

РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ БЕСКОНТАКТНОГО АСИНХРОНИЗИРОВАННОГО ТУРБОГЕНЕРАТОРА С МНОГОФАЗНЫМ КАСКАДНЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ

В.А. Бобер¹, инж., **А.М. Галиновский**², канд. техн. наук, **В.А. Саратов**³, канд. техн. наук

1, 2 – Нац. техн. ун-т Украины «КПИ»,
пр. Победы, 37, Киев-56, 03056, Украина

3 – Ин-т электродинамики НАН Украины,
пр. Победы, 56, Киев-57, 03680, Украина

Приведены результаты разработок и исследований математических моделей асинхронизированного турбогенератора с трехфазной обмоткой ротора, с контактными кольцами и в бесконтактном исполнении с учетом параметров массива ротора и особенностей работы многофазного каскадного электромашино-вентильного возбудителя с модулированным напряжением и естественной коммутацией. Библиография: 19, рис. 8, таблица.

Ключевые слова: асинхронизированный турбогенератор, возбудитель, преобразователь, естественная коммутация.

Введение. В настоящее время в энергосистемах широко внедряются асинхронизированные машины (АСМ) [1, 2, 16]. На гидроаккумулирующих станциях 35-ти стран мира работают АСМ мощностью до 500 МВт в режимах генератора и двигателя [1]. В Украине и России введены в эксплуатацию асинхронизированные турбогенераторы (АСТГ) мощностью 110...320 МВт [16]. Первый АСТГ мощностью 200 МВт изготовлен Харьковским НПО «Электротяжмаш» и установлен в 1986 г. на Бурштынской ГРЭС. В разработке АСТГ-200 принимали участие ученые Института электродинамики НАН Украины и НТУ Украины «КПИ» [3, 12].

В существующих АСМ роторные обмотки подключены к преобразователю частоты (ПЧ) через контактные кольца. Требования по повышению надежности машин исключают или ограничивают применение щеточно-контактных узлов. Поэтому актуальна разработка бесконтактных АСМ (БАСМ).

В системах возбуждения БАСМ применяются электромашино-вентильные преобразователи (ЭМВП), к которым предъявляются самые высокие требования по качеству формы кривой выходного напряжения, быстродействию регулирования, простоте устройств управления вращающимся преобразователем, защите от коммутационных перенапряжений.

Формирование кривой выходного напряжения ЭМВП существенно упрощается при применении циклического алгоритма управления ПЧ [5–10]. Наиболее просто такой алгоритм управления реализуется в непосредственных ПЧ (НПЧ) с искусственной коммутацией (НПЧИ) при ограниченном числе полностью управляемых ключей. В работе [19] рассмотрена система возбуждения БАСТГ на базе указанного НПЧИ. Однако исследования, проведенные в работе [10], показали: НПЧИ не могут применяться в системах возбуждения БАСМ в связи с большими коммутационными перенапряжениями и потерями в преобразователях.

Наилучшим качеством формы кривой выходного напряжения при инфранизких частотах нагрузки отличаются ЭМВП на базе каскадного возбудителя и НПЧ с естественной коммутацией и модулированным напряжением (НПЧЕМ) [5–9, 14]. Наилучшие технические показатели имеют НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования, в которых применяется комбинированный закон управления тиристорами по току нагрузки и частоте заполнения, комбинированное потенциальное соединение обмоток источника и нагрузки [5–7, 14, 17, 18]. Однако такие ПЧ не работоспособны при применении трехфазных источников питания [6, 9, 14]. Работоспособны многофазно-трехфазные мостовые НПЧЕМ с четным числом фаз источника на одну фазу нагрузки [5–8, 14]. В работе [11] отмечается, что применение многофазных возбудителей в мощных бесконтактных синхронных машинах приводит к улучшению качества формы выходного напряжения и повышению быстродействия возбудителей.

Эти положения справедливы и для возбудителей БАСТГ. Поэтому разработка многофазных ЭМВП БАСТГ на базе каскадных возбудителей и НПЧЕМ является актуальной.

Цель работы. Разработка и исследование математической модели бесконтактного асинхронизированного турбогенератора с электромашинно-вентильным преобразователем на базе многофазного каскадного электромашинного возбудителя и непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией и модулированным напряжением.

Разработке специальной математической модели (СММ) БАСТГ предшествуют: исследование АСТГ по схеме замещения; разработка и исследование математической модели АСТГ с контактными кольцами.

Исследования моделей АСТГ и БАСТГ проводятся с учетом и без учета параметров массива ротора при номинальной нагрузке: мощность $P = 200$ МВт; напряжение $U = 15750$ В; частота $f = 50$ Гц; $\cos\varphi = 0,85$. Число пар полюсов $p = 1$, число фаз ротора $m = 3$.

Исследование АСТГ по схеме замещения. Схема замещения АСТГ показана на рис. 1 а. Активные и индуктивные сопротивления рассеяния обмоток: $r_1 = 0,00271$ Ом; $r'_2 = 0,00285$ Ом; $x_1 = 0,224$ Ом; $x'_2 = 0,188$ Ом. Параметры ротора приведены к обмотке статора, коэффициент трансформации $k = w_r/w_s = 3,654$, где w_r, w_s – числа эффективных витков фаз статора и ротора. Сопротивление взаимоиндукции в номинальном режиме $x_m = 2,46$ Ом.

При работе АСТГ со скольжением s в токопроводящих элементах конструкции ротора (клинья, бочка ротора, бандажные кольца) протекают вихревые токи частоты скольжения. Они влияют на характеристики АСТГ и работу его системы возбуждения. Расчет параметров массивного ротора выполнен на основе описания распределения электромагнитного поля в многослойной среде системой уравнений Максвелла с переходом к электрической многозвенной схеме замещения [3, 12, 15]. Каждая конструктивная область ротора подразделяется на элементарные слои, эквивалентные Г-образными схемами замещения каждого слоя. Выражения параметров клиньев, зубцов и ярма ротора однотипны по структуре. Параметры Г-образной схемы замещения слоя определяются по следующим соотношениям:

$$\text{сопротивление вихревому току, наведенному в слое, } z = j \cdot \frac{\omega \cdot \mu \cdot x}{\beta \cdot th(\beta \cdot h)} \cdot k ;$$

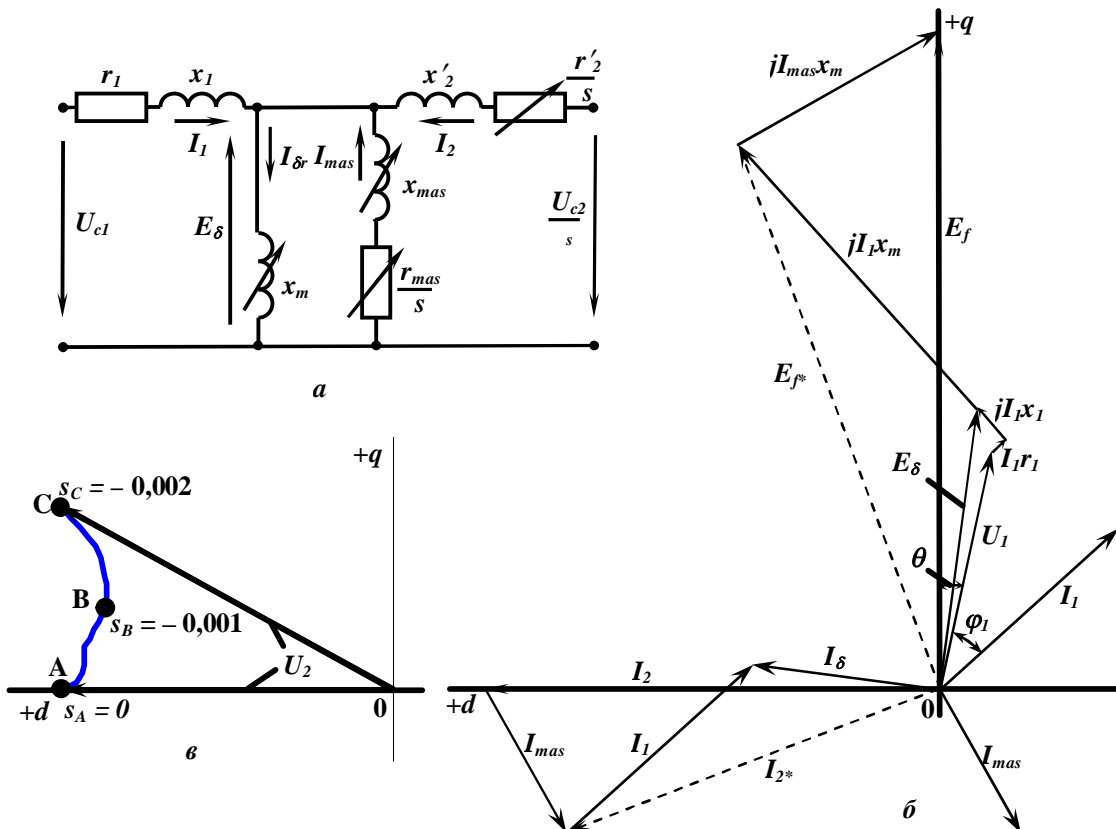


Рис. 1

сопротивление рассеяния поля в слое $z_\tau = j \cdot \frac{\omega \cdot \mu_x}{\beta} \cdot th(\beta \cdot h) \cdot k$;

постоянная распространения электромагнитного поля в слое $\beta = (j\omega\mu_x\gamma + (\frac{\pi}{\tau})^2 \cdot \frac{\mu_x}{\mu_y})^{0,5}$;

коэффициент $k = \frac{2mw_{\text{эф}}^2}{p} \cdot \frac{l}{\tau}$,

где круговая частота электромагнитного поля в роторе $\omega = \omega_1 \cdot s$; ω_1 – частота сети; μ_x – тангенциальная составляющая магнитной проницаемости слоя; h – высота слоя; γ – удельная электропроводность слоя; τ – полюсное деление; μ_y – магнитная проницаемость слоя вдоль радиуса ротора; l – длина бочки ротора; $w_{\text{эф}}$ – эффективное число витков в фазе обмотки, к которой приводятся параметры бочки ротора. Эффективное число витков обмотки возбуждения $w_{\text{эф}} = 33,23$. Сопротивления ротора вихревому току, приведенные к обмотке возбуждения, в зависимости от скольжения представлены в таблице.

$s, \%$	0	0,05	0,1	0,15	0,2	0,3	0,4
$r, \text{Ом}$	0,0125	0,0259	0,0418	0,0438	0,0404	0,0413	0,0405
$r/s, \text{Ом}$	$-\infty$	- 51,9	- 41,8	- 28,8	- 20,2	- 13,8	- 10,1
$x, \text{Ом}$	0	0,0111	0,0125	0,0143	0,0162	0,0181	0,0202
$x/ s , \text{Ом}$	675,8	22,2	12,5	9,5	8,1	6,0	5,0

На рис. 1 б приведена векторная диаграмма напряжений и намагничивающих сил генератора. Пунктирными линиями показаны вектора тока ротора I_2^* и наведенной этим током ЭДС E_f^* в АСТГ без учета параметров массива.

На рис. 2 представлены зависимости: полной S_2 , активной P_2 и реактивной Q_2 мощ-

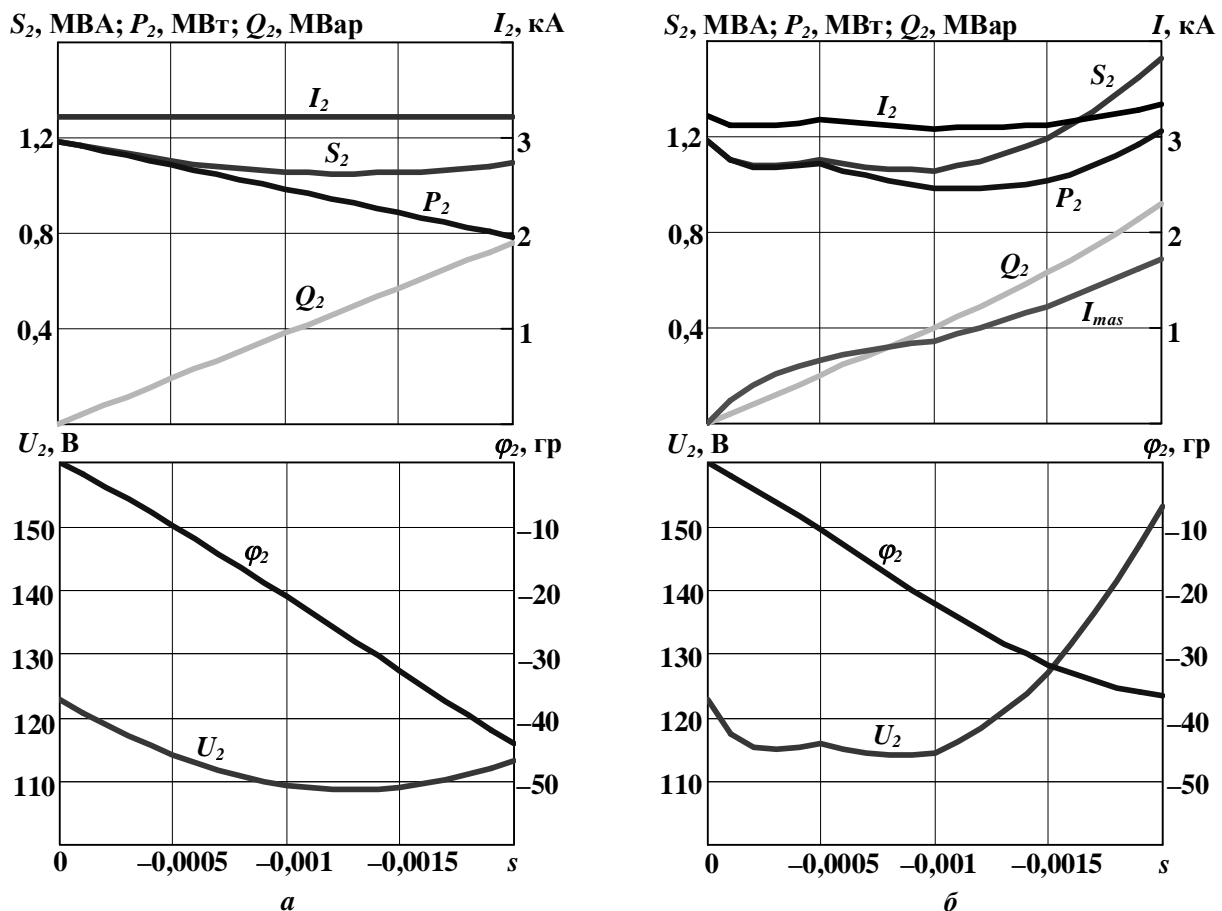


Рис. 2

ностей, напряжения U_2 , тока I_2 , тока в массиве I_{mas} и $\cos\varphi_2$ от скольжения s ($s = 0 \dots -0,002$): a – без учета массива; b – с учетом параметров массива. Расчеты проведены при неизменной номинальной мощности АСТГ-200.

На рис. 1 в показана линия напряжений ротора АСТГ-200 при изменении скольжения от $s_A = 0$ до $s_C = -0,002$. Выделена точка с номинальным скольжением $s_N = s_B = -0,001$.

Электрические схемы моделей АСТГ и БАСТГ показаны на рис. 3 и 4.

Статорные обмотки генераторов подключаются к автономной нагрузке переключателем K_1 или к сети переключателем K_2 .

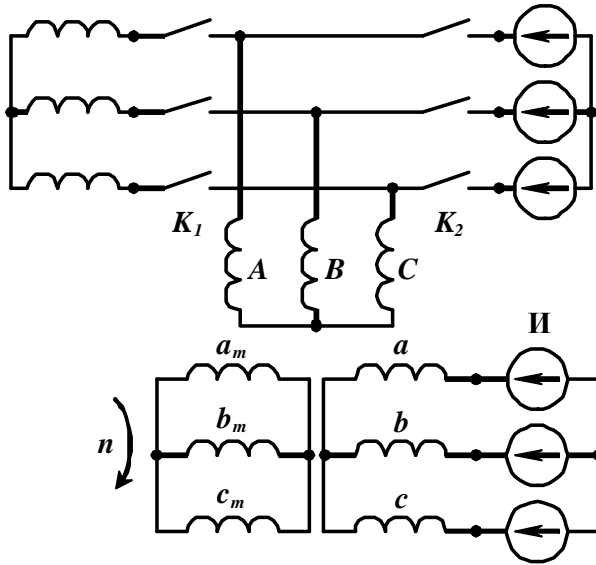


Рис. 3

В АСТГ (рис. 3) трехфазная обмотка ротора подключена к источнику напряжения частоты скольжения (И). В БАСТГ (рис. 4) трехфазная обмотка ротора генератора через три фазные тиристорные преобразователи (ТП_А, ТП_В, ТП_С) подключена к якорным обмоткам многофазного каскадного возбуждателя, который состоит из двух возбуждателей с одинаковым числом пар полюсов p_B .

Параметры массива ротора АСТГ и БАСТГ учитываются введением дополнительной трехфазной обмотки (a_m, b_m, c_m) с переменными параметрами.

Статорные обмотки двух возбуждателей БАСТГ (A_1, B_1, C_1 и A_2, B_2, C_2) подключены к трехфазному источнику напряжения частоты скольжения генератора (И_В). Направления вращения полей возбуждателей

(n_{B1} и n_{B2}) противоположные.

Число фаз якорных обмоток возбуждателей $m_i = 12$. На рис. 4 обозначено: 1-1...1-12 – якорные обмотки первого возбуждателя; 2-1...2-12 – якорные обмотки второго возбуждателя. В якорных обмотках возбуждателей наводятся ЭДС:

$$\begin{aligned} e_{1.1} &= A_{i1} \sin(\omega_1 t) & e_{2.1} &= A_{i2} \sin(\omega_2 t) \\ e_{1.2} &= A_{i1} \sin(\omega_1 t + 30^\circ) & e_{2.2} &= A_{i2} \sin(\omega_2 t + 30^\circ) \\ &\dots\dots\dots & &\dots\dots\dots \\ e_{1.12} &= A_{i1} \sin(\omega_1 t + 330^\circ) & e_{2.12} &= A_{i2} \sin(\omega_2 t + 330^\circ), \end{aligned}$$

где $\omega_1 = 2\pi f_{21}$, $\omega_2 = 2\pi f_{22}$ – частоты ЭДС якорных обмоток возбуждателей; $f_{21} = p_B \cdot f \cdot (1-s) / p + f_s$, $f_{22} = p_B \cdot f \cdot (1-s) / p - f_s$. На входы фазных ТП подаются три фазные системы биений напряжений:

$$\begin{aligned} e_{1A} &= e_{1.1} + e_{2.1} = A_i \sin(\omega_3 t) \cdot \cos(\omega_B t); \\ e_{2A} &= e_{1.4} + e_{2.4} = A_i \sin(\omega_3 t + 90^\circ) \cdot \cos(\omega_B t); \\ e_{3A} &= e_{1.7} + e_{2.7} = A_i \sin(\omega_3 t + 180^\circ) \cdot \cos(\omega_B t); \\ e_{4A} &= e_{1.10} + e_{2.10} = A_i \sin(\omega_3 t + 270^\circ) \cdot \cos(\omega_B t); \\ \\ e_{1B} &= e_{1.5} + e_{2.9} = A_i \sin(\omega_3 t) \cdot \cos(\omega_B t - 120^\circ); \\ e_{2B} &= e_{1.8} + e_{2.12} = A_i \sin(\omega_3 t + 90^\circ) \cdot \cos(\omega_B t - 120^\circ); \\ e_{3B} &= e_{1.11} + e_{2.3} = A_i \sin(\omega_3 t + 180^\circ) \cdot \cos(\omega_B t - 120^\circ); \\ e_{4B} &= e_{1.2} + e_{2.6} = A_i \sin(\omega_3 t + 270^\circ) \cdot \cos(\omega_B t - 120^\circ); \\ \\ e_{1C} &= e_{1.9} + e_{2.5} = A_i \sin(\omega_3 t) \cdot \cos(\omega_B t + 120^\circ); \\ e_{2C} &= e_{1.12} + e_{2.8} = A_i \sin(\omega_3 t + 90^\circ) \cdot \cos(\omega_B t + 120^\circ); \\ e_{3C} &= e_{1.3} + e_{2.11} = A_i \sin(\omega_3 t + 180^\circ) \cdot \cos(\omega_B t + 120^\circ); \\ e_{4C} &= e_{1.6} + e_{2.2} = A_i \sin(\omega_3 t + 270^\circ) \cdot \cos(\omega_B t + 120^\circ). \end{aligned}$$

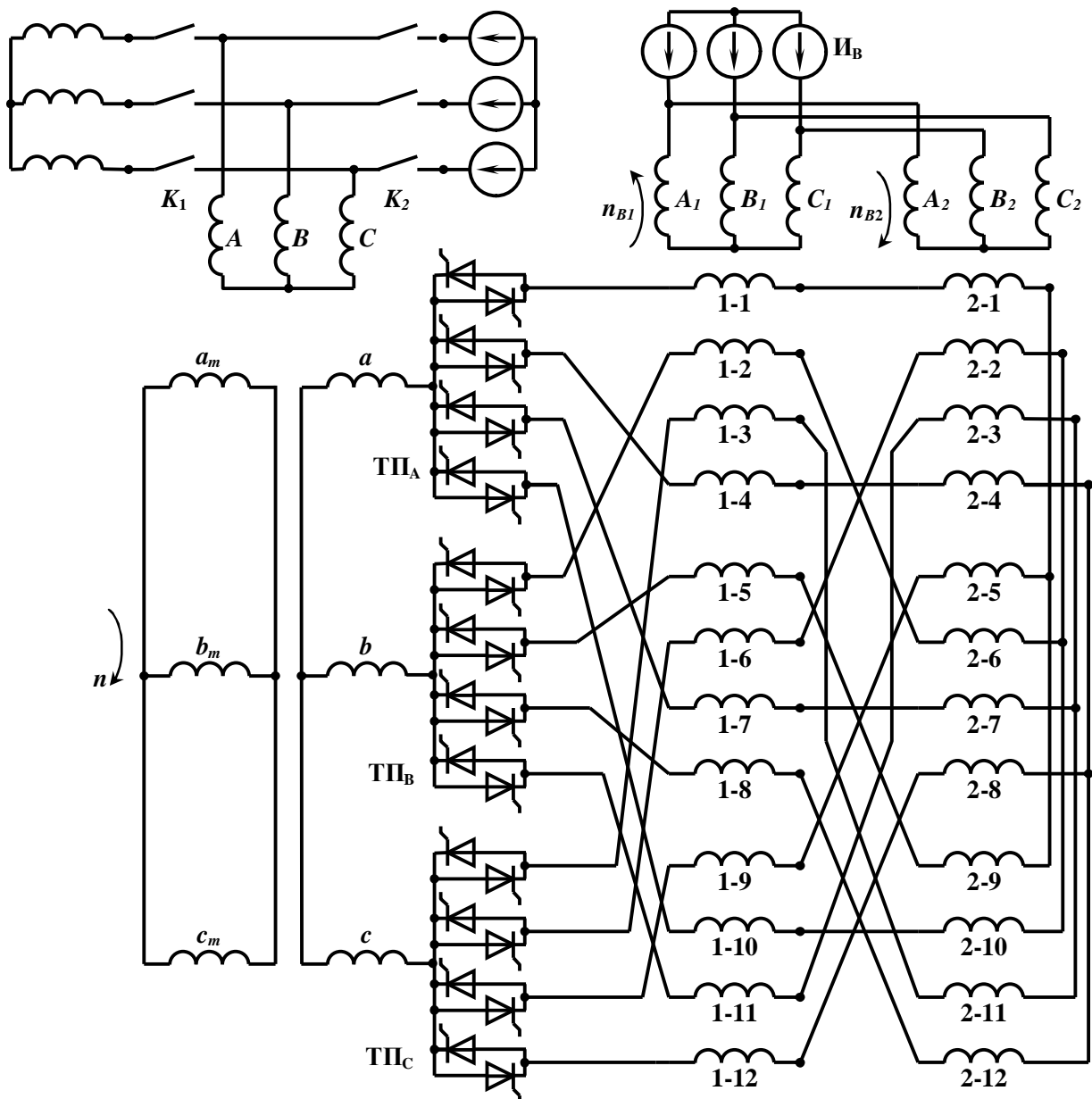


Рис. 4

Частота биений равна частоте скольжения генератора: $\omega_B = (\omega_1 - \omega_2) / 2 = 2\pi f_B = 2\pi f_s$.

Частота заполнения $\omega_3 = (\omega_1 + \omega_2) / 2 = 2\pi f_3$, где $f_3 = p_B \cdot n$.

На валу БАСТГ установлена управляющая машина (УМ) с числом пар полюсов $p_U = p_B$. На статоре УМ расположены две обмотки возбуждения, подключенные к регулируемым источникам постоянного тока. В якорных обмотках УМ наводятся ЭДС с частотой управления $f_U = p_U \cdot n = p_B \cdot n$, равной частоте заполнения f_3 .

В возбудителе применено комбинированное потенциальное разделение обмоток источника, при котором в общие звезды соединены обмотки якоря с одинаковыми фазами ЭДС частоты заполнения. Применен комбинированный закон управления НПЧЕМ, при котором совместное управление встречновключенными тиристорами осуществляется при токе роторной обмотки генератора, меньшем тока уставки i_{um} , а раздельное – в других случаях.

Уравнения математических моделей АСТГ и БАСТГ. Математическая модель – это система дифференциальных уравнений электрического равновесия. Методика расчета, приведенная в работе [4], позволяет: контролировать ток в узлах схемы на каждом шаге интегрирования; применять любой из известных методов интегрирования. В данном исследовании применен метод интегрирования Эйлера.

Источники трехфазных напряжений (рис. 3 и 4) представлены трехфазными источниками ЭДС (E_i) с внутренними активными сопротивлениями R_i и индуктивностями L_i . Каждая ветка с источниками напряжения описывается дифференциальным уравнением

$$R_i \cdot I + L_i \cdot pI + E_i = \varphi_{in} - \varphi_{ik}, \quad (1)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования по времени t ; $E_i = A \cdot \cos(2\pi \cdot f \cdot t - \alpha_i)$; A – амплитуда ЭДС источника; f – частота источника; $\alpha_i = (m-1) \cdot 2\pi/3$ – начальная фаза ЭДС; m – номер фазы ЭДС; I – ток ветви; φ_{in} , φ_{ik} – потенциалы начала и конца ветви.

Обмотки генератора и возбuditеля. Дифференциальное уравнение для обмотки фазы A статора генератора при вращении ротора

$$R_A \cdot I_A + \sum L_{Am} \cdot pI_m + \sum pL_{Am} \cdot I_m = \varphi_{An} - \varphi_{Ak}, \quad (2)$$

где R_A – активное сопротивление фазы A ; L_{Am} , pL_{Am} – взаимоиנדуктивности и производные взаимоиנדуктивностей между фазами; I_m , pI_m – токи и производные токов фаз АГ; φ_{An} , φ_{Ak} – потенциалы начала и конца ветви фазы; m – фазы статора и ротора АСГ (A, B, C, a, b, c).

Подобным образом составлены дифференциальные уравнения обмоток возбuditеля.

Нагрузка. Каждая ветвь нагрузки описывается дифференциальным уравнением

$$R_n \cdot I + L_n \cdot pI = \varphi_{nn} - \varphi_{nk}, \quad (3)$$

где R_n – активное сопротивление нагрузки; L_n – индуктивность нагрузки; I – ток ветви; φ_{nn} , φ_{nk} – потенциалы начала и конца ветви.

Тиристор. Модель тиристора представлена RL – цепью (3) с переменными параметрами. В открытом состоянии $R_t, L_t \approx 0$, а в закрытом $R_t, L_t \approx \infty$.

Из уравнений (1) ... (3) составлено матричное уравнение:

$$R' \times I + L' \times pI + pL' \times I + K'_E \times E = K'_\varphi \times \varphi, \quad (4)$$

где K'_E – матрица коэффициентов ЭДС размера $n \times k$ (n – количество ветвей схемы, k – количество ЭДС в схеме); K'_φ – матрица коэффициентов потенциалов.

Ветви схемы связаны узлами, для которых составлена система уравнений в матричном виде согласно I-му закону Кирхгофа:

$$K'_i \times I = 0, \quad (5)$$

где K'_i – матрица коэффициентов тока; I – матрица токов.

Количество уравнений, входящих в системы (4) и (5), меньше количества неизвестных (φ, I, pI). Поэтому составлены еще n уравнений для связи токов и их производных. Согласно методу численного интегрирования Эйлера составляем систему уравнений в матричном виде

$$K'_{i0} \times I_0 + h \cdot K'_{pi} \times pI = K'_{ii} \times I, \quad (6)$$

где K'_{i0} , K'_{pi} , K'_{ii} – единичные диагональные матрицы; h – шаг интегрирования; I_0 – матрица токов предыдущего шага интегрирования.

Перенеся неизвестные величины уравнений (4)...(6) в правую часть, а известные в левую, получаем систему матричных уравнений:

$$\begin{cases} R' \times I_0 + pL' \times I_0 + K'_E \times E = K'_\varphi \times \varphi - L' \times pI, \\ 0 = K'_i \times I, \\ K'_{i0} \times I_0 = K'_{ii} \times I - h \cdot K'_{pi} \times pI. \end{cases}$$

После преобразования получаем одно матричное уравнение:

$$R \times I_0 + pL \times I_0 + K_{i0} \times I_0 + K_E \times E = (K_\varphi + K_i - h \cdot K_{pi} - L) \times N,$$

где N – матрица неизвестных, в которую входят потенциалы, токи и производные токов. Решение этого уравнения следующее:

$$N = (K_\varphi + K_i - h \cdot K_{pi} - L)^{-1} \times (R \times I_0 + pL \times I_0 + K_{i0} \times I_0 + K_E \times E).$$

Исследования математических моделей АСТГ и БАСТГ при работе на автономную нагрузку.

Параметры моделей, общие для АСТГ и БАСТГ. Активные сопротивления и индуктивности рассеяния обмоток генератора: $r_1 = 0,00271$ Ом; $r_2 = 0,038$ Ом; $L_{\sigma 1} = 0,713$ мГн; $L_{\sigma 2} = 7,99$ мГн.

Взаимоиндуктивность, приведенная к обмотке статора, $L_m = 5,22$ мГн.

Массив ротора представлен дополнительной трехфазной обмоткой ротора с активным сопротивлением $r_m = 0,0404$ Ом и индуктивностью рассеяния $L_{mas} = 25,783$ мГн.

Параметры нагрузки: $r_n = 0,896$ Ом; $L_n = 1,768$ мГн.

Параметры сети: $U = 15750$ В; $r_{H2} = 1$ мОм; $L_{H2} = 1 \cdot 10^{-7}$ Гн.

Параметры источников напряжения: $r_{H1} = 1 \cdot 10^{-3}$ Ом; $L_{H1} = 1 \cdot 10^{-7}$ Гн.

Параметры выключателей: в разомкнутом положении $r_{H1} = 1 \cdot 10^5$ Ом, $L_{H1} = 25$ Гн; в замкнутом положении $r_{H1} = 1 \cdot 10^{-4}$ Ом, $L_{H1} = 2,5 \cdot 10^{-7}$ Гн.

Скольжение $s = -0,002$.

Параметры модели электромашиинно-вентильного преобразователя БАСТГ. Параметры возбудителя: число пар полюсов $p_B = 2$; количество фаз статора $m_s = 3$, ротора $m_r = 12$; коэффициент трансформации ($w_{r\phi} / w_{s\phi}$) $k_\phi = 1$; активное сопротивление статора $r_{l\phi} = 0,175$ мОм, ротора $r_{2\phi} = 0,7$ мОм; индуктивность рассеяния статора $L_{\sigma l\phi} = 1,114 \cdot 10^{-6}$ Гн, ротора $L_{\sigma 2\phi} = 4,456 \cdot 10^{-6}$ Гн; взаимоиנדуктивность, приведенная к обмотке статора, $L_{m\phi} = 22,97 \cdot 10^{-6}$ Гн.

Параметры тиристоров: в направлении прямой проводимости $r_{H1} = 1 \cdot 10^{-4}$ Ом, $L_{H1} = 2,5 \cdot 10^{-7}$ Гн; в направлении обратной проводимости $r_{H1} = 1 \cdot 10^5$ Ом, $L_{H1} = 25$ Гн.

Временные диаграммы напряжений и токов модели АСТГ показаны на рис. 5 и 6, а модели БАСТГ – на рис. 7 и 8.

Диаграммы на рис. 5 и 7 рассчитаны без учета параметров массивов роторов, диаграммы на рис. 6 и 8 рассчитаны с учетом параметров массивов роторов.

На диаграммах *а* и *б* приведены: $u_A, u_B, u_C, i_A, i_B, i_C$ – фазные напряжения и токи нагрузки АСТГ и БАСТГ; $u_a, u_b, u_c, i_a, i_b, i_c$ – фазные напряжения и токи обмоток роторов АСТГ и БАСТГ; i_{ma}, i_{mb}, i_{mc} – токи дополнительных обмоток роторов АСТГ и БАСТГ.

На диаграммах *в* рис. 7 и 8 приведены: i_{ia}, i_{ib}, i_{ic} – токи якорных обмоток возбудителей

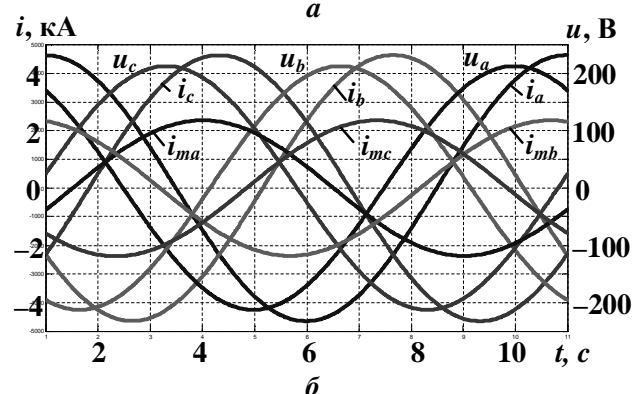
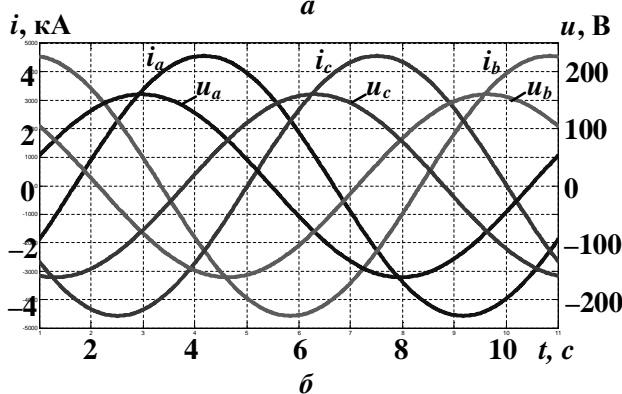
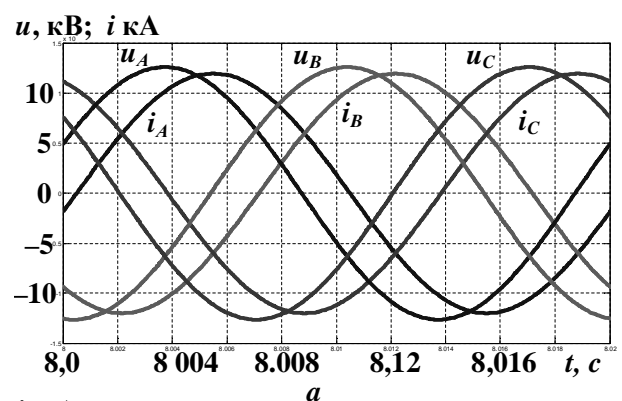
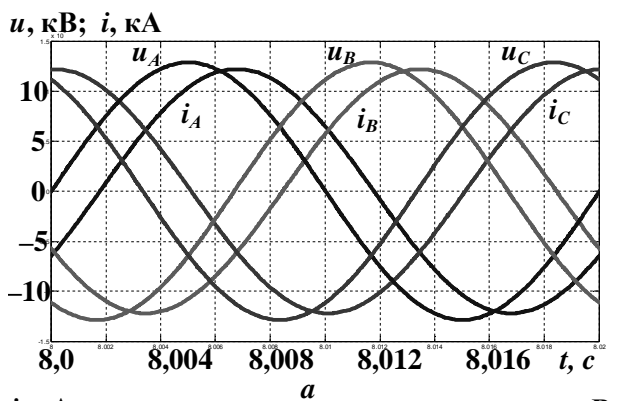


Рис. 5

Рис. 6

на входах трех фазных тиристорных преобразователей БАСТГ; sua , sub , suc – сигналы управления тиристорами прямых и обратных блоков трех фазных тиристорных преобразователей БАСТГ.

Расчет моделей БАСТГ проведен при длительности сигналов управления по частоте заполнения $T_{su} = 90^\circ$. Уставка по току нагрузки $i_{un} = 100$ А.

Анализ результатов исследований моделей БАСТГ и АСТГ при работе на автономную нагрузку с номинальными параметрами: мощность $P = 200$ МВт; напряжение $U = 15750$ В; $f = 50$ Гц; $\cos\varphi = 0,85$.

Сопоставим расчеты при скольжениях АСТГ и БАСТГ $s = -0,002$.

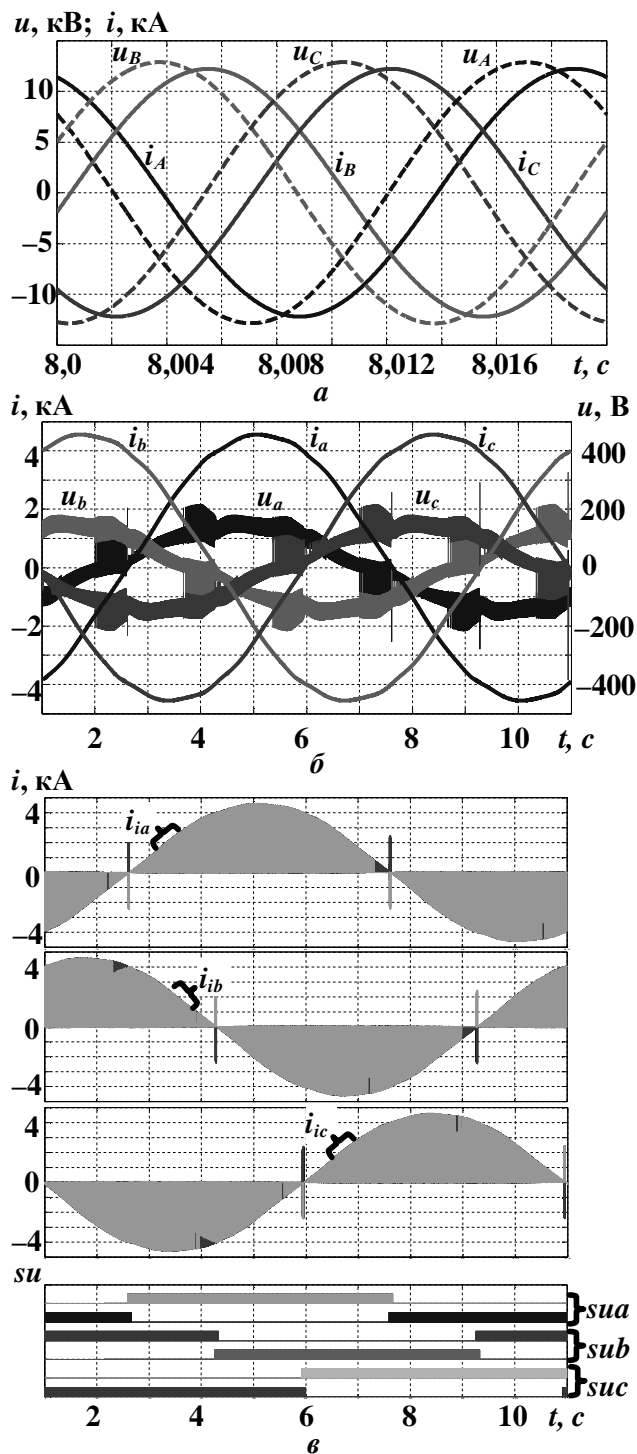


Рис. 7

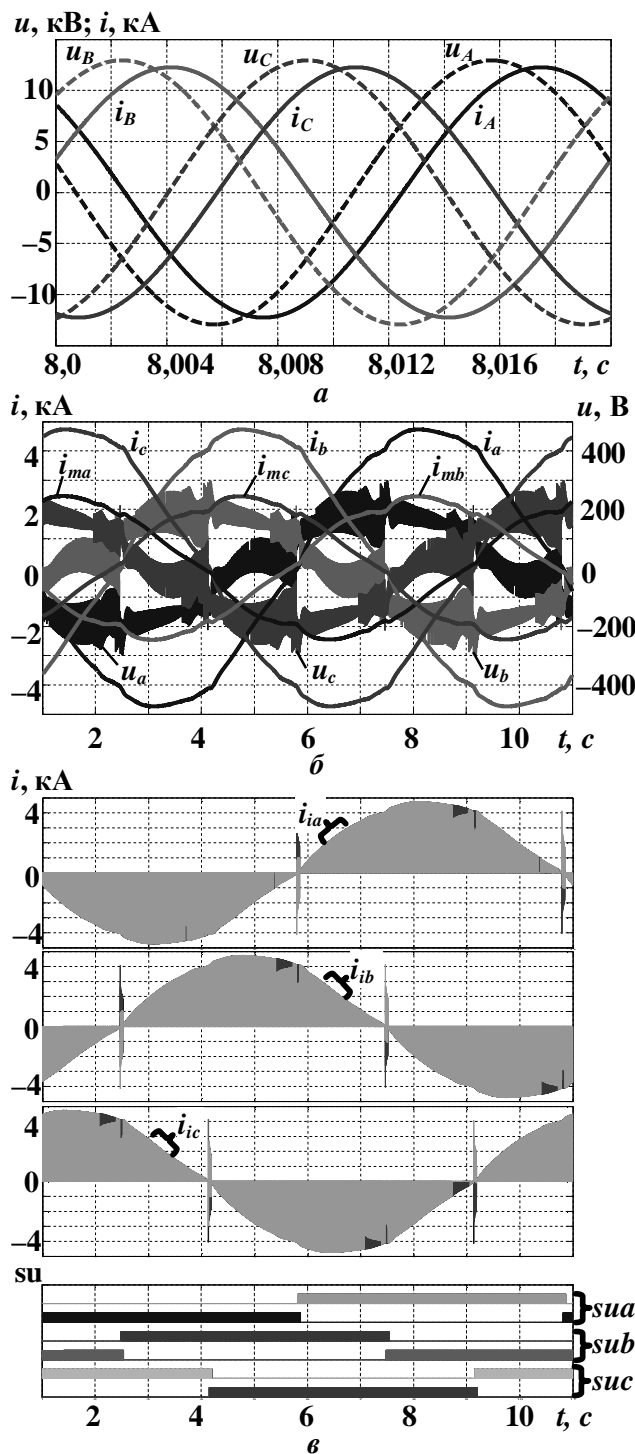


Рис. 8

Расчет АСТГ по схеме замещения проведен в среде Mathcad.

Расчет АСТГ и БАСТГ по специальным математическим моделям (СММ) проведен в среде Matlab. Программы расчетов СММ написаны на m-языке Matlab.

Программы работают устойчиво, без накопления ошибок и сбоев.

При неизменных номинальных параметрах нагрузки сопоставлялись расчетные величины: U_2 , I_2 – действующие значения первых гармоник фазных напряжений и токов обмоток роторов (обмоток возбуждения); φ_2 – углы между векторами U_2 и I_2 ; I_{mas} – действующее значение первых гармоник фазных токов дополнительных обмоток ротора АСТГ и БАСТГ, приведенных к обмоткам роторов.

Параметры АСТГ по схеме замещения при $s = -0,002$ (рис. 2):

а) без учета массива ротора $U_2 = 113$ В, $I_2 = 3226$ А, $\varphi_2 = -44^\circ$;

б) с учетом массива ротора $U_2 = 153$ В, $I_2 = 3334$ А, $\varphi_2 = -36,7^\circ$, $I_{mas} = 1723$ А.

Параметры АСТГ, рассчитанные по СММ с шагом интегрирования $\Delta t = 10^{-6}$ с, практически совпадают с результатами расчетов АСТГ по схеме замещения (рис. 5 и 6).

Для обеспечения высокой точности расчет СММ БАСТГ необходимо выполнять со сравнительно малым шагом интегрирования ($\Delta t \leq 10^{-7}$ с).

Параметры БАСТГ с учетом параметров массива ротора, рассчитанные по СММ с шагом интегрирования $\Delta t = 10^{-7}$ с (рис. 8), практически совпадают с результатами расчетов АСТГ по схеме замещения и по СММ.

Выводы. Разработана специализированная математическая модель, позволяющая исследовать режимы работы и характеристики бесконтактного асинхронизированного турбогенератора (БАСТГ) с вращающимся многофазно-трехфазным непосредственным преобразователем частоты при естественной коммутации и модулированном входном напряжении с учетом параметров массива ротора генератора. Проведены исследования модели БАСТГ в установившихся режимах работы. Достоверность результатов исследований модели БАСТГ подтверждена их практическим совпадением с результатами исследований установившихся режимов работы моделей асинхронизированного турбогенератора с контактными кольцами по схеме замещения и специальной математической модели.

Целесообразно дальнейшее развитие математической модели БАСТГ с учетом работы систем автоматического регулирования, контроля и защиты в квазиустановившихся и динамических режимах работы.

1. Абубакиров Ш.И. Опыт и перспективы использования асинхронизированных гидрогенераторов в проектах ОАО «Институт Гидропроект» // Гидротехника. – 2010. – № 2 (19). – С. 6–11.
2. Антонюк О.В., Пинчук Н.Д., Кади-Оглы И.А. и др. Асинхронизированные неявнополюсные компенсаторы. 15 января 2010 г., <http://neftegaz.ru/science/view/600>
3. Асанбаев В.Н., Саратов В.А. Схемы замещения и параметры мощных асинхронизированных турбогенераторов. – Киев, 1990. – 53 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т электродинамики; № 641).
4. Бобер В.А. Математическая модель электромеханических систем // Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізація: Зб. наук. пр. VI Всеукраїнської наук.-техн. конф. молодих учених. – Кременчук: КДПУ, 2008. – С. 58–59.
5. 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. – Вип. 83. – С. 95–104.
6. Галиновский А.М. Электромашинно-вентильные модулированные преобразователи в бесконтактных генераторах стабильной частоты // Техн. електродинаміка. – Спец. вип. Силовая электроника и энергоэффективность. – 1998. – Т.2. – С. 61–65.
7. Галиновский А.М., Бобер В.А. Математическая модель бесконтактной асинхронизированной машины // Гидроенергетика Украины. – 2008. – № 4. – С. 21–27.
8. Галиновский А.М., Бобер В.А., Ленская Е.А. Особенности построения и расчета вращающихся многофазных преобразователей частоты бесконтактных асинхронизированных машин // Энергетика: економіка, технологія, екологія. – 2007. – № 1. – С. 45–57.
9. Галиновский А.М., Васылив К.Н., Ленская Е.А. Исследование бесконтактного асинхронизированного генератора с модулированным напряжением // Вісн. НТУ “ХПІ”. – 2001. – №16. – С. 41–46.

10. 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.
11. Глебов И.А. Научные основы проектирования систем возбуждения мощных синхронных машин. – Л.: Наука. – 1988. – 322 с.
12. Постников И.М., Асанбаев В.Н., Финк А.Ф., Саратов В.А., Черемисов И.Я., Зозулин Ю.В., Карпман Д.В. Исследование параметров и характеристик мощных асинхронизированных турбогенераторов в асинхронном режиме. – Киев, 1984. – 51 с. – (Препр. / АН УССР. Ин-т электродинамики; № 399).
13. Саратов В.А. Слоистая модель и многозвенная схема замещения асинхронной машины // *Регулируемые асинхронные двигатели: Сб. науч. тр.*: – Киев: Ин-т электродинамики НАН Украины, 1997. – С. 19–25.
14. Сенько В.И., Галиновский А.М., Ленская Е.А. Многофазно-трехфазные мостовые преобразователи частоты бесконтактных асинхронизированных машин // *Вісн. Кременчуцького держ. ун-ту ім. Михайла Остроградського*. – 2010. – №4 (63), Ч.3. – С. 69–73.
15. Титко О.І., Васильковський Ю.М. Синхронно-асинхронні турбогенератори. – К: Наук. думка. – 2010. – 248 с.
16. Шакарян Ю.Г., Лабунец И.А. Внедрение асинхронизированных генераторов и компенсаторов на объектах единой энергетической системы // *Енергетик*. – 2005. – Вип. 6. – С. 12–19.
17. А. с. SU 1206922. Н 02 М 5 / 27. Преобразователь частоты / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак; Опубл. 23.01.86, Бюл. № 3.
18. А. с. SU 1339821. Н 02 М 5 / 42. Способ комбинированного управления тиристорным преобразователем частоты / А.М. Галиновский, Е.М. Дубчак; Опубл. 23.09.87, Бюл. № 35.
19. А. с. SU 15347445. Н 02 Р 9 / 14. Устройство для возбуждения асинхронизированной синхронной машины / Ю.Е. Савельев, С.В. Быков, Ю.В. Зозулин, Ю.А. Козлов; Опубл. 08.01.90, Бюл. № 1.

УДК 621.313.333

В.А. Бобер¹ інж., **О.М. Галіновський**², канд. техн. наук, **В.О. Саратов**³, канд. техн. наук

1, 2 – Нац. техн. ун-т України «КПІ»,

пр. Перемоги, 37, Київ-56, 03056, Україна

3 – Ін-т електродинаміки НАН України,

пр. Перемоги, 56, Київ-57, 03680, Україна

Розробка та дослідження математичної моделі безконтактного асинхронізованого турбогенератора з багатофазним каскадним збудником

Наведено результати розробок та досліджень математичних моделей асинхронізованого турбогенератора з трифазною обмоткою ротора, з контактними кільцями і в безконтактному виконанні з урахуванням параметрів масиву ротора та особливостей роботи багатофазного каскадного електромашино-вентильного збудника з модульованою напругою і природною комутацією. Бібл. 19, рис. 8, таблиця.

Ключові слова: асинхронізований турбогенератор, збудник, перетворювач, природна комутація.

V.A. Bober¹, **O.M. Galinovsky**², **V.O. Saratov**³

1, 2 – National Technical University of Ukraine «Kyiv's Polytechnic Institute»,

Peremogy, 37, Kyiv-56, 03056, Ukraine

3 – Institute of Electrodynamics National Academy of Sciences of Ukraine,

Peremohy, 56, Kiev-57, 03680, Ukraine

Development and research of a mathematical model of contactless asynchronous turbogenerator with multi-phase cascade agent

The results of research and development of mathematical models of asynchronous turbogenerator with three-phase winding rotor, slip ring and a non-contact version of the array within the parameters of the rotor and the characteristics of polyphase cascade of electric-valve exciter with modulated voltage and natural commutation.

References 19, figures 8, table.

Key words: asynchronous turbogenerator, exciter, transmitter, natural commutation.

Надійшла 04.01.2012

Received 04.01.2012