

УДК 621.314.2.38

Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский

**МАТЕМАТИЧЕСКАЯ МОДЕЛЬ КОМПЕНСАТОРА
НЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ НА БАЗЕ МНОГОУРОВНЕВОГО ИНВЕРТОРА
С ЗОННОЙ ШИМ НА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

В статье рассмотрен принцип повышения коэффициента мощности электротехнологической установки большой мощности. Устройство выполняет компенсацию реактивной мощности и мощности искажений в системе питания выпрямительной нагрузки с резкопеременным характером. Корректор построен на базе многоуровневого каскадного преобразователя с зонной ШИМ. Представлена математическая модель в синхронных dq -координатах и результаты имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB Simulink.

Ключевые слова: корректор коэффициента мощности, СТАТКОМ, многозонная ШИМ, реактивная мощность, мощность искажений, активный фильтр.

Проблема повышения качества электроэнергии приобретает особую актуальность вследствие непрерывного роста мощных несимметричных, нелинейных и быстроизменяющихся потребителей электроэнергии, существенно ухудшающих показатели качества электроэнергии. К таким потребителям, прежде всего, относятся мощные электрометаллургические установки, тяговые подстанции, предприятия металлообработки и др. [1, 2].

К крупным токоприемникам относятся токоприемники с потребляемой мощностью выше 1000 кВт, которые подключаются чаще всего непосредственно к сетям промышленных предприятий 6–10 кВ. К таким мощным токоприемникам относятся электропечные агрегаты, установки контактной электросварки и преобразовательные агрегаты электролизных установок. Реактивная нагрузка этих приемников может составлять до 80–130% активной нагрузки.

При работе электрооборудования на питающих шинах сети переменного тока возникают скачки потребляемой реактивной мощности, искажения с коэффициентом несинусоидальности до 10 – 20%, а также при несимметричной нагрузке возникает несимметрия токов фаз. Все данные явления негативно сказываются не только на потребителях, подключенных к данной питающей сети, но и на силовом распределительном оборудовании.

Обычные меры для улучшения качества напряжения (усиление питающей сети, установка фильтро-компенсирующих емкостно-индуктивных элементов) зачастую оказываются дорогостоящими и неэффективными, особенно в области высоких напряжений и больших мощностей. Появление мощных быстродействующих преобразователей напряжения с полностью управляемыми вентилями позволяет реализовать их в узлах с мощными, нелинейными и резкоизменяющимися нагрузками.

Мощность электротехнологических установок может достигать десятков и даже сотен МВА. При этом из-за невысокого значения их коэффициента мощности величина потребляемой реактивной мощности и мощности искажений составляет значительную долю. При нагрузке с управляемым выпрямителем, например, дуговой печи постоянного тока (ДППТ), рациональным является использование многоуровневого корректора коэффициента мощности (ККМ) с зонной ШИМ (рис. 1) при напряжении питающей сети 10 кВ.

Для компенсации неактивной составляющей мощности на стороне высокого напряжения предлагается использовать четырехуровневый корректор коэффициента мощности (ККМ) с зонной ШИМ на высокой частоте (рис. 1). Использование многоуровневой топологии на базе каскадного построения силового инвертора более выгодно из-за экономичного

использования ключевых и пассивных элементов, улучшенной формой выходного напряжения инвертора, а также идентичного их построения – однофазных мостовых инверторов, что упрощает не только конструкцию, но и математический анализ данного типа компенсатора [3, 4].

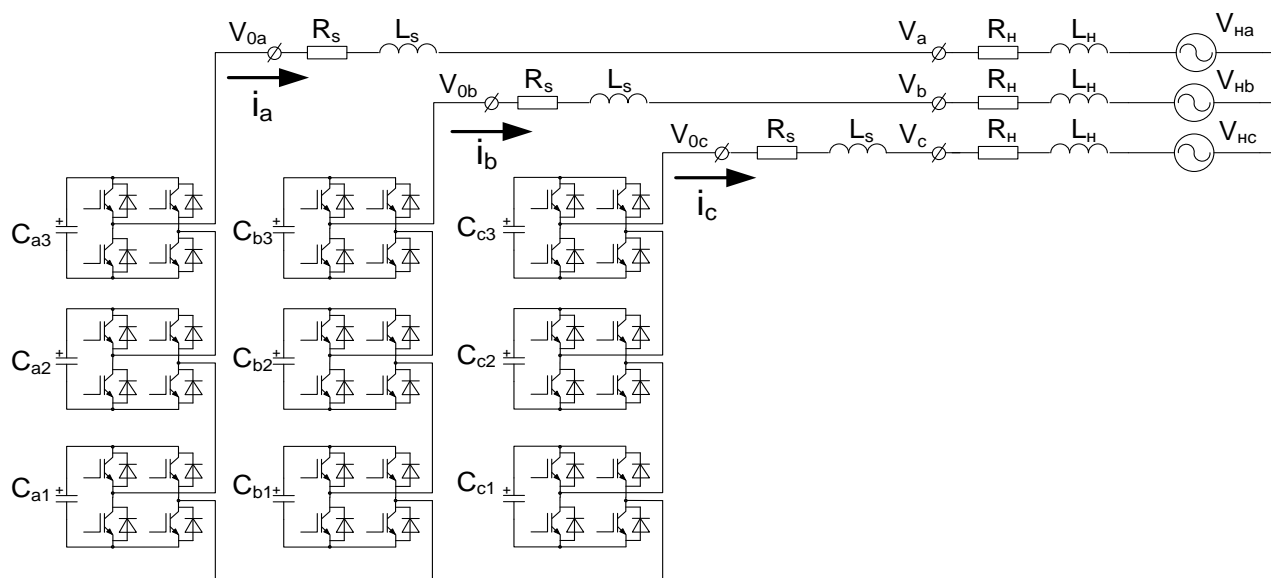


Рис. 1. Четырехуровневый корректор коэффициента мощности с зонной ШИМ

Принцип компенсации реактивной мощности заключается в перераспределении потока мощности в системе «питающая сеть – ККМ – нагрузка» таким образом, что весь поток реактивной мощности и мощности искажений циркулирует между ККМ и нагрузкой, не переходя в питающую сеть. Принцип компенсации мощности искажений заключается в генерировании ККМ в питающую сеть тока, все гармоники которого равны по амплитуде, но противоположны по фазе высшим гармоникам тока нагрузки. На рис. 2 представлена структурная схема перераспределения мощностей [5].



Рис. 2. Структурная схема потоков мощности при использовании ККМ

Математический анализ исследуемой схемы проводился в синхронной системе dq -координат, ориентированной по вектору напряжения питающей сети. Было получено описание ККМ для усредненной (1)–(2), и малосигнальной (3)–(4) математических моделей:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{3E}{\omega L_s} \begin{bmatrix} m_d \\ m_q \\ m_0 \end{bmatrix} - \frac{1}{\omega L_s} \begin{bmatrix} V_d \\ V_q \\ V_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s/\omega \cdot L_s & -\omega & 0 \\ \omega & R_s/\omega \cdot L_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s/\omega \cdot L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (1)$$

$$\frac{dE_j}{dt} = -\frac{3E_j}{R_s C} - \frac{1}{3C} \begin{bmatrix} m_{dj} & m_{qj} & m_{0j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix} = \frac{3E}{\omega L_s} \begin{bmatrix} m_d \\ m_q \\ m_0 \end{bmatrix} + \frac{3 \cdot e}{\omega L_s} \begin{bmatrix} M_d \\ M_q \\ M_0 \end{bmatrix} - \frac{1}{\omega L_s} \begin{bmatrix} v_d \\ v_q \\ v_0 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R_s/\omega L_s & -\omega & 0 \\ \omega & R_s/\omega L_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s/\omega L_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \\ i_0 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

$$\frac{de_j}{dt} = -\frac{3e_j}{R_s C} - \frac{1}{3C} \begin{bmatrix} I_d & I_q & I_0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_{dj} \\ m_{qj} \\ m_{0j} \end{bmatrix} - \frac{1}{C} \begin{bmatrix} M_{dj} & M_{qj} & M_{0j} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} m_d \\ m_q \\ m_0 \end{bmatrix}, \quad (4)$$

где m, i, e, v – соответственно отклонения параметров скважности ШИМ, тока ККМ, напряжения на конденсаторах и сети от точек покоя M, I, E и V соответственно.

Используя математическое описание каскадного многоуровневого ККМ можно найти передаточные характеристики основных параметров устройства. Провести анализ устойчивости функционирования системы управления и рассчитать параметры регулировочных звеньев можно либо по передаточным функциям (5)–(7), либо по уравнениям разностным дискретным уравнениям (8) и (9) представляющих собой систему векторного управления ККМ с реализацией алгоритма быстрого вычисления. По известному состоянию ККМ и нагрузке (токи и напряжения) определяется необходимое выходное напряжение ККМ для формирования компенсирующего тока.

$$W_{idd} = W_{iqq} = \frac{NE(R_s + pL_s)}{L_s^2 p^2 + 2L_s R_s p + (R_s^2 + \omega^2 L_s^2)}, \quad (5)$$

$$W_{iqd} = \frac{-NE\omega L_s}{L_s^2 p^2 + 2L_s R_s p + (R_s^2 + \omega^2 L_s^2)}, \quad (6)$$

$$W_{Eidj} = -\left(\frac{Y_{dj} L_s p + Y_{qj} L_s \omega + Y_{dj} R_s}{3p^2 C L_s + 3p C R_s + Y_{dj} Y_{qj} N} \right), \quad (7)$$

$$u_{df}^*(k) = u_{ds}(k) + \omega_s L_s i_{qf}(k) - \left[\frac{L_s}{T_s} + \frac{R_s}{2} \right] \cdot \left[(i_{df}^*(k) - i_{df}(k)) + \frac{T_s}{\left[\frac{L_s}{R_s} + \frac{T_s}{2} \right]} \cdot \sum_{n=0}^{n=k-1} [i_{df}^*(n) - i_{df}(n)] \right], \quad (8)$$

$$u_{qf}^*(k) = \omega_s L_s i_{df}(k) - \left[\frac{L_s}{T_s} + \frac{R_s}{2} \right] \cdot \left[(i_{qf}^*(k) - i_{qf}(k)) + \frac{T_s}{\left[\frac{L_s}{R_s} + \frac{T_s}{2} \right]} \cdot \sum_{n=0}^{n=k-1} [i_{qf}^*(n) - i_{qf}(n)] \right], \quad (9)$$

где N – число инверторов в фазе; E – напряжение на конденсаторах; R_s и L_s – активное сопротивление и индуктивность фазного реактора; C – емкость конденсатора; Y_j – коэффициент заполнения ШИМ; u_{ds} – напряжение питающей сети; T_s – период дискретизации; i_f – ток ККМ; i_f^* – опорный ток.

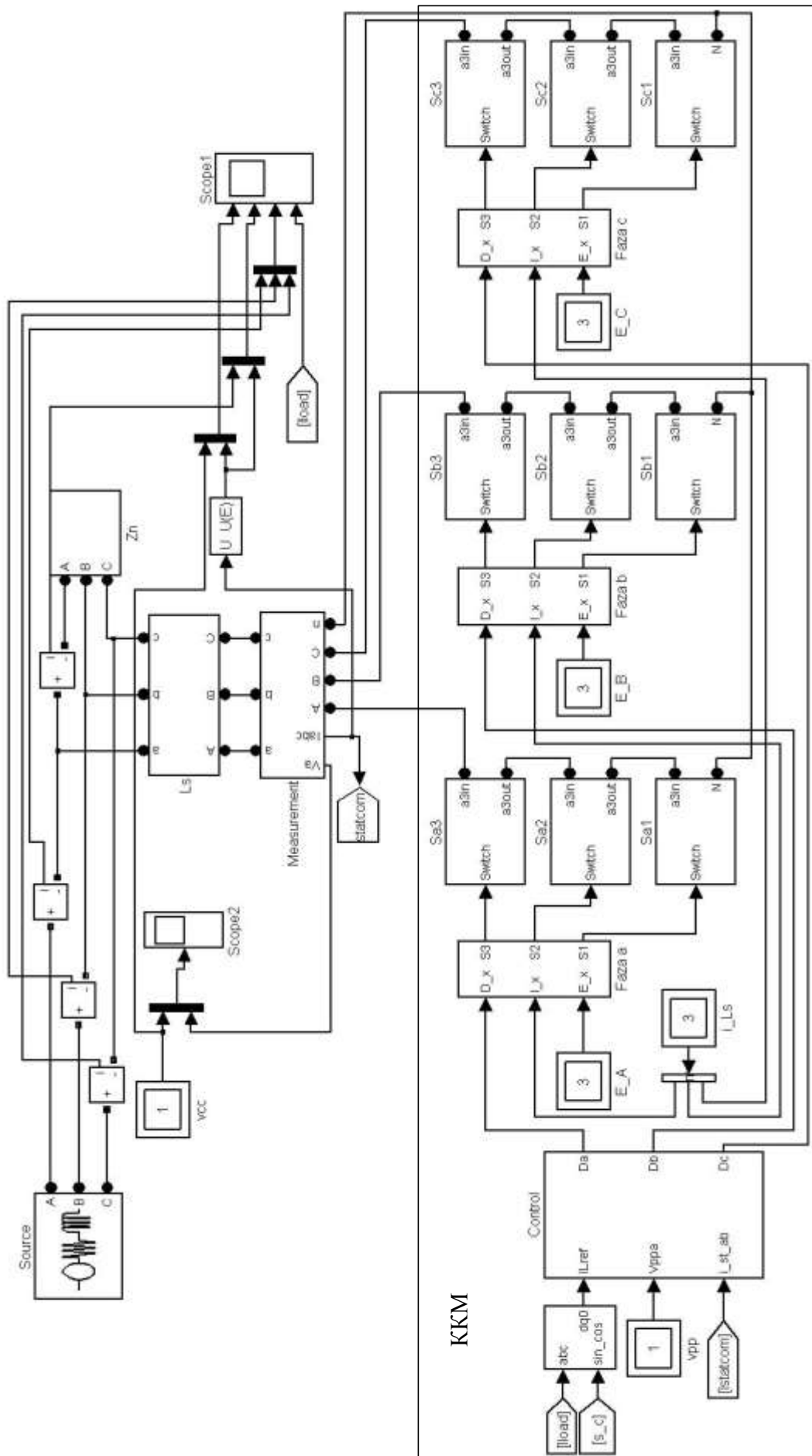


Рис. 3. Имитационная модель четырехуровневого корректора коэффициента мощности

Имитационная модель «сеть – ККМ – нагрузка», представленная на рис. 3, была реализована в пакете MATLAB Simulink. В качестве нагрузки был взят управляемый мостовой выпрямитель (блок Z_n на рис. 3). Источник переменного трехфазного напряжения учитывает индуктивное и активное сопротивление генератора (блок $Source$).

Силовая часть модели ККМ состоит из девяти однофазных полномостовых инверторов по три в каждой фазе ($S_{a1}–S_{a3}$, $S_{b1}–S_{b3}$, $S_{c1}–S_{c3}$). На основе математической модели, была разработана структурная схема системы управления ККМ – блок расчета ($Control$) и блок ШИМ ($Faza$), представленные на рис. 4 и рис. 5 соответственно.

Блок расчета $Control$ включает в себя преобразование Парка (прямое и обратное) и синхронизацию с сетью посредством ФАПЧ. Благодаря преобразованию Парка все необходимые сигналы реального времени перенесены в dq -координатное пространство. ФАПЧ необходим для синхронизации dq -координат с сетью. Выходными данными блока являются синусная и косинусная функции, однозначно определяющие угол положения вектора трехфазного напряжения, являющегося базисным для системы управления.

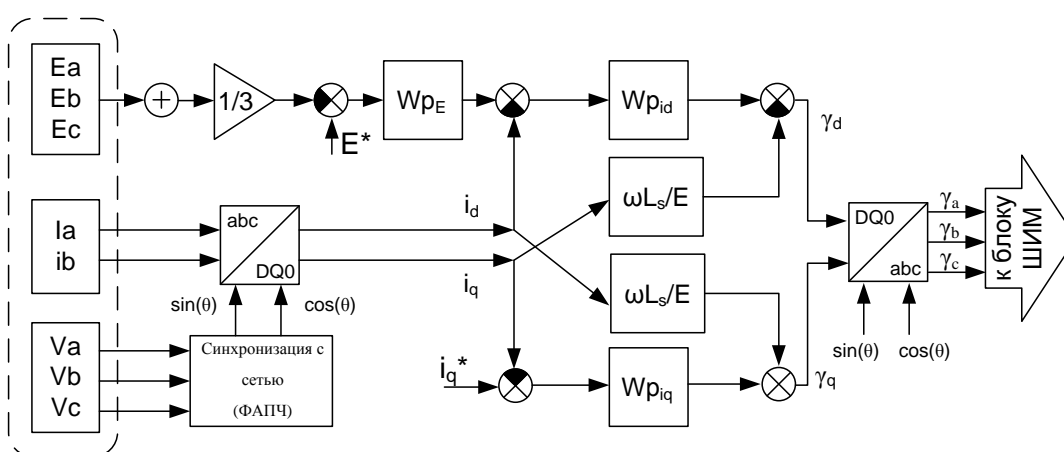


Рис. 4. Структурная схема системы управления

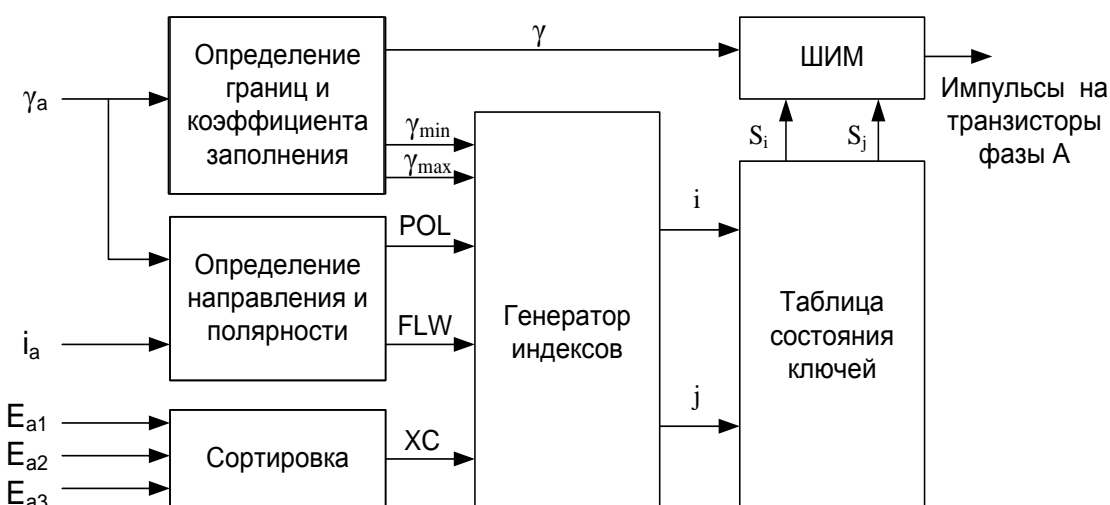


Рис. 5. Функциональная схема блока ШИМ

Блок ШИМ определяет включенные полупроводниковые элементы. Алгоритм работы блоков «Определение границ и коэффициента заполнения», «Определение направления и полярности» и «Сортировка» реализованы на языке программирования С. «Генератор индек-

сов» по текущим параметрам формирует выборку из «Таблицы состояний включенных ключей».

Временные зависимости тока, потребляемого нагрузкой, тока ККМ, а также тока питающей сети, полученные в результате имитационного моделирования в программном комплексе MATLAB Simulink, представлены на рис. 6. В качестве объекта исследования была взята электротехнологическая установка с управляемым трехфазным мостовым выпрямителем.

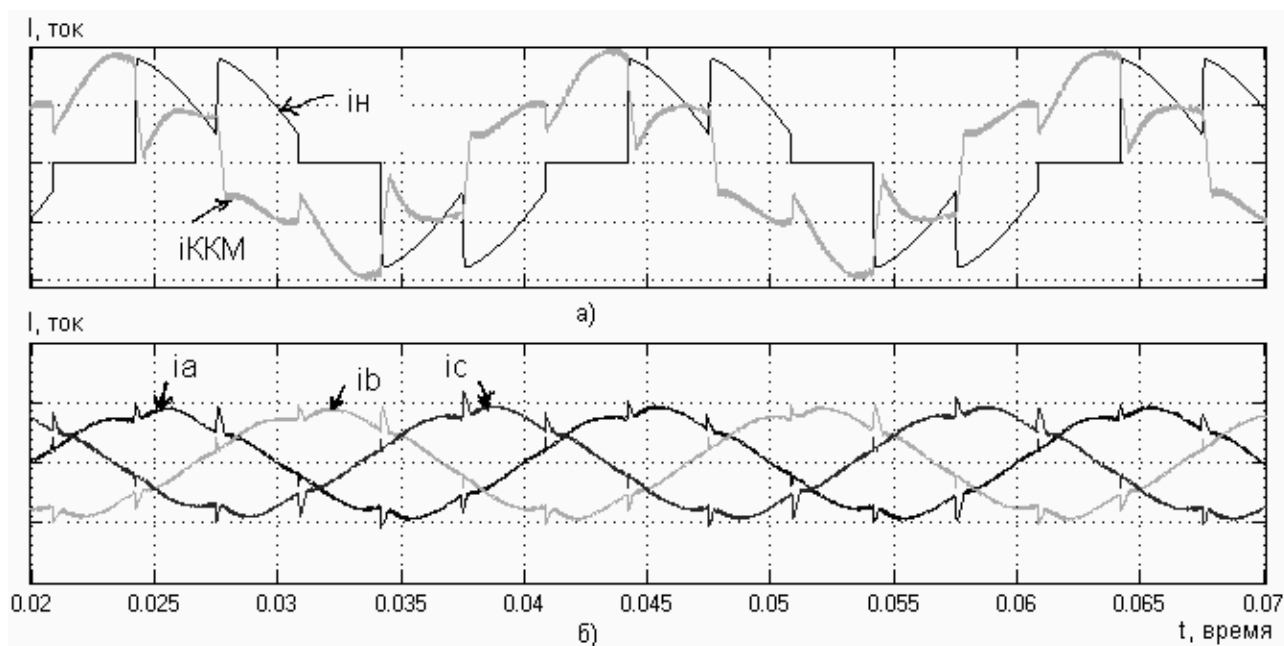


Рис. 6. Результаты имитационного моделирования:
 а – ток нагрузки и ток ККМ фазы А; б – фазные токи сети

Исследования, проведённые на имитационной модели, показали практически нулевой фазовый сдвиг между током и напряжением питающей сети, значительное повышение коэффициента мощности χ и снижение коэффициента искажений K_n (с 40% до 7% при $\alpha = 45^\circ$) в спектре тока питающей сети в полном диапазоне изменения угла управления выпрямителем, а также устойчивую работу ККМ в установившихся и динамических режимах. Для улучшения качества тока сети, целесообразно уменьшать инерционность реактивных элементов и предустановок в системе управления ККМ. Использование ККМ на мощности менее 10% от номинала нежелательно из-за увеличения высших гармоник в выходном токе компенсации, и как результат сетевых токов.

Выводы

1. Показана необходимость использования компенсирующих и корректирующих устройств для мощных потребителей, обладающих нелинейной и резкопеременной нагрузкой. От качества электроэнергии напрямую зависят как экономические, так и техникоэксплуатационные показатели.

2. Разработано математическое описание ККМ на базе многоуровневого каскадного инвертора напряжения в синхронных dq -координатах, ориентированных по вектору напряжения питающей сети. Использование многоуровневой топологии на базе каскадного построения силового инвертора более выгодно из-за экономичного использования ключевых и пассивных элементов, улучшенной формы выходного напряжения инвертора, идентичного их построения, а также простоты конструкции и математического описания.

3. По разработанной математической модели сформирована имитационная модель в

среде Matlab\Simulink, защищенная свидетельством о государственной регистрации программы для ЭВМ [6]. Предложена система управления для ККМ на базе многоуровневого каскадного инвертора.

4. Достоверность результатов моделирования подтверждается результатами экспериментального исследования физического макета (≈ 4 кВА) основных узлов устройства, предназначенного для непосредственного подключения к трехфазной сети 380 В, 50 Гц. Система управления выполнена с использованием сигнальных цифровых процессоров.

Библиографический список

1. **Горюнов, И.Т.** Проблемы обеспечения качества электрической энергии / И.Т. Горюнов, В.С. Мозгалева, В.А. Богданов // Электрические станции. 2001. № 1.
2. **Иванов, В.С.** Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. **Донской, Н.** Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики / Н. Донской, А. Иванов, В. Матисон, И. Ушаков // Силовая электроника. 2008. №1.
4. **Алтунин, Б.Ю.** Корректор коэффициента мощности в высоковольтной распределительной электросети на базе многоуровневого каскадного преобразователя с ШИМ на высокой частоте / Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский, М.Н. Слепченко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». 2008. №11(111).
5. **Кириенко, В.П.** Комплексное устройство компенсации реактивной мощности и мощности искажений в системах питания с управляемыми выпрямителями / В.П. Кириенко, М.Н. Слепченко. – М.: Электричество, 2006. № 11.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ / Имитационная модель корректора коэффициента мощности на базе многоуровневого инвертора/ Карнавский И.А. № гос. регистрации 2009613526 от 30.02.2002 г.

*Дата поступления
в редакцию 15.10.2010*

B.U. Altunin, I.A. Karnavskiy

MATHEMATICAL MODEL OF THE COMPENSATOR OF INACTIVE POWER ON BASE OF MULTILEVEL INVERTER WITH ZONAL PWM AT THE HIGH FREQUENCY

This paper presents the principle of an increase in the capacity rate of the electrotechnological installation of large power is examined. Device carries out the compensation for reactive power and power of distortions in the power-supply system of rectifying load with the sharply varying nature. Corrector is built on the base of multilevel cascade converter with the zonal PWM. Is represented mathematical model in the synchronous dq-coordinates and results of imitation model in the program Matlab/Simulink.

Key words: corrector of power coefficient, STATCOM, multilevel cascade inverter, reactive power, distortion power, active filter.