

УДК 621.314.2.38

**Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский**

## **ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ КОМПЕНСАТОРА РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ И МОЩНОСТИ ИСКАЖЕНИЙ НА БАЗЕ МНОГОУРОВНЕВОГО КАСКАДНОГО ИНВЕРТОРА**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е. Алексеева

Рассмотрен принцип построения компенсатора реактивной мощности и мощности искажений на базе многоуровневого каскадного инвертора с зонной ШИМ. Представлена имитационная 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.

С развитием производства все острее встает вопрос энергоэффективности. Задачи максимальной экономии энергетических ресурсов и повышения качества промышленной продукции являются одними из наиболее актуальных как в нашей стране, так и за рубежом. Было реализовано много проектов, направленных на улучшение параметров качества электроэнергии в электрических сетях регионов России. Важнейший законопроект N 261-ФЗ «Об энергосбережении, о повышении энергетической эффективности и о внесении изменений в отдельные законодательные акты РФ» принят ГД ФС РФ 11 ноября 2009 года.

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 относятся мощные электрометаллургические установки, тяговые подстанции, предприятия металлообработки и др. [1, 2].

Для преобразования трёхфазного напряжения в постоянное широко используются управляемые и неуправляемые вентильные преобразовательные установки, построенные по мостовым схемам с числом фаз выпрямления от 6 до 24. Основным недостатком управляемых тиристорных преобразователей является снижение коэффициента мощности системы, особенно при глубоком регулировании, обусловленное фазовым сдвигом тока относительно напряжения питающей сети и, следовательно, значительным потреблением реактивной мощности.

Второй недостаток выпрямителей проявляется при рассмотрении вопроса их электромагнитной совместимости с питающей сетью. Вентильные преобразователи в значительной степени искажают синусоидальную форму тока питающей сети, генерируя гармонические составляющие высших порядков, что, помимо снижения коэффициента мощности, отрицательно сказывается на оборудовании, подключенном к той же питающей сети, и требует применения фильтрующих устройств. Это приводит к дополнительным затратам на оборудование и при использовании пассивных фильтров гармоник к возможности возникновения нежелательных резонансных явлений.

Обычные меры для улучшения качества напряжения (усиление питающей сети, установка фильтрокомпенсирующих 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, дуговая печь постоянного тока (ДППТ), эффективно использование многоуровневого корректора коэффициента мощности (ККМ) с зонной ШИМ при напряжении питающей сети 10 кВ.

Для компенсации неактивной составляющей мощности на стороне высокого напряжения предлагается использовать четырехуровневый ККМ с зонной ШИМ на высокой частоте (рис. 1). Использование многоуровневой топологии на базе каскадного построения силового инвертора более выгодно по сравнению с другими типами из-за экономичного использования ключевых и пассивных элементов, улучшенной формы 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].

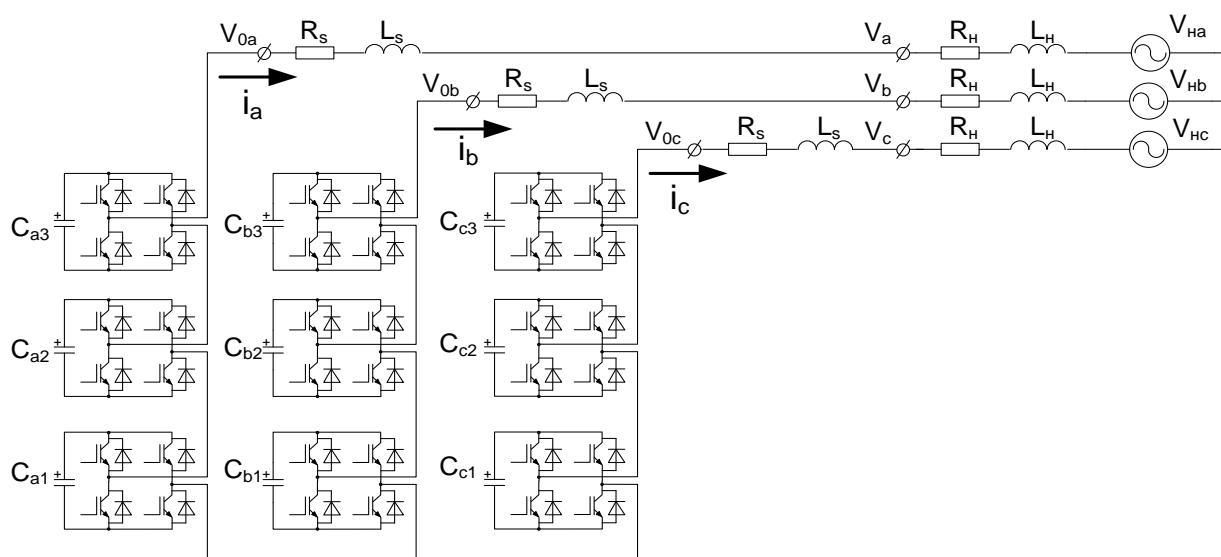


Рис. 1. Четырехуровневый компенсатор реактивной мощности и мощности искажений

Имитационная модель «сеть – ККМ – нагрузка», представленная на рис. 2, была реализована в пакете Matlab/Simulink [5]. В качестве модели источника сетевого напряжения и силовых модулей используются стандартные библиотечные блоки, корректно описывающие поведение реальных моделируемых узлов. Для задания параметров сетевого источника тока и ключевых элементов использованы *Three-phase sourc* и *Three-level bridge* соответственно из библиотеки *SimPowerSystems*. Источник переменного трехфазного напряжения учитывает индуктивное и активное сопротивление генератора (блок *Source*). В качестве нагрузки был взят управляемый мостовой выпрямитель (рис. 2) блок *Zn*.

Силовая часть модели ККМ состоит из девяти однофазных мостовых инверторов, по три в каждой фазе (*Sa1–Sa3*, *Sb1–Sb3*, *Sc1–Sc3*), рис. 3, а). Структурная схема системы управления ККМ – блок регулятора (*Control*) и блок ШИМ (*Faza*), представлены на рис. 3, б и рис. 3, в соответственно.

Блок расчета *Control* включает в себя преобразование Парка (прямое и обратное) и синхронизацию с сетью посредством ФАПЧ (PLL). ФАПЧ необходим для синхронизации dq-координат с сетью. Выходными данными блока являются синусная и косинусная функции, однозначно определяющие угол положения вектора трехфазного напряжения.

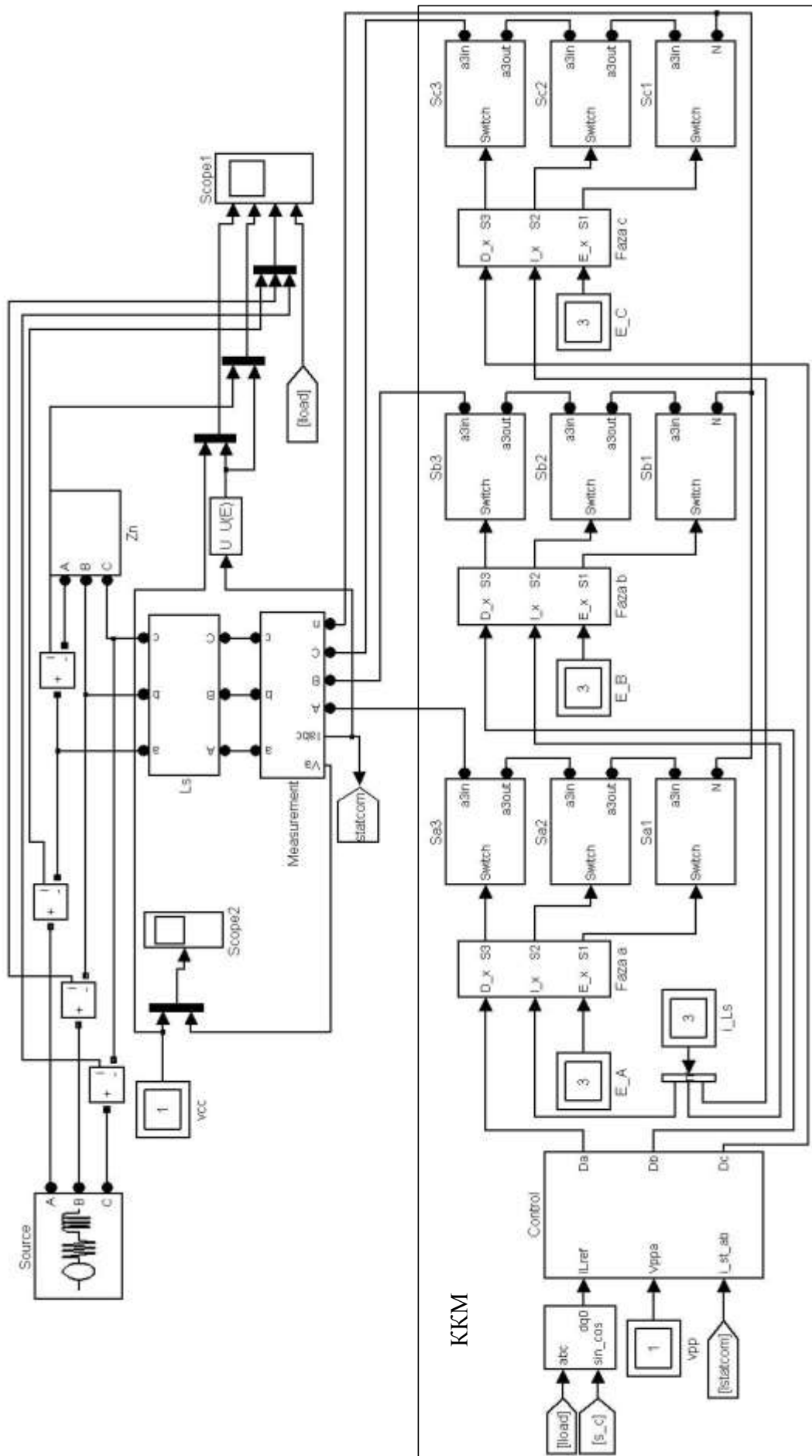


Рис. 2. Имитационная модель четырехуровневого корректора коэффициента мощности

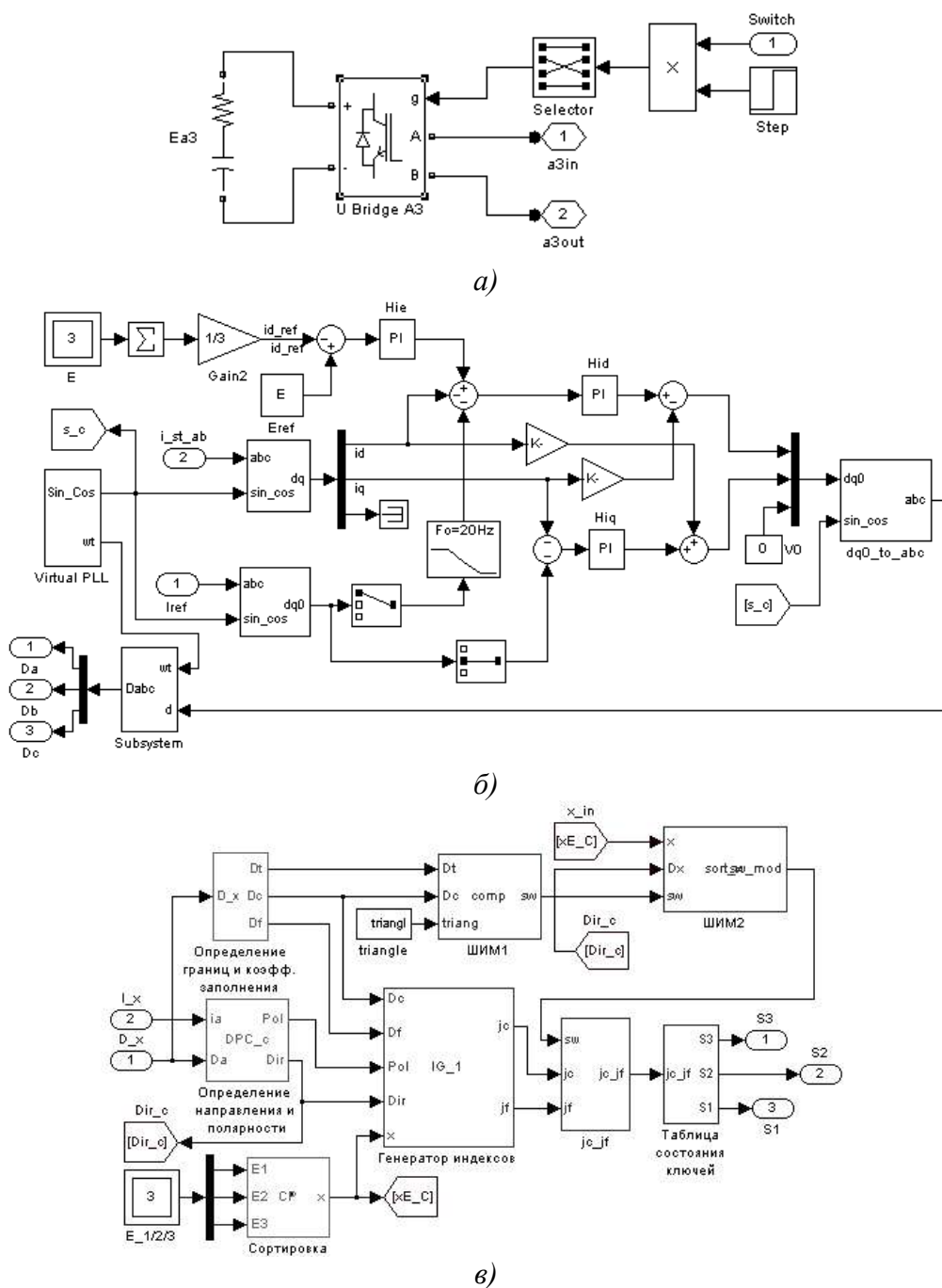
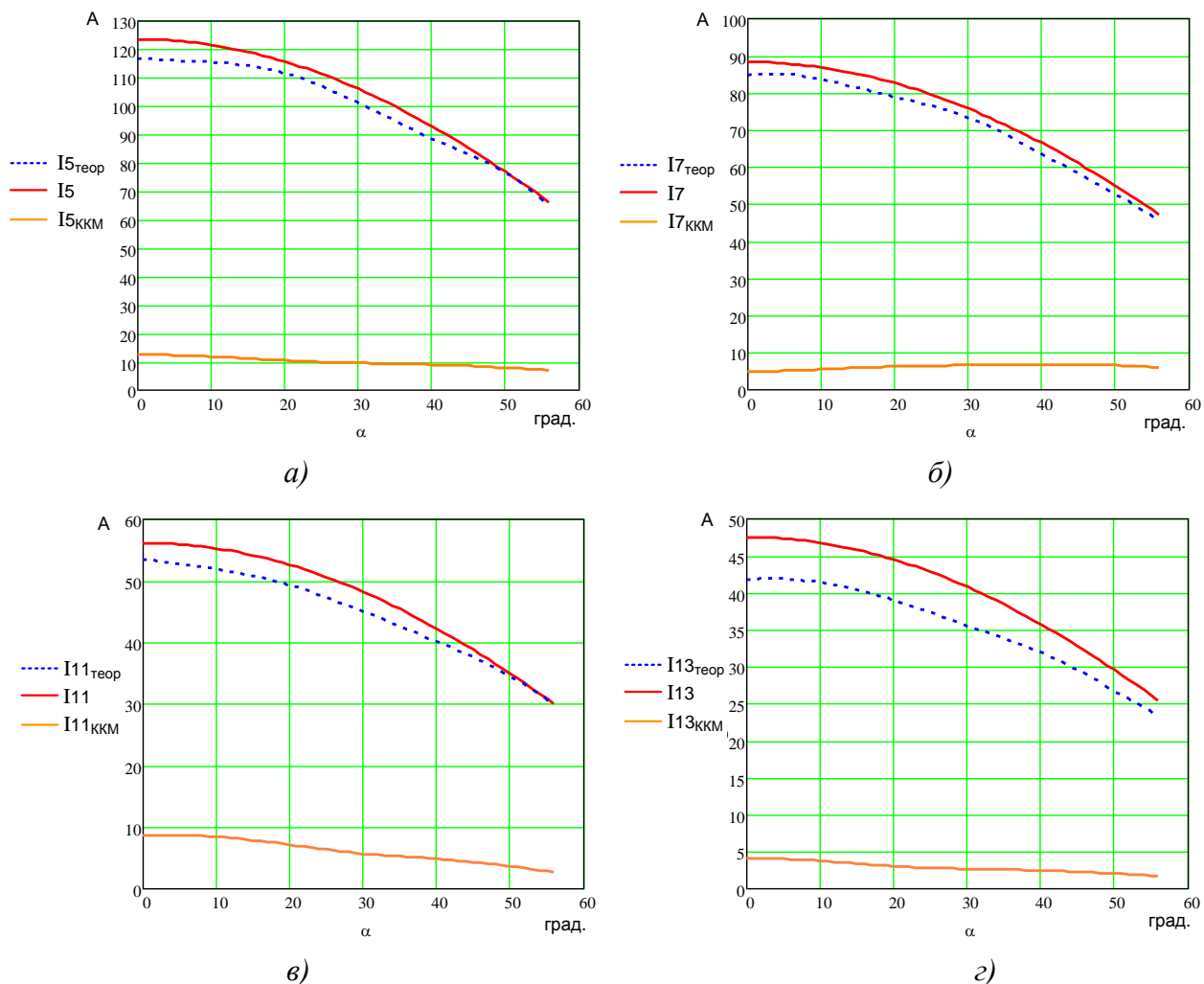


Рис. 3. Модели в Simulink:

а – мостовой инвертор; б – регулятор; в – 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 индексов» по текущим параметрам формирует выборку из «Таблицы состояний включенных ключей».

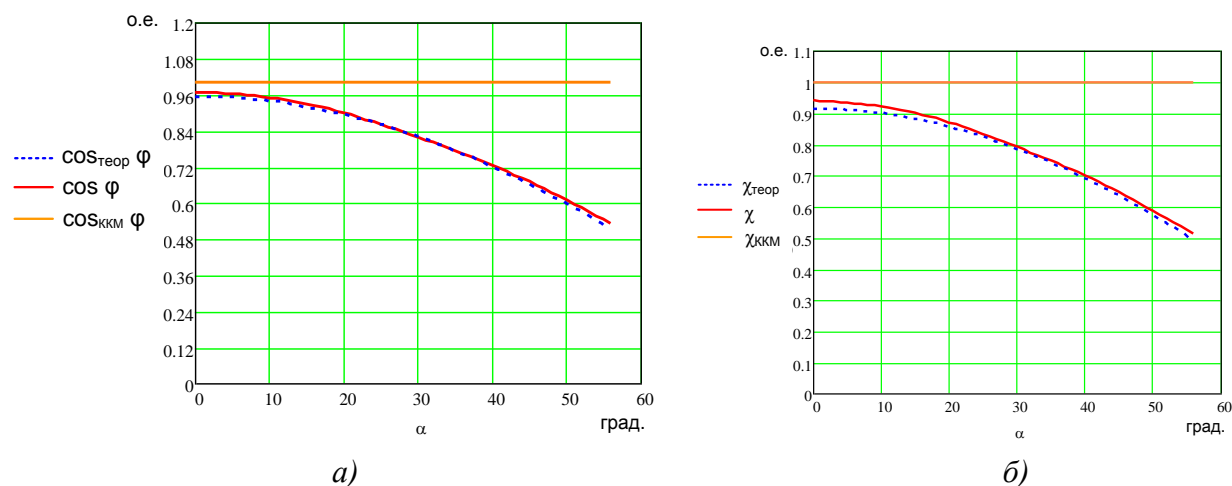
На имитационной модели были проведены исследования работы ККМ в полном диапазоне регулирования угла управления управляемого выпрямителя ДППТУ-12. На рис. 4 представлены графические зависимости высших гармонических составляющих сетевого тока без использования и с использованием ККМ при работе ДППТУ-12. Для сравнения на графиках добавлены теоретически полученные зависимости.



**Рис. 4. Зависимости высших гармоник сетевого тока от угла управления:**

*а* –пятая гармоника; *б* –седьмая гармоника; *в* –одиннадцатая гармоника; *г* –тринадцатая гармоника

Результаты моделирования показали, что при использовании ККМ сдвиг основной гармоники в сетевом токе практически равен нулю, рис. 5, *а*). Уменьшение угла сдвига и высших гармоник приводит к увеличению коэффициента мощности, рис. 5, *б*), и улучшению электромагнитной совместимости ДДПТУ-12.



**Рис. 5. Зависимости косинуса угла сдвига  $\varphi_1$  первой гармоники тока сети (*а*) и коэффициента мощности от угла управления (*б*)**

### Выводы

1. Разработан алгоритм управления силовыми ключами. Данный алгоритм позволяет управлять  $N$ -уровневым инвертором с контролем потока мощности для регулирования заряда на накопительных конденсаторах.

2. Разработана система управления имитационной модели ККМ на базе трехуровневого инвертора в среде Matlab/Simulink, защищенная свидетельством о государственной регистрации для ЭВМ [6].

3. Сравнительный анализ высших гармоник, косинуса угла сдвига, коэффициента мощности, активной и реактивной мощностей на модели без использования ККМ и с его использованием дал результаты, подтверждающие данные теоретического расчета. Использование ККМ повышает косинус угла сдвига практически до 1, снижает содержание высших гармоник в сети в среднем в 10 раз, в результате чего улучшается ЭМС.

4. Эффективность использования ККМ подтверждается увеличением коэффициента мощности во всем диапазоне регулирования ДППТУ-12, особенно при глубоком регулировании.

### Библиографический список

1. **Горюнов, И.Т.** Проблемы обеспечения качества электрической энергии / И.Т. Горюнов, В.С. Мозгалева, В.А. Богданов // Электрические станции. 2001. № 1. С. 32–37.
2. **Иванов, В.С.** Режимы потребления и качество электроэнергии систем электроснабжения промышленных предприятий / В.С. Иванов, В.И. Соколов. – М.: Энергоатомиздат, 1987.
3. Многоуровневые автономные инверторы для электропривода и электроэнергетики / Н. Донской [и др.] // Силовая электроника. 2008. № 1. С. 20–25.
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. Слепченков // Вестник ЮУрГУ. Сер. Энергетика. 2008. №11(111). С. 77–79.
5. **Алтунин, Б.Ю.** Математическая модель компенсатора неактивной мощности на базе многоуровневого инвертора с зонной ШИМ на высокой частоте / Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский // Труды НГТУ им. Р.Е. Алексеева. 2010. № 4. С. 219–225.
6. Свидетельство о государственной регистрации программы для ЭВМ: Имитационная модель корректора коэффициента мощности на базе многоуровневого инвертора / И.А. Карнавский № 2009613526 от 30.06.2009.

*Дата поступления  
в редакцию 01.02.2011*

**B.U. Altunin, I.A. Karnavskiy**

### SYSTEM CONTROL MODEL OF COMPENSATOR REACTIVE AND DISTORTION POWERS BASED ON CASCADE MULTILEVEL INVERTER

This paper presents the principle of compensation for reactive power and power of distortions on the basis of the multilevel cascade inverter with band-PWM. 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.