

РЕВЕРСИВНЫЕ ТИРИСТОРНЫЕ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ БЕСКОНТАКТНЫХ СИНХРОННЫХ КОМПЕНСАТОРОВ

Приведений анализ работы моделей трехфазно-однофазных обертковых реверсивных тиристорных преобразователей безконтактных синхронных компенсаторов у системе схмотехнического моделирования. Показано, что при комбинированному способу управління зустрічно включеними тиристорами можливі короткі замикання якірних обмоток збудників як при упереджуючому, так і при відстаючому куті управління тиристорами. Це необхідно враховувати при розробці систем збудження безконтактних компенсаторів.

Приведен анализ работы моделей трехфазно-однофазных вращающихся реверсивных тиристорных преобразователей бесконтактных синхронных компенсаторов в системе схмотехнического моделирования. Показано, что при комбинированном способе управления встречно включенными тиристорами возможны короткие замыкания якорных обмоток возбуждителей как при упереджающем, так и при отстающем угле управления тиристорами. Это необходимо учитывать при разработке систем возбуждения бесконтактных компенсаторов.

ВСТУПЛЕНИЕ

Одна из важнейших проблем электроэнергетики – регулирование реактивной мощности в электрических сетях, которое, в основном, осуществляется явнополюсными синхронными компенсаторами (СК). СК обеспечивают стабилизацию напряжения сети, позволяют с высоким быстродействием кратковременно увеличить до двукратного номинального значения производств реактивной мощности в динамических режимах. Во всех рабочих режимах система возбуждения обеспечивает подачу токов возбуждения, включая режимы форсировок напряжения возбуждения и развозбуждения с возможностью реверса токов в обмотках при динамических возмущениях в электросистеме. В основном изготавливают бесконтактные СК (БСК). Для увеличения потребляемой реактивной мощности разрабатываются БСК с реверсивными системами возбуждения [2, 4, 6-12].

В работе [2] БСК с реверсивным возбуждением имеет две обмотки возбуждения, подключенные к двум синхронным возбудителям (СВ). Намагничивающая сила (НС) дополнительной обмотки составляет $\approx 15\%$ НС основной обмотки. В работах [6, 7] БСК имеет один СВ и реверсивный мостовой тиристорный преобразователь (ТП). Изменение тока возбуждения СК осуществляется изменением угла управления вращающихся тиристоров по определенному закону. Возможные токи короткого замыкания (КЗ) якорной обмотки СВ при переходе тока нагрузки ТП через нуль ограничиваются реакторами. Основным недостатком БСК [2, 7] – увеличенный вес и габариты.

В работах [8-10, 12] БСК имеет один СВ, токоограничивающие реакторы отсутствуют. Применен трехфазно-однофазный реверсивный ТП. Изменение величины и направления тока нагрузки ТП (тока возбуждения СК) осуществляется изменением величины и направления тока возбуждения СВ.

В работах [1, 8, 10, 12] рассматриваются трехфазно-однофазные реверсивные ТП генераторов, возбуждаемых переменным током, и бесконтактных синхронных машин (БСМ). При изменении ЭДС источника питания по синусоидальному закону реверсивные ТП рассматриваются как непосредственные преобразователи частоты с естественной коммутацией и модулированным напряжением (НПЧЕМ). В работах [8, 10] исследования проведены при разных способах управления НПЧЕМ. Показано: при управлении НПЧЕМ по частоте нагрузки и при совместном

управлении тиристорами по частоте заполнения [3] возможны КЗ источника питания; в НПЧЕМ с комбинированным способом управления [5] наилучшее качество формы кривой выходного напряжения [5], при упереджающих углах управления тиристорами можно избежать токов КЗ источника питания. Однако в работах недостаточно раскрыто влияние величины угла управления тиристорами на работу реверсивного преобразователя с комбинированным управлением.

Цель работы: исследование работы трехфазно-однофазного реверсивного тиристорного преобразователя с комбинированным способом управления при широком диапазоне изменения угла управления тиристорами, разработка рекомендаций по его применению в системе возбуждения БСК.

Исследуем преобразователь в системе схмотехнического моделирования Micro Cap (системе МС).

СХЕМА НПЧЕМ

Схема НПЧЕМ показана на рис. 1, где: $V_{a1}, V_{b1}, V_{c1}, V_{a2}, V_{b2}, V_{c2}$ – первый и второй источник питания; $r_a=r_b=r_c=r_i, x_a=x_b=x_c=x_i$ – активные и индуктивные сопротивления источника; Т1-Т12 – тиристоры прямого и обратного блоков ТП; R_n, L_n – активное сопротивление и индуктивность нагрузки. В НПЧЕМ применены тиристоры В25RIA120, защищенные RC-цепями.

ЭДС источников питания:

$$e_{a1} = E_{m1} \sin \omega_1 t; e_{b1} = E_{m1} \sin(\omega_1 t - 120); e_{c1} = E_{m1} \sin(\omega_1 t + 120);$$

$$e_{a2} = E_{m2} \sin \omega_2 t; e_{b2} = E_{m2} \sin(\omega_2 t - 120); e_{c2} = E_{m2} \sin(\omega_2 t + 120);$$

где $E_{m1}=E_{m2}, \omega_{i1} = 2\pi f_{i1}, \omega_{i2} = 2\pi f_{i2}$.

На вход НПЧЕМ подаются биения напряжений:

$$e_a = e_{a1} + e_{a2} = E_m \sin \omega_3 t \cdot \cos \omega_6 t;$$

$$e_b = e_{b1} + e_{b2} = E_m \sin(\omega_3 t - 120) \cdot \cos \omega_6 t;$$

$$e_c = e_{c1} + e_{c2} = E_m \sin(\omega_3 t + 120) \cdot \cos \omega_6 t;$$

где $E_m=E_{m1}+E_{m2}$, частота биений $f_6 = |f_{i1}-f_{i2}|/2$, $\omega_6=2\pi f_6$, частота заполнения $f_3=(f_{i1}+f_{i2})/2$, $\omega_3=2\pi f_3$.

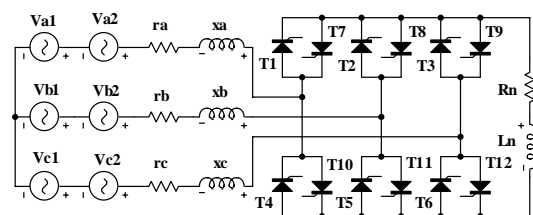


Рис. 1. Электрическая схема модели НПЧЕМ

СОВМЕСТНОЕ УПРАВЛЕНИЕ НПЧЕМ ПО ЧАСТОТЕ ЗАПОЛНЕНИЯ

Исследуем НПЧЕМ при частоте нагрузки $f_n=f_6=0$. Параметры схемы: $E_{m1}=E_{m2}=55$ В; $f_3=f_{i1}=f_{i2}=138$ Гц; полное сопротивление источника $z_i=1$ Ом; относительная величина активного сопротивления $k_r=r_i/x_i=0$; $R_n=14$ Ом; $L_n=0$. Длительность сигналов управления по частоте $f_u=f_3$ $T_u=120^\circ$.

На рис. 2, а-с показаны зависимости напряжений и токов НПЧЕМ от угла $\theta=\omega_3 t$ при упреждающих углах управления: а) $\alpha_u=15^\circ$; б) $\alpha_u=24,37^\circ$; в) $\alpha_u=24,38^\circ$. Принятые обозначения: $e_a, e_b, e_c, i_a, i_b, i_c$ – ЭДС и токи источников питания (i_i); u_n, i_n – напряжение и ток нагрузки; su – сигналы управления тиристорами T_1-T_3 ; γ – угол коммутации. На интервале угла коммутации поочередно включаются прямой и обратный вентили одного плеча ТП. Длительность работы обратного вентиля определяется величиной угла α_u . Вентили работают поочередно группами 2-3. Этот режим сохраняется при увеличении α_u до величины угла $\alpha_u=24,37^\circ$, при котором $\gamma=60^\circ$ (рис. 2, б). При $\alpha_u>24,37^\circ$ $\gamma>60^\circ$, появляются участки КЗ преобразователя с $u_n=0$. Это видно из диаграмм на рис. 2, в, рассчитанных при $\alpha_u=24,38^\circ$. Наибольшие мгновенные величины токов источника (токи КЗ) увеличиваются примерно в 10 раз.

Исследуем НПЧЕМ с параметрами: $E_{m1}=E_{m2}=110$ В; $z_i=3$ Ом; $k_r=0,5$; $R_n=14$ Ом; $L_n=0$; $f_{i1}=134$ Гц; $f_{i2}=142$ Гц; $f_3=|f_{i1}+f_{i2}|/2=138$ Гц; $f_6=|f_{i1}-f_{i2}|/2=4$ Гц; $\alpha_u=18,2^\circ$. Анализ диаграмм напряжений и токов (рис. 2, д) показывает: при $\gamma>60^\circ$ участки КЗ чередуются с участками рабочего режима преобразователя.

КОМБИНИРОВАННОЕ УПРАВЛЕНИЕ НПЧЕМ

На рис. 3, 4 показаны временные диаграммы напряжений и токов НПЧЕМ с параметрами: $E_{m1}=E_{m2}=110$ В; $f_{i1}=146$ Гц; $f_{i2}=148$ Гц; $f_3=|f_{i1}+f_{i2}|/2=147$ Гц; $f_6=|f_{i1}-f_{i2}|/2=1$ Гц; $z_i=2$ Ом; $k_r=0,5$; полное сопротивление нагрузки $Z_n=14$ Ом; $\cos\varphi_n=0,9$. Уставка тока нагрузки $i_u=0,5$ А. Напряжения и токи НПЧЕМ (рис. 3) рассчитаны при углах управления: а) $\alpha_u=45^\circ$; б) $\alpha_u=15^\circ$; в) $\alpha_u=5^\circ$; д) $\alpha_u=-5^\circ$. На рис. 4 – фрагменты диаграмм напряжений и токов НПЧЕМ при $\alpha_u=5^\circ$.

Все величины в системе относительных единиц (о.е.), в которой базовыми величинами приняты напряжение холостого хода (х.х.) и ток КЗ выпрямителя:

$$U_{d0} = \frac{3\sqrt{3}}{\pi} E_m = 364 \text{ В}; \quad I_{dk} = \frac{E_m}{z_i} = 110 \text{ А},$$

где $E_m=E_{m1}+E_{m2}=220$ В – наибольшая амплитуда ЭДС источника питания. Все величины в о.е. выпрямителя обозначены нижним индексом (*).

На рисунках: $u_{d0}^*=u_{d0}/U_{d0}$, $u_n^*=u_n/U_{d0}$ – текущие значения напряжений выпрямителя в режимах х.х. и нагрузки; u_{T7}^* и u_{T10}^* – напряжения на тиристорах T_7 и T_{10} ; a_{ik} – текущее значение амплитуды тока КЗ источника питания; su_n и su_o – сигналы управления тиристорами прямого и обратного блоков ТП.

При индуктивном характере нагрузки НПЧЕМ, комбинированном управлении тиристорами и достаточной величине упреждающего угла управления тиристорами с уменьшением амплитуды ЭДС источника питания поочередно наступают режимы короткого замыкания (КЗ), опрокидывания инвертора (ОИ) и инвертора (И).

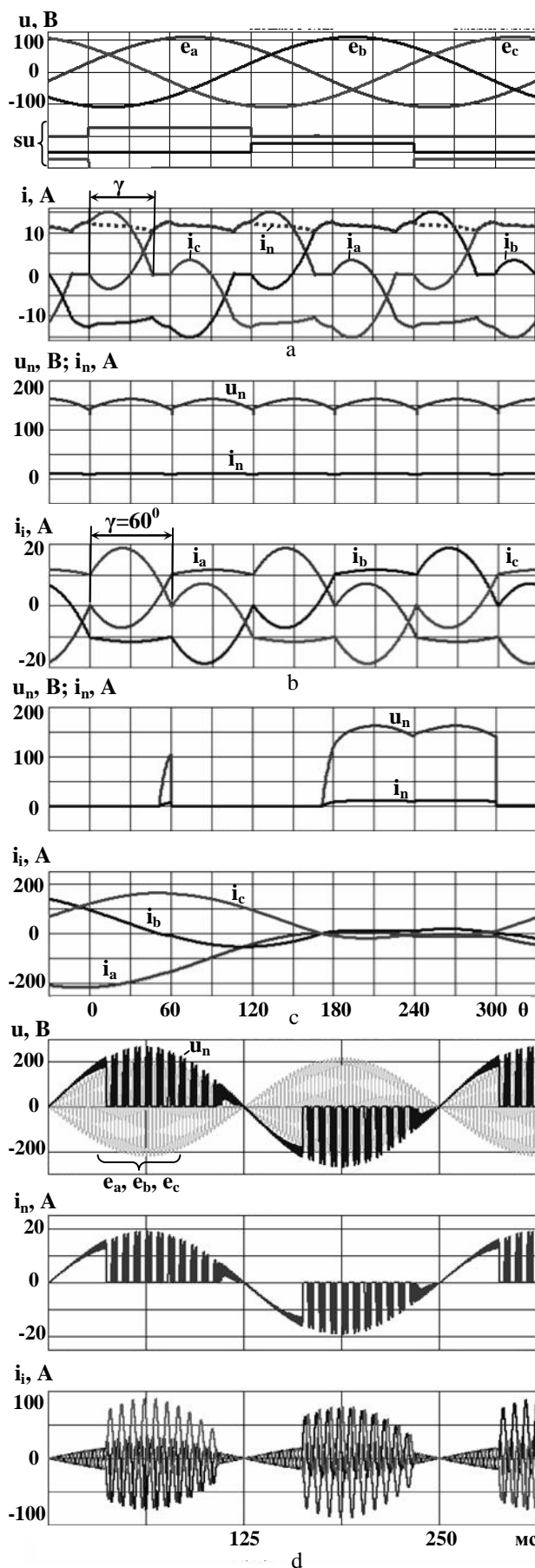


Рис. 2. Диаграммы напряжений и токов НПЧЕМ при управлении по частоте заполнения

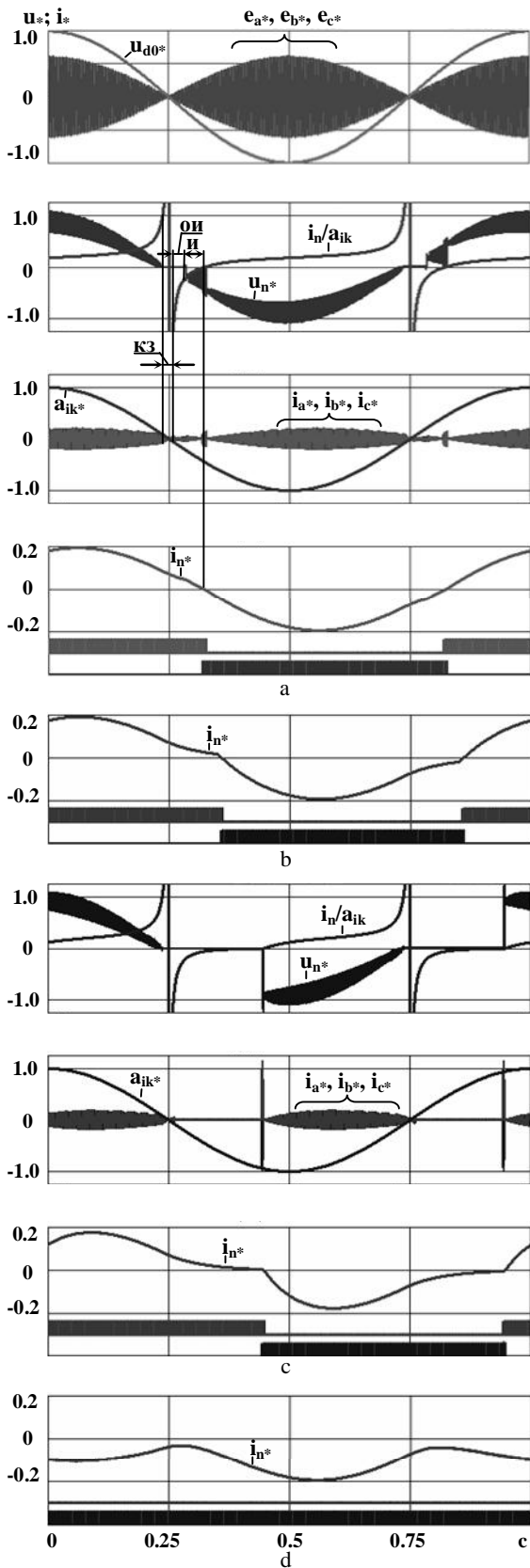


Рис. 3. Диаграммы напряжений и токов НПЧЕМ при комбинированном законе управления

На рис. 3,а показаны режимы работы НПЧЕМ при $\alpha_u=45^\circ$. Режим КЗ определяется между точками $i_n/a_{ik}=1$ и $i_n/a_{ik}=-1$. Режимы КЗ и ОИ существенно искажают форму кривой напряжения u_n^* .

Анализ диаграмм напряжений и токов показывает, что НПЧЕМ работоспособен при $\alpha_u \approx 50^\circ - 15^\circ$ (рис. 3,а,б).

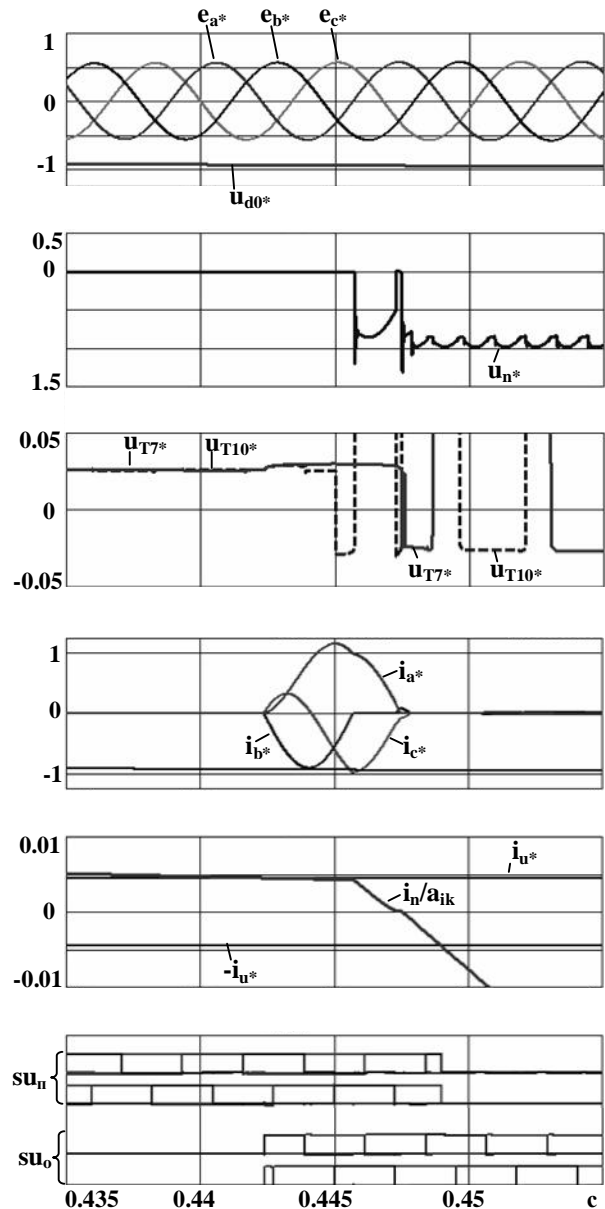


Рис. 4. Фрагменты диаграмм напряжений и токов НПЧЕМ при угле управления $\alpha_u = 5^\circ$

При сравнительно малых упреждающих углах управления (рис. 3,с и рис. 4) режимы КЗ и ОИ в НПЧЕМ отсутствуют. Ток нагрузки замыкается через два вентиля тиристорного блока прямой (обратной) проводимости и затухает с постоянной времени нагрузки. Режим КЗ нагрузки затягивается. При $i_n < i_u$ сигналы управления подаются на тиристоры блока обратной (прямой) проводимости, что приводит к короткому замыканию источника питания. Это видно из фрагментов диаграмм напряжений и токов НПЧЕМ на рис. 4, где уставка тока нагрузки в о.е. $i_u^* = i_u / I_{dk} = 0,5 / 110 = 0,455$. В зоне совместного управления тиристорами величина максимального мгновенного значения тока КЗ источника питания (i_{imax}) приближается к амплитуде установившегося тока КЗ источника питания, что может привести к повреждению БСК. Токи КЗ существенно зависят от величины со-

противления источника питания и коэффициента форсировки напряжения возбудителя БСК.

При отстающих углах управления тиристорами НПЧЕМ неработоспособен (рис. 3, d).

Таким образом, при комбинированном способе управления, в зоне совместного управления тиристорами принципиально возможны КЗ обмотки якоря возбудителя БСК как при упреждающем, так и при отстающем угле управления.

Результаты исследований могут быть применены при разработке бесконтактных асинхронизированных компенсаторов с двумя и тремя роторными обмотками [11, 12].

ВЫВОДЫ

1. Исследования модели трехфазно-однофазного тиристорного преобразователя БСК в системе схемотехнического моделирования показали: при применении комбинированного способа управления встречно включенными тиристорами в зоне перехода тока нагрузки преобразователя через ноль возможны КЗ якорных обмоток возбудителя как при упреждающем, так и при отстающем угле управления тиристорами, что может привести к повреждению компенсатора.

2. Для обеспечения надежной работы системы возбуждения БСК целесообразно применять контроль состояния тиристорov.

3. Целесообразно провести сопоставительный анализ технико-экономических показателей бесконтактных синхронных и асинхронизированных компенсаторов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Брускин Д.Э. Генераторы, возбуждаемые переменным током. – М.: "Высшая школа", 1974. – 128 с.
2. Пекне В.З. Синхронные компенсаторы (конструкция, монтаж, испытания и эксплуатация). – М.: Энергия. 1980. – 272 с.
3. А.с. №1104639 А СССР МКИ H02 P 13/30. Способ управления тиристорным преобразователем частоты. / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак, В.В. Працок. Оpubl. 1984, БИ № 27.
4. Герасименко Ю.Н. и др. Мощные синхронные компенсаторы с бесщеточными системами возбуждения // Электрические станции. – 1984. – № 8. – С. 16-19.
5. А.с. №1339821 А1 СССР МКИ H02 M 5/42. Способ комбинированного управления тиристорным преобразователем частоты. / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак. Оpubl. 1987, БИ № 35.
6. А.с. №1356130 СССР МКИ H02 P 9/14. Синхронная машина с бесщеточной реверсивной системой возбуждения. / Ю.В. Зозулин, Ю.Е. Савельев, В.В. Кузьмин // Оpubl. 1987, БИ № 44.
7. Кильдишев В.С., Тиристорные бесщеточные возбудители мощных синхронных машин. / В.С. Кильдишев, Г.А. Ковальков, В.В. Кузьмин, Ю.Е. Савельев // Электрические станции. – 1987. – №11. – С. 61-67.
8. Галиновский А. М. Исследование моделей трехфазно-однофазных и трехфазно-трехфазных возбудителей бесконтактных машин двойного питания / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак, М.А. Цюрила, Е.А. Ленская // Гидроэнергетика Украины. – 2006. – № 4. – С. 36-43.
9. Пат. № 22001 У Украина. МКИ H02P 9/14: Пристрій реверсивного безщіткового збудження синхронного компенсатора. / О.М. Галиновський, О.О. Ленська, Є.М. Дубчак, Ю.Ю. Савельєв // Оpubl. 10.04.2007. Бюл. № 4.
10. Галиновский А.М. Электрические и эквивалентные схемы, исследование работы трехфазно-однофазных электромашинно-вентильных преобразователей с модулированным напряжением / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак, С.В. Коваленко, Е.А. Ленская // Вісник НТУ "ХПІ". – 2008. – №45. – С. 17-35.
11. Антонюк О.В. Асинхронизированные неявнополюсные

компенсаторы / О.В. Антонюк, Н.Д. Пинчук // Наука и технологии / Приборостроение. – 15.01.2010 г.

12. Галиновський О.М. Електромашинно-вентильні перетворювачі безконтактних синхронних та асинхронізованих компенсаторів / О.М. Галиновський, Є.М. Дубчак // Вісник Вінницького політехнічного інституту. – 2012. – № 1. – С. 77-80.

Bibliography (transliterated): 1. Bruskin D.Eh. Generatory, vzbuzhdaemye peremennym tokom. - M.: "Vysshaja shkola", 1974. - 128 s. 2. Pekne V.Z. Sinkhronnye kompensatory (konstrukcija, montazh, ispytaniya i ehkspluatacija). - M.: Ehnergija. 1980. - 272 s. 3. A.s. №1104639 A SSSR MKI N02 R 13/30. Sposob upravlenija tiristornym preobrazovatelem chastoty. / A.M. Galinovskij, E.M. Dubchak, V.V. Pracjuk. Opubl. 1984, BI № 27. 4. Gerasimenko Ju.N. i dr. Moshhnye sinkhronnye kompensatory s besshchetochnymi sistemami vzbuzhdenija // Ehlektricheskie stancii. - 1984. - № 8. - S. 16-19. 5. A.s. №1339821 A1 SSSR MKI N02 M 5/42. Sposob kombinirovannogo upravlenija tiristornym preobrazovatelem chastoty. / A.M. Galinovskij, E.M. Dubchak. Opubl. 1987, BI № 35. 6. A.s. №1356130 CCCR MKI N02 R 9/14. Sinkhronnaja mashina s besshchetnoj rewersivnoj sistemoj vzbuzhdenija. / Ju.V. Zozulin, Ju.E. Savel'ev, V.V. Kuz'min // Opubl. 1987, BI № 44. 7. Kil'dishev V.S., Tiristornye besshchetochnye vzbuditeli moshnykh sinkhronnykh mashin. / V.S. Kil'dishev, G.A. Koval'kov, V.V. Kuz'min, Ju.E. Savel'ev // Ehlektricheskie stancii. - 1987. - №11. - S. 61-67. 8. Galinovskij A. M. Issledovanie modelej trekhfazno-odnofaznykh i trekhfazno-trekhfaznykh vzbuditelej beskontaktnykh mashin dvojnogo pitaniya / A.M. Galinovskij, E.M. Dubchak, M.A. Cjurila, E.A. Lenskaja // Hidroenergetika Ukrainy. - 2006. - № 4. - S. 36-43. 9. Pat. № 22001 U Ukraїna. MKI H02P 9/14: Pristriij rewersivnogo bezshhitkovogo zbudzhenija sinkhronnogo kompensatora. / O.M. Galinovskij, O.O. Lens'ka, Є.M. Dubchak, Ju.Ju. Savelev // Opubl. 10.04.2007. Bjul. № 4. 10. Galinovskij A.M. Ehlektricheskie i ehkvalentnye skhemy, issledovanie raboty trekhfazno-odnofaznykh elektromashinno-ventil'nykh preobrazovatelej s modulirovannym naprjazheniem / A.M. Galinovskij, E.M. Dubchak, S.V. Kovalenko, E.A. Lenskaja // Visnik NTU "KhPI". - 2008. - №45. - S. 17-35. 11. Antonjuk O.V. Asinkhronizirovannye nejavnopoljusnye kompensatory / O.V. Antonjuk, N.D. Pinchuk // Nauka i tekhnologii / Priborostroenie. - 15.01.2010 g. 12. Galinovskij O.M. Elektromashinno-ventil'ni peretvorjvachi bezkontaktnikh sinkhronnykh ta asinkhronizovanikh kompensatoriv / O.M. Galinovskij, Є.M. Dubchak // Visnik Vinnic'kogo politekhnichnogo institutu. - 2012. - № 1. - S. 77-80.

Поступила (received) 15.06.2013

Галиновский Александр Михайлович¹, к.т.н., доц.,

Дубчак Евгений Михайлович¹,

Ленская Елена Александровна²

¹Национальный технический университет Украины

"Киевский политехнический институт",

кафедра электромеханики,

03056, Киев, просп. Победы, 37,

тел/phone: +38 044 4068238, e-mail: alga 40@mail.ru

²Отдел НТ политики Департамента технической политики

Национальное агентство Украины по вопросам обеспечения

эффективного использования энергетических ресурсов,

04112, Киев, ул. Ивана Гонты, 1,

тел/phone: +38 044 4564835

Galynovskiy A.M.¹, Dubchak E.M.¹, Lenskaya E.A.²

¹National Technical University of Ukraine "Kyiv Polytechnic Institute"
37, Prospect Peremohy, Kyiv-56, 03056, Ukraine

²State Agency on Energy Efficiency and Energy Saving of Ukraine

1, Ivan Gonta Str., Kyiv, 04112, Ukraine

Reversible thyristor converters of brushless synchronous compensators.

Behavior of models of three-phase-to-single-phase rotary reversible thyristor converters of brushless synchronous compensators in a circuit simulation system is analyzed. It is shown that combined control mode of opposite-connected thyristors may result in the exciter armature winding short circuits both at the thyristor feed-forward and lagging current delay angles. It must be taken into consideration when developing brushless compensator excitation systems.

Key words – thyristor converter, synchronous compensators, modeling, analysis.