

УДК 621.314.58

Д.В. КоробковНовосибирский государственный технический университет,
Новосибирск, Россия**СИСТЕМА «ТРЕХФАЗНЫЙ МЭГ – УПРАВЛЯЕМЫЙ
МОСТОВОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ» С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ
ДРОССЕЛЕМ В НЕЙТРАЛИ: РЕЖИМЫ РАБОТЫ
И УСЛОВИЯ ИХ СУЩЕСТВОВАНИЯ**

Приведены результаты анализа режимов работы и условий их существования в системе, состоящей из магнитоэлектрического генератора (МЭГ) и управляемого (тиристорного) мостового выпрямителя с дополнительным дросселем, подключенным к нейтрали генератора и средней точке двуполярного постоянного напряжения. Несложная модификация известной схемы Ларионова предназначена для применения в электротехнических комплексах электропитания переменного напряжения с промежуточным звеном постоянного напряжения, в которых первичным источником электрической энергии является МЭГ с переменной частотой вращения вала, а в качестве стабилизатора параметров энергии нагрузки – автономный транзисторный инвертор напряжения (ИН), нагрузка которого имеет нейтраль, подключенную к средней точке двуполярного выходного напряжения выпрямителя. Необходимость введения дополнительного дросселя состоит в формировании контура протекания постоянной составляющей тока нагрузки, минуя конденсаторы звена постоянного тока системы. Введение дросселя изменяет режимы работы схемы, которые характеризуются различным количеством и длительностью интервалов проводимости тиристорov выпрямителя на периоде частоты напряжения генератора. В статье приведены результаты первого, необходимого для систем с МЭГ и выпрямителем, этапа анализа электромагнитных процессов при нулевой величине постоянной составляющей тока нагрузки. При анализе режимов работы принята LE-схема замещения фазы генератора с учетом наличия взаимной индуктивности фаз и опирающаяся на теорему постоянства потокосцепления и допущении, что магнитная система не насыщена и линейна. Система дифференциальных уравнений трехфазного МЭГ дополнена уравнением для напряжения и тока нейтрали, появление которого обусловлено введением дополнительного дросселя. Полученные в относительных величинах выражения позволяют определять условия существования режимов в модифицированной схеме в широком диапазоне изменения частоты вращения вала генератора, углов управления, индуктивности фаз генератора и входной индуктивности выпрямителя (индуктивность фидера генератора). Результаты этого этапа анализа являются основой для следующего шага – учета влияния наличия постоянной составляющей тока нагрузки ИН.

Ключевые слова: магнитоэлектрический генератор, управляемый выпрямитель с дополнительным дросселем в нейтрали генератора, анализ режимов работы и условий их существования в системе с генератором и выпрямителем, постоянство потокосцепления, ненасыщенная линейная магнитная система.

D.V. Korobkov

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russian Federation

**“THE THREE-PHASE PMSG – CONTROLLED BRIDGE
RECTIFIER” SYSTEM WITH ADDITIONAL REACTOR
IN NEUTRAL: OPERATING MODES AND CONDITIONS
OF THEIR EXISTENCE**

The results of the analysis of operating modes and conditions of their existence in a system consisting of a synchronous generator with permanent magnets (PMSG) and a controlled (thyristor) bridge rectifier with an additional choke connected to the generator neutral and the midpoint of the bipolar output voltage of the rectifier are presented. This simple modification of the known Larionov scheme is intended for use in electrical AC voltage power supply complexes with intermediate DC voltage link. In such systems, PMSG is the variable shaft speed primary source and the voltage inverter (VI) is used as load power parameters stabilizer. The load neutral is connected to the midpoint of the bipolar output voltage of the rectifier. The need for the introduction of an additional choke is to form a circuit of the load current constant component in its presence bypassing the DC link capacitors of the system. The introduction of the choke changes the operating modes of the circuit, which are characterized by a different number and duration of thyristor conduction intervals on the period of the generator voltage frequency. The article presents the results of the first stage of electromagnetic analysis required for systems with PMSG and rectifier at zero value of the load current constant component. The system of differential equations of a three-phase permanent magnets synchronous generator (PMSG) is supplemented by the equation for neutral voltage and neutral current, the appearance of which is due to the introduction of an additional choke. The expressions obtained in relative values allow to define the conditions for the existence of modes in the modified scheme in a wide range of changing generator shaft speed, control angles, phase generator inductance and rectifier input inductance (generator feeder inductance). The results of this analysis stage are the foundation for the next step – considering the influence of the load current constant component of the VI.

Keywords: synchronous generator with permanent magnets, controlled rectifier with additional choke in the neutral of the generator, analysis of operating modes and conditions of their existence in the system with the generator and rectifier, the constancy of the flux linkage, unsaturated linear magnetic system.

Введение. Улучшение параметров электрической энергии переменного тока с нестабильным характером и низким качеством может осуществляться с использованием полупроводниковых статических преобразователей. Такие процессы имеют место в классе систем генерирования электрической энергии (СГЭЭ), получивших в отечественной литературе название «переменная скорость – постоянная частота» (ПСПЧ) [1], где первичным источником электрической энергии является синхронный генератор (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов (магнитоэлектрический генератор – МЭГ) и переменной частотой вращения вала, а в качестве стабилизатора параметров энергии

нагрузки – автономный транзисторный инвертор напряжения (ИН) с цифровой системой управления [2–7, 10]. Достоинства СГЭЭ с ИН обусловлены свойствами указанных электротехнических устройств: высокая надежность, высокое качество генерируемой электрической энергии и малые эксплуатационные затраты [2, 6, 8].

Комплексная проблема построения, проектирования и оптимизации таких систем с нулевым проводом сопряжена с решением ряда задач, в числе которых необходимость обеспечения малого, близкого к нулю, уровня постоянной составляющей переменного напряжения при работе на автономную нагрузку или тока при работе параллельно с промышленной сетью [3, 9–13].

В зарубежной литературе основное внимание уделяется вопросам синтеза параметров регуляторов системы автоматического управления и оптимизации топологии силовой схемы систем ПСПЧ в составе ветроэнергетических комплексов [14–28] с изолированной нейтралью нагрузки. В [27] для улучшения качества энергии, потребляемой от МЭГ, применен емкостной фильтр, подключенный к фазам генератора по схеме «звезда», нейтраль которой соединена со средней точкой выходной транзисторной стойки трехфазного диодного выпрямителя. В [28] описывается применение модифицированного преобразователя постоянного напряжения повышающего типа, средняя точка транзисторной стойки которого соединена со средней точкой конденсаторов звена постоянного напряжения инвертора и с нейтралью выходного LC-фильтра. Однако во всех случаях указанная выше задача не ставится.

В [10] предпочтение отдается схемам с многофазным генератором и двумя выпрямителями, формирующими положительное и отрицательное напряжения со средней точкой, питающие трехфазный трехуровневый инвертор или с однофазными инверторами напряжения, каждый из которых со своим независимым звеном постоянного тока. В контексте указанной задачи первый вариант обеспечивает выравнивание уровней положительного и отрицательного формируемых постоянных напряжений даже при протекании постоянного тока нулевого провода нагрузки.

В [11] для систем ПСПЧ со звеном постоянного тока, выполненных по схеме «СГ – выпрямитель – инвертор» предложено решение задачи путем введения дросселя, соединяющего среднюю точку напряжения звена постоянного тока инвертора и нейтраль СГ, что создает контур

протекания постоянной составляющей тока нагрузки, минуя конденсаторы звена постоянного тока, и тем самым обеспечивается равенство напряжений плеч двуполярного выходного напряжения выпрямителя.

В [12] описаны результаты определения режимов работы и анализа условий их существования в СГЭЭ с МЭГ и диодным (неуправляемым) вентильным преобразователем (НВП) с дополнительным дросселем в нейтрали генератора.

Выполнение в системе по [11] ВП управляемым на тиристорах (УВП, рис. 1) требует проведения работы, аналогичной приведенной в [12]. На схеме рис. 1 выходное фазное напряжение $u_{cr1...cr3}$ СГ поступает через индуктивности L_f фидера генератора на трехфазную мостовую схему УВП, образованную тиристорами $V1...V6$, которая формирует два постоянных напряжения, равных $E_c/2$, соединенных общей точкой через дроссель L_0 с нейтралью N_{cr} СГ.

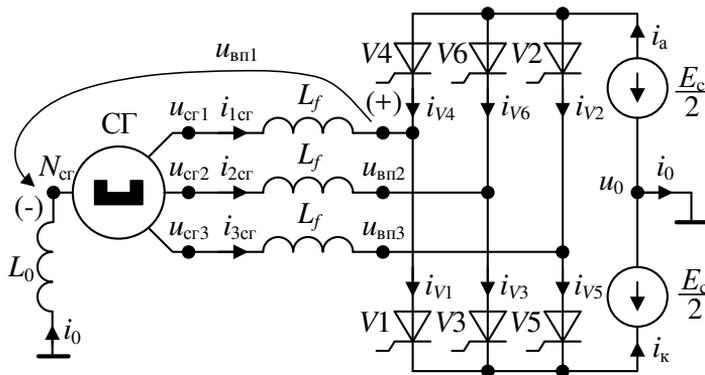


Рис. 1. Система «СГ-УВП» с дополнительным дросселем L_0

В СГЭЭ с ИН эти напряжения питают ИН, а их общая точка дополнительно соединяется и с нейтралью нагрузки. Очевидно, что при $L_0 = 0$ анодная и катодная группы образуют нулевые схемы и работают независимо. Введение $L_0 > 0$ ограничивает величину тока i_0 , сохраняя пульсность мостовой схемы и снижая загрузку фаз СГ током i_0 .

1. Постановка задачи. Наличие контура протекания тока i_0 в схеме рис. 1 ставит задачу анализа электромагнитных процессов в модифицированной схеме с целью выявления ее режимов работы, характеризующихся изменением количества и длительности интервалов проводимости тиристоров при изменении частоты вращения вала генератора

(соответственно, частоты и величины выходного напряжения генератора) и углов управления выпрямителем.

При анализе электромагнитных процессов необходимо найти выражения длительностей интервалов проводимости тиристоров и определить граничные значения частот напряжения генератора и углов управления выпрямителем, при которых существует соответствующий режим работы предложенной модифицированной схемы.

На первом этапе анализа, изложению результатов которого посвящена статья, проведем анализ при нулевой величине постоянной составляющей тока i_0 . Результаты этого первого этапа анализа являются необходимой базой для следующего шага – учета влияния величины постоянной составляющей i_0 при наличии постоянной составляющей тока нагрузки в системе с ИН. Система уравнений (1), сформированная в относительных единицах и описывающая СГ системы (см. рис. 1), основана на методике (модель генератора и базис), изложенной в [13], и применена в случае НВП в [12].

$$\begin{cases} \mathbf{e} - n^* \mathbf{X} \frac{d}{d\vartheta} \mathbf{i}_{\text{сг}}^* = \mathbf{u}_{\text{вп}}^*, \\ i_{\text{сг}1}^* + i_{\text{сг}2}^* + i_{\text{сг}3}^* = i_0^*, \\ n^* X_0^* \frac{di_0^*}{d\vartheta} = u_0^*, \\ \mathbf{u}_{\text{вп}1}^* + \mathbf{u}_{\text{вп}2}^* + \mathbf{u}_{\text{вп}3}^* = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где \mathbf{e} – фазные ЭДС генератора, $\mathbf{e} = [e_1^* \ e_2^* \ e_3^*]^T$, $e_j^* = n^* \sin[\vartheta - \frac{2\pi}{3}(j-1)]$, $j=1\dots 3$; $\mathbf{i}_{\text{сг}}^*$ – фазные токи генератора (можно выразить через токи тиристоров), $\mathbf{i}_{\text{сг}}^* = [i_{\text{сг}1}^* \ i_{\text{сг}2}^* \ i_{\text{сг}3}^*]^T$; $\mathbf{u}_{\text{вп}}^*$ – фазные напряжения вентильного преобразователя, $\mathbf{u}_{\text{вп}}^* = [u_{\text{вп}1}^* \ u_{\text{вп}2}^* \ u_{\text{вп}3}^*]^T = \mathbf{e} - n^* \mathbf{X} \cdot \frac{d}{d\vartheta} \mathbf{i}_{\text{сг}}^*$; \mathbf{X} – матрица размерностью 3×3 фазных X_{jj}^* ($j=1\dots 3$) и взаимных X_S^* индуктивностей генератора, $X_S^* = 1/(1+q) \cos(2\pi/3)$, $X_{jj}^* = X_j^* + X_f^* = 1$, $X_j^* = 1/(1+q)$, $X_f^* = q/(1+q)$.

Системе уравнений (1) и рис. 1 соответствует эквивалентная схема замещения на рис. 2. Чтобы определить режимы работы системы «СГ-УВП» с дополнительным дросселем в нейтрали генератора, можно, воспользоваться результатами, описанными в [12], вводя угол

управления α в решение системы уравнений (1) относительно i_{crj}^* и при анализе длительности протекания токов.

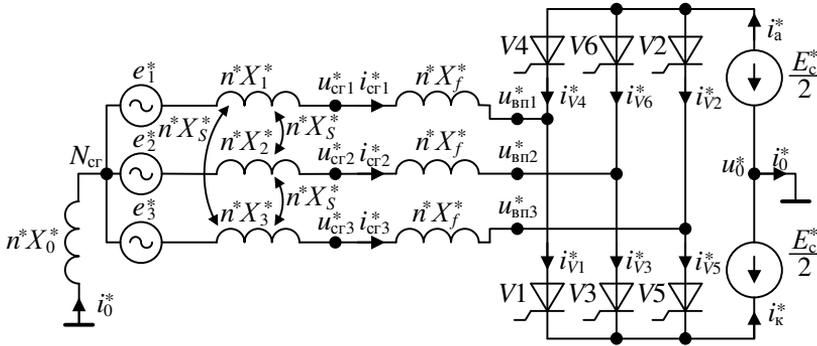


Рис. 2. Эквивалентная схема замещения системы «СГ-УВП»

2. Анализ режимов работы и условий их существования. На рис. 3–5 приведены временные диаграммы, поясняющие электромагнитные процессы во всех выявленных режимах работы УВП в системе, приведенной на рис. 1, отличающихся длительностью и количеством интервалов проводимости тиристоров. За начало отсчета при анализе электромагнитных процессов принят момент положительной смены знака мгновенного значения ЭДС фазы 1 СГ. Поскольку в статье анализируются условия существования режимов работы, то далее приводятся необходимые для этого результирующие выражения без изложения промежуточных выкладок решения системы уравнений (1), сделанных по аналогии с [12].

2.1. Режим 1 прерывистых фазных токов генератора. Режим 1 прерывистых тока i_0^* , индуктивности nX_0^* и токов i_{crj}^* генератора, диаграммы которых приведены на рис. 3, а, характеризуется длительностью протекания тока фазы генератора: $\lambda \leq \pi/3$. Диаграммы на рис. 3, а поясняют электромагнитные процессы при включении V1 и протекании тока i_{cr1}^* в фазе 1 СГ. С момента времени $\alpha + \pi/6$ включения V1 с углом управления α ток протекает по контуру « $e_1^* - nX_1^* - nX_f^* - V1 - E_c^*/2 - nX_0^* - N_{cr}$ ».

Решая (1) на интервале λ и учитывая, что при $i_{cr1}^*(\lambda) = 0$, расчет λ осуществляется по выражению:

$$-n^* \cos\left(\lambda + \frac{\pi}{6} + \alpha\right) + n^* \cos\left(\frac{\pi}{6} + \alpha\right) - \frac{E_c^*}{2} \lambda = 0. \quad (2)$$

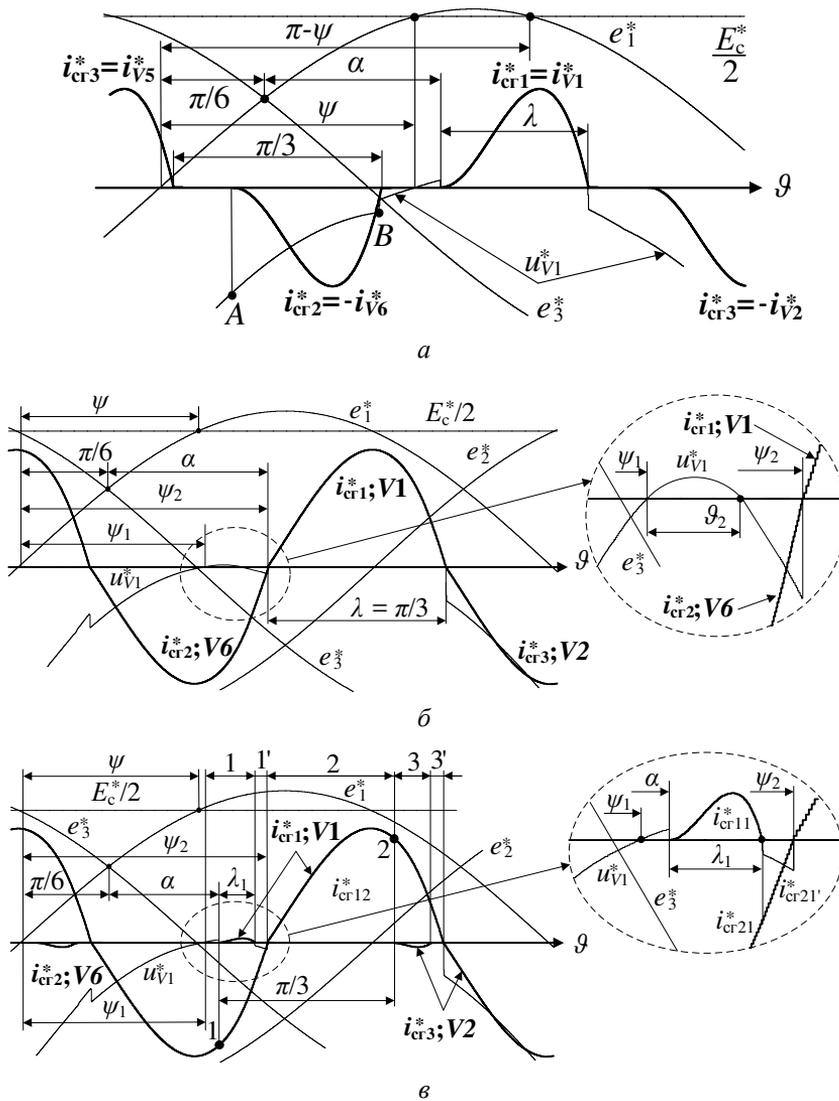


Рис. 3. Диаграммы режимов работы УВП в системе «СГ-УВП»:
 а – режим 1 прерывистых токов, $\lambda < \pi/3$; б – режим 2 непрерывных токов нейтрали при $\alpha = \psi - \pi/6$; в – режим 2 непрерывных токов нейтрали при $\psi_1 - \pi/6 < \alpha < \psi_1 + \psi_2 - \pi/6$

Обозначив граничные частоту $n_{гр1}^*$ и угол управления $\alpha_{гр1}^*$, при которых $\lambda = \pi/3$, используя выражение (1), можно определить условия существования режима 1:

$$n^* = \frac{\sqrt{3} \pi}{2} \frac{1}{3 \sin(\pi/3 + \alpha)}. \quad (3)$$

При постоянстве α по выражению (4) можно рассчитать $n_{\text{гp1}}^*$. При постоянстве n^* по выражению (4), выразив α как функцию n^* , можно рассчитать $\alpha_{\text{гp1}}^*$.

2.2. Режим 2 непрерывных токов нейтрали генератора. При увеличении n^* напряжение u_{V1}^* на участке AB (см. рис. 3, а) увеличивается, и при некотором $n_{\text{гp2}}^*$ значение u_{V1}^* в точке, которую обозначим как ψ_1 , оказывается равным 0.

В [12] показано, что при $n^* \in [n_{\text{гp1}}^*; n_{\text{гp2}}^*]$ НВП работает в подрежиме 1 с $\lambda = \pi/3$. В УВП этого режима нет, поскольку при $\alpha < \alpha_{\text{гp1}}^*$ и $n^* < n_{\text{гp2}}^*$ УВП работает как НВП в подрежиме 1, а при $\alpha > \alpha_{\text{гp1}}^*$ УВП работает с $\lambda < \pi/3$ в режиме 1. При $n^* > n_{\text{гp2}}^*$ $u_{V1}^* > 0$ при $\vartheta > \psi_1$: диаграммы на рис. 3, б при $\alpha = \psi_2 - \pi/6$. Как следует из выводов, изложенных в [12], при $n^* > n_{\text{гp2}}^*$ $\psi_2 > \psi$.

Используя результаты [12] и решение системы (1), для u_{V1}^* на участке AB можно найти ψ_1 как решение уравнения $u_{V1}^*(\psi_1) = 0$:

$$n^* \sin(\psi_1) - \frac{E_c^*}{2} + \frac{X_S^* + X_0^*}{X_{11}^* + X_0^*} \left[n^* \sin\left(\psi_1 + \frac{\pi}{3}\right) - \frac{E_c^*}{2} \right] = 0. \quad (4)$$

В выделенной области диаграмм в окрестности ψ_1 на рис. 3, б показано, что $\psi_1 + \vartheta_2 \leq \alpha + \pi/6 \leq \psi_2$ – зона нечувствительности по α . В этой области $u_{V1}^* < 0$. В соответствии с (3) ϑ_2 можно найти из выражения:

$$n^* \sin(\vartheta_2 + \psi_1) - \frac{E_c^*}{2} + \frac{X_S^* + X_0^*}{X_{11}^* + X_0^*} \left[n^* \sin\left(\vartheta_2 + \psi_1 + \frac{\pi}{3}\right) - \frac{E_c^*}{2} \right] = 0. \quad (5)$$

При $n^* > n_{\text{гp2}}^*$ диапазон $\alpha = [\psi_1 - \pi/6; \psi_1 + \vartheta_2 - \pi/6]$ – это еще один интервал проводимости $V1$ режима 2 (см. рис. 3, в). Введем дополнительную индексацию фазных токов в соответствии с номером временного интервала проводимости тиристорov.

Интервал 1 при $\alpha + \pi/6 \leq \vartheta \leq \alpha + \pi/6 + \lambda_1$ имеет длительность λ_1 одновременного проводящего состояния двух тиристорov $V1$ (фаза 1 СГ – ток $i_{\text{сr11}}^*$) и $V6$ (фаза 2 СГ – ток $i_{\text{сr21}}^*$). Решая (1) на этом интервале, можно получить выражения для $i_{\text{сr11}}^*(\vartheta)$ и $i_{\text{сr21}}^*(\vartheta)$ с учетом, что $i_{\text{сr11}}^*(\alpha + \pi/6) = 0$, $i_{\text{сr21}}^*(\alpha + \pi/6) = -i_{\text{сr12}}^*(\alpha + \pi/2)$ (точки 1 и 2 диаграмм).

Длительность λ_1 можно найти решением уравнения

$$i_{cr11}^* (\alpha + \pi/6 + \lambda_1) = 0. \quad (6)$$

Интервал 1' при $\alpha + \pi/6 + \lambda_1 \leq \vartheta \leq \psi_2$ проводящего состояния одного тиристора V6. Решая (1), на этом интервале можно получить $i_{cr21'}^* (\vartheta)$ при $i_{cr21'}^* (\psi_2) = 0$.

Интервал 2 при $\psi_2 \leq \vartheta \leq \alpha + \pi/6 + \pi/3 = \alpha + \pi/2$ проводящего состояния одного тиристора V1. Решая (1), на этом интервале можно получить $i_{cr21}^* (\vartheta)$ при $i_{cr12}^* (\psi_2) = 0$:

ψ_2 можно определить, используя результаты, изложенные в [12]:

$$\psi_2 = -\arcsin\left(\frac{1}{n^*} \frac{E_c^* \pi}{2 \cdot 3}\right) + \frac{5\pi}{6}. \quad (7)$$

При $\vartheta \geq \alpha + \pi/6 + \pi/3 = \alpha + \pi/2$ электромагнитные процессы повторяются в других фазах генератора при проводящем состоянии других тиристорov. Увеличение n^* при фиксированном α приводит к уменьшению длительности интервала 1'. При некоторой величине $n_{гр3}^*$ $\alpha + \pi/6 + \lambda_1 = \psi_2$ интервал 1' отсутствует. Используя (5) и (6), можно написать систему уравнений граничных значений $n_{гр3}^*$ и $\alpha_{гр3}^*$:

$$\begin{cases} \psi_2 = -\arcsin\left(\frac{1}{n^*} \frac{E_c^* \pi}{2 \cdot 3}\right) + \frac{5\pi}{6} \\ \frac{X^* + X_S^* + X_0^*}{X^* [X^* + 2(X_S^* + X_0^*)]} \left[\cos\left(\alpha + \frac{\pi}{6}\right) - \cos(\psi_2) \right] - \frac{1}{n^*} \frac{1}{X^*} \frac{E_c^*}{2} \left(\psi_2 - \alpha - \frac{\pi}{6} \right) + \\ + \frac{X_S^* + X_0^*}{X^* [X^* + 2(X_S^* + X_0^*)]} \left[\cos\left(\psi_2 - \frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right] = 0. \end{cases} \quad (8)$$

2.3. Режим 3 непрерывных токов тиристорov без угла γ . Режим 3 непрерывных токов тиристорov, временные диаграммы которого приведены на рис. 4, а, возникает при $n^* > n_{гр3}^*$ или $\alpha < \alpha_{гр3}^*$.

На интервале 1 при $\alpha + \pi/6 \leq \vartheta \leq \alpha + \pi/6 + \lambda_1$ длительностью λ_1 одновременного проводящего состояния двух ключей справедливо решение системы (1) для интервала 1 режима 2, с учетом, что $i_{cr21}^* (\alpha + \pi/6) = -i_{cr12}^* (\alpha + \pi/2)$ (точки 1 и 3 диаграмм (см. рис. 4, а)).

На интервале 2 при $\alpha + \pi/6 + \lambda_1 \leq \vartheta \leq \alpha + \pi/2$ проводящего состояния только одного ключа решением системы (1) можно получить

$i_{cr12}^*(\vartheta)$, при $i_{cr12}^*(\alpha + \pi/6 + \lambda_1) = i_{cr11}^*(\alpha + \pi/6 + \lambda_1) \neq 0$ (точка 2 диаграмм на рис. 4, а). На интервале 3 через $\pi/3$ от начала интервала 1 ($\vartheta = \alpha + \pi/6$) электромагнитные процессы аналогичны интервалу 1, но с другими фазами генератора и тиристорами. Опираясь на материалы, изложенные в [12], и решения системы (1), процедура определения λ_1 может быть основана на решении уравнения

$$i_{cr21}^*(\alpha + \pi/6 + \lambda_1) = 0. \quad (9)$$

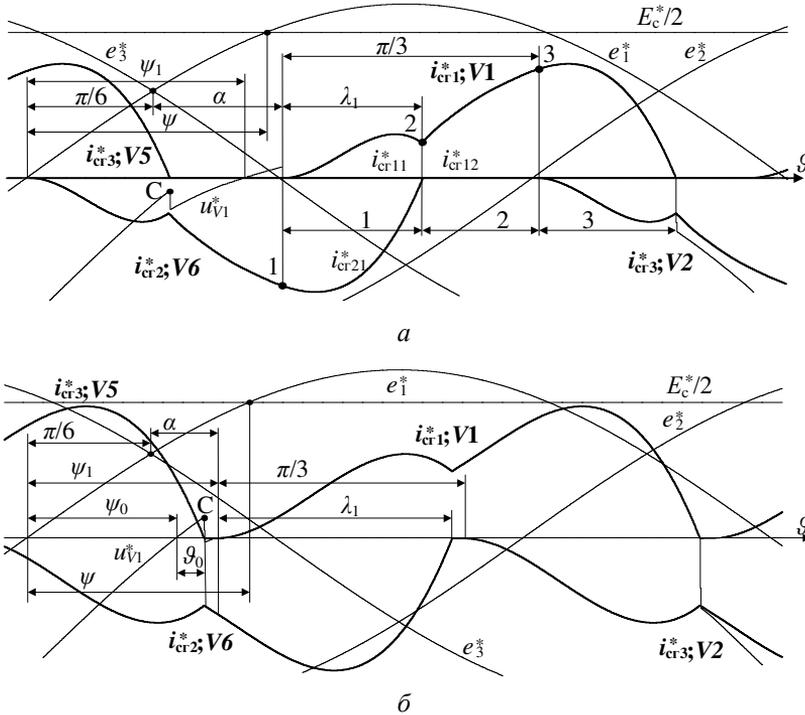


Рис. 4. Режим 3 (а); режим 3 при $\alpha = \psi_1 - \pi/6$ и $n^* > n_{tr4}^*$ (б)

При некотором граничном значении $n^* = n_{tr4}^*$ локальный максимум «С» u_{v1}^* (см. рис. 4, а) достигает нуля. Обозначим этот момент времени как ψ_0 : $u_{v1}^*(\psi_0) = 0$. В этой ситуации $\psi_1 + \lambda_1 = \psi_0 + \pi/3$, а минимальный угол управления равен $\psi_1 - \pi/6$.

В соответствии с [12] и решением системы (1) можно записать:

$$\psi_0 = \arcsin \left(\frac{1}{n^*} \frac{X_{11}^* + X_0^* + 2X_5^*}{X_{11}^* + 2X_5^* + 3X_0^*} \frac{E_c^*}{2} \right). \quad (10)$$

При $\alpha = \psi_1 - \pi/6$ и $n^* > n_{\text{гp4}}^*$ локальный максимум «С» напряжения u_{V1}^* в момент времени $\psi_0 + \vartheta$ положителен (рис. 4, б). При $\psi_0 + \vartheta - \pi/6 \leq \alpha \leq \psi_1 - \pi/6$ существует зона нечувствительности по управлению, и УВП работает в режиме 3 как НВП с $\alpha = \psi_1 - \pi/6$. В граничном режиме $\lambda_1 = \psi_0 + \pi/3 - \psi_1$, поэтому для расчета $n_{\text{гp4}}^*$ при фиксированном α необходимо уравнение (8) решить относительно n^* , а ψ_1 и ψ_0 – по (3) и (9).

2.4. *Подрежим 3 прерывистых токов тиристоров.* При $n^* > n_{\text{гp4}}^*$ с углами управления в диапазоне $\psi_0 - \pi/6 \leq \alpha \leq \psi_0 - \pi/6 + \vartheta$ УВП работает в подрежиме 3 при $\lambda_1 < \pi/3$, который иллюстрируется диаграммами (рис. 5, а). Появляются два дополнительных непродолжительных интервала проводимости γ и λ_3 .

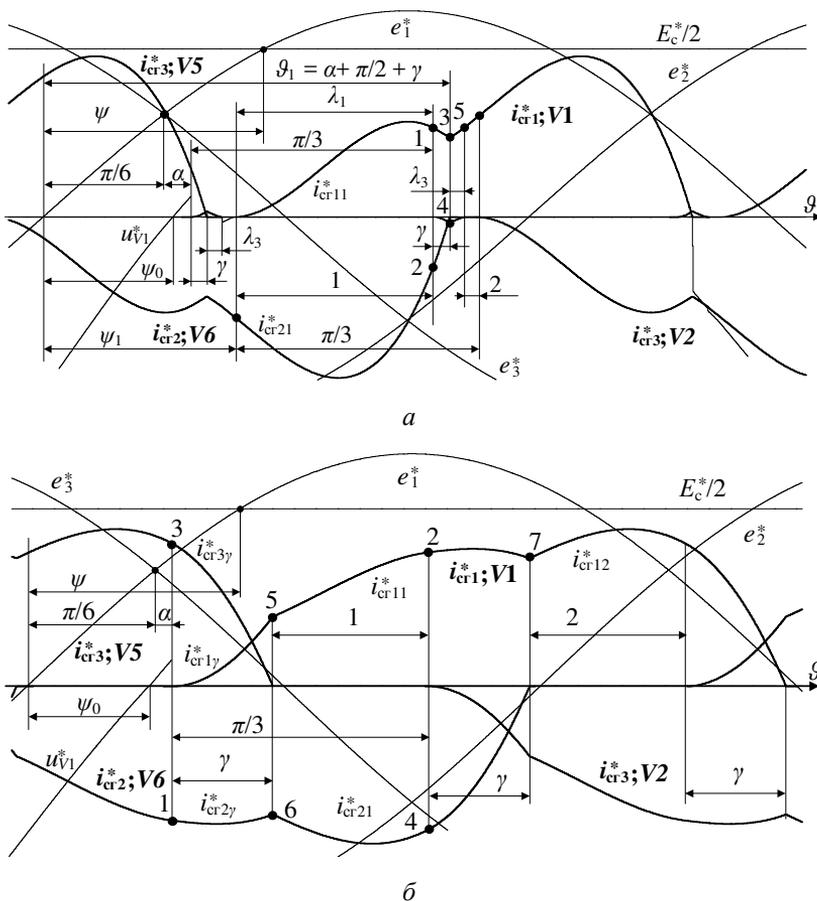


Рис. 5. Подрежим 3 (а); режим 4 (б)

Для интервала 1 справедлива система уравнений (3), (8) и решение системы (1) интервала 1 режима 3. Для интервалов γ и λ_3 , сохраняя индексацию токов фаз СГ, заменив $\psi_0 = \alpha + \pi/6$ в выражениях материалов [12], можно получить решение (1) $i_{cr1\gamma}^*(\vartheta) \dots i_{cr3\gamma}^*(\vartheta)$, учитывая, что $i_{cr1\gamma}^*(\alpha + \pi/2) = i_{cr11}^*(\alpha + \pi/2)$ (точка 1 диаграмм, (см. рис. 5, а), $i_{cr2\gamma}^*(\alpha + \pi/2) = i_{cr21}^*(\alpha + \pi/2)$ (точка 2 диаграмм, (см. рис. 5, а), $i_{cr3\gamma}^*(\alpha + \pi/2) = 0$.

Для интервала λ_3 решением системы (1) можно получить выражения $i_{cr1\lambda}^*(\vartheta)$ и $i_{cr3\lambda}^*(\vartheta)$, учитывая, что $i_{cr1\lambda}^*(\alpha + \pi/2 + \gamma) = i_{cr1\gamma}^*(\alpha + \pi/2 + \gamma)$ (точка 3 диаграмм рис. 5, а и $i_{cr3\lambda}^*(\alpha + \pi/2 + \gamma) = i_{cr3\gamma}^*(\alpha + \pi/2 + \gamma)$ (точка 4 диаграмм на рис. 5, а).

Для интервала 2 решением системы (1) можно получить $i_{cr12}^*(\vartheta)$ с учетом того, что $i_{cr12}^*(\alpha + \pi/2 + \gamma + \lambda_3) = i_{cr1\lambda}^*(\alpha + \pi/2 + \gamma + \lambda_3) \neq 0$ (точка 5 диаграмм на рис. 5, а).

Можно составить систему уравнений (10), как систему уравнений относительно γ и λ_3 , с помощью которой можно найти соответствующие длительности интервалов. При некоторой граничной частоте $n^* = n_{гр5}^*$ и $\psi_0 - \pi/6 \leq \alpha \leq \psi_1 - (\pi/2 - \lambda_1)$ или при $n^* > n_{гр4}^*$ и $\alpha = \alpha_{гр4}$ выполняется равенство $\psi_1 - (\alpha + \pi/6) = \gamma + \lambda_3$, а длительность интервала 2 равна 0.

$$\begin{cases} i_{cr2\gamma}^* \left(\alpha + \frac{\pi}{2} + \gamma \right) = f1(\gamma, \lambda_3) = 0, \\ i_{cr3\lambda}^* \left(\alpha + \frac{\pi}{2} + \gamma + \lambda_3 \right) = f2(\gamma, \lambda_3) = 0. \end{cases} \quad (11)$$

Если выражения токов в системе (10) рассматривать как функции n^* , α и γ , то эту систему можно преобразовать в систему (11) для расчета $n_{гр5}^*$ и $\alpha_{гр4}$:

$$\begin{cases} \psi_1 = f1(n^*) = \gamma + \lambda_3 + \alpha + \frac{\pi}{6}, \\ i_{cr2\gamma}^* \left(\alpha + \frac{\pi}{2} + \gamma \right) = f2(\alpha, n^*, \gamma) = 0, \\ i_{cr3\lambda}^* \left(\alpha + \frac{\pi}{2} + \gamma + \lambda_3 \right) = f3(\alpha, n^*, \gamma) = 0. \end{cases} \quad (12)$$

Если n^* больше некоторого значения, когда при $\alpha = \psi_1 - \pi/6$ $\lambda_1 = \pi/3$, то подрежима 3 не существует, а $n_{\text{гp5}}^*$ и $\alpha_{\text{гp4}}$ следует искать, используя (8), задав $\lambda_1 = \pi/3$ и решая уравнение (12).

$$i_{\text{cr21}}^* (\alpha + \pi/6 + \lambda_1) = f(n^*, \alpha) = 0. \quad (13)$$

2.4. Режим 4 непрерывных токов тиристоров с углом $\gamma \leq \pi/3$. Режим 4 (временные диаграммы приведены на рис. 5, б) возникает в УВП при $n^* > n_{\text{гp5}}^*$ или $\alpha < \alpha_{\text{гp4}}$. По характеру электромагнитных процессов он аналогичен режиму непрерывных токов тиристоров мостовой схемы трехфазного выпрямителя: имеются три интервала углов коммутации γ одновременной работы трех тиристоров и два интервала 1 и 2 одновременной работы двух тиристоров. Отличие обусловлено током i_0 дополнительной индуктивности L_0 , который приводит к появлению «несимметрии» токов тиристора на интервалах 1 и 2: амплитуда тока на интервале 1 меньше амплитуды тока на интервале 2.

В соответствии с материалами [12] и решением системы (1) для интервала γ при $\alpha + \pi/6 \leq \vartheta < \alpha + \pi/6 + \gamma$ можно получить $i_{\text{cr1}\gamma}^*(\vartheta) \dots i_{\text{cr3}\gamma}^*(\vartheta)$, учитывая, что $i_{\text{cr1}\gamma}^*(\alpha + \pi/6) = 0$, $i_{\text{cr2}\gamma}^*(\alpha + \pi/6) = -i_{\text{cr11}}^*(\alpha + \pi/2)$ (точки 1 и 2 на диаграммах, см. рис. 5, б), $i_{\text{cr3}\gamma}^*(\alpha + \pi/6) = -i_{\text{cr21}}^*(\alpha + \pi/2)$ (точки 3 и 4 на диаграммах, см. рис. 5, б).

Для интервала 1 длительностью $\pi/3 - \gamma$ при $\alpha + \pi/6 + \gamma \leq \vartheta < \alpha + \pi/2$ одновременного проводящего состояния двух ключей можно получить $i_{\text{cr11}}^*(\vartheta)$ и $i_{\text{cr21}}^*(\vartheta)$, учитывая что $i_{\text{cr11}}^*(\alpha + \pi/6 + \gamma) = i_{\text{cr1}\gamma}^*(\alpha + \pi/6 + \gamma)$ (точка 5 диаграмм, см. рис. 5, б), $i_{\text{cr21}}^*(\alpha + \pi/6 + \gamma) = -i_{\text{cr12}}^*(\alpha + \pi/2 + \gamma)$ (точки 6 и 7 диаграмм, см. рис. 5, б).

γ можно найти решением уравнения

$$i_{\text{cr3}\gamma}^* (\alpha + \pi/6 + \gamma) = 0. \quad (14)$$

В режиме 4 $\gamma \leq \pi/3$.

2.4. Режим 5 непрерывных токов тиристоров с постоянным углом $\gamma = \pi/3$. При $\alpha = \text{const} > \alpha_{\text{гp4}}$ и увеличении n^* растет и γ до величины $\pi/3$. Приняв $\gamma = \pi/3$, уравнение (13) можно использовать для расчета граничных значений $n_{\text{гp6}}^*$ или $\alpha_{\text{гp5}}$ существования режима 4. Режим 5 возникает при $n^* > n_{\text{гp6}}^*$ или $\alpha < \alpha_{\text{гp5}}$. УВП работает как НВП с вынужденным углом

$\psi_0 - \pi/3$ и $\gamma = \pi/3 = \text{const}$. Диаграммы на рис. 5, б и решение (13) справедливы для режима 5 при $\alpha = 0$. При решении системы (1) следует учитывать, что $i_{\text{cr}1\gamma}^*(\psi_0) = 0$, $i_{\text{cr}2\gamma}^*(\psi_0) = -i_{\text{cr}1\gamma}^*(\psi_0 + \gamma)$, $i_{\text{cr}3\gamma}^*(\psi_0) = -i_{\text{cr}2\gamma}^*(\psi_0 + \gamma)$.

Расчет ψ_0 осуществляется при $\gamma = \pi/3$ и состоит в решении уравнения

$$i_{\text{cr}3\gamma}^*(\psi_0 + \gamma) = 0. \quad (15)$$

2.5. *Диаграмма условий существования режимов работы системы «СГ-УВП» с дополнительной индуктивностью.* На рис. 6 приведен пример диаграммы условий существования выявленных режимов работы системы, представленной на рис. 1, полученной с использованием выражений (2), (3), (4), (6), (7), (9), (11), (13), (14) при $q = 1$ и $X_0^* = 2$. Трансцендентные уравнения и их системы решались средствами MathCAD и MatLab.

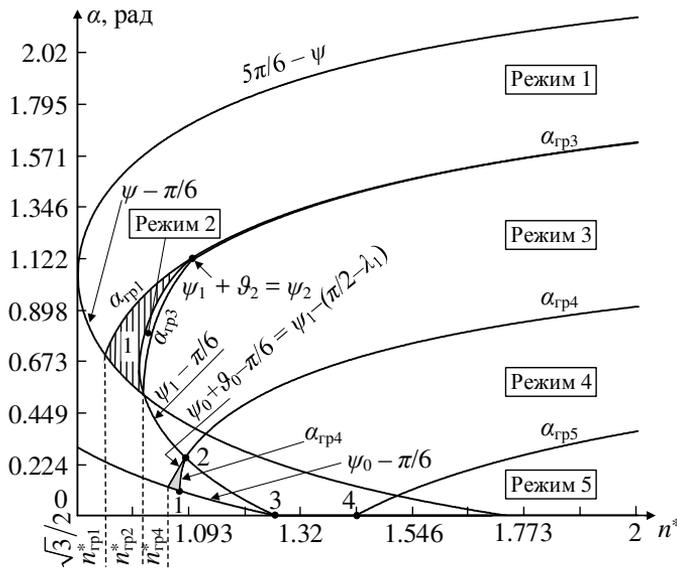


Рис. 6. Диаграммы условий существования режимов работы системы при $q = 1$, $X_0^* = 2$

Режим 1 существует в области значений n^* и α , описываемых кривыми $5\pi/6 - \psi$, $\alpha_{\text{гр}1} = f(n^*)$, $\alpha_{\text{гр}3} = f(n^*)$. Пунктирная линия $n^* = n_{\text{тр}1}^*$ соответствует $\lambda = \pi/3$ при $\alpha = \psi - \pi/6$.

Режим 2 существует в области значений n^* и α , ограниченной минимальными значениями углов $\alpha_{\text{гр}3} = f(n^*)$, в которой присутствует

зона 1 нечувствительности по управлению (заштрихована). Зависимости $\alpha_{гр1} = f(n^*)$ и $\alpha_{гр3} = f(n^*)$ сливаются в точке, когда $\psi_1 + \vartheta_2 = \psi_2$. При n^* более величины этой точки режим 2 в УВП отсутствует. Пунктирная линия при $n^* = n_{гр2}^*$ соответствует $\psi_1 + \vartheta_2 = \psi_2$ при $\alpha = \psi_2 - \pi/6$.

Режим 3 существует в области значений n^* и α , ограниченной кривыми $\alpha_{гр3} = f(n^*)$, $\psi_1 - \pi/6$ и $\alpha_{гр4} = f(n^*)$.

Небольшая затемненная область – зона существования подрежима 3. В точке 2 $\lambda_1 = \pi/3$ кривая $\psi_0 + \vartheta_0 - 5\pi/6$ сливается с $\alpha_{гр4} = f(n^*)$. Пунктирная линия при $n^* = n_{гр4}^*$ соответствует $\psi_0 + \vartheta_0 = \psi_1$ при $\alpha = \psi_1 - \pi/6$.

Режим 4 существует в области значений n^* и α , ограниченной кривыми $\alpha_{гр4} = f(n^*)$, $\psi_0 - 5\pi/6$ (между точками 1 и 3), $\alpha_{гр5} = f(n^*)$. На отрезке между точками 3 и 4 минимальный угол управления $\alpha = 0$.

Режим 5 существует при n^* выше значений точки 4 и ограничен кривой $\alpha_{гр5} = f(n^*)$.

Выводы. Анализ электромагнитных процессов в системе «трехфазный СГ – мостовой УВП» с дополнительным дросселем, соединяющим нейтраль генератора и среднюю точку двуполярного выходного напряжения выпрямителя при нулевой величине постоянной составляющей тока дросселя, позволил выявить шесть режимов работы, характеризующихся разными количеством и длительностью проводящего состояния тиристорov выпрямителя, граничными значениями частоты напряжения генератора и угла управления выпрямителем. Четыре режима работы являются доминирующими и существуют в широком диапазоне частот вращения вала СГ и углов управления выпрямителем: режим 1 прерывистых фазных токов генератора при длительности проводящего состояния тиристора менее $\pi/3$; режим 3 непрерывных токов тиристорov при наличии двух интервалов проводимости без угла коммутации; режим 4 непрерывных токов тиристорov с двумя интервалами проводимости при наличии угла коммутации менее $\pi/3$; режим 5 непрерывных токов тиристорov с двумя интервалами проводимости с постоянным углом коммутации, равным $\pi/3$. Два режима работы имеют место в узком диапазоне частот вращения вала генератора и углов управления выпрямителем: режим 2 непрерывных токов нейтрали генератора с двумя интервалами проводимости тиристора длительностью проводящего состояния, один из которых равен $\pi/3$, а другой – менее $\pi/3$; подрежим 3 прерывистых токов тиристорov с тремя

интервалами проводимости. Последние два режима работы имеют место при малых значениях частот напряжения генератора. В этих режимах присутствует зона нечувствительности по управлению.

Библиографический список

1. Галтеев Ф.Ф. Современные системы электроснабжения самолетов / науч. ред. проф. Н.Т. Коробан; Гос. ком. Совета Министров СССР по науке и технике; АН СССР; ВИНТИ. – М., 1977. – 95 с. (Итоги науки и техники. Электрооборудование транспорта. Т. 4).

2. Усачев А.П., Гордейчик А.В., Рохлин А.М. IGBT – инвертор для ветроэлектрической станции // Труды IV МНТК АПЭП-98. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – Т. 7. – С. 69–71.

3. Харитонов С.А., Коробков Д.В. Параллельная работа инвертора на IGBT модулях с промышленной сетью // Труды IV МНТК АПЭП-98. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – Т. 7. – С. 72–73.

4. Mechatronic system «semiconductor frequency converter – synchronous generator» in wind power installations with variable speed of the wind turbine shaft rotation / S.A. Kharitonov, G.S. Zinoviev, G.V. Grabovectsky, N.I. Borodin, E.B. Preobrazhensky, M.V. Martinovich, S.V. Brovanov, D.V. Korobkov, A.A. Stennikov, A.V. Popov // Proceeding of the 1 Russian – Korean international symposium on applied mechanics. RUSKO-AM-2001, Novosibirsk, 2001. – Novosibirsk, 2001. – P. 168–172.

5. Система генерирования электрической энергии «переменная скорость – постоянная частота» на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и инверторов напряжения / Н.И. Бородин, М.А. Маслов, А.В. Левин, Д.В. Коробков, М.М. Юхнин, С.А. Харитонов, Э.Я. Лившиц // Электротехника 2030. Перспективные технологии электроэнергетики: сб. тез. IX симпозиум.; Московская обл. 29–31 мая 2007. – М., 2007. – С. 301–302.

6. Система генерирования электрической энергии типа «переменная скорость – постоянная частота» на базе синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов и инверторов напряжения / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, М.А. Маслов, Н.И. Бородин, А.В., Левин, М.М. Юхнин, Э.Я. Лившиц // Электротехника. – 2008. – № 6. – С. 27–32.

7. Стенников А.А., Коробков Д.В., Харитонов С.А. Режим генерирования ветроэнергетической установки на базе инверторов напряжения // Десятая Междунар. конф.-сем. по микро/нанотехнологиям

и электронным приборам. EDM 2009: сб. тр. Новосиб. гос. ун-т; ЗСОК Эрлагол, Алтай, 1–6 июля, 2009. – Новосибирск, 2009. – С. 424–427.

8. Некоторые особенности конструктивного исполнения полупроводникового преобразователя частоты для авиационной системы генерирования / В.В. Машинский, Д.В. Коробков, С.А. Харитонов, М.М. Юхнин, Э.Я. Лившиц // *Технічна електродинаміка. Тематичний випуск. Силова електроніка та енергоефективність. Ч. 3.* – Київ, 2012. – С. 61–63.

9. Грабовецкий Г.В., Коробков Д.В., Харитонов С.А. Особенности работы инвертора напряжения в системе генерирования электрической энергии летательного аппарата // *Доклады АН ВШ РФ.* – 2012. – № 1(18). – С. 69–79.

10. Кульманов В.Г. Разработка и исследование микропроцессорной инверторной системы питания с генератором переменной частоты для воздушных судов: автореф... дис. канд. техн. наук. – М., 2017. – 20 с.

11. Система генерирования электрической энергии трехфазного переменного тока с инвертором напряжения: пат. № 2513113, МПК Н02J3/26. / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, В.В. Машинский, С.Н. Завертан, П.А. Бачурин, А.В. Гейст, Д.В. Макаров, С.В. Воробьева // *Изобретения.* – 2013. – Бюл. №36.

12. Коробков Д.В. Система «Трехфазный МЭГ – мостовой выпрямитель» с дополнительным дросселем в нейтрали: определение режимов работы и условий их существования // *Доклады АН ВШ РФ.* – 2019. – № 1(42). – С. 44–61. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-44-61.

13. Харитонов С.А. Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 536 с.

14. Li Jianlin, Hu Shuju, Xu Honghua. A kind of direct-driven WECS using single-switch three-phase Boost rectifier // 2008 IEEE International Conference on Industrial Technology; 21–24 April 2008. – Chengdu, China. – P. 1–6. DOI: 10.1109/ICIT.2008.4608557

15. Dewei Xu, Zhenhan Luo. A novel AC-DC converter for PMSG variable speed wind energy conversion systems // 2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference; 17–20 May 2009. – Wuhan, China. – P. 1117–1122. DOI: 10.1109/PEMC.2009.5157551

16. Venkata Yaramasu, Bin Wu. Three-level boost converter based medium voltage megawatt PMSG wind energy conversion systems // 2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition; 17–22 Sept. 2011. – Phoenix, AZ, USA. – P. 561–567. DOI: 10.1109/ECCE.2011.6063819

17. AmirHossein Rajaei, Mustafa Mohamadian, Ali Yazdian. A new high frequency grid interface system for PMSG-based wind turbine generators in low power applications // IECON 2012 – 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society; 25–28 Oct. 2012. – Montreal, QC, Canada. – P. 3510–3515. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389335

18. Abdeldjalil Dahbi, Nasreddine Nait-Said, Messaoud Hamouda, Fatima Zohra Arama. Analysis of different converters used in wind energy conversion system // 2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC); 17–19 Oct. 2014. – Ouarzazate, Morocco. – P. 8. DOI: 10.1109/IRSEC.2014.7059815

19. Solid-state transformer interfaced PMSG wind energy conversion system / Rui Gao, Iqbal Husain, Fei Wang, Alex Q. Huang // 2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC); 15–19 March 2015. – Charlotte, NC, USA. – P. 1310–1317. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104517

20. Hussien A., Taha M., Mahgoub Ossama A. Design and control of a quasi-Z-source inverter based for wind power generation using PMSG // 2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC); 10–13 June 2015. – Rome, Italy. – P. 6. DOI: 10.1109/EEEIC.2015.7165491

21. R. Jegatheeswaran, R. Rajesh. Variable speed wind energy conversion system using PMSG & z-source inverter // 2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS); 19–20 March 2015. – Coimbatore, India. – P. 7. DOI: 10.1109/ICIIECS.2015.7193004

22. Zinat Tasneem, Shafiul Hasan Rafi, M.R.I. Sheikh. Optimization of a direct-drive wind power generation system by using PMSG // 2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT); 21–23 May 2015. – Dhaka, Bangladesh. – P. 5. DOI: 10.1109/ICEEICT.2015.7307413

23. Yuzhi Zhang, Haoyan Liu, H. Alan Mantooth. Control strategy of high power converters with synchronous generator characteristics for PMSG-based wind power application // 2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC); 20–24 March 2016. – Long Beach, CA, USA. – P. 3180–3184. DOI: 10.1109/APEC.2016.7468319

24. Analysis of a PMSG and its power electronic converter in isolated operation / J. González, C. Hernández, E. Melgoza, C. Espinoza, J.L. Hernández, M.A. Arjona, F.J. Martínez // 2016 XXII International Conference

on Electrical Machines (ICEM); 4–7 Sept. 2016. – Lausanne, Switzerland. – P. 126–131. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732516

25. Elmorshedy M.F., Allam S.M., Rashad Essam M. Performance analysis and control of a stand-alone wind-driven PMSG including unbalanced conditions // 2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM); 4–7 Sept. 2016. – Lausanne, Switzerland. – P. 1145–1157. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732669

26. Md. Akmam Ul Haque, D. Datta, M. R. I. Sheikh. A comparative study on power converters for PMSG based wind turbine generation system // 2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE); 8–10 Dec. 2016. – Rajshahi, Bangladesh. – P. 4. DOI: 10.1109/ICECTE.2016.7879631

27. Julio Cesar Ferreira Soltoski, Carlos Henrique Illa Font. On the application of a three-phase two-switch DCM boost rectifier in small-scale wind energy conversion system // 2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG). – Florianopolis, Brazil. – P. 7. DOI: 10.1109/PEDG.2017.7972561

28. A Look at DC/DC boost converter topology and balancing of DC-voltage capacitors of 3-level NPC inverter in 7MW PMSG Hydraulic Energy Conversion Chain / Chirine Benzazah, Loubna Lazrak, Soukaina El Daoudi, Mustapha Ait Lafkih // 2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS). – P. 7. DOI: 10.1109/WITS.2019.8723809

References

1. Galteev F.F. Sovremennye sistemy elektrosnabzheniia samoletov [Modern aircraft power supply systems]. Ed. H.T. Копобан, Gos. kom. Soveta Ministrov SSSR po nauke i tekhnike, AN SSSR, VINITI. Moscow, 1977. 95 p. (Itogi nauki i tekhniki. Elektrooborudovanie transporta. Vol. 4).

2. Usachev A.P., Gordeichik A.V., Rokhlin A.M. IGBT - invertor dlia vetroelektricheskoi stantsii [IGBT - inverter for wind power station]. *Trudy IV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii APEP-98*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1998, vol. 7, pp. 69-71.

3. Kharitonov S.A., Korobkov D.V. Parallel'naia rabota invertora na IGBT moduliakh s promyshlennoi set'iu [Parallel operation of inverter on IGBT modules with industrial network]. *Trudy IV Mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii APEP-98*. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 1998, vol. 7, pp. 72-73.

4. Kharitonov S.A., Zinoviev G.S., Grabovectsky G.V., Borodin N.I., Preobrazhensky E.B., Martinovich M.V., Brovanov S.V., Korobkov D.V., Stennikov A.A., Popov A.V. Mechanotronic system “semiconductor frequency converter - synchronous generator” in wind power installations with variable speed of the wind turbine shaft rotation. *Proceeding of the 1 Russian - Korean international symposium on applied mechanics. RUSKO-AM-2001, Novosibirsk, 2001*. Novosibirsk, 2001, pp. 168-172.

5. Borodin N.I., Maslov M.A., Levin A.V., Korobkov D.V., Iukhnin M.M., Kharitonov S.A., Livshits E.Ia. Sistema generirovaniia elektricheskoi energii “peremennaia skorost' - postoiannaia chastota” na baze sinkhronnogo generatora s vozbuzhdeniem ot postoiannykh magnitov i inverterov napriazheniia [Electric energy generation system "variable speed - constant frequency" on the basis of synchronous generator with excitation from permanent magnets and voltage inverters]. *Elektrotehnika 2030. Perspektivnye tekhnologii elektroenergetiki. Sbornik tezisov IX Simpoziuma Moskovskaia oblast'. 29-31 May 2007*, pp. 301-302.

6. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Maslov M.A., Borodin N.I., Levin A.V., Iukhnin M.M., Livshits E.Ia. Sistema generirovaniia elektricheskoi energii tipa «peremennaia skorost' – postoiannaia chastota» na baze sinkhronnogo generatora s vozbuzhdeniem ot postoiannykh magnitov i inverterov napriazheniia [Electric energy generation system "variable speed - constant frequency" type on the basis of synchronous generator with excitation from permanent magnets and voltage inverters]. *Elektrotehnika*, 2008, no. 6, pp. 27-32.

7. Stennikov A.A., Korobkov D.V., Kharitonov S.A. Rezhim generirovaniia vetroenergeticheskoi ustanovki na baze inverterov napriazheniia [Wind power generation mode based on voltage inverters]. *X Mezhdunarodnaia konferentsiia-seminar po mikro/nanotekhnologiiam i elektronnyim priboram. EDM 2009. Sbornik trudov Novosibirskogo gosudarstvennogo universiteta, ZSOK Erlagol, Altai, 1-6 July 2009*. Novosibirsk, 2009, pp. 424-427.

8. Mashinskii V.V., Korobkov D.V., Kharitonov S.A., Iukhnin M.M., Livshits E.Ia. Nekotorye osobennosti konstruktivnogo ispolneniia poluprovodnikovogo preobrazovatelia chastoty dlia aviatsionnoi sistemy generirovaniia [Some features of the semiconductor frequency converter design for an aircraft generation system]. *Tekhnichna elektrodinamika. Tematichnii vipusk. Silova elektronika ta energoefektivnist'. Part 3*. Kiiv, 2012, pp. 61-63.

9. Grabovetskii G.V., Korobkov D.V., Kharitonov S.A. Osobennosti raboty invertora napriazheniia v sisteme generirovaniia elektricheskoi energii letatel'nogo apparata [Features of voltage inverter operation in aircraft electric power generation system]. *Doklady AN VSh RF*, 2012, no. 1(18), pp. 69-79.

10. Kul'manov V.G. Razrabotka i issledovanie mikroprotsessornoi invertornoi sistemy pitaniia s generatorom peremnoi chastoty dlia vozdushnykh sudov [Development and investigation of microprocessor inverter power supply system with variable frequency generator for aircraft]. Abstract Ph.D. thesis. Moscow, 2017. 20 p.

11. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Mashinskii V.V., Zavertan S.N., Bachurin P.A., Geist A.V., Makarov D.V., Vorob'eva S.V. Sistema generirovaniia elektricheskoi energii trekhfaznogo peremennogo toka s invertorom napriazheniia [Three-phase AC power generation system with voltage inverter]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2513113 (2013).

12. Korobkov D.V. Sistema «Trehfaznyi MEG - mostovoi vypriamitel'» s dopolnitel'nym drosselem v neutrali: opredelenie rezhimov raboty i uslovii ikh sushchestvovaniia [The «three phase pmsg - full bridge rectifier» system with additional reactor in neutral: identification of operating modes and conditions of their existence]. *Doklady AN VSh RF*, 2019, no. 1(42), pp. 44-61. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-44-61.

13. Kharitonov S.A. Elektromagnitnye protsessy v sistemakh generirovaniia elektricheskoi energii dlia avtonomnykh ob"ektov [Electromagnetic processes in electric power generation systems for autonomous objects: monograph]. Novosibirsk: Novosibirskii gosudarstvennyi tekhnicheskii universitet, 2011. 536 p.

14. Li Jianlin, Hu Shuju, Xu Honghua. A kind of direct-driven WECS using single-switch three-phase Boost rectifier. *2008 IEEE International Conference on Industrial Technology*, 21-24 April 2008. Chengdu, China, pp. 1-6. DOI: 10.1109/ICIT.2008.4608557

15. Dewei Xu, Zhenhan Luo. A novel AC-DC converter for PMSG variable speed wind energy conversion systems. *2009 IEEE 6th International Power Electronics and Motion Control Conference*, 17-20 May 2009. Wuhan, China, pp. 1117-1122. DOI: 10.1109/IPEMC.2009.5157551

16. Venkata Yaramasu, Bin Wu. Three-level boost converter based medium voltage megawatt PMSG wind energy conversion systems. *2011 IEEE Energy Conversion Congress and Exposition*, 17-22 September 2011. Phoenix, AZ, USA, pp. 561-567. DOI: 10.1109/ECCE.2011.6063819

17. AmirHossein Rajaei, Mustafa Mohamadian, Ali Yazdian. A new high frequency grid interface system for PMSG-based wind turbine generators in low power applications. *IECON 2012 - 38th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 25-28 October 2012. Montreal, QC, Canada, pp. 3510-3515. DOI: 10.1109/IECON.2012.6389335
18. Abdeldjalil Dahbi, Nasreddine Nait-Said, Messaoud Hamouda, Fatima Zohra Arama. Analysis of different converters used in wind energy conversion system. *2014 International Renewable and Sustainable Energy Conference (IRSEC)*, 17-19 October 2014. Ouarzazate, Morocco, P. 8. DOI: 10.1109/IRSEC.2014.7059815
19. Rui Gao, Iqbal Husain, Fei Wang, Alex Q. Huang. Solid-state transformer interfaced PMSG wind energy conversion system. *2015 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 15-19 March 2015. Charlotte, NC, USA, pp. 1310-1317. DOI: 10.1109/APEC.2015.7104517
20. Hussien A., Taha M., Mahgoub Ossama A. Design and control of a quasi-Z-source inverter based for wind power generation using PMSG. *2015 IEEE 15th International Conference on Environment and Electrical Engineering (EEEIC)*, 10-13 June 2015. Rome, Italy. P. 6. DOI: 10.1109/EEEIC.2015.7165491
21. R. Jegatheeswaran, R. Rajesh. Variable speed wind energy conversion system using PMSG & z-source inverter. *2015 International Conference on Innovations in Information, Embedded and Communication Systems (ICIIECS)*, 19-20 March 2015. Coimbatore, India. P. 7. DOI: 10.1109/ICIIECS.2015.7193004
22. Zinat Tasneem, Shafiul Hasan Rafi, M.R.I. Sheikh. Optimization of a direct-drive wind power generation system by using PMSG. *2015 International Conference on Electrical Engineering and Information Communication Technology (ICEEICT)*, 21-23 May 2015. Dhaka, Bangladesh. P. 5. DOI: 10.1109/ICEEICT.2015.7307413
23. Yuzhi Zhang, Haoyan Liu, H. Alan Mantooh. Control strategy of high power converters with synchronous generator characteristics for PMSG-based wind power application. *2016 IEEE Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC)*, 20-24 March 2016. Long Beach, CA, USA, P. 3180-3184. DOI: 10.1109/APEC.2016.7468319
24. González J., Hernández C., Melgoza E., Espinoza C., Hernández J.L., Arjona M.A., Martínez F.J. Analysis of a PMSG and its power electronic converter in isolated operation. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 4-7 September 2016. Lausanne, Switzerland, pp. 126-131. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732516

25. Elmorshedy M.F., Allam S.M., Rashad Essam M. Performance analysis and control of a stand-alone wind-driven PMSG including unbalanced conditions. *2016 XXII International Conference on Electrical Machines (ICEM)*, 4-7 September 2016. Lausanne, Switzerland, pp. 1145-1157. DOI: 10.1109/ICELMACH.2016.7732669

26. Md. Akmam Ul Haque, D. Datta, M. R. I. Sheikh. A comparative study on power converters for PMSG based wind turbine generation system. *2016 2nd International Conference on Electrical, Computer & Telecommunication Engineering (ICECTE)*, 8-10 December 2016. Rajshahi, Bangladesh. P. 4. DOI: 10.1109/ICECTE.2016.7879631

27. Julio Cesar Ferreira Soltoski, Carlos Henrique Illa Font. On the application of a three-phase two-switch DCM boost rectifier in small-scale wind energy conversion system. *2017 IEEE 8th International Symposium on Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*. Florianopolis, Brazil. P. 7. DOI: 10.1109/PEDG.2017.7972561

28. Chirine Benzazah, Loubna Lazrak, Soukaina El Daoudi, Mustapha Ait Lafkih. A Look at DC/DC boost converter topology and balancing of DC-voltage capacitors of 3-level NPC inverter in 7MW PMSG Hydraulic Energy Conversion Chain. *2019 International Conference on Wireless Technologies, Embedded and Intelligent Systems (WITS)*. P. 7. DOI: 10.1109/WITS.2019.8723809

Сведения об авторе

Коробков Дмитрий Владиславович (Новосибирск, Россия) – старший преподаватель кафедры «Электроника и электротехника» Новосибирского государственного технического университета, ведущий инженер-конструктор Института силовой электроники Новосибирского государственного технического университета, м.н.с. (630073, Новосибирск, пр. К. Маркса, 20, e-mail: korobkov@corp.nstu.ru).

About the author

Korobkov Dmitry Vladislavovich (Novosibirsk, Russian Federation) is a Senior Lecturer of NSTU electronics and electrical engineering department, lead engineer IPE NSTU, j.r.s. (630073, Novosibirsk, 20, K. Marks pr., e-mail: korobkov@corp.nstu.ru).

Получено 30.10.2019