

БЕСКОНТАКТНЫЙ АСИНХРОНИЗИРОВАННЫЙ ГЕНЕРАТОР ПРИ КОМБИНИРОВАННОМ УПРАВЛЕНИИ ВОЗБУЖДЕНИЕМ

А. М. Галиновский, В. А. Бобер

Национальный технический университет Украины «Киевский политехнический институт»
просп. Победы, 37, г. Киев, 03056, Украина. E-mail: ntuukafem@ua.fm

Приведены результаты исследований математической модели бесконтактного асинхронизированного генератора с каскадным многофазным электромашинным возбудителем и непосредственным преобразователем частоты с естественной коммутацией и модулированным входным напряжением при работе генератора с инфранизкой частотой возбуждения и управлении возбуждением по цепи возбуждения возбудителя и углу управления тиристорами.

Ключевые слова: асинхронизированный, генератор, возбудитель, преобразователь, комбинированный.

БЕСКОНТАКТНИЙ АСИНХРОНІЗОВАНИЙ ГЕНЕРАТОР ПРИ КОМБІНОВАНОМУ КЕРУВАННІ ЗБУДЖЕННЯМ

О. М. Галіновський, В. А. Бобер

Національний технічний університет України «Київський політехнічний інститут»
просп. Перемоги, 37, м. Київ, 03056, Україна. E-mail: ntuukafem@ua.fm

Наведено результати досліджень математичної моделі бесконтактного асинхронізованого генератора з каскадним багатофазним електромашинним збудником і безпосереднім перетворювачем частоти з природною комутацією та модульованою вхідною напругою при роботі генератора з інфранизкою частотою збудження та управлінні збудженням по ланцюгу збудження збудника й куту керування тиристорами.

Ключові слова: асинхронізований, генератор, збудник, перетворювач, комбінований.

АКТУАЛЬНОСТЬ РАБОТЫ. В настоящее время широко внедряются асинхронизированные машины (АСМ) – генераторы, двигатели, компенсаторы и другие установки. На гидроаккумулирующих станциях 35 стран мира работают АСМ мощностью до 500 МВт в режимах генератора и двигателя [1, 2]. В энергосистемах России и Украины введены в эксплуатацию асинхронизированные турбогенераторы (АСТГ) мощностью 110–320 МВт [1, 3, 4]. Первые АСТГ мощностью 200 МВт построены Харьковским НПО «Электротяжмаш» и установлены на Бурштынской ГРЭС.

В АСМ роторные обмотки подключены к преобразователю частоты (ПЧ) через контактные кольца. Вместе с тем синхронные машины в основном выполняются в бесконтактном исполнении, что обусловлено необходимостью повышения надежности их работы. Актуальными являются разработка и широкое внедрение бесконтактных АСМ (БАСМ). Система возбуждения БАСМ строится на базе электромашинно-вентильных преобразователей (ЭМВП), содержащей электромашинный возбудитель, и вращающихся преобразователей частоты (ПЧ).

Высокое качество формы выходного напряжения обеспечивает ЭМВП с каскадным электромашинным возбудителем и непосредственным преобразователем частоты (НПЧ) с естественной коммутацией (НПЧЕ) при модулированном входном напряжении (НПЧЕМ) [5–7, 9–11].

В НПЧЕМ применяются комбинированное потенциальное соединение обмоток источника [2], комбинированный закон управления тиристорами по току нагрузки и по частоте заполнения [12]. При комбинированном потенциальном соединении обмоток возбуждения БАСМ могут применяться НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования [5].

Однако мостовые схемы преобразования не могут применяться в трехфазно-трехфазных НПЧЕМ БАСМ [7–9], поэтому разрабатываются многофазно-трехфазные НПЧЕМ с четным числом фаз источника на одну фазу нагрузки [7–9, 10, 11].

В [10, 11, 13] приводится анализ работы основной электрической машины БАСМ (далее асинхронной машины (АМ)), моделей НПЧЕ и НПЧЕМ при изменении скольжения АГ. На рис. 1 показана схема замещения АМ.

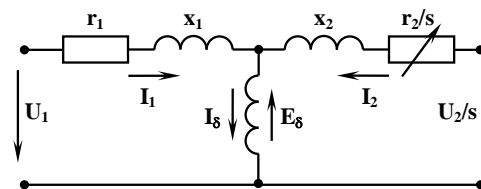


Рисунок 1 – Схема замещения АМ

Уравнения напряжений и намагничивающих сил АМ [10, 11, 13]:

$$\begin{cases} \dot{U}_1 + \dot{E}_\delta - j\dot{I}_1 x_1 - \dot{I}_1 r_1 = 0 \\ \frac{\dot{U}_2}{s} + \dot{E}_\delta - j\dot{I}_2 x_2 - \dot{I}_2 \frac{r_2}{s} = 0, \\ \dot{I}_1 + \dot{I}_2 = \dot{I}_\delta \end{cases}$$

откуда находим $\dot{U}_2 = \dot{I}_2 r_2 - \dot{E}_{2p} \cdot s$, где $\dot{E}_{2p} = \dot{E}_\delta - j\dot{I}_2 x_2$ – результирующая ЭДС обмотки ротора.

На рис. 2 показаны векторные диаграммы АМ в режиме двигателя (а) и генератора (б).

При скольжении $s = 0$ напряжение вторичного контура АМ $U_2 = I_2 r_2$ (рис. 1, точка В). При изменении скольжения конец вектора U_2 перемещается по линии напряжений АF, проведенной через точку В параллельно вектору \dot{E}_{2p} . Для любой точки на линии АF величина U_2 пропорциональна расстоянию к точке О.

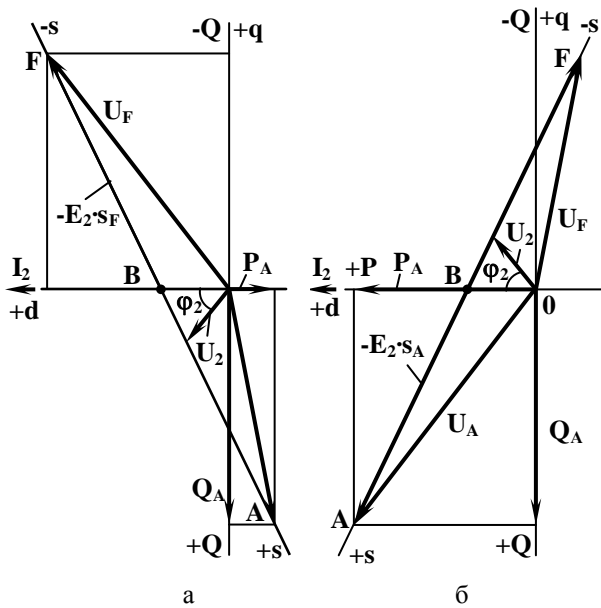


Рисунок 2 – Векторные диаграммы АМ в режимах двигателя (а) и генератора (б)

В асинхронном генераторе при $\infty > s > s_d$ активная мощность передается от ПЧ в обмотку ротора; при $s_d > s > (-)\infty$ активная мощность передается с обмотки ротора через ПЧ в сеть.

В асинхронном двигателе при $\infty > s > s_d$ активная мощность передается с обмотки ротора через ПЧ в сеть; при $s_d > s > (-)\infty$ активная мощность передается от ПЧ в обмотку ротора.

На рис. 3 показаны зависимости напряжения U_2 и мощностей (P_2 , Q_2 и S_2) вторичного контура БАСГ мощностью 100 кВт от скольжения s [7]. Как видно из рис. 2, 3, при $s > 0$ вторичный контур АМ потребляет реактивную мощность, а при $s < 0$ отдает ее.

При неизменной нагрузке первичного контура АМ с изменением скольжения остается неизменной величина тока возбуждения, однако существенно изменяется напряжение возбуждения. При увеличении диапазона изменения скольжения увеличиваются параметры коммутации (индуктивные сопротивления рассеяния и активные сопротивления якорных обмоток возбуждателей). Это приводит к увеличению углов коммутации, появлению режимов короткого замыкания и опрокидывания инвертора, ухудшению качества формы тока нагрузки НПЧЕМ в области низких и инфранизких частот [10, 11]. Улучшение качества формы нагрузки НПЧЕМ можно достигнуть увеличением амплитуды ЭДС источника питания при комбинированном регулировании возбуждения АГ по цепи возбуждения возбуждателей и углу управления тиристорами. В работе [11] показано, что регулирование тока возбуждения изменением угла управления тиристорами допускается при угле нагрузки НПЧЕМ $\varphi_n \leq 30^\circ$ [7].

В работах [10, 11] модели НПЧЕМ исследованы в системе схемотехнического моделирования Micro Cap.

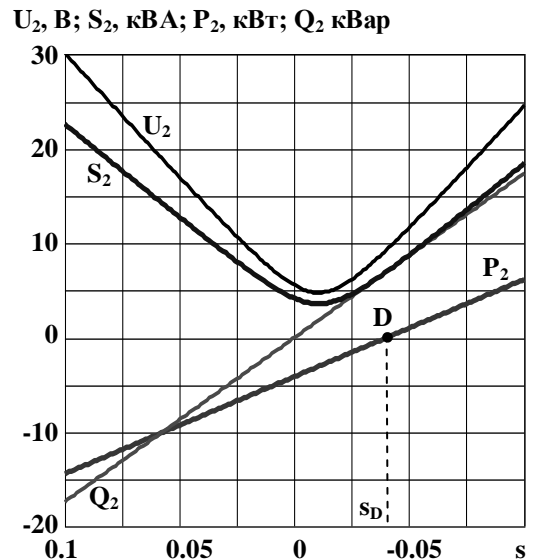


Рисунок 3 – Напряжения и мощности ПЧ БАСГ-100 в зависимости от скольжения

Работы [6–8, 13] посвящены разработке и исследованию математических моделей БАСМ. Однако исследования математических моделей БАСМ проводились без учета комбинированного регулирования возбуждения.

Целью работы являются исследования математической модели БАСГ с каскадным возбудителем и многофазно-трехфазным НПЧЕМ при комбинированном регулировании возбуждения АГ.

МАТЕРИАЛ И РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЙ.

Электрическая схема модели БАСМ показана на рис. 4: АГ – асинхронный генератор с числом пар полюсов p ; В1, В2 – возбудители с трехфазными обмотками на статоре и двенадцати фазными обмотками на роторе, число пар полюсов p_B ; ТП – тиристорный преобразователь; I_1, I_2 – источники напряжения; ВЧ – вращающаяся часть; N – нагрузка АГ.

На статорные обмотки возбуждателей подается напряжение частоты скольжения f_s , направления вращений полей статоров – противоположные.

На схеме показаны номера обмоток ротора возбуждателей: 1-1÷1-12; 2-1÷2-12.

Частоты ЭДС якорных обмоток двух возбуждателей: $f_{21} = p_B \cdot f(1-s)/p - f_s$, $f_{22} = p_B \cdot f(1-s)/p + f_s$, где f – частота сети, f_s – частота скольжения.

ЭДС двух источников питания:

$$\begin{aligned} e_{1,1} &= A_{11} \sin(\omega_1 t); & e_{2,1} &= A_{12} \sin(\omega_2 t); \\ e_{1,1} &= A_{11} \sin(\omega_1 t + 30^\circ); & e_{2,1} &= A_{12} \sin(\omega_2 t + 30^\circ); \\ & \dots & & \dots \\ e_{1,1} &= A_{11} \sin(\omega_1 t + 330^\circ); & e_{2,1} &= A_{12} \sin(\omega_2 t + 330^\circ). \end{aligned}$$

На входы фазных ТП подаются три системы биений напряжений:

$$\begin{cases} e_{1A} = e_{1,1} + e_{2,1} = A_1 \sin(\omega_2 t) \cos(\omega_1 t); \\ e_{2A} = e_{1,4} + e_{2,4} = A_1 \sin(\omega_2 t + 90^\circ) \cos(\omega_1 t); \\ e_{3A} = e_{1,7} + e_{2,7} = A_1 \sin(\omega_2 t + 180^\circ) \cos(\omega_1 t); \\ e_{4A} = e_{1,10} + e_{2,10} = A_1 \sin(\omega_2 t + 270^\circ) \cos(\omega_1 t), \end{cases}$$

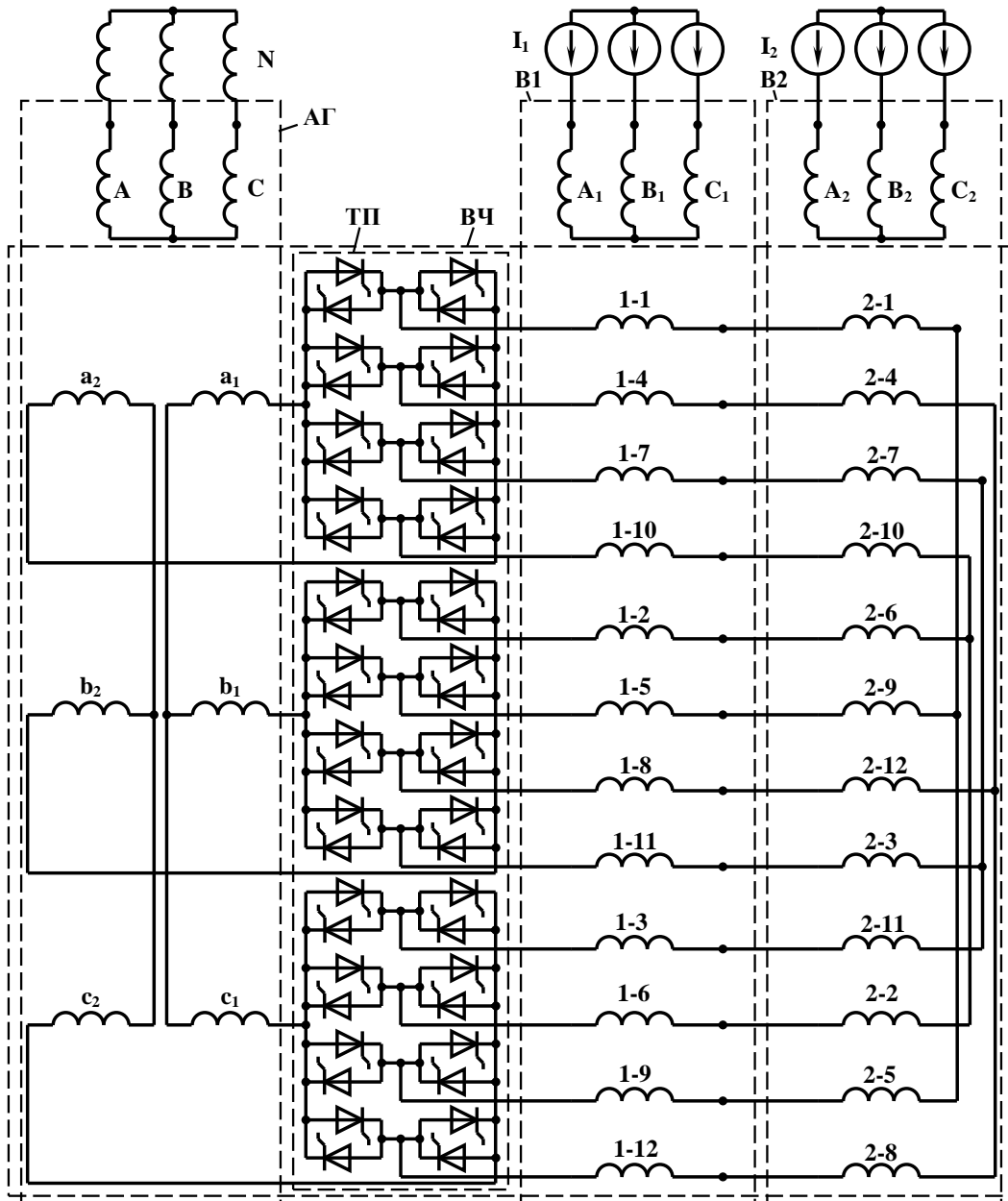


Рисунок 4 – Электрическая схема модели БАСГ с каскадным электромашинным возбуждателем и многофазно-трехфазным НПЧЕМ

$$\begin{cases} e_{1B} = e_{1,5} + e_{2,9} = A_i \sin(\omega_z t) \cos(\omega_b t - 120^\circ); \\ e_{2B} = e_{1,8} + e_{2,12} = A_i \sin(\omega_z t + 90^\circ) \cos(\omega_b t - 120^\circ); \\ e_{3B} = e_{1,11} + e_{2,3} = A_i \sin(\omega_z t + 180^\circ) \cos(\omega_b t - 120^\circ); \\ e_{4B} = e_{1,2} + e_{2,6} = A_i \sin(\omega_z t + 270^\circ) \cos(\omega_b t - 120^\circ); \\ e_{1C} = e_{1,9} + e_{2,5} = A_i \sin(\omega_z t) \cos(\omega_b t + 120^\circ); \\ e_{2C} = e_{1,12} + e_{2,8} = A_i \sin(\omega_z t + 90^\circ) \cos(\omega_b t + 120^\circ); \\ e_{3C} = e_{1,3} + e_{2,11} = A_i \sin(\omega_z t + 180^\circ) \cos(\omega_b t + 120^\circ); \\ e_{4C} = e_{1,6} + e_{2,2} = A_i \sin(\omega_z t + 270^\circ) \cos(\omega_b t + 120^\circ), \end{cases}$$

где $A_{i1} = A_{i2} = A_i / 2$ – амплитуды ЭДС источника, $\omega_1 = 2\pi f_{21}$, $\omega_2 = 2\pi f_{22}$, частота заполнения $\omega_z = 2\pi f_z$, $f_z = |f_{21} + f_{22}| / 2$, частота биений напряжений $\omega_b = 2\pi f_b$, $f_b = |f_{21} - f_{22}| / 2 = f_s$.

Исследование математической модели БАСГ мощностью 100 кВт, $U_{IN} = 400$ В, $\cos\phi_{IN} = 0,8$, $p = 2$.

Параметры модели.

Асинхронный генератор. Коэффициент трансформации $k_T = (k_{w2} W_2) / (k_{w1} W_1) = 3$, где W_2 – число витков фазы одной трехфазной обмотки ротора. Активные сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток: $r_1 = 0,03$ Ом; $L_{1s} = 0,34$ мГн; $r_2 = 0,4$ Ом; $L_{2s} = 3,06$ мГн. Взаимоиндуктивность $L_m = 7,5$ мГн.

Возбудитель. Коэффициент трансформации $k_B = 1$, $p_B = 5$. Активные сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток: $r_{B1} = 0,036$ Ом; $L_{B1s} = 0,03$ мГн; $r_{B2} = 0,036$ Ом; $L_{B2s} = 0,03$ мГн. Взаимоиндуктивность $L_m = 0,27$ мГн.

Тиристоры. Активное сопротивление и индуктивность в открытом и закрытом состоянии:

$r_T = 0,1 \text{ мОм}; L_T = 0,25 \text{ мкГн}; r_{TZ} = 25 \text{ Ом}; L_{TZ} = 10 \text{ кГн}.$

Нагрузка: $R_n=1 \text{ Ом}; L_n=2.4 \text{ мГн}.$

Источники напряжения: $U_i = 29,5 \text{ В}; f_i = 0,5 \text{ Гц}; R_i = 1 \text{ мОм}; L_i = 0,1 \text{ мкГн}.$

На рис. 5 показаны временные диаграммы напряжений и токов БАСГ при скольжении генератора $s = 0,01 = \text{const}.$

Временные диаграммы рассчитаны при углах управления тиристорами $\alpha_u = 0^\circ$ (а – в) и $\alpha_u = 50^\circ$ (г – е). Угол $\alpha_u = 0^\circ$ определяется по точке пересечения кривых фазных ЭДС частоты заполнения. Расчеты проведены при постоянных ЭДС источников питания на входе статорных обмоток возбуждителей.

На рисунках:

$u_A, u_B, u_C, i_A, i_B, i_C$ – фазные напряжения и токи нагрузки генератора;

$u_{a1}, u_{b1}, u_{c1}, i_{a1}, i_{b1}, i_{c1}$ – фазные напряжения и токи первой трехфазной обмотки возбуждения генератора.

Как следует из результатов исследований, фазные токи обмоток возбуждения генератора практически синусоидальные при широком изменении угла управления тиристорами. Практически синусоидальные напряжения и токи нагрузки генератора.

При уменьшении угла управления тиристорами требуемая величина напряжения генератора поддерживается увеличением напряжения возбуждения возбуждителей.

Как было указано выше, при скольжении $s > 0$ вторичный контур АМ потребляет реактивную мощность, а при $s < 0$ отдает ее. Это положение, справедливое для АМ, нельзя полностью переносить на оценку характера выдачи и потребления реактивной мощности вторичным контуром ПЧ.

Частота скольжения АМ $f_s = f_1 - f_B = s \cdot f_1.$

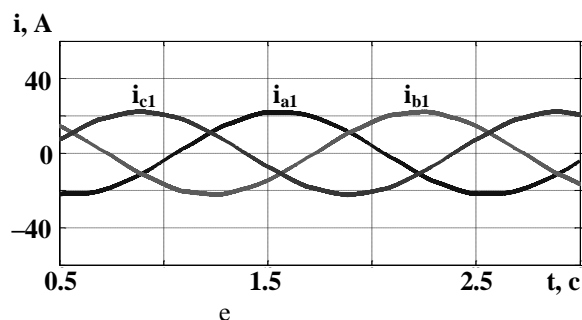
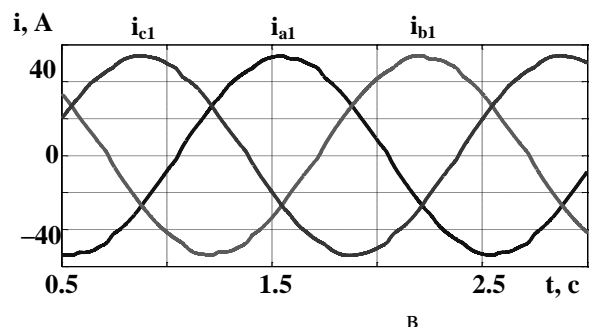
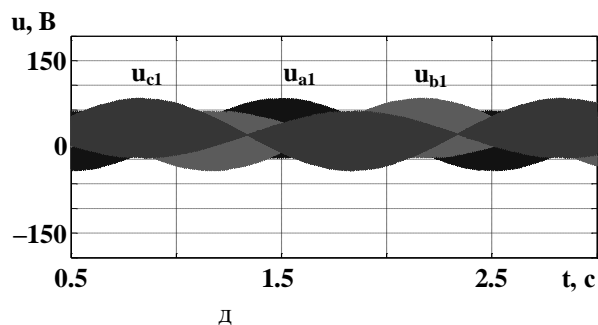
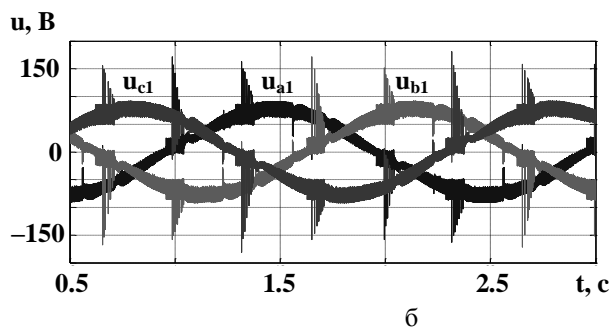
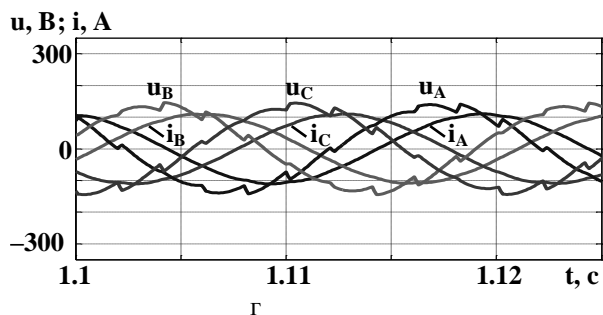
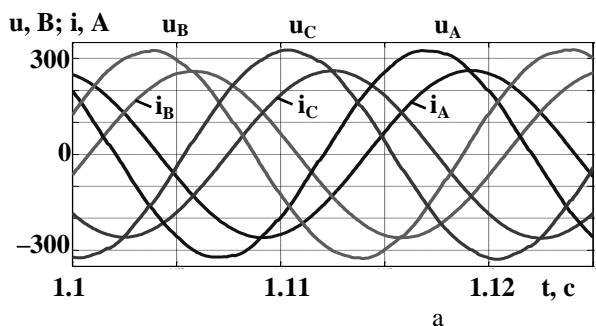


Рисунок 5 – Напряжения и токи статора АГ (а, г) и нагрузки НПЧЕМ (б, в, д, е) при углах управления тиристорами $\alpha_u = 0^\circ$ (а–в) и $\alpha_u = 50^\circ$ (г–е)

При $f_s > 0$ скольжение $s > 0$ (положительно), вектор напряжения опережает вектор тока на угол $\varphi_2 > 0$. При этом временные уравнения тока и напряжения первой фазы ротора АМ:

$$i_2(t) = I_{2m} \cos(2\pi s f_1 t);$$

$$u_2(t) = U_{2m} \cos(2\pi s f_1 t + \varphi_2).$$

При $f_s < 0$ скольжение $s < 0$ (отрицательно), угол $\varphi_2 < 0$. Направление вращения векторов тока и на-

пряжения ротора АМ в пространстве (по отношению к статору) противоположно направлению их вращения при положительном скольжении. Временное уравнение фазного тока вторичного контура (АМ и ПЧ)

$$i_2(t) = I_{2m} \cos(2\pi(-s)f_1t) = I_{2m} \cos(2\pi|s|f_1t).$$

Временное уравнение напряжения вторичного контура с учетом знаков скольжения АМ и угла φ_2 :

$$u_2(t) = U_{2m} \cos(2\pi(-s)f_1t + (-\varphi_2)) = U_{2m} \cos(2\pi|s|f_1t + |\varphi_2|),$$

т. е. вектор напряжения вторичного контура ПЧ при положительном и отрицательном скольжении всегда опережает вектор тока на угол $|\varphi_2|$.

Результаты многочисленных исследований математических моделей АСМ с контактными кольцами и в бесконтактном исполнении в режимах двигателя и генератора полностью подтвердили это положение.

ВЫВОДЫ. 1. Результаты исследований математической модели БАСМ с ЭМВП на базе каскадного возбудителя и НПЧЕМ подтвердили работоспособность преобразователя при комбинированном регулировании возбуждением генератора по цепи возбуждения возбудителей и углу управления тиристорами.

2. Вектор напряжения вторичного контура ПЧ при положительном и отрицательном скольжении основной электрической машины АСМ в режимах генератора и двигателя всегда опережает вектор тока на угол $|\varphi_2|$. Это положение обязательно необходимо учитывать при расчете ПЧ.

3. Целесообразны совершенствование математической модели БАСМ с учетом системы автоматического регулирования, расчет переходных процессов асинхронизированного комплекса при изменении режимов работы, законов регулирования, набросе и сбросе нагрузки.

ЛИТЕРАТУРА

1. Постников И.М., Новиков А.В., Прокофьев Ю.А. и др. Теория и методы расчета асинхронных турбогенераторов. – К.: Наукова думка, 1977. – 176 с.
2. А.с. СССР № 1206922. Преобразователь частоты / Галиновский А.М., Дубчак Е.М.; опубл. 1986.
3. Алексеев Б.А., Мамиконянц Л.Г., Шакарян Ю.Г. Регулирование режимов работы электроэнергетических систем с помощью асинхронизированных синхронных машин // Электрич. станции. – 1998. – № 12. – С. 48–56.
4. Лабунец И.А. Асинхронизированные турбогенераторы // Новости электротехники. – Информ. спр. изд. – 2007. – № 1 (43). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/about.php>

5. Галиновский А.М. Электромашинно-вентильные модулированные преобразователи в бесконтактных генераторах стабильной частоты // Технічна електродинаміка. – Спец. вип. 2. – Т. 2, Силовая электроника и энергоэффективность. – К.: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1998. – С. 61–65.

6. Галиновский А.М., Васылив К.Н., Ленская Е.А. Исследование бесконтактного асинхронизированного генератора с модулированным напряжением. – Харьков: НТУ “ХПИ”, 2001. – № 16. – 196 с.

7. Галиновский А.М., Бобер В.А. Математична модель безконтактної асинхронізованої машини з багатофазним збудником // Гідроенергетика України. – 2008. – № 4. – С. 21–27.

8. Бобер В.А., Галиновский А.М. Математическая модель бесконтактной асинхронизированной машины с каскадным возбудителем в режимах генератора и двигателя // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2009. – № 83. – С. 95–103.

9. Сенько В.И., Галиновский А.М., Ленская Е.А. Многофазно-трехфазные мостовые преобразователи частоты бесконтактных асинхронизированных машин // Вісник Кременчуцького держ. університету ім. Михайла Остроградського. – № 4/2010 (63), част. 3. – С. 69–73.

10. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Электромашинно-вентильные преобразователи машин двойного питания, часть 1 // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 84. – С. 124–133.

11. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Ленская Е.А. Электромашинно-вентильные преобразователи машин двойного питания, часть 2 // Гірничя електромеханіка та автоматика: наук.-техн. зб. – 2010. – Вип. 85. – С. 159–169.

12. А.с. СССР № 1339821. Способ комбинированного управления тиристорным преобразователем частоты / Галиновский А.М., Дубчак Е.М.; опубл. 1987.

13. Галиновский А.М., Бобер В.А., Давыдов А.Н., Вишневский А.С. Особенности проектирования асинхронизированных машин // Електромеханічні і енергозберігаючі системи. Щоквартальний науково-виробничий журнал. – Кременчук: КрНУ, 2011. – Вип. 2/2011 (14). – С. 110–115.

14. Бобер В.А. Математическая модель электро-механических систем // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізація: Зб. наук. праць VI Всеукраїнської науково-технічної конференції молодих учених у м. Кременчук. – КДПУ, 2008. – С. 58–59.

15. Абубакиров Ш.И. Опыт и перспективы использования асинхронизированных гидрогенераторов в проектах ОАО «Институт Гидропроект» // Гидротехника. – 2010. – № 2 (19). – С. 6–11.

CONTACTLESS ASYNCHRONIZED GENERATOR WITH COMBINED EXCITATION CONTROL

A. Galinovsky, V. Bober

Natioanal Technical University of Ukraine “Kiev Polytechnic Institute”

prosp. Pobedy, 37, Kiev, 03056, Ukraine. E-mail: ntuukafem@ua.fm

The results of the research on mathematical model of the contactless asynchronous generator with cascade polyphase cross-field exciter and direct frequency transformer with essential switching and modulated input voltage at infralow excitation frequency generator’s operation and excitation control via exciter’s excitation circuit and thyristor control angle are given.

Key words: asynchronous, generator, exciter, transformer, combined.

REFERENCES

1. Postnikov I., Novikov A., Prokofyev U. *Theory and methods of asynchronous turbogenerators evaluation*. – K.: Naukova dumka, 1977. – 176 p. [in Russian]
2. Certificate of authorship of USSR 1206922_Frequency transformers / A. Galynovskiy, E. Dubchak; publ. 1986. [in Russian]
3. Certificate of authorship of USSR 1339821_Thyristor frquency transformer combined control method / A. Galynovskiy, E. Dubchak; publ. 1987. [in Russian]
4. Alekseev B., Mamikonyanc L., Shakaryan U. Electro energetic systems operation modes control with a help of asynchronous synchronous machines // *Electrich. stancii*. – 1998. – № 12. – PP. 48–56. [in Russian]
5. Galynovskiy A. A modulated valve-engine transducer of the contactless frequency-stable generators // *Technichna elektrodynamika*. – K.: Electrodynamics Institute, 1998. – № 2. – PP. 61–65. [in Russian]
6. Galynovskiy A., Vasiliv K., Lenskaya E. A contactless asynchronous generator with modulated voltage research. – Kharkov: NTU “KhPI”, 2001. – № 16. – PP. 196. [in Russian]
7. Labunec I. Asynchronous turbogenerators // *Novosti electrotehniki*. – 2007. – № 1 (43). [in Russian]
8. Bober V. Electromechanical systems mathematical model // *Electromehanichni sistemi, metodi modeluvannya ta optimizacii:zb. nauk.prac VI Vseukrainskoi naukovu-tehnichnoi konferencii molodih uchenih u m. Kremenchuk*. – KDPU, 2008. – PP. 58–59. [in Russian]
9. Galynovskiy A., Bober V. The mathematical model of the contactless asynchronous machine with cascade exiter in generator and drive modes // *Hyrnicha elektromehanika ta avtomatika: nauk.-tehn. zb.* – 2009. – № 83. – PP. 95–103. [in Russian]
10. Galynovskiy A., Bober V. The mathematical model of the contactless asynchronous machine with cascade exiter in generator and drive modes // *Hyrnicha elektromehanika ta avtomatika: nauk.-tehn. zb.* – 2009. – № 83. – PP. 95–103. [in Russian]
11. Senko V., Galynovskiy A., Lenskaya E. The poly phase-three phase lattice circuit frequency transformers of the contactless asynchronous machines // *Visnik KDU im. Mikhaila Ostrohradskoho*. – 2010. – № 4. – PP. 60–73. [in Russian]
12. Abubakirov S. The asynchronous hydro generators operation experience and outlooks in “Institute Hydroproekt” enterprise // *Hydrotehnika*. – 2010. – № 2 (19). – PP. 6–11. [in Russian]
13. Galynovskiy A., Dubchak E., Lenskaya E. The double-input machines valve-engine transducers, part 1 // *Hyrnicha elektromehanika ta avtomatika: nauk.-tehn. zb.* – 2010. – № 84. – PP. 124–133. [in Russian]
14. Galynovskiy A., Dubchak E., Lenskaya E. The double-input machines valve-engine transducers, part 2 // *Hyrnicha elektrpmehanika ta avtomatika: nauk.-tehn. zb.* – 2010. – № 85. – PP. 159–169. [in Russian]
15. Galynovskiy A., Bober V., Davidov A., Vishnevskiy A. Asynchronous machines projecting features // *Electromehanichni i energozberigauchi sistemi. Shokvartalniy noukovo-virobnichiy jurnal*. – Kremenchuk: KDU, 2009. – № 2/2011 (14). – PP. 110–115. [in Russian]

Стаття надійшла 23.12.2011.

Рекомендовано до друку
к.т.н., доц. Каліновим А.П.