

УДК 621.314.58

**СИСТЕМА «ТРЕХФАЗНЫЙ МЭГ – МОСТОВОЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ»
С ДОПОЛНИТЕЛЬНЫМ ДРОССЕЛЕМ В НЕЙТРАЛИ: ОПРЕДЕЛЕНИЕ
РЕЖИМОВ РАБОТЫ И УСЛОВИЙ ИХ СУЩЕСТВОВАНИЯ****Д.В. Коробков***Новосибирский государственный технический университет*

Одна из задач достижения требуемых показателей качества энергии при проектировании систем генерирования электрической энергии (СГЭЭ), выполненных по структурной схеме «синхронный генератор (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов – управляемый вентильный преобразователь (ВП) – автономный транзисторный инвертор напряжения (ИН)» заключается в обеспечении малого, близкого к нулю, уровня постоянной составляющей переменного напряжения нагрузки. Вариантом решения этой задачи может быть подключение дополнительного дросселя к нейтрали СГ и средней точки звена постоянного тока ИН, которая в таких СГЭЭ соединена с нейтралью нагрузки. Анализ электромагнитных процессов в системе с трехфазным СГ осуществлен с использованием LE схемы замещения фазы СГ (КПД системы высок, в формировании электромагнитных процессов доминируют реактивные элементы) со взаимными индуктивностями фаз СГ при постоянстве потокоцепления на такте преобразования энергии. Анализ системы, когда ключи ВП – диоды, выявил семь режимов работы системы, отличных от систем с нулевыми и мостовыми ВП без дросселя: прерывистых токов фаз СГ, ключей ВП и дросселя; непрерывных токов дросселя с длительностью тока фаз СГ $\pi/3$; прерывистых токов ключей ВП с интервалами длительностью первого менее $\pi/3$, второго – равным $\pi/3$; непрерывных токов ключей ВП с интервалами длительностью первого менее $\pi/3$, второго – равным $\pi/3$; одновременной работы трех ключей с выключением после угла коммутации γ вступающего в работу ключа; непрерывных токов ключей с γ меньше $\pi/3$, характер тока которых обусловлен наличием контура, образованным дросселем; режим, аналогичный предыдущему, но с γ , равным $\pi/3$. Для всех режимов работы получены выражения граничной частоты вращения вала СГ, до которой существует режим, вынужденных углов включения, длительностей протекания токов. Описанный результат – основа анализа системы с тиристорами и СГЭЭ с НПЧсЕК.

Ключевые слова: эквивалентная схема замещения синхронного генератора с возбуждением от постоянных магнитов, электромагнитные процессы в системе с вентильным преобразователем.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-44-61

Введение

Системы генерирования электрической энергии (СГЭЭ) типа «переменная скорость – постоянная частота» с применением в качестве первичного источника электрической энергии синхронного генератора (СГ) с возбуждением от постоянных магнитов (магнитоэлектрического генератора – МЭГ), а в качестве стабилизатора параметров энергии нагрузки – автономного транзисторного инвертора напряжения (ИН) с цифровой системой управления характеризуются достоинствами, обусловленными свойствами указанных электротехнических устройств: высокая надежность, высокое качество генерируемой электрической энергии и малые эксплуатационные затраты [1, 2]. При проектировании подобных систем со звеном постоянного тока среди прочих требований необходимо обеспечить малый, близкий к нулю, уровень постоянной составляющей переменного напряже-

ния нагрузки [3, 4]. Одним из способов решения этой задачи может быть структурная модификация силовой схемы путем введения дополнительного дросселя между нейтралью СГ и нагрузки [5]. Вариант схемы вентильного преобразователя (ВП) звена постоянного тока с использованием тиристоров показан на рис. 1.

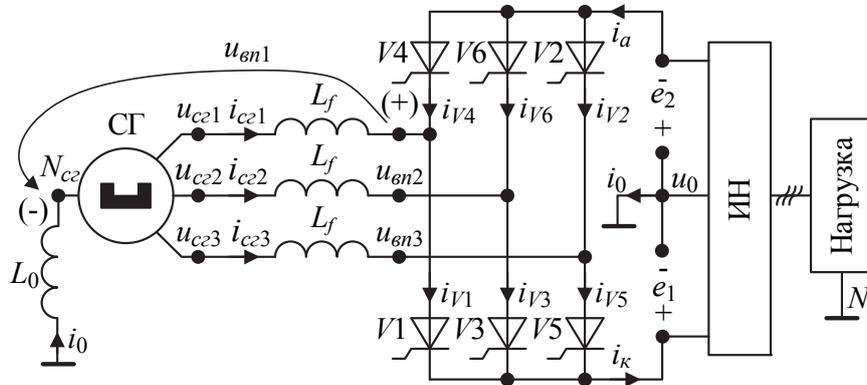


Рис. 1 – Вариант схемы вентильного преобразователя звена постоянного тока с использованием тиристоров

Fig. 1 – Variant of DC bus converter circuit using thyristors

Выходное фазное напряжение $u_{cn1...cn3}$ СГ поступает через индуктивности L_f фидера генератора на трехфазную мостовую схему, образованную ключами $V1...V6$, которая формирует два питающих напряжения e_1 и e_2 , соединенных общей точкой через дроссель L_0 с нейтралью N_{cg} СГ. В указанных СГЭЭ e_1 и e_2 питают ИН, а общая точка e_1 и e_2 соединяется и с нейтралью N 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 .

Исследование характеристик СГЭЭ с ВП по рис. 1 в литературе отсутствует.

1. Постановка задачи

В соответствии с известными методиками [6, 7] исследования схем с вентильными преобразователями необходимо определить режимы работы ВП, которые обусловлены неполной управляемостью ключей и наличием во входной цепи ВП индуктивностей. Режимы работы ВП и условия их существования необходимо определять при вариации оборотов вала СГ (частоты фазного напряжения СГ). Причем на первом этапе осуществляется анализ электромагнитных процессов в схеме с диодами ($V1...V6$ -диоды). Высокое значение КПД ВП рис. 1 делает доминирующим влияние реактивных элементов в формировании электромагнитных процессов. Полученные результаты используются при анализе характеристик схемы с тиристорами, включая определение расчетного значения КПД, а также могут быть применены для СГЭЭ с НПЧсЕК [7–11].

В соответствии с математической моделью генератора, его эквивалентной схемой и принятым в [7] базисом, наличием контура протекания тока i_0 через L_0 можно записать систему уравнений (1) в относительных единицах (верхний

индекс «*» указывает, что переменные уравнений записаны в относительных единицах).

Входные напряжения выпрямителя $u_{вп1} \dots u_{вп3}$ измеряются относительно $N_{сг}$, как показано на рис.1 на примере $u_{вп1}$.

$$\begin{cases} e - n^* X \frac{d}{d\vartheta} i_{сг}^* = u_{вп}^*, \\ i_{сг1}^* + i_{сг2}^* + i_{сг3}^* = i_0^*, \\ n^* X_0 \frac{di_0^*}{d\vartheta} = u_0^*, \\ u_{вп1}^* + u_{вп2}^* + u_{вп3}^* = 0, \end{cases} \quad (1)$$

где

$$e = \begin{bmatrix} e_1^* \\ e_2^* \\ e_3^* \end{bmatrix}; \quad i_{сг}^* = \begin{bmatrix} i_{сг1}^* \\ i_{сг2}^* \\ i_{сг3}^* \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} i_{V1}^* - i_{V4}^* \\ i_{V3}^* - i_{V6}^* \\ i_{V5}^* - i_{V2}^* \end{bmatrix}; \quad u_{вп}^* = \begin{bmatrix} u_{вп1}^* \\ u_{вп2}^* \\ u_{вп3}^* \end{bmatrix} = e - n^* X \frac{d}{d\vartheta} i_{сг}^*;$$

$$X = \begin{bmatrix} X_{11}^* & X_S^* & X_S^* \\ X_S^* & X_{22}^* & X_S^* \\ X_S^* & X_S^* & X_{33}^* \end{bmatrix}; \quad e_j^* = n^* \sin \left[\vartheta - \frac{2\pi}{3}(j-1) \right], \quad j=1 \dots 3,$$

$$X_S^* = \frac{1}{1+q} \cos \left(\frac{2\pi}{3} \right); \quad X_{jj}^* = X_j^* + X_f^* = 1; \quad X_j^* = \frac{1}{1+q}; \quad X_f^* = \frac{q}{1+q}.$$

Системе уравнений (1) соответствует эквивалентная схема замещения, приведенная на рис. 2.

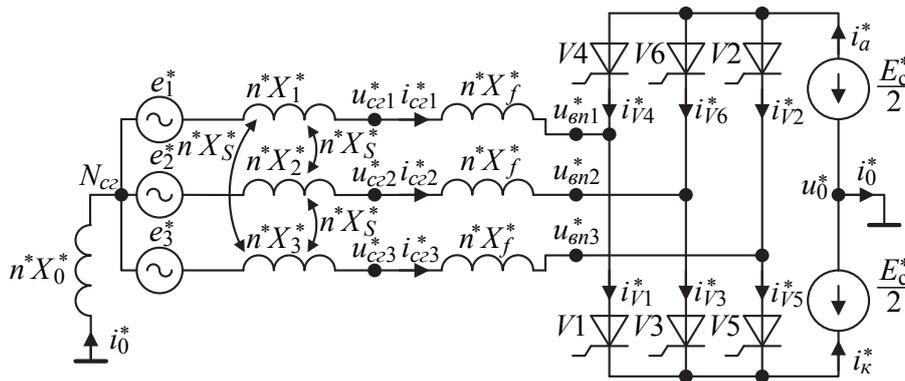


Рис. 2 – Эквивалентная схема замещения

Fig. 2 – Equivalent Substitution Scheme

Решение систем уравнений (1) относительно $i_{сгj}^*$ и анализ длительности протекания токов позволяют выявить искомые режимы работы ВП.

2. Режим 1

Режим 1 прерывистых токов фаз генератора i_{crj}^* , i_0^* индуктивности nX_0^* характеризуется длительностью протекания токов $\lambda \leq \pi/3$. Наличие i_0^* создает условия независимой работы ключей анодной и катодной групп в этом режиме.

Диаграммы режима 1, приведенные на рис. 3, поясняют электромагнитные процессы при включении $V1$ (протекает ток i_{cr1}^*). С момента времени ψ вынужденного включения $V1$ ($e_1^* > E_c^*/2$), который определен относительно перехода через нуль фазной ЭДС e_1^* , ток протекает по контуру $e_1^* - nX_1^* - nX_f^* - V1 - E_c^*/2 - nX_0^* - N_{cr}$.

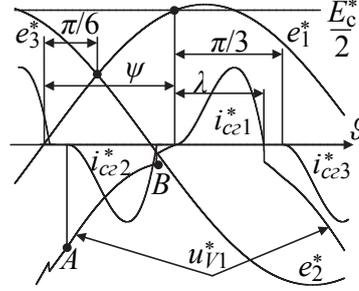


Рис. 3 – Диаграммы режима 1
Fig. 3 – Mode 1 Diagrams

Решением системы уравнений (1) для i_{cr1}^* при $i_{cr1}^*(\psi) = 0$ и смещении начала отсчета в ψ будет выражение

$$i_{cr1}^* = \frac{1}{n^*} \frac{1}{X_{11}^* + X_0^*} \left[-n^* \cos(\vartheta + \psi) + n^* \cos(\psi) - \frac{E_c^*}{2} \vartheta \right]. \quad (2)$$

Учитывая, что $e_1^*(\psi) = E_c^*/2$ в режиме 1:

$$\psi = \arcsin \left(\frac{1}{n^*} \frac{E_c^*}{2} \right). \quad (3)$$

На участке $A-B$ (рис. 3) кривая напряжения u_{V1}^* анод-катод $V1$ (рис. 2)

$$u_{V1}^* = e_1^* - \frac{E_c^*}{2} - n^* (X_S^* + X_0^*) \frac{di_{cr2}^*}{d\vartheta}. \quad (4)$$

Если учесть опережение i_{cr2}^* на $\pi/3$ относительно i_{cr1}^* и его инверсию, воспользоваться (2) для $di_{cr2}^*/d\vartheta$ и выражением (4), то можно получить для u_{V1}^* на участке $A-B$:

$$u_{V1}^* = n^* \sin(\vartheta) - \frac{E_c^*}{2} + \frac{X^* + X_0^*}{X_{11}^* + X_0^*} \left[n^* \sin \left(\vartheta + \frac{\pi}{3} \right) - \frac{E_c^*}{2} \right]. \quad (5)$$

При $\vartheta = \lambda$ $i_{cr1}^* = 0$, поэтому с учетом (3) λ можно рассчитать по выражению

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

Используя (2) и (3) при $\lambda = \pi/3$ по выражению

$$-n_{\text{гp1}}^* \cos \left[\frac{\pi}{3} + \arcsin \left(\frac{\sqrt{3}}{2n_{\text{гp1}}^*} \right) \right] + n_{\text{гp1}}^* \cos \left[\arcsin \left(\frac{1}{n_{\text{гp1}}^*} \frac{\sqrt{3}}{2} \right) \right] - \frac{\sqrt{3}}{2} \frac{\pi}{3} = 0, \quad (7)$$

можно получить граничную частоту существования режима 1 $n_{\text{гp1}}^* = 0,9211244$.

3. Подрезим 1

Подрезим 1 (рис. 4) возникает при $n^* > n_{\text{гp1}}^*$ и характеризуется непрерывным током i_0^* при длительности протекания тока фазы генератора $\lambda = \pi/3$. Из диаграмм протекания тока $i_{\text{сг1}}^*$ в фазе 1 СГ при включения $V1$, представленных на рис. 4, видно что угол вынужденного включения $\psi_2 > \psi$. Индекс «2» при ψ_2 принят с учетом анализа режимов работы схемы, описание которых приведено в следующих разделах.

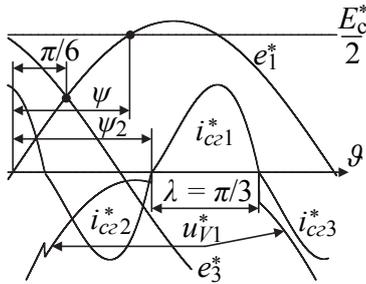


Рис. 4 – Диаграммы режима 1 при $n^* > n_{\text{гp1}}^*$

Fig. 4 – Submode 1 Charts, $n^* > n_{\text{гp1}}^*$

Рассчитать ψ_2 для подрезима 1 можно, используя выражение (6) при $\lambda = \pi/3$:

$$\psi_2 = -\arcsin \left(\frac{1}{n^*} \frac{E_c^* \pi}{2} \frac{\pi}{3} \right) - \frac{\pi}{6} + \pi. \quad (8)$$

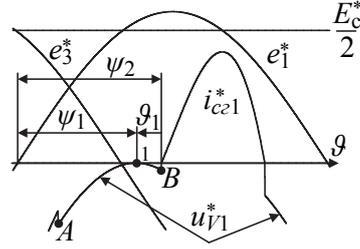
Выражения для режима 1 справедливы и для подрезима 1 при учете, что $\lambda = \pi/3 = \text{const}$, а ψ необходимо заменить на ψ_2 .

На рис. 5 приведены диаграммы подрезима 1 при $n^* = n_{\text{гp2}}^*$, когда в точке 1 кривая напряжения u_{V1}^* анод-катод $V1$ касается оси абсцисс: $u_{V1}^* = 0$ в точке 1.

Если начало отсчета для тока $i_{\text{сг1}}^*$ расположить в ψ_2 ($i_{\text{сг1}}^*(0) = 0$), то, используя (5), можно получить:

$$\frac{du_{V1}^*}{d\vartheta} = n^* \cos(\vartheta + \psi_2) + \frac{X_S^* + X_0^*}{X_{11}^* + X_0^*} n^* \cos \left(\vartheta + \psi_2 + \frac{\pi}{3} \right). \quad (9)$$

При $n^* = n_{\text{гp2}}^*$ в точке 1 $u_{V1}^* = 0$ и $du_{V1}^*/d\vartheta = 0$, а с учетом выражения (8) для поиска $n_{\text{гp2}}^*$ необходимо решить систему уравнений (10).

Рис. 5 – Диаграммы режима 1 при $n^* = n_{гр2}^*$ Fig. 5 – Submode 1 Charts, $n^* = n_{гр2}^*$ 

Момент времени $\vartheta_1 < 0$, так как начало отсчета для i_{cr1}^* принято в ψ_2 . С учетом рис. 5 и знака ϑ_1 : $\psi_1 = \psi_2 + \vartheta_1$.

$$\begin{cases} \psi_2 = -\arcsin\left(\frac{1}{n_{гр2}^*} \frac{E_c^* \pi}{2 \cdot 3}\right) - \frac{\pi}{6} + \pi, \\ \cos(\vartheta_1 + \psi_2) + \frac{X_S^* + X_0^*}{X_{11}^* + X_0^*} \cos\left(\vartheta_1 + \psi_2 + \frac{\pi}{3}\right) = 0, \\ n_{гр2}^* \sin(\vartheta_1 + \psi_2) - \frac{E_c^*}{2} + \frac{X_S^* + X_0^*}{X_{11}^* + X_0^*} \left[n_{гр2}^* \sin\left(\vartheta_1 + \psi_2 + \frac{\pi}{3}\right) - \frac{E_c^*}{2} \right] = 0, \end{cases} \quad (10)$$

$n_{гр2}^*$ зависит от X_S^* и X_0^* . Для примера: при $q=1$, $X_S^* = 1/(1+q)\cos(2\pi/3)$ и $X_0^* = 2 n_{гр2}^* = 0,98865$.

4. Режим 2

Режим 2 возникает при $n^* > n_{гр2}^*$, когда $u_{V1}^* > 0$ на участке $A - B$, и соответственно создаются условия включения $V1$. На рис. 6 представлены детализированные диаграммы режима 2 для токов i_{cr1}^* в фазе 1 СГ при включения $V1$, i_{cr2}^* в фазе 2 СГ при включения $V6$ и i_{cr3}^* в фазе 3 СГ при включения $V2$.

Режим 2 характеризуется прерывистым током ключей длительностями протекания $\lambda_1 < \pi/3$ (интервал I) и $\lambda_2 = \pi/3$ (интервал II). На интервале I ток проводят два ключа: по одному из анодной и катодной групп, как в мостовой схеме. На интервале I присутствует нулевая токовая пауза.

Можно выделить 4 характерных временных участка.

Интервал 1 при $\psi_1 \leq \vartheta \leq \psi_1 + \lambda_1$ длительностью λ_1 одновременного проводящего состояния $V1$ (протекает ток i_{cr1}^*) и $V6$ (протекает ток i_{cr2}^*). Введем дополнительный индекс «1» в обозначении токов на интервале 1: i_{cr11}^* , i_{cr21}^* и i_{01}^* – токи фаз 1 и 2 СГ, элемента $n^* X_0^*$ соответственно. $i_{V1}^* = i_{cr11}^*$, $i_{V6}^* = i_{cr21}^*$.

Поскольку до ψ_1 электромагнитные процессы в схеме аналогичны процессам в подрежиме 1 на участке $A - B$, то ψ_1 можно определить по условию $u_{V1}^*(\psi_1) = 0$, что в соответствии с (5) записывается так:

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

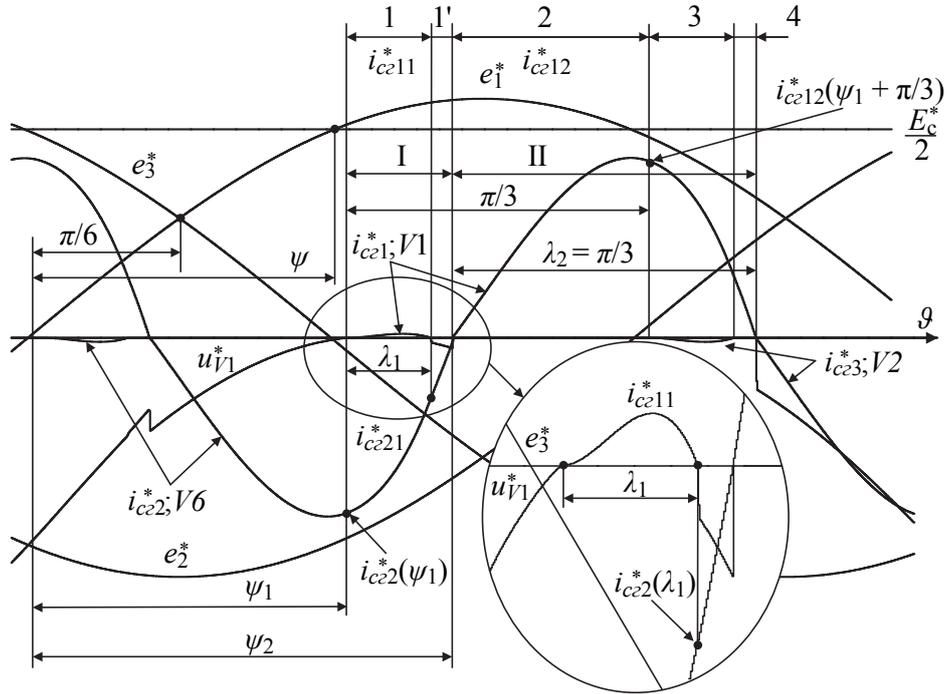


Рис. 6 – Диаграммы режима 2

Fig. 6 – Mode 2 Diagrams

С учетом (1), проведя соответствующие преобразования относительно производных токов генератора и проинтегрировав полученные выражения, можно записать систему уравнений (12), в которой I_{11} и I_{12} – постоянные интегрирования, которые можно найти из условий $i_{cr11}^*(\psi_1) = 0$, $i_{cr21}^*(\psi_1) = -i_{cr12}^*(\psi_1 + \pi/3)$. Выражение для i_{cr12}^* получено далее, при анализе электромагнитных процессов на соответствующем интервале.

$$\left\{ \begin{aligned} i_{cr11}^* &= -\frac{X + X_S^* + X_0^*}{X[X + 2(X_S^* + X_0^*)]} \cos(\vartheta) + \frac{X_S^* + X_0^*}{X[X + 2(X_S^* + X_0^*)]} \times \\ &\times \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{n^*} \frac{1}{X} \frac{E_c^*}{2} \vartheta + I_{11}, \\ i_{cr21}^* &= -\frac{1}{X + X_S^* + X_0^*} \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{n^*} \frac{1}{X + X_S^* + X_0^*} \frac{E_c^*}{2} \vartheta - \\ &- \frac{X_S^* + X_0^*}{X + X_S^* + X_0^*} i_{cr11}^* + I_{21}, \end{aligned} \right. \quad (12)$$

где $X = X_{jj}^* - X_S^*$.

Длительность λ_1 можно найти из условия $i_{cr11}^*(\psi_1 + \lambda_1) = 0$.

Интервал 1' при $\psi_1 + \lambda_1 \leq \vartheta \leq \psi_2$ проводящего состояния только одного $V6$ (протекает ток i_{cr2}^*). При этом $i_{cr1}^* = i_{V1}^* = 0$ до ψ_2 .

i_{cr2}^* на интервале 1' определяется выражением (6) при учете инверсии, сдвига в опережение на $\pi/3$ и условия, что $i_{cr21}^*(\psi_2) = 0$. Соответственно можно получить выражение (13).

$$i_{cr21}^*(\vartheta) = \frac{1}{n^*} \frac{1}{X_{22}^* + X_0^*} \left[n^* \cos\left(\vartheta + \frac{\pi}{3}\right) - n^* \cos\left(\psi_2 + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{E_c^*}{2}(\vartheta - \psi_2) \right]. \quad (13)$$

Интервал 2 при $\psi_2 \leq \vartheta \leq \psi_1 + \pi/3$ проводящего состояния только одного $V1$ (протекает ток i_{cr1}^*). Обозначим i_{cr1}^* на интервале 2 как i_{cr12}^* .

Для i_{cr12}^* справедливо выражение (6) при замене $\psi = \psi_2$ и учете $i_{cr12}^*(\psi_2) = 0$:

$$i_{cr12}^* = \frac{1}{n^*} \frac{1}{X_{11}^* + X_0^*} \left[-n^* \cos(\vartheta) + n^* \cos\psi_2 - \frac{E_c^*}{2}(\vartheta - \psi_2) \right], \quad (14)$$

ψ_2 , присутствующий в полученных выше выражениях, можно определить решая уравнение $i_{cr21}^*(\psi_1 + \lambda_1) = i_{cr21}^*(\psi_1 + \lambda_1)$ относительно ψ_2 . Сопоставление зависимости ψ_2 от n^* , найденной по указанному уравнению и выражению (8), показало совпадение результатов вычисления ψ_2 двумя способами. Поэтому удобнее для вычисления ψ_2 в режиме 2 использовать выражение (8).

Через $\pi/3$ от ψ_1 (начала интервала 1) на интервалах 3 и 4 повторяются электромагнитные процессы, аналогичные интервалам 1 и 1', но с $V1$ (протекает ток i_{cr1}^*) и $V2$ (протекает ток i_{cr3}^*).

5. Режим 3

Режим 3 возникает при $n^* > n_{гр3}^*$ и характеризуется непрерывным током ключей с двумя интервалами: длительностью протекания $\lambda_1 < \pi/3$ и $\lambda_2 = \pi/3$ (интервалы I и II рис. 7). При этом на интервале I существуют токи двух ключей: по одному из анодной и катодной групп, как в мостовой схеме.

На рис. 7 представлены детализированные диаграммы режима 3 для токов i_{cr1}^* в фазе 1 СГ при включения $V1$, i_{cr2}^* в фазе 2 СГ при включения $V6$ и i_{cr3}^* в фазе 3 СГ при включения $V2$.

Если сравнить диаграммы режима 2 и 3, то видно, что они схожи, но в режиме 3 отсутствует интервал 1', поэтому полученные для режима 2 выражения для токов можно использовать и в режиме 3.

Учитывая (8), (11) и условия $i_{cr11}^*(\psi_1 + \lambda_1) = 0$, $i_{V1}^*(\psi_1) = 0$, для поиска $n_{гр3}^*$ необходимо решить систему уравнений (15) относительно $n_{гр3}^*$.

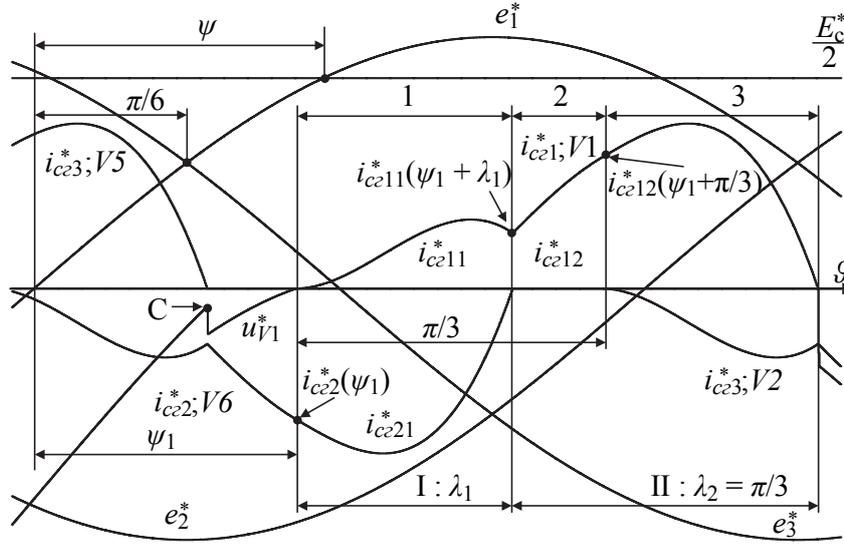


Рис. 7 – Диаграммы режима 3
Fig. 7 – Mode 3 Diagrams

$$\left\{ \begin{array}{l} \psi_2 = -\arcsin\left(\frac{1}{n_{\text{ГР3}}^*} \frac{E_c^* \pi}{2 \cdot 3}\right) - \frac{\pi}{6} + \pi, \\ n_{\text{ГР3}}^* \sin(\psi_1) - \frac{E_c^*}{2} + \frac{X_S^* + X_0^*}{X_{11}^* + X_0^*} \left[n_{\text{ГР3}}^* \sin\left(\psi_1 + \frac{\pi}{3}\right) - \frac{E_c^*}{2} \right] = 0, \\ \frac{X + X_S^* + X_0^*}{X \left[X + 2(X_S^* + X_0^*) \right]} \left[\cos(\psi_1) - \cos(\psi_2) \right] - \frac{1}{n_{\text{ГР3}}^*} \frac{1}{X} \frac{E_c^*}{2} (\psi_2 - \psi_1) + \\ + \frac{X_S^* + X_0^*}{X \left[X + 2(X_S^* + X_0^*) \right]} \left[\cos\left(\psi_2 - \frac{2\pi}{3}\right) - \cos\left(\psi_1 - \frac{2\pi}{3}\right) \right] = 0. \end{array} \right. \quad (15)$$

Например, при $q = 1$, $X_S^* = 1/(1+q) \cos(2\pi/3)$ и $X_0^* = 2 n_{\text{ГР3}}^* = 0,9984607329$.

В режиме 3 можно выделить три характерных временных участка.

Интервал 1 при $\psi_1 \leq \vartheta \leq \psi_1 + \lambda_1$ длительностью λ_1 одновременного проводящего состояния $V1$ и $V6$. Сохраним дополнительный индекс «1» в обозначении токов на интервале 1: i_{cr11}^* , i_{cr21}^* и i_{01}^* – токи фаз 1 и 2 СГ, элемента $n X_0^*$ соответственно. Электромагнитные процессы в режиме 3 на этом интервале аналогичны электромагнитным процессам режима 2 на интервале 1, поэтому справедливы выражения (11) и (12).

Интервал 2 при $\psi_1 + \lambda_1 \leq \vartheta \leq \psi_1 + \pi/3$ проводящего состояния только одного $V1$ (протекает ток i_{cr1}^*). Обозначим i_{cr1}^* на интервале 2 как i_{cr12}^* . Электромагнитные процессы в режиме 3 на этом интервале аналогичны электромагнитным

процессам режима 2 на интервале 2, поэтому справедливо выражение (14) при замене $\psi_2 = \psi_1 + \lambda_1$, за тем исключением, что $i_{cr12}^*(\psi_1 + \lambda_1) = i_{cr11}^*(\psi_1 + \lambda_1) \neq 0$:

$$i_{cr12}^* = \frac{1}{n^*} \frac{1}{X_{11}^* + X_0^*} \left[-n^* \cos(\vartheta) + n^* \cos(\psi_1 + \lambda_1) - \frac{E_c^*}{2} (\vartheta - \psi_1 - \lambda_1) \right] + i_{cr11}^*(\psi_1 + \lambda_1), \quad (16)$$

где $i_{cr11}^*(\psi_1 + \lambda_1)$ – по выражению (12) при $\vartheta = \psi_1 + \lambda_1$.

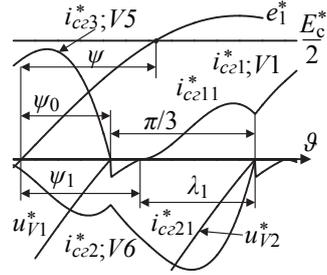
Интервал 3 через $\pi/3$ от ψ_1 (начала интервала 1), на котором повторяются электромагнитные процессы, аналогичные интервалу 1, но с $V1$ (протекает ток i_{cr1}^*) и $V2$ (протекает ток i_{cr3}^*).

Определение λ_1 осуществляется по условию $i_{cr21}^*(\psi_1 + \lambda_1) = 0$.

При $n^* = n_{гр4}^*$ локальный максимум «С» u_{V1}^* достигает нуля. При $n^* = n_{гр4}^*$ возникает подрежим 3, когда $u_{V1}^* \geq 0$ до ψ_1 .

На рис. 8 приведены детализированные диаграммы, поясняющие способ определения u_{V1}^* при $n^* = n_{гр4}^*$ на интервале до ψ_1 .

Рис. 8. Диаграммы, поясняющие способ определения u_{V1}^*
Fig. 8. Diagrams explaining the method of determining u_{V1}^*



Электромагнитные процессы до момента времени, соответствующего указанному локальному максимуму u_{V1}^* , аналогичны процессам на интервале 1: ток проводят $V5$ (i_{cr3}^* фазы 3 СГ) и $V6$ (i_{cr2}^* фазы 2 СГ). u_{V1}^* можно определить по u_{V2}^* с учетом фазового сдвига $u_{V1}^*(\vartheta) = u_{V2}^*(\vartheta + \pi/3)$. В соответствии с (1) на интервале $[\psi_1; \psi_1 + \lambda_1]$, проводя соответствующие преобразования, получаем

$$u_{V2}^* = -\frac{X_{11}^* + 2X_S^* + 3X_0^*}{X_{11}^* + X_S^* + 2X_0^*} e_3^* - \frac{E_c^*}{2}. \quad (17)$$

Таким образом,

$$u_{V1}^* = u_{V2}^*(\vartheta + \pi/3) = -\frac{X_{11}^* + 2X_S^* + 3X_0^*}{X_{11}^* + X_S^* + 2X_0^*} e_3^*(\vartheta + \pi/3) - \frac{E_c^*}{2}. \quad (18)$$

Используя (18) угол ψ_0 , находим из условия $u_{V1}^*(\psi_0) = 0$:

$$\psi_0 = \arcsin \left(\frac{1}{n^*} \frac{X_{11}^* + X_S^* + 2X_0^*}{X_{11}^* + 2X_S^* + 3X_0^*} \frac{E_c^*}{2} \right). \quad (19)$$

Если в выражения (11) и (19) сделать замену $n^* = n_{гр4}^*$, приняв, что ψ_0 и ψ_1 – это функции от $n_{гр4}^*$, учесть, что $\psi_1 + \lambda_1 = \psi_0 + \pi/3$ и в выражениях (16) сделать замену $\lambda_1 = f(n_{гр4}^*) = \psi_0(n_{гр4}^*) + \pi/3 - \psi_1(n_{гр4}^*)$, то для расчета $n_{гр4}^*$ необходимо решить уравнение $i_{сг21}^*(\psi_1(n_{гр4}^*) + \lambda_1(n_{гр4}^*)) = 0$ относительно $n_{гр4}^*$.

Например, при $q = 1$, $X_S^* = 1/(1+q) \cos(2\pi/3)$ и $X_0^* = 2 n_{гр4}^* = 1,0478947242$. $\psi_0(n_{гр4}^*) = 0.6484342748$.

6. Подрезим 3

Подрезим 3 возникает при $n^* > n_{гр4}^*$ (рис. 9) и характеризуется наличием небольшого по длительности интервала одновременного протекания тока в двух ключах одной группы. Возникает угол коммутации γ , но ток во вступающем в работу ключе после γ спадает до нуля и присутствует нулевая токовая пауза, также небольшая по длительности, после которой начинаются доминирующие процессы подрезима 3 (интервал 1), когда работают два ключа из разных групп.

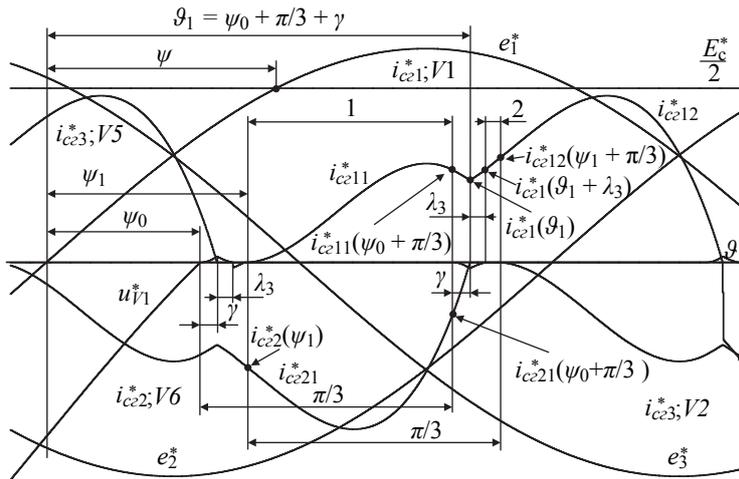


Рис. 9 – Диаграммы подрезима 3
Fig. 9 – Submode 3 Diagramms

На рис. 9 представлены детализированные диаграммы подрезима 3 для токов $i_{сг1}^*$ в фазе 1 СГ при включении $V1$, $i_{сг2}^*$ в фазе 2 СГ при включении $V6$ и $i_{сг3}^*$ в фазе 3 СГ при включении $V2$.

Можно выделить четыре характерных временных участка.

Интервал 1 при $\psi_1 \le \vartheta \le \psi_0 + \pi/3$ длительностью $\psi_0 + \pi/3 - \psi_1$ одновременного проводящего состояния $V1$ и $V6$. Сохраним дополнительный индекс «1» в обозначении токов на интервале 1: $i_{сг11}^*$, $i_{сг21}^*$ и i_{01}^* – токи фаз 1 и 2 СГ, элемента $n^* X_0^*$ соответственно. Справедливы выражения (11) и (12).

Интервал γ при $\psi_0 + \pi/3 < \vartheta \leq \psi_0 + \pi/3 + \gamma$ одновременного проводящего состояния $V1, V2$ (протекает ток i_{cr3}^*) и $V6$. Введем дополнительный индекс « γ » в обозначении токов на интервале γ : $i_{crj\gamma}^*$ ($j = 1...3$) и $i_{0\gamma}^*$ – фазные токи СГ и элемента $n^* X_0^*$ соответственно.

В соответствии с (1) для интервала γ , проведя соответствующие преобразования относительно производных токов генератора и проинтегрировав полученные выражения, можно получить систему.

$$\begin{cases} i_{cr1\gamma}^* = \frac{1}{n^*} \frac{1}{X_{jj}^* - X_S^*} \left[-n^* \cos(\vartheta) - \frac{X_{jj}^* + 3X_S^* + 4X_0^*}{X_{jj}^* + 2X_S^* + 3X_0^*} \frac{E_c^*}{2} \vartheta \right] + I_{1\gamma}, \\ i_{cr2\gamma}^* = \frac{1}{n^*} \frac{1}{X_{jj}^* - X_S^*} \left[-n^* \cos\left(\vartheta - \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{X_{jj}^* + X_S^* + 2X_0^*}{X_{jj}^* + 2X_S^* + 3X_0^*} \frac{E_c^*}{2} \vartheta \right] + I_{2\gamma}, \\ i_{cr3\gamma}^* = \frac{1}{n^*} \frac{1}{X_{jj}^* - X_S^*} \left[-n^* \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{X_{jj}^* + X_S^* + 2X_0^*}{X_{jj}^* + 2X_S^* + 3X_0^*} \frac{E_c^*}{2} \vartheta \right] + I_{3\gamma}, \end{cases} \quad (20)$$

где $I_{j\gamma}$ ($j = 1...3$) находятся из условий, что $i_{cr1\gamma}^*(\psi_0 + \pi/3) = i_{cr11}^*(\psi_0 + \pi/3)$, $i_{cr2\gamma}^*(\psi_0 + \pi/3) = i_{cr21}^*(\psi_0 + \pi/3)$, $i_{cr3\gamma}^*(\psi_0 + \pi/3) = 0$.

Интервал λ_3 при $\psi_0 + \pi/3 + \gamma < \vartheta \leq \psi_0 + \pi/3 + \gamma + \lambda_3$ одновременного проводящего состояния $V1$ и $V2$. $V6$ выключился в момент времени $\psi_0 + \pi/3 + \gamma$.

Введем дополнительный индекс « λ » в обозначении токов на интервале λ_3 : $i_{crj\lambda}^*$ ($j = 1...3$) и $i_{0\lambda}^*$ – фазные токи СГ и элемента $n^* X_0^*$ соответственно.

С учетом (1), проведя соответствующие преобразования относительно производных токов генератора, можно получить систему уравнений, в которой $I_{1\lambda}$ и $I_{3\lambda}$ можно найти из условий $i_{cr1\lambda}^*(\psi_0 + \pi/3 + \gamma) = i_{cr1\gamma}^*(\psi_0 + \pi/3 + \gamma)$ и $i_{cr3\lambda}^*(\psi_0 + \pi/3 + \gamma) = i_{cr3\gamma}^*(\psi_0 + \pi/3 + \gamma)$.

$$\begin{cases} i_{cr1\lambda}^* = -\frac{X + X_S^* + X_0^*}{X \left[X + 2(X_S^* + X_0^*) \right]} \cos(\vartheta) + \frac{X_S^* + X_0^*}{X \left[X + 2(X_S^* + X_0^*) \right]} \times \\ \times \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) - \frac{1}{n^*} \frac{1}{X} \frac{E_c^*}{2} \vartheta + I_{1\lambda}, \\ i_{cr3\lambda}^* = -\frac{1}{X + X_S^* + X_0^*} \cos\left(\vartheta + \frac{2\pi}{3}\right) + \frac{1}{n^*} \frac{1}{X + X_S^* + X_0^*} \frac{E_c^*}{2} \vartheta - \\ - \frac{X_S^* + X_0^*}{X + X_S^* + X_0^*} i_{cr1\lambda}^* + I_{3\lambda}. \end{cases} \quad (21)$$

Интервал 2 при $\psi_0 + \pi/3 + \gamma + \lambda_3 < \vartheta \leq \psi_1 + \pi/3$ проводящего состояния одного ключа $V1$.

Для интервала 2 справедливо выражение (16) при замене $\psi_1 + \lambda_1$ на $\psi_0 + \pi/3 + \gamma + \lambda_3$, причем $i_{cr12}^*(\psi_0 + \pi/3 + \gamma + \lambda_3) = i_{cr1\lambda}^*(\psi_0 + \pi/3 + \gamma + \lambda_3) \neq 0$ и можно получить выражение

$$i_{cr12}^* = \frac{1}{n^*} \frac{1}{X_{11}^* + X_0^*} \left[-n^* \cos(\vartheta) + n^* \cos\left(\psi_0 + \frac{\pi}{3} + \gamma + \lambda_3\right) - \frac{E_c^*}{2} \left(\vartheta - \psi_0 - \frac{\pi}{3} - \gamma - \lambda_3 \right) \right] + i_{cr1\lambda}^*(\psi_0 + \pi/3 + \gamma + \lambda_3). \quad (22)$$

При $\vartheta > \psi_1 + \pi/3$ электромагнитные процессы аналогичны тем, что проходили с момента времени $\vartheta = \psi_1$.

В полученных уравнениях для подрежима 3 присутствуют γ и λ_3 , требующие вычисления с использованием системы уравнений

$$\begin{cases} i_{cr2\gamma}^*(\psi_0 + \pi/3 + \gamma) = f1(\gamma, \lambda_3) = 0, \\ i_{cr3\lambda}^*(\psi_0 + \pi/3 + \gamma + \lambda_3) = f2(\gamma, \lambda_3) = 0. \end{cases} \quad (23)$$

При $n^* = n_{гр5}^*$ $\psi_1 - \psi_0 = \gamma + \lambda_3$ длительность интервала 2 равна 0.

При $q = 1$, $X_S^* = 1/(1+q) \cos(2\pi/3)$ и $X_0^* = 2 n_{гр5}^* = 1,0642950884$.

7. Режим 4

Режим 4 возникает при $n^* > n_{гр5}^*$ (рис. 10) и по характеру электромагнитных процессов аналогичен режиму непрерывных токов ключей мостовой схемы трехфазного выпрямителя: присутствует три интервала углов коммутации γ одновременной работы трех ключей (два из одной группы и один из другой группы) и два интервала 1 и 2 одновременной работы двух ключей разных групп. Отличие состоит в наличии тока i_0 дополнительной индуктивности L_0 , который приводит к появлению «несимметрии» тока ключа на интервалах 1 и 2: амплитуда тока на интервале 1 меньше амплитуды тока на интервале 2.

На рис. 10 представлены детализированные диаграммы режима 4 для токов i_{cr1}^* в фазе 1 СГ при включении $V1$, i_{cr2}^* в фазе 2 СГ при включении $V6$ и i_{cr3}^* в фазе 3 СГ при включении $V5$ и $V2$.

Можно выделить два характерных временных участка.

Интервал γ при $\psi_0 \leq \vartheta < \psi_0 + \gamma$ одновременного проводящего состояния $V1$ (протекает ток i_{cr1}^*), $V5$ (протекает ток i_{cr3}^*) и $V6$ (протекает ток i_{cr2}^*). Сохраним дополнительный индекс « γ » в обозначении токов на интервале.

Для этого интервала справедлива система (20), но следует учесть, что указанные выражения получены для интервала γ подрежима 3 при $\psi_0 + \pi/3 < \vartheta \leq \psi_0 + \pi/3 + \gamma$ и описывают электромагнитные процессы, проходящие на $\pi/3$

позже. При замене $\vartheta = \vartheta + \pi/3$ $di_{cr1\gamma}^*/d\vartheta$ режима 4 описывается выражением для $di_{cr3\gamma}^*/d\vartheta$ подрежима 3, $di_{cr2\gamma}^*/d\vartheta$ режима 4 – выражением для $di_{cr1\gamma}^*/d\vartheta$ подрежима 3, $di_{cr3\gamma}^*/d\vartheta$ режима 4 – выражением для $di_{cr2\gamma}^*/d\vartheta$ подрежима 3, поэтому, используя (20), получаем систему уравнений, в которой постоянные интегрирования $I_{j\gamma}$ ($j = 1...3$) находятся из условий $i_{cr1\gamma}^*(\psi_0) = 0$, $i_{cr2\gamma}^*(\psi_0) = -i_{cr11}^*(\psi_0 + \pi/3)$, $i_{cr3\gamma}^*(\psi_0) = -i_{cr21}^*(\psi_0 + \pi/3)$.

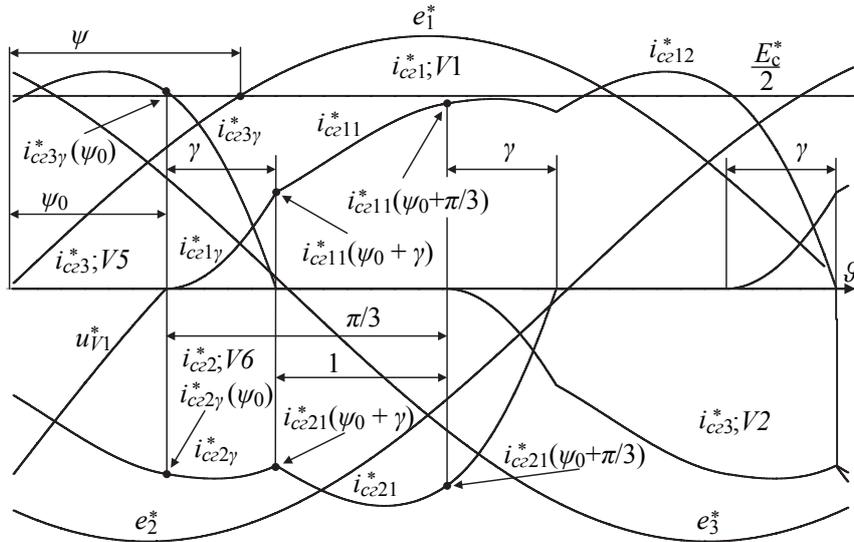


Рис. 10 – Диаграммы режима 4

Fig. 10 – Mode 4 diagrams

$$\begin{cases} i_{cr1\gamma}^* = \frac{1}{n} \frac{1}{X_{jj}^* - X_S^*} \left[-n^* \cos(\vartheta) - \frac{X_{jj}^* + X_S^* + 2X_0^*}{X_{jj}^* + 2X_S^* + 3X_0^*} \frac{E_c^*}{2} \left(\vartheta + \frac{\pi}{3} \right) \right] + I_{1\gamma}, \\ i_{cr2\gamma}^* = \frac{1}{n} \frac{1}{X_{jj}^* - X_S^*} \left[n^* \cos\left(\vartheta + \frac{\pi}{3}\right) + \frac{X_{jj}^* + 3X_S^* + 4X_0^*}{X_{jj}^* + 2X_S^* + 3X_0^*} \frac{E_c^*}{2} \left(\vartheta + \frac{\pi}{3} \right) \right] + I_{2\gamma}, \\ i_{cr3\gamma}^* = \frac{1}{n} \frac{1}{X_{jj}^* - X_S^*} \left[n^* \cos\left(\vartheta - \frac{\pi}{3}\right) - \frac{X_{jj}^* + X_S^* + 2X_0^*}{X_{jj}^* + 2X_S^* + 3X_0^*} \frac{E_c^*}{2} \left(\vartheta + \frac{\pi}{3} \right) \right] + I_{3\gamma}. \end{cases} \quad (24)$$

Интервал 1 при $\psi_0 + \gamma \leq \vartheta < \psi_0 + \pi/3$ длительностью $\pi/3 - \gamma$ одновременно-го проводящего состояния V1 и V6. Сохраним дополнительный индекс «1» в обозначении токов на интервале 1.

Для этого интервала справедлива система (12), однако постоянные интегрирования I_{11} и I_{21} следует искать из условий $i_{cr11}^*(\psi_0 + \gamma) = i_{cr1\gamma}^*(\psi_0 + \gamma)$, $i_{cr21}^*(\psi_0 + \gamma) = i_{cr2\gamma}^*(\psi_0 + \gamma)$.

В полученных уравнениях для режима 4 присутствует γ , определить который можно из условия $i_{сг3\gamma}^*(\psi_0 + \gamma) = 0$, решив это уравнение относительно γ .

С увеличением n^* увеличивается γ . При $n^* = n_{гр6}^*$ $\gamma = \pi/3$, длительность интервала 1 равна 0.

8. Режим 5

Режим 5 возникает при $n^* > n_{гр6}^*$. Режим 5 алогичен режиму 4, но характеризуется $\gamma = \pi/3 = \text{const}$.

Приняв $\gamma = \pi/3$ в системе (24) при условии $i_{сг3\gamma}^*(\psi_0 + \gamma) = 0$, используя выражение (19) и решив уравнение $i_{сг3\gamma}^*(\psi_0(n^*) + \pi/3) = 0$ относительно n^* можно найти $n_{гр6}^*$. При $q = 1$, $X_S^* = 1/(1+q) \cos(2\pi)$ и $X_0^* = 2 n_{гр6}^* = 1,3906195029$.

Токи фаз генератора на интервале γ описываются системой уравнений (24). Постоянные интегрирования $I_{j\gamma}$ ($j = 1 \dots 3$) можно найти из условий $i_{сг1\gamma}^*(\psi_0) = 0$, $i_{сг2\gamma}^*(\psi_0) = -i_{сг1\gamma}^*(\psi_0 + \gamma)$, $i_{сг3\gamma}^*(\psi_0) = -i_{сг2\gamma}^*(\psi_0 + \gamma)$.

В получаемых таким образом уравнениях для режима 5 присутствует ψ_0 , определить который можно из условия $i_{сг3\gamma}^*(\psi_0 + \gamma) = 0$, приняв $\gamma = \pi/3$ и решив указанное уравнение относительно неизвестного ψ_0 .

Заключение

Проведенный анализ электромагнитных процессов в системе «трехфазный синхронный генератор с возбуждением от постоянных магнитов – мостовой вентильный преобразователь», с дополнительным дросселем в нейтрали генератора при вариации частоты вращения вала генератора для случая неуправляемых ключей (диодов), выявил семь режимов работы системы, обусловленных длительностями протекания токов фаз генератора, дросселя и ключей на такте преобразования энергии. Выявленные режимы работы отличаются от режимов работы систем с нулевыми и мостовыми схемами преобразователей без дополнительного дросселя. Для всех режимов работы исследуемой системы определены: граничная частота вращения вала генератора, до которой существует режим; углы вынужденного включения; длительности протекания токов элементов системы. В соответствии с известными методиками анализа систем с ВП проведенное исследование является основой анализа систем с тиристорами и СГЭЭ с НПЧсЕК.

ЛИТЕРАТУРА

1. 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.
2. 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. Силова електроніка та енергоефективність. – 2012. – Ч. 3. – С. 61–63.

3. ГОСТ Р 54073–2010. Системы электроснабжения самолетов и вертолетов. Общие требования и нормы качества электроэнергии. – Введ. 2011–01–01. – М. : Стандартинформ, 2011. – 40 с.
4. **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.
5. Патент 2513113 Российская Федерация, МПК Н 02 J 3/26. Система генерирования электрической энергии трехфазного переменного тока с инвертором напряжения / С.А. Харитонов, Д.В. Коробков, В.В. Машинский, С.Н. Завертан, П.А. Бачурин, А.В. Гейст, Д.В. Макаров, С.В. Воробьева. – № 2012125942/07; заявл. 21.06.2012; опубл. 20.04.2014, Бюл. № 11.
6. **Зиновьев Г.С.** Силовая электроника: монография. – М.: Юрайт, 2012. – 667 с.
7. **Харитонов С.А.** Электромагнитные процессы в системах генерирования электрической энергии для автономных объектов: монография. – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 2011. – 536 с.
8. Система генерирования переменного тока типа «синхронный генератор с РЗМ – преобразователь частоты» для ветроэнергетической установки мощностью 1000кВт «Радуга-1» / Г.В. Грабовецкий, С.А. Харитонов, В.Ф. Лучкин, Е.Б. Преображенский, Н.И. Бородин, Н.Н. Лаптев, М.М. Юхнин // Труды третьей международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-96. – Новосибирск: НГТУ, 1996. – Т. 8. – С. 29–32.
9. Результаты испытаний системы генерирования переменного тока «синхронный генератор – циклоконвертор» для ветроэнергетической установки мощностью 1000кВт / С.А. Харитонов, С.В. Брованов, А.В. Филатов, М.В. Мартинович, П.В. Акимов, Д.В. Коробков // Труды третьей международной научно-технической конференции «Актуальные проблемы электронного приборостроения» АПЭП-96. – Новосибирск: НГТУ, 1996. – Т. 8. – С. 33–35.
10. **Коробков Д.В.** Анализ статического режима работы СГЭЭ типа «МЭГ – НПЧ с ЕК» для ВЭУ с переменной частотой вращения вала ветротурбины при параллельной работе с промышленной сетью // Техническая электродинамика. Силовая электроника та энергоэффективность. – 2005. – Ч. 2. – С. 52–53.
11. **Коробков Д.В.** Методика и программа анализа качества генерируемой энергии СГЭЭ типа «МЭГ – НПЧ с ЕК» при параллельной работе с промышленной сетью // Техническая электродинамика. Силовая электроника та энергоэффективность. – 2007. – Ч. 2. – С. 73–78.

**THE THREE PHASE PMSG – FULL BRIDGE RECTIFIER SYSTEM
WITH AN ADDITIONAL REACTOR IN NEUTRAL:
THE IDENTIFICATION OF THEIR OPERATING MODES
AND CONDITIONS OF EXISTENCE**

Korobkov D.V.

Novosibirsk State Technical University, Novosibirsk, Russia

One of the tasks of obtaining the required characteristics of energy quality while designing electric power generation systems (EPGS), made on the basis of a permanent magnets synchronous generator (PMSG) – a controlled valve converter (VC) – an autonomous transistor voltage inverter (VI) structural scheme is to provide a small, close to zero level of the constant component of load alternating voltage. A way of solving this problem can be to connect an additional reactor to the neutral of the PMSG and the midpoint of the IN DC link. The latter is connected to the load neutral in such EPGSS. The analysis of electromagnetic processes in the system with a three-phase SG was carried out using the LE-phase equivalent circuit of SG (the system efficiency is high and reactive elements dominate in the electromagnetic processes formation) with mutual inductances of the SG phases at a constant flux linkage in the energy conversion cycle. The analysis of the system revealed seven operating modes of the system different from the modes in the systems with a three-phase half-wave rectifier and a full-wave bridge rectifier when the VP keys are diodes. These modes are discontinuous currents of SG phases, VP keys and the reactor; con-

tinuous reactor currents with the duration of the SG phases current of $\pi/3$; discontinuous currents of VP keys with two intervals, with the first interval being less than $\pi/3$ and the second interval being equal to $\pi/3$; continuous currents of the VP keys with two intervals, with the first interval being less than $\pi/3$ and the second interval being equal to $\pi/3$; simultaneous operation of three keys with switching off the key entering into operation after the switching angle γ ; continuous currents of keys, with γ being less than $\pi/3$ whose current form is caused by the presence of the circuit formed by the reactor; the mode similar to the previous one, but with γ being equal to $\pi/3$. Expressions of the SG shaft boundary speed up to which the mode exists as well as a forced switch-on angle and current duration for all operation modes were obtained. The presented results are the basis of the analysis of the system with thyristors and EPGs with cycloconverters.

Keywords: equivalent circuit of a permanent magnet synchronous generator, electromagnetic processes in the system with a controlled valve converter.

DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-44-61

REFERENCES

1. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Maslov M.A., Borodin N.I., Levin A.V., Yukhnin M.M., Livshits E.Ya. Sistema generirovaniya elektricheskoi energii tipa "peremennaya skorost' – postoyannaya chastota" na baze sinkhronnogo generatora s vzbuzhdeniem ot postoyannykh magnitov i invertorov napryazheniya [Variable speed constant frequency power generation system based on a synchronous generator excited from permanent magnets and voltage inverters]. *Elektrotehnika – Russian Electrical Engineering*, 2008, no. 6, pp. 27–32. (In Russian).
2. Maschinskii V.V., Korobkov D.V., Kharitonov S.A., Yukhnin M.M., Livshits E.Ya. Nekotorye osobennosti konstruktivnogo ispolneniya poluprovodnikovogo preobrazovatelya chastoty dlya aviacionnoj sistemy generirovaniya [Some features of the semiconductor frequency converter design for aircraft generation system]. *Tekhnichna elektrodinamika. Silovaya elektronika ta energoefektivnist' – Technical electrodynamics. Power electronics and energy efficiency*, 2012, pt. 3, pp. 61–63.
3. GOST R 54073–2010. *Sistemy elektrosnabzheniya samoletov i vertoletov. Obshchie trebovaniya i normy kachestva elektroenergii* [State Standard 54073–2010. Electric power supply systems of airplanes and helicopters. General requirements and norms of quality of electric energy]. Moscow, Standartinform Publ., 2010. 40 p.
4. Grabovecky G.V., Korobkov D.V., Kharitonov S.A. Osobennosti raboty invertora napryazheniya v sisteme generirovaniya elektricheskoi energii letatel'nogo apparata [The voltage-source inverter in system of generating of electric energy for the aircraft, feature of work]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii – Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2012, no. 1 (18), pp. 69–79.
5. Kharitonov S.A., Korobkov D.V., Maschinskii V.V., Zavertan S.N., Bachurin P.A., Geist A.V., Makarov D.V., Vorob'eva S.V. *Sistema generirovaniya elektricheskoi energii trekhfaznogo peremennogo toka s invertorom napryazheniya* [Three-phase alternating current generating system with voltage inverter]. Patent RF, no. 2513113, 2014.
6. Zinov'ev G.S. *Silovaya elektronika* [Power electronics]. Moscow, Yurait Publ., 2012. 667 p.
7. Kharitonov S.A. *Elektromagnitnye protsessy v sistemakh generirovaniya elektricheskoi energii dlya avtonomnykh ob'ektov* [Electromagnetic processes in power generating systems for standalone units]. Novosibirsk, NSTU Publ., 2011. 536 p.
8. Grabovetskii G.V., Kharitonov S.A., Luchkin V.F., Preobrazhenskii E.B., Borodin N.I., Laptev N.N., Yukhnin M.M. [AC generating system "synchronous generator REM – the frequency Converter" type for 1000kW wind power plant "Raduga-1"]. *Trudy tret'ei mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya» APEP-96* [Proceedings of Third international scientific-technical conference "Actual problems of electronic instrument engineering" APEIE-96]. Novosibirsk, 1996, vol. 8, pp. 29–32. (In Russian).
9. Kharitonov S.A., Brovanov S.V., Filatov A.V., Martinovich M.V., Akimov P.V., Korobkov D.V. [Test results of the AC generation system "synchronous generator-cycloconverter" for 1000 kW wind power plant]. *Trudy tret'ei mezhdunarodnoi nauchno-tekhnicheskoi konferentsii «Aktual'nye problemy elektronnoy priborostroeniya» APEP-96* [Proceedings of Third international scientific-technical conference "Actual problems of electronic instrument engineering" APEIE-96]. Novosibirsk, 1996, vol. 8, pp. 33–35. (In Russian).

10. Korobkov D.V. Analiz staticheskogo rezhima raboty SGEE tipa "MEG – NPCh s EK" dlya VEU s peremennoi chastotoi vrashcheniya vala vetroturbiny pri parallel'noi rabote s promyshlennoi set'yu [The static mode analysis of "PMSG – cycloconverter" type EPGS operation for wind turbines with variable shaft speed of the wind turbine in parallel operation with industrial network]. *Tekhnichna elektrodinamika. Silova elektronika ta energoefektivnist'* – *Technical electrodyamics. Power electronics and energy efficiency*, 2005, pt. 2, pp. 52–53.
11. Korobkov D.V. Metodika i programma analiza kachestva generiruemoi energii SGEE tipa "MEG – NPCh s EK" pri parallel'noi rabote s promyshlennoi set'yu [Method and program of quality analysis of "PMSG – cycloconverter" type EPGS generated energy in parallel operation with the industrial network]. *Tekhnichna elektrodinamika. Silova elektronika ta energoefektivnist'* – *Technical electrodyamics. Power electronics and energy efficiency*, 2007, pt. 2, pp. 73–78.

СВЕДЕНИЯ ОБ АВТОРАХ



Коробков Дмитрий Владиславович – родился в 1971 году, заместитель директора ИСЭ НГТУ, старший преподаватель кафедры электроники и электротехники НГТУ. Область научных интересов: автономные системы генерирования электрической энергии с полупроводниковыми преобразователями. Опубликовано более 50 научных работ. (Адрес: 630073, Россия, г. Новосибирск, пр. К. Маркса, 20. E-mail: korobkov@corp.nstu.ru, kpe@ngs.ru).

Korobkov Dmitry Vladislavovich – he was born in 1971, deputy Director of IPE of NSTU, senior teacher of NSTU electronics and electrical engineering department. His research interests are currently focused on standalone electrical energy generation systems with semiconductor converters. He is author of more than 50 scientific papers. (Address: 20, Karl Marx Av., Novosibirsk, 630073, Russia. E-mail: korobkov@corp.nstu.ru, kpe@ngs.ru).

*Статья поступила 28 сентября 2018 г.
Received September 28, 2018*

To Reference:

Korobkov D.V. Sistema «trekhfaznyi MEG – mostovoi vypryamitel'» s dopolnitel'nym drossелеm v neutrali: opredelenie rezhimov raboty i uslovii ikh sushchestvovaniya [The three phase PMSG – full bridge rectifier system with an additional reactor in neutral: the identification of their operating modes and conditions of existence]. *Doklady Akademii nauk vysshei shkoly Rossiiskoi Federatsii* – *Proceedings of the Russian higher school Academy of sciences*, 2019, no. 1 (42), pp. 44–61. DOI: 10.17212/1727-2769-2019-1-44-61.