

В.А. Бобер, А.М. Галиновский, канд. техн. наук
(Украина, Киев, НТУУ «Киевский политехнический институт»)

МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ БЕСКОНТАКТНОЙ АСИНХРОНИЗИРОВАННОЙ МАШИНЫ С КАСКАДНЫМ ВОЗБУДИТЕЛЕМ В РЕЖИМАХ ГЕНЕРАТОРА И ДВИГАТЕЛЯ

Введение

Проблеме разработки электрических машин двойного питания в контактном и бесконтактном исполнении уделяется большое внимание [1, 3, 10, 12, 14, 16 – 18]. В работах [10, 12, 14, 16 – 18] рассматривается вопрос разработки бесконтактных асинхронизированных машин (БАСМ) с системами возбуждения, построенными на базе каскадного электромашинного возбудителя и вращающегося непосредственного преобразователя частоты с естественной коммутацией при моделированном входном напряжении (НПЧЕМ). В каскадном возбудителе применено комбинированное потенциальное разделение роторных обмоток [5]. В НПЧЕМ применен комбинированный способ управления встречновключенными тиристорами [6]. При указанных способах соединения обмоток источника и управления НПЧЕМ обеспечивается высокое качество формы напряжения и тока нагрузки в случае применения нулевых схем преобразования. В работах [10, 12, 16, 17] показана принципиальная возможность применения НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования при наличии двух «независимых» трехфазных нагрузок. Однако, НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования практически неработоспособны при нагрузке на две трехфазные индуктивно взаимосвязанные обмотки ротора одной машины. Это обусловлено сдвигом фаз первых высших гармоник выходных напряжений одноименных фаз нагрузки трехфазно-трехфазных преобразователей на угол π . Устранение этого фактора возможно в многофазном НПЧЕМ с четным числом фаз источника на одну фазу нагрузки [13, 14, 16 – 18].

В работе [18] приведена математическая модель БАСМ с многофазным каскадным возбудителем. Причем авторы рассматривают только автономную работу генератора. Вместе с тем наибольшее применение БАСМ с каскадными многофазными возбудителями могут найти именно в мощных высоковольтных регулируемых электроприводах [19]. Поэтому разработка моделей энергосистем с БАСМ – актуальна.

Совершенствование математической модели БАСМ с многофазным каскадным электромашинным возбудителем и НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования, исследование БАСМ в режимах двигателя и генератора при работе в автономной энергосистеме и параллельно с сетью являются **целью работы**.

Общая характеристика метода формирования системы уравнений

Известные способы моделирования электромеханических систем, которые содержат полупроводниковые преобразователи, основаны на методе узловых потенциалов, в котором соединения узлов между собой описываются «матрицами соединения» [4, 9 – 11, 14, 15, 18]. В процессе интегрирования итоговой системы уравнений определяются искомые значения токов в ветвях с погрешностями, которые зависят от шага и метода интегрирования. Эти погрешности означают нарушение первого закона Кирхгофа по узлам схемы. С каждым шагом интегрирования происходит увеличение погрешности в определении потенциалов узлов, что приводит к нарушению устойчивости процесса интегрирования.

Существуют методы компенсации погрешностей в расчете токов, которые с определенной степенью точности обеспечивают сумму токов в каждом узле, равную нулю [11]. При этом процесс интегрирования становится более устойчивым.

В работе [15] предложен метод формирования системы уравнений, позволяющий полностью устранить проблему нарушения первого закона Кирхгофа. Это достигается тем, что вся система уравнений формируется в алгебраическом виде. При этом дифференциальные уравнения входят в общую систему тоже как алгебраические. Определение неизвестных системы алгебраических уравнений может быть выполнено совершенно точно, практически с нулевой погрешностью. При этом строго соблюдается первый закон Кирхгофа для всех узлов системы. В этом случае погрешность процесса интегрирования сохраняется, но это не приводит к нарушению условия равенства нулю токов во всех узлах. Метод формирования системы уравнений, согласно работе [15], обеспечивает высокую устойчивость процесса интегрирования, меньшую погрешность вычислений по сравнению с известными методами. Этот метод применен при создании математической модели бесконтактной асинхронизированной машины с многофазным каскадным возбудителем.

Электрическая схема математической модели БАСМ изображена на рис. 1, где: АМ – основная электрическая машина с числом пар полюсов p ; В1, В2 – неявнополюсные возбудители с числом пар полюсов $p_{В1} = p_{В2} = p_{В}$; ТП1, ТП2 – тиристорные переключатели; АД – асинхронный двигатель с короткозамкнутым ротором; К1 – К3 – выключатели; ВЧ – вращающаяся часть.

На трехфазные статорные обмотки возбудителей подается напряжение с частотой возбуждения АМ. Направления вращения полей статоров двух возбудителей противоположны. Роторные обмотки двух возбудителей соединены последовательно. На входы фазных ТП подаются биения напряжений. Частота биений напряжений равна частоте возбуждения возбудителей. Применено комбинированное потенциальное разделение обмоток источника, при котором в отдельные 4-х лучевые звезды соединены обмотки с одинаковыми фазами несущей частоты. Две трехфазные обмотки ротора АМ подключены к выходам 4-х фазных мостовых ТП. К статору АМ может подключаться энергосистема (E_c), автономная нагрузка (A_n, B_n, C_n), асинхронный двигатель (АД).

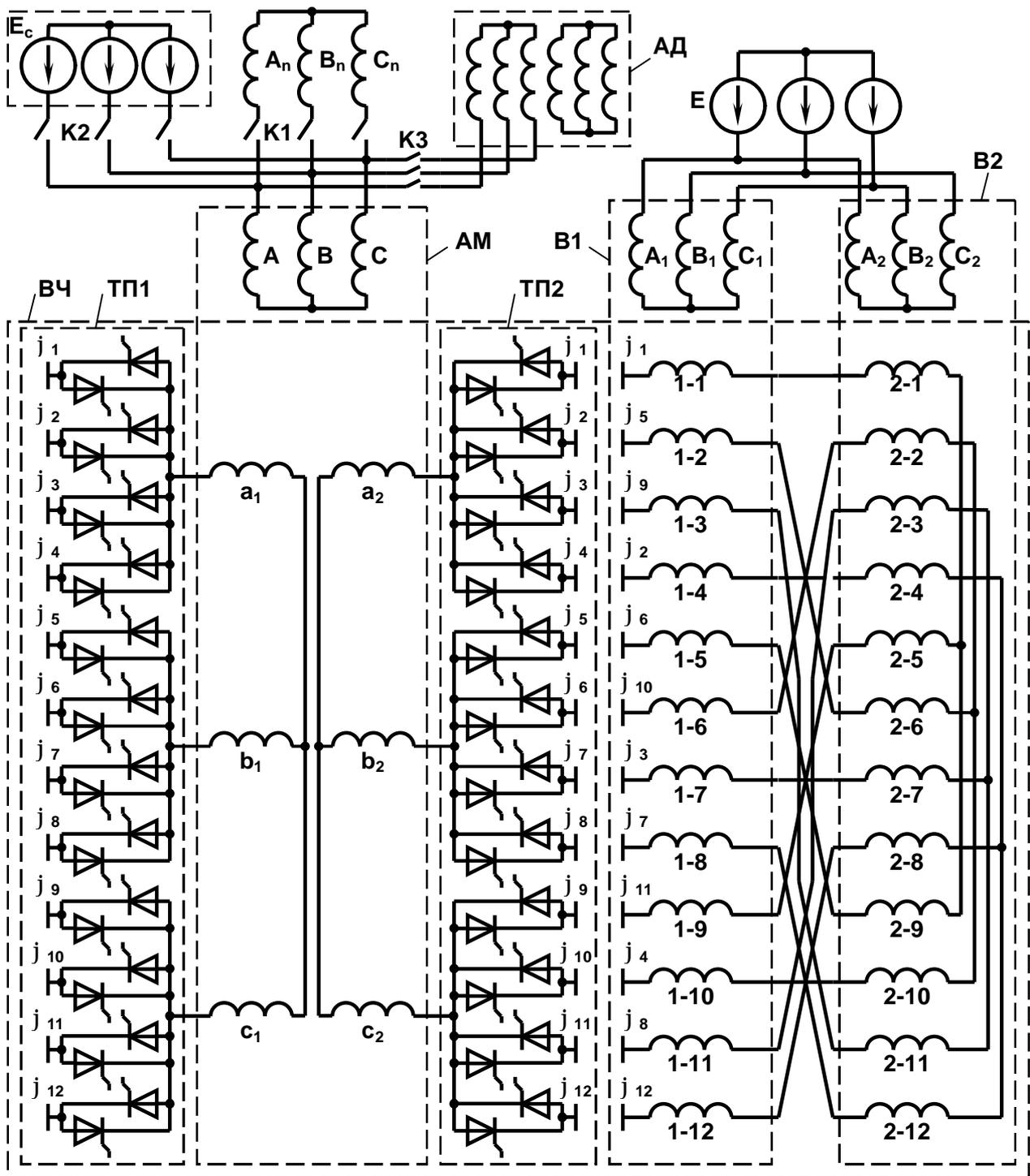


Рис. 1. Электрическая схема математической модели БАСМ с многофазным каскадным возбудителем

Построение математической модели

Все ветви структурной схемы описываются по II-му закону Кирхгофа.

Источники напряжения состоят из 3-фазных источников ЭДС с внутренними активными сопротивлениями R_i и индуктивностями L_i . Каждая ветвь с источником ЭДС описывается дифференциальным уравнением вида

$$R_i \cdot i + L_i \cdot \dot{i} + E_i = j_{in} - j_{ik}, \quad (1)$$

где $p = d/dt$ – оператор дифференцирования по времени, i – ток ветви, $E_i = A \cdot \cos(2p \cdot f \cdot t - a_i)$ – ЭДС, A – амплитуда напряжения источника, f – частота источника, t – время, $a_i = (m-1) \cdot p/6$ – начальная фаза ЭДС, m – номер фазы ЭДС, j_{i_n}, j_{i_k} – потенциалы начала и конца ветви.

Каждый возбудитель представлен вращающейся электрической машиной с 3-х фазной обмоткой статора и 12-ти фазной обмоткой ротора. Каждая обмотка описывается дифференциальным уравнением

$$R_k i_k + \sum_1^{15} L_{kn} \cdot p i_n + \sum_1^{15} p L_{kn} \cdot i_n = j_{k1} - j_{k2}, \quad (2)$$

Генератор представляет собой вращающуюся электрическую машину с 3-х фазной обмоткой статора и двумя 3-х фазными обмотками ротора. Каждая обмотка описывается дифференциальным уравнением

$$R_k i_k + \sum_1^9 L_{kn} \cdot p i_n + \sum_1^9 p L_{kn} \cdot i_n = j_{k1} - j_{k2}, \quad (3)$$

Тиристоры и выключатели моделируются RL – цепью с переменными активными сопротивлениями и индуктивностями. В открытом состоянии $R \approx 0$, $L \approx 0$, в закрытом – $R \approx \infty$, $L \approx \infty$. Дифференциальное уравнение RL цепи следующее:

$$R \cdot i + L \cdot p i = j_n - j_k. \quad (4)$$

Дифференциальное уравнение для каждой обмотки асинхронного двигателя можно записать так:

$$R_k i_k + \sum_1^6 L_{kn} \cdot p i_n + \sum_1^6 p L_{kn} \cdot i_n = j_{k1} - j_{k2}, \quad (5)$$

В выражениях (2), (3) и (5) приняты обозначения: R_k – активное сопротивление k -ой обмотки, L_{kk} – индуктивность k -ой обмотки, L_{kn} – взаимные индуктивности k -ой обмотки со всеми остальными обмотками, I_n – токи обмоток, j_{k1}, j_{k2} – потенциалы начала и конца k -ой обмотки соответствующих машин.

Уравнения движения электрической машины (ЭМ)

$$\frac{p}{J} (M_{\mathcal{E}} - M) = \frac{dw_r}{dt}, \quad (6)$$

$$w_r = w_{r0} + \int \left(\frac{dw_r}{dt} \right) dt, \quad (7)$$

$$g = g_0 + \int w_r dt, \quad (8)$$

где p – число пар полюсов; J – момент инерции; w_r – угловая скорость ротора; g – угол поворота ротора; $M_{\text{Э}}$ – электромагнитный момент; M – момент сопротивления на валу.

Электромагнитный момент

$$M_{\text{Э}} = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^6 I_k \sum_{n=1}^6 I_n \frac{dL_{kn}}{dt}. \quad (9)$$

Все ветви схемы представлены матричным уравнением

$$R \times I + L \times pI + pL \times I + K_E \times E = K_j \times j, \quad (10)$$

где K_E , K_{φ} – матрицы коэффициентов.

Ветви структурных элементов соединяются в узлы. На основании I-го закона Кирхгофа для узлов составлены следующие уравнения:

$$K_i \times I = 0, \quad (11)$$

где K_i – матрица коэффициентов, определяющая принадлежность и направление k -го тока к n -му узлу.

К уравнениям (10) и (11) добавляются уравнения связи токов и их производных. Для расчетов принят метод Эйлера, поэтому третье матричное уравнение имеет вид

$$K'_{i0} \times I_0 + h \cdot K'_{pi} \times pI = K_{ii} \times I, \quad (12)$$

где K'_{i0} , K'_{pi} , K_{ii} – единичные диагональные матрицы размером $[n \times n]$.

В целом математическая модель схемы (рис. 1) представляет собой комплекс матричных уравнений электрических цепей и уравнений движения:

$$\begin{cases} R \times I_0 + pL \times I_0 + K_E \times E = K_j \times j - L \times pI; \\ 0 = K_i \times I; \\ K_{i0} \times I_0 = K_{ii} \times I - h \cdot K_{pi} \times pI. \end{cases} \quad (13)$$

$$\begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ -h & 1 & 0 \\ 0 & -h & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} pw \\ w \\ g \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} p \cdot (M_{\text{эм}} - M_{\text{сопр}}) / J \\ w_0 \\ g_0 \end{bmatrix}. \quad (14)$$

После преобразований уравнения (13) и (14) примут вид:

$$R \times I_0 + pL \times I_0 + K_{i0} \times I_0 + K_E \times E = (K_j + K_i - h \cdot K_{pi} - L) \times N; \quad (15)$$

$$K_M \times M = M_0, \quad (16)$$

где N – матрица неизвестных, которая включает матрицы потенциалов j , токов I и производных токов pi , M – матрица, в которую входят неизвестные уравнений движения – производная угловой скорости $p\omega$, угловая скорость ω и угол поворота ротора g .

Решение уравнений следующее

$$N = \left(K_j + K_i - h \cdot K_{pi} - L \right)^{-1} \times (R \times I_0 + pL \times I_0 + K_{i0} \times I_0 + K_E \times E), \quad (17)$$

$$M = (K_M)^{-1} \times M_0. \quad (18)$$

Параметры системы

Электрическая сеть. Фазная ЭДС $E_c = 380$ В, активное сопротивление $R_s = 1$ мОм, индуктивность $L_{ss} = 0,1$ мкГн.

Основная электрическая машина. $P = 250$ кВт. Число пар полюсов $p = 2$. Активные сопротивления и индуктивности обмоток: $R_s = 5,17$ мОм; $L_{ss} = 92,3$ мкГн; $R_r = 0,19$ Ом; $L_{rs} = 11,7$ мГн. Указаны параметры одной трехфазной обмотки ротора. Коэффициент трансформации $k_T = \omega_{2\phi} / \omega_{1\phi} = 4,737$. Взаимоиндуктивность $L_m = 4,5$ мГн. Скольжение $s = +0,005$.

Возбудитель: $m_1 = 3$; $m_2 = 12$; $p_B = 5$; $R_s = 36$ мОм; $L_{ss} = 30$ мкГн; $R_r = 36$ Ом; $L_{rs} = 30$ мкГн; $L_m = 0,26$ мГн. Коэффициент трансформации $k_{TB} = 1$. Фазная ЭДС $E = 6,5$ В, активное сопротивление $R_s = 1$ мОм, индуктивность $L_{ss} = 0,1$ мкГн. Частота возбуждения – 0,25 Гц.

Тиристоры. Активное сопротивление и индуктивность в открытом и закрытом состоянии: $R_{vo} = 0,1$ мОм; $L_{vo} = 0,25$ мкГн; $R_{vz} = 1$ кОм, $L_{vz} = 2,5$ Гн.

Нагрузка: $R_n = 1,252$ Ом; $L_n = 2,47$ мГн.

Применено комбинированное управление по частоте заполнения и току нагрузки. Угол управления тиристорами – упреждающий.

Результаты исследований

На рис. 2 приведены диаграммы напряжения (u_A, u_B, u_C) и токов (i_A, i_B, i_C) статора валогенератора с постоянной частотой вращения вала при работе на автономную нагрузку.

На рис. 3 приведены диаграммы напряжений и токов валогенератора при работе параллельно с сетью:

a – фрагмент напряжений (u_{a1}, u_{b1})

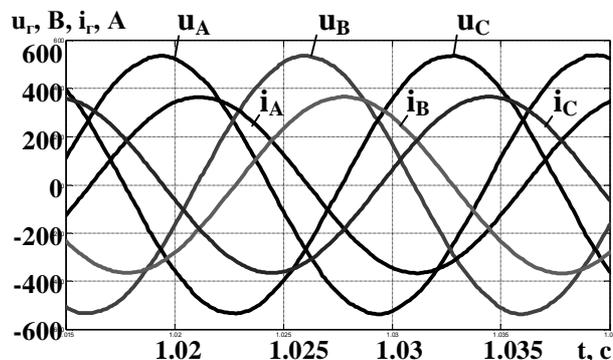


Рис. 2. Диаграммы напряжения и токов валогенератора

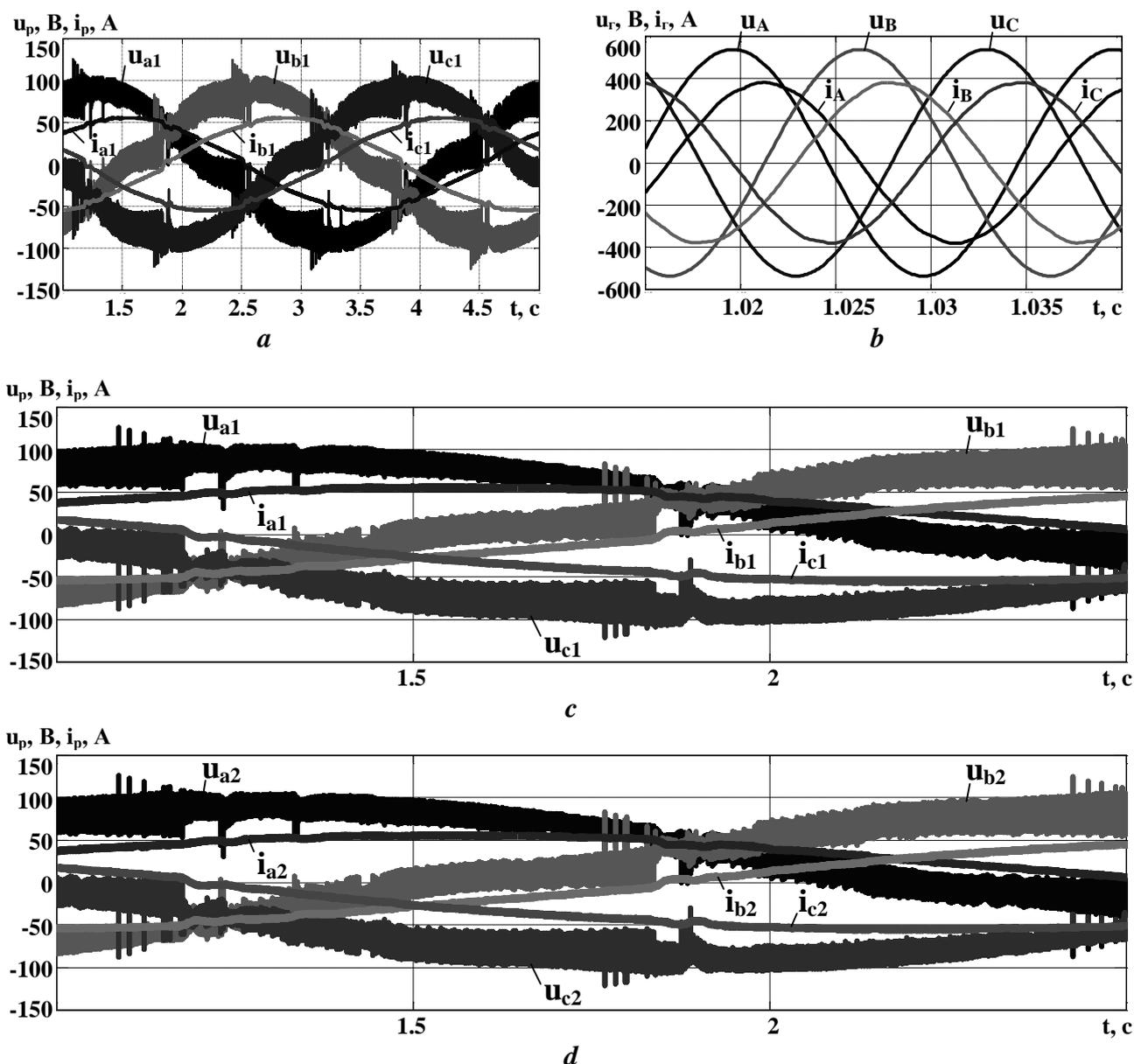


Рис. 3. Диаграммы напряжений и токов валогенератора при работе параллельно с сетью

u_{c1}) и токов (i_{a1} i_{b1} i_{c1}) первой трехфазной обмотки ротора;

b – фрагмент напряжений (u_A , u_B , u_C) и токов (i_A , i_B , i_C) статора;

c , d – фрагмент напряжений и токов двух трехфазных обмоток ротора.

Анализ результатов исследований подтверждает высокое качество формы напряжения автономного генератора и токов нагрузки генератора, а также высокое качество формы токов возбуждения. Следует особенно подчеркнуть идентичность формы токов и напряжений двух трехфазных обмоток возбуждения (рис. 3, c и d), что достигается за счет применения четного числа фаз источника на одну фазу обмотки возбуждения АМ.

Высокое качество формы токов статорных и роторных обмоток наблюдается и при работе БАСМ с заданным моментом в генераторном и двигательном режимах.

На рис. 4 показаны напряжения и токи генератора при работе параллельно с сетью при заданном моменте $M_n = 1590$ Н·м.

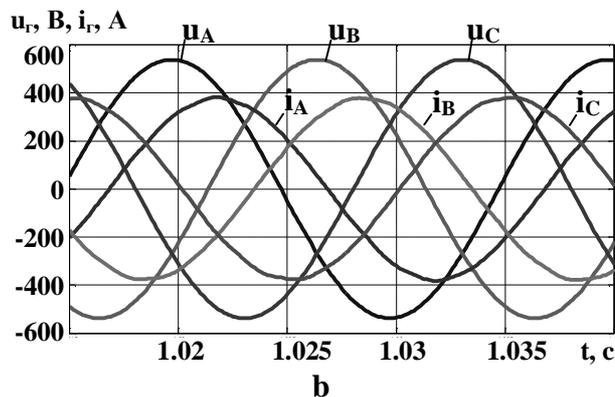
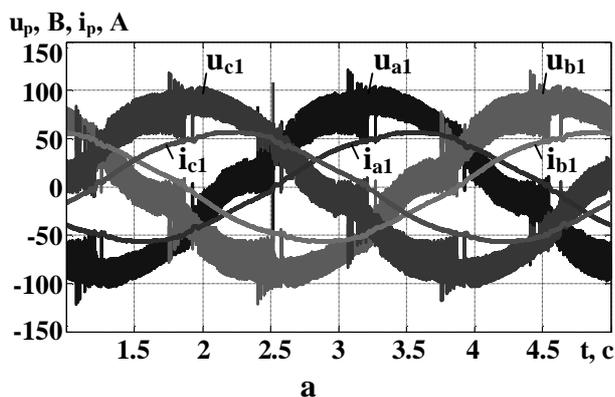


Рис. 4. Диаграммы напряжений и токов автономного генератора при работе параллельно с сетью при заданном моменте вращения

На рис. 5 показаны напряжения и токи двигателя с моментом нагрузки $M_n = 500 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

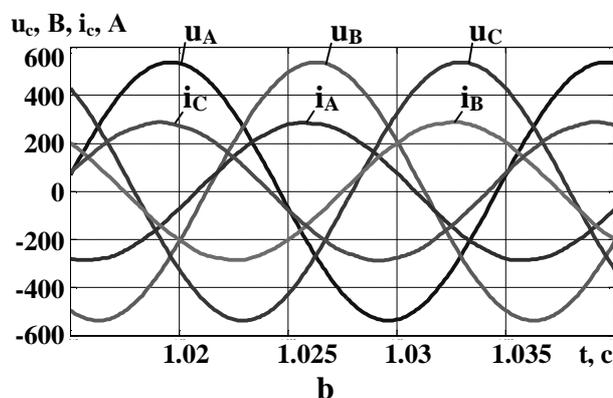
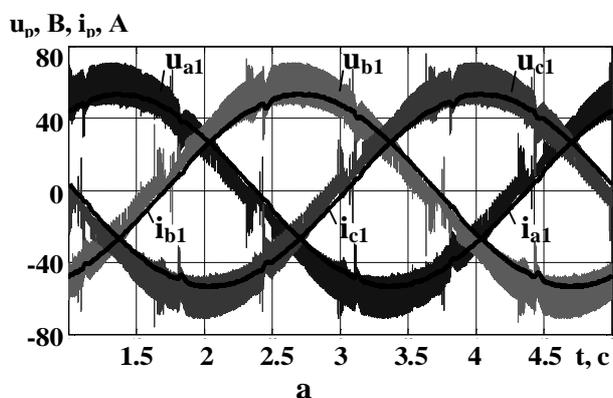


Рис. 5. Диаграммы напряжений и токов двигателя при заданном моменте нагрузки

В системе применяется комбинированный закон управления НПЧЕМ по частоте заполнения и току нагрузки, при котором совместное управление встречно включенными тиристорами осуществляется при токах нагрузки меньших уставки, в другом случае – раздельное управление.

Заключение

1. Проведено совершенствование математической модели БАСМ с многофазным каскадным электромашинным возбудителем и НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования. Исследована работа БАСМ при неизменной нагрузке в режимах: валогенератора, работающего в автономной энергосистеме и параллельно с сетью; генератора и двигателя, работающих при заданных моментах на валу.

2. Подтверждено высокое качество формы выходного напряжения и тока НПЧЕМ с мостовыми схемами преобразования при применении:

- комбинированного потенциального разделения обмоток;
- комбинированного закона управления встречно включенными тиристорами;
- четного числа фаз источника на одну фазу нагрузки.

3. Качество формы напряжения и тока НПЧЕМ во многом определяется соотношением параметров источника питания и нагрузки, величиной угла управления тиристорами. Актуальной является разработка рекомендаций по проектированию электромашинных возбудителей и управляющих машин.

4. Целесообразно дальнейшее совершенствование математических моделей БАСМ с учетом автоматического регулирования возбуждения при переменном характере нагрузки, изменении скорости вращения и других факторов, сопоставление результатов исследований на математических и физических моделях БАСМ.

5. Наиболее перспективные направления разработки БАСМ: турбогенераторы; высоковольтный регулируемый электропривод при применении бесконтактных пусковых устройств.

Список литературы

1. Онищенко Г.Б., Локтева И.Л. Асинхронные вентильные каскады и двигатели двойного питания. М.: Энергия, 1979. – 200 с.
2. Иванов-Смоленский А.В. Электрические машины. – М.: Энергия, 1980. – 928 с., ил.
3. Шакарян Ю.Г. Асинхронизированные синхронные машины. М.: Энергоатомиздат, 1984. – 192 с.
4. Плахтына Е.Г. Математическое моделирование электромашинно-вентильных систем. Львов: Вища шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1986. – 164 с.
5. А.С. СССР № 1206922. Галиновский А.М., Дубчак Е.М. Преобразователь частоты. Бюл. № 3, 1986.
6. А.С. СССР № 1339821. Галиновский А.М., Дубчак Е.М. Способ комбинированного управления тиристорным преобразователем частоты. Бюл. № 35, 1987.
7. Копылов И.П. Математическое моделирование электрических машин. М.: Высш. шк., 1987. – 248 с.
8. Башарин А.В., Постников Ю.В. Примеры расчета автоматизированного электропривода на ЭВМ. Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 512 с.
9. Лищенко А.И., Мазуренко Л.И. Математическое моделирование асинхронных генераторов с вентильным возбуждением в фазных координатах статора // Техн. электродинамика, 1997. – № 6. – С. 31–36.
10. Васылив К.Н., Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Плахтына Е.Г. Математическое моделирование модулированного преобразователя частоты с каскадным электромашинным преобразователем. Труды I Международной (III Всероссийской) конф. по электромеханотронике. – С.Пб., 1997. – С. 52 – 67.
11. Василів К.М. Метод квазікомбінованих схем і вузлових уточнень струмів // Електроенергетичні та електромеханічні системи. Вісник Державного університету "Львівська політехніка". – 2000. – № 400, С. 10-17.
12. Галиновский А.М., Васылив К.Н., Ленская Е.А. Исследование бесконтактного асинхронизированного генератора с модулированным возбудителем. // Вісник НТУ «ХПІ». – 2001 – № 16. – С. 41 – 46.
13. Галиновский А.М., Бобер В.А., Кузьминский Е.В., Ленская Е.А., Эрхард Айхофер. Многофазный вентильный генератор автономной ветроэнергетической установки. // Праці Інституту електродинаміки НАН України – 2006. – Спец. вип. – С. 152-156.
14. Галиновский А.М., Бобер В.А., Ленская Е.А. Особенности построения и расчета вращающихся многофазных преобразователей частоты бесконтактных асинхронизированных машин. // Енергетика: економіка, технології, екологія. – 2007 – №1. – С. 45-57.

15. Бобер В.А. Математическая модель электромеханических систем. Електромеханічні системи, методи моделювання та оптимізація. // Зб. наук. праць VI Всеукр. наук.-техн. конф. молодих учених. – Кременчук, 2008. – С. 58 – 59.
16. Галиновский А.М., Дубчак Е.М., Шиманский С.В., Ленская Е.А. Генератор постоянной частоты для ветроустановок и нетрадиционных источников энергии. // Відновлювана енергетика – 2008. – №2, С. 51 – 57.
17. Галиновский А.М., Ленская Е.А. Электромашинно-вентильные преобразователи с регулированием амплитуды выходного напряжения изменением тока возбуждения. //Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2008. – Вип. 81. – С. 125-135.
18. Галиновский А.М., Бобер В.А. Математична модель безконтактної асинхронізованої машини з багатозначним збудником. //Гідроенергетика України, – 2008. – №4. – С. 21-27.
19. Галиновский А.М., Бобер В.А., Троян А.И., Ленская Е.А. Режимы работы водонасосной станции и выбор регулируемого электропривода. //Гірнична електромеханіка та автоматика: Наук. – техн. зб. – 2009. – Вип. 82. – С. 124-134.