Yu. P. Koskin, D. V. Samokhvalov

ON TERMINOLOGY AND SPECIALISTS TRAINING IN ELECTROMECHATRONICS

Terminology of electromechatronics is considered. Identified and scientifically substantiated general terms: "Electromechatronics", "Electromechatronical Converter", "Electronic components of energy use", "Electronic components of informational use". The problems of training in electromechatronics within existing specialties are reviewed.

Electromechatronics, Electromechatronical Converter, Electrical Engineering, Mechatronics, Electric Drive

УДК 621.314.263

М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, В. Ю. Шелюх

БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩАЯ МОДЕЛЬ МНОГОУРОВНЕВОГО МАТРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Разработаны быстродействующие модели многоуровневых матричных преобразователей частоты по методологии моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам. Предусмотрено задание конфигурации систем от одномостовых схем, до высоковольтных устройств, содержащих последовательно соединенные мосты. Предложен алгоритм управления матричными преобразователями, приведены результаты расчетов, отмечены особенности матричных преобразователей.

Матричный преобразователь, высоковольтный преобразователь, алгоритм управления, моделирование, модель, затраты машинного времени

В мощных электромеханотронных системах (ЭМТС), содержащих асинхронизированные генераторы-двигатели (АГД), например в гидроаккумулирующих электростанциях (ГАЭС), используются преобразователи частоты (ПЧ) повышенного напряжения [1], [2]. Эти ПЧ подключаются с одной стороны к электросети, с другой – к ротору АГД. ПЧ передают мощность из электросети к ротору АГД и обратно при изменении частоты тока ротора в сравнительно узких пределах, например ±5 Гц. Во многих случаях используются тиристорные ПЧ с непосредственной связью (НПЧ) [3]. НПЧ работают с низким коэффициентом мощности и это приводит к увеличению мощности оборудования. В ряде систем используются двухуровневые и трехуровневые ПЧ со звеном постоянного напряжения [4]. ПЧ этих типов позволяют решить все задачи управления ЭМТС. Однако искажения токов и напряжений на входе и выходе ПЧ велики и требуется применение фильтров. Существуют предложения по использованию в цепях роторов АГД каскадных [5] и многотактно-многоуровневых [6] ПЧ, в которых напряжения и токи имеют лучшую форму, но и эти ПЧ имеют недостатки – нагрузка элементов неравномерна. Чтобы выбрать перспективный ПЧ для указанного применения, необходимо сравнение ПЧ различных типов. Такое сравнение представлено в [7]. При этом, правда, не рассматривались матричные преобразователи частоты (МПЧ) [8]. В данной статье представлена модель многоуровневого МПЧ, построенная по взаимосвязанным подсистемам, отличающаяся быстродействием [9].

Математическое описание силовой части МПЧ. Рассматривается трехфазно-трехфазный матричный ПЧ, схема которого представлена на рис. 1 (M – число последовательно включенных мостов, m – номер моста). МПЧ содержит трансформатор (Тр), трехфазно-однофазные ПЧ (ТОПЧ), систему управления (на рисунке не показана). Каждый мост питается от индивидуальной обмотки трансформатора. В каждом плече моста два транзисторных модуля образуют полностью управляемый ключ. В фазах нагрузки ТОПЧ соединены последовательно и образуют трехфазный источник повышенного напряжения.

Питание МПЧ осуществляется от сети с ЭДС фаз e_{sn}, индуктивностями L_s, напряжениями u_{sn} и токами i_{sn}. Между сетью и ПЧ включен трансформатор с коэффициентом трансформации K_t, ЭДС e_{tnm} и токами фаз вторичных обмоток i_{tn} (n – номер фазы), индуктивностями рассеяния и активными сопротивлениями фаз вторичных обмоток L_t и R_t.

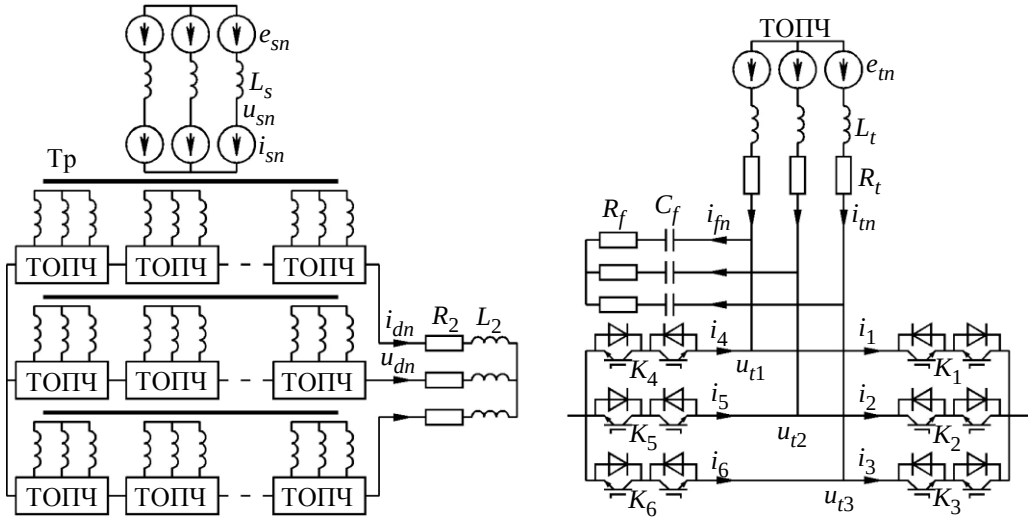

Рис. 1

К вторичным обмоткам трансформатора подключены *RC*-фильтры с емкостями C_f, активными сопротивлениями R_f, токами i_{fn} и напряжениями фаз u_{tn}. К вторичным обмоткам подключены также транзисторные мосты, которые в целом образуют трехфазный источник напряжения. К выходу МПЧ подключена трехфазная *RL*-нагрузка с индуктивностью L_2 и активным сопротивлением R_2. Напряжения фаз нагрузки u_{dn}, токи фаз i_{dn}.

ЭДС фаз сети:

$$e_{sn} = E_{sm} \sin\left[\tau - \left(n-1\right)\cdot\frac{2\pi}{3}\right], \quad \tau = \omega t,$$

где τ – фаза ЭДС; ω – угловая частота ЭДС; E_{sm} – амплитуда ЭДС; n = 1, 2, 3.

Напряжения и токи фаз сети определяются из уравнений

$$u_{sn} = e_{sn} - L_s \frac{di_{sn}}{dt}, \qquad \frac{di_{sn}}{dt} = \sum_{m=1}^{M} \frac{di_{tnm}}{dt}, \qquad i_{sn} = \sum_{m=1}^{M} i_{tnm}.$$

ЭДС фаз вторичных обмоток трансформатора:

$$e_{tn} = e_{sn} / K_t .$$

Ветви *RC*-фильтров заменяются зависимыми источниками напряжения u_{tn}:

$$u_{cn} = \frac{1}{C_f} \int i_{fn} \cdot dt, \; u_{tn} = u_{cn} + R_f \, i_{fn}.$$

Источники u_{tn} переносятся в фазы трансформатора и в фазы мостов. При этом схема рис. 1 разделяется на подсхемы (рис. 2).

Токи фаз вторичных обмоток трансформатора:

$$di_{tn}/dt = \left(e_{tn} - u_{tn} - R_t i_{tn} \right) / L_t .$$

Анодная и катодная группы вентилей (рис. 2) заменяются источниками u_{eanm}, u_{eknm}:

$$u_{nm} = u_{eanm} + u_{eknm} = \frac{K_1 u_{t1m} + K_2 u_{t2m} + K_3 u_{t3m}}{K_1 + K_2 + K_3} + \frac{-K_4 u_{t1m} - K_5 u_{t2m} - K_6 u_{t3m}}{K_4 + K_5 + K_6},$$

где K_n – функции состояния вентилей (1 – открыт, 0 – закрыт).

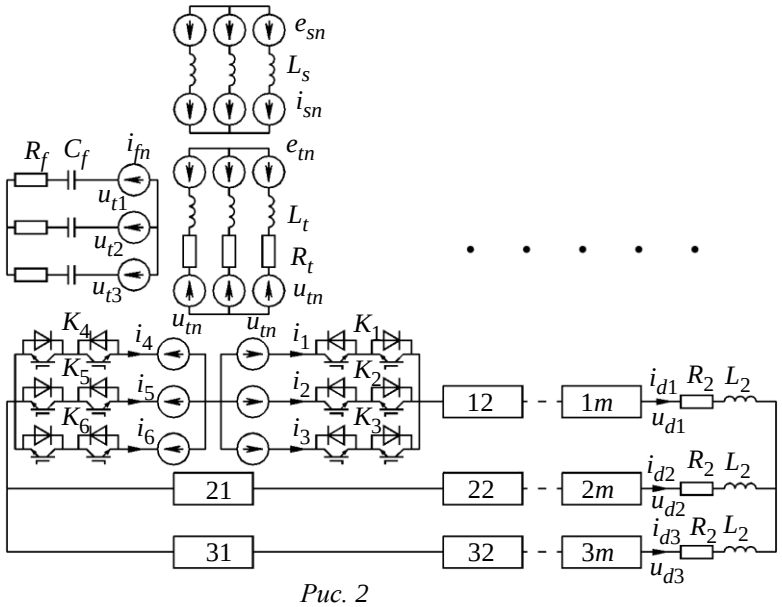

Рис. 2

В результате указанных операций схема рис. 2 преобразуется в схему рис. 3.

В схеме рис. 3 последовательно включенные зависимые источники u_{nm} суммируются:

$$u_{en} = \sum_{m=1}^{M} u_{nm}.$$

В результате схема рис. 3 упрощается до схемы рис. 4, *а*.

Из источников u_{en} удаляются составляющие нулевой последовательности u_0:

$$u_0 = \left(u_{e1} + u_{e2} + u_{e3} \right) / 3, \quad u_{dn} = u_{en} - u_0.$$

При этом схема рис. 4, *а* преобразуется в схему рис. 4, *б*.

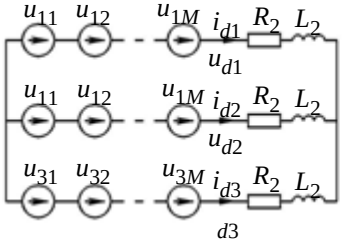

Рис. 3

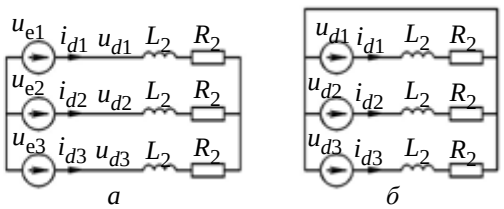

Рис. 4

Токи фаз нагрузки определяются из уравнений:

$$di_{dn}/dt = \left(u_{dn} - R_2 \; i_{dn} \right) / L_2 .$$

После определения токов нагрузки i_{dn} определяются токи в плечах мостов ТОПЧ. При этом рассматриваются подсхемы анодной и катодной групп вентилей и ток фазы нагрузки представляется в виде зависимого источника тока.

Каждой комбинации открытых и закрытых вентилей моста присваивается номер *j*:

$$j = K_1 + 2K_2 + 4K_3 + 8K_4 + 16K_5 + 32K_6 .$$

Если открыты 3 плеча моста, то при *j* = 35 токи плеч определяются выражениями

$$i_6 = i_d , \quad \left. \begin{array}{l} i_1 = i_d + \left[u_{t1} - u_{t2} + R \; i_1 - i_2 \right] / R \; / 2, \\ i_2 = i_d - \left[u_{t1} - u_{t2} + R \; i_1 - i_2 \right] / R \; / 2, \end{array} \right\}$$

где *R* – параметр для раскрытия неопределенности в распределении токов.

Аналогично определяются токи в плечах моста при *j* = 14, 21, 28, 42, 49.

Если открыты 2 плеча моста, то токи плеч определяются следующим образом:

$$\textit{если } j = 10, 12, 17, 20, 33, 34 \;\; \textit{то} \;\; i_l = K_i \; i_d , \;\; l = 1...6.$$

Токи *RC*-цепей:

$$i_{f1} = i_1 - i_{s1} + i_4 , \quad i_{f2} = i_2 - i_{s2} + i_5 , \quad i_{f3} = -i_{f1} - i_{f2} .$$

Алгоритм управления МПЧ. Схема системы управления одного моста представлена на рис. 5 (индекс номера моста опущен).

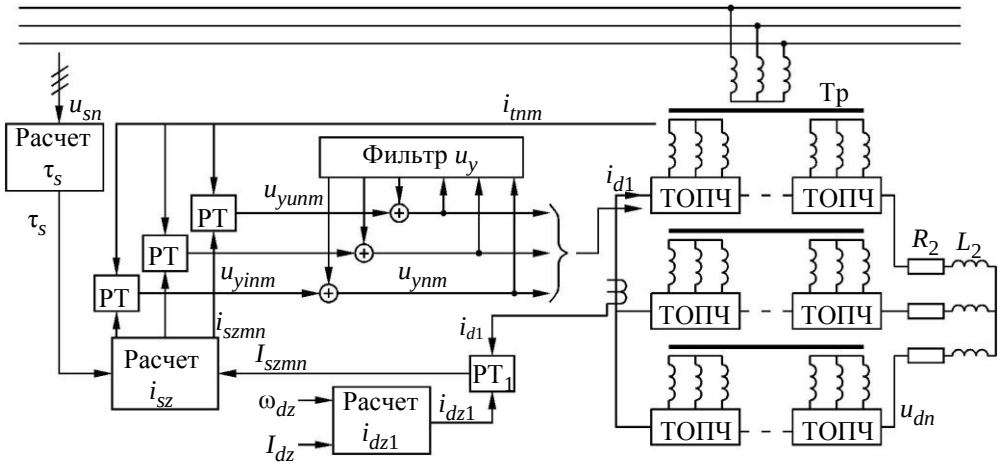

Рис. 5

Поддержание тока нагрузки i_d осуществляется регулятором тока $РТ_1$, на входы которого поступают сигналы по фактическому и заданному i_{dzn} токам:

$$i_{dzn} = I_{dzm} \; \sin\left[\tau_z - \left(n - 1 \right) \cdot 2\pi / 3 \right],$$

где τ_z – фаза заданного тока нагрузки, I_{dzm} – амплитуда заданного тока нагрузки.

На выходе регулятора формируется заданная амплитуда входного тока моста I_{szm}.

$$I_{szm} = K_{ao}\ \ i_{dz} - i_d\ \ , \quad \left.\begin{array}{l} \text{если}\ \ I_{szm} > I_{sm},\ \ \text{то}\ \ I_{szm} = I_{sm}, \\ \text{если}\ \ I_{szm} < I_{sm},\ \ \text{то}\ \ I_{szm} = -I_{sm}, \end{array}\right\}$$

где K_{ao} – коэффициент; I_{sm} – амплитуда тока сети.

По величине фазы напряжения сети τ_s и амплитудам I_{smn} рассчитываются мгновенные значения заданных входных токов моста i_{sz}.

$$i_{szn} = I_{smn}\ \sin\left[\tau_s + \varphi_{\text{ТР}} - \ \ n-1\ \cdot 2\pi/3\right],$$

где $\varphi_{\text{ТР}}$ – заданный сдвиг между токами и напряжениями трансформатора.

На вход П-регулятора входных токов моста поступают мгновенные значения заданных и фактических входных токов моста i_{tr}. На выходе регулятора формируются токовые составляющие напряжений управления u_{yis}:

$$u_{yis} = K_{\text{iso}}\ \ i_{sz} - i_{tr}\ \ ,$$

где K_{iso} – коэффициент пропорционального регулятора.

Сетевые составляющие напряжений управления формируются фильтрами:

$$u_{yun} = U_{ym}\ \sin\left[\tau_y - \ \ n-1\ \cdot 2\pi/3\right].$$

После суммирования сигналов u_{yis} и u_{yu} формируется напряжение управления u_{yn}:

$$u_{yn} = u_{yisn} + u_{yun}, \quad \left.\begin{array}{l} \text{если}\ \ u_{yn} > u_{y\max},\ \ \text{то}\ \ u_{yn} = u_{y\max}, \\ \text{если}\ \ u_{yn} < u_{y\min},\ \ \text{то}\ \ u_{yn} = u_{y\min}. \end{array}\right\}$$

Транзисторы переключаются по следующему алгоритму [10].

Формируются линейные напряжения управления u_{yli}:

$$u_{yl1} = u_{y1} - u_{y3}, \quad u_{yl2} = u_{y2} - u_{y1}, \quad u_{yl3} = u_{y3} - u_{y2}.$$

Фазные вспомогательные сигналы g_i (i = 1, 2, 3):

$$\left.\begin{array}{ll} \text{если}\ \ u_{yli} > u_{\text{оп}},\ \ \text{то} & g_i = 1, \\ \text{иначе} & g_i = -1. \end{array}\right\}$$

Линейные вспомогательные сигналы g_{li}:

$$g_{l1} = g_1 - g_2, \quad g_{l2} = g_2 - g_3, \quad g_{l3} = g_3 - g_1.$$

Функции K_i (i = 1, …, 6), разрешающие работу транзисторов в режиме ШИМ:

$$\left.\begin{array}{l} \text{если}\ \ g_{li} = 0,\ \ \text{то}\ \ K_i = K_{i+3} = 0, \\ \text{если}\ \ g_{li} = 2,\ \ \text{то}\ \ K_i = 1,\ K_{i+3} = 0, \\ \text{если}\ \ g_{li} = -2,\ \ \text{то}\ \ K_i = 0,\ K_{i+3} = 1. \end{array}\right\}$$

Алгоритм управления поясняется рис. 6. На нем изображены напряжения фаз сети u_{sn}; фазные u_{yn} и линейное u_{yl1} напряжения управления; опорное напряжение $u_{\text{оп}}$; фазные g_n и линейные g_{ln} вспомогательные функции; функции состояния транзисторов K_i.

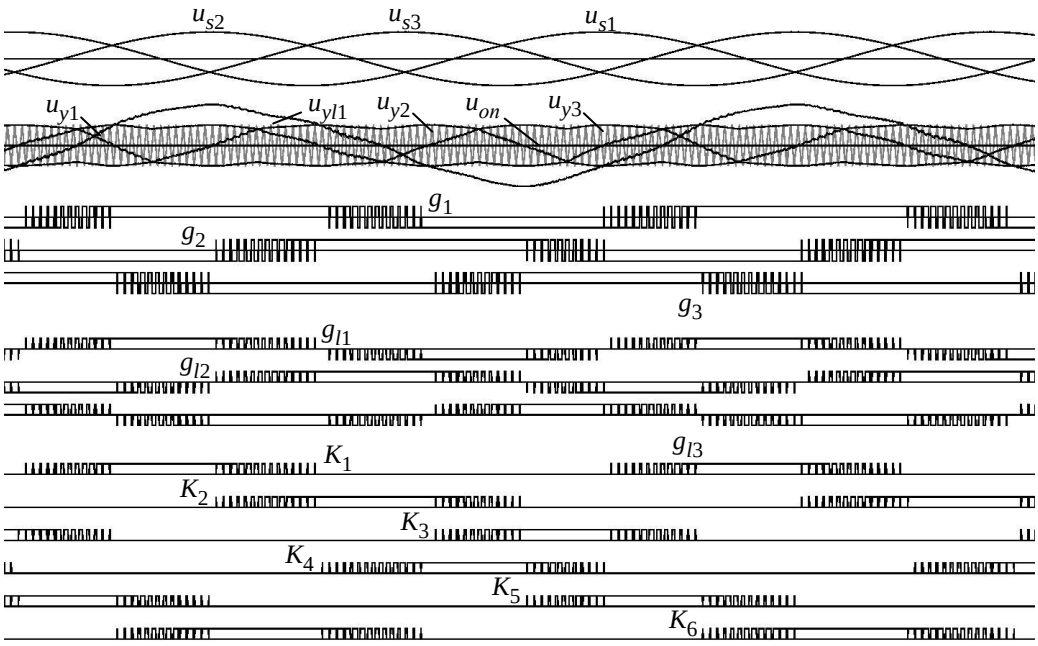

Рис. 6

Расчеты на модели МПЧ. В соответствии с математическим описанием МПЧ разработана компьютерная модель системы на языке С++. Для подтверждения работоспособности МПЧ в ГАЭС с АГД выполнены расчеты при следующих параметрах: напряжение сети – 15.75 кВ; коэффициент трансформации – 23; активная мощность ПЧ – 19.5 МВт; напряжение на выходе – 6 кВ; номинальная частота на выходе – 3.57 Гц; частота ШИМ – 4 кГц; коэффициент мощности нагрузки – 0.96. На рис. 7 представлена диаграмма переходного процесса в системе с МПЧ при изменении частоты тока нагрузки от 0 до 3.57 Гц. На рис. 8 представлена диаграмма токов первых фаз шести мостов ПЧ. Результаты анализа токов и напряжений МПЧ при частоте тока нагрузки 3.57 Гц представлены в таблице.

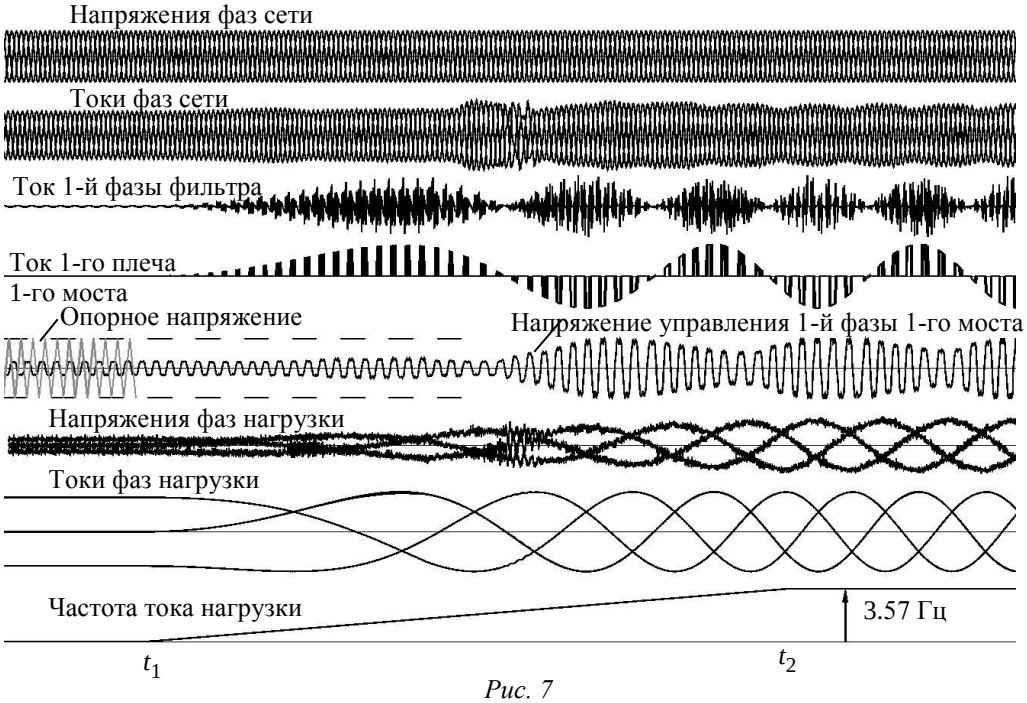

Рис. 7

Напряжение 1-й фазы сети, В		9093.266
Частота гармоники, Гц	Действующее значение	Фаза, …°
50	9093.266	–0.0006877
Ток 1-й фазы сети, А		883.843
Коэффициент искажения синусоидальности		0.1075
Частота гармоники, Гц	Действующее значение	Фаза, …°
50	880.138	–26.61
Ток 1-й фазы 1-го моста, А		1321.188
Частота гармоники, Гц	Действующее значение	Фаза, …°
50	1087.91	–23.556
Ток 1-й фазы нагрузки, А		1918.104
Коэффициент искажения синусоидальности		0.01361
Частота гармоники, Гц	Действующее значение	Фаза, …°
3.57	1917.927	–11.622
Напряжение 1-й фазы нагрузки, В		3415.182
Коэффициент искажения синусоидальности		0.0991
Частота гармоники, Гц	Действующее значение	Фаза, …°
3.57	3398.369	4.631

Из рис. 8 видно, что токи вторичных обмоток трансформатора имеют низкочастотные биения, а нагрузка распределена равномерно между мостами МПЧ. Анализ работы МПЧ свидетельствует о том, что ПЧ этого типа могут быть использованы в ГАЭС с АГД.

Рис. 8

Выполненные исследования позволяют сделать следующие выводы**.**

1. Разработан оригинальный комплекс математических и компьютерных моделей матричных преобразователей частоты методом моделирования систем по взаимосвязанным подсистемам. Компьютерные модели обладают высоким быстродействием.

2. Предложен алгоритм векторного управления матричным преобразователем частоты, в соответствии с которым обеспечивается регулирование трехфазных систем токов питания и нагрузки, а преобразовательные мосты имеют индивидуальные системы управления. В каждой из указанных систем управления регулятор тока фазы нагрузки формирует амплитуду заданных токов сети, а мгновенные значения токов фаз сети формируются регуляторами токов при ориентации вектора токов по вектору напряжений сети.

3. В рассмотренном матричном преобразователе частоты нагрузка распределяется равномерно между вторичными обмотками трансформатора и между преобразовательными мостами. В нагрузке вторичных обмоток трансформатора и преобразовательных мостов существуют биения.

4. Исследованиями на моделях доказана возможность использования матричных преобразователей в ГАЭС в цепях роторов машин двойного питания.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шрейнер Р. Т., Кривовяз В. К., Калыгин А. И. Развитие высоковольтных каскадных преобразователей частоты для электропривода // Сб. мат. V Междунар. (XVI Всерос.) науч. конф. 18–21 сент. 2007 г., Санкт-Петербург. СПб., 2007.

2. Saiju R., Koutnik J., Krueger K. Dynamic Analysis of Start-up Strategies of AC Excited Double Fed Induction Machine for Pumped Storage Power Plant // EPE 2009. Barcelona, Spain, 2009. P. 2.

3. Bocquel A., Janning J. 4*300 MW Variable Speed Drive for Pump-Storage Plant Applications // EPE 2003. Toulouse, Fr., 2003. P. 3.

4. Janning J., Schwery A. Next generation variable speed pump-storage stations // EPE 2009. Barcelona, Spain, 2009. P. 4.

5. Пронин М. В., Воронцов А. Г., Нахди Т. Гидроаккумулирующая электростанция с асинхронизированными машинами и каскадными преобразователями частоты // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 1. С. 70–80.

6. Многотактно-многоуровневый преобразователь частоты для гидроаккумулирующей электростанции / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, Т. Нахди, М. Е. Кузин //Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 6. С. 67–78.

7. Сравнение преобразователей частоты в цепи ротора асинхронной машины в гидроаккумулирующих электростанциях / М. В. Пронин, А. Г. Воронцов, Г. А. Гоголев, Т. Нахди // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 2. С. 45–55.

8. Skvorcov B. A., Baygildina E. I. Cascade matrix converter // Proc. of the IEEE Rus. North West Section 01.01.2011. P. 33–39.

9. Особенности моделирования электрических систем в SIMULINK и методы их расчета по взаимосвязанным подсистемам / М. Е. Кузин, Т. Нахди, Е. В. Кистанова. и др. // Изв. СПбГЭТУ «ЛЭТИ». 2011. Вып. 6. С. 67–78.

10. Ефимов А. А., Шрейнер Р. Т. Активные преобразователи в регулируемых электроприводах переменного тока. Новоуральск: Изд-во НГТИ. 2001. 250 с.

M. V. Pronin, A. G. Vorontsov, V. Y. Shelyukh

FAST MULTI-LEVEL MATRIX CONVERTER MODEL

The development of multi-level matrix frequency converters is performed. System modeling methodology for interconnected subsystems is used, this decision allows to reduce the expenses for computer calculations time. Models are forseen settings of system configurations from low-voltage devices, which contain one converter bridge, to high-voltage devices, which contain serially connected converter bridges. The algorithm of matrix converters control is suggested, the results of electromagnetic processes calculations and features of matrix converters are adduced.

Matrix converter, high-voltage converter, control algorithm, modeling, model, expense of machine time