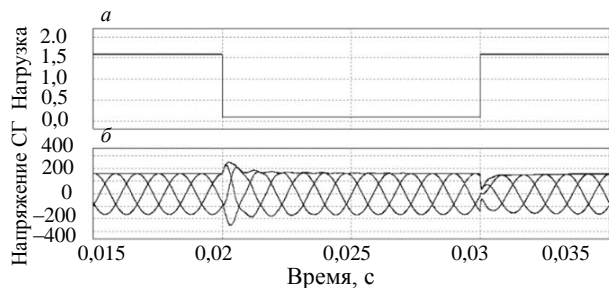


Рис. 12. Осциллограмма переходных процессов при сбросе и набросе нагрузки, уровень нагрузки (а), трехфазное напряжение на зажимах СГ (б)

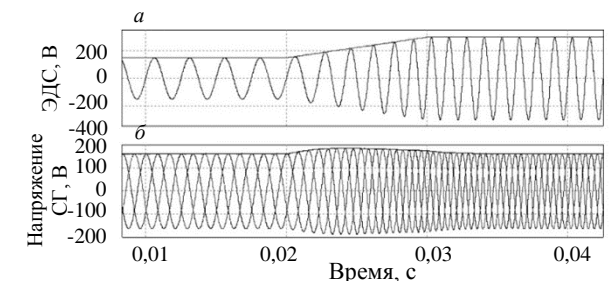


Рис. 13. Осциллограмма переходных процессов при плавном увеличении частоты генерируемого напряжения, ЭДС холостого хода (а), трехфазное напряжение на зажимах СГ (б)

Обсуждение результатов

В результате моделирования были получены переходные процессы, изображенные на рис. 9–13. Форма переходных процессов совпадает с формой, полученной при анализе переходных характеристик.

При моделировании СГЭЭ для режима стабилизации напряжения на зажимах СГ численный эксперимент импульсной нагрузкой показал удовлетворительные результаты в части устойчивости системы регулирования, однако полученные параметры пиковых напряжений не удовлетворяют ГОСТ Р 540073–2010. Следует заметить, что более точная настройка регуляторов способна дать лучший результат в сравнении с полученным. Численный эксперимент при изменении частоты генерируемого напряжения показал приемлемые результаты. Параметры переходного процесса удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 540073–2010.

Заключение

В данной работе исследованы динамические процессы в системе генерирования электрической энергии переменного тока переменной частоты на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и параллельного полупроводникового преобразователя для летательных аппаратов. Предложены математическая модель системы и её линеаризованный вариант, с помощью их получены и исследованы частотные характеристики. Проведен синтез системы автоматического регулирования и произведен расчет регуляторов частотным методом. В ходе численных экспериментов получены адекватные результаты, удовлетворяющие теоретическим данным.

Исследование выполнено при финансовой поддержке РФФИ в рамках научного проекта № 18-38-00281.

Литература

1. Кутахов В.П. Полностью электрический самолет / В.П. Кутахов, С.А. Воронович, В.А. Каргопольцев // Авиапанорама. – 2009. – Т. 74, № 2. – С. 14–17.
2. Электрический самолет: от идеи до реализации / А.В. Лёвин, И.И. Алексеев, С.А. Харитонов, Л.К. Ковалёв. – М.: Машиностроение, 2010. – 288 с.
3. ГОСТ 54073–2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М.: Стандартинформ, 2011. – 39 с.
4. Принципы построения основных преобразовательных устройств электроэнергетического комплекса / А.В. Лёвин, С.М. Мусин, С.А. Харитонов, К.Л. Ковалёв, А.А. Герасин, С.П. Халютин // Электрический самолет: концепции и технологии. – Уфа: УГАТУ, 2014. – 388 с.
5. Барвинский А.П. Электрооборудование самолетов: учеб. для сред. спец. учеб. заведений / А.П. Барвинский, Ф.Г. Козлова. – 2-е изд. – М.: Транспорт, 1990. – 320 с.
6. Бут Д.А. Бесконтактные электрические машины: учеб. пособие. – М.: Высш. шк., 1990. – 416 с.
7. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов. – Новосибирск: НГТУ, 2011. – 536 с.
8. Стабилизация напряжения синхронного генератора с постоянными магнитами при переменной нагрузке / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, Д.В. Макаров, А.Г. Гарганеев // Доклады ТУСУР. – 2012. – № 1, ч. 1. – С. 139–146.
9. Авиационная система генерирования электроэнергии / С.А. Харитонов, Д. В. Коробков, Д. В. Макаров, А.В. Левин, С.Ф. Коняхин, М.М. Юхнин // Научный вестник НГТУ. – 2013. – № 1. – С. 147–162.
10. Makarov D.V. Method of synchronization in power supply / D.V. Makarov, S.A. Kharitonov, M.A. Khoroshev // Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE), 2016 13th International Scientific-Technical Conference on // IEEE. – 2016. – Т. 3. – Р. 17–21.
11. Чаплыгин Е.Е. Спектральное моделирование преобразователей с широтно-импульсной модуляцией: учеб. пособие. – М.: МЭИ, 2009. – 56 с.
12. Erickson R.W. Fundamentals of Power Electronics. Second Edition. USA, NJ, Secaucus: Kluwer Academic Publishers, 2000. – 877 p.
13. Васильев К.К. Теория автоматического управления (следящие системы): учеб. пособие. – 2-е изд. – Ульяновск: УлГТУ, 2001. – 98 с.
14. Middlebrook R.D. Small-Signal Modeling of Pulse-Width Modulated Switched-Mode Power Converters // Proceedings of the IEEE. – 1988. – Vol. 76, No. 4. – P. 343–354.
15. Ким Д.П. Теория автоматического управления. – Т. 1: Линейные системы. – М.: Физматлит, 2003. – 288 с.

Хорошев Максим Александрович

Аспирант каф. электроники и электротехники (ЭЭ) Новосибирского государственного технического университета (НГТУ)
Карла Маркса пр-т, д. 20, Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7-913-893-18-68
Эл. почта: imxoiam1@gmail.com

Харитонов Сергей Александрович

Д.т.н., проф., директор Института силовой электроники, зав. каф. ЭЭ НГТУ
Карла Маркса пр-т, д. 20, Новосибирск, Россия, 630073
Тел.: +7 (383-3) 46-08-64
Эл. почта: Kharit1@yandex.ru

Khoroshev M.A., Kharitonov S.A.

Analysis of dynamic processes in the electric power generating system of variable frequency for aircrafts

The dynamic processes in the electric power generation system of variable frequency for aircraft «synchronous generator – semiconductor converter» type are analyzed. A mathematical model of the electric power system in a rotating coordinate system is proposed. The structure of the regulation system has been developed. The transfer characteristics for the analysis of the stability of the system has been received. Simulation modeling of the system's dynamic modes of operation under dynamic load and change in the frequency of the generated voltage was carried out.

Keywords: active rectifier, permanent magnet synchronous generator, aviation power supply system, closed loop control system, dynamic process, optimal control.

doi: 10.21293/1818-0442-2019-22-3-103-110

References

1. Voronovich S.A., Kargopol'cev V.A. *Polnost'yu elektricheskij samolet* [All electric aircraft]. *Aviapanorama*, 2009, vol. 74, no 2, pp. 14–17.
2. Levin A.V., Alekseev I.I., Kharitonov S.A., Kovalev L.K. *Elektricheskij samolet: ot idei do realizacii*. [Electric aircraft: from idea to implementation.]. М., Mashinostroenie Publ., 2010, 288 p.

3. GOST 54073–2010. *Sistemy elektrosnabzheniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii* [State standard 54073–2010. Power supply systems for airplanes and helicopters. General requirements and standards for power quality]. M., Standartinform Publ., 2011, 39 p.
4. Levin A.V., Musin S.M., Kharitonov S.A., Kovalev K.L., Gerasin A.A., Khalyutin S.P. *Principy postroeniya osnovnykh preobrazovatel'nykh ustroystv elektroenergeticheskogo kompleksa* [Principles of construction of the main converting devices of the electric power complex]. *Electric Aircraft: concepts and technologies*. Ufa, UGATU Publ., 2014, 388 p.
5. Barvinskiy A.P., Kozlova F.G. *Elektrooborudovanie samoletov* [Aircraft electrical equipment]. M., Transport Publ., 1990, 320 p.
6. But D. A. *Beskontaktnye elektricheskie mashiny* [Contactless electrical machines]. M., Vysshaya shkola Publ., 1990, 416 p.
7. Kharitonov S.A. *Elektromagnitnye processy v sistemakh generirovaniya elektricheskoy energii dlya avtonomnykh ob"ektov* [Electromagnetic processes in systems for generating electrical energy for autonomous objects]. Novosibirsk, NGTU Publ., 2011, 536 p.
8. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Makarov D.V., Garganeev A.G. [Synchronous generator with permanent magnets voltage stabilization with variable load]. *Proceedings of TUSUR University*, 2012, no. 1, pt. 1, pp. 139–146 (in Russ.).
9. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Makarov D.V., Levin A.V., Konyakhin S.F., Yukhnin M.M. *Aviatsionnaya sistema generirovaniya elektroenergii* [Aviation power generation system]. Novosibirsk, Nauchnyy vestnik NSTU, 2013, no. 1, pp. 147–162 (in Russ.).
10. Makarov D.V., Kharitonov S.A., Khoroshev M.A. Method of synchronization in power supply. *Actual Problems of Electronics Instrument Engineering (APEIE)*, 2016 13th International Scientific-Technical Conference on. IEEE, 2016, vol. 3, pp. 17–21.
11. Chaplygin E.E. *Spektral'noe modelirovanie preobrazovateley s shirotno-impul'snoy modulyaciey* [Spectral modeling of pulse-width modulated converters]. M., MEI Publ., 2009, 56 p.
12. Erickson, Robert W. *Fundamentals of Power Electronics*. Second Edition. USA, NJ, Secaucus: Kluwer Academic Publishers, 2000, 877 p.
13. Vasil'ev K. K. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya (sledyaschie sistemy)* [Automatic control theory (tracking systems)]. Ul'yanovsk, UIGTU Publ., 2001, 98 p.
14. Middlebrook R.D. Small-Signal Modeling of Pulse-Width Modulated Switched-Mode Power Converters. *Proceedings of the IEEE*, vol. 76, no. 4, 1988, pp. 343–354.
15. Kim D.P. *Teoriya avtomaticheskogo upravleniya. T. 1. Lineynye sistemy* [Automatic control theory. Vol. 1. Linear systems]. M., Phizmatlit Publ., 2003, 288 p.

Maxim A. Khoroshev

Phd student, Novosibirsk State Technical University
20, K. Marks pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone.: +7-913-893-18-68
Email: imxoiam1@gmail.com

Sergey A. Kharitonov

Director, Institute of Power Electronics, Head of the Department of Electronics and Electrical Engineering, Novosibirsk State Technical University
20, K. Marks pr., Novosibirsk, Russia, 630073
Phone.: +7 (383-3) 46-08-64
Email: Kharit1@yandex.ru