

Вентильный генератор с кольцевой схемой соединения якорных обмоток и 18-пульсным выпрямленным напряжением

МЫЦЫК Г.С., ХЛАИНГ МИН У

При построении машинно-электронных генерирующих систем (МЭГС), основанных на преобразовании многофазного переменного тока в постоянный ток, используется так называемая «кольцевая» схема соединения якорных обмоток электрического генератора (ЭГ). Однако одной из причин, ограничивающих ее более широкое применение на практике, может быть отсутствие доказательств ее преимуществ перед широко используемой «лучевой» схемой. В статье приводятся результаты исследования рабочих процессов в МЭГС типа вентильный генератор (ВГ) с 9-фазной якорной обмоткой ЭШ по «кольцевой» схеме в двух вариантах: в традиционном исполнении (ВГ-9К) и в модификации, использующей многоканальный принцип преобразования (ВГ-9КМ). Показаны преимущества варианта ВГ-9КМ и приведено модельное описание, необходимое при проектировании. В качестве средства решения поставленных задач используется имитационное компьютерное моделирование.

Ключевые слова: 9-фазный электрический генератор, выпрямительный блок, «кольцевая» схема, трехканальное преобразование, трехфазный трансфильтр, модельное описание, компьютерное моделирование, сопоставительная оценка

Возможности повышения качества бесконтактного машинно-электронного преобразования механической энергии в электроэнергию постоянного тока нельзя считать исследованными и раскрытыми в том объеме, который необходим для их структурно-параметрической оптимизации и который основывался бы на современных достижениях научно-технической мысли. В частности, в доступных источниках информации [1–7] отсутствуют обоснованные рекомендации по выбору наиболее рациональной топологии якорной обмотки электрического генератора (ЭГ) и числа ее фаз m , работающей в составе рассматриваемой здесь машинно-электронной генерирующей системы (МЭГС). Система выполнена в виде двух последовательно соединенных силовых звеньев – ЭГ переменного тока и вентильного блока (ВБ); МЭГС такого рода известны также как вентильные генераторы (ВГ) [3–7].

Совершенствование МЭГС определяется улучшением их электроэнергетической и электромагнитной совместимости (ЭЭС и ЭМС) при одновременном выполнении действующих долговременных программ энерго- и ресурсосбережения. Развитие МЭГС типа ВГ в этом направлении отражено, например, в работах [1, 2, 4–7]. Заметим, что теоретически предельно достижимым показателем ЭЭС и ЭМС (т.е. идеальным конечным результатом) для данного класса МЭГС можно считать отсутствие искажений как в выходном токе I_{d0} (МЭГС), так и в фазных токах $i_{j\phi}$ (ЭГ). Требуемый уровень искажений тока I_{d0} (снижение уровня пульсаций) достигается известными способами – увеличением фазности m генератора и уменьшением индуктив-

ности рассеяния L_s его якорных обмоток. Что касается снижения искажений фазных токов ЭГ, то необходимых рекомендаций в технической литературе обнаружить не удалось. Например, если топология якорной обмотки – «несимметричная 6-лучевая схема» и используется традиционная структура выпрямительного тракта, то при увеличении параметра m ЭГ с 3 до 6 пульсность выпрямленного напряжения возрастает с $m_3 = 6$ до $m_3 = 12$, а искажения фазного тока не уменьшаются, а возрастают [1, 5]. С целью избежать этого недостатка в работах [1, 2, 4–6] МЭГС выполнена по двухканальной структуре выпрямительного тракта – с суммированием выходных токов каналов путем использования двухобмоточного трансфильтра (иначе уравнительного реактора). Выпрямительные мосты каналов при этом работают независимо друг от друга, и, хотя при этом искажения фазных токов остаются на уровне 30% (без учета влияния паразитного параметра L_s), искажения эквивалентного фазного тока, по которому рассчитывается реакция якорной обмотки ЭГ, уменьшаются [6]. Данная концепция многоканального преобразования (МКП) энергетического потока использована также в [5], где обмотки ЭГ выполнены по такой же «лучевой» топологии, что и в [1, 2, 4], но с числом фаз $m=9$, а выпрямительный блок (ВБ) – в виде трех выпрямительных мостов, соединенных параллельно по выходу через трехобмоточный трансфильтр (ТТФ), которые совместно с последним и обеспечивают 18-пульсное выпрямление напряжения. Использование в [5] для синтеза МЭГС концепции МКП позволило снизить суммарную габаритную (расчетную) мощность якорной обмотки ЭГ и обмотки

ТТФ в 1,45 раза по сравнению с традиционным решением (без ТТФ).

Целью статьи является исследование не выявленных еще возможностей совершенствования МЭГС типа ВГ за счет применения иной топологии якорных обмоток ЭГ – по схеме «многоугольник» (иначе – по «кольцевой» схеме).

Традиционная структура МЭГС типа ВГ с «кольцевой» якорной обмоткой и с числом фаз $m=9$. Якорная обмотка ЭГ в данной структуре ВГ выполняется в виде 9 сдвинутых в пространстве (на статоре) на угол $2\pi/9$ обмоток и соединенных по схеме «девятиугольник». В традиционном варианте якорные обмотки ЭГ своими 9 выводами подключены ко входам выпрямительного блока (ВБ) по мостовой схеме на 18 диодах. На рис. 1 приведена структурно-функциональная схема 9-фазного вентильного генератора ВГ-9К с якорной обмоткой по «кольцевой» схеме (с её габаритной мощностью $S_{ЭМ} = 1,119P_{d0}$), на рис. 2 – векторная диаграмма фазных напряжений.

Взаимосвязь между фазным и выпрямленным напряжением. Алгоритм работы диодов ВБ определяется наибольшими значениями линейных напряжений $U_{я.л}$, векторы которых показаны на рис. 2 штриховыми линиями (например, $A_1A_5, A_1A_6, A_4A_8, A_4A_9$). По векторной диаграмме определим взаимосвязь между векторами A_1A_5 и A_1A_9 , значение которой необходимо для определения коэффициента схемы $K_{сх}$ [5]. Из треугольника $DA_1A_5A_9$ следует:

$$\frac{A_1A_5}{\sin 80^\circ} = \frac{A_1A_9}{\sin 20^\circ}; \quad A_1A_5 = \frac{\sin 80^\circ}{\sin 20^\circ} A_1A_9 = 2,8794 A_1A_9.$$

(1)

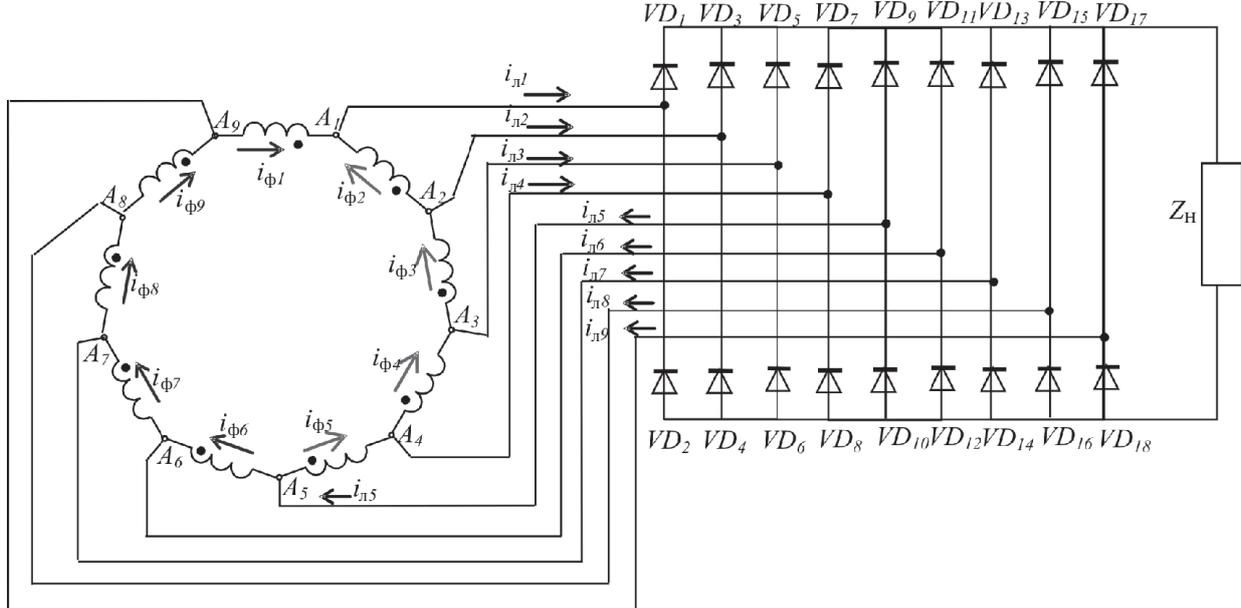


Рис. 1

Таким образом, в данном решении ВГ-9К

$$K_{сх} = \frac{U_{я.лм}}{U_{я.фм}} = \frac{A_1A_5}{A_1A_9} = \frac{2,8794A_1A_9}{A_1A_9} = 2,8794 \gg 2,88, \quad (2)$$

где $U_{я.лм}, U_{я.фм}$ – амплитудные значения наибольшего в схеме обмотки линейного напряжения и фазного напряжения 9-фазной обмотки ЭГ. Для сравнения заметим, что при $m=3$ и топологии обмотки ЭГ «звезда» $K_{сх} = \sqrt{3} = 1,732$.

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения ВГ-9К $U_{d0(18)}$ в пренебрежении падением напряжения на диодах ВБ

$$U_{d0(2m)} = \frac{2m}{\pi} \sin \frac{\pi}{2m} U_{я.лм} \Big|_{m=9} = \frac{18}{\pi} \sin \frac{\pi}{18} U_{я.лм} = 0,9949 U_{я.лм}. \quad (3)$$

Из (2) и (3) следует

$$U_{d0(18)} = 0,9949 K_{сх} U_{я.фм} = 0,9949 \cdot 2,8794 U_{я.фм} = 2,8647 U_{я.фм}, \quad (4)$$

где $0,9949 K_{сх} = 2,8647 = K_{d(6)S}$ – результирующий коэффициент выпрямления.

Из (4) получим действующее значение фазного напряжения в долях выпрямленного:

$$U_{я.ф} = \frac{U_{d0(18)}}{\sqrt{2} \cdot 2,8647} = 0,2468 U_{d0(18)}. \quad (5)$$

Его значение, полученное на основе имитационного компьютерного моделирования (ИКМ), дает несколько больший результат:

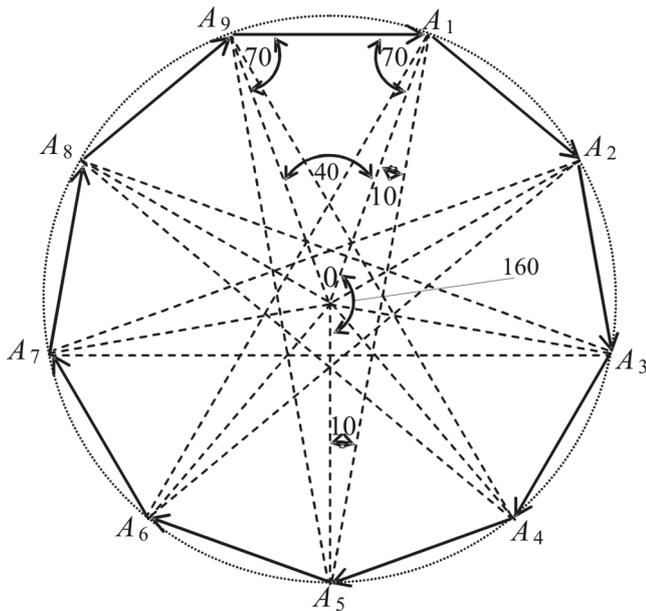


Рис. 2

$$U_{я.ф} = 0,250U_{d0(18)} \tag{5a}$$

Незначительное расхождение результатов (примерно 1,3%) объясняется неучетом падения напряжения на диодах ВБ (и учетом его при ИКМ).

Определение параметров фазного тока ВГ-9К. Для определения действующего значения фазного тока необходимо знать его форму, что требует однозначного представления о процессах в ВГ. Средство решения этой задачи – все то же имитационное компьютерное моделирование. Результаты моделирования при тех же допущениях, что и в [5], представлены осциллограммами на рис. 3.

Форма линейных токов имеет вид квазимеандра с паузой $7\pi/9$ между его полуволнами (т.е. вид импульсов со скважностью $s=4,5$) с действующим значением тока

$$I_{л} = \frac{I_{d0}}{\sqrt{s}} = \frac{I_{d0}}{\sqrt{4,5}} = 0,4714I_{d0} \tag{6}$$

На основе ИКМ получено близкое к этому значение:

$$I_{л} = 0,470I_{d0} \tag{6a}$$

Как видно из осциллограмм рис. 3, фазные токи имеют необычную форму – «меандр», как бы промодулированный гармониками, кратными 9. Обозначим такую форму тока как «квазимеандр» и остановимся на трактовке ее физической сущности.

При принятых допущениях в любой момент в выпрямительном блоке в проводящем состоянии находятся только два диода из 18, например VD_1 и VD_{10} , которые подключены к точкам A_1 и A_5 «девя-

тиугольника» обмоток ЭГ (рис. 1 и 3). Эти точки делят «девятиугольник» на две неравные ветви: слева находится пять согласно последовательно включенных обмоток, а справа – четыре. В том случае, если бы число обмоток в левой и правой ветвях «многоугольника» было одинаковым (что реально имеет место при четном значении числа m [7]), то токи в них были бы также одинаковыми с формой «меандр», а их максимальные и действующие значения были бы равны:

$$I_{я.фm} = I_{я.ф} = \frac{I_{d0}}{2} = 0,5I_{d0} \tag{7}$$

Этот факт подтверждается результатами моделирования варианта ВГ-6К, полученными при $m=6$ [7]. В случае, когда $m=9$ (нечетно), оказывается, что гармоники нулевой последовательности (ГНП), кратные 9, суммируясь отдельно в левой и правой ветвях, имеют в них разные знаки. В результате после суммирования в «девятиугольнике» остаются не скомпенсированными лишь ГНП, кратные 9, содержащиеся только в одной обмотке левой ветви (из пяти обмоток). С учетом (7) полная сумма ГНП (в одной фазе) по форме представляет собой «меандр» частотой $9f$ (где f – частота напряжения ЭГ) с максимальным значением, равным

$$I_{S9(2k-1)m} = \frac{1}{9}I_{я.ф(9)m} = \frac{1}{9}0,5I_{d0} = 0,0555I_{d0} \tag{8}$$

и может быть представлена следующим рядом Фурье:

$$I_{S9(2k-1)}(t) = 0,0555I_{d0} \sum_{k=1}^{\infty} \frac{1}{9(2k-1)} \sin 9(2k-1)\omega t \tag{9}$$

На рассматриваемом интервале времени $Dq_1 = 0 \dot{e} \pi/18$ токи в обеих ветвях протекают снизу вверх, как показано на рис. 1 стрелками. С учетом этого факта, а также того, что взаимосвязь фазных токов $i_{\phi 1}(t)$, $i_{\phi 2}(t)$ с линейным током $i_{л1}(t) = i_{л1-2}(t)$ описывается известным выражением (рис. 3):

$$i_{л1}(t) = i_{\phi 1}(t) - i_{\phi 2}(t) \tag{10}$$

и основные гармоники токов $i_{\phi 1}(t)$, $i_{\phi 2}(t)$ относительно полярности своих обмоток имеют разные знаки (рис. 1 и 3), можно считать, что токи ГНП, являясь однозначно сфазированными со своими основными гармониками, на данном интервале Dq_1 в двух ветвях также протекают в противоположных направлениях (о чем упомянуто выше). В результате ГНП в четырех обмотках левой ветви и в четырех обмотках правой ветви при суммировании взаимокompенсируются. Не скомпенсированными оказываются только токи ГНП одной (пятой) об-

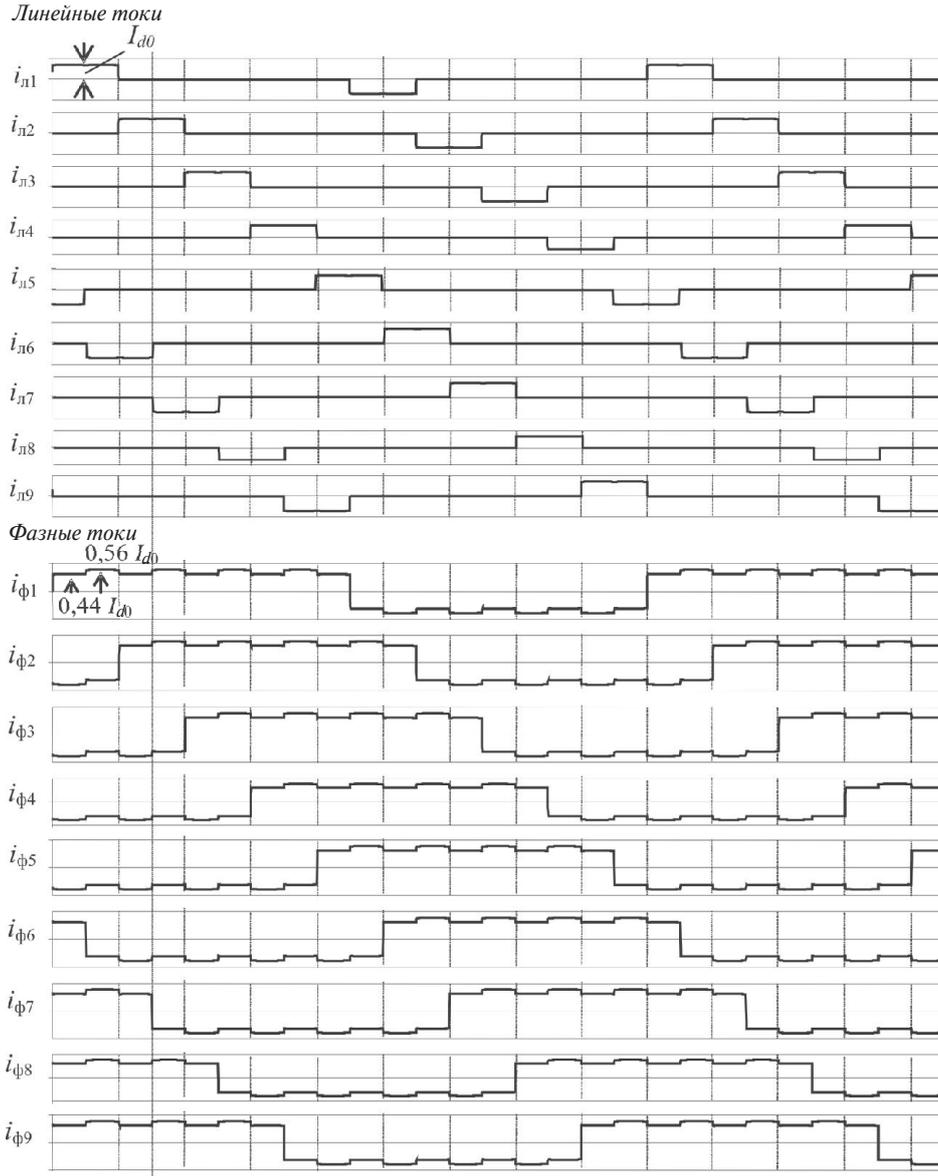


Рис. 3

мотки в левой ветви. В итоге мгновенные значения токов в ветвях на интервале Dq_1 несколько различаются: ток 1-й ветви (из пяти обмоток с токами $i_{\phi 1}(t), i_{\phi 6}(t)$ и $i_{\phi 9}(t)$) формируется как разность токов (7) и (9), а ток 2-й ветви (из четырех обмоток с токами $i_{\phi 2}(t)$ и $i_{\phi 5}(t)$) – суммированием токов (7), (9). При этом максимальные значения токов в обеих ветвях и, в частности, в 1-й и 2-й фазах (по модулю) на интервале Dq_1 оказываются равными (рис. 3):

$$\begin{aligned}
 I_{я1\phi m} \Big|_{Dq_1} &= I_{я.\phi m} - I_{S9(2k-1)} = \\
 &= 0,5I_{d0} - 0,0555I_{d0} = 0,4445I_{d0}; \quad (11)
 \end{aligned}$$

$$I_{я2\phi m} \Big|_{Dq_1} = I_{я.\phi m} + I_{S9(2k-1)} =$$

$$= 0,5I_{d0} + 0,0555I_{d0} = 0,5555I_{d0}. \quad (12)$$

На следующем интервале $Dq_2 = \pi/18 \dot{\pi}/9$ (рис. 3) вместо диода VD_{10} вступает в работу диод VD_{12} , и ситуация изменяется: в левой ветви током будут обтекаться четыре обмотки, а в правой – пять. Соответственно поменяются и максимальные значения импульсов тока в ветвях (и в токах $i_{\phi 1}(t)$ и $i_{\phi 2}(t)$). Далее процессы повторяются. При этом максимальное значение линейного тока, обусловленное токами 1-й и 2-й фаз на интервале $Dq_1 + Dq_2$, согласно (10) и рис. 3 равно:

$$I_{л1m} = I_{d0}. \quad (13)$$

Компьютерное моделирование подтверждает полученные результаты (10)–(13). Таким образом, форма фазного тока ВГ-9К определена, и на этой основе может быть вычислено его действующее

значение. Несложно убедиться, что оно равно действующему значению тока с формой «меандр» и максимальным значением $0,5I_{d0}$:

$$I_{я.ф(9)} = 0,5I_{d0}. \quad (14)$$

Полученный на основе ИКМ результат незначительно отличается от (14):

$$I_{я.ф(9)} = 0,496I_{d0}. \quad (14a)$$

Небезынтересно отметить два особых момента в данной структуре ВГ-9К: взаимосвязь линейного тока (7) с фазным (6) в численном отношении выглядит необычно – линейный ток несколько меньше фазного, что, однако, не сопровождается нарушением закона Кирхгофа; одно и то же (общее) напряжение на двух параллельных ветвях (всегда имеющих место) не создает предпосылок для протекания уравнивающего тока, так что несколько различающиеся по значению токи в ветвях имеют иную природу принудительного свойства. Заметим также, что при этом суммарные значения ампер-витков в обеих ветвях оказываются одинаковыми.

Габаритная мощность якорных обмоток ВГ-9К. С учетом (5), (14) определим искомую габаритную мощность (без учета падения напряжения на диодах ВБ):

$$S_{я(9)г} = 9U_{я.ф}I_{я.ф} = 9 \cdot 40,2468U_{d0} \cdot 0,5I_{d0} = 1,1106P_{d0}. \quad (15)$$

По результатам ИКМ

$$S_{я(9)г} = 9U_{я.ф(9)}I_{я.ф(9)} = 9 \cdot 40,250U_{d0} \cdot 0,496I_{d0} = 1,116P_{d0}. \quad (15a)$$

Как видно, расхождение в результатах меньше 0,5%, что дает основание считать проведенное исследование корректным. Дополнительным подтверждением могут служить представленные на рис. 4 результаты ИКМ рабочих процессов в ВГ-9К ($P_{d0} = 6$ кВА; $f = 400$ Гц; $U_{d0} = 270$ В), которые иллюстрируют соответствие основных процессов проектному замыслу. На рис. 4 $i_{ф1}(t)$, $u_{ф1}(t)$ – фазные ток и напряжение якорной обмотки; u_{A9A5} и u_{A2A6} – четыре из девяти линейных напряжений на входе ВБ; $i_{л1}(t)$ – один из девяти линейных токов; $u_d(t)$, $i_d(t)$ – напряжение и ток на выходе ВБ; $U_{dmax(18)}$, $U_{dmin(18)}$, U_{d0} , DU_d – максимальное и минимальное значения, постоянная составляющая и уровень пульсации выпрямленного напряжения соответственно; $I_{л1}$, $I_{ф1}$, $U_{ф1}$, $U_{л}$ – действующие значения фазных и линейных токов и напряжений; Du_{VD} – падение напряжения в одном диоде. Кроме того, правомерность полученного модельного описания дополнительно подтвердим проверкой его на вы-

полнение критерия энергетического баланса, согласно которому активные входная и выходная мощности МЭГС по основным гармоникам должны быть равны:

$$9U_{я.ф(1)}I_{я.ф(1)} = U_{d0}I_{d0}. \quad (16)$$

Действующее значение основной гармоники фазного тока с формой «меандр» и максимальным значением $0,5I_{d0}$ [см. (14), рис. 3 и 4]

$$I_{я.ф(1)} = \frac{4}{\rho} \cdot 0,5 \frac{1}{\sqrt{2}} I_{d0} = 0,45016I_{d0}, \quad (17)$$

тогда, используя (5), (16) и (17), получаем искомое подтверждение с точностью до 4-го знака после запятой:

$$\begin{aligned} 9U_{я.ф(1)}I_{я.ф(1)} &= 9 \cdot 40,2468U_{d0} \cdot 0,45016I_{d0} = \\ &= 1,000017U_{d0}I_{d0}. \end{aligned} \quad (18)$$

Модифицированный вариант ВГ-9КМ. Предыдущий опыт исследований [5] показал, что при синтезе МЭГС класса ВГ использование принципа многоканального преобразования позволяет существенно улучшить их показатели качества. С той же целью используем этот принцип и в данном случае. Топология якорной обмотки ЭГ при этом остается той же, а ВБ расчленяется на три канала в виде трех трехфазных мостов. Одни одноименные по полярности выходные выводы мостов через три магнитосвязанные обмотки одного трехфазного трансформатора ($ТТФ1$) подключены к одному выходному выводу ВГ-9КМ, а три других выходных вывода через обмотки аналогичного $ТТФ2$ подключены к другому его выходному выводу (рис. 5). На входы трех мостов от якорной обмотки подаются три трехфазные системы напряжений, сдвинутые относительно друг друга на угол $2\pi/9$. Заметим, что в отличие от [5] использовать один $ТТФ$ не удается.

Что можно ожидать от такой структуры? При сохранении функциональной характеристики – уменьшения искажений тока якорных обмоток и их расчетной мощности. Проверим эту прогнозируемую потенциальную возможность.

Взаимосвязь между фазным и выпрямленным напряжением. Процесс преобразования 9-фазного напряжения в постоянное здесь выглядит иначе. Выпрямительные мосты здесь работают независимо друг от друга, т.е. в режиме отдельно работающего моста, с формой входных (линейных) токов «квазимеандр» с паузой $\rho/3$ между полуволнами и максимальным значением тока $I_{d0}/3$ (рис. 7). Три трехфазные системы напряжений, подаваемые на входы мостов, показаны на векторной диаграмме пунктирными линиями (рис. 6). Определим взаи-

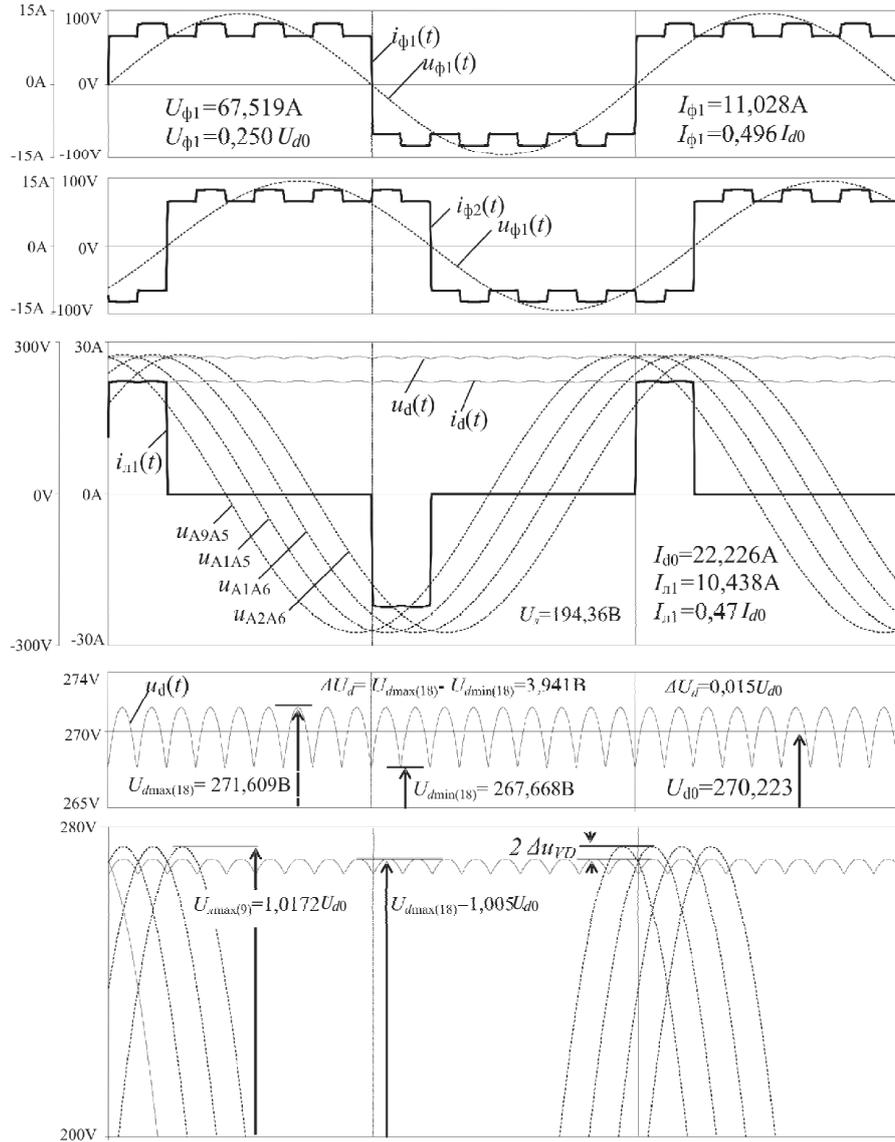


Рис. 4

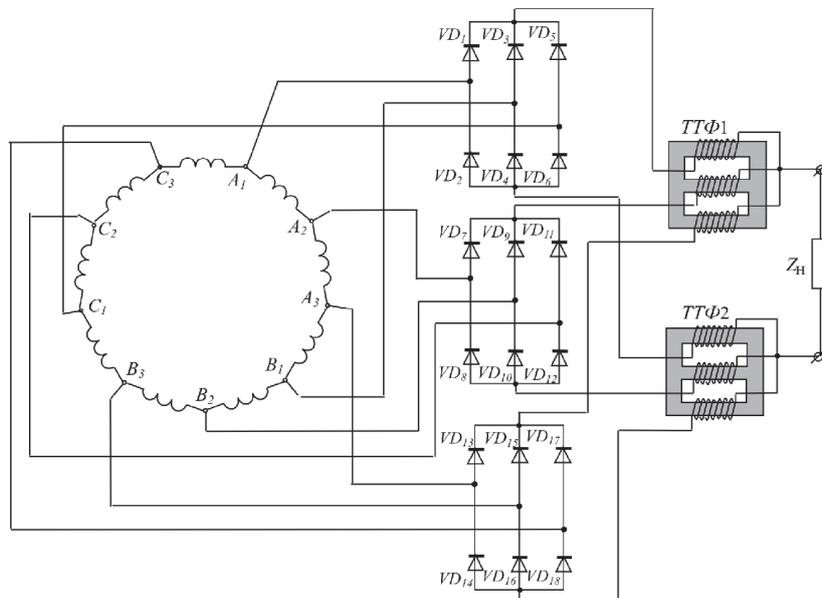


Рис. 5

мосвязь между векторами A_1B_1 и A_1A_2 . Из треугольника $D0A_1B_1$ следует:

$$\frac{A_1B_1}{\sin 120^\circ} = \frac{0A_1}{\sin 30^\circ}; A_1B_1 = \frac{\sin 120^\circ}{\sin 30^\circ} 0A_1. \quad (19)$$

Из $D0A_1A_2$ находим:

$$\frac{0A_1}{\sin 70^\circ} = \frac{A_1A_2}{\sin 40^\circ}; 0A_1 = \frac{\sin 70^\circ}{\sin 40^\circ} A_1A_2. \quad (20)$$

Из (19), (20) следует:

$$A_1B_1 = \frac{\sin 120^\circ}{\sin 30^\circ} 0A_1 = \frac{\sin 120^\circ \sin 70^\circ}{\sin 30^\circ \sin 40^\circ} A_1A_2 = 2,532 A_1A_2. \quad (21)$$

Из (21) получаем искомую взаимосвязь:

$$K_{сх} = \frac{A_1B_1}{A_1A_2} = \frac{U_{я.л(3)m}}{U_{я.ф(9)m}} = 2,532, \quad (22)$$

где $U_{я.л(3)m}$, $U_{я.ф(9)m}$, – максимальные значения линейного напряжения 3-фазной системы (определяемого, например, вектором A_1B_1 – рис. 6) и фазного напряжения 9-фазной обмотки (вектор A_1A_2).

На рис. 8 приведены результаты ИКМ ВГ-9КМ с ТТФ1, ТТФ2 при мощности $P_{d0} = 10$ кВт, $f = 50$ Гц, $U_{d0} = 540$ В, $U_{dmax(6)} = 565,645$ В, $U_{dmin(6)} = 489,664$ В, $U_{dmax(18)} = 542,825$ В, $U_{dmin(18)} = 534,571$ В, $S_{я(9)г} = 9S_{ф.г} = 10,18$ кВА, $S_{я(9)г} = 1,017P_{d0}$.

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения ВГ-9КМ $U_{d0(18)}$ в данном решении определяется постоянной составляющей выпрямленного напряжения выпрямительных мостов (рис. 8):

$$U_{d0(18)} = U_{d0(6)} = \frac{2m}{p} \sin \frac{p}{2m} U_{я.л(3)m} \Big|_{m=3} =$$

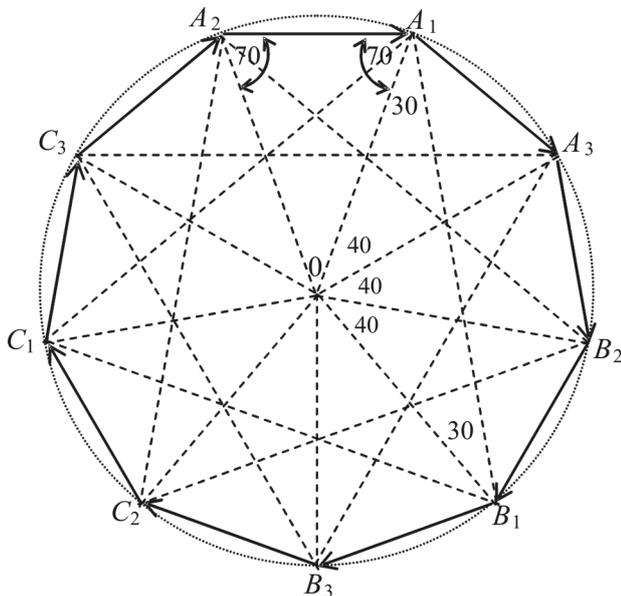
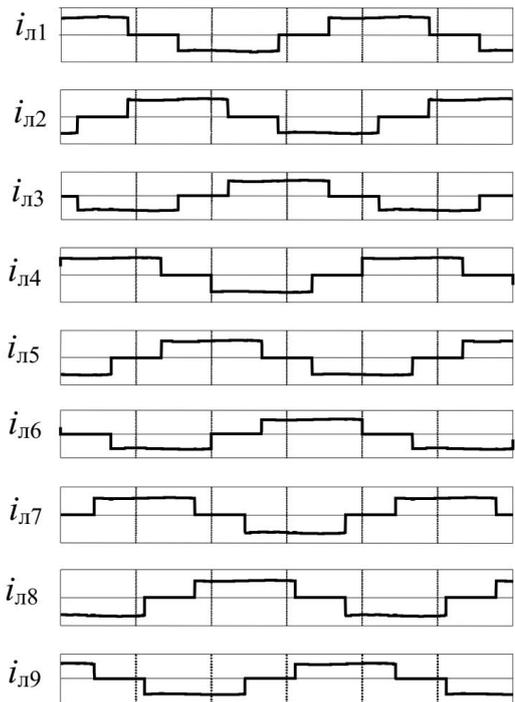


Рис. 6

Линейные токи



Фазные токи

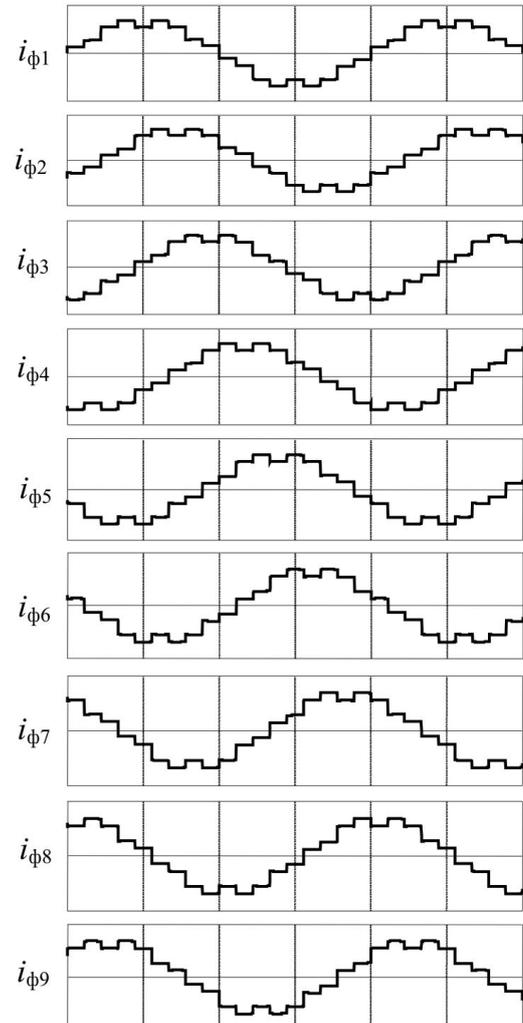


Рис. 7

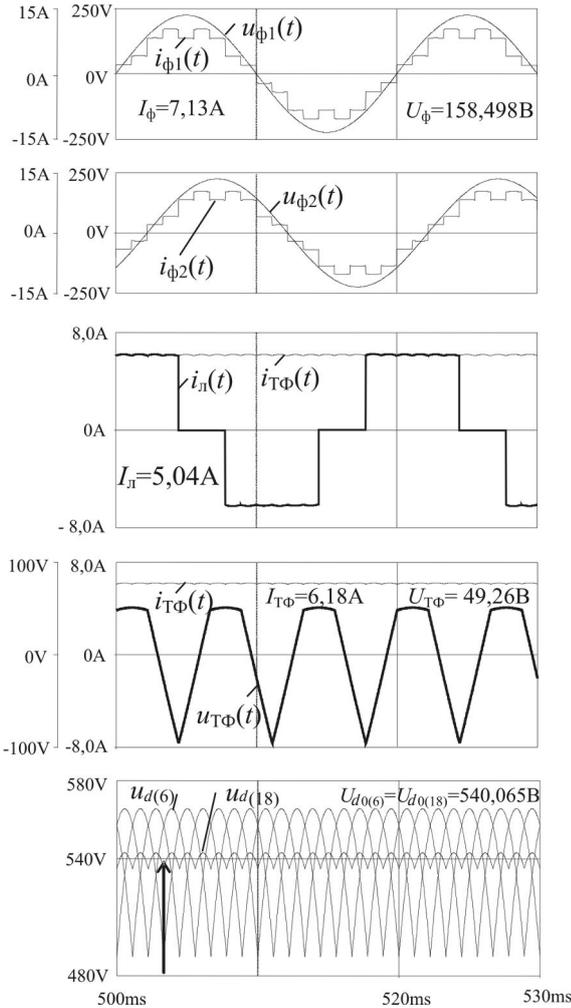


Рис. 8

$$= \frac{6}{p} \sin \frac{p}{6} U_{\text{я.л}(3)m} = 0,9549 U_{\text{я.л}(3)m}. \quad (23)$$

Из (22) и (23) следует:

$$U_{d0(18)} = 0,9549 K_{\text{сх}} U_{\text{я.ф}(9)m} = 0,955 \Psi_{5,32} U_{\text{я.ф}(9)m} = 2,4178 U_{\text{я.ф}(9)m}, \quad (24)$$

где $0,955 K_{\text{сх}} = 2,4178 = K_{d(6)\text{С}}$ — результирующий коэффициент выпрямления.

Из (24) получим действующее значение фазного напряжения:

$$U_{\text{я.ф}(9)} = \frac{U_{d0(18)}}{\sqrt{2} \Psi_{4,178}} = 0,29246 U_{d0(18)} \gg 0,2925 U_{d0(18)}. \quad (25)$$

На основе ИКМ (с учетом падения напряжения) получено:

$$U_{\text{я.ф}(9)} = 0,2935 U_{d0(18)}. \quad (25a)$$

Определение параметров фазного тока ВГ. Результаты исследования на основе ИКМ представле-

ны осциллограммами на рис. 7 и 8. Форма линейных токов имеет вид квазимеридиана с паузой $2p/3$ между его полуволнами (т.е. имеет вид импульсов со скважностью 1,5) с максимальным значением тока $I_{d0}/3$ и действующим его значением:

$$I_{\text{л}} = \frac{I_{d0}}{3\sqrt{s}} = \frac{I_{d0}}{3\sqrt{1,5}} = 0,2722 I_{d0}. \quad (26)$$

Фазные токи имеют девятиступенчатую (на полупериоде) форму с действующим значением, которое определено на основе ИКМ:

$$I_{\text{я.ф}(9)} = 0,385 I_{d0}. \quad (27)$$

Габаритная мощность якорных обмоток ВГ-9КМ. Используя (25) и (27), находим искомую габаритную мощность:

$$S_{\text{я}(9)\text{Г}} = 9 U_{\text{я.ф}(9)} I_{\text{я.ф}(9)} = 9 \Psi_{4,2925} U_{d0} 0,385 I_{d0} = 1,0135 P_{d0}. \quad (28)$$

На основе ИКМ получено несколько большее (на 0,35%) значение, что с учетом падения напряжения на диодах ВБ и ожидалось:

$$S_{\text{я}(9)\text{Г}} = 9 U_{\text{я.ф}(9)} I_{\text{я.ф}(9)} = 9 \Psi_{4,2935} U_{d0} 0,385 I_{d0} = 1,0170 P_{d0}. \quad (29)$$

Форма напряжения на обмотках трансфилтров ТТФ1 и ТТФ2 такая же, как и в решении ВГ-9 [5], но его частота здесь в 2 раза меньше. При определении габаритной мощности двух трансфилтров использованы результаты ИКМ и методика [5]:

$$S_{\text{ТФС}} = 0,030 P_{d0}. \quad (30)$$

С учетом (29) и (30) получим суммарную габаритную мощность якорных обмоток ЭГ и обмоток трансфилтров (без учета падения напряжения на диодах ВБ):

$$S_{\text{С}} = S_{\text{я}(9)\text{Г}} + S_{\text{ТФС}} = (1,0135 + 0,03) P_{d0} = 1,0435 P_{d0}. \quad (31)$$

По результатам ИКМ (с учетом падения напряжения на диодах) получено:

$$S_{\text{С}} = S_{\text{я}(9)\text{Г}} + S_{\text{ТФС}} = (1,017 + 0,03) P_{d0} = 1,047 P_{d0}. \quad (32)$$

Об энергетической эффективности решения ВГ-9КМ. Известно, что отрицательное воздействие на энергетические характеристики ВГ оказывает индуктивность рассеяния якорных обмоток. Одним из существенных отличий рассмотренного здесь ВГ-9КМ от ВГ-9ЗМ, описанного в [5], является заметно меньшее число витков якорной обмотки. Обозначим число витков якорной обмотки

ВГ-9КМ через $w_{я.ф}^I$, а ВГ-9ЗМ [5] – $w_{я.ф}^{II}$. Поскольку индуктивность L_s рассеяния пропорциональна квадрату витков:

$$L_{s(я.ф)} \in w_{я.ф}^2, \quad (33)$$

то отношение индуктивностей указанных обмоток будет иметь вид

$$\frac{L_{s(я.ф)}^{II}}{L_{s(я.ф)}^I} \in \frac{3 \cdot w_{я.ф}^{II} \cdot \frac{U_{я.ф}^{II}}{U_{я.ф}^I}}{3 \cdot w_{я.ф}^I \cdot \frac{U_{я.ф}^I}{U_{я.ф}^I}} = \frac{3 \cdot U_{я.ф}^{II} \cdot \frac{U_{я.ф}^{II}}{U_{я.ф}^I}}{3 \cdot U_{я.ф}^I \cdot \frac{U_{я.ф}^I}{U_{я.ф}^I}} = K_{w(я.ф)}^2. \quad (34)$$

Таким образом, для требуемой оценки необходимо найти коэффициент $K_{w(я.ф)}^2$. При решении задачи используем значения фазных напряжений, полученные путем ИКМ. В ВГ-9ЗМ [5] это напряжение равно:

$$U_{я.ф}^{II} = 0,4275U_{d0}, \quad (35)$$

а в данном решении ВГ-9КМ:

$$U_{я.ф}^I = 0,2935U_{d0}. \quad (36)$$

Используя (35), (36), получаем:

$$K_{w(я.ф)}^2 = \frac{3 \cdot U_{я.ф}^{II} \cdot \frac{U_{я.ф}^{II}}{U_{я.ф}^I}}{3 \cdot U_{я.ф}^I \cdot \frac{U_{я.ф}^I}{U_{я.ф}^I}} = \frac{3 \cdot 0,4275U_{d0} \cdot \frac{0,4275U_{d0}}{0,2935U_{d0}}}{3 \cdot 0,2935U_{d0} \cdot \frac{0,2935U_{d0}}{0,2935U_{d0}}} = 2,1216. \quad (37)$$

Из (37) следует, что индуктивность одной якорной обмотки в решении ВГ-9КМ будет в 2,12 раза меньше, чем в решении ВГ-9ЗМ [5].

Таким образом, сопротивление коммутации в ВГ-9КМ ожидается меньше примерно в 2 раза, чем в прототипе ВГ-9ЗМ.

Поскольку угол коммутации диодов ϱ , ухудшающий энергетику преобразования, пропорционален не только параметру L_s , но и I_{d0} , то необходимо учесть ещё и значения токов I_k в момент коммутации. В обоих решениях этот ток одинаков и равен $I_k = I_{d0}/3$.

Что касается искажений фазного тока, то в рассмотренном решении ВГ-9КМ они в 1,5 раза меньше, чем в прототипе [5]: коэффициент гармоник тока $K_{Г(i)}$ равен 11% против 16%, а ближайшие по частоте 5-я и 7-я гармоники не превышают 7% (против 20% для 5-й и 14,3% для 7-й в прототипе).

Выводы. 1. Использование при структурном синтезе вентильных генераторов принципа многоканального преобразования при нечетном числе фаз ЭГ обеспечивает снижение габаритной мощности его якорной обмотки по сравнению с традиционным (одноканальным) принципом синтеза. При этом для конкретного случая ЭГ с числом фаз $m=9$ показано, что использование топологии якорной

обмотки «многоугольник» (иначе «кольцевой» схемы) по сравнению с «лучевой» схемой [5] дает выигрыш в габаритной (расчетной) мощности 2,9%.

2. В любой из двух указанных топологий якорных обмоток наиболее эффективно использовать нечетное число фаз ЭГ.

3. Из сравнения результатов проведенного анализа с результатами, полученными в [5], следует, что при прочих равных условиях:

фазный ток якорной обмотки при топологии «многоугольник» оказывается больше в 1,84 раза, а фазное напряжение в 1,46 раз меньше, чем в обмотке, рассмотренной в [5]. Данную информацию целесообразно учитывать при конкретно поставленном техническом задании на этапе выбора структуры ВГ;

предварительная оценка ожидаемого значения индуктивности рассеяния якорных обмоток ЭГ показывает, что в варианте ВГ-9КМ оно должно быть меньше, чем в прототипе ВГ-9ЗМ [5] примерно в 2 раза, что способствует улучшению энергетических показателей МЭГС (за счет уменьшения угла коммутации ϱ диодов ВБ).

4. Рассмотренное решение ВГ-9КМ может представлять интерес при построении машинно-электронных генерирующих систем повышенной мощности (см., например, [1, 2]).

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Хугорещкий Г.М., Воронов Г.Г. Шестифазные турбогенераторы. – Сб. «Электросила», 1969, № 28.
2. Левин А.М., Лейкин Б.В., Мясникова Н.И., Родштейн Л.А. Вопросы проектирования электропривода с автономным источником энергии. – Автоматизированный электропривод в народном хозяйстве. – Труды V Всесоюзной конф. по автоматизированному электроприводу, т. 1/Под общ. ред. М.Г. Чиликина, И.И.Петрова, М.Н. Соколова. – М.: Энергия, 1971, с. 194–197.
3. Рожнов Н.М., Русаков А.М., Сугробов А.М., Тыричев П.А. Вентильные генераторы автономных систем электроснабжения. – М.: Изд-во Московского энергетического института, 1996, 280 с.
4. Патент № 81011, Н02К 21/12 (РФ). Система генерирования постоянного тока/ С.Ф. Коныхин, Г.С. Мыщык. – БИ, 2009, № 8.
5. Маслов С.И., Мыщык Г.С., Хлаинг Мин У, Ян Найнг Мьинг. О влиянии топологии и числа фаз якорной обмотки на показатели качества вентильного генератора. – Электричество, 2014, № 2, с. 32–40.
6. Мыщык Г.С., Кью Зо Лин. Анализ структур вентильных генераторов. – Вестник Московского энергетического института, 2010, № 5, с. 85–96.
7. Маслов С.И., Мыщык Г.С., Хлаинг Мин У, Ян Найнг Мьинг. Методика сопоставительной оценки вариантов вентильного генератора с различной пульсностью выпрямленного напряжения. – Вестник Московского энергетического института, 2014, № 1, с.

[07.04.14]

А в т о р ы : Мыщык Геннадий Сергеевич окончил Московский энергетический институт (МЭИ) в 1964 г. Защитил в МЭИ в 2001 г. докторскую диссер-

тацию «Методология структурно-алгоритмического синтеза и анализа малоискажающих устройств силовой электроники для электротехнических комплексов автономных объектов». Профессор кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» НИУ «МЭИ».

Хлаинг Мин У защитил в НИУ «МЭИ» в 2009 г. кандидатскую диссертацию «Исследование эффективности использования промежуточного высокочастотного преобразования при построении статических преобразователей и систем на их основе». Докторант (с 2010 г.) кафедры «Электротехнические комплексы автономных объектов» НИУ «МЭИ».

Elektrichestvo (Electricity), 2015, No. 1, pp. 51–60.

A Converter-Fed Generator with a Ring Connection Arrangement of the Armature Windings and an 18-Pulse Rectified Voltage

G.S. MYTSYK and HLAING MIN U

In constructing generating systems involving combined use of electrical machines and electronic devices, in which a multiphase AC voltage is converted into a DC voltage, a so called ring connection diagram of the electrical generator armature windings is used. However, lack of evidence that such an arrangement has advantages over the widely used “beam” connection diagram may be one of factors limiting its wider use for practical applications. The article presents the results from studying the working processes in a converter-fed generator with a 9-phase armature winding connected according to a “ring” circuit arrangement made in two versions: in the traditional makeup (CFG-9R) and in the version using the multichannel conversion principle (CFG-9RM). Advantages of the CFG-9RM version are shown, and the model description necessary in designing the system is presented. Computer-aided simulation is used as a tool for solving the stated problems.

Key words: 9-phase electrical generator, rectifying unit, “ring” connection diagram, three-channel conversion, three-phase conversion, three-phase transfilter, model description, computer modeling, comparative assessment

REFERENCES

1. **Khutoretskii G.M., Voronov G.G.** *Shestifazhnye turbogeneratory (6-phase turbogenerators)*. Sbornik «Elektrosila» (Coll. «Elektrosila», 1969, No. 28).
2. **Levin A.M., Leikin B.V., Myasnikova N.I., Rodshtein L.A.** *Trudy V Vsesoyuznoi konf. po avtomatizirovannomu elektroprivodu / Pod red. M.G. Chilikina, I.I. Petrova, M.N. Sokolova (Proc. V All-Union conf. to Automatic Electric Drive / Edit. by M.G. Chilikin, I.I. Petrov, M.N. Sokolov)*. Moscow, Publ. «Energiya», 1971, pp. 194–197.
3. **Rozhnov N.M., Rusakov A.M., Sugrobov A.M., Tyrichev P.A.** *Ventil'nye generatory avtonomnykh system elektrosnabzheniya (Valve Generators of the Autonomous Systems of Electric Power Supply)*. Publ. of Moscow Power Engineering Institute, 1996, 280 p.

4. **RF Patent № 81011, HO2K 21/12.** *Sistema generirovaniya postoyannogo toka (Generation System)*/S.F. Konyakhin, G.S. Mytsyk. *Bulletint*, 2009, No. 8.

5. **Maslov S.I., Mytsyk G.S., Khlaing Min U, Yan Naing M'int.** *Elektrichestvo (Electricity)*, 2014, No. 2, pp. 32–40.

6. **Mytsyk G.S., K'o Zo Lin.** *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta (Bull. of Moscow Power Engineering Institute)*, 2010, No. 5, pp. 85–96.

7. **Maslov S.I., Mytsyk G.S., Khlaing Min U., Yan Naing M'int.** *Vestnik Moskovskogo energeticheskogo instituta (Bull. of Moscow Power Engineering Institute)*, 2014, No. 1, pp.

Authors: Mytsyk Gennadii Sergeevich (Moscow, Russia) – Doctor Techn. Sci., Professor from the «Electrical complexes of autonomous object» Department, Moscow Power Engineering Institute (MPEI).

Khlaing Min U (Union M'yanma) – Cand. Techn. Sci., MPEI.

