

УДК 621.314

## АНАЛИЗ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПРОЦЕССОВ БЛОКА ВОЗБУЖДЕНИЯ ТРЕХКАСКАДНОГО СТАРТЕР-ГЕНЕРАТОРА ДЛЯ АВИАЦИОННОЙ ЭНЕРГОСИСТЕМЫ

Д.А. Ведерников, О.А. Вавилов, М.А. Жарков, Р.Ю. Сараханова  
*Новосибирский государственный технический университет*

В данной статье рассматривается система возбуждения трехкаскадного синхронного генератора для авиационного применения в двух отличительных режимах работы: в качестве генератора электрической энергии для бортовой системы электроснабжения и электростартера для газотурбинных двигателей летательного аппарата. В статье представлен расчет стартерного и генераторного режима работы системы возбуждения. Получены основные расчетные соотношения для схемы полупроводникового преобразователя, подтвержденные имитационным моделированием в среде PowerSIM.

Решена задача синтеза системы автоматического управления для блока возбуждения ТСГ, работающего в составе бортовой системы электроснабжения с применением методики расчета параметров регуляторов на основе метода разделения движений. Для генераторного режима работы создана двухконтурная система управления, включающая в себя ПИ- и ПИД-регуляторы с регулированием по выходному напряжению основного генерирующего каскада. Для управления блоком возбуждения в электростартерном режиме работы спроектирована одноконтурная система управления по току обмотки возбуждения с добавлением резонансной составляющей. Оценка эффективности спроектированных систем управления выполнена на основе имитационного моделирования с использованием пакетов прикладных программ PowerSIM и MATLAB/Simulink для генератора, питающего трехфазную сеть переменного тока в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54073–2017.

Результаты математического моделирования легли в основу проектирования экспериментального образца силовой части в гибридном интегральном исполнении для системы регулирования напряжения ТСГ.

*Ключевые слова:* синхронный генератор, возбудитель, инвертор напряжения, понижающий преобразователь постоянного тока, система автоматического управления, ПИ-регулятор, резонансный регулятор, метод разделения движений.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-29-47

### Введение

В системе электроснабжения (СЭС) летательных аппаратов традиционно выделяют первичную и вторичную подсистемы. Основу первичной подсистемы составляют первичные источники электроэнергии, такие как электрогенераторы или химические источники, например, аккумуляторные батареи. Выработанная первичными источниками электроэнергия затем преобразуется полупроводниковыми преобразователями в другие виды электроэнергии [1] и поставляется во вторичную СЭС, а через нее далее – к бортовым системам летательного аппарата.

На современных летательных аппаратах чаще всего применяется комбинированная система электроснабжения, которая включает в себя все необходимые первичные источники электроэнергии [2–4]. Основным агрегатом комбинированной СЭС выступает трехкаскадный синхронный генератор (ТСГ), работающий на постоянной частоте в составе вспомогательной силовой установки (ВСУ), либо интегрированный с гидроприводом постоянных оборотов, работающий в основной системе в комплексе с маршевым двигателем [5–7].

Для системы генерирования на основе трехкаскадного синхронного генератора необходимо устройство, которое бы регулировало ток обмотки возбуждения возбудителя при изменениях тока статора основного генератора [8]. Питанием такого устройства служит напряжение подвозбудителя, которое не зависит от режима и условий работы основного генератора. Так как уровень напряжения подвозбудителя обычно выше уровня напряжения, максимально необходимого для питания обмотки возбуждения возбудителя, то для регулирования этого напряжения подойдет любой полупроводниковый преобразователь понижающего типа [9]. Рассматривая стартерный режим работы, следует учесть, что в диапазоне скоростей разгона трехкаскадного электрогенератора напряжения подвозбудителя недостаточно для устойчивой работы блока возбуждения, таким образом, необходимо организовать питание преобразователя от аккумуляторной батареи – напрямую или через повышающий преобразователь постоянного напряжения [10].

Структурная схема системы представлена на рис. 1 и включает в себя основной генерирующий каскад, возбудитель, представляющий собой расположенный на валу основного каскада шестифазный генератор, блок вращающихся выпрямителей, питающий обмотку возбуждения основного генератора постоянным током, и подвозбудитель, который также расположен на одном валу с основным генератором и возбудителем, и представляет собой трехфазную синхронную машину с возбуждением от постоянных магнитов.

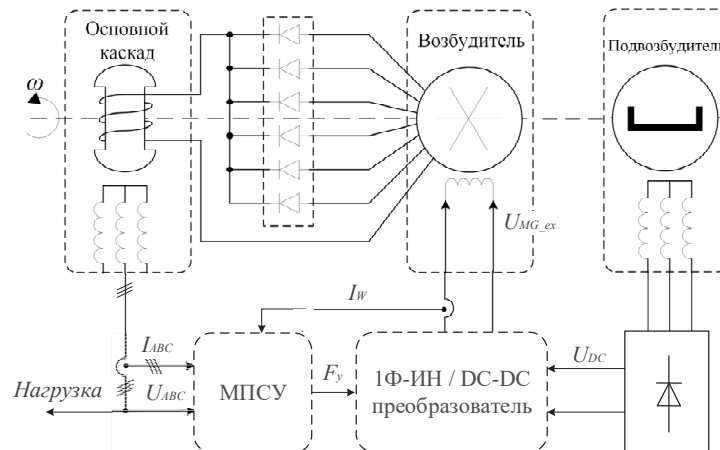


Рис. 1 – Структурная схема системы генерирования на основе трехкаскадного синхронного генератора

Fig. 1 – Block diagram of a generation system based on a three-stage synchronous generator

Здесь  $U_{DC}$  – постоянное напряжение, питающее блок системы возбуждения;  $I_W$  – ток обмотки возбуждения возбудителя;  $F_y$  – импульсы управления для силовых ключей преобразователей, генерируемые МПСУ;  $I_{ABC}$  и  $U_{ABC}$  – трехфазный выходной ток и напряжение ТСГ соответственно.

Напряжение генерируемое подвозбудителем, подается через трехфазный выпрямитель на систему возбуждения, которая в зависимости от режима работы может представлять собой однофазный инвертор напряжения (1Ф-ИН) или понижающий преобразователь постоянного тока, работающие от выпрямленного трехфазного напряжения подвозбудителя [11].

Преобразователь в свою очередь создает ток необходимого значения на обмотке возбуждения возбудителя. Таким образом электромагнитная система из возбудителя, диодного выпрямителя и обмотки возбуждения основного каскада обеспечивает необходимый уровень тока возбуждения для стабилизации статорных напряжений на заданном уровне.

Второй режим работы предлагаемой системы – двигательный режим трехкаскадного синхронного генератора. В данном режиме на обмотке возбуждения необходимо создать переменное напряжение, так как при нулевой скорости вращения вала невозможно передать электромагнитный поток от системы возбуждения до основного каскада. Для этого подходит способ трансформаторной передачи энергии, так как в состоянии покоя ТСГ можно представить обычным трансформатором. Сформированное на обмотке возбуждения переменное напряжение с коэффициентом трансформации, равным отношению числа витков индукторной и якорной обмотки, передается на якорную обмотку возбудителя, после чего оно выпрямляется и запитывает в свою очередь возбудитель основного каскада. Таким образом до создания вращающегося поля трехкаскадного генератора возможно осуществить возбуждение основного каскада для создания электромагнитного момента, необходимого для преодоления момента сопротивления вала газотурбинного двигателя и вывода системы на обороты малого газа.

### 1. Анализ электромагнитных процессов в системе возбуждения ТСГ

Исходя из предположения о том, что для запуска трехкаскадного генератора необходимо обеспечить полуторную перегрузку по току фазы на выходе основного генератора (ОГ), для обеспечения перегрузки необходим соответствующий ток возбуждения возбудителя. Как правило, в документации на синхронные генераторы приведена зависимость тока на фазных обмотках генератора и необходимый для этого ток возбуждения генератора. Для определения напряжения на обмотке возбуждения ОГ импеданс обмотки возбуждения примем чисто активным, поскольку в начальный момент времени вал неподвижен.

Тогда напряжение обмотки возбуждения ОГ, выраженное через ток перегрузки, примет следующий вид:

$$U_{MG\_ex} = I_{MG\_ex} \cdot R_{MG\_ex}, \quad (1)$$

где  $U_{MG\_ex}$  – напряжение;  $I_{MG\_ex}$  – ток;  $R_{MG\_ex}$  – активное сопротивление обмотки возбуждения ОГ. Необходимо отметить, что выражение (1) отражает среднее выпрямленное напряжение по мостовой двухполупериодной схеме.

Действующее значение напряжения фазы возбудителя на входе выпрямительной схемы рассчитывается следующим образом:

$$U_{EX\_phase} = \frac{\pi}{3 \cdot \sqrt{6}} \cdot U_{MG\_ex}. \quad (2)$$

Поскольку в режиме стартера в начальный момент скорость вала равна нулю, примем обмотку возбуждения и фазные обмотки в качестве первичной и вторичной обмотки трансформатора. Таким образом, коэффициент трансформации возбудителя принимает следующий вид:

$$k_T = \frac{w_2}{w_1}, \quad (3)$$

где  $w_1$ ,  $w_2$  – количество витков обмотки возбуждения возбудителя и фазы рабочей обмотки возбудителя соответственно.

Действующее значение напряжения на обмотке возбуждения возбудителя с учетом выражений (2) и (3) рассчитывается следующим образом:

$$U_W = \frac{U_{EX\_phase}}{k_T}. \quad (4)$$

Полное сопротивление обмотки возбуждения возбудителя, выраженное с помощью комплексного сопротивления обмотки возбуждения возбудителя  $z_W$ , выглядит следующим образом:

$$Z_W = \sqrt{\text{Re}(z_W)^2 + \text{Im}(z_W)^2}. \quad (5)$$

Действующее значение тока через обмотку возбуждения возбудителя, полученное с помощью выражений (4) и (5), представлено как

$$I_W = \frac{U_W}{Z_W}. \quad (6)$$

#### А. Анализ электромагнитных процессов в преобразователе напряжения в режиме стартера

В качестве преобразователя напряжения для питания обмотки возбуждения возбудителя был выбран управляемый Н-мост, который способен работать как в качестве однофазного инвертора напряжения, так и выполнять роль DC/DC преобразователя. В стартерном режиме работы выпрямитель, представляющий собой трехфазный диодный мост, питаемый подвозбудителем, не используется, DC-DC преобразователь в этом режиме подключается к аккумуляторной батарее. В качестве обмотки возбуждения возбудителя выступает эквивалентная RL нагрузка. Для управления преобразователем используется блок скалярной широтно-импульсной модуляции (ШИМ), принцип работы которого основан на формировании импульсов управления  $F_y$  для полупроводниковых ключей в моменты сравнений двух сигналов – синусоидального модулирующего сигнала  $u_M$  с амплитудой  $M$  и одностороннего пилообразного опорного сигнала  $U_{REF}$ , описываемого следующим выражением:

$$U_{REF(max)}(t) = \frac{-2}{\pi} \arctg \left( \tg \left( \frac{\omega_{ref}}{2} \cdot t - \frac{\pi}{2} \right) \right), \quad (7)$$

где  $\omega_{ref} = 2\pi f_{ref}$ ;  $f_{ref}$  – частота опорного сигнала, равная частоте коммутации полупроводниковых ключей.

Процесс работы ШИМ также может быть описан с помощью переключающих функций для полупроводниковых ключей, как представлено ниже:

$$F_1(t) = \begin{cases} 1, & u_{1M}(t) > u_{ref}(t), \\ 0, & u_{1M}(t) < u_{ref}(t); \end{cases} \quad (8)$$

$$F_2(t) = \begin{cases} 1, & u_{2M}(t) > u_{ref}(t), \\ 0, & u_{2M}(t) < u_{ref}(t), \end{cases} \quad (9)$$

где  $u_{1M}$  и  $u_{2M}$  – модулирующие сигналы для ключей в катодной группе первой и второй стойки Н-моста соответственно, при этом ключи в анодной группе рабо-

тают в противофазе с парными для них ключами внутри каждой отдельной стойки Н-моста.

Тогда напряжение на обмотке возбуждения возбудителя, полученное с помощью выражений (8) и (9), выглядит следующим образом:

$$u_W(t) = U_{DC} (F_1(t) - F_2(t)). \quad (10)$$

Величина действующего значения напряжения на RL нагрузке может быть описана с помощью следующего выражения:

$$U_W = \sqrt{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T (u_W)^2 dt} = \frac{U_{DC} M}{\sqrt{2}}, \quad (11)$$

где  $u_W$  – мгновенное значение напряжения в обмотке возбуждения;  $T$  – период напряжения на нагрузке.

Графики токов и их спектров, представленные на рис. 2, были получены с помощью математического моделирования в среде Mathcad на основе выражений (1)–(11) при частоте модулирующего сигнала 1000 Гц, опорного сигнала 30 кГц.

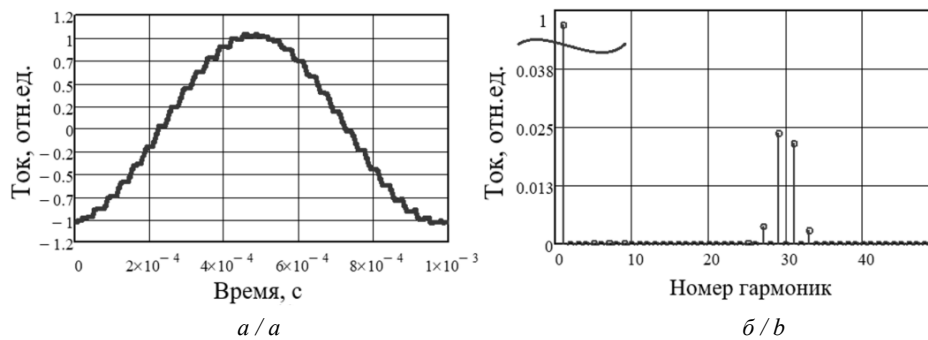


Рис. 2 – Осциллограмма тока на обмотке возбуждения возбудителя (а) и его гармонический спектр в относительных единицах (б)

Fig. 2 – Oscillogram of the excitation winding current of the exciter (a) and its harmonic spectrum in relative units (b)

Полученный в результате математического моделирования коэффициент гармонических искажений по току обмотки возбуждения составляет  $THD_F = 1,16059$ .

### Б. Анализ электромагнитных процессов преобразователя напряжения в режиме генератора

Поскольку вал, а значит, и ротор возбудителя вращается, то в режиме генерирования на обмотку возбуждения возбудителя необходимо подать постоянный ток, достаточный для возбуждения возбудителя. Преобразователь в данном случае работает от выпрямленного напряжения подвозбудителя, генерируемого трехфазной диодной мостовой схемой. Полупроводниковые ключи рассматриваемого в работе преобразователя могут работать как в режиме мостового преобразователя постоянного тока, так и в качестве классической схемы понижающего DC-DC преобразователя. В данной работе рассматривается первый вариант, при котором преобразователь функционирует в качестве однофазного инвертора напряжения.

Выпрямленное напряжение возбuditеля выражается в соответствии со следующей по формулой:

$$U_{DC} = \frac{3\sqrt{6}}{\pi} U_{SUB\_phase},$$

где  $U_{SUB\_phase}$  – фазное напряжение на выходе подвозбудителя.

ШИМ преобразователя функционирует аналогично стартерному режиму, описанному выше (7), при этом коэффициент заполнения ШИМ выражается следующим образом:

$$M = \frac{U_W}{U_{DC}},$$

где  $U_W$  – напряжение, необходимое для возбуждения возбuditеля.

Полученный график тока на обмотке возбуждения и его спектральный состав представлены на рис. 3.

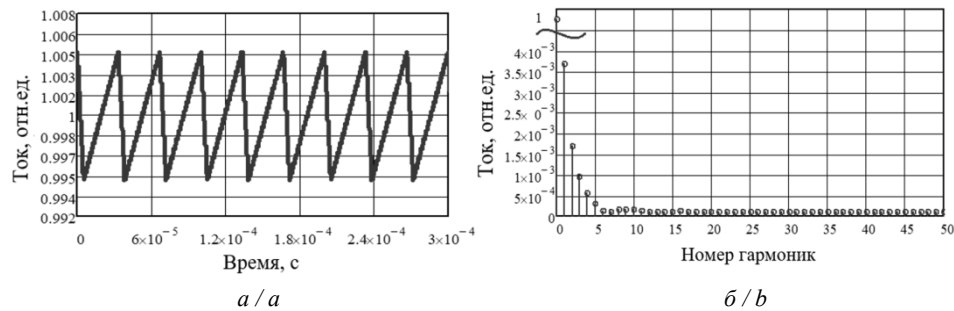


Рис. 3 – Осциллограмма тока на обмотке возбуждения возбuditеля (а) и его гармонический спектр в относительных единицах (б)

Fig. 3 – Oscillogram of the excitation winding current of the exciter (a) and its harmonic spectrum in relative units (b)

## 2. Имитационное моделирование режимов работы системы возбуждения в среде PSIM

Моделирование проводилось в соответствии с данными, указанными в табл. 1, В качестве основного звена системы генерирования электроэнергии рассматривается синхронный генератор мощностью 90 кВт · А с частотой вращения вала 12 000 об/мин, питающий бортовую сеть переменного тока постоянной частоты 115 В/400 Гц, в соответствии с требованиями ГОСТ Р 54073–2017 [12].

На рис. 4 приведены спектральный состав и осциллограммы тока обмотки возбуждения для двух режимов работы, на рис. 5 – спектральный состав и кривая выходного напряжения ТСГ в генераторном режиме работы.

На основании результатов моделирования стартерного режима установлено, что расхождение с расчетом амплитуды напряжения по основной и коммутационным гармоникам, вплоть до пятой, не превысило 0,2 %. Коэффициент гармонических искажений составил  $THD_F = 1,16198$ , несоответствие с расчетом 0,12 %. Поскольку форма тока на обмотке возбуждения близка к синусу, имеет смысл оценивать только амплитуду гармоники на основной частоте, отличие амплитуды основной гармоники от расчета не превысило 0,1 %.

Таблица 1 / Table 1

**Параметры силовой схемы**  
**Parameters of the power circuit**

Параметр	Значение
<i>Стартерный режим</i>	
Шаг счета моделирования, с	$1 \cdot 10^{-7}$
Коэффициент заполнения ШИМ при разомкнутой системе управления $M$	0,54387
Частота выходного напряжения 1Ф-ИН (частота модулирующего сигнала ШИМ), кГц	1
Частота коммутации полупроводниковых ключей (частота опорного сигнала ШИМ), кГц	30
Напряжение $U_{DC}$ на входе 1Ф-ИН, В	270
Сопротивление обмотки возбуждения $R_W$ , Ом	3,85
Индуктивность обмотки возбуждения $L_W$ , мГн	4,65
Амплитуда тока обмотки возбуждения $i_{W(ref)}$ , А	4,98
<i>Генераторный режим</i>	
Напряжение $U_{DC}$ на входе понижающего DC-DC преобразователя, В	68
Коэффициент заполнения ШИМ при разомкнутой системе управления $M$	0,849648
Частота коммутации полупроводниковых ключей (частота опорного сигнала), кГц	30
Действующее значение первой гармоники выходного напряжения ТСГ $u_{g(ref)}$ , В	115
Частота выходного напряжения ТСГ, Гц	400
Действующее значение первой гармоники выходного тока ТСГ, А	250

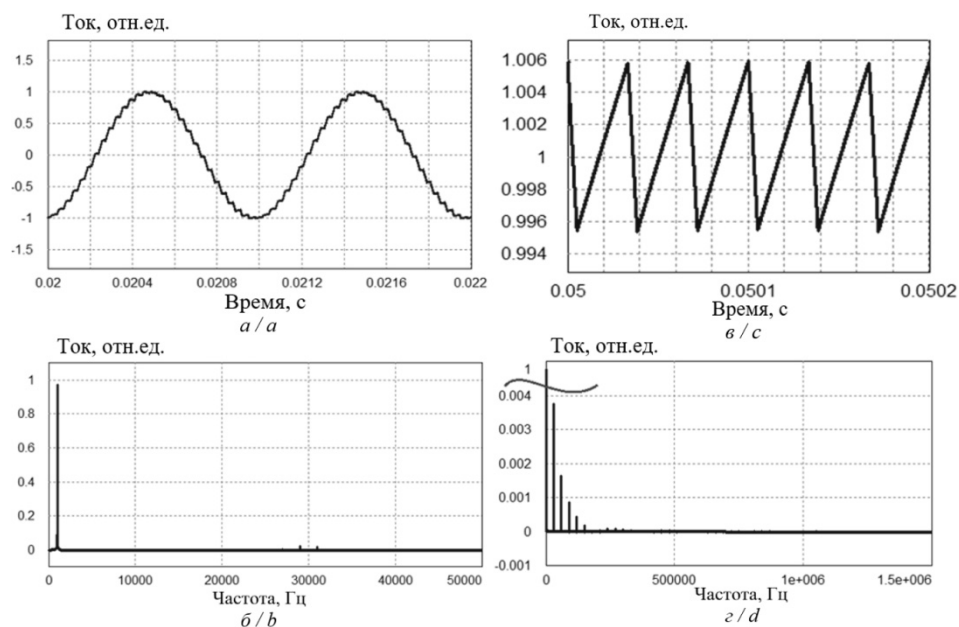


Рис. 4 – Ток через обмотку возбуждения возбудителя в стартерном (а) и генераторном (б) режиме, спектр тока в стартерном (в) и генераторном (г) режиме

Fig. 4 – Current through the excitation winding in the starter (a) and generator (b) operation modes, current harmonic spectrum in the starter (c) and generator (d) operation modes

В генераторном режиме величина первой гармоники выходного напряжения ТСГ расходитсся с требуемым значением на 3 %, на коммутационной гармонике 30 кГц погрешность составила 3,66 %, коэффициент гармонических искажений фазного напряжения основного генератора составил  $THD_F \approx 14$  %. Ток на обмотке возбуждения возбудителя близок к константе, коммутационные гармоники не вносят существенного вклада в среднее значение тока.

На рис. 5 представлена осциллограмма действующего значения напряжения на выходе основного генератора, полученная в результате моделирования полной модели ТСГ с расчетным коэффициентом заполнения ШИМ для генераторного режима.

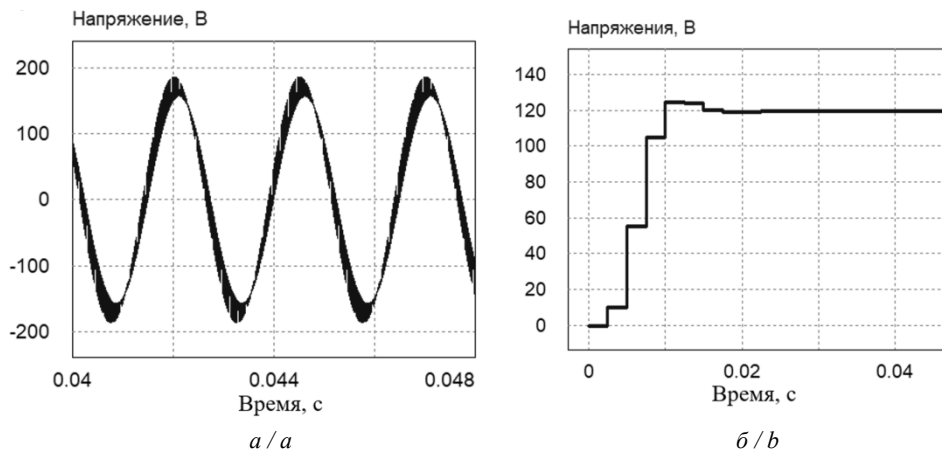


Рис. 5 – Осциллограмма мгновенного (а) и действующего (б) значения напряжения на выходе основного генерирующего каскада в генераторном режиме

Fig. 5 – Oscillogram of instantaneous (a) and effective (b) output voltage values of the main generating stage in the generator operation mode

В генераторном режиме ток на обмотке возбуждения возбудителя близок к константе, коммутационные гармоники не вносят существенного вклада в среднее значение тока, поэтому точность расчета по нулевой гармонике находится в рамках 0,2 %

### 3. Синтез системы управления

Исходя из результатов, полученных в разделе 2, можно заключить, что в полученной силовой схеме при разомкнутой системе управления невозможно добиться высокого качества выходных параметров и удовлетворения требования указанного стандарта для бортовых систем переменного тока [12]. Добавление системы автоматического регулирования (САР) позволит уменьшить ошибку слежения по току обмотки возбуждения в стартерном режиме и ошибку слежения по выходному напряжению в генераторном режиме, а также обеспечит грубость динамических свойств процессов в системе при существенных изменениях рабочего режима и устойчивость рассматриваемой системы в динамических режимах при соблюдении требований ГОСТ [12] на характеристики переходных процессов.

Для системы возбуждения в генераторном режиме, работающей в конфигурации понижающего преобразователя, построена двухконтурная САР, представлен-



ная на рис. 6. В ее состав входит пропорционально-интегральный (ПИ) регулятор по току обмотки возбуждения возбудителя во внутреннем контуре, и пропорционально-интегрально-дифференциальный (ПИД) регулятор по выходному трехфазному напряжению ТСГ во внешнем контуре регулирования.

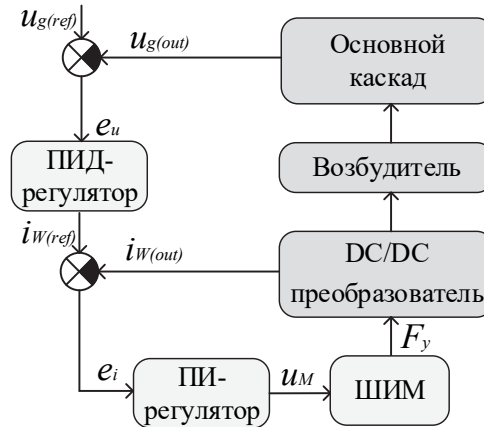


Рис. 6 – Структурная схема системы управления возбудителя в генераторном режиме работы

Fig. 6 – Block diagram of the exciter control system in the generator operation mode

Здесь  $i_{W(ref)}$  и  $i_{W(out)}$  – задание на ток обмотки возбуждения и фактическое значение этого тока;  $u_{g(ref)}$  и  $u_{g(out)}$  – задание на выходное напряжение ТСГ для одной из фаз (фазы  $A$ ) и фактическое значение этого напряжения;  $e_u$  и  $e_i$  – ошибки слежения по выходному напряжению и току обмотки;  $u_M$  – управляющее воздействие, поступающее с выхода регулятора на вход ШИМ (модулирующий сигнал), где затем формируется последовательность управляющих импульсов  $F_y$  для силовых ключей преобразователя.

В данной работе для расчета параметров регулятора используется метод разделения движений (МРД), обеспечивающий грубость динамических свойств процессов в системе управления по отношению к существенным изменениям режимов работы преобразователя при простой процедуре синтеза регуляторов [13, 14]. Также, как показано в работе [15], данный метод позволяет проводить независимый расчет резонансных и основных составляющих регулятора.

Передаточная функция (ПИ) регулятора и ее вид, адаптированный под расчет с использованием МРД [14], выглядят следующим образом:

$$W_{PI}(s) = k_P + \frac{k_I}{s} = k_1 \frac{s + T_1^{-1}}{\mu_1 s}, \quad (12)$$

где  $k_P$  и  $k_I$  – пропорциональный и интегральный коэффициенты регулятора;  $k_1$  – коэффициент усиления, рассчитываемой на основе МРД;  $\mu_1$  – постоянная времени подсистемы быстрых движений (ПБД);  $T_1$  – постоянная времени подсистемы медленных движений (ПМД).

В качестве регулятора во внешнем контуре САР для понижающего преобразователя предлагается использовать (ПИД) регулятор:

$$W_{PID}(s) = k_P + \frac{k_I}{s} + k_D s = k_2 \frac{(s^2 + T_2^{-1}s + T_2^{-2})}{\mu_2^2 s^2 + d_2 \mu_2 s}, \quad (13)$$

где  $k_D$  – дифференциальный коэффициент регулятора;  $k_2$  – коэффициент усиления регулятора;  $d_2$  – коэффициент демпфирования.

Процессы в понижающем DC-DC преобразователе могут быть описаны с помощью следующей системы уравнений в форме Коши:

$$\begin{cases} \frac{dI_W}{dt} = -\frac{R_W}{L_W} I_W + \frac{U_{DC}}{L_W} u_M; \\ I_{OUT} = I_W, \end{cases} \quad (14)$$

где  $R_W$  – сопротивление обмотки возбуждения;  $L_W$  – индуктивность обмотки возбуждения;  $I_{OUT}$  – выходной ток преобразователя.

Соответственно, передаточная функция по току, полученная на основе математической модели DC-DC преобразователя (14) с помощью преобразования Лапласа, выглядит следующим образом:

$$W_1(s) = \frac{I_W(s)}{u_M(s)} = \frac{U_{DC}}{L_W s + R_W}. \quad (15)$$

Передаточная функция объекта управления для внешнего контура включает в себя компоненты, отражающие параметры возбудителя и основного генератора, и выглядит следующим образом:

$$W_2(s) = \frac{1}{T_{ST1}s + 1} \cdot \frac{1}{\frac{L_{WG}}{R_{WG}}s + 1} \cdot \frac{1}{T_{ST2}s + 1}, \quad (16)$$

где  $T_{ST1}$  – постоянная времени обмотки статора возбудителя;  $T_{ST2}$  – постоянная времени обмотки статора основного генератора;  $R_{WG}$  и  $L_{WG}$  – сопротивление и индуктивность обмотки возбуждения основного генератора.

Структурная схема для системы возбуждения в стартерном режиме работы представлена на рис. 7.

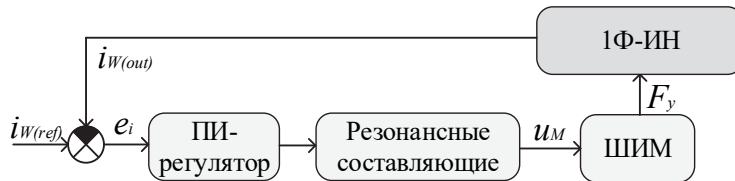


Рис. 7 – Структурная схема системы управления возбудителя в стартерном режиме работы

Fig. 7 – Block diagram of the exciter control system in the starter operation mode

В этом режиме работы рассматривается одноконтурная система управления, включающая в себя ПИ-регулятор с резонансной компонентой, которая позволяет

удовлетворить требованию асимптотического стремления к нулю ошибки регулирования  $e_i(t)$ :

$$W_{PIR}(s) = k_3 \frac{s + T_3^{-1}}{\mu_3 s} \left( 1 + \frac{k_{RES} s}{s^2 + \omega_0^2} \right), \quad (17)$$

здесь  $\omega_0$  – частота заданного гармонического воздействия;  $k_{RES}$  – коэффициент усиления резонансной составляющей регулятора, рассчитываемые следующим образом:

$$k_{RES}(s) = 2d\omega_0 = 2d2\pi f_0, \quad (18)$$

где коэффициент демпфирования выбирается из условия  $d > 0$ , например  $d = 1$ .

Ток в обмотке возбуждения, подключенной в качестве нагрузки к выходу однофазного инвертора, может быть описан с помощью следующего выражения:

$$\frac{dI_W}{dt} = \frac{1}{L_W} U_{DC} - \frac{R_W}{L_W} I_W. \quad (19)$$

Учитывая, что в обеих САР присутствует контур регулирования тока обмотки возбуждения, передаточная функция однофазного инвертора по этому току аналогична передаточной функции для DC-DC преобразователя (15). Полученные передаточные функции для объекта управления и регуляторов (12)–(17) используются далее для синтеза САР и расчета параметров регуляторов.

#### А. Стартерный режим работы

На первом этапе с помощью передаточной функции для резонансного регулятора (17) и передаточной функции для объекта управления (15) получена передаточная функция для замкнутой системы для внутреннего контура по току с единичной обратной связью следующего вида:

$$W_{I1}(s) = \frac{W_1(s)W_{PIR}(s)}{1 + W_1(s)W_{PIR}(s)}, \quad (20)$$

$$W_{I1}(s) = \frac{k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} (s^2 + k_{RES} s + \omega_0^2) (s + T_3^{-1})}{A_2(s)}. \quad (21)$$

Для характеристического полинома передаточной функции (21) введена следующая замена:

$$\begin{aligned} A_2(s) = & \mu_3 s^4 + \left( \mu_3 \frac{R_W}{L_W} + k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} \right) s^3 + \left( \mu_3 + k_3 k_{RES} \frac{U_{DC}}{L_W} + k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} T_3^{-1} \right) s^2 + \\ & + \left( \mu_3 \frac{R_W}{L_W} \omega_0^2 + k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} \omega_0^2 + k_3 k_{RES} \frac{U_{DC}}{L_W} T_3^{-1} \right) s + \left( k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} T_3^{-1} \omega_0^2 \right). \end{aligned} \quad (22)$$

Для анализа условий устойчивости замкнутой системы и получения расчетных соотношений параметров ПИ-регулятора необходимо рассмотреть данный характеристический полином, при этом необходимо отметить наличие малого положи-

тельного параметра  $\mu_3$  в его составе, что приводит к формированию быстрых и медленных процессов в замкнутой системе. Для выделения этих процессов и анализа корней данного полинома можно использовать метод разделения движений, описанный в [13, 14]. Так, характеристический полином ПМД можно получить из выражения (22) при  $\mu_3 \rightarrow 0$ :

$$A_{I(SMS)}(s) = k_3 \frac{U_{DC}}{L_W} \left( s^2 + k_{RES}s + \omega_0^2 \right) (s + T_3^{-1}). \quad (23)$$

Принимая во внимание устойчивость полинома в числителе передаточной функции (21), устойчивость процессов в подсистеме медленных движений обеспечивается выбором  $T_3 > 0$ . Данную постоянную времени можно рассчитать исходя из требований на время переходных процессов по току  $I_W$ , используя следующее соотношение:

$$t_{settle} = (3...4)T_1, \quad (24)$$

где  $t_{settle}$  – время переходного процесса по току.

Для получения полинома ПБД необходимо выполнить в полиноме (22) замену  $s = p / \mu_3$  и умножить полученное выражение на  $\mu_3^3$ . Затем, устремив  $\mu_3 \rightarrow 0$ , было получено следующее выражение:

$$\lim_{\mu_3 \rightarrow 0} \left( A_I \left( \frac{p}{\mu_3} \right) \mu_3^3 \right) = p^4 + p^3 k_3 \frac{U_{DC}}{L_W}. \quad (25)$$

После умножения (25) на  $p^{-3}$  и выполнения замены  $p = \mu_3 s$  для полинома подсистемы быстрых движений можно записать:

$$A_{I(FMS)}(s) = s\mu_3 + k_3 \frac{U_{DC}}{L_W}. \quad (26)$$

Исходя из выражения для ПБД (25) при постоянной времени  $\mu_3 > 0$  устойчивость быстрых процессов будет обеспечиваться условием  $(k_3 U_{DC} / L_W) > 0$ . Для простоты расчета можно выбрать коэффициент регулятора  $k_3$  равным  $L_W / U_{DC}$ . Из выражения (23) следует, что темп медленных процессов определяется постоянными времени  $T_3$  и  $\tau = 1 / \sqrt{\omega_0^2}$ . Тогда постоянную времени  $\mu_3$  можно рассчитать, используя следующее соотношение:

$$\mu_3 = \min\{\tau, T_3\} \eta^{-1}, \quad (27)$$

где  $\eta$  – степень разделения быстрых и медленных движений, которую рекомендуется задавать из условия  $\eta \geq 10$  [14]. На практике для импульсных преобразователей расчет данного параметра можно упростить, опираясь на частоту коммутации силовых ключей преобразователя, как будет показано далее.

## Б. Генераторный режим работы

Процедура расчета параметров ПИ-регулятора для внутреннего контура САР на рис. 2 аналогична расчету, проведенному в предыдущем подразделе. Используя передаточную функцию ПИ-регулятора (12) и передаточную функцию объекта

управления (24), получена передаточная функция для замкнутой системы по внутреннему контуру:

$$W_{I2}(s) = \frac{W_1(s)W_{PI}(s)}{1 + W_1(s)W_{PI}(s)}. \quad (28)$$

На основе анализа характеристического полинома данной передаточной функции и выделения полиномов подсистем быстрых и медленных движений получены следующие соотношения для расчета параметров ПИ-регулятора во внутреннем контуре двухконтурной САР:

$$k_1 = U_{DC} / L_W, \quad (29)$$

$$\mu_1 = 1 / f_s, \quad (30)$$

$$T_1 = \mu_1 \eta, \quad (31)$$

где  $f_s$  – частота коммутации силовых ключей. При таком подходе к расчету параметров постоянные времени  $T$  и  $\mu$  автоматически принимают достаточно малые значения, чтобы удовлетворять требованиям на время переходного процесса при сохранении достаточного запаса устойчивости.

Синтез регулятора во внешнем контуре также аналогичен проведенным ранее процедурам. Используя передаточные функции для объекта управления (16) и ПИД-регулятора (13), при условии, что все переходные процессы во внутреннем контуре закончились, была получена передаточная функция для замкнутой системы по внутреннему контуру:

$$W_U(s) = \frac{W_2(s)W_{PID}(s)}{1 + W_2(s)W_{PID}(s)}, \quad (32)$$

$$W_U(s) = \frac{k_2(s^2 + T_2^{-1}s + T_2^{-2})}{A_{CO}(s)(\mu_2^2 s^2 + d_2 \mu_2 s + k_2(s^2 + T_2^{-1}s + T_2^{-2}))}, \quad (33)$$

где введена замена:

$$A_{CO}(s) = (T_{ST1}s + 1) \left( \frac{L_{WG}}{R_{WG}} s + 1 \right) (T_{ST2}s + 1). \quad (34)$$

Анализируя характеристический полином системы (33) аналогично проведенным в предыдущем разделе процедурам, были получены полиномы подсистем быстрых и медленных движений:

$$A_{U(SMS)}(s) = k_2(s^2 + T_2^{-1}s + T_2^{-2}), \quad (35)$$

$$A_{U(FMS)}(s) = s^2 \mu_2^2 T_{ST1} T_{ST2} \frac{L_{WG}}{R_{WG}} + s \mu_2 T_{ST1} T_{ST2} \frac{L_{WG}}{R_{WG}} d_2. \quad (36)$$

Учитывая полученные выражения (33)–(36), на основе метода разделения движений и при соблюдении условий  $\mu_2 > 0$  и  $d_2 = 1$ , коэффициенты ПИД-регулятора можно рассчитать следующим образом:

$$k_2 = T_{ST1} T_{ST2} \frac{L_{WG}}{R_{WG}}, \quad (37)$$

$$\mu_2 = T_1, \quad (38)$$

$$T_2 = \mu_2 \eta. \quad (39)$$

Здесь постоянные времени подсистем быстрых и медленных движений  $\mu_2$  и  $T_2$  для внешнего контура рассчитаны на основе быстродействия внутреннего контура.

#### 4. Результаты моделирования

Для экспериментальной проверки эффективности синтезированной САР и предлагаемого регулятора было проведено имитационное моделирование системы возбуждения с помощью ПО PowerSIM и среды MATLAB/Simulink.

Параметры регуляторов, рассчитанные в соответствии с указанными выше параметрами силовых схем и полученными выражениями (30)–(32), (34)–(36), (37)–(39), указаны в табл. 2.

Таблица 2 / Table 2

Параметры регуляторов в системе автоматического управления  
Parameters of controllers in the automatic control system

Коэффициент	ПИР-регулятор	ПИ-регулятор	ПИД-регулятор
$k_{RES}$	12566	—	—
$k$	$1,72 \cdot 10^{-5}$	$6,85 \cdot 10^{-5}$	$5,57 \cdot 10^{-9}$
$\mu$	$3,333 \cdot 10^{-5}$	$3,33 \cdot 10^{-5}$	$2,33 \cdot 10^{-4}$
$T$	$3,333 \cdot 10^{-4}$	$2,33 \cdot 10^{-4}$	$2,33 \cdot 10^{-3}$
$\eta$	10	7	7

На рис. 8 приведены осциллограммы тока обмотки возбуждения в стартерном режиме, на рис. 9 – осциллограммы фазы  $A$  выходного напряжения ТСГ в генераторном режиме работы в статическом режиме и при изменении мощности нагрузки от 100 до 160 % от номинального значения.

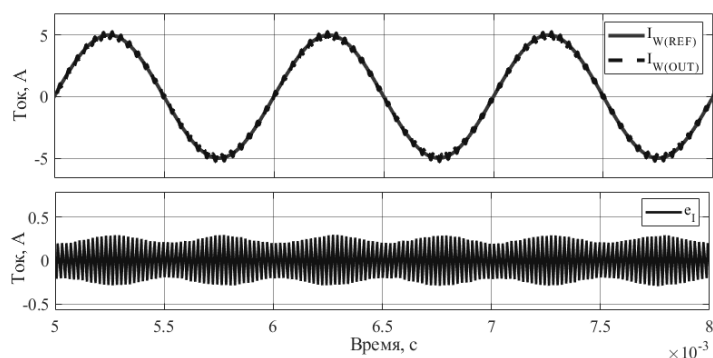


Рис. 8 – Осциллограммы тока обмотки возбуждения возбuditеля в стартерном режиме работы

Fig. 8 – Oscillograms of the exciter field winding current in the starter operation mode

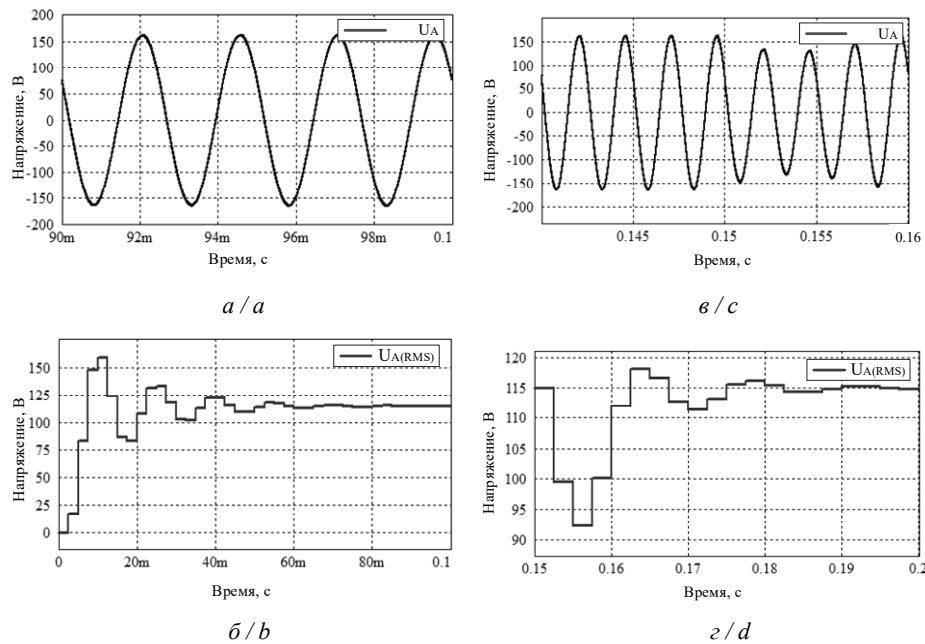


Рис. 9 – Осциллограммы одной фазы выходного напряжения ТСГ в статическом (а), (б) и динамическом (в), (г) режимах работы

Fig. 9 – Oscillograms of one phase of the generator output voltage in static (a), (b) and dynamic (c), (d) operating modes

Как видно из полученных осциллограмм, в стартерном режиме относительная ошибка слежения по току для САР с регулятором (17) составляет  $e_I \approx 4\%$ , а коэффициент гармонических искажений по току обмотки возбуждения составляет  $THD_F = 0,04$ , что полностью соответствует предъявляемым требованиям на точность и существенно улучшает результаты, полученные для разомкнутой системы управления из раздела 2.

Для генераторного режима ошибка по величине первой гармоники (400 Гц) составляет менее 1 % при коэффициенте нелинейных искажений  $THD \approx 0,3\%$ , что в несколько раз меньше аналогичных результатов, полученных при моделировании разомкнутой системы в разделе 3. Время переходного процесса при набросе мощности нагрузки составляет около 0,05 с.

По результатам данного раздела можно заключить, что полученные при имитационном моделировании синтезированной САР результаты полностью удовлетворяют требованиям ГОСТ Р 54073–2017 для бортовых систем переменного тока с постоянной частотой.

### Заключение

В данной работе показана возможность создания стартер-генераторной системы двигателя самолета на основе трехкаскадного синхронного генератора и полупроводникового преобразователя. Предложена система возбуждения, основанная на H-мосте, которая позволяет использовать трехкаскадный синхронный генератор не только в режиме генерирования, но и как стартерную систему. Преимущество предложенной топологии для стартерного режима состоит в возможности как форсирования тока, так и в быстром уменьшении потока возбуждения за счет

изменения направления протекания тока в обмотке возбуждения. Используя трансформаторный эффект, становится возможным создание потока возбуждения при нулевой скорости вала генератора.

Представлена процедура синтеза системы автоматического регулирования для системы возбуждения трехкаскадного синхронного генератора. Подробно рассмотрен расчет параметров регуляторов на основе метода разделения движений для двух режимов работы системы возбуждения, результаты имитационного моделирования демонстрируют эффективность синтезированной САР.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Машиностроение. Т. IV-21. Самолеты и вертолеты. Кн. 2. Проектирование, конструкции и системы самолетов и вертолетов / ред.-сост. А.М. Матвеев. – М.: Машиностроение, 2004. – 752 с.
2. Mathematical modeling of operation modes of the starter-generator / N.M. Maksimov, G.A. Savosteenko, D.H. Yu, N.V. Savosteenko // Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus), St. Petersburg, Moscow, Russia. – IEEE, 2021. – P. 1009–1013. – DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396286.
3. Design of power hardware-in-the-loop simulations for integrated starter-generator systems / L. Zhu, D. Jiang, R. Qu, L.M. Tolbert, Q. Li // IEEE Transactions on Transportation Electrification. – 2019. – Vol. 5 (1). – P. 80–92. – DOI: 10.1109/TTE.2018.2881052.
4. Díez-Maroto L., Rouco L., Fernández-Bernal F. Modeling, sizing, and control of an excitation booster for enhancement of synchronous generators fault ride-through capability: experimental validation // IEEE Transactions on Energy Conversion. – 2016. – Vol. 31 (4). – P. 1304–1314. – DOI: 10.1109/TEC.2016.2575004.
5. Электрооборудование летательных аппаратов. Т. 2. Элементы и системы электрооборудования – приемники электрической энергии / С.А. Грузков, В.А. Морозов, В.И. Нагайцев [и др.]. – М.: Изд-во МЭИ, 2008. – 552 с.
6. Грузков С.А. Электрооборудование летательных аппаратов. – М.: Изд-во МЭИ, 2005. – 568 с.
7. Zharkov M.A., Sarakhanova R.Yu. Analysis of current state of the starting device for aircraft gas turbine engines // Proceedings of 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon). – IEEE, 2020. – P. 383–388. – DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216243.
8. Performance Investigation of a brushless synchronous machine with additional harmonic field windings / F. Yao, Q. An, L. Sun, T.A. Lipo // IEEE Transactions on Industrial Electronics. – 2016. – Vol. 63 (11). – P. 6756–6766. – DOI: 10.1109/TIE.2016.2581759.
9. Design and implementation of voltage source converter excitation system to improve power system stability / Z. Chen, C. Mao, D. Wang, J. Lu, Y. Zhou // IEEE Transactions on Industry Applications. – 2016. – Vol. 52 (4). – P. 2778–2788. – DOI: 10.1109/TIA.2016.2543685.
10. The analysis of the reactive launch of three-stage synchronous generator for aviation starter-generator device / M.A. Zharkov, S.A. Kharitonov, V.E. Sidorov, R.Y. Dubkova // 2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS), Ufa, Russia. – IEEE, 2019. – P. 1–5. – DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949881.
11. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 536 с.
12. ГОСТ Р 54073–2017. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – М.: Стандартинформ, 2018. – 35 с.
13. Yurkevich V.D. PIR controller design based on the time-scale separation method and internal model principle for harmonic disturbance suppression // Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing. – 2021. – Vol. 57 (4). – P. 363–370. – DOI: 10.3103/S8756699021040130.
14. Юркевич В.Д. Многоканальные системы управления. Синтез линейных систем с разнотемповыми процессами. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2016. – 182 с.



15. Вавилов О.А., Юркевич В.Д., Коробков Д.В. Методика синтеза резонансного регулятора на основе метода разделения движений для инвертора напряжения // Вестник Томского государственного университета. Управление, вычислительная техника и информатика. – 2023. – № 63. – С. 4–15. – DOI: 10.17223/19988605/63/1.

## ANALYSIS OF ELECTROMAGNETIC PROCESSES IN THE EXCITATION UNIT OF A THREE-STAGE STARTER GENERATOR FOR THE AVIATION POWER SYSTEM

Vedernikov D.A., Vavilov O.A., Zharkov M.A., Sarakhanova R.Y.  
Novosibirsk State Technical University

This article discusses the excitation system of a three-stage synchronous generator for aviation use in two distinctive modes of operation: as an electric power generator for an on-board power supply system and an electric starter for gas turbine engines of the aircraft. The article presents the calculation of the starter and generator operating modes of the excitation system. The basic design relations for the semiconductor converter circuit have been obtained and confirmed by simulation modeling in the PowerSIM environment.

The problem of synthesizing an automatic control system for the TSG excitation unit operating as part of an on-board power supply system using a method for calculating the parameters of regulators based on the motion separation method has been solved. A two-circuit control system has been created for the generator mode of operation, including PI and PID regulators with output voltage regulation of the main generating stage. To control the excitation unit in the electric starter mode of operation, a single-circuit control system for the current of the excitation winding with the addition of a resonant component has been designed. The evaluation of the efficiency of the designed control systems was carried out on the basis of simulation modeling using PowerSIM and MATLAB/Simulink application software packages for a generator feeding a three-phase AC network in accordance with the requirements of GOST R 54073-2017.

The results of mathematical modeling formed the basis for the design of an experimental sample of the power unit in a hybrid integrated design for the TSG voltage regulation system.

**Keywords:** synchronous generator, exciter, voltage inverter, DC step-down converter, automatic control system, PI controller, resonant controller, motion separation method.

DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-29-47

## REFERENCES

1. Matveenko A.M., ed. *Mashinostroenie*. T. IV-21. *Samolety i vertolety*. Kn. 2. *Proektirovanie, konstruksii i sistemy samoletov i vertoletov* [Mechanical engineering. Vol. IV-21. Airplanes and helicopters. Bk. 2. Design, construction and systems of airplanes and helicopters]. Moscow, Mashinostroenie Publ., 2004. 752 p.
2. Maksimov N.M., Savosteenko G.A., Yu D.H., Savosteenko N.V. Mathematical modeling of operation modes of the starter-generator. *Proceedings of the 2021 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (ElConRus)*, St. Petersburg, Moscow, Russia, 2021, pp. 1009–1013. DOI: 10.1109/ElConRus51938.2021.9396286.
3. Zhu L., Jiang D., Qu R., Tolbert L.M., Li Q. Design of power hardware-in-the-loop simulations for integrated starter-generator systems. *IEEE Transactions on Transportation Electrification*, 2019, vol. 5 (1), pp. 80–92. DOI: 10.1109/TTE.2018.2881052.
4. Díez-Maroto L., Rouco L., Fernández-Bernal F. Modeling, sizing, and control of an excitation booster for enhancement of synchronous generators fault ride-through capability: experimental validation. *IEEE Transactions on Energy Conversion*, 2016, vol. 31 (4), pp. 1304–1314. DOI: 10.1109/TEC.2016.2575004.
5. Gruzkov S.A., Morozov V.A., Nagaitsev V.I., et. al. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov*. T. 2. *Elementy i sistemy elektrooborudovaniya – priemniki elektricheskoi energii* [Electrical equipment of aircraft. Vol. 2. Elements and systems of electrical equipment – receivers of electrical energy]. Moscow, MPEI Publ., 2008. 552 p.

6. Gruzkov S.A. *Elektrooborudovanie letatel'nykh apparatov* [Electrical equipment of aircraft]. Moscow, MPEI Publ., 2005. 568 p.
7. Zharkov M.A., Sarakhanova R.Yu. Analysis of current state of the starting device for aircraft gas turbine engines. *Proceedings of 2020 International Ural Conference on Electrical Power Engineering (UralCon)*. IEEE, 2020, pp. 383–388. DOI: 10.1109/UralCon49858.2020.9216243.
8. Yao F., An Q., Sun L., Lipo T.A. Performance investigation of a brushless synchronous machine with additional harmonic field windings. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 2016, vol. 63 (11), pp. 6756–6766. DOI: 10.1109/TIE.2016.2581759.
9. Chen Z., Mao C., Wang D., Lu J., Zhou Y. Design and implementation of voltage source converter excitation system to improve power system stability. *IEEE Transactions on Industry Applications*, 2016, vol. 52 (4), pp. 2778–2788. DOI: 10.1109/TIA.2016.2543685.
10. Zharkov M.A., Kharitonov S.A., Sidorov V.E., Dubkova R.Y. The analysis of the reactive launch of three-stage synchronous generator for aviation starter-generator device. *2019 International Conference on Electrotechnical Complexes and Systems (ICOECS)*, Ufa, Russia, pp. 1–5. DOI: 10.1109/ICOECS46375.2019.8949881.
11. Kharitonov S.A. *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh generirovaniya elektricheskoi energii dlya avtonomnykh ob"ektov* [Electromagnetic processes in electric power generation systems for autonomous objects]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 536 p.
12. GOST R 54073–2017. *Sistemy elektrosnabzheniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii* [State Standard R 54073–2017. Electric power supply systems of airplanes and helicopters. General requirements and norms of quality of electric energy]. Moscow, Standartinform Publ., 2018. 35 p.
13. Yurkevich V.D. PIR controller design based on the time-scale separation method and internal model principle for harmonic disturbance suppression. *Optoelectronics, Instrumentation and Data Processing*, 2021, vol. 57 (4), pp. 363–370. DOI: 10.3103/S8756699021040130.
14. Yurkevich V.D. *Mnogokanal'nye sistemy upravleniya. Sintez lineinykh sistem s raznotempovymi protsessami* [Multi-input-multi-output control systems. Design of linear control systems with multi-time scale motions]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2016. 182 p.
15. Vavilov O.A., Yurkevich V.D., Korobkov D.V. Metodika sinteza rezonansnogo regul'yatora na osnove metoda razdeleniya dvizhenii dlya invertora napryazheniya [Resonant controller design by time-scale separation method for a voltage inverter]. *Vestnik Tomskogo gosudarstvennogo universiteta. Upravlenie, vychislitel'naya tekhnika i informatika = Tomsk State University Journal of Control and Computer Science*, 2023, no. 63, pp. 4–15. DOI: 10.17223/19988605/63/1. (In Russian).

#### СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



**Ведерников Дмитрий Александрович** – родился в 2000 году, магистрант, НГТУ. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, преобразователи электрической энергии. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vedernikovdmitriy2@gmail.com).

**Vedernikov Dmitry Alexandrovich** (b. 2000) – master student, NSTU. His research interests cover power electronics, aviation generation systems, and power converters. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vedernikovdmitriy2@gmail.com).



**Вавилов Олег Андреевич** – родился в 1998 году, аспирант кафедры автоматики, младший научный сотрудник Центра технологического превосходства, НГТУ. Область научных интересов: системы автоматического управления, силовые преобразователи, инверторы напряжения, широтно-импульсная модуляция, синтез регуляторов, автоматизация. Опубликовано пять научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: vavilov.oleg.rp462@gmail.com).

**Vavilov Oleg Andreevich** (b. 1998) – postgraduate student of the Automation Department, junior researcher, NSTU. Research interests: power electronics, automation, power engineering, intelligent control systems, control theory. Author of 5 published research papers. (Address: 20, Karl Marks Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: vavilov.oleg.rp462@gmail.com).



**Жарков Максим Андреевич** – родился в 1988 году, канд. техн. наук, доцент кафедры ЭЭ, заместитель директора Института силовой электроники НГТУ. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, электропривод. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, Новосибирск, пр. Карла Маркса, 20. E-mail: maks.zharkoff@yandex.ru).

**Zharkov Maksim Andreevich** (b. 1988) – Candidate of Sciences (Eng.), associate professor at the Department of EE, Deputy Director of the Institute of Power Electronics of NSTU. His research interests include power electronics, aviation generation systems, and electric drives. More than 50 scientific papers have been published. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: maks.zharkoff@yandex.ru).



**Сараханова Регина Юрьевна** – родилась в 1991 году, младший научный сотрудник, Институт силовой электроники, НГТУ. Область научных интересов: силовая электроника, авиационные системы генерирования, непосредственные преобразователи частоты. Опубликовано 10 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, 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, direct frequency converters. She is author of 10 scientific papers. (Address: 20, Kark Marks Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: sarakhanova\_nstu@mail.ru).

*Статья поступила 01 ноября 2023 г.*

*Received November 01, 2023*

---

To Reference:

Vedernikov D.A., Vavilov O.A., Zharkov M.A., Sarakhanova R.Y. Analiz elektromagnitnykh protsessov bloka vzbuzhdeniya trekhkaskadnogo starter-generatora dlya aviatsionnoi energosistemy [Analysis of electromagnetic processes in the excitation unit of a three-stage starter generator for the aviation power system]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii = Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2024, no. 1 (62), pp. 29–47. DOI: 10.17212/1727-2769-2024-1-29-47.