

НЕПОСРЕДСТВЕННЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С ИСКУССТВЕННОЙ И ЕСТЕСТВЕННОЙ КОММУТАЦИЕЙ В БЕСКОНТАКТНЫХ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫХ МАШИНАХ

Приведені порівняльний аналіз безпосередніх перетворювачів частоти з штучною та природною комутацією при циклічному алгоритмі управління, рекомендації по їх застосуванню в безконтактних асинхронізованих машинах з трифазними обмотками збудження. Перетворювачі з обмеженим числом повністю керованих вентилів мають великі втрати в захисних ланках вентилів, вони можуть застосовуватися в системах автоматичного регулювання збудження. Найкращу якість форми напруги і струму навантаження забезпечують перетворювачі з природною комутацією при модульованій вхідній напрузі, комбінованому потенційному з'єднанні обмоток джерела живлення і комбінованому способі управління тиристорами. При розділенні навантаження перетворювача на дві трифазні групи, парному числі фаз джерела живлення на одну фазу навантаження застосовуються мостові схеми перетворення. Регулювання струму навантаження здійснюється по струму збудження збудників і куту управління тиристорами. Перетворювачі можуть застосовуватися в потужних асинхронізованих двигунах і генераторах. У асинхронізованих компенсаторах можливе застосування діодно-тиристорних перетворювачів без передачі сигналів управління на оберткову частину. Найменше збільшення розрахункової потужності джерела живлення мають перетворювачі частоти без модуляції вхідної напруги. Проте вони мають низьку якість форми вихідної напруги при високому коефіцієнті потужності навантаження. Бібл. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключові слова: безконтактна асинхронізована машина, перетворювач, діод, транзистор, тиристор.

Приведены сопоставительный анализ непосредственных преобразователей частоты с искусственной и естественной коммутацией при циклическом алгоритме управления, рекомендации по их применению в бесконтактных асинхронизированных машинах с трехфазными обмотками возбуждения. Преобразователи с ограниченным числом полностью управляемых вентилей имеют большие потери в защитных цепях вентилей, они могут применяться в системах автоматического регулирования возбуждения. Наилучшее качество формы напряжения и тока нагрузки обеспечивают преобразователи с естественной коммутацией при модулированном входном напряжении, комбинированном потенциальном соединении обмоток источника питания и комбинированном способе управления тиристорами. При разделении нагрузки преобразователя на две трехфазные группы, четном числе фаз источника питания на одну фазу нагрузки применяются мостовые схемы преобразования. Регулирование тока нагрузки осуществляется по току возбуждения возбудителей и углу управления тиристорами. Преобразователи могут применяться в мощных асинхронизированных двигателях и генераторах. В асинхронизированных компенсаторах возможно применение диодно-тиристорных преобразователей без передачи сигналов управления на вращающуюся часть. Наименьшее увеличение расчетной мощности источника питания имеют преобразователи частоты без модуляции входного напряжения. Однако они имеют низкое качество формы выходного напряжения при высоком коэффициенте мощности нагрузки. Библ. 10, табл. 1, рис. 6.

Ключевые слова: бесконтактная асинхронизированная машина, преобразователь, диод, транзистор, тиристор.

Введение. Асинхронизированные машины с контактными кольцами (АСМ) применяются как генераторы крупных и автономных электроэнергетических систем, генераторы-двигатели гидроаккумулирующих станций, регулируемый электропривод, компенсаторы, электромеханические устройства связи энергосистем [1, 2]. Актуальна разработка и внедрение бесконтактных асинхронизированных машин (БАСМ).

БАСМ состоит из основной электрической машины (ОЭМ), возбудителя и автоматического регулятора возбуждения. Возбудители состоят из преобразователей частоты (ПЧ) и вспомогательных электрических машин. Синхронный (асинхронный) возбудитель содержит синхронную (асинхронную) машину.

Возбудители БАСМ разрабатываются на базе непосредственных ПЧ (НПЧ) с искусственной (НПЧИ) и естественной (НПЧЕ) коммутацией при циклическом алгоритме управления, который обуславливает применение простых устройств передачи сигналов управления на вращающуюся часть.

В работе [3] предложено применять диодно-транзисторные НПЧИ в возбудителях бесконтактных асинхронизированных турбогенераторов. В работах [4-6] показаны методы определения расчетных соот-

ношений и параметров защитных цепей вентилей преобразователей. В работах [6-7] показано, что диодно-транзисторные НПЧИ не могут применяться в возбудителях БАСМ в связи с большими потерями в защитных цепях вентилей. В НПЧЕ применяются комбинированное потенциальное разделение фаз источника питания и комбинированный закон управления тиристорами, при котором совместное управление встречно включенными тиристорами осуществляется при токах нагрузки меньших тока уставки [8]. НПЧЕ БАСМ работоспособны только при передаче активной мощности в обмотку возбуждения ОЭМ [9, 10]. В БАСМ средних и больших мощностей в обмотку возбуждения ОЭМ передается и реактивная мощность. Реактивная мощность передается в преобразователь только в асинхронизированных компенсаторах и турбогенераторах в режимах глубокого потребления реактивной мощности из сети [8-10]. НПЧЕ обеспечивает высокое качество формы тока нагрузки при низких величинах $\cos\varphi_n$. Неудовлетворительное качество формы кривой тока нагрузки при инфранизких частотах – один из недостатков НПЧЕ при циклическом алгоритме управления [8].

Высоким качеством формы кривой тока нагрузки при инфранизких частотах отличаются многофазные НПЧЕ с модулированным входным напряжением (НПЧЕМ) [8-10]. В мостовых тиристорных и диодно-тиристорных НПЧЕМ применяется четное число фаз источника питания на одну фазу нагрузки, разделенную на две трехфазные группы [5].

Работоспособность НПЧЕ и НПЧЕМ подтверждена результатами исследований математических моделей и физических макетов возбудителей БАСМ [8-10]. Однако в литературе недостаточно сопоставлена работа разных типов НПЧ в возбудителях БАСМ разных мощностей с разными диапазонами изменения скольжения.

Цель работы – сопоставительный анализ результатов исследований моделей многофазно-трехфазных НПЧ с искусственной и естественной коммутацией, разработка рекомендаций по применению НПЧ в возбудителях БАСМ разных мощностей.

Материал и результаты исследований. Схема замещения и векторные диаграммы ОЭМ показаны на рис. 1. Обозначения на схеме (рис. 1,а): U_{1C} , I_1 , U_{2C} , I_2 – напряжения и токи статора и ротора; r_1 , x_1 , r_2 , x_2 – активные и индуктивные сопротивления обмоток; s – скольжение; x_m , I_δ – сопротивление и ток намагничивающего контура; E_δ – результирующая ЭДС. Параметры ротора приведены к статору.

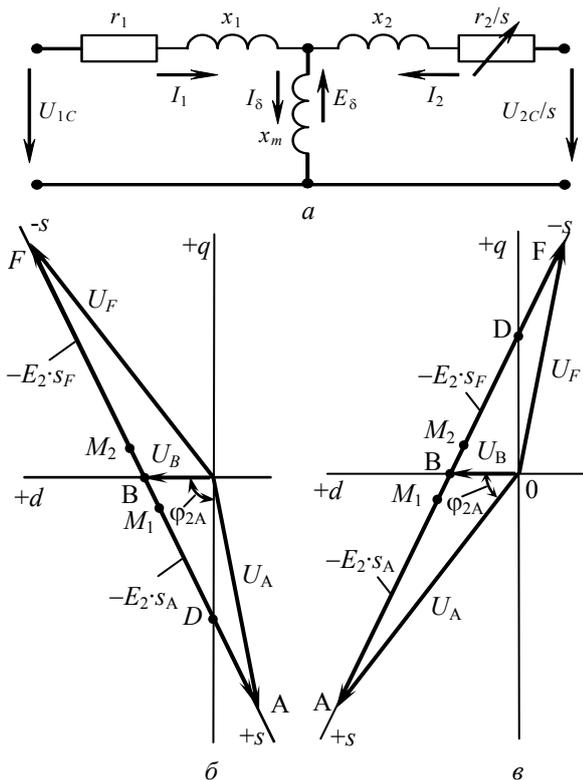


Рис. 1. Схема замещения (а) и векторные диаграммы ОЭМ (б, в)

Уравнения напряжений и намагничивающих сил:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 + \dot{E}_\delta - jI_1x_1 - I_1r_1 = 0 \\ \frac{\dot{U}_2}{s} + \dot{E}_\delta - jI_2x_2 - I_2\frac{r_2}{s} = 0, \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_\delta \end{cases} \quad (1)$$

откуда находим

$$\dot{U}_2 = I_2r_2 - \dot{E}_{2p} \cdot s, \quad (2)$$

где результирующая ЭДС ротора $\dot{E}_{2p} = \dot{E}_\delta - jI_2x_2$.

На рис. 1,б,в показаны векторные диаграммы ОЭМ бесконтактного асинхронизированного двигателя (БАСД) и генератора (БАСГ) при неизменных параметрах первичной сети. При скольжении $s = 0$ $U_2 = I_2r_2$ (точка В на рис. 1). При изменении скольжения конец вектора U_2 перемещается по линии напряжений AF, проведенной через точку В параллельно вектору \dot{E}_{2p} . В БАСД активная мощность передается от ПЧ в обмотку ротора при $s_D > s > -\infty$. В БАСГ активная мощность поступает в обмотку ротора при $\infty > s > s_D$. Нижними индексами обозначены скольжения величин, указанные точками на рисунках.

Нагрузка преобразователей частоты БАСМ средних и больших мощностей имеет индуктивный характер независимо от знака скольжения [8]. На рис. 2 показаны зависимости параметров нагрузки ПЧ БАСГ-250 от скольжения, где P_2 , Q_2 , S_2 – активная, реактивная и полная мощности, φ_2 – угол нагрузки. Зависимости построены при номинальной нагрузке БАСГ: $P_{1N} = 250$ кВт; $U_{1N} = 400$ В; $\cos\varphi_{1N} = 0,8$.

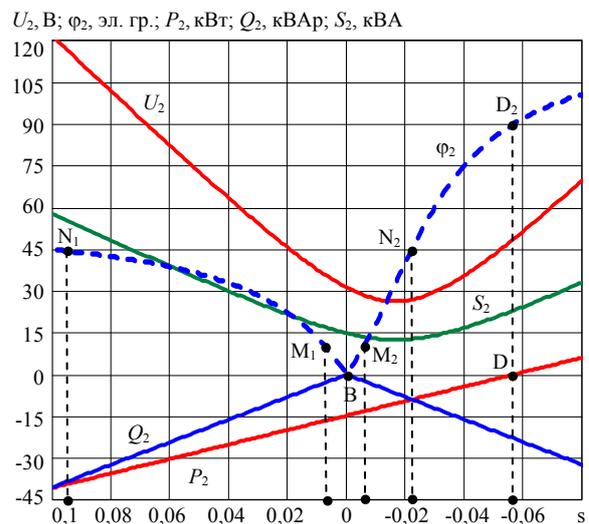


Рис. 2. Параметры ПЧ БАСГ мощностью 250 кВт в зависимости от скольжения

Схемы моделей НПЧ в программе Micro Cap показаны на рис. 3. На рис. 3,а приведена схема возбудителя с трехфазно-трехфазным тиристорно-транзисторным НПЧИ. При замене тиристорных на диоды получим схему диодно-тиристорного НПЧИ. При закорачивании транзисторов получим тиристорный НПЧЕ с нулевыми схемами преобразования [6, 7]. На рис. 3,б показана схема тиристорного НПЧЕ при переносе тиристорных на сторону нагрузки (An, Bn, Cn).

На рис. 3,в показана схема каскадного возбудителя с двенадцати-фазно-трехфазным мостовым НПЧЕМ. Нагрузка НПЧЕМ разделена на две трехфазные группы (A_{n1} , B_{n1} , C_{n1} и A_{n2} , B_{n2} , C_{n2}) [4]. На входы трех фазных тиристорных переключателей подаются три системы напряжений частоты заполнения, промодулированные трехфазной системой частоты биений напряжений.

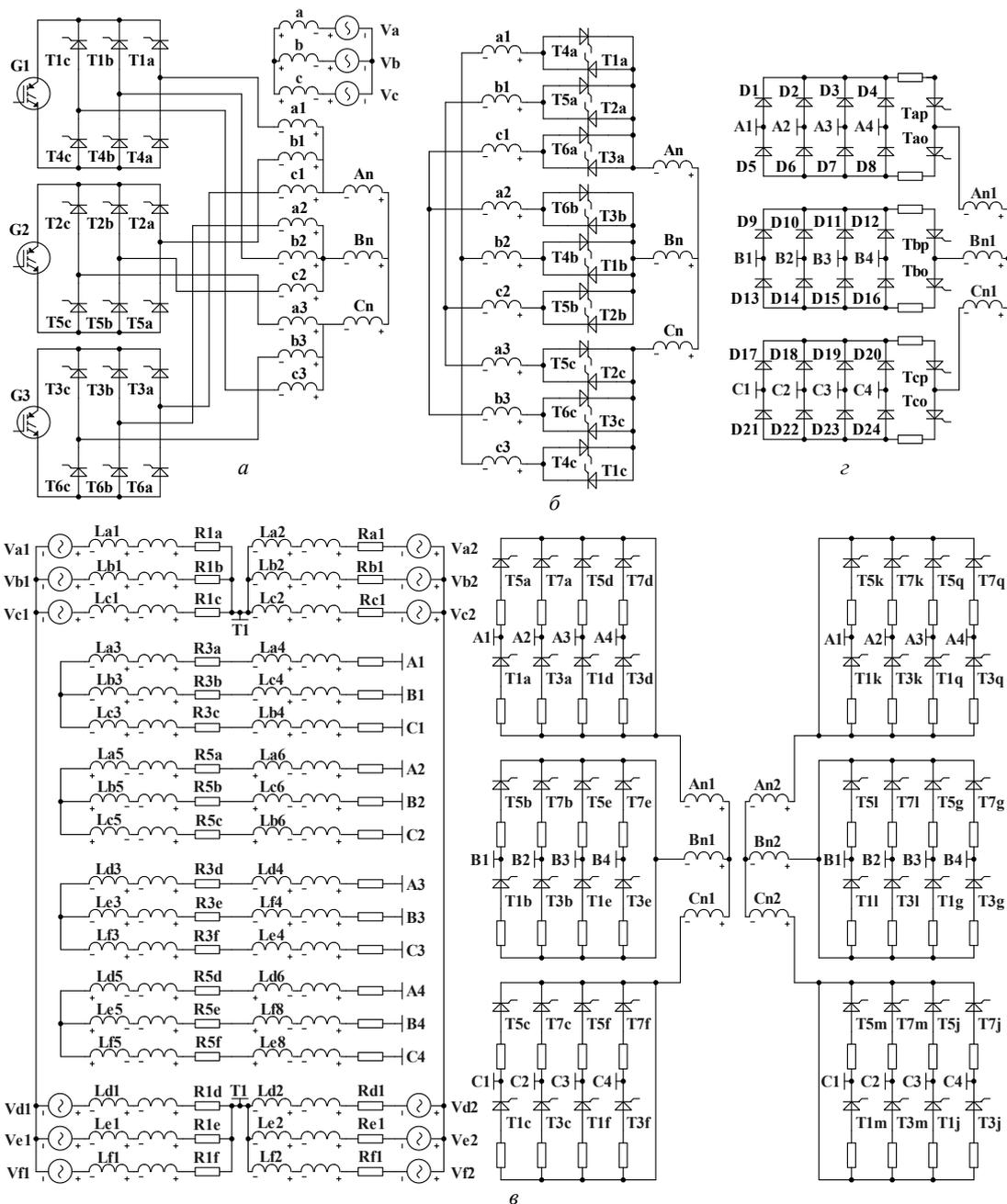


Рис. 3. Схемы моделей НПЧ с искусственной (а) и естественной коммутацией (б-з)

В режиме холостого хода:

$$\begin{aligned}
 e_{A1} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t) \cdot \cos(\omega_b t); \\
 e_{A2} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 90) \cdot \cos(\omega_b t); \\
 e_{A3} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 180) \cdot \cos(\omega_b t); \\
 e_{A4} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 270) \cdot \cos(\omega_b t). \\
 e_{B1} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t) \cdot \cos(\omega_b t - 120); \\
 e_{B2} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 90) \cdot \cos(\omega_b t - 120); \\
 e_{B3} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 180) \cdot \cos(\omega_b t - 120); \\
 e_{B4} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 270) \cdot \cos(\omega_b t - 120). \\
 e_{C1} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t) \cdot \cos(\omega_b t + 120); \\
 e_{C2} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 90) \cdot \cos(\omega_b t + 120); \\
 e_{C3} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 180) \cdot \cos(\omega_b t + 120); \\
 e_{C4} &= A_i \cdot \sin(\omega_z t + 270) \cdot \cos(\omega_b t + 120),
 \end{aligned}$$

(3)

где $\omega_z = 2\pi f_z$ – частота заполнения, $\omega_b = 2\pi f_b$ – частота биений напряжений, $f_z = |f_{21} + f_{22}|/2$, $f_b = |f_{21} - f_{22}|/2$, f_{21}, f_{22} – частоты ЭДС двух источников питания.

Частота нагрузки равна частоте скольжения ОЭМ, $f_n = f_s = f_b$. Частота управления тиристорами равна частоте заполнения (частоте источника) $f_u = f_z = f_i$.

На рис. 3,з показана схема одного фазного блока диодно-тиристорного переключателя НПЧЕМ [5, 10].

Исследование моделей НПЧ бесконтактных асинхронизированных генераторов проводим сначала при одинаковых параметрах источников питания и нагрузки. Числа пар полюсов ОЭМ $p = 2$, возбудителей и управляющих машин (УМ) $p_w = p_u = 4$. Частота сети $f = 50$ Гц, скольжение $s = 0,04$, частота скольжения $f_s = s f = 2$ Гц. Модели преобразователей построены в программе Micro Cap на транзисторах IRG4PH50S_IR, диодах MR2510 и тиристорах B25RIA120. Нагрузка НПЧ: $f_n = f_s = 2$ Гц; $z_n = 12,5$ Ом; угол нагрузки $\varphi_n = 24^\circ$.

В каскадном возбудителе применены два асинхронных возбудителя, на статорные обмотки которых подается напряжение частоты скольжения. Направления вращения полей противоположны. Частоты ЭДС якорных обмоток возбудителей:

$$f_{2w1} = p_w \cdot f(1-s) / p - f_s = 98 \text{ Гц};$$

$$f_{2w2} = p_w \cdot f(1-s) / p - f_s = 94 \text{ Гц}.$$

Сопротивление последовательно соединенных якорных обмоток (фаз источников питания) $z_i = 3 \text{ Ом}$; относительная величина активного сопротивления источника питания $k_r = r/x_i = 0,25$; амплитуды ЭДС источников питания $A_{i1} = A_{i2} = 55 \text{ В}$; наибольшая величина амплитуды ЭДС $A_i = A_{i1} + A_{i2} = 110 \text{ В}$; частота источника питания $f_i = f_3 = (f_{2w1} + f_{2w2})/2 = 96 \text{ Гц}$.

В БАСГ с тиристорным НПЧЕМ применена УМ синхронного типа с двумя обмотками возбуждения. Частота ЭДС якорной обмотки (частота управления)

$$f_u = p_u \cdot f(1-s) / p = 96 \text{ Гц}.$$

Угол управления тиристорами $\alpha_u = 0$.

Параметры возбудителей с НПЧЕ и НПЧИ:

$$f_u = 96 \text{ Гц}; f_i = f_u \pm f_s; A_i = 110 \text{ В}; z_i = 3 \text{ Ом}; k_r = 0,25.$$

Модель каскадного возбудителя применена также для исследования одномашинного возбудителя с НПЧЕ. Для этого принимается амплитуда ЭДС одного возбудителя $A_i = 110 \text{ В}$, в другом возбудителе $A_i = 0$.

Для ограничения внутренних перенапряжений диоды и тиристоры ПЧ шунтируют защитными $R_F C_F$ – цепями. Параметры защитных цепей НПЧЕ и НПЧЕМ принимают равными параметрам защитных цепей вентилях выпрямителей, рассчитанных при условии ограничения максимального обратного напряжения на вентилях при максимальном напряжении источника питания с учетом всех режимов работы выпрямителя.

В трехфазном мостовом выпрямителе [4, 5]:

$$C_{F \min} = \frac{4}{9} \cdot \frac{\tau^2}{L_i}; R_{Fm} = \frac{\sqrt{3} \cdot \tau}{C_{F \min}}; \quad (4)$$

$$C_{F3} = k_{CF} \cdot C_{F \min}; R_{F3} = R_{Fm}/k_{RF}. \quad (5)$$

Величина R_{Fm} определяется на границе периодического и аperiodического режимов переходного процесса в защитной цепи. При $k_{CF} = 4-6$ и $k_{RF} < k_{CF}$ коммутационные перенапряжения практически отсутствуют. Принимаем $k_{CF} = 6$, $k_{RF} = 0,8 \cdot k_{CF}$.

Емкость защитной цепи выпрямителя с нулевой схемой преобразования в два раза больше, чем в мостовом выпрямителе. В m -фазном выпрямителе [5]

$$C_{Fm} = 3 \cdot C_{F3}/m. \quad (6)$$

Расчет защитных цепей диодов и тиристоров моделей НПЧИ проводим из условия ограничения напряжений на вентилях на одинаковом уровне, меньшем допустимого повторяющегося напряжения.

В табл. 1 приведены результаты исследований НПЧ. Все величины определены по текущим средним значениям при интегрировании по времени в квазиустановившихся режимах работы [5]. Приняты такие обозначения величин: P_n, V_{in} – мощность и амплитуда тока нагрузки; p_G, p_D, p_T, p_f – потери на транзисторах, диодах, тиристорах и защитных цепях соответственно; η – коэффициент полезного действия НПЧ; T_{suG}, T_{suT} – длительности сигналов управления транзисторами и тиристорами в эл. градусах.

На рис. 4 показаны временные диаграммы напряжений и токов НПЧ: a – диодно-транзисторный НПЧИ; b – тиристорно-транзисторный НПЧИ при комбинированном способе управления тиристорами и удлинённом сигнале управления транзисторами; c – каскадный тиристорный НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования; d – каскадный диодно-тиристорный НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования.

На диаграммах обозначены: u_{nA} – напряжение нагрузки; $i_{nA}, i_{nB}, i_{nC}, i_{nAs} = (i_{nA1} + i_{nA2})/2, i_{nBs} = (i_{nB1} + i_{nB2})/2, i_{nCs} = (i_{nC1} + i_{nC2})/2$ – токи нагрузки; $e_{aa} = e_{a1} + e_{a2}, e_{bb} = e_{b1} + e_{b2}, e_{cc} = e_{c1} + e_{c2}$ – напряжения биений НПЧЕМ в режиме холостого хода; u_{G1}, u_{D1}, u_{T1a} – напряжения на транзисторе, диоде и тиристоре; i_{G1}, i_{D1a}, i_{T1a} – токи через транзистор, диод и тиристор; su – сигналы управления тиристорами прямого и обратного блоков.

Диодно-транзисторные НПЧИ обеспечивают высокое качество токов нагрузки как при $f_u < f_i$ (рис. 4, a), так и при $f_u > f_i$. НПЧИ работоспособны при изменении направления передачи активной мощности и неизменном законе изменения частоты f_u . Однако в связи с большими потерями в защитных цепях вентилях (по табл. 1 $p_F = 15,4\%$ от P_n) НПЧИ можно применять только в системах АРВ БАСМ.

В табл. 1 приведены результаты расчетов тиристорно-транзисторных НПЧИ при комбинированном способе управления тиристорами и разной длительности сигналов управления транзисторами ($T_{suG} = 120^\circ$ и $T_{suG} = 200^\circ$). При увеличении длительности сигналов управления транзисторами потери в защитных цепях уменьшаются более чем в 100 раз (п. №3 и №4 табл. 1). При сравнительно больших частотах нагрузки НПЧИ работает подобно НПЧЕ. Транзисторы «включаются в работу» при малых частотах нагрузки. Уменьшение амплитуды ЭДС источника питания, малая величина тока отключаемого тиристора на участке коммутации приводит к улучшению качества формы кривой тока нагрузки при ограниченных коммутационных перенапряжениях. Поэтому НПЧИ работоспособны при сравнительно малых частотах нагрузки. Однако в связи со сложностью силовой части и устройства управления НПЧИ не могут применяться в возбудителях БАСМ.

Потери в защитных цепях НПЧЕ и НПЧЕМ не превышают 0,05 % мощности нагрузки (п. №№ 5 – 8 табл. 1). Мощность нагрузки НПЧЕ превышает мощность нагрузки НПЧЕМ на 10 % при применении нулевых схем преобразования и на 20 % при применении мостовых преобразователей.

Отметим: при одинаковых электромагнитных нагрузках и наружных диаметрах магнитопроводов длина активной части вспомогательной электрической машины возбудителя с мостовым НПЧ примерно на 25 % меньше, чем в возбудителе на базе НПЧ с нулевыми схемами преобразования. Поэтому в мощных БАСМ рекомендуется применять возбудители с многофазными мостовыми НПЧЕ и НПЧЕМ. Однако с целью упрощения конструкции возбудителей в целом в БАСМ мощностью до 1000 кВт целесообразно применять НПЧ с нулевыми схемами преобразования.

Результаты расчетов моделей НПЧ

№ п/п	Параметры преобразователя	Расчетные величины и единицы измерения						
		P_n , Вт	V_{in} , А	p_G , %	p_D , %	p_T , %	p_F , %	η , %
Трехфазно-трехфазный диодно-транзисторный НПЧИ								
1	$f_u > f_i, T_{suG} = 120^\circ, k_{CF} = 96$	659,1	6,28	1,77	1,37	-	15,4	79,0
2	$f_u < f_i, T_{suG} = 120^\circ, k_{CF} = 96$	662,5	6,20	1,52	1,34	-	12,1	81,8
Трехфазно-трехфазный тиристорно-транзисторный НПЧИ								
3	$f_u < f_i, T_{suG} = T_{suT} = 120^\circ, k_{CF} = 240$	713,4	6,45	1,4	-	1,75	5,83	85,5
4	$f_u < f_i, T_{suG} = 200^\circ, T_{suT} = 120^\circ, k_{CF} = 6$	778,3	6,74	0,86	-	1,8	0,044	91,5
Многофазно-трехфазные каскадные тиристорные НПЧЕМ и НПЧЕ с нулевыми схемами преобразования								
5	$A_{i1} = A_{i2} = A, f_u = f_i, k_{CF} = 6$	703,2	6,41	-	-	1,7	0,025	93,3
6	$A_{i1} = 2A, A_{i2} = 0, f_u < f_i, k_{CF} = 6$	770,2	6,71	-	-	1,77	0,015	94,5
Многофазно-трехфазные каскадные тиристорные НПЧЕМ и НПЧЕ с мостовыми схемами преобразования								
7	$A_{i1} = A_{i2} = A, f_u = f_i, k_{CF} = 6$	1331	6,23	-	-	1,74	0,024	93,2
8	$A_{i1} = 2A, A_{i2} = 0, f_u < f_i, k_{CF} = 6$	1598	6,83	-	-	1,78	0,05	91,4
Многофазно-трехфазный каскадный диодно-тиристорный НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования								
9	$A_{i1} = A_{i2} = A, k_{CF} = 6$	1308	6,17	-	1,35	1,66	0,05	91,6

Качество формы тока возбуждения ОЭМ БАСМ зависит от типа НПЧ, диапазона изменения скольжения, соотношения параметров источника питания и нагрузки преобразователя.

НПЧЕ следует разрабатывать только при $f_u < f_i$, так как при $f_u > f_i$ получаем неудовлетворительное качество формы кривой тока нагрузки.

В БАСМ с синхронным возбудителем (СВ) и НПЧЕ применяется асинхронная УМ. Числа пара полюсов СВ и УМ одинаковые. На обмотку статора УМ подается напряжение частоты скольжения. Направление вращения поля статора УМ согласно с направлением вращения вала машины. При этом $f_u < f_i$. Амплитуда и фаза тока возбуждения ОЭМ регулируются величиной тока возбуждения СВ и фазой напряжения возбуждения УМ.

Качество формы кривой тока нагрузки НПЧЕ зависит от относительной величины сопротивления источника питания при номинальном (расчетном) скольжении $M_z = z_i/Z_n$ и от относительной величины активного сопротивления источника питания $k_r = r_i/x_i$.

Увеличение рабочего диапазона скольжения ОЭМ приводит к увеличению сопротивления источника питания, увеличению величины M_z . При этом в зоне малых скольжения происходит увеличению углов коммутации, ухудшается качество формы тока нагрузки НПЧЕ.

Исследуем модель двенадцати-трехфазного мостового НПЧЕ при разных величинах M_z . На рис. 5 показаны диаграммы токов нагрузки НПЧЕ, рассчитанные при:

а) принятых раньше параметрах ($Z_n = 12,5$ Ом, $\varphi_n = 24^\circ$, $M_z = 0,24$, $k_r = 0,25$, $A_{i1} = 110$ В, $A_{i2} = 0$ и др.);

б) изменении величин – $Z_n = 3$ Ом, $M_z = 1$, $A_{i1} = 40$ В.

Коэффициент нелинейного искажения тока нагрузки НПЧЕ составляет:

• $k_{in} = 3,84$ % при $M_z = 0,24$;

• $k_{in} = 8,16$ % при $M_z = 1$.

На рис. 6 показаны токи нагрузки двенадцати-трехфазного мостового НПЧЕМ при принятых раньше параметрах нагрузки ($Z_n = 12,5$ Ом, $\varphi_n = 24^\circ$) и изменении параметров источника питания:

а) $A_{i1} = A_{i2} = 90$ В, $M_z = 1$;

б) $A_{i1} = A_{i2} = 165$ В, $M_z = 0,24$, $\alpha_u = 70^\circ$.

Как видно из рис. 4,в и рис. 6, высокое качество формы токов нагрузки НПЧЕМ сохраняется как при увеличении относительной величины полного сопротивления источника питания до значения $M_z = 1$, так и при угле управления тиристорами $\alpha_u = 70^\circ$.

Регулирование тока нагрузки НПЧЕМ углом управления тиристорами α_u возможно при угле нагрузки $\varphi_n < 30^\circ$. При $\varphi_n = 30^\circ \div 45^\circ$ высокое качество формы токов нагрузки обеспечивается при упреждающем угле управления $\alpha_u = -(0 \div 40^\circ)$ [8].

Диодно-тиристорные НПЧЕМ обеспечивают высокое качество токов нагрузки (рис. 4,з). В БАСМ отсутствует устройство передачи сигналов управления на вращающуюся часть [4, 10]. Амплитуда и фаза тока возбуждения ОЭМ регулируются напряжением статорных обмоток возбудителей. Однако НПЧЕМ работоспособны только при $\varphi_{2n} < 30^\circ$. Принципиально возможно применение НПЧЕМ в бесконтактных асинхронизированных компенсаторах.

Выбор типа НПЧ зависит от мощности, режима работы и диапазона изменения скольжения БАСМ.

На рис. 2 точками N_1 и N_2 (скольжения s_{N1} и s_{N2}) ограничена зона работы БАСГ при угле нагрузки НПЧЕМ $\varphi_n = 0 \div 45^\circ$. При этом коэффициент изменения скорости вращения вала генератора $k_n = n_{max}/n_{min} = 1,12$. При $\cos\varphi_{1N} = 0,9$ $k_n \approx 1,25$.

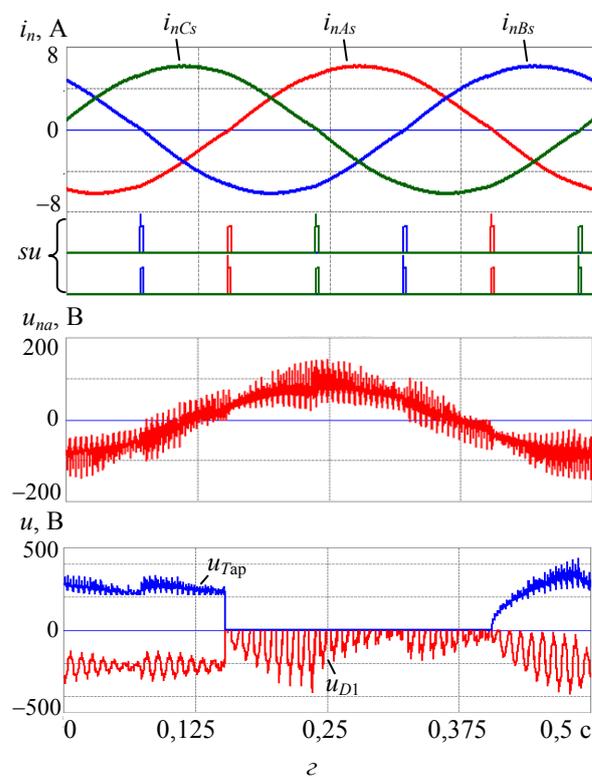
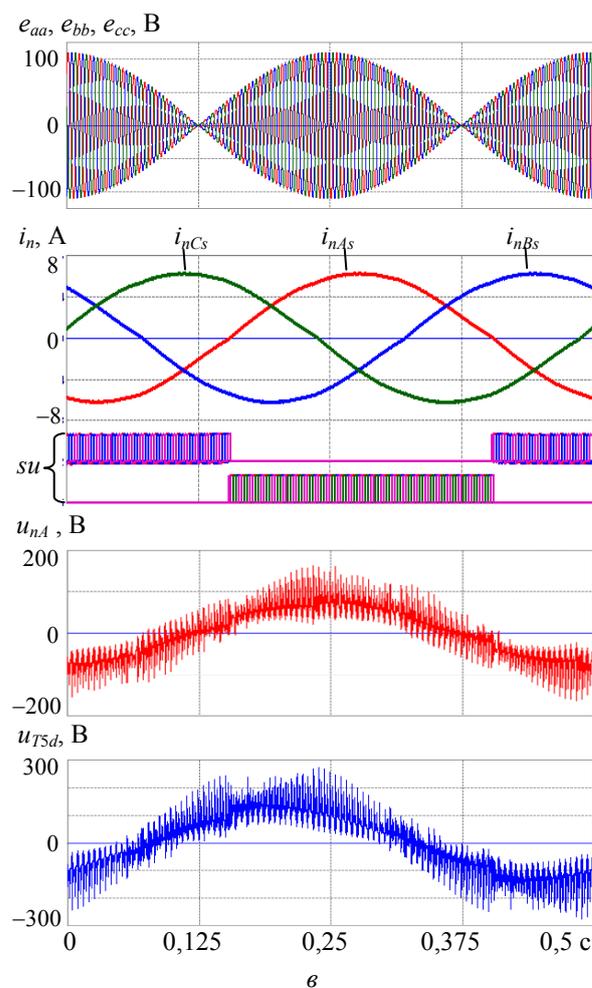
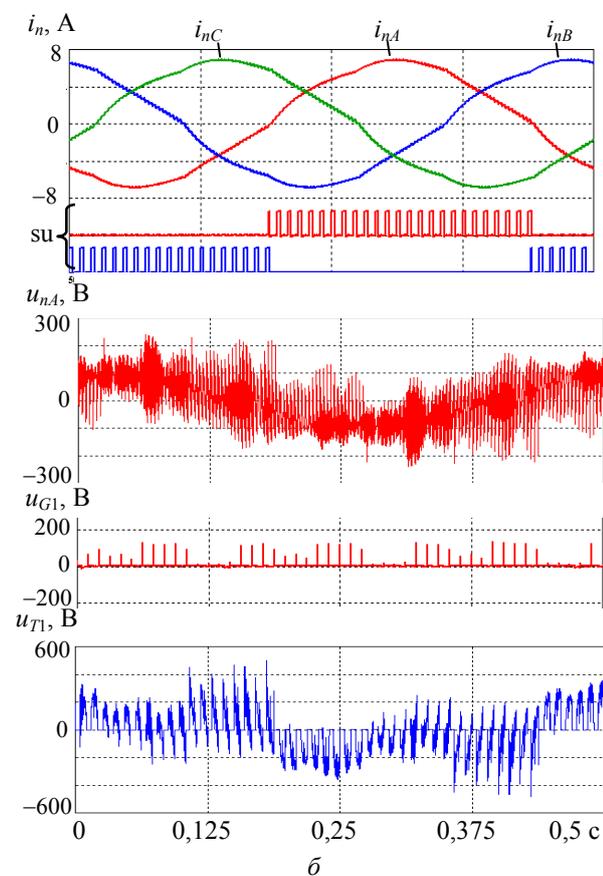
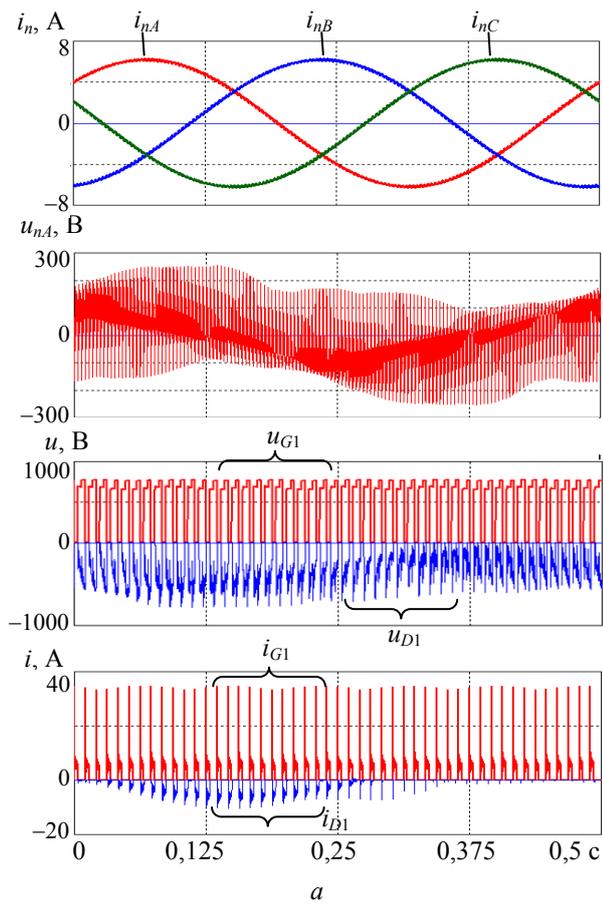


Рис. 4. Напряжения и токи НПЧ: а – диодно-транзисторный НПЧ при $f_u < f_i$; б – тиристорно-транзисторный НПЧ при комбинированном управлении, $T_{suG} = 200^\circ$, $T_{suT} = 120^\circ$, $f_u < f_i$; в – тиристорный НПЧЕМ; г – диодно-тиристорный НПЧЕМ

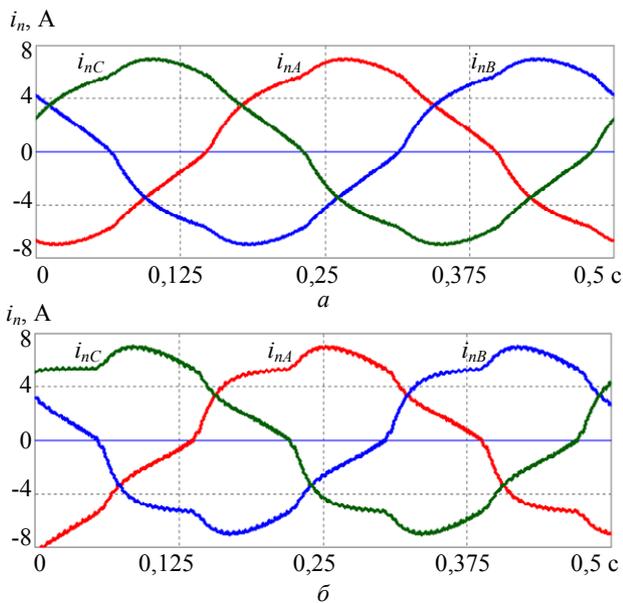


Рис. 5. Токи нагрузки мостового НПЧЕ при разных соотношениях параметров источника питания и нагрузки

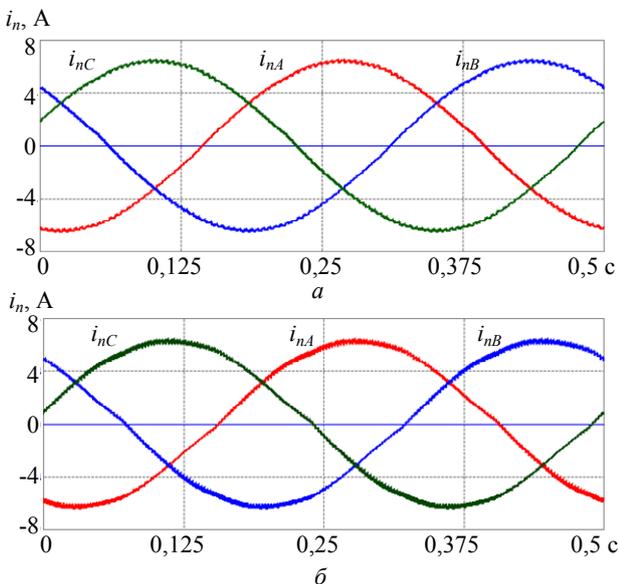


Рис. 6. Токи нагрузки мостового НПЧЕМ при разных параметрах источника питания

Возбудители с НПЧЕ могут работать в двух зонах рабочих скольжений БАСМ. На рис. 1, в и рис. 2 показаны зоны рабочих скольжений БАСГ: $s_A \div s_{M1}$ – зона положительного скольжения; $s_{M2} \div s_{MD}$ – зона отрицательного скольжения. Зоны рабочих скольжений БАСД (рис. 1, б): $s_{MD} \div s_{M1}$; $s_{M2} \div s_{MF}$. Зоны $s_{M1} \div s_{M2}$ – нерабочие зоны НПЧЕ в БАСГ и БАСД.

Особенности работы преобразователей учитываются при разработке БАСМ. Например, в [10] рекомендуется работа бесконтактного асинхронизированного турбогенератора при скольжениях: $s = 0$ в режиме глубокого потребления реактивной мощности; $s < 0$ при выдаче реактивной мощности в сеть. При этом обеспечивается: равномерный нагрев трехфазных обмоток возбуждения ОЭМ в номинальном режиме и режимах выдачи реактивной мощности; высокое качество формы кривых токов нагрузки НПЧЕМ во всех режимах работы.

БАСГ автономных газоза энергетических установок разрабатываются на базе НПЧЕМ с нулевыми схемами преобразования.

Перспективна разработка бесконтактных асинхронизированных генераторов-двигателей гидроаккумулирующих станций [2] на базе каскадных возбудителей с мостовыми НПЧЕМ. Устранение высоковольтных щеточно-контактных узлов существенно повысит надежность работы агрегатов.

Выводы.

1. Диодно-транзисторные НПЧИ, обеспечивающие высокое качество токов нагрузки при изменении направления передачи активной мощности, рекомендуется применять в системах АРВ БАСМ.

2. В возбудителях БАСМ могут применяться многофазно-трехфазные НПЧЕ и НПЧЕМ с мостовыми и нулевыми схемами преобразования.

3. Возбудители бесконтактных асинхронизированных турбогенераторов, компенсаторов и электромеханических устройств связи энергосистем можно построить только на базе НПЧЕМ. В указанных устройствах рекомендуется применять многофазные мостовые НПЧЕМ с управлением по напряжению возбуждения возбудителей и углу управления тиристорами.

4. В возбудителях БАСМ мощностью до 1000 кВт рекомендуется применять НПЧЕ и НПЧЕМ с нулевыми схемами преобразования.

5. Достоинство возбудителей с НПЧЕ – высокое качество формы кривой тока нагрузки при малых величинах $\cos\phi_n$, недостаток – неработоспособность в зоне малых скольжений БАСМ. Достоинство каскадных возбудителей с НПЧЕМ – работа в зоне изменения знака скольжения БАСМ, недостаток – увеличенные габариты. Актуальна разработка совмещенных возбудителей БАСМ с достоинствами возбудителей на базе НПЧЕ и НПЧЕМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А. Внедрение асинхронизированных генераторов и компенсаторов на объектах единой энергетической системы // Энергетик. – 2005. – №6. – С. 12-19.
2. Абубакиров Ш.И. Опыт и перспективы использования асинхронизированных гидрогенераторов в проектах ОАО «Институт Гидропроект» // Гидротехника. – 2010. – №2. – С. 6-11.
3. Савельев Ю.Е., Быков С.В., Зозулин Ю.В., Козлов Ю.А. Устройство для возбуждения асинхронизированной синхронной машины. А.с. СССР № 1534744 5Н02Р 9/14. Оpubл. в БИ, №1, 1990.
4. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Методика расчета защитных цепей вентиля выпрямителя // Технічна електродинаміка. – 2005. – №4. – С. 43-50.
5. Галиновский А.М. Исследование электромашино-вентильных преобразователей бесконтактных синхронных и асинхронизированных машин в системе схемотехнического моделирования. // Електротехніка і електромеханіка. – 2013. – №5. – С. 23-29.
6. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Исследование моделей электромашино-вентильных преобразователей с ограниченным числом полностью управляемых вентилях // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – №5. – С. 22-29.
7. Ленская Е.А. Преобразователи частоты с искусственной коммутацией в системе возбуждения асинхронизированной машины // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. – 2012. – №1. – С. 40-45.

8. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Электромашино-вентильные преобразователи машин двойного питания (часть 2) // Гірничі електромеханіка та автоматика. – 2010. – №85. – С. 159-169.
9. Галиновский А.М., Бобер В.А., Дубчак Е.М. Режимы работы преобразователей частоты в бесконтактных асинхронизированных машинах с инфранизкими частотами возбуждения // Електромеханічні та енергозберігаючі системи. – 2012. – №2. – С. 56-61.
10. Галиновский А.М., Бобер В.А., Дубчак Е.М. Бесконтактный асинхронизированный турбогенератор с вращающимся преобразователем частоты в режимах глубокого потребления и выдачи реактивной мощности // Технічна електродинаміка. – 2015. – №1. – С. 72-77.

REFERENCES

1. Shakaryan Y.G., Labunets I.A. Implementation of asynchronous generators and condensers at the facilities of the Unified Energy System. *Energetik – Power Engineer*, 2005, no.6, pp. 12-19. (Rus).
2. Abubakirov Sh.I. Experience and prospects of use of asynchronous hydro generators in the projects of LTD «Institute Hydroproject». *Gidrotekhnika – Hydrotechnika*, 2010, no. 2, pp. 6-11. (Rus).
3. Savelyev Y.E., Bykov S.V., Zozulin Y.V., Kozlov Y.A. *Ustroystvo dlya vozvuzhdeniya asinhronizirovannoy sinhronnoy mashiny* [Device for the excitation of asynchronous a synchronous machine]. USSR Certificate of Authorship, no. 1534744, 1990. (Rus).
4. Galinovskiy A.M., Lenska E.A., Erhard Ayhofer. Methods of calculating protection circuits valves rectifier. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical electrodyamics*, 2005, no.4, pp. 43-50. (Rus).
5. Galinovskiy A.M. Research into valve-engine transducers of brushless synchronous and asynchronous machines in a circuit simulation system. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2013, no.5, pp. 23-29. (Rus).
6. Galinovskiy A.M., Lenska E.A., Erhard Ayhofer. Research on electric machine valve converters with a limited number of fully-controlled valves. *Elektrotekhnika i elektromekhanika – Electrical engineering & electromechanics*, 2006, no.5, pp. 22-29. (Rus).
7. Lenska E.A. Frequency converters with forced switching system excitation of asynchronous machines. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2012, no.1, pp. 40-45. (Rus).
8. Galinovskiy A.M., Dubchak E.M., Lenska E.A. Electric machine valve converters of machines dual power (Part 2). *Hirnycha elektromekhanika ta avtomatyka – Mining electrical engineering and automation*, 2010, no.85, pp. 159-169. (Rus).
9. Galinovskiy A.M., Bober V.A., Dubchak E.M. Modes of operation of frequency converters in the proximity of asynchronous machines with infra-low frequency excitation. *Elektromekhanichni i enerhozberihaiuchi systemy – Electromechanical and energy saving systems*, 2012, no.2, pp. 56-61. (Rus).
10. Galinovskiy A.M., Beaver V.A. Dubchak E.M. Brushless asynchronous turbine generators with rotary converter in modes of deep consumption and issuance of reactive power. *Tekhnichna elektrodynamika – Technical Electrodyamics*, 2015, no.1, pp. 72-77. (Rus).

Поступила (received) 30.03.2015.

Галиновский Александр Михайлович¹, к.т.н., доц.,
Ленская Елена Александровна², начальник отдела,
Мельник Николай Петрович³, председатель,
¹Национальный технический университет Украины
«Киевский политехнический институт»,

03056, Киев, просп. Победы, 37,
тел/phone: +38 044 2580154, e-mail: alga40@mail.ru

² Государственное агентство по энергоэффективности и энергосбережению Украины,

02094, Киев, ул. Краковская, д. 17, к. 207,

тел/phone: +38 044 5585835, e-mail: A_Lenskay@ukr.net

³ ФХ «Свитанок»,

03056, Киев, пр. Победы, 89/1,

тел/phone: +38 044 5229439, e-mail: svitrad2004@mail.ru

A.M. Galynovskiy¹, E.A. Lenskaya², N.P. Melnik³

¹ National Technical University of Ukraine «Kyiv Polytechnic Institute»,

37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine.

² State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine,

17, Krakovskaya Str., apt. 207, Kyiv, 02094, Ukraine.

³ FH «Svitanok»,

89/1, Prospect Peremohy, Kyiv, 03056, Ukraine.

Direct frequency converter with artificial and natural commutation for brushless asynchronous machines.

The comparative analysis of direct frequency converters with artificial and natural- switching term of the cyclical control algorithm is presented; the recommendations for their using in brushless asynchronous machines with three-phase winding are developed. Converters with a limited number of full-controlled valves have large losses in safety circuits of gates, they can be used in system of automatic excitation control. The best quality of voltage and current load are provided by converters with natural commutation using modulated input voltage, the combined potential compounds windings supply and the combined method of thyristor controlling. When the load is divided into two three-phase groups, an even number of phases of the power supply for single phase of the load are applied the bridge converter circuit. Regulation of the load current is carried out by the excitation current of field exciters and by the control angle of thyristor. Converters can be used in high-power asynchronous motors and generators. In asynchronous compensators it is possible to use diode-thyristor converters without transmitting the control signals to the rotating part. The frequency converters without modulation of input voltage have the smallest increase in rated capacity of power supply. However, they have a low quality form of the output voltage at high power factor of load. References 10, table 1, figures 6.

Key words: brushless asynchronous machine, inverter, diode, transistor, thyristor.