

КОРРЕКТОР КОЭФФИЦИЕНТА МОЩНОСТИ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНОЙ ЭЛЕКТРОСЕТИ НА БАЗЕ МНОГОУРОВНЕВОГО КАСКАДНОГО ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ С ШИМ НА ВЫСОКОЙ ЧАСТОТЕ

Б.Ю. Алтунин, М.Н. Слепченко, И.А. Карнавский
г. Нижний Новгород, НГТУ

В статье рассмотрены принципы компенсации реактивной мощности и мощности искажений в высоковольтной распределительной электросети с помощью корректора коэффициента мощности, построенного на базе многоуровневого каскадного преобразователя с ШИМ на высокой частоте. Представлена его математическая модель, составленная в синхронной системе dq-координат, ориентированной по вектору напряжения питающей сети, изложены основные принципы построения системы управления и приведены результаты имитационного моделирования в программном комплексе Matlab/Simulink.

На современном этапе развития отечественной энергетики необходим форсированный переход к энергосберегающим технологиям – различным способам снижения потерь электрической энергии, сокращающим потребность в вводе новых генерирующих мощностей и требуемом для них органическом топливе.

По утверждению технической инспекции РАО ЕЭС России [1] в настоящее время имеет место факт повсеместной загрузки линий электропередачи распределительных сетей потоками реактивной мощности в диапазоне 80 % и более от величины активной мощности. Снижение потерь по Холдингу на 1 % только за счет компенсации реактивной мощности на шинах нагрузок высвобождает в часы зимнего максимума нагрузок для потребителей около 1500 МВт, на 2 % – около 3000 МВт, на 3 % – около 4500 МВт и т.д.

Уменьшение в распределительных сетях балластных потоков реактивной мощности за счет ее компенсации у потребителя или на конечных подстанциях:

а) позволит (при наличии в энергоузлах тех же объемов активной мощности и той же пропускной способности сетей) снабжать дополнительных потребителей, то есть позволит обеспечить в определенной степени прирост потребления активной мощности без увеличения ее генерации в узле (регионе) или без увеличения ее перетока из других энергосистем;

б) позволит самому потребителю прирастить свои производственные мощности без увеличения потребления из сети;

в) позволит присоединить потребителя там, где ранее было отказано, или присоединить новых потребителей, там, где компенсация реактивной мощности позволит это сделать;

г) улучшит технико-экономическую эффективность систем электроснабжения как электросетевых компаний, так и самих потребителей;

д) повысит устойчивость электроэнергетических систем, систем электроснабжения и нагрузки потребителей при снижении и провалах напряжения в сети.

22 марта 2007 в Минюсте РФ был зарегистрирован первый из документов, регламентирующих отношения субъектов электроэнергетики в области компенсации реактивной мощности. Это приказ министра промышленности и энергетики РФ В.Б. Христенко №49 от 22.02.2007 года «О порядке расчета значений соотношения потребления активной и реактивной мощности для отдельных энергопринимающих устройств (групп энергопринимающих устройств) потребителей электрической энергии, применяемых для определения обязательств сторон в договорах об оказании услуг по передаче электрической энергии (договорах энергоснабжения)» [2]. Данным приказом утверждается «Порядок расчета значений соотношения потребления...». В соответствии с «Порядком...» для всех потребителей электрической энергии, присоединенная мощность энергопринимающих устройств которых более 150 кВт (за исключением граждан-потребителей, использующих электрическую энергию для бытового потребления, и приравненных к ним в соответствии с нормативными правовыми актами в области государственного регулирования тарифов групп (категорий) потребителей (покупателей), в том числе многоквартирных домов, садоводческих, огороднических, дачных и прочих некоммерческих объединений граждан) рассчитывается значение соотношения потребления активной и реактивной мощностей. Так предельные значения коэффициента реактивной мощности, потребляемой в часы наибольших суточных нагрузок электрической сети, для потреби-

телей, присоединенных к сетям напряжением ниже 220 кВ, определяются в соответствии с нижеприведённой таблицей [2].

Простейшими устройствами компенсации реактивной мощности являются нерегулируемые конденсаторные батареи (КБ) постоянной мощности и регулируемые релейные или статические тиристорные компенсаторы (СТК) [3]. Однако, для потребителей с изменяющейся потребляемой реактивной мощностью, постоянно включенные КБ не приемлемы, а релейные КБ и СТК при их возможности регулирования величины компенсируемой реактивной мощности имеют ряд существенных недостатков [3], к основным из которых можно отнести возможность возникновения резонансных явлений в питающей сети и перегрузку КБ высшими гармониками тока.

В настоящее время широко распространёнными и перспективными устройствами компенсации реактивной мощности являются статические компенсаторы (СТАТКОМ) [4]. На рис. 1 представлена структурная схема стандартного СТАТКОМа, состоящего из трёхфазного преобразователя на запираемых тиристорах VS с обратными диодами VD , емкостного накопителя в цепи постоянного тока C_n и выходных фильтрующих дросселей L_f на стороне переменного тока.

Принцип действия СТАТКОМа заключается в регулировании напряжения на фильтрующих дросселях L_f как по амплитуде, так и по фазе за счёт изменения напряжения на выходе тиристорного ШИМ-преобразователя. Для перевода СТАТКОМа в емкостной режим работы $+Q$ (рис. 2) (режим генерации реактивной мощности),

Предельные значения коэффициента реактивной мощности

Положение точки присоединения потребителя к электрической сети	$\tan \phi$
напряжением 110 кВ (154 кВ)	0,5
напряжением 35 кВ (60 кВ)	0,4
напряжением 6–20 кВ	0,4
напряжением 0,4 кВ	0,35

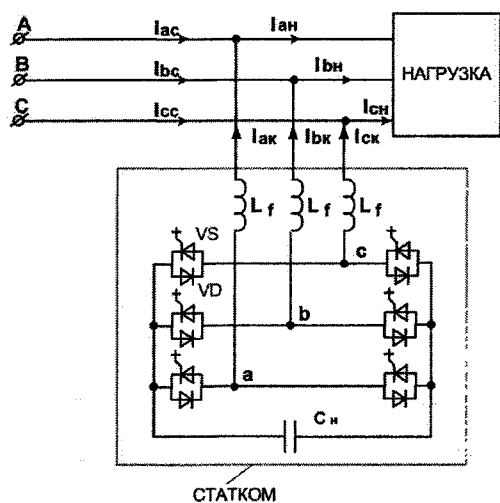


Рис. 1. Структурная схема СТАТКОМа

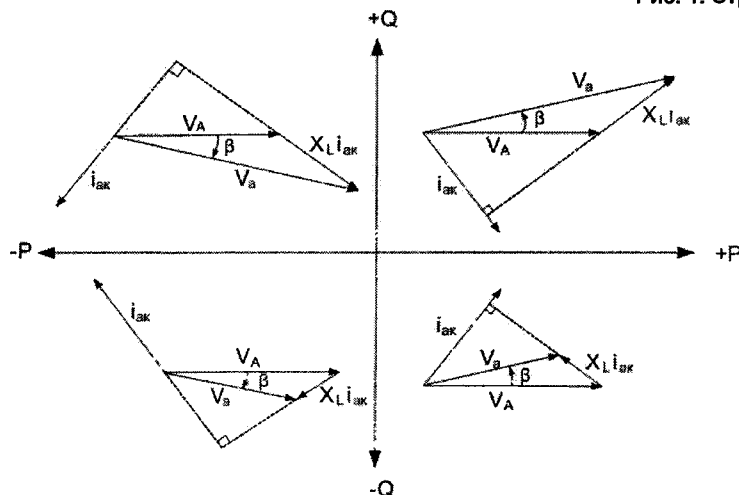


Рис. 2. Векторная диаграмма напряжений и токов СТАТКОМа

необходимо, чтобы величина выходного напряжения преобразователя V_a по амплитуде была больше напряжения сети V_A . Напротив, при выходном напряжении преобразователя меньше сетевого СТАТКОМ потребляет реактивную мощность, т.е. работает в индуктивном режиме $-Q$. На рис. 2 представлена векторная диаграмма напряжений и токов СТАТКОМ в четырёх квадрантах PQ -области.

«На практике» не существует идеальных систем, т.е. потери активной мощности присутствуют всегда. Если не учитывать их влияние при разработке СТАТКОМа, то заряд на конденсаторе будет постепенно снижаться, что в результате приведёт к потере устойчивости всей системы. Поэтому для регулирования и поддержания напряжения на конденсаторе даже при чисто индуктивном или чисто емкостном режиме работы СТАТКОМа, необходимо поддерживать незначительный угол расфазировки β (см. рис. 2) основной гармоники выходного модулируемого напряжения преобразователя и напряжения питающей сети. Это обеспечивает потребление СТАТКОМом из сети активной мощности, необходимой для компенсации потерь и регулирования напряжения на емкостном накопителе.

Основными достоинствами СТАТКОМа являются [4]:

- возможность генерирования и регулирования потока реактивной мощности как емкостного, так и индуктивного характера при одном типе накопителя энергии на стороне постоянного тока;
- синусоидальная форма тока во всём диапазоне регулирования мощности;
- наивысшее из всех существующих компенсаторов быстродействие и наилучшие удельные массогабаритные показатели.

Максимальная величина компенсируемой СТАТКОМом реактивной мощности для выше-

приведённого схемного решения (см. рис. 1) ограничена допустимыми значениями напряжения и тока запираемых тиристоров и обратных диодов. Для использования СТАТКОМа в распределительных сетях с напряжением 6–10 кВ и выше необходимо применение многомодульных или многоуровневых схем преобразователей. В этом случае авторами предлагается использование каскадной многоуровневой топологии преобразователя с зонной ШИМ на высокой частоте. На рис. 3 представлена функциональная схема трёхуровневого корректора коэффициента мощности (ККМ), выполненного на однофазных мостовых преобразователях с емкостными накопителями в цепи постоянного напряжения. При высоком напряжении питающей сети ККМ, составленный из стандартных однофазных мостовых преобразователей, соединённых последовательно, позволяет использовать в своём составе IGBT транзисторы на номинальное напряжение, соответствующее одному уровню выходного напряжения. Количество модулей, таким образом, определяется максимальным выходным напряжением ККМ.

Математический анализ исследуемой схемы проводился в синхронной системе $dq0$ -координат, ориентированной по вектору напряжения питающей сети. Было получено описание ККМ для усредненной (1), (2) и малосигнальной (3), (4) математических моделей:

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

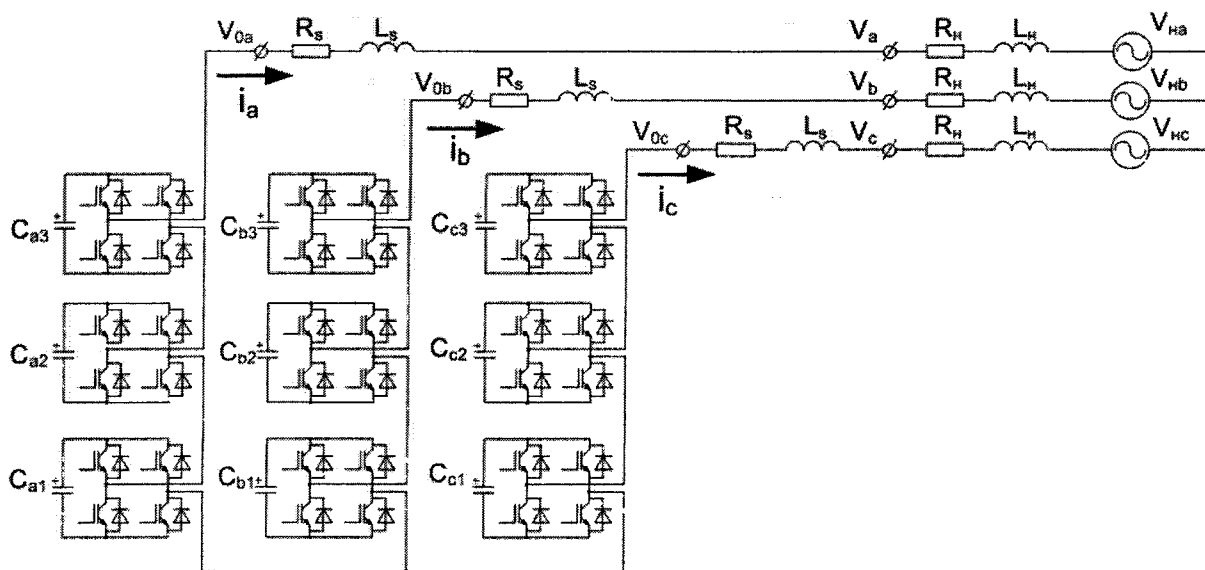


Рис. 3. Трёхуровневый корректор коэффициента мощности с зонной ШИМ на высокой частоте

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

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

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

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. По математическому описанию ККМ были получены передаточные функции ток – коэффициент заполнения, перекрестная передаточная функция ток – коэффициент заполнения, напряжение на конденсаторе – ток (5)–(8), на базе которых проводилось исследование устойчивости

работы преобразователя и разработка корректирующих звеньев.

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

$$W_{iqq} = \frac{NE(R_s + pL_s)}{L_s^2 p^2 + 2L_s R_s p + (R_s^2 + \omega^2 L_s^2)}; \quad (6)$$

$$W_{iqd} = \frac{-NE\omega L_s}{L_s^2 p^2 + 2L_s R_s p + (R_s^2 + \omega^2 L_s^2)}; \quad (7)$$

$$W_{Eidj} = -\left(\frac{Y_{dj} L_s p + Y_{qj} L_s \omega + Y_{dj} R_s}{3p^2 CL_s + 3pCR_s + Y_{dj} Y_{qj} N} \right). \quad (8)$$

Проведенный анализ имитационной модели, составленной по полученному описанию в программном комплексе Simulink, показал стабильную работу ККМ в статических и динамических режимах. Некоторые результаты имитационного моделирования представлены на рис. 4.

Основываясь на математической и имитационной моделях, была разработана структурная схема системы управления ККМ, представленная на рис. 5. Схема содержит блоки: преобразования Парка (прямое и обратное), синхронизации с сетью посредством ФАПЧ и блок ШИМ. Благодаря блоку преобразования Парка все поступающие с датчиков напряжений и токов сигналы реального времени перенесены в DQ0-координатное пространство. ФАПЧ необходим для синхронизации системы DQ0-координат с напряжением питающей сети. Выходными данными блока являются

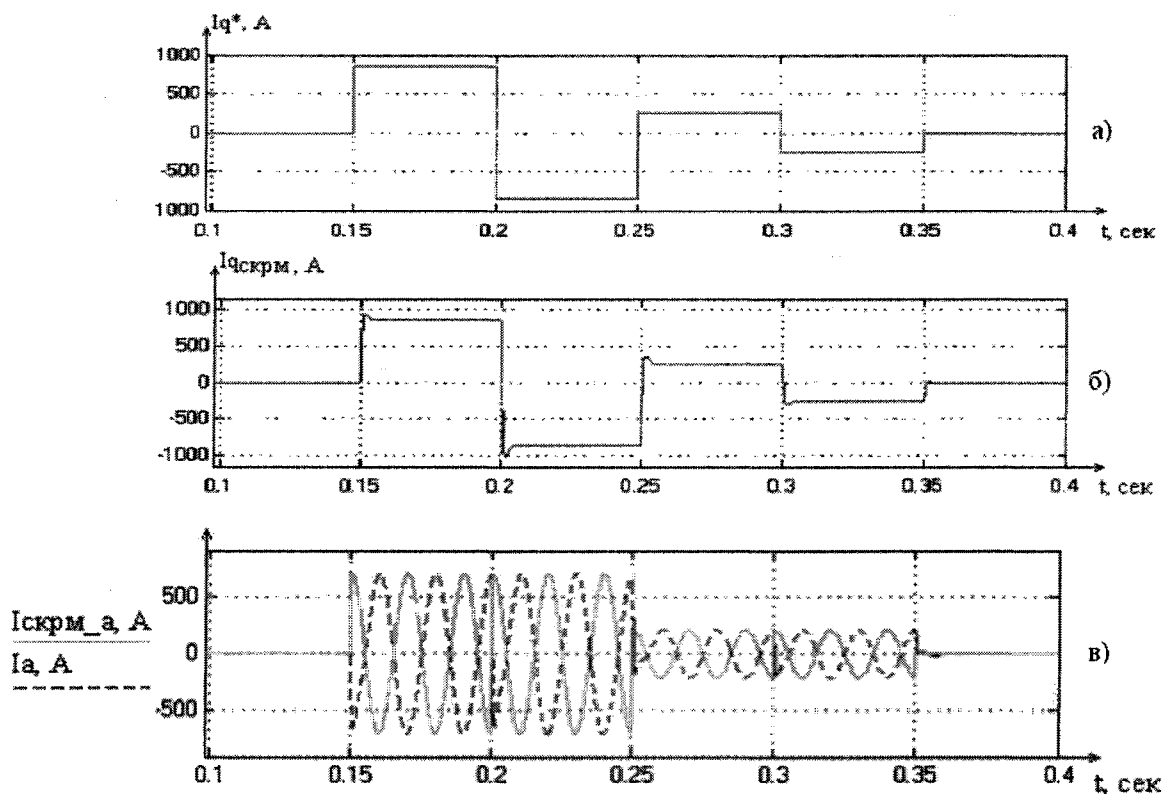


Рис. 4. Временные диаграммы: (а) реактивного тока нагрузки и (б) реактивного тока корректора (q-составляющая), (в) тока нагрузки и ККМ фазы А

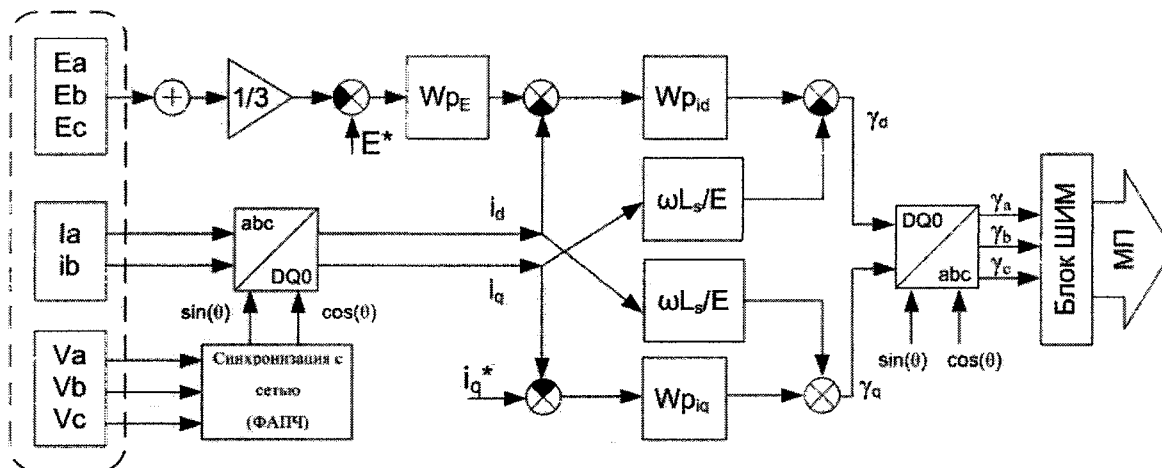


Рис. 5. Структурная схема системы управления ККМ

синусная и косинусная функции, однозначно определяющие угол положения вектора трехфазного напряжения, являющегося базисным для системы управления. Блок ШИМ определяет состояние ключевых элементов.

Вопросу компенсации мощности искажений и её первоисточнику — высшим гармоникам тока в распределительных сетях промышленных предприятий — должно уделяться самое серьёзное внимание. Связано это с весьма вредным влиянием, которое оказывают высшие гармоники тока на работу электрооборудования. Широко распространённым способом компенсации мощности искажений является применение пассивных фильтров (ПФ). Настраиваемые ПФ могут вызвать резонансные явления в системе, которые, в свою очередь, приводят к дополнительным искажениям тока и напряжения. Наличие большого количества пассивных элементов увеличивает потери в ПФ и в системе электропитания в целом. С увеличением количества компенсируемых гармоник растут массогабаритные показатели и затраты на изготовление ПФ.

Применение зонной ШИМ на ВЧ в разрабатываемом ККМ позволяет не только регулировать с высокой степенью точности компенсирующую реактивную мощность, но и генерировать им в питающую сеть ток, в гармоническом составе ко-

торого кроме первой гармоники, соответствующей реактивной составляющей, присутствуют высшие гармоники, равные по амплитуде, но противоположные по фазе высшим гармоническим тока сети.

На рис. 6 представлена структурная схема блока определения опорного тока ККМ в синхронной системе dq -координат, ориентированной по вектору напряжения питающей сети. В данном случае, d -составляющая компенсационного тока I_{dk}^* содержит в своём составе переменную d -составляющую некомпенсированного тока питающей сети $I_{ds,AC}$ и необходимую для поддержания и регулирования напряжения на ёмкостных накопителях составляющую I_{dc} . Неактивная q -составляющая компенсационного тока I_{qk}^* полностью соответствует q -составляющей некомпенсированного тока I_{qs} , и содержит постоянную реактивную составляющую, а также переменную, соответствующую высшим гармоническим составляющим.

В программном комплексе Matlab/Simulink была составлена обобщённая математическая модель силовой части ККМ и его системы управления. На рис. 7 представлены результаты имитационного моделирования — временные диаграммы а) некомпенсированного тока питающей сети, содержащего как реактивную составляющую, так и высшие гармони-

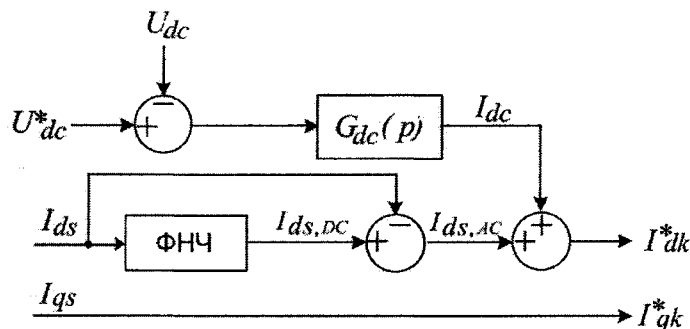


Рис. 6. Структурная схема блока определения опорных токов

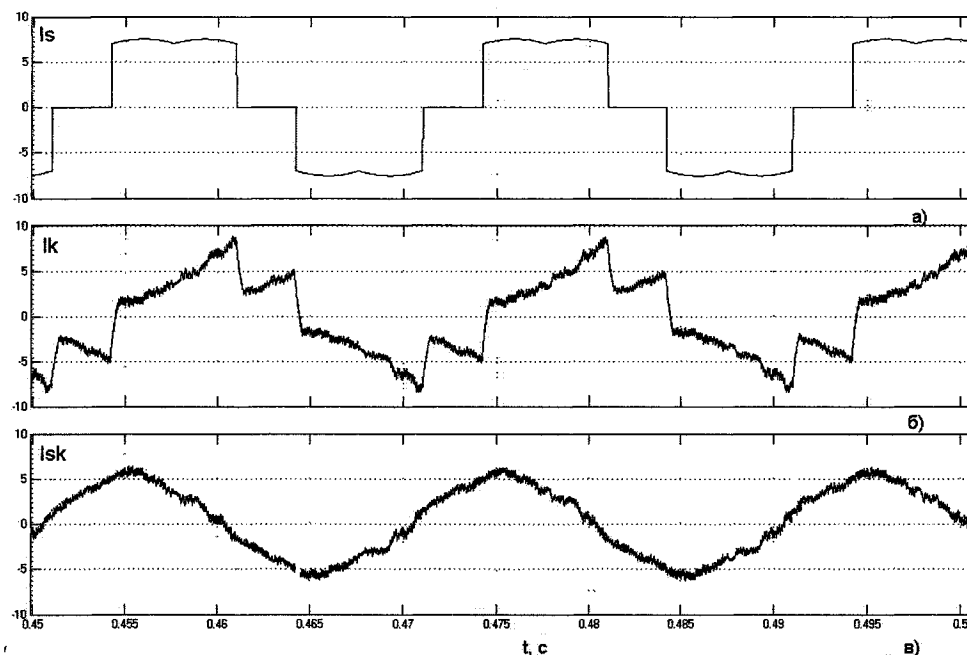


Рис. 7. Результаты имитационного моделирования ККМ

ки; б) компенсационного тока ККМ и в) скомпенсированного тока питающей сети.

Анализ проведенных исследований ККМ в распределительной электросети показал практически нулевой фазовый сдвиг между током и напряжением сети, низкое содержание в спектре тока питающей сети гармоник до 10 порядка включительно при различном характере нагрузки, а также устойчивую работу ККМ в установившихся и динамических режимах.

Литература

1. Миляков, А.В. Реактивная мощность и её значение в надёжности и экономике систем электро-

снабжения/ А.В. Миляков// Официальная страница ОАО «Алтайэнерго». – <http://www.altaienergo.ru/>.

2. Министерство промышленности и энергетики РФ. Приказ от 22 февраля 2007 г. № 49. Зарегистрировано в Минюсте РФ 22 марта 2007 г. № 9134.

3. Глинттерник, С.Р. Тиристорные преобразователи со статическими компенсирующими устройствами/ С.Р. Глинттерник. – Л.: Энергоатомиздат, 1988.

4. Розанов, Ю.К. Основные этапы развития и современное состояние силовой электроники/ Ю.К. Розанов// Электричество. – 2005. – №7. – С. 52–61.

Алтуний Борис Юрьевич, заведующий кафедрой «Теоретическая и общая электротехника» Нижегородского государственного технического университета, доктор технических наук, профессор. Окончил электротехнический факультет Уральского государственного технического университета (УПИ) в 1962 году. Защитил докторскую диссертацию по теме «Тиристорные переключающие устройства регулирования под нагрузкой трансформаторного оборудования электротехнологических установок» в 1997 году в Московском энергетическом институте (Техническом университете).

Слепченков Михаил Николаевич, доцент кафедры «Промышленная электроника», кандидат технических наук Нижегородского государственного технического университета. Окончил факультет автоматики и электромеханики Нижегородского государственного технического университета в 2001 году. Защитил кандидатскую диссертацию по теме «Комплексное устройство компенсации реактивной мощности и мощности искажений в системах питания с выпрямительной нагрузкой» в 2005 году в Нижегородском государственном техническом университете.

Карнавский Иван Александрович, аспирант Нижегородского государственного технического университета. Окончил факультет автоматики и электромеханики Нижегородского государственного технического университета в 2007 году. Защитил магистерскую диссертацию по теме «Многоуровневый статический компенсатор реактивной мощности с ШИМ на высокой частоте» в 2007 году в Нижегородском государственном техническом университете.