

**ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ЧАСТОТЫ С ИСКУССТВЕННОЙ КОММУТАЦИЕЙ
В СИСТЕМЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ АСИНХРОНИЗИРОВАННОЙ МАШИНЫ**

Е. А. Ленская

Национальное агентство по энергоэффективности и энергосбережению Украины
ул. Гонты, 1, г. Киев, Украина. E-mail: A_Lanskay@ukr.net

Приведены результаты исследований работы тиристорно-транзисторного непосредственного преобразователя частоты в системе возбуждения бесконтактной асинхронизированной машины. Исследования проведены при разных законах управления тиристорами, при низкой и инфранизкой частоте нагрузки преобразователя. Сопоставлены результаты исследований непосредственных преобразователей частоты с искусственной и естественной коммутацией.

Ключевые слова: асинхронизированная, преобразователь, коммутация, искусственная, естественная.

**ПЕРЕТВОРЮВАЧІ ЧАСТОТИ ІЗ ШТУЧНОЮ КОМУТАЦІЄЮ
В СИСТЕМІ ЗБУДЖЕННЯ АСИНХРОНІЗОВАНОЇ МАШИНИ**

О. О. Ленська

Національне агентство по енергоефективності та енергозбереженню України
вул. Гонти, 1, м. Київ, Україна. E-mail: A_Lanskay@ukr.net

Наведено результати досліджень роботи тиристорно-транзисторного безпосереднього перетворювача частоти в системі збудження бесконтактної асинхронізованої машини. Дослідження проведені при різних законах керування тиристорами, при низькій та інфранизкій частоті навантаження перетворювача. Співставлено результати досліджень безпосередніх перетворювачів частоти із штучною та природною комутацією.

Ключові слова: асинхронізована, перетворювач, комутація, штучна, природна.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. Одна из важных задач энергосберегающей технологии – разработка и внедрение бесконтактных асинхронизированных машин (БАСМ). БАСМ представляет собой электромеханический комплекс, состоящий из основной электрической машины, электромашинно-вентильного преобразователя (ЭМВП) и автоматического регулятора возбуждения. ЭМВП состоит из электромашинного возбудителя и вращающегося преобразователя частоты (ПЧ). Блок передачи и формирования сигналов управления ПЧ (БСУ) – составная часть ЭМВП, которая во многом определяет возможность создания БАСМ.

ЭМВП существенно упрощается при применении непосредственных ПЧ (НПЧ) с циклическим алгоритмом управления, обуславливающим применение простых БСУ [1–3, 6–10].

Высоким качеством формы выходного напряжения отличается ЭМВП с каскадным возбудителем и НПЧ с естественной коммутацией (НПЧЕ) и модулированным входным напряжением (НПЧЕМ) [7, 9, 10]. В НПЧЕМ применен комбинированный закон управления, при котором совместное управление встречно включенными тиристорами осуществляется при токе нагрузки меньшем тока уставки i_u . НПЧЕМ обеспечивают высокое качество формы выходного напряжения при коэффициенте мощности нагрузки $\cos\varphi_n \geq 0,75$ [9, 10]. Увеличенные габариты каскадных возбудителей ограничивают их применение в БАСМ малой и средней мощности.

В работе [8] рассмотрены ЭМВП БАСМ на базе одномашинных возбудителей и НПЧЕ. Величина напряжения ПЧ регулируется током возбуждения возбудителя. НПЧЕ отличаются высоким качеством формы тока нагрузки при промышленных и низких

частотах. Однако при инфранизких частотах форма кривой тока нагрузки несинусоидальная.

Высокое качество формы кривой тока нагрузки при инфранизких частотах обеспечивает диодно-транзисторный НПЧИ с «ограниченным числом полностью управляемых ключей» [1–3, 6]. НПЧИ строится на базе трех диодных мостовых выпрямителей, которые закорачиваются тремя транзисторами. В работе [3] предлагается применить НПЧИ в бесконтактной системе возбуждения асинхронизированного турбогенератора. В работе [6] показано, что НПЧИ не может быть применен в системе возбуждения БАСМ. Это связано с большими коммутационными перенапряжениями на диодах НПЧИ и потерями в их защитных цепях. Диод после уменьшения прямого тока до нуля остается открытым на интервале времени восстановления запирающих свойств τ_D . На этом интервале через вентиль протекает обратный ток, после чего сопротивление вентилля резко возрастает, а обратный ток падает. Из-за наличия индуктивности источника питания резкий обрыв обратного тока является причиной возникновения перенапряжения на вентиле. Во вращающемся выпрямителе бесконтактной синхронной машины наибольшая амплитуда обратного тока через диод $< 1\%$ тока к. з. выпрямителя [5]. При переходе тока через ноль перенапряжения на диоде без защитной цепи могут в несколько раз превысить напряжение холостого хода выпрямителя U_{d0} . Величина перенапряжений на диодах трехфазного мостового выпрямителя НПЧИ при разрыве номинального тока через диод транзистором превышают величину U_{d0} в десятки раз. Их можно уменьшить при применении мощного фильтра. Однако потери в фильтре могут составить 20 % и выше от мощности ПЧ [6, 8].

В работах [2, 8] исследуется НПЧИ с комбинированным законом управления тиристорами при изменении длительности сигнала управления транзисторами. Вместе с тем в литературе отсутствуют сведения об исследованиях тиристорно-транзисторных НПЧИ при разных законах управления тиристорами и транзисторами. Актуальным является сопоставительный анализ результатов исследований математических моделей НПЧИ с ограниченным числом полостью управляемых ключей и НПЧЕ.

Целью работы является сопоставительный анализ работы моделей тиристорно-транзисторного НПЧИ БАСМ при разных законах управления тиристорами, при низкой и инфранизкой частоте нагрузки.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Исследуем модели преобразователей в системе схемотехнического моделирования Micro Cap [4]. На рис. 1,а показана принципиальная электрическая схема тиристорно-транзисторного НПЧИ. При замене тиристоров на диоды получим диодно-тиристорный НПЧИ. При закорачивании транзисторов (рис. 1,а) получим схему тиристорного НПЧЕ (рис. 1,б).

В моделях НПЧ применяются диоды MR2510 ($\tau_D=5,7$ мкс), тиристоры B25RIA120 ($\tau_T=2,9$ мкс), транзисторы IRG4PH50S_IR. Параметры возбудителя: $E_m=80$ В, $f_i=144$ Гц – амплитуда и частота ЭДС; $L_{m1}=L_{m2}=1$ Гн – взаимные индуктивности обмоток; $L_{s1}=0$, $R_l=0$ – индуктивность рассеяния и активное сопротивление первичной обмотки; $z_i=3$ Ом – полное сопротивление вторичной обмотки (источника); $k_r=r_i/x_i=0,25$ – относительная величина активного сопротивления источника; $L_i=3,3$ мГн. Параметры нагрузки: $f_n=4$ Гц; $z_n=12,5$ Ом; $\cos\phi_n=0,906$. Фильтр нагрузки: $C_{fn}=0,5$ мкФ; $R_{fn}=0,1$ мОм; $L_{fn}=0,1$ мГн.

Параметры защитных цепей вентилях трехфазных мостовых выпрямителей по [4]. Минимальная емкость $C_{fmin}=(4/9)\cdot\tau^2/L_i$. При этом активное сопротивление $R_{fm}=\sqrt{3}\tau/C_{fmin}$. При $C_f=C_{fmin}$ величина напряжения на нагрузке и вентилях превышает амплитуду линейного напряжения источника на $\approx 30\%$. Коммутационные перенапряжения практически отсутствуют при $C_f=4-5 C_{fmin}$.

Расчет защитных $R_f C_f$ -цепей вентилях моделей НПЧ проводим из условия ограничения коммутационных напряжений на одинаковом уровне, меньшем допустимых повторяющихся напряжений на вентилях. Емкость и активное сопротивление защитной цепи: $C_f=k_{Cf}\cdot C_{fmin}$; $R_f=R_{fm}/k_{Rf}$. В диодно-транзисторном НПЧИ $k_{Cf}=k_{Rf}=25$, в тиристорно-транзисторном – $k_{Cf}=40$, $k_{Rf}=25$. В НПЧЕ $k_{Cf}=k_{Rf}=4$.

На рис. 3 показаны временные диаграммы напряжений и токов диодно-транзисторного НПЧИ (а), тиристорно-транзисторного НПЧИ (б-д) и тиристорного НПЧЕ (е) при параметрах управления:

- а) частота управления транзисторами $f_{uG}=140$ Гц $< f_v$, длительность сигналов управления $T_{suG}=120^\circ$;
- б) длительный сигнал управления всеми тиристорами, $f_{uT}=1$ Гц, $T_{suT}=360^\circ$, $f_{uG}=148$ Гц, $T_{suG}=120^\circ$;
- в) длительный сигнал управления всеми тиристорами, $f_{uT}=1$ Гц, $T_{suT}=360^\circ$, $f_{uG}=140$ Гц, $T_{suG}=120^\circ$;
- г) управление тиристорами по току нагрузки, уставка тока $i_u=0,1$ А, $f_{uG}=140$ Гц, $T_{suG}=120^\circ$;
- д) комбинированный закон управления тиристорами, уставка тока $i_u=0,1$ А, $f_{uT}=f_{uG}=140$ Гц, $T_{suT}=120^\circ$, $T_{suG}=120^\circ$, начала сигналов управления тиристором и транзистором синхронизированы;
- е) комбинированный закон управления тиристорами, уставка тока $i_u=0,1$ А, $f_{uT}=140$ Гц, $T_{suT}=120^\circ$.

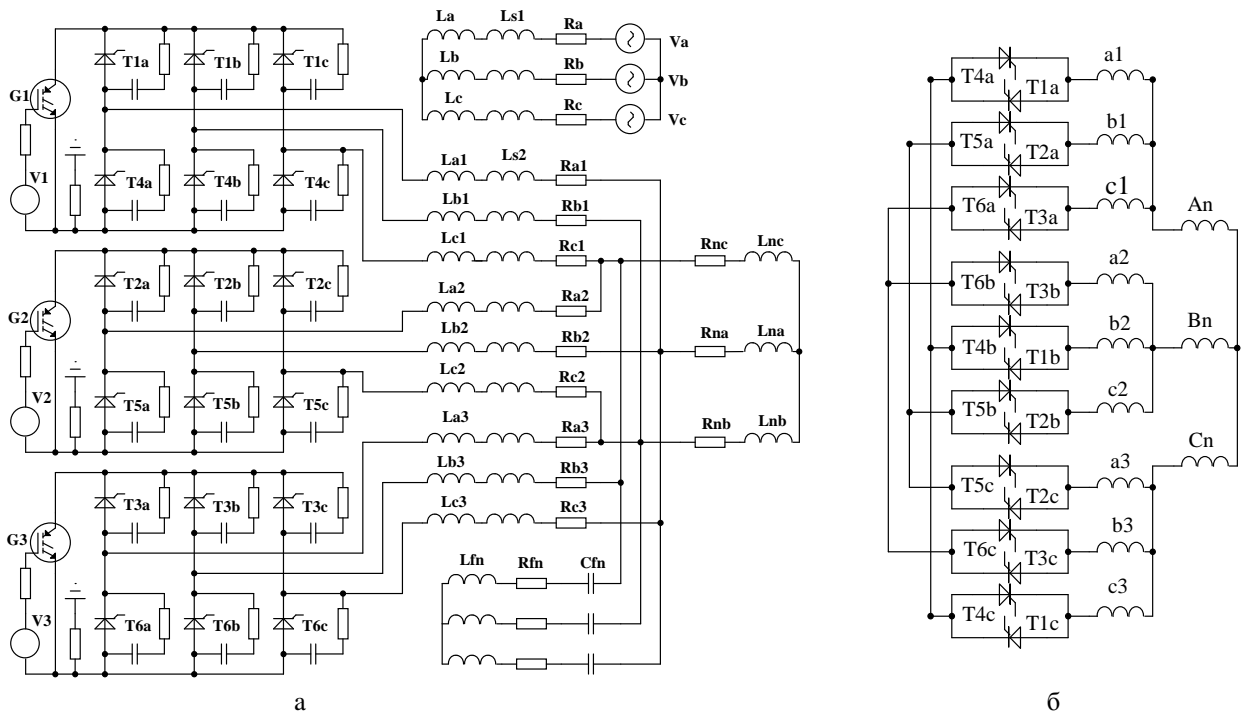


Рисунок 1 – Принципиальные электрические схемы НПЧИ (а) и НПЧЕ (б)

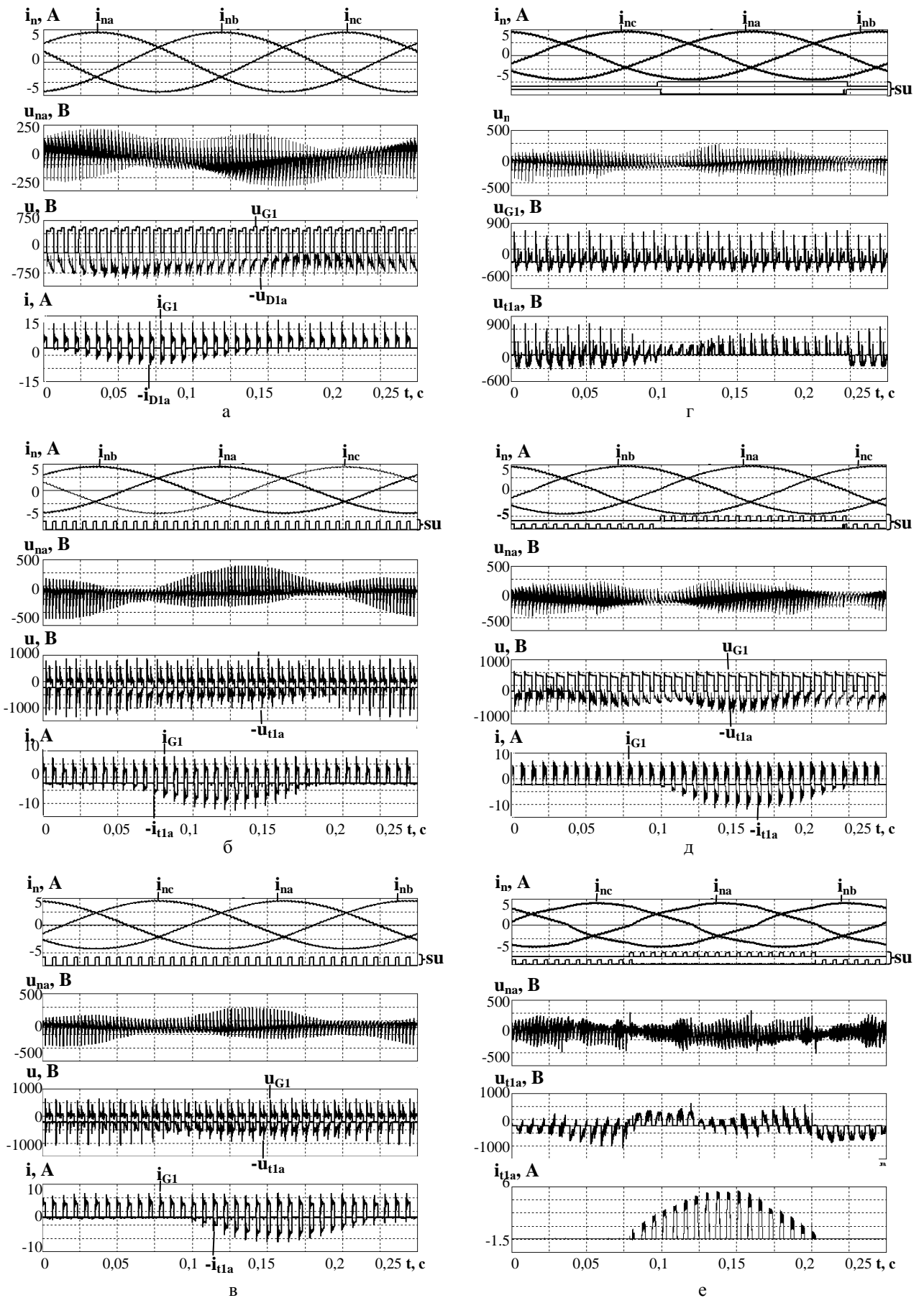


Рисунок 2 – Временные диаграммы напряжений и токов НПЧ: а) диодно-транзисторного НПЧИ; б – д) тиристорно-транзисторного НПЧИ при разных законах управления; е) тиристорного НПЧЕ

Таблиця 1 – Распределение мощностей в моделях НПЧИ и НПЧЕ

Величина	Ед. изм.	$f_i = 144 \text{ Гц}, f_n = 4 \text{ Гц}$						$f_i = 148.5 \text{ Гц}, f_n = 0.5 \text{ Гц}$	
		а	б	в	г	д	е	ж	з
$P_n = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{m_n} i_{ni}^2 \cdot R_n \right) dt \right] dt$	Вт	348,78	331,24	335,57	357,9	363,44	413,07	397,64	506,14
$p_i = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{m_i} i_{ii}^2 \cdot R_i \right) dt$	Вт	24,38	25,89	24,96	24,32	25,99	25,06	28,87	28
$p_w = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{n_D} u_{wi} \cdot i_{wi} \right) dt$	Вт	5,99	105,5	96,01	37,8	8,93	10,07	9,42	11,61
$p_G = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{n_G} u_{Gi} \cdot i_{Gi} \right) dt$	Вт	7,16	8,08	6,72	6,72	7,47	-	10,85	-
$p_f = \frac{1}{T} \int_0^T \left[\frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_{n_f} i_{fi}^2 \cdot R_{fi} \right) dt \right] dt$	Вт	33,78	23,88	15,12	15,75	21,9	0,26	36,29	0,20
$\sum p = p_i + p_w + p_G + p_f$	Вт	71,31	163,3	142,8	84,63	64,28	35,4	85,43	39,81
$P_l = P_n + \sum p$	Вт	420,09	494,57	478,38	442,53	427,72	448,47	483,06	545,94
$P_1' = \frac{1}{T} \int_0^T \left(\sum_m e_{ici} \cdot i_{ici} \right) dt$	Вт	418,72	494,62	478,53	442,53	429,59	448,89	485,68	544,95
$dp = 100 \cdot \left[\frac{P_1' - P_l}{P_1' + P_l} \right]$	%	0,16	0,005	0,02	0,0002	0,22	0,05	0,27	0,09
$\eta = 100 P_n / P_l$	%	83,3	66,97	70,12	80,88	84,6	92,02	81,87	92,88

Обозначения на диаграммах: $u_{na}, u_{G1}, u_{D1a}, u_{T1a}$ – напряжения на нагрузке, транзисторе, диоде, тиристор; i_{na}, i_{nb}, i_{nc} – токи нагрузки; i_{G1}, i_{D1a}, i_{T1a} – токи через транзистор, диод, тиристор; su – сигнал управления тиристором.

В табл. 1 показано распределение мощностей в моделях НПЧИ и НПЧЕ при $f_i = 144 \text{ Гц}, f_n = 4 \text{ Гц}$ в соответствии с диаграммами на рис. 3. Мощности на элементах схем определены по текущим средним значениям переменной при интегрировании по времени [5]. Вначале преобразователь рассчитывался до установившегося режима. Дальнейший расчет проводился с показаний фиксированной точки, время счета – 1 с. Обозначения величин: P_n – мощность нагрузки; $p_i, p_w, p_G, p_f, \sum p$ – потери в источнике, на вентилях (диодах или тиристорах), на транзисторах, на фильтрах, суммарные потери; P_l, P_1' – мощности источника, рассчитанные разными методами; dp – погрешность определения мощности источника; η – КПД преобразователей. В таблице приведены расчетные соотношения по определению величин, где i_{ni} – ток нагрузки i -й фазы, R_n – сопротивление нагрузки, i_{ii} – ток i -й обмотки трех трехфазных групп, R_i – сопротивление источника, $n_w = 18$ – общее число вентилях (диодов или тиристор), u_{wi}, i_{wi} – напряжение и ток на i -том вентиле, $n_G = 3$ – число транзисторов; u_{Gi}, i_{Gi} – напряжение и ток i -го транзистора, n_f – общее число фильтров, i_{fi}, R_{fi} – ток и сопротивление i -того фильтра, e_{ici}, i_{ici} –

ЭДС и ток i -й фазы статора, $m = 3$ – число фаз статора.

Как видно из данных табл. 1 и рис. 2, замена диодов на тиристоры с постоянными (длительными) сигналами управления приводит к уменьшению потерь на фильтрах до 2 раз. Это связано с меньшей величиной времени восстановления запирающих свойств тиристор. Однако более существенным является увеличение потерь на тиристорах. Замена диодов на тиристоры с постоянными сигналами управления приводит при $f_u < f_i$ к увеличению потерь на тиристорах примерно в 16 раз. При этом $p_T / p_f \approx 6$, КПД преобразователя уменьшается с 83,3 до 70,1 %.

В тиристорно-транзисторном НПЧИ потери на тиристорах существенно снижаются при управлении тиристорами по току нагрузки. Наименьшие потери – при комбинированном законе управления ими, при котором $\eta = 84,6 \%$.

Тиристорный НПЧЕ имеет наименьшие потери на фильтрах, наибольшую величину КПД: $\eta = 92 \%$.

Как было указано раньше, качество токов нагрузки НПЧЕ неудовлетворительно при инфранизких частотах, при этом высокое качество токов нагрузки обеспечивается в НПЧИ [8]. На рис. 3 показаны токи нагрузки тиристорно-транзисторного НПЧИ (а) и тиристорного НПЧЕ (б) при инфранизкой частоте нагрузки $f_n = 0,5 \text{ Гц}$ и частоте источника $f_i = 148,5 \text{ Гц}$. В обоих случаях применен комбинированный закон управления тиристорами, уставка по

току $i_u = 0,1$ А. Параметры управления: $f_{uT} = f_{uG} = 148$ Гц; $T_{suT} = 120^\circ$; $T_{suG} = 120^\circ$. Распределение мощностей в НПЧИ и НПЧЕ показано в табл. 1 (столбцы «ж» и «з»).

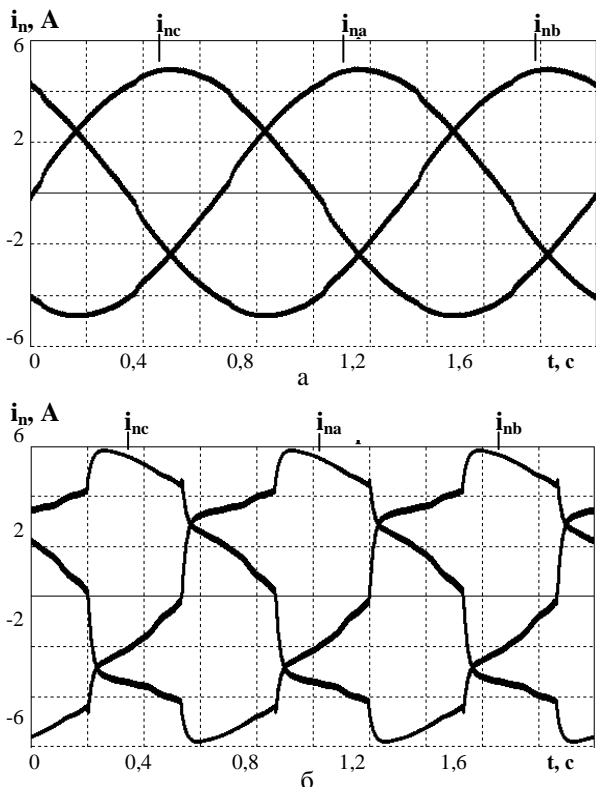


Рисунок 3 – Токи нагрузки транзисторно-тиристорного НПЧИ (а) и НПЧЕ (б) при $f_n = 0,5$ Гц

В связи с вышесказанным, в системах возбуждения БАСМ при сравнительно высоком диапазоне изменения скорости вращения вала и переходом скольжения через ноль возможно применение тиристорно-транзисторных НПЧИ с комбинированной (естественной и искусственной) коммутацией [8]. В таком НПЧИ транзисторы работают в зоне инфранизких частот нагрузки. Пониженные напряжения на нагрузке преобразователя в этом режиме исключают превышение напряжений на элементах системы выше допустимых повторяющихся напряжений тиристоров. При низких частотах нагрузки транзисторы практически закорочены, что обуславливает работу НПЧ с высоким КПД.

ВЫВОДЫ. 1. В НПЧИ с ограниченным числом полностью управляемых ключей замена диодных мостов на тиристорные с длительными сигналами управления тиристорами приводит к существенному увеличению потерь на тиристорах. Существенное уменьшение потерь на тиристорах наблюдается при управлении тиристорами по току нагрузки НПЧИ. Наилучшие показатели тиристорно-транзисторные НПЧИ имеют при комбинированном законе управления тиристорами и частоте $f_u < f_i$. Однако применение НПЧ с искусственной коммутацией в электромашино-вентильном преобразователе БАСМ нецелесообразно в связи с низким КПД НПЧ.

2. В БАСМ с низкими и инфранизкими частотами токов возбуждения возможно применение транзисторно-тиристорных НПЧ с комбинированной искусственно-естественной коммутацией (НПЧИЕ). Режимы работы НПЧИЕ при низких частотах нагрузки аналогичны режимам работы НПЧЕ с нулевыми схемами преобразования. Целесообразно проведение всесторонних теоретических и экспериментальных исследований НПЧИ при их применении в системах возбуждения БАСМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Бернштейн А.Я., Гусяцкий Ю.М., Кудрявцев А.В., Сарбатов Р.С. Тиристорные преобразователи частоты в электроприводе. – М.: Энергия, 1980. – 328 с.
2. Галиновский А.М. Электромашино-вентильные модулированные преобразователи в бесконтактных генераторах стабильной частоты. Технічна електродинаміка. – Вип. 2. – Т. 2: Силовая электроника и энергоэффективность. – К.: ИЭД НАН Украины, 1998. – С. 61–65.
3. А. С. SU 1534744 5H02P 9 / 14. Устройство для возбуждения асинхронизированной синхронной машины / Савельев Ю.Е., Быков С.В., Зозулин Ю.В., Козлов Ю.А.; опубл. 08.01.90, Бюлл. № 1.
4. Разевиг В.Д. Система схмотехнического моделирования Micro-Cap 6. – М.: СОЛОН, 2001. – 344 с.
5. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Методика расчета защитных цепей вентилей выпрямителя // Технічна електродинаміка. – 2005. – № 4. – С. 43–50.
6. Галиновский А.М., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Исследование моделей электромашино-вентильных преобразователей с ограниченным числом полностью управляемых вентилей // Електротехніка і електромеханіка. – 2006. – № 5. – С. 22–29.
7. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Цюрила М.А., Ленская Е.А. Исследование моделей трехфазно-однофазных и трехфазно-трехфазных возбудителей бесконтактных машин двойного питания // Гидроенергетика Украины. – 2006. – № 4. – С. 36–43.
8. Галиновский А.М., Ленская Е.А. Электромашино-вентильные преобразователи с регулированием амплитуды выходного напряжения изменением тока возбуждения // Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ, 2008. – № 81. – С. 124–134.
9. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Электромашино-вентильные преобразователи машин двойного питания. Ч. 1 // Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ, 2010. – № 84. – С. 218–227.
10. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Электромашино-вентильные преобразователи машин двойного питания. Ч. 2 // Гірнична електромеханіка та автоматика. – Дніпропетровськ, 2010. – № 85. – С. 159–169.

**TRANSFORMERS OF FREQUENCY WITH ARTIFICIAL COMMUTATION
IN SYSTEM OF EXCITATION OF ASYNCHRONIZED MACHINE**

E. Lenskaya

State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine

ul. Ivana Gonty, 1, Kiev, Ukraine. E-mail: A_Lanskay@ukr.net

The results of investigations of thyristor-transistor direct frequency converter excitation system of contactless asynchronous machine. The studies were conducted under different laws thyristor control, low and infra-low frequency load converter. Compares the results of studies of direct frequency converters with artificial and natural commutation.

Key words: asynchronous, converter, switching, simulated, natural.

REFERENCES

1. Bernstein A.J., Gusyatsky J.M., Kudryavtsev A.V. Sarbatov R.S. *Thyristor frequency converters in electric drives*. – M.: Energy, 1980. – 328 p. [in Russian]
2. Galinovsky A.M. *Electric valve-modulated converters in the proximity of stable frequency generators. Technical elektrodinamika*. – Iss. 2. – Vol. 2: Power electronics and energy efficiency. – K.: IED NAS, 1998. – PP. 61–65. [in Russian]
3. A. SU 1534744 5H02P 9/14. *Device for excitation asynchronous synchronous machine* / Savelyev J.E., Bikov S.V., Zozulin J.V, Kozlov Y.A.; publ. 08.01.90, Bull. № 1. [in Russian]
4. Razevig V.D. *The system of circuit simulation Micro-CAP 6*. – M.: SOLON, 2001. – 344 p. [in Russian]
5. Galinovsky AM, Lenskaya E.A., Erhard Ayhofer. Methods of calculating the protective circuit valverectifier // *Tehnichna elektrodinamika*. – 2005. – № 4. – PP. 43–50. [in Russian]
6. Galinovsky A.M., Lenskaya E.A., Erhard Ayhofer. The study models of electric machine-valve converters with a limited number of fully controlled rectifiers // *Elektrotehnika i elektromehanika*. – 2006. – № 5. – PP. 22–29. [in Russian]
7. Galinovsky A.M., Dubchak E.M., Tsyurila M.A., Lenskaya E.A. The study models the three-phase-phase and three-phase-three-phase machines pathogens contactless dual-adapter // *Gidroenergetika Ukrainy*. – 2006. – № 4. – PP. 36–43. [in Russian]
8. Galinovsky AM, Lenskaya E.A. Electric-valve converters control the amplitude of the output voltage change of excitation current // *Girnichna elektromehanika i automatika*. – Dnipropetrovsk, 2008. – № 81. – PP. 124–134. [in Russian]
9. Galinovsky A.M, Dubchak E.M, Lenskaya E.A. Electric-car double-valve converter power supply (P. 1) // *Girnichna elektromehanika i automatika*. – Dnipropetrovsk, 2010. – № 84. – PP. 218–227. [in Russian]
10. Galinovsky A.M., Dubchak E.M., Lenskaya E.A. Electric-car double-valve converter power supply (P. 2) // *Girnichna elektromehanika i automatika*. – Dnipropetrovsk, 2010. – № 85. – PP. 159–169. [in Russian]

Стаття надійшла 18.01.2012.

Рекомендовано до друку
д.т.н., проф. Родькіним Д.Й.