

УДК 519.876.5;537.85;537.872

## ПРОЕКТИРОВАНИЕ АКТИВНОГО КОРРЕКТОРА КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ И ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЕГО РАБОТЫ

И.Ю. Краснов, В.Н. Черемисин

Томский политехнический университет

E-mail: kiu@tpu.ru

*Спроектирован корректор коэффициента мощности, представлена его структурная схема в трехфазной сети. Проведено имитационное моделирование работы корректора в трехфазной сети с активной и реактивной нагрузкой. Посредством анализа графических и численных данных доказана адекватность построенной модели и эффективность использования корректора коэффициента мощности в трехфазных сетях.*

### Ключевые слова:

*Корректор коэффициента мощности, имитационное моделирование, компенсация реактивной мощности.*

### Введение

В России последнее время всё больше и больше внимания уделяется энергосберегающим аспектам. Энергосберегающие меры актуальны для многих отраслей, в том числе и для промышленности. Увеличение количества потребителей электроэнергии, несоизмеримое с интенсивностью появления новых её источников, обуславливает дефицит данного вида энергии, а также увеличение её стоимости.

Передача и распределение электроэнергии обычно сопровождается потреблением реактивной энергии, расходуемой на создание магнитных полей и создающей дополнительную нагрузку на силовые линии питания, как в элементах энергосистем, так и в нагрузке. В свою очередь, преобразование электроэнергии характеризуется коэффициентом мощности (КМ), который определяет количество активной энергии, передаваемой потребителю [1]. Понятно, что в случае отсутствия потребления реактивной энергии КМ должен быть близок к единице, а для этого необходимо, чтобы из сети потреблялся ток, совпадающий по форме и фазе с напряжением сети [2].

Компенсация реактивной мощности — один из самых эффективных способов энергосбережения на промышленных предприятиях [3].

Указанные цели до некоторого момента времени достигались с помощью пассивных методов компенсации реактивной мощности — использования источников реактивной мощности, среди которых применение находили статические тиристорные компенсаторы, а также конденсаторные установки [4]. Однако, поскольку современные системы электропитания, в большинстве своем, — импульсные устройства, в значительной степени искажающие гармонический состав потребляемого тока, то для улучшения его гармонического состава целесообразно использование активного корректора коэффициента мощности (ККМ) [5, 6]. При помощи ККМ возможно не только организовать потребляемый ток сети, совпадающий по форме и фазе с напряжением, но и обеспечить заданный уровень постоянного напряжения на конденсаторе.

### 1. Описание структуры ККМ

Структурная схема ККМ

Активные ККМ используются как в однофазных, так и в многофазных сетях. Для каждого отдельного случая ККМ имеет особую структуру. Структурная схема активного ККМ для трехфазных цепей приведена на рис. 1. Она содержит дроссель  $L$ , инвертор с  $IGBT$ -модулем, конденсатор  $C$ , блок системы управления ключами инвертора, датчики напряжений и токов.

Система управления по сигналам с датчиков (напряжение в фазах, ток потребления в фазах на входе ККМ, напряжение на конденсаторе, уровень заданного напряжения) формирует сигнал управления ключами инвертора. Управление осуществляется таким образом, чтобы организовать синусоидальную форму потребляемого нагрузкой тока сети, совпадающий по фазе с напряжением, а также обеспечить уровень напряжения на конденсаторе вблизи заданного значения.

Элементы схемы ККМ (дроссель и конденсатор) выбираются в соответствии с предполагаемыми условиями работы ККМ, мощностью и типом нагрузки. Величина индуктивности дросселя влияет на гармонический состав потребляемого тока, который регламентирован соответствующим ГОСТ [7].

Описание системы управления ККМ

Система управления ККМ формирует шестимерный массив импульсных сигналов (для  $IGBT$ -драйверов), каждый из которых соответствует состоянию одного из шести ключей инвертора (открыт или закрыт). Второй, четвертый и шестой элементы данного массива инверсны первому, третьему и пятому элементам этого же массива соответственно. Функциональная схема системы управления представлена на рис. 2 [8].

Первый, третий и пятый элементы массива управляющих сигналов организуются импульсными блоками с заданным уровнем гистерезиса (смена значения элемента массива на «0» при

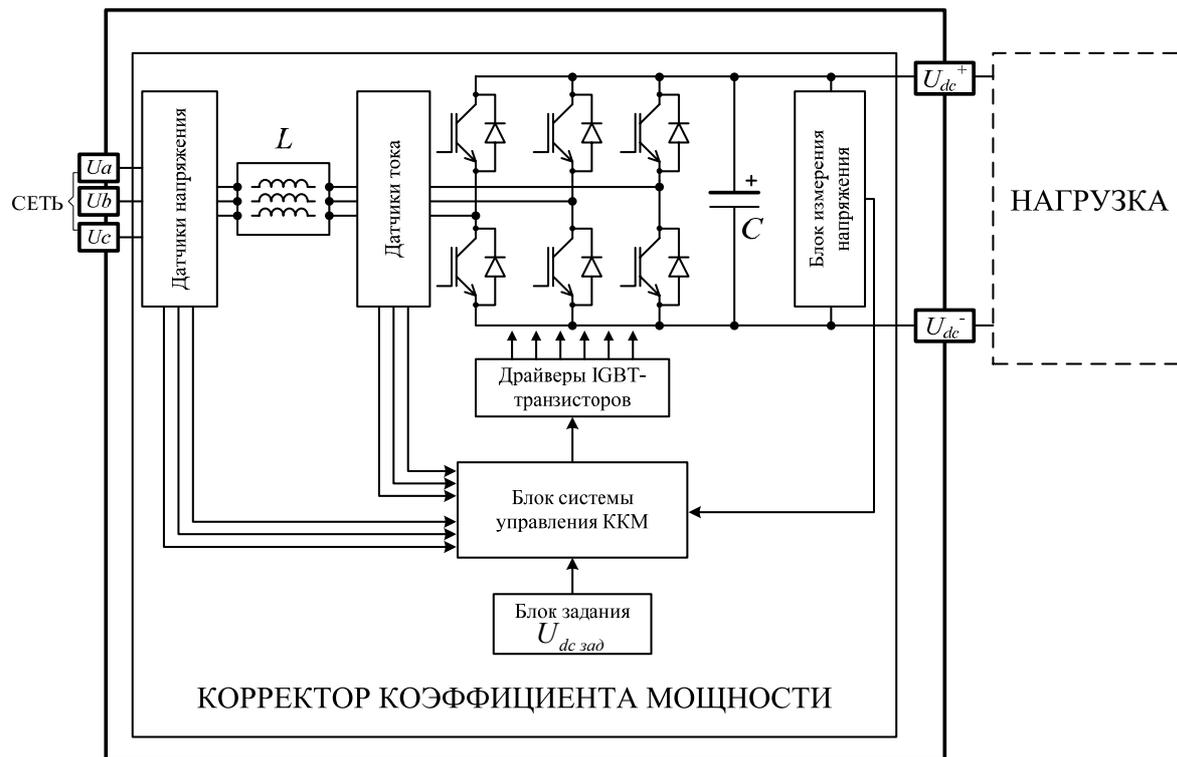


Рис. 1. Структурная схема активного ККМ

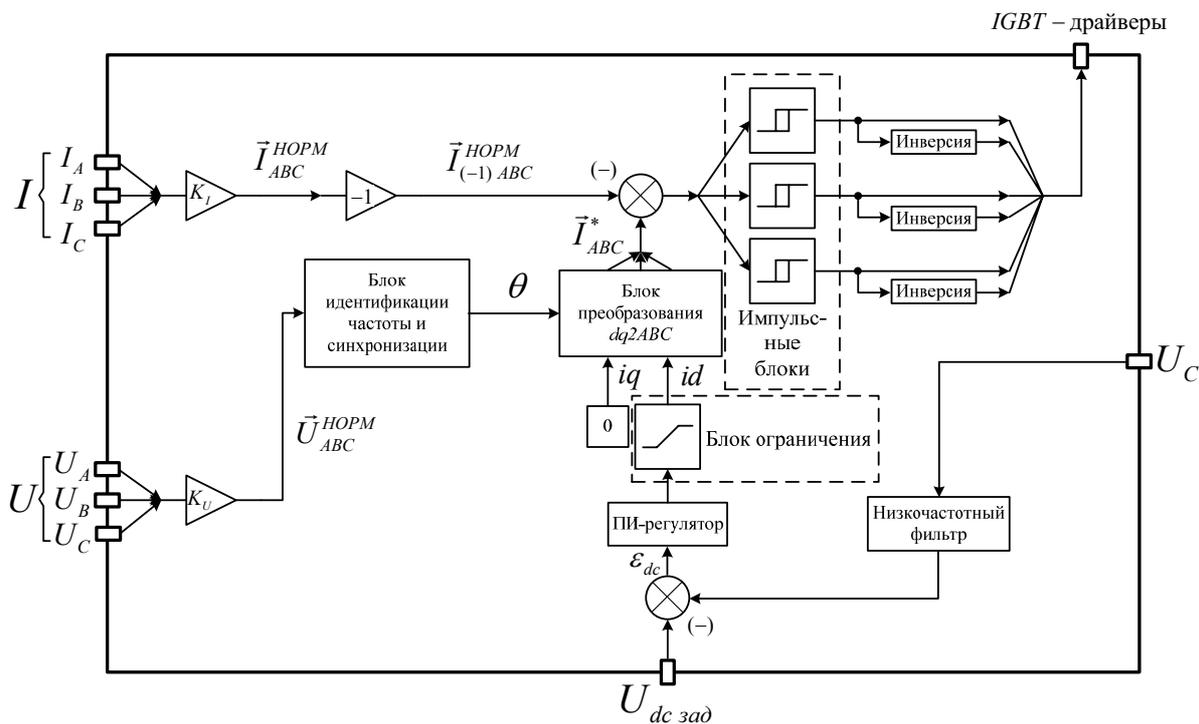


Рис. 2. Функциональная схема системы управления ключами инвертора ККМ

поступлении на вход реле сигнала меньше нижнего уровня гистерезиса; смена значения элемента массива на «1» при поступлении на вход реле сигнала больше верхнего уровня гистерезиса). На вход каждого из импульсных блоков поступает элемент трехмерного массива ошибки рассогласования по току

(разница между сформированным массивом тока  $\vec{I}_{ABC}^*$  и массивом тока  $\vec{I}_{(-1)ABC}^{NORM}$ , элементы которого находятся в противофазе с сигналами токов с датчиков). Нормированный вектор  $\vec{I}_{ABC}^{NORM}$  системы управления получается в результате перемножения входных сигналов тока на нормирующий коэффи-

циент  $K_r$ . Аналогично нормируются сигналы входных фазных напряжений. Значения элементов заданного массива тока  $\vec{I}_{ABC}^*$  образуются путём поворота во вращающейся системе координат  $dq0$  вектора тока синхронно с вектором питающего напряжения.

Длина вектора тока определяется координатой  $id$ , которая в свою очередь формируется по закону ПИ (пропорционально-интегральному)-регулирования ошибки рассогласования  $\varepsilon_{dc}$  по напряжению на конденсаторе (разница между заданным сигналом и сигналом обратной связи) [8]; координата  $iq$  задаётся нулевой, угол  $\theta$  поворота вектора тока вычисляется в соответствии с алгоритмом идентификации частоты и фазового сдвига питающего напряжения. Для использования в вычислениях более сглаженного и точного сигнала с датчика напряжения на конденсаторе  $U_c$  используется низкочастотный фильтр типа скользящего среднего [9].

## 2. Моделирование работы ККМ

Построение имитационной модели трехфазной сети с ККМ

Для проведения имитационного моделирования работы ККМ в трехфазной сети была построена модель сети с ККМ и нагрузкой в среде инженерных расчетов Mathworks Matlab 7.4.0/Simulink 6.6 [10] с использованием встроенной библиотеки «SimPowerSystems».

Модель включает в себя (рис. 3): трехфазный источник питания «Three-Phase Source» и блоки: задания уровня напряжения на конденсаторе, ам-

перметров и вольтметров, заземления, ККМ, нагрузки (активной или реактивной), вычисления активной и реактивной мощности «Active & Reactive Power» для вычисления коэффициента мощности, осциллографов для визуального анализа сигналов.

Блок ККМ, созданный в соответствии со структурной схемой (рис. 1), состоит из: датчиков фазных напряжений, дросселя, датчиков фазных токов и блока их инверсии, трехфазного инвертора с IGBT-модулем, конденсатора и блока системы управления ключами инвертора. В свою очередь блок системы управления ключами инвертора создан согласно структурной схеме, рис. 2.

Алгоритм идентификации частоты и фазового сдвига сигнала фазного напряжения питания предусматривает возможный «обрыв» синхронизируемой фазы напряжения, при наступлении которого сигнал фазы вычисляется по сигналам двух других фаз. В системе управления ККМ также предусмотрен анализ превышения тока потребления над установленным максимально возможным уровнем. При наступлении данного случая блокируется управляющий сигнал, имитируя открытие всех ключей инвертора (режим пассивного выпрямителя [11, 12]).

## 3. Проведение имитационного моделирования работы ККМ в среде Matlab/Simulink

Моделирование работы ККМ проводилось при амплитуде фазного питающего напряжения 311 В частотой 50 Гц. Фазовый сдвиг всех фаз напряжения питания относительно нуля был задан в  $96^\circ$  для ими-

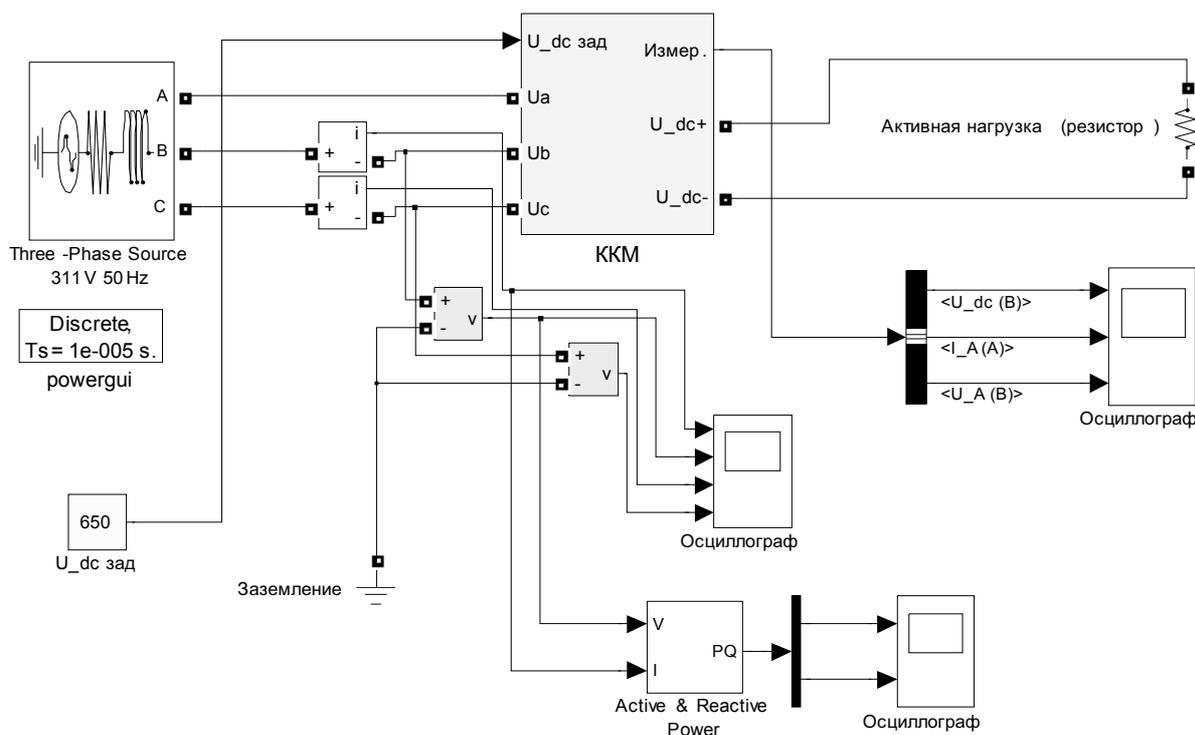


Рис. 3. Схема модели трехфазной сети с активной нагрузкой в Matlab/Simulink

тации работы при ненулевых начальных условиях и подтверждения работы алгоритма синхронизации в приближенных к реальным условиях. Дроссель на входе ККМ имеет индуктивность 3 мГн; конденсатор в цепи постоянного напряжения – 1000 мкФ. Размер зоны гистерезиса реле системы управления (разница между верхней и нижней границами) был установлен в 10 А, коэффициенты усиления ПИ-регулятора: пропорциональный – 5 А/В, интегральный – 30 А/В. Резистор, как элемент, выбранный в качестве активной нагрузки, имеет номинал 27 Ом. В качестве элемента реактивной нагрузки был выбран асинхронный двигатель мощностью 7,5 кВт серии 4А112М2У3. Заданное значение напряжения на конденсаторе составляет 650 В.

Для наглядного подтверждения эффективности применения ККМ некоторое время (0,05 с) моделирование проводилось без его использования (с отключенным управляющим сигналом) – режим пассивного выпрямителя. По истечении 0,05 секунды с начала моделирования с помощью «ключа отключения управления» управляющий сигнал был подключен к трехфазному инвертору, обеспечивая работу ККМ в сети. Моделирование было закончено при достижении значения напряжения на

конденсаторе заданного уровня (0,3 с). При моделировании с реактивным типом нагрузки (асинхронный двигатель) анализ результатов проводился при работе двигателя в номинальном режиме (вращении вала двигателя на номинальной частоте и номинальном статическом моменте) после завершения переходных процессов.

#### 4. Результаты моделирования

Графические результаты проведенного моделирования представлены на рис. 4 и 5. Коэффициент мощности, гармонический состав сигнала тока потребления (амплитуда основной 1-й гармоники 50 Гц, амплитуда 5-й гармоники 250 Гц и коэффициент суммарных гармонических искажений THD<sup>1</sup>), уровень напряжения на конденсаторе – до момента подключения ККМ (без использования ККМ) и после (с ККМ) сведены в табл. 1 и 2. Коэффициент мощности сети был рассчитан по формуле [11, 8]:

$$\cos \varphi = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2 + D^2}},$$

где  $P$  – активная мощность,  $Q$  – реактивная мощность,  $D$  – искажающая составляющая мощности.

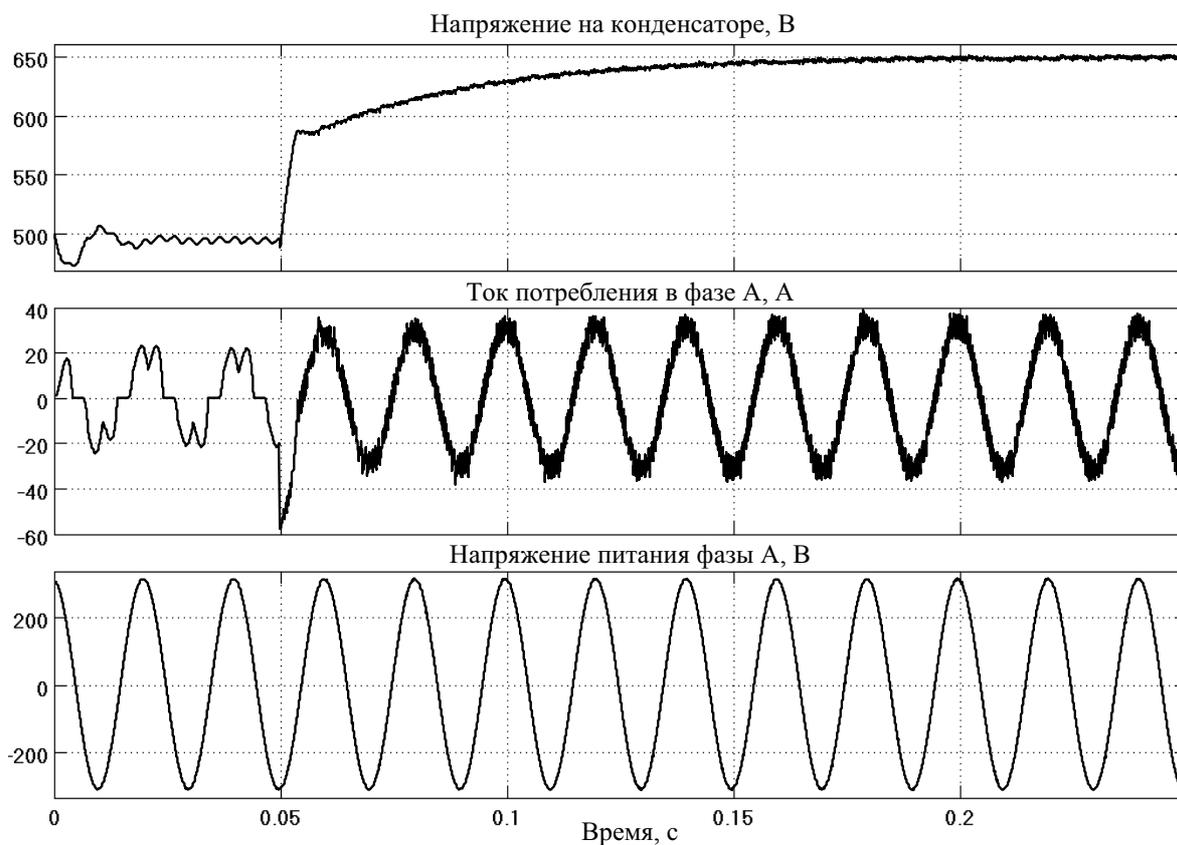


Рис. 4. Результаты моделирования работы ККМ в трехфазной сети с активной нагрузкой

<sup>1</sup> THD (коэффициент гармонических искажений) – отношение суммарной мощности всех гармоник (кроме первой) к мощности первой гармоники.

По приведённым графическим данным (рис. 4 и 5) можно сделать вывод о том, что до момента включения ККМ в трехфазной сети сигнал тока потребления содержал наряду с основной гармоникой (50 Гц) ещё и 5-ю гармонику (250 Гц) и гармоники более высокого порядка (350 Гц, 550 Гц и т. д.). Таким образом, можно предположить, что сигнал тока имел несинусоидальную не соответствующую ГОСТ 13109-97 форму [7].

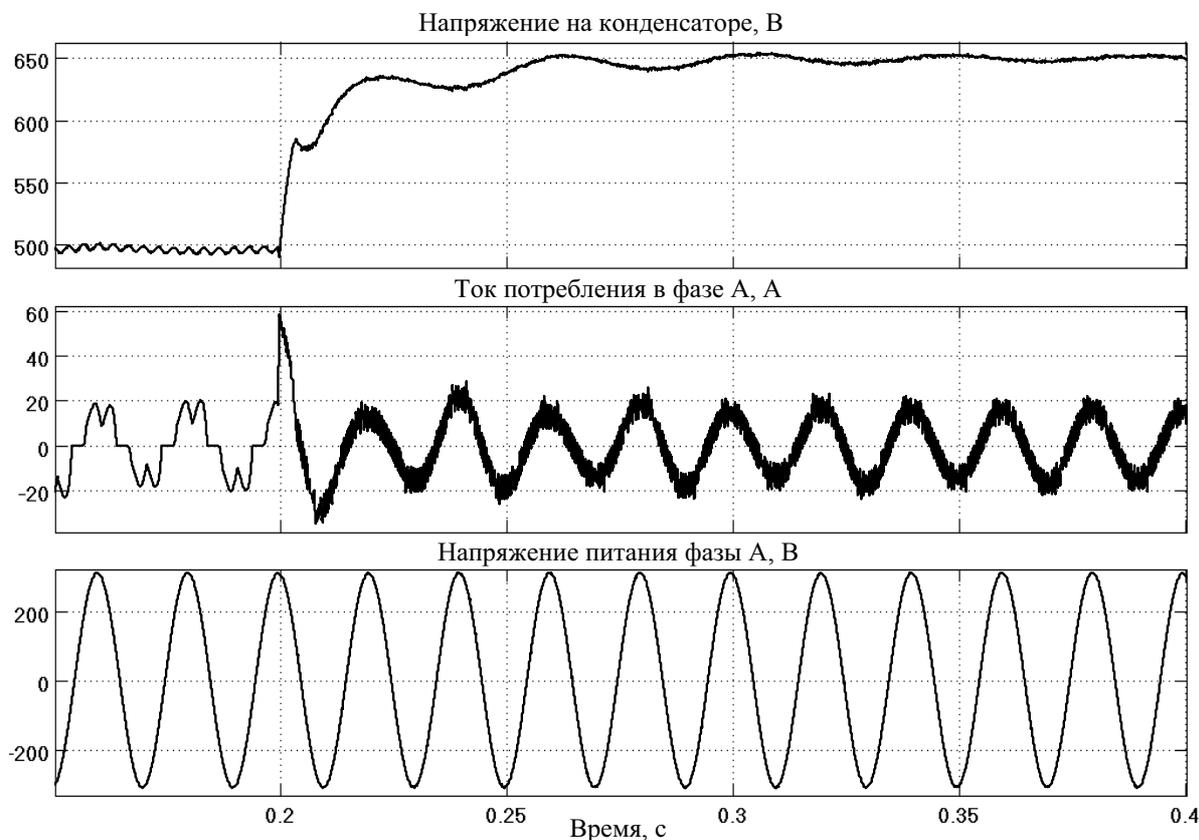
**Таблица 1.** Численные результаты моделирования с активной и реактивной нагрузкой

| Параметр  | Без ККМ   |   | С ККМ   |   |
|---|---|---|---|---|
|   | Активная  | Реактивная  | Активная  | Реактивная  |
| Тип нагрузки  |   |   |   |   |
| Коэффициент мощности $\cos\phi$   | 0,75  | 0,71  | 0,999   | 0,998   |
| Гармонический состав сигнала тока потребления, А, (% от основной гармоники 50 Гц) | 50 Гц – 19,33 А<br>250 Гц – 5,71 А<br>ТНД – 31,57 % | 50 Гц – 16,45 А<br>250 Гц – 5,15 А<br>ТНД – 22,59 % | 50 Гц – 32,61 А<br>250 Гц – 0,65 А<br>ТНД – 13,02 % | 50 Гц – 16,08 А<br>250 Гц – 0,64 А<br>ТНД – 26,32 % |
| Напряжение на конденсаторе, (% от заданного уровня)                               | 76,1  | 75,38   | 100,0   | 100,0   |

Указанные предположения подтверждены численными данными из таблиц, полученными с по-

мощью инструмента системы Matlab «FFT Analysis», – отличный от единицы КМ (0,75 при активной нагрузке и 0,71 – при реактивной), превышенные амплитуды 5-й гармоники 5,71 А (табл. 1) и 5,15 А (табл. 2) допустимого уровня 1,14 А. Более того, без использования активного ККМ (режим пассивного выпрямителя) напряжение на конденсаторе при активной нагрузке составляет лишь 72,3 % от заданного уровня (470 В при заданных 650 В), а при реактивной – 75,38 % (490 В при заданных 650 В).

После подключения с помощью «ключа отключения управления» (в момент времени 0,05 с) управляющего сигнала к инвертору ККМ сигнал тока потребления принял синусоидальную форму, по фазе совпадающую с сигналом напряжения питания (рис. 4 и 5). КМ сети при подключенном ККМ составил 0,999 при активной нагрузке и 0,998 – при реактивной. Коэффициент гармонических искажений снизился с 31,57 до 13,02 % (табл. 1). Работа ключей инвертора «внесла» искажения в сигнал тока в виде высокочастотных колебаний при реактивной нагрузке, увеличив значение ТНД по сравнению с режимом пассивного выпрямителя с 22,59 до 26,32 % (табл. 2). Однако, амплитуда 5-й гармоники снизилась более чем в 8 раз и, в целом, сигнал тока стал соответствовать ГОСТ 13109-97 [7]. Немаловажен и тот факт, что напряжение на конденсаторе достигло заданного уровня.



**Рис. 5.** Результаты моделирования работы ККМ в трехфазной сети с реактивной нагрузкой – асинхронным двигателем

Таким образом, система управления ключами инвертора ККМ обеспечила не только синусоидальную форму тока и отсутствие сдвига фазы тока относительно фазы напряжения, но и заданный уровень напряжения на конденсаторе (рис. 4 и 5).

Данные из таблиц численно подтверждают эффективность работы ККМ в трехфазной сети как с активной, так и с реактивной нагрузкой.

### Заключение

С момента принятия ГОСТ Р 51317.3.2-2006 по эмиссии гармонических составляющих тока, создаваемой статическими преобразователями [7], в электрических сетях взамен статических преобразователей с низким КМ стали применяться активные ККМ. ККМ позволяет не только улучшить гармонический состав тока потребления, но и повысить мощность подключенного к сети оборудования за счёт поддержания заданного уровня напряжения на конденсаторе в цепи постоянного тока.

Большой интерес представляют трехфазные активные ККМ, сконструированные на базе трехфазного инвертора, работающего в обратном режиме. ККМ данного типа широко применимы в электроприводах, источниках питания, частотных преобразователях и другом промышленном электрическом оборудовании.

В ходе исследовательской работы создана имитационная модель трехфазной сети с ККМ в среде Matlab/Simulink. Результаты проведённого моделирования подтверждают адекватность построенной модели в режиме пассивного выпрямителя (без использования ККМ), а также эффективность работы ККМ для улучшения гармонического состава

тока и поддержания заданного уровня напряжения на конденсаторе. При активной нагрузке с помощью ККМ  $\cos\varphi$  сети был увеличен с 0,75 до 0,999, а уровень напряжения на конденсаторе – с 495 до 650 В; при реактивной нагрузке с помощью ККМ  $\cos\varphi$  был увеличен с 0,71 до 0,998, а уровень напряжения на конденсаторе – с 490 до 650 В.

После анализа полученных результатов можно констатировать, что:

1. В электроприводе с ККМ установленная полная мощность трансформатора питающей сети по сравнению с сетью без ККМ снижается на 35 %, соответственно уменьшаются сечения подводных кабелей и расход электроэнергии [2].
2. Ток потребления при использовании ККМ полностью соответствует требованиям ГОСТ по эмиссии низкочастотных гармонических составляющих в питающую сеть [8].

### Выводы

1. Спроектирован активный корректор коэффициента мощности, составлена его структурная схема и имитационная модель в среде Mathworks Matlab/Simulink.
2. Проведено имитационное моделирование работы активного корректора коэффициента мощности в трехфазной сети с активной и реактивной нагрузкой.
3. По результатам проведенного моделирования показана адекватность построенных моделей, доказана эффективность использования активного корректора коэффициента мощности в трехфазных сетях для компенсации реактивной энергии.

### СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Зевеке Г.В., Ионкин П.А., Нетушил А.В., Страхов С.В. Основы теории цепей. – 5-е изд., перераб. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 528 с.
2. Кочкин В. Реактивная мощность в электросетях. Технологии управляемой компенсации // Новости электротехники. – 2007. – № 3. – С. 34–44.
3. Геворкян М.В. Современные компоненты компенсации реактивной мощности для низковольтных сетей. – М.: Издат. дом «Додэка-XXI», 2003. – 64 с.
4. Кудрин Б.И. История компенсации реактивной мощности // Электрика. – 2001. – № 6. – С. 26–29.
5. Дабровски К. Компенсация РМ – интеллектуальный регулятор // Энерго-Инфо. – 2007. – № 2. – С. 2–12.
6. Овчинников Д.А., Кастров М.Ю., Лукин А.В., Малышков Г.М. Трехфазный выпрямитель с коррекцией коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. – 2002. – Вып. 6. – С. 12–39.
7. ГОСТ 13109-97 (МЭК 61000-3-2-95). – Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
8. Краснов И.Ю., Черемисин В.Н. Активный корректор коэффициента мощности // Itech. Журнал интеллектуальных технологий. – 2008. – № 11. – С. 24–27.
9. Гутников В.С. Фильтрация измерительных сигналов. – Л.: Энергоатомиздат, 1990. – 192 с.
10. Дьяконов В., Круглов В. MATLAB. Анализ, идентификация и моделирование систем. – СПб.: Питер, 2002. – 444 с.
11. Гамазин С., Пупин В., Ивкин О. Новые устройства обеспечения надежности электроснабжения и качества электроэнергии потребителей // Рынок электротехники. – 2006. – № 2. – С. 21–35.
12. Овчинников Д.А., Кастров М.Ю. Пассивные корректоры коэффициента мощности // Практическая силовая электроника. – 2003. – № 9. – С. 12–15.

Поступила 07.04.2009 г.