

метров технологических режимов работы оборудования, методику расчета технико-экономических показателей биоконплексов в зависимости от различных факторов и представляет собой удобный инструмент для комплексного анализа их экономической эффективности.

Библиографические ссылки

1. Королев С. А., Майков Д. В. Метод идентификации параметров модели метаногенеза в виде системы дифференциальных уравнений на основе генетического алгоритма // Интеллектуал. системы в пр-ве. – 2012. – № 1. – С. 29–35.
2. Королев С. А., Майков Д. В. Идентификация математической модели и исследование различных режимов метаногенеза в мезофильной среде // Компьютерные исследования и моделирование. – 2012. – Т. 4, № 1. – С. 131–141. –

URL: http://crm.ics.org.ru/uploads/crmissues/crm_2012_1/12112.pdf (дата обращения: 13.11.2013).

3. Русяк И. Г., Королев С. А., Майков Д. В. Исследование стационарных решений и оптимизация параметров математической модели метаногенеза // Вестн. Том. гос. ун-та. Математика и механика. – 2012. – № 3. – С. 15–21.
4. Королев С. А., Майков Д. В. Влияние климатических условий на тепловой режим работы биогазовой установки // Вестн. Ижев. гос. техн. ун-та. – 2011. – № 2. – С. 211–215.
5. Королев С. А., Майков Д. В. Методика расчета экономических показателей биогазового комплекса // Актуальные вопросы и перспективы развития современной экономики : материалы Междунар. конф. (Иваново, 4 апр. 2012 г.). – Иваново, 2012. – С. 73–80.
6. Королев С. А., Майков Д. В. Повышение экономической эффективности применения биогазовых комплексов на предприятиях животноводства // Соц.-экон. упр.: теория и практика. – 2012. – № 1. – С. 5–9.

S. A. Korolev, PhD (Physics and Mathematics), Associate Professor, Department of mathematical modeling of processes and technologies, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

D. V. Maykov, Post-graduate, Department of mathematical modeling of processes and technologies, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Information-analytical system of structure design, calculation and optimization of technological and economic parameters of biogas complexes

The information and analytical system was developed. It allows solving the complex of problems associated with the introduction of biogas technology in enterprises of livestock: automated design of biogas complex structure, calculation and optimization of parameters of technological modes of equipment, technical and economic analysis of different options for organization of production.

Keywords: biogas, biogas complex, technical and economic analysis, information and analytical system

Получено: 08.11.13

УДК 621.314

А. В. Морозов, аспирант;

В. К. Барсуков, кандидат технических наук, профессор;

В. А. Морозов, кандидат технических наук, доцент

Ижевский государственный технический университет имени М. Т. Калашникова

РАЗРАБОТКА МАТРИЧНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ЧАСТОТЫ

Приведены теоретические основы функционирования матричных преобразователей частоты, описан алгоритм управления силовыми ключами, обеспечивающий регулирование выходной частоты, амплитуды, а также коэффициента мощности на входе.

Ключевые слова: преобразователь частоты, двунаправленный силовой ключ, скалярное управление, ПЛИС

Матричная структура обеспечивает преобразование параметров источника переменного тока (амплитуды и частоты) в напряжение, необходимое для питания нагрузки, без накопления энергии в промежуточном звене постоянного тока. Такие преобразователи относятся к системам прямой передачи энергии от источника к нагрузке. Отсутствие конденсаторов большой емкости, занимающих от 30 до 50 % объема инвертора, позволяет создавать более эффективные преобразователи переменного тока. Кроме того, они могут работать в более широком диапазоне температур и иметь более долгий срок службы, так как отсутствуют электролитические конденсаторы, уязвимые при высоких температурах. В настоящее время матричные преобразователи находят применение в при-

водах переменного тока и в системах генерирования ветроэнергетических установок [1].

Выделяют следующие преимущества матричного преобразователя частоты (МПЧ) перед двухзвенными преобразователями частоты:

- двунаправленный обмен энергией между нагрузкой и сетью, что позволяет говорить о МПЧ как об энергосберегающей системе;
 - однократное преобразование энергии;
 - лучшие массогабаритные показатели.
- В числе недостатков:
- большое число транзисторов,
 - более сложное управление,
 - низкий коэффициент передачи напряжения,
 - сложность коммутации ключей [4].

Принципы построения матричного преобразователя. Математическая модель матричного преобразователя

На рис. 1, а приведена принципиальная схема трехфазного матричного преобразователя частоты. Показанные на схеме ключи – это полностью управляемые симметричные (двунаправленные) ключи из встречно включенных IGBT с общим эмиттером (рис. 1, б). Для формирования таким способом ключей в МПЧ используется 18 транзисторов и диодов. Существует несколько способов создания ключей [1], каждый из которых имеет свои достоинства и недостатки.

В схеме предусматривается возможность присоединения любой фазы выхода к любой фазе входа. Также возможно закорачивание всех фаз на выходе

(нулевое напряжение). Чтобы сформировать напряжение нужной величины, нужно подключиться к фазе с ближайшим уровнем напряжения. Таким образом, всегда существуют один-два уровня нужного знака и нулевой уровень. В отличие от непосредственных преобразователей на тиристорах с неполной управляемостью, на выходе можно получить частоты как ниже, так и выше частоты сети [3].

Для трехфазного матричного преобразователя переменного тока эквивалентная схема замещения (рис. 2) представляет собой двухзвенный преобразователь и содержит управляемый выпрямитель $S_1...S_6$ без звена постоянного тока и управляемый инвертор $S_7...S_{12}$. Данный способ предложен Марко Вентурини в 1980 г. [4].

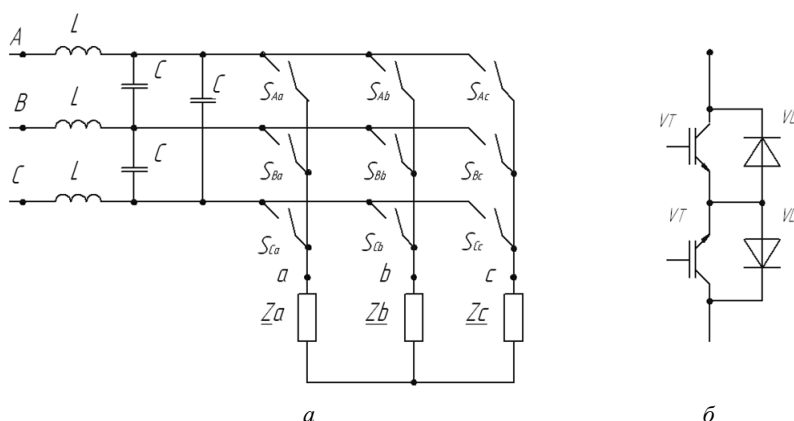


Рис. 1. Принципиальная схема матричного преобразователя

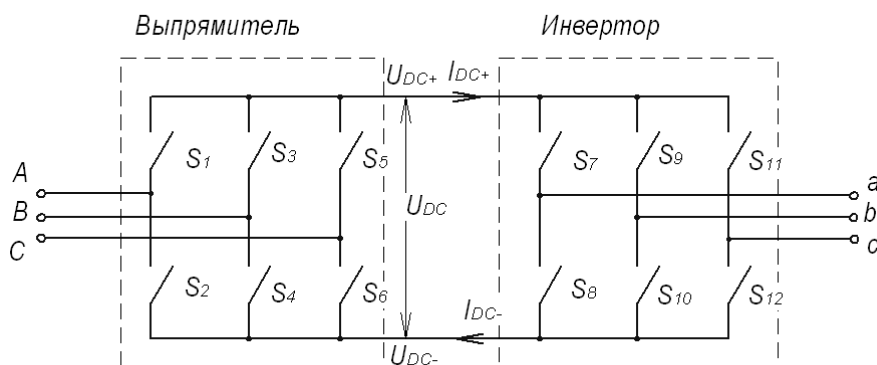


Рис. 2. Схема замещения МПЧ

Фазы входа обозначены заглавными буквами A, B, C , фазы выхода – строчными a, b, c . Направления тока I_{DC} и напряжения U_{DC} в выпрямителе показаны стрелками. Входные (индекс i) и выходные (индекс o) напряжения и токи, представленные в векторной форме:

$$\begin{aligned} u_A(t) & \quad u_a(t) \\ U_i(t) = u_B(t), \quad U_o(t) = u_b(t), \\ u_C(t) & \quad u_c(t) \\ i_A(t) & \quad i_a(t) \\ I_i(t) = i_B(t), \quad I_o(t) = i_b(t), \\ i_C(t) & \quad i_c(t) \end{aligned}$$

С учетом известного входного напряжения и желаемой формы выходного напряжения можно определить переключающую матрицу ключей $S(t)$.

Для выпрямительной части схемы преобразователя входными величинами является матрицы токов $I_i(t)$ и напряжений $U_i(t)$, а выходными – токи I_{DC+} и I_{DC-} и напряжения U_{DC+} и U_{DC-} . Эти величины связаны между собой через переключающую матрицу выпрямителя $S_B(t)$:

$$I_i(t) = S_B(t) \begin{pmatrix} I_{DC+} \\ I_{DC-} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} U_{DC+} \\ U_{DC-} \end{pmatrix} = S_B^T(t) U_i(t), \quad (2)$$

где $S_B(t) = \begin{matrix} S_1 & S_2 \\ S_3 & S_4 \\ S_5 & S_6 \end{matrix}$ – матрица, содержащая переключатели

функций ключей выпрямителя $S_1...S_6$. Значение переключающей функции ключа равно единице, если ключ замкнут, и нулю, если он разомкнут.

Аналогично для инверторной части схемы $S_7...S_{12}$ уравнения, связывающие входные и выходные величины инвертора, выглядят следующим образом:

$$U_o(t) = S_{II}(t) \begin{matrix} U_{DC+} \\ U_{DC-} \end{matrix}, \quad (3)$$

$$\begin{matrix} I_{DC+} \\ I_{DC-} \end{matrix} = S_{II}^T(t) U_o(t), \quad (4)$$

где $S_{II}(t) = \begin{matrix} S_7 & S_8 \\ S_9 & S_{10} \\ S_{11} & S_{12} \end{matrix}$ – переключающая матрица инвертора.

Подставляя (4) и (2) в (1) и (3) соответственно, можно записать:

$$U_o(t) = S_{II}(t) S_B^T(t) U_i(t),$$

$$I_i(t) = S_{II}^T(t) S_B(t) I_o(t)$$

или

$$U_o(t) = S(t) U_i(t), \quad (5)$$

$$I_i(t) = S^T(t) I_o(t), \quad (6)$$

где $S(t) = S_{II}(t) S_B^T(t)$ – искомая переключающая матрица:

$$S(t) = \begin{matrix} S_7 & S_8 \\ S_9 & S_{10} \\ S_{11} & S_{12} \end{matrix} * \begin{matrix} S_1 & S_3 & S_5 \\ S_2 & S_4 & S_6 \end{matrix}.$$

$$S(t) = \begin{matrix} S_{Aa} & S_{Ba} & S_{Ca} \\ S_{Ab} & S_{Bb} & S_{Cb} \\ S_{Ac} & S_{Bc} & S_{Cc} \end{matrix}.$$

Связь между входными и выходными величинами МПЧ:

$$\begin{matrix} u_a & S_{Aa} & S_{Ba} & S_{Ca} & u_A \\ u_b & S_{Ab} & S_{Bb} & S_{Cb} & * u_B \\ u_c & S_{Ac} & S_{Bc} & S_{Cc} & u_C \end{matrix}, \quad (7)$$

$$\begin{matrix} i_A & S_{Aa} & S_{Ba} & S_{Ca} & i_a \\ i_B & S_{Ab} & S_{Bb} & S_{Cb} & * i_b \\ i_C & S_{Ac} & S_{Bc} & S_{Cc} & i_c \end{matrix}. \quad (8)$$

Согласно первому закону коммутации, при питании активно-индуктивной нагрузки мгновенному изменению тока препятствует ЭДС самоиндукции. Таким образом, в любой момент времени хотя бы один ключ каждой выходной фазы должен быть замкнут. С другой стороны, для недопущения корот-

кого замыкания фаз источника питания может быть открыт только один ключ каждой выходной фазы. Эти два условия объединены в выражении

$$\sum_{K=A,B,C} S_{Ka}(t) = \sum_{K=A,B,C} S_{Kb}(t) = \sum_{K=A,B,C} S_{Kc}(t) = 1. \quad (9)$$

ШИМ модуляция напряжения осуществляется для изменения его среднего значения путем управления длительностью импульсов. Коэффициент заполнения – это относительная длительность импульса модуляции:

$$m_{Kj} = \frac{t_{Kj}}{T},$$

где t_{Kj} – длительность импульса; T – период модуляции.

Уравнения для средних за период модуляции значений выходных и входных величин МПЧ можно записать с использованием модуляционной матрицы коэффициентов m_{ij} :

$$\begin{matrix} u_a & m_{Aa} & m_{Ba} & m_{Ca} & u_A \\ u_b & m_{Ab} & m_{Bb} & m_{Cb} & * u_B \end{matrix}, \quad (10)$$

$$\begin{matrix} u_c & m_{Ac} & m_{Bc} & m_{Cc} & u_C \\ i_A & m_{Aa} & m_{Ba} & m_{Ca} & i_a \\ i_B & m_{Ab} & m_{Bb} & m_{Cb} & * i_b \\ i_C & m_{Ac} & m_{Bc} & m_{Cc} & i_c \end{matrix}. \quad (11)$$

То же самое в компактной форме:

$$U_o(t) = M(t) U_i(t), \quad (12)$$

$$I_i(t) = M^T(t) I_o(t), \quad (13)$$

где $M(t)$ – модуляционная матрица МПЧ.

Выражение (9) в таком случае преобразуется в

$$\sum_{K=A,B,C} m_{Ka}(t) = \sum_{K=A,B,C} m_{Kb}(t) = \sum_{K=A,B,C} m_{Kc}(t) = 1. \quad (14)$$

Модуляционная матрица $M(t)$ определяется алгоритмом управления МПЧ, который, в свою очередь, может быть скалярным или векторным. Алгоритмы управления определяют законы изменения коэффициентов m_{ij} во времени. Известны следующие скалярные алгоритмы управления: метод Вентурины, метод Вентурины с добавлением третьей гармоники, описанные в [5], метод Роя [4]. Существуют также более совершенные методы пространственно-векторной модуляции [4].

Значительным недостатком МПЧ является низкий коэффициент передачи напряжения – отношение максимально возможной амплитуды напряжения на выходе к амплитуде входного напряжения. Данная проблема была решена Вентурины путем добавления к выходному напряжению третьих гармоник входной и выходной частот, что позволило достичь коэффициента передачи, равного 0,866, который является теоретическим пределом для МПЧ.

Для обеспечения неразрывности выходных цепей применяются сложные методы коммутации ключей

[1], направленные на достижение безопасного для транзисторов режима переключения нагрузки с одной сетевой фазы на другую.

Практическая реализация матричного преобразователя частоты со скалярным управлением

Нагрузка подключается к трехфазному МПЧ без использования нейтрального провода, так как нейтральный проводник на выходе МПЧ принципиально сформировать невозможно. Вследствие этого задача сводится к получению на выходе преобразователя синусоидальных междуфазных напряжений требуемой частоты. В выбранном для рассмотрения наиболее простом алгоритме управления [2] для формирования междуфазных напряжений нагрузки используются линейные сетевые напряжения максимальной величины (околопиковые участки входных линейных напряжений длительностью $\pi/3$). Схемой замещения МПЧ, работающего в данном режиме, в грубом приближении можно считать двухзвенный преобразователь частоты (ПЧ) с неуправляемым мостовым выпрямителем и ШИМ-инвертором без звена постоянного тока. Форма и гармонический состав выпрямленного напряжения мостового трехфазного выпрямителя приведены на рис. 3.

В двухзвенных ПЧ промежуточное звено постоянного тока используется для сглаживания пульсаций выпрямленного напряжения и рекуперации энергии в сеть. В свою очередь, матричная схема силовой части преобразователя позволяет рекуперировать энергию за счет непосредственной связи входных и выходных цепей. Таким образом, напряжение, форма которого представлена на рис. 3, имеет вполне приемлемый уровень высших гармоник и может быть использовано для питания практически любой нагрузки путем его модуляции по синусоидальному закону.

Практическая реализация МПЧ возможна с использованием программируемой логической интегральной схемы (ПЛИС) с оптронной развязкой силовых цепей. Блок-схема системы управления (рис. 4) содержит ШИМ-модулятор, формирователь импульсов

синхронизации и схему логического умножения импульсов. Формирователь импульсов синхронизации обеспечивает открытие тех 6 силовых ключей из 9 имеющихся, которые обеспечивают коммутацию максимального в текущий момент линейного напряжения. На входы формирователя подаются напряжения с измерительных витков сетевого трехфазного трансформатора. ШИМ-модулятор вырабатывает импульсы управления силовыми ключами по закону изменения сигналов управления. Изменением частоты и амплитуды сигналов управления, которые могут задаваться программным способом в микроконтроллере, осуществляется формирование нужных напряжений на выходе.

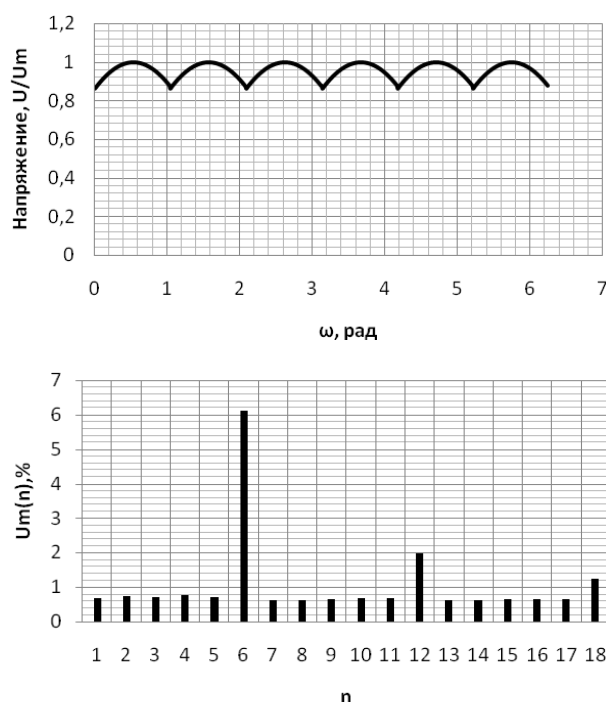


Рис. 3. Форма и гармонический состав напряжения на выходе мостовой схемы

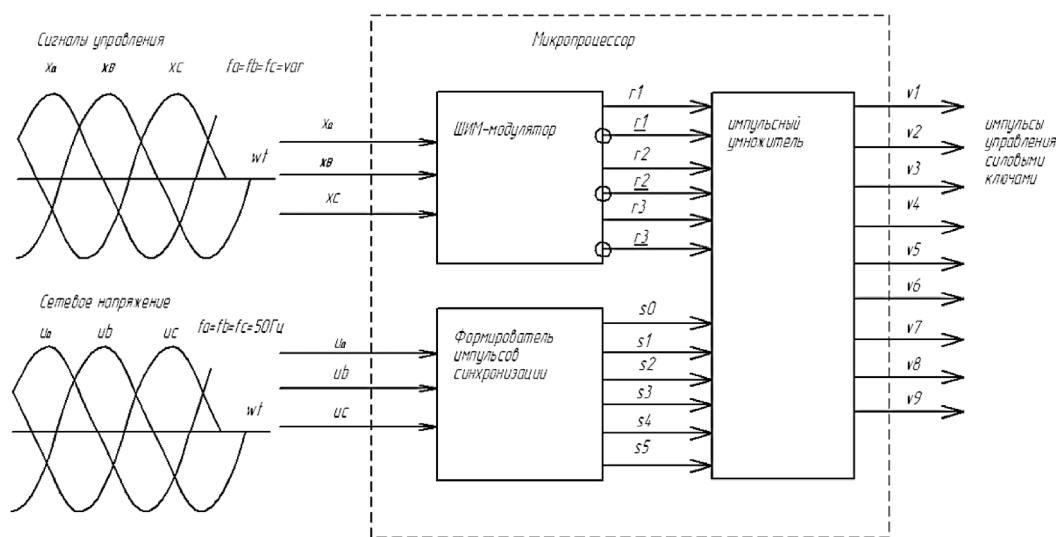


Рис. 4. Блок-схема системы управления

Импульсы на выходе модулятора формируются при сравнении трехфазных сигналов управления с одним и тем же опорным напряжением треугольной формы, обеспечивающей временной разнос фронтов импульсов разных ключей (рис. 5).

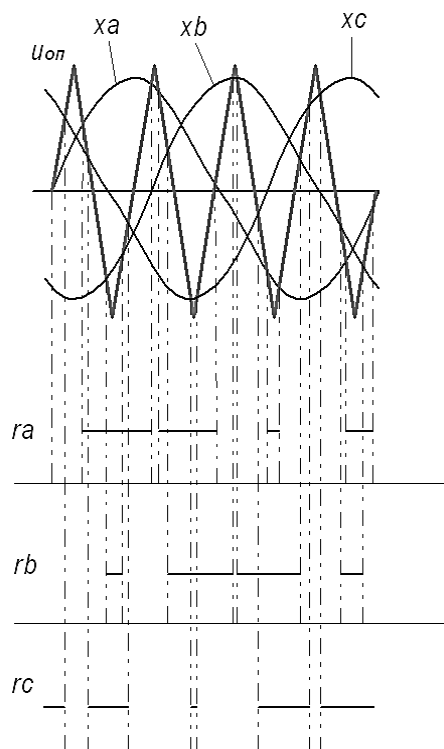


Рис. 5. Формирование ШИМ-сигналов

Частота опорного напряжения выбирается на несколько порядков выше частоты сети. Увеличение частоты повышает плавность изменения выходных напряжений, но в то же время повышает и коммутационные потери в ключах. Временными границами импульсов синхронизации являются точки естественной коммутации – пересечения линейных напряжений сети (рис. 6). В течение одного периода формируется 6 импульсов $S_0 \dots S_5$ длительностью $\pi/3$ рад. Сдвигом импульсов синхронизации относительно указанного на рис. 6 положения можно добиться как индуктивного при запаздывании импульсов на $0 \dots \pi/3$, так и емкостного (при опережении на $0 \dots \pi/3$) характера тока, потребляемого преобразователем из сети. При отсутствии фазового сдвига импульсов из сети потребляется чисто активный ток.

На входы умножителя подаются ШИМ-сигналы r_a, r_b, r_c и импульсы синхронизации $S_0 \dots S_5$. Выходные сигналы $U_1 \dots U_9$ управления ключами формируются согласно выражениям:

$$U_1 = r_a \cdot (S_0 + S_1) + \bar{r}_a \cdot (S_3 + S_4),$$

$$U_2 = r_b \cdot (S_0 + S_1) + \bar{r}_b \cdot (S_3 + S_4),$$

$$U_3 = r_c \cdot (S_0 + S_1) + \bar{r}_c \cdot (S_3 + S_4),$$

$$U_4 = r_a \cdot (S_2 + S_3) + \bar{r}_a \cdot (S_0 + S_5),$$

$$U_5 = r_b \cdot (S_2 + S_3) + \bar{r}_b \cdot (S_0 + S_5),$$

$$U_6 = r_c \cdot (S_2 + S_3) + \bar{r}_c \cdot (S_0 + S_5),$$

$$U_7 = r_a \cdot (S_4 + S_5) + \bar{r}_a \cdot (S_1 + S_2),$$

$$U_8 = r_b \cdot (S_4 + S_5) + \bar{r}_b \cdot (S_1 + S_2),$$

$$U_9 = r_c \cdot (S_4 + S_5) + \bar{r}_c \cdot (S_1 + S_2),$$

которые кратко можно записать в матричной форме:

$$[U] = [S_i + S_{i+1}] \cdot [r].$$

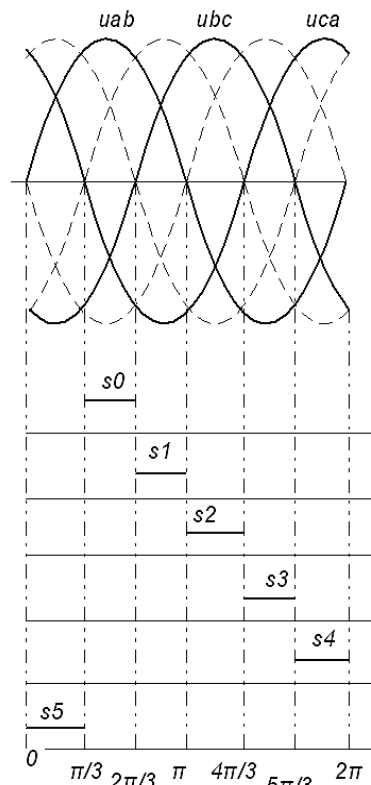


Рис. 6. Импульсы синхронизации S_i

Разработанный МПЧ со скалярным управлением характеризуется хорошими массогабаритными показателями, полной управляемостью и возможностью изменения фазы входного тока.

Следует отметить, что описанный алгоритм управления МПЧ построен без использования обратных связей (ОС). На практике при эксплуатации электроприводов существуют различные возмущающие воздействия: скачки тока нагрузки и колебания входного напряжения. Первые через преобразователь передаются в питающую сеть, вызывая ухудшение качества напряжения, а вторые негативно влияют на работу оборудования. Для устранения данных недостатков применяются различные виды автоматического регулирования МПЧ с использованием ОС.

В [5] описан механизм автоматического регулирования МПЧ с целью стабилизации входного тока преобразователя либо напряжения на нагрузке. Другой способ основан на отрицательной ОС с ПИ-звеном и пространственным вектором выходного тока в качестве опорной величины сравнения [6].

Заключение

Матричные преобразователи являются отдельным классом современных силовых электронных устройств, сочетающим в себе свойства всех остальных преобразователей переменного тока. За последние годы разработана обширная теоретическая база различных алгоритмов управления МПЧ, приспособленных для работы в составе электроприводов и систем электропитания различного назначения. Однако возможное широкое промышленное применение МПЧ на данный момент ограничивается их характерными недостатками и рядом технологических трудностей.

Библиографические ссылки

1. Климов В., Климова С. Двухнаправленные ключи в матричных структурах преобразователей переменного тока // Силовая электроника. – 2008. – № 4. – С. 58–61.
2. Сидоров С. Матричный преобразователь частоты – объект скалярного управления // Силовая электроника. – 2009. – № 3. – С. 31–35.

3. Гельман М. В., Дудкин М. М., Преображенский К. А. Преобразовательная техника : учеб. пособие. – Челябинск : Издат. центр ЮУрГУ, 2009. – 424 с.

4. Кокорин Н. В. Исследование и разработка преобразователя частоты матричного типа для электроприводов переменного тока : дис. ... канд. техн. наук : 05.09.12 : утв. 11.05.2010. – Чебоксары, 2010. – 157 с.

5. Alesina, A.; Venturini, M. Intrinsic amplitude limits and optimum design of 9-switches direct PWM AC-AC converters // Proceedings of IEEE power electronics specialists conference, PESC'88, Kyoto, Japan. – 1988. – Vol. 2. – Pp. 1284-1291.

6. Karaca, H.; Akkaya, R. Control of Venturini Method Based Matrix Converter in Input Voltage Variations // Proceedings of the International MultiConference of Engineers and Computer Scientists 2009. Vol II IMECS 2009, March 18-20, 2009, Hong Kong. – URL: http://www.iaeng.org/publication/IMECS2009/IMECS2009_pp1412-1416.pdf (дата обращения: 14.11.2013).

A. V. Morozov, Post-graduate, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. K. Barsukov, PhD in Engineering, Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

V. A. Morozov, PhD in Engineering, Associate Professor, Kalashnikov Izhevsk State Technical University

Development of matrix converter

The theoretical foundations of matrix converter functioning are presented in the article, an algorithm of driving the power switches providing the regulation of frequency and amplitude of the output voltage and input power factor is described.

Keywords: inverter, bidirectional power switch, scalar control, FPGA

Получено: 08.11.2013

13.32.018.782.3-047.37

А. И. Судаков, кандидат технических наук, доцент;

Е. А. Чабанов, доцент;

Н. В. Шулаков, доктор технических наук, профессор

Пермский национальный исследовательский политехнический университет

НОВЫЕ ПОДХОДЫ К ИДЕНТИФИКАЦИИ ПЕРЕХОДНЫХ ПРОЦЕССОВ СИНХРОННЫХ МАШИН В ОПЫТАХ ВНЕЗАПНОГО СИММЕТРИЧНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ ВЕРОЯТНОСТНО-СТАТИСТИЧЕСКИМИ МЕТОДАМИ

Статья посвящена новому развитию вероятностно-статистических методов (ВСМ) исследования длительных переходных процессов синхронных машин (СМ), протекающих в условиях влияния на данные процессы различных случайных факторов. В частности, разработан новый, неординарный метод минимизации среднеквадратичной погрешности приближения дискретной статистической модели переходной составляющей к опытным данным сравнительно длинного участка дискретного переходного процесса и представления указанной погрешности в виде дискретной поверхности в трехмерном измерении.

Ключевые слова: синхронная машина, переходный процесс, идентификация, среднеквадратичная погрешность

Научный коллектив Пермского национального исследовательского политехнического университета в составе проф. Н. В. Шулакова (руководитель проекта), доц. А. И. Судакова, доц. Е. А. Чабанова, ст. преподавателя С. В. Шутемова в рамках выигранного гранта № 13-08-96044 ФГБУ «Российский фонд фундаментальных исследований» занимается разработкой новых подходов к методам иденти-

фикации переходных процессов мощных синхронных машин в объеме требований стандартов Российской Федерации по результатам стендовых испытаний.

1. Актуальность задачи

Искусственное нарушение нормального режима работы синхронных генераторов в опыте внезапного симметричного короткого замыкания (ВКЗ) всех фаз