

УДК 621.314.2.38

Б.Ю. Алтунин, И.А. Карнавский, А.А. Кралин

**ИМИТАЦИОННАЯ МОДЕЛЬ СИСТЕМЫ УПРАВЛЕНИЯ СТАТКОМ  
ДЛЯ СИММЕТРИРОВАНИЯ СЕТЕВЫХ ТОКОВ**

Нижегородский государственный технический университет им. Р.Е.Алексеева

Рассмотрена проблема асимметрии напряжений в сетях электроснабжения. Предложено использование преобразовательного устройства СТАТКОМ для создания устройства симметрирования токов сети и разработана система управления с использованием ШИМ напряжений и токов. Приведены результаты моделирования предложенного компенсатора токов несимметрии. Работа выполнена при финансовой поддержке Министерства образования и науки Российской Федерации (гос. контракт №16.526.12.6076 от 11.10.2011).

*Ключевые слова:* несимметрия напряжений, несимметрия токов реактивная мощность, СТАТКОМ.

ГОСТ 13109-97 регламентирует практически все параметры электроэнергии для обеспечения функционирования любого электрооборудования. Широко ведутся разработки в области компенсации реактивной мощности электрооборудования, стабилизации напряжения и обеспечения бесперебойной работы электрооборудования, активной и пассивной фильтрации токов высших гармоник. Одним из важных параметров электроэнергии является несимметрия напряжения. ГОСТ13109-97 устанавливает значения коэффициентов несимметрии напряжения по обратной  $K_{2U}$  и нулевой  $K_{0U}$  последовательностям - нормально допустимое 2% и предельно допустимое 4%. [1]

Несимметрия напряжений происходит только в трёхфазной сети и обусловлена неравномерным распределением нагрузок по фазам. Источниками несимметрии напряжений являются: дуговые сталеплавильные печи, тяговые подстанции переменного тока, электросварочные машины, однофазные электротермические установки и другие однофазные, двухфазные и несимметричные трёхфазные потребители электроэнергии, в том числе бытовые. Несимметрия напряжения негативно сказывается на работе электрооборудования и системы электроснабжения в целом. [2, 3]

Влияние несимметрии напряжений на работу электрооборудования: [2, 3]

1. В электрических сетях возрастают потери электроэнергии от дополнительных потерь в нулевом проводе, ухудшается функция защитных устройств.

2. Однофазные, двухфазные потребители и разные фазы трёхфазных потребителей электроэнергии работают не на номинальных напряжениях.

3. Ухудшаются режимы работы многофазных вентильных выпрямителей: значительно увеличивается пульсация выпрямленного напряжения, ухудшаются условия работы системы импульсно-фазового управления тиристорных преобразователей.

4. В электродвигателях, кроме отрицательного влияния несимметричных напряжений, возникают магнитные поля, вращающиеся встречно вращению ротора. Общее влияние несимметрии напряжений на электрические машины, включая трансформаторы, выливается в значительное снижение срока их службы.

Например, электрические печи чувствительны к отклонениям напряжения. Понижение напряжения электродуговых печей, например, на 7 % приводит к удлинению процесса плавки стали в 1,5 раза. Повышение напряжения выше 5% приводит к перерасходу электроэнергии.

Отклонения напряжения также отрицательно влияют на работу электросварочных

машин: например, для машин точечной сварки при изменении напряжения на 15% получается 100 % брак продукции.

Методы борьбы с несимметрией напряжений;

- 1) равномерное распределение нагрузки по фазам.
- 2) применение симметрирующих устройств.

Равномерное распределение нагрузки по фазам не всегда возможно, например в условиях производства оборудование может работать независимо друг от друга и создавать переменную неравномерную загрузку сети в течение дня. Использование симметрирующих устройств является более гибким и универсальным способом устранения негативного влияния несимметрии напряжений.

В рамках проекта в НГТУ им. Р.Е.Алексеева проводится исследовательская работа по анализу и исследованию режимов работы устройства симметрирования на математических и имитационных моделях, выполненного на основе трехфазного мостового инвертора рис.1. Исследуемое устройство представляет собой трехфазный мостовой инвертор, подключенный через фазные реакторы с сетью в точке где наблюдается неравномерная загрузка сети по фазам. Емкостной накопитель в цепи постоянного тока служит как источник напряжения для формирования выходного напряжения и обмена мощностью между фазами для симметрирования токов.

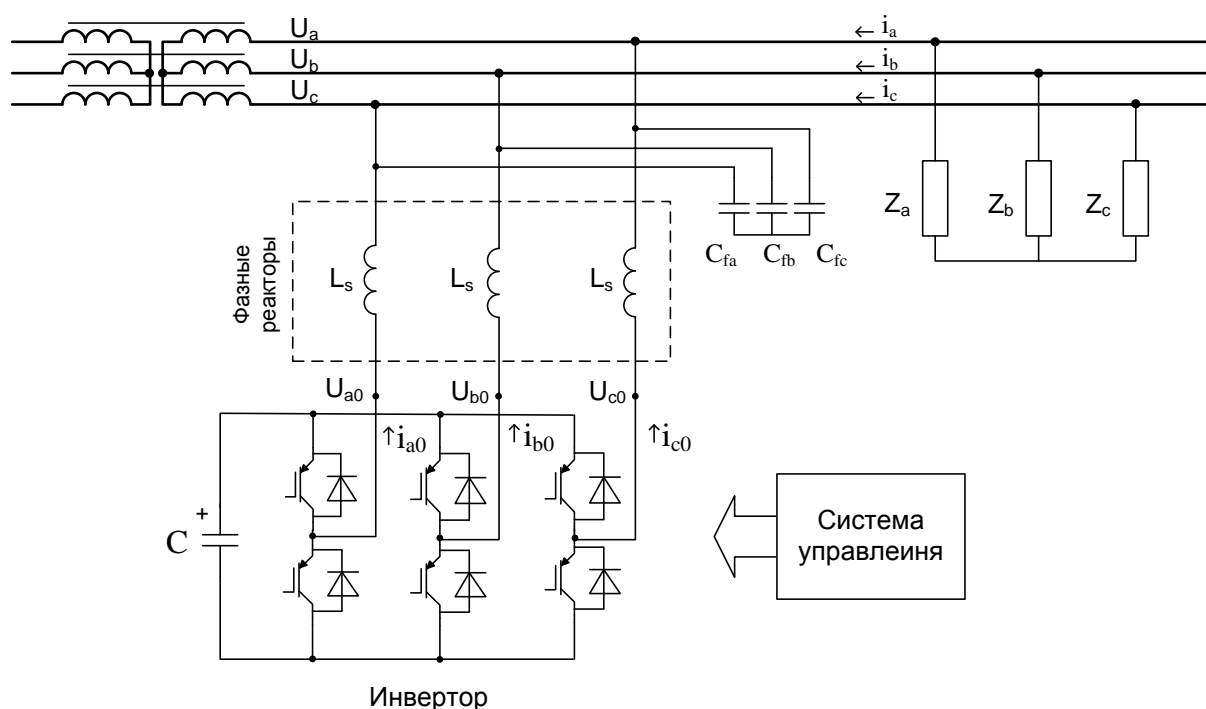


Рис. 1. Схема симметрирования сетевых токов

Аналитические выражения в синхронной системе координат представлены выражениями (1) и (2).

$$U_0^d(t) = U^d(t) + R_{L_s} \cdot i_0^d(t) - \omega L_s i_0^q(t) + L_s \frac{d}{dt} i_0^d(t), \quad (1)$$

$$U_0^q(t) = U^q(t) + R_{L_s} \cdot i_0^q(t) + \omega L_s i_0^d(t) + L_s \frac{d}{dt} i_0^q(t), \quad (2)$$

где  $R_{L_s}$  – активное сопротивление фазного реактора.

Аналитическое выражение, позволяющее построить систему управления, обеспечивающую симметрирование токов сети, представленное выражениями (1) и (2) в

синхронной системе координат, преобразуем к дискретному виду (3)-(6), учитывая, что время дискретизации  $T_s$ . Опорное расчетное напряжение на  $k$ -м шаге будет иметь задержку  $T_s$  из-за математических расчетов и смещения по фазе выходного сигнала, поэтому данную задержку следует скомпенсировать в регуляторе и системе управления [4].

$$U_0^d(k+1) = U^d(k) + R_{L_s} \cdot i_0^d(k) - \omega L_s i_0^q(k) + Kp(i^{d*}(k) - i_0^d(k)) + \Delta U_{Id}(k), \quad (3)$$

$$U_0^q(k+1) = U^q(k) + R_{L_s} \cdot i_0^q(k) + \omega L_s i_0^d(k) + Kp(i^{q*}(k) - i_0^q(k)) + \Delta U_{Iq}(k), \quad (4)$$

$$\Delta U_{Id}(k) = Ki(i^{d*}(k-1) - i_0^d(k-1)) + \Delta U_{Id}(k-1), \quad (5)$$

$$\Delta U_{Iq}(k) = Ki(i^{q*}(k-1) - i_0^q(k-1)) + \Delta U_{Iq}(k-1). \quad (6)$$

Полученные уравнения учитывают дискретность системы и единичную задержку распространения управляющего сигнала. Пропорционально-интегральные регулировочные дискретные звенья обеспечивают устойчивость системы.

Используя полученные уравнения, разработана система управления трехфазным мостовым инвертором с использованием синхронной системы координат. Несимметрия в синхронной системе координат соответствует удвоенной частоте сети, поэтому необходимо ввести полосовые фильтры для выделения полезных задающих сигналов несимметрии. Частота фильтра должна соответствовать 100 Гц, при частоте питающей сети 50 Гц. Структурная схема системы управления представлена на рис. 2.

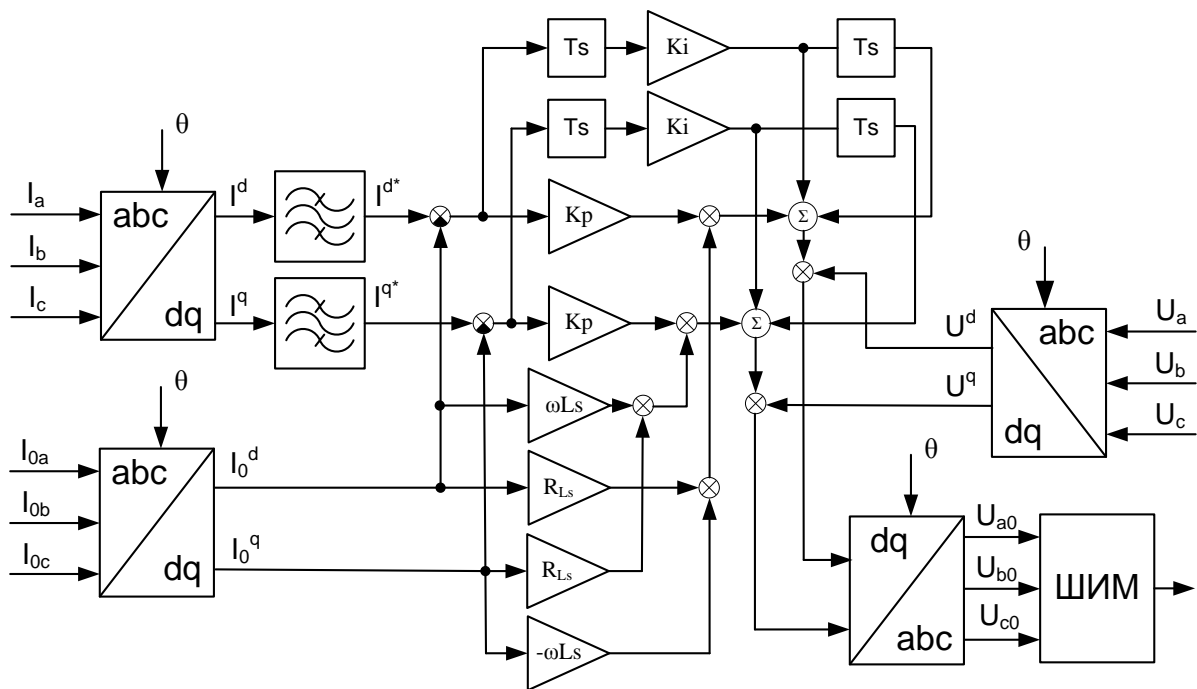


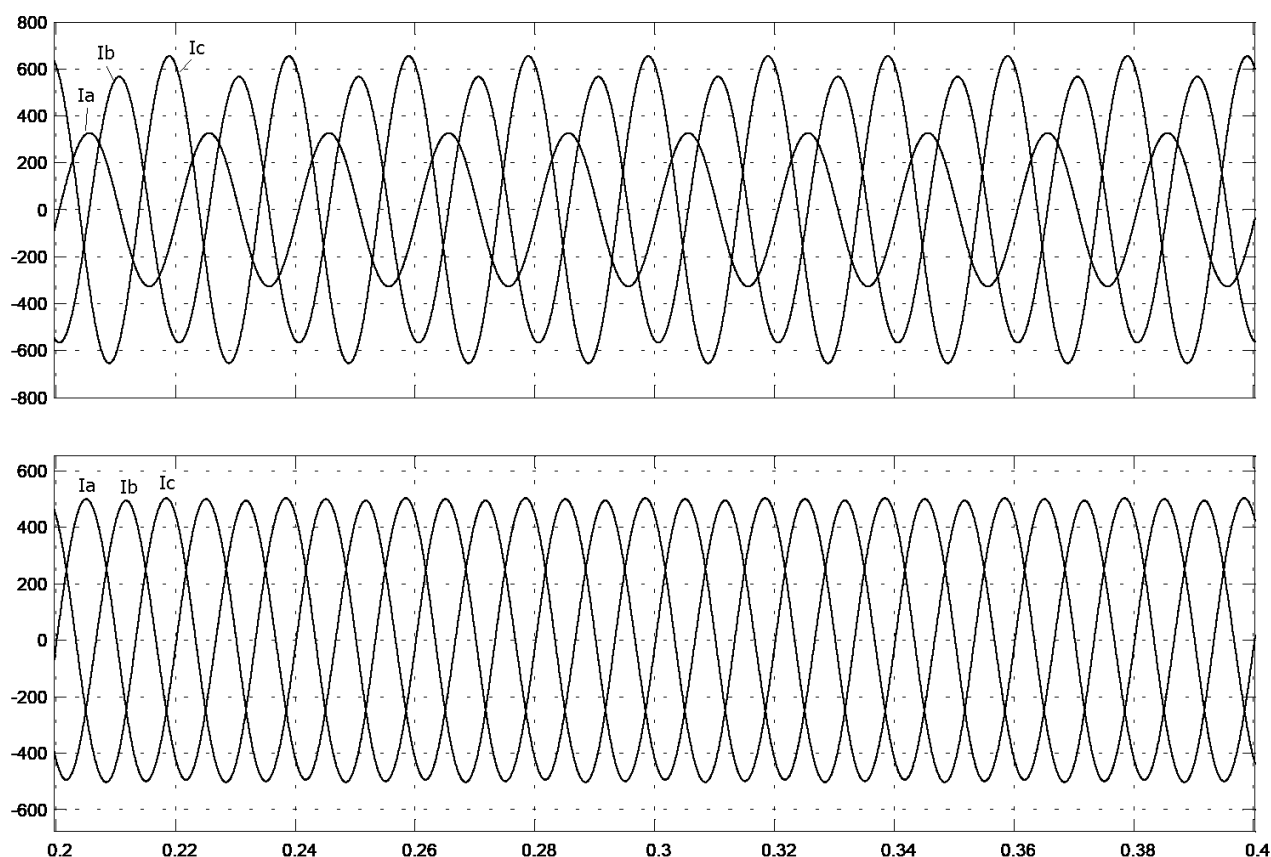
Рис. 2. Структурная блок-схема системы управления

Сигналы токов и напряжений, измеренные с помощью датчиков в точке подключения к сети, и симметрирующее устройство квантуются по времени с шагом дискретизации  $T_s$  и передаются на блоки преобразования из статической  $abc$  в синхронную  $dq$  систему координат. Математические вычисления выполняются в соответствии с уравнениями Парка. Так как рассматриваемая сеть трехпроводная, то нулевая последовательность отсутствует и не берется в расчет.

Полосовой фильтр, настроенный на 100 Гц, выполняет выделение полезной гармоники по двум составляющим  $d$  и  $q$ . Фильтр должен быть цифровым и учитывать фазовые и амплитудные искажения. Для расчетов сигналы с выхода фильтра берутся как

опорные. Блоки  $T_s$  выполняют задержку сигнала на один период квантования, тем самым выполняя функцию запоминания значения на один такт. Управления силовыми ключевыми элементами требуют управляющих импульсов, поэтому блок ШИМ преобразует трехфазные рассчитанные сигналы в импульсы.

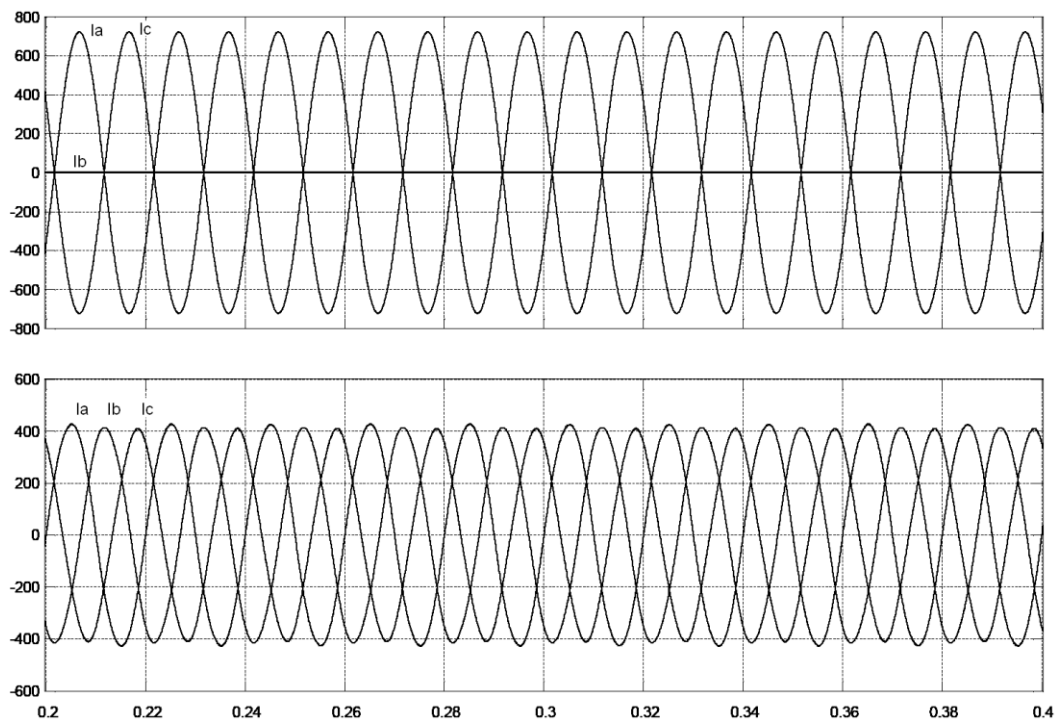
Используя полученную систему управления, исследована работа симметрирующего устройства в пакете Matlab/Simulink. На рис. 3 представлены временные характеристики сетевых токов несимметричной нагрузки без симметрирующего устройства и с использованием такого устройства, приведенного на рис. 1. Как видно из диаграммы, перераспределение токов по фазам выравнивает амплитуды фазных токов – симметрирует токи сети.



**Рис. 3. Временная диаграмма сетевых токов несимметричной нагрузки без симметрирующего устройства и с симметрирующим устройством**

Одним из тяжелых режимов работы трансформатора является неполнофазный режим, который также заметно влияет на несимметрию напряжений. Рассмотрим режим работы устройства при двухфазной нагрузке – фазы  $A$  и  $C$  имеют номинальную нагрузку активного характера, а нагрузка в третьей фазе  $B$  отсутствует, например, обрыв фазы. Симметрирующее устройство должно выполнять перераспределение токов между фазами для получения симметричных токов в фазах сети.

На рис. 4 представлена временная диаграмма токов неполнофазного режима без симметрирующего устройства, на которой фазные токи присутствуют только в двух фазах. Подключение предложенного симметрирующего устройства с разработанной системой управления выравнивает фазные токи по амплитуде и по фазе. Устраненная несимметрия токов в фазах не вызывает несимметрии напряжений на вторичной обмотке трансформатора. Как показали исследования, применение симметрирующего устройства в значительной степени снижает несимметричное распределение токов даже в аварийном режиме.



**Рис. 4. Временная диаграмма неполнофазного режим работы без симметрирующего устройства и с симметрирующим устройством**

По полученным аналитическим выражениям, описывающим симметрирующее устройство на основе трехфазного мостового инвертора, разработана система управления перераспределения фазных токов в синхронной dq системе координат. Эффективное снижение несимметрии токов сети устраняет несимметрию напряжений питающей сети, вызванную несимметричным потреблением фазных токов.

#### Библиографический список

1. ГОСТ 13109-97 “Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения”
2. Железко, Ю. С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии / Ю. С. Железко. – М.: ЭНАС, 2009.
3. Шидловский, А.К. Высшие гармоники в низковольтных электрических сетях / А.К. Шидловский, А.Ф. Жаркин. – Киев: Наук. думка, 2005.
4. Fang Lin Luo, Hong Ye, Muhammad Rashid / Digital Power Electronics and Applications / Elsevier (USA), 2005.

Дата поступления  
в редакцию 09.10.2012

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

#### **SIMULATION MODEL OF STATCOM'S SYSTEM CONTROL FOR BALANCING THE CURRENT NETWORK**

This article presents the problem of voltage imbalance in supply networks. The STATCOM devices can balance current and voltage network. The control system developed using the PWM voltage and current. Simulation results of the proposed compensator current unbalance.

*Key words:* voltage unbalance, current unbalance reactive power STATCOM.