

Научная статья  
 УДК 631.362.34:[621.85.052:62-189.2]  
 doi:10.35694/YARCX.2022.59.3.013

## МОДЕЛИРОВАНИЕ УСТРОЙСТВА КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ СТАТКОМ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКОЙ СИСТЕМЕ

**Владимир Викторович Шмигель<sup>1</sup>, Артем Сергеевич Угловский<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup>Ярославская государственная сельскохозяйственная академия, Ярославль, Россия

<sup>1</sup>v.shmigel@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-7265-831X

<sup>2</sup>a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID0000-0002-5678-4786

**Реферат.** В данной статье рассмотрена функциональная модель СТАТКОМ (статический синхронный компенсатор) и её применение в системе энергоснабжения. СТАТКОМ может обеспечивать как ёмкостную, так и индуктивную компенсацию, управлять своим выходным током в номинальном максимальном ёмкостном или индуктивном диапазоне независимо от величины напряжения системы переменного тока. Рассматриваются системы управления СТАТКОМ, предназначенные для сложных задач, таких как компенсация нелинейных нагрузок. Представлена конструкция системы управления при подключении СТАТКОМ к несимметричным электрическим сетям (активного и активно-индуктивного характера). В программе Simulink представлено несколько функциональных блоков управления СТАТКОМ, который также известен как управляемый преобразователь источника напряжения (VSC), основанный на использовании пропорционально-интегральных (ПИ) регуляторов. Проведён анализ алгоритма работы системы электроснабжения с напряжением сети 500 кВ и включения различных потребителей.

*Ключевые слова:* СТАТКОМ, реактивная мощность, ёмкостная компенсация, индуктивная компенсация, нелинейная нагрузка, несимметричная электрическая сеть

## SIMULATION OF POWER FACTOR CORRECTION UNIT STATCOM IN ELECTRIC POWER SYSTEM

**Vladimir V. Shmigel<sup>1</sup>, Artem S. Uglovskiy<sup>2</sup>**

<sup>1, 2</sup>Yaroslavl State Agricultural Academy, Yaroslavl, Russia

<sup>1</sup>v.shmigel@yarcx.ru, ORCID 0000-0001-7265-831X

<sup>2</sup>a.uglovskii@yarcx.ru, ORCID0000-0002-5678-4786

**Abstract.** This article presents the functional model of STATCOM (static synchronous compensator) and its application in the power supply system. STATCOM can provide both capacitive and inductive compensation, control its output current in the rated maximum capacitive or inductive range regardless of the voltage value of the AC system. STATCOM control systems designed for complex tasks such as nonlinear load compensation are considered. The design of the control system when connecting STATCOM to asymmetric electric networks (active and active-inductive) is presented. The Simulink program presents several functional control units of STATCOM, which is also known as the controlled voltage source converter (VSC), based on the use of proportional-integral (PI) regulators. An analysis of the algorithm of operation of the power supply system with a network voltage of 500 kV and inclusion of various consumers was carried out.

*Keywords:* STATCOM, reactive power, capacitive compensation, inductive compensation, nonlinear load, asymmetric electric network

**Введение.** Стабильность напряжения сети играет важную роль для обеспечения работы энергосистемы при возникновении больших помех и неисправностей. Роль СТАТКОМ заключается в решении проблем, таких как провал или скачок напряжения, которые обычно возникают в энергосистеме в условиях высокого и низкого напряжения.

Для уменьшения влияния переходной устойчивости и колебаний, создаваемых в энергосистемах во время и после отказов, в системе используются контроллеры гибких систем передачи переменного тока (FACTS) и стабилизаторы энергосистемы. Контроллеры FACTS способны эффективно управлять состоянием сети, и эту функцию FACTS можно использовать для улучшения стабильности напряжения, устойчивого состояния и переходной стабильности сложной энергосистемы. Это позволяет увеличить использование существующей сети ближе к её тепловой нагрузочной способности и таким образом избежать необходимости строительства новых линий электропередачи. В данной статье для исследования используются модели векторных типов SVC (инвертор с питанием от источника напряжения) и СТАТКОМ.

Статический синхронный компенсатор – это шунтирующее устройство семейства гибких систем передачи переменного тока, использующее силовую электронику для управления потоком мощности и повышения устойчивости к переходным процессам в электрических сетях. СТАТКОМ регулирует напряжение на своих выводах, контролируя количество реактивной мощности, вводимой в энергосистему или потребляемой ею.

При низком напряжении в системе СТАТКОМ генерирует реактивную мощность (ёмкостный СТАТКОМ). Когда напряжение в системе высокое, он уменьшает реактивную мощность (индуктивный СТАТКОМ) [1; 2].

Изменение реактивной мощности выполняется с помощью преобразователя напряжения (VSC), подключённого на вторичной стороне трансформатора связи. VSC использует силовые электронные устройства с принудительной коммутацией (GTO, IGBT или IGCT).

Цель данной статьи – рассмотреть системы управления СТАТКОМ, предназначенные для сложных задач, таких как компенсация нелинейных нагрузок; провести моделирование системы управления при подключении СТАТКОМ к несимметричным электрическим сетям (активный и активно-индуктивный характер).

СТАТКОМ – это устройство компенсации реактивной мощности (Q), которое шунтируется с системами передачи и распределения переменного тока. Базовая топология основана на преобразователях источника напряжения, где новые топологии состоят из коммутационных устройств, в то время как последние СТАТКОМ включают переключатели с линейной коммутацией, такие как тиристоры. СТАТКОМ, способный генерировать или поглощать реактивную мощность для компенсации линии передачи, расположен между генераторами и нагрузкой [1–3]. Этот принцип ра-

боты СТАТКОМ позволяет ему действовать и как источнику, и как нагрузке для линии передачи. Кроме того, СТАТКОМ могут заменить статические компенсаторы VAr (SVC) в распределительных системах [1; 3].

**Методика.** Для моделирования устройства компенсации реактивной мощности используется библиотека SimPowerSystems. Программа позволяет устанавливать различные параметры содержащихся в ней блоков электротехнических элементов: трансформаторов, ЛЭП, асинхронных двигателей, СТАТКОМ, преобразователей и т.д. Для измерения токов используется подключаемый в разрыв проводника (линии) блок измерителя, сигнал с которого поступает на осциллограф (дисплей библиотеки Simulink).

**Результаты исследования.** СТАТКОМ может повысить качество электроэнергии, выполнив несколько компенсаций, таких как динамическое регулирование напряжения, демпфирование колебаний линии электропередачи, обеспечение стабильности во время переходных процессов, контроль скачков напряжения, а также контроль активной и реактивной мощности (PQ) в системах передачи и распределения. Это достигается за счёт того, что СТАТКОМ использует VSC с переключателями питания, систему управления с обратной связью, которая контролирует состояние переключателей (включено – выключено), и выходные фильтры [3; 4].

Рассмотрим характеристики и принципы работы СТАТКОМ. На рисунке 1 показана система с двумя генераторами и линия передачи, в которой идеальный шунтирующий компенсатор подключён к середине линии. Генераторы имеют эквивалентное реактивное сопротивление  $X_{G1}$  и  $X_{G2}$ , линия передачи имеет эквивалентное реактивное сопротивление  $X_{dl}$ . Напряжения в точке общего соединения (PCC) генераторов задаются как  $V1 \angle \delta1$  и  $V2 \angle \delta2$ . Шунтирующий компенсатор, подключённый в середине линии, представляет собой источник напряжения, который непрерывно контролируется до VSC  $\angle \delta SC$ . На рисунке 2 представлены векторные диаграммы системы передачи с шунтирующим компенсатором, где предполагается, что  $\delta1 = +\delta / 2$ , а  $\delta2 = -\delta / 2$ .

Разности фаз показывают, что ток  $I_{1-SC}$  течёт от первого генератора к линии, в то время как  $I_{SC-2}$  течёт от линии ко второму генератору. Вектор  $I_{SC}$  – это производный ток, протекающий через шунтирующий конденсатор, где он перпендикулярен  $V_{sc}$ , как показано на рисунке 2а. Это означает, что компенсатор не обменивается активной мощностью (P) с линией. В этом случае компенсатор имеет только реактивную мощность на своих соединениях. Следовательно, мощность, передаваемая от  $V1$  к  $V2$ , может быть рассчитана как

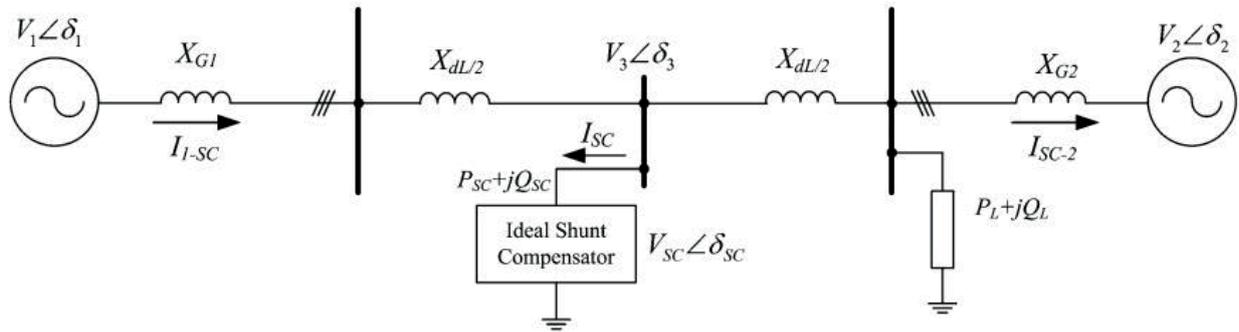
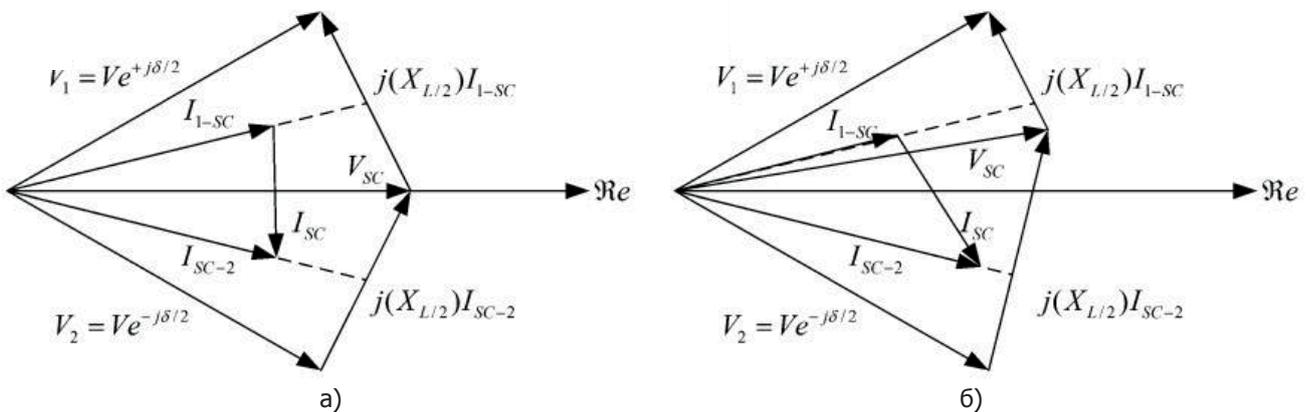


Рисунок 1 – Подключение идеального шунтирующего компенсатора к линии передачи



а) компенсация активной мощности; б) компенсация реактивной и активной мощности.

Рисунок 2 – Векторная диаграмма поперечной компенсации

$$P_1 = \frac{2V^2}{X_L} \sin\left(\frac{\delta}{2}\right), \quad (1)$$

где  $P_1$  – активная мощность, подаваемая  $V_1$ ;  $V$  – векторная сумма источников  $V_1$  и  $V_2$ . В случае, если какой-либо компенсатор не был включён в систему, передаваемая мощность выражается следующим образом:

$$P_1 = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta), \quad (2)$$

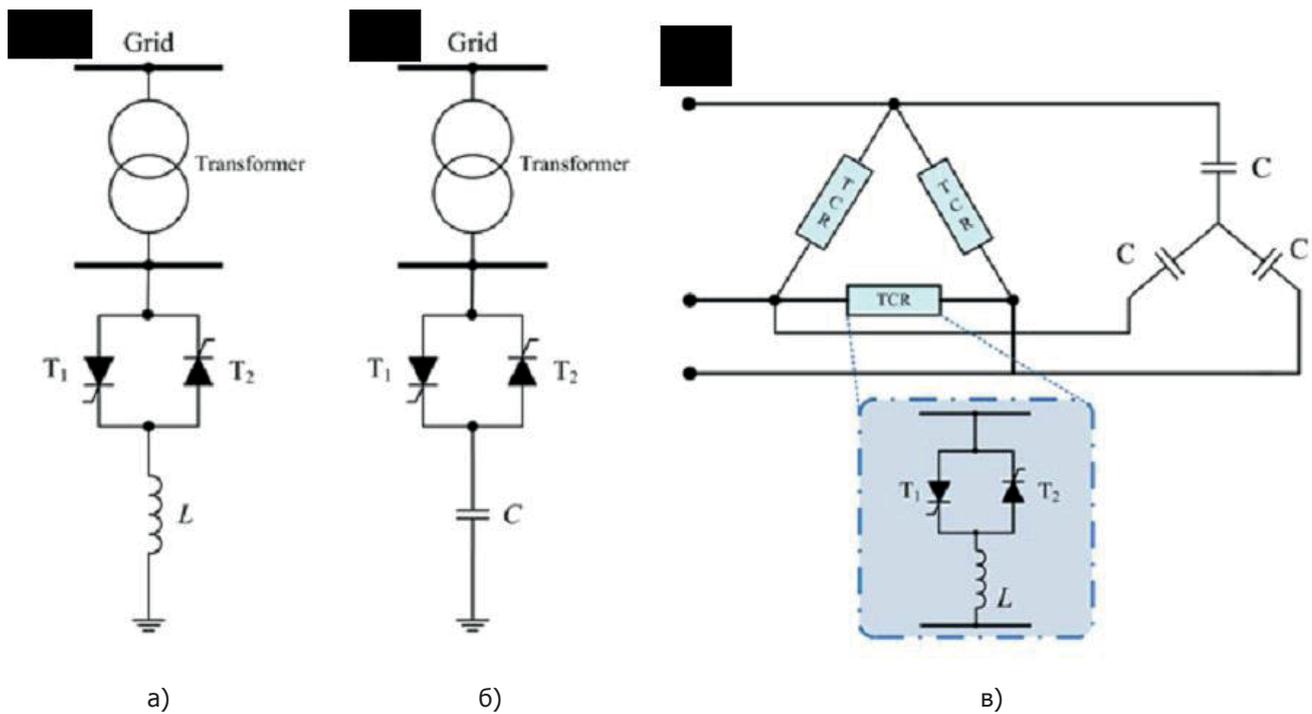
откуда видно, что компенсатор увеличивает способность управления мощностью линии передачи, поскольку  $2\sin(\delta/2)$  даёт более высокое значение, чем  $\sin(\delta)$  в диапазоне  $[0, 2\pi]$ . В случае, если фазовые углы  $V_1$  и  $V_2$  отличаются от  $\delta/2$ , то мощность, протекающая через источники, имеет компоненты активной и реактивной мощности, как показано на рисунке 2б. В этой ситуации шунтирующий компенсатор благодаря своей структуре, основанной на силовой электронике, может использоваться для регулировки активной или реактивной мощности. Кроме того, структура устройства также меняется в зависимости от требований компенсации

активной или реактивной мощности, поскольку они различаются по элементам накопления энергии [1]. Тип подключения и устройство переключения компенсаторов имеют несколько различных рабочих характеристик.

Топологии на основе тиристорov подразделяются на две основные группы: тиристоры с самокоммутацией и с принудительной коммутацией. Тиристоры с самокоммутацией подразумевают классификацию GTO, запираемый тиристор. Тиристоры с принудительной коммутацией – тиристоры с гарантированным малым временем выключения, подразделяются на интегрированный затвор-коммутируемый тиристор (IGCT), с МОП-управлением (MCT). Также в принудительную коммутацию входят биполярные транзисторы с изолированным затвором (IGBT) [1; 2].

На рисунке 3 изображены устройства FACTS на основе тиристорov.

СТАТКОМ работает как шунтирующий SVC (регулируемый статический компенсатор реактивной мощности) для регулировки напряжения системы переменного тока, управляя ёмкостным или индуктивным выходным током. На рисунке 4 представ-



а) – реактор с тиристорным управлением; б) – конденсатор с тиристорным переключением; в) – 6-импульсный статический компенсатор VAR.

Рисунок 3 – Устройства FACTS на основе тиристор

лена вольт-амперная характеристика режима работы СТАТКОМ, когда он выполняет индуктивную или ёмкостную компенсацию относительно своего линейного тока. Кроме того, характеристика V-I показывает, что СТАТКОМ может обеспечивать ёмкостную или индуктивную мощность даже при очень низких напряжениях (например, 0,15 о.е.).

Преобразователи, используемые в топологиях СТАТКОМ, классифицируются в соответствии с их многоимпульсной или многоуровневой структурой. Многоимпульсные преобразователи переключаются на линейную частоту, состоят из устройств с линейной коммутацией. В случае прямого (бес-трансформаторного) подключения СТАТКОМа к

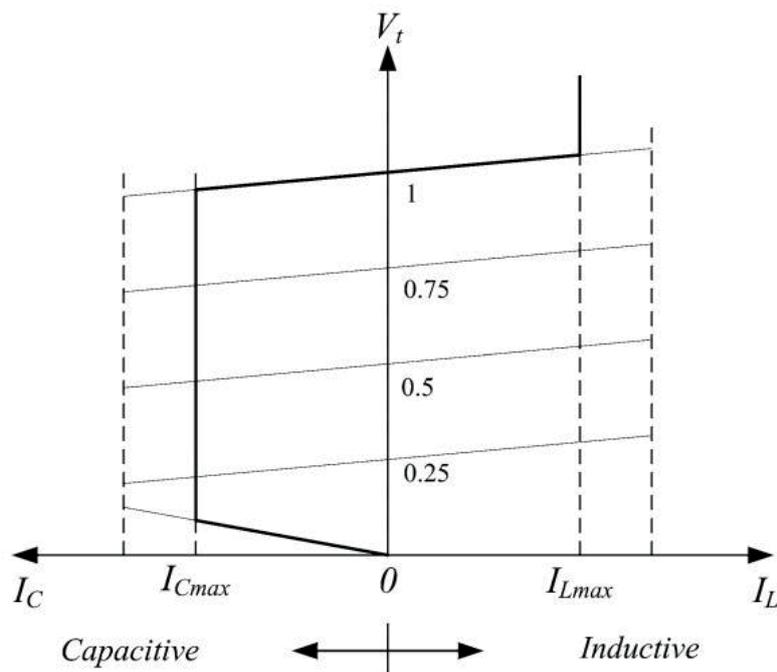


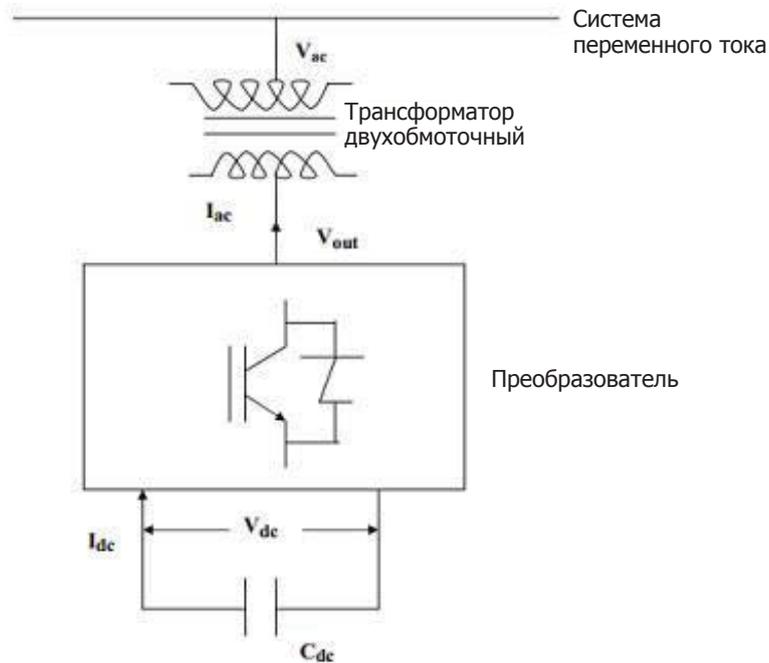
Рисунок 4 – Типичная вольт-амперная характеристика СТАТКОМ

**Моделирование устройства компенсации реактивной мощности СТАТКОМ в электроэнергетической системе**

сетям среднего класса напряжения применяются многоуровневые преобразователи, один из них – преобразователь на основе H-мостов [1].

На рисунке 5 показана функциональная модель СТАТКОМ.

Принцип работы модели (рис. 5) следующий: если амплитуда напряжения ( $V_{ac}$ ) линейной шины уменьшается ниже выходного напряжения СТАТКОМ  $V_{out}$ , ток течёт через реактивное сопротивление от преобразователя к системе переменного тока



$V_{ac}$  – напряжение на шине;  $I_{ac}$  – ток, подаваемый СТАТКОМ;  $V_{out}$  – выходное напряжение VSC;  $V_{dc}$  – напряжение постоянного тока на стороне конденсатора.

Рисунок 5 – Функциональная модель СТАТКОМ

тока, и преобразователь генерирует реактивную ёмкостную мощность для системы переменного тока. Если амплитуда  $V_{out}$  уменьшается ниже напряжения на шине электросети, ток течёт из системы переменного тока в преобразователь, и преобразователь поглощает реактивную индуктивную мощность из системы переменного тока. Обмен

реактивной мощности становится равным нулю, если  $V_{out}$  равен напряжению системы переменного тока, и в этом случае говорят, что СТАТКОМ находится в «плавающем» состоянии.

Величину переменного тока  $I_{ac}$  для данной модели можно рассчитать с помощью следующего уравнения:

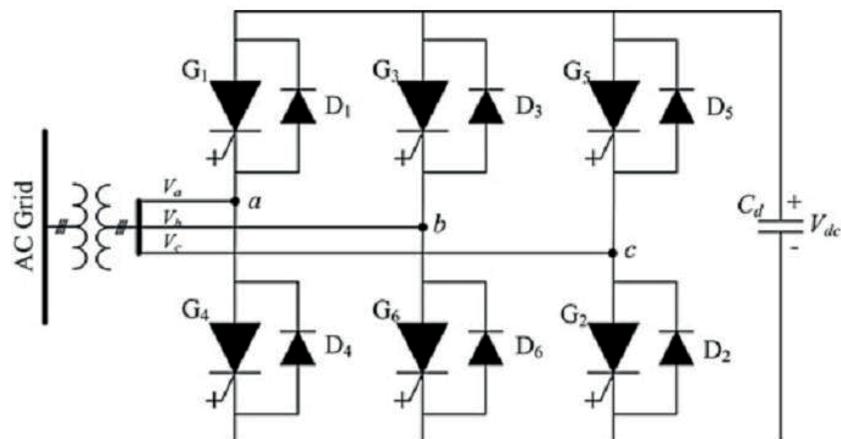


Рисунок 6 – Базовый 6-импульсный двухуровневый СТАТКОМ VSC

$$I_{ac} = \frac{V_{out} - V_{ac}}{X}, \quad (3)$$

где  $V_{out}$  и  $V_{ac}$  – значения выходного напряжения преобразователя и напряжения системы переменного тока соответственно;  $X$  – реактивное сопротивление утечки трансформатора связи.

Соответствующая передаваемая реактивная мощность  $P_Q$  может быть выражена следующим уравнением:

$$P_Q = \frac{(V_{out})^2 - V_{out} V_{ac} \cdot \cos\alpha}{X}, \quad (4)$$

где  $\alpha$  – угол между  $V_{out}$  и  $V_{ac}$ .

Количество обмениваемой реальной мощности в установившемся режиме обычно невелико. Значит, угол  $\alpha$  тоже мал. Реальный обмен мощностью между VSC и системой переменного тока  $P_R$  можно рассчитать с помощью следующего уравнения:

$$P_R = \frac{(V_{out})V_{ac} \sin\alpha}{X}. \quad (5)$$

Данные формулы характеризуют работу СТАТКОМ, режим генерации тока любой фазы относительно напряжения сети, регулирования выходного напряжения СТАТКОМ за счёт изменения реактивной мощности, потреблённой или выданной в сеть.

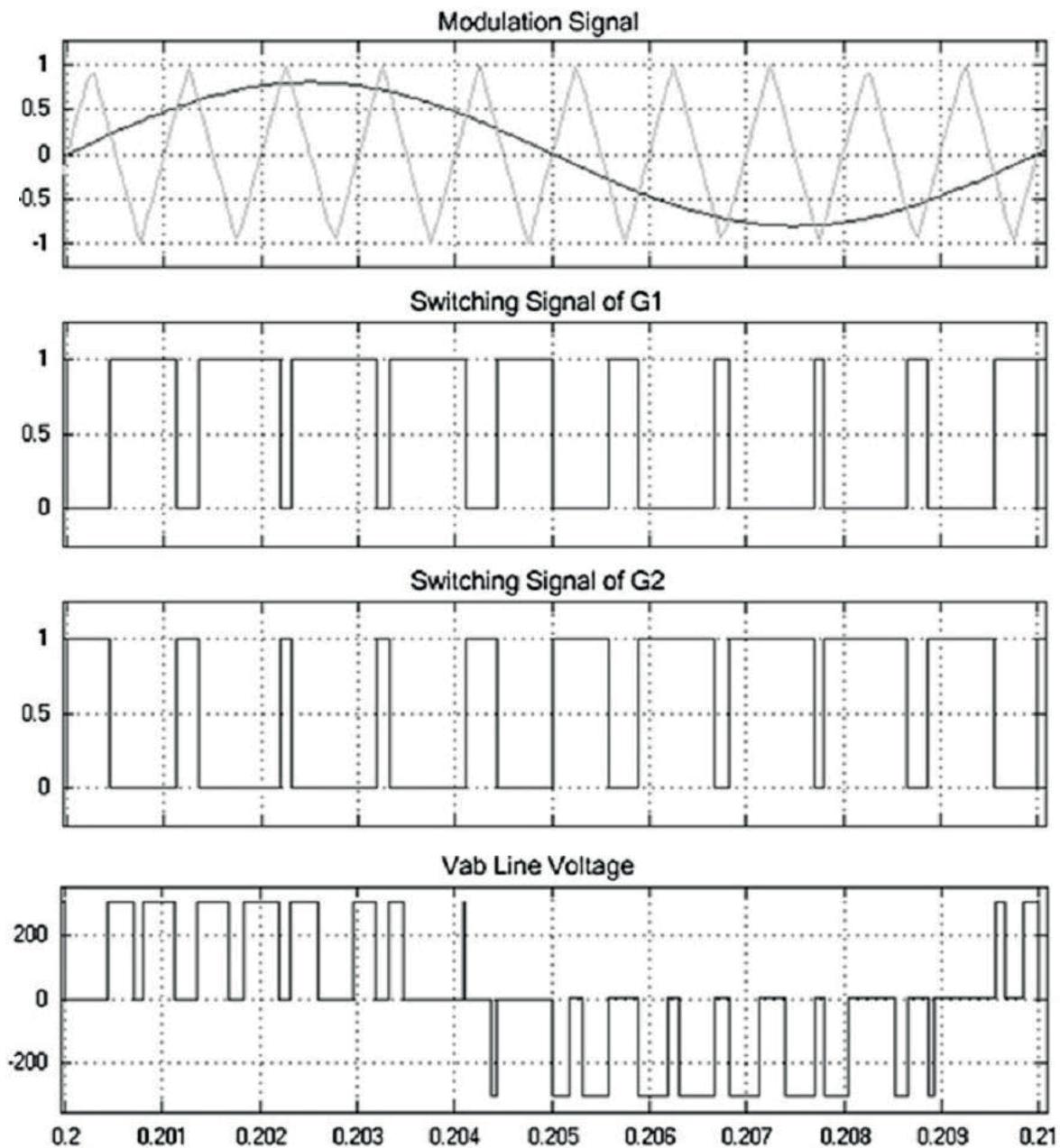


Рисунок 7 – Выходное линейное напряжение VSC, работающего при последовательности проводимости  $120^\circ$

В Simulink предварительные модели СТАТКОМ основаны на многоимпульсных преобразователях по своим меньшим потерям и меньшего содержания гармоник. Топологии многоимпульсных преобразователей состоят из нескольких 6-импульсных схем VSC, которые также известны как трёхуровневые VSC.

Базовый блок СТАТКОМ VSC в конфигурации 6-импульсного двухуровневого режима (рис. 6) состоит из шести GTO и антипараллельных диодов, а также могут использоваться несколько других самокоммутируемых устройств, таких как IGBT, MCT или IGCT. GTO – это переключающие устройства системы, в которой преобразователь может генерировать сбалансированное трёхфазное выходное напряжение переменного тока из конденсатора постоянного тока. Частота выходного напряжения регулируется частотой модуляции тиристорными ключами GTO [3; 5].

VSC может работать с последовательностями переключения 120° или 180°, что позволяет выполнять соответственно два или три переключения в любое время. Рисунок 7 иллюстрирует последовательность переключения; сигналы, генерируемые и подаваемые на переключатели  $G_1$  и  $G_4$ , и выходное линейное напряжение  $v_{ab}$  на каждой оси. Линейное напряжение  $v_{ab}$  может быть выражено рядом Фурье как:

$$v_{ab} = a_0 + \sum_{h=1}^{\infty} a_h \cos(h\omega t) + \sum_{h=1}^{\infty} b_h \sin(h\omega t), \quad (6)$$

где  $a_0$  – коэффициент постоянной составляющей сигнала, равный амплитуде основной гармоники напряжения сети;  $a_h, b_h$  – коэффициенты реальной и мнимой части  $h$ -й гармоники при преобразовании Фурье внутри рассматриваемого окна;  $\omega$  – частота;  $t$  – время.

Коэффициенты  $a_0, a_h$  и  $b_h$  можно определить, рассматривая один основной период  $v_{ab}$ . Среднее напряжение рассчитывается как  $a_0 = 0$ , поскольку форма волны  $v_{ab}$  симметрична. С другой стороны, коэффициент  $b_h$  имеет нечётно-волновую симметрию [3].

$$b_h = \frac{2}{\pi} \int_0^{\pi} U_{dc} \sin(h\omega t) d(\omega t),$$

$$b_h = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} U_{dc} \sin(h\omega t) d(\omega t) = \frac{4U_{dc}}{\pi h} \cos(h\alpha).$$

$$v_{ab} = \sum_{h=1,3,5}^{\infty} \frac{4U_{dc}}{\pi h} \cos(h\alpha) \sin(h\omega t). \quad (7)$$

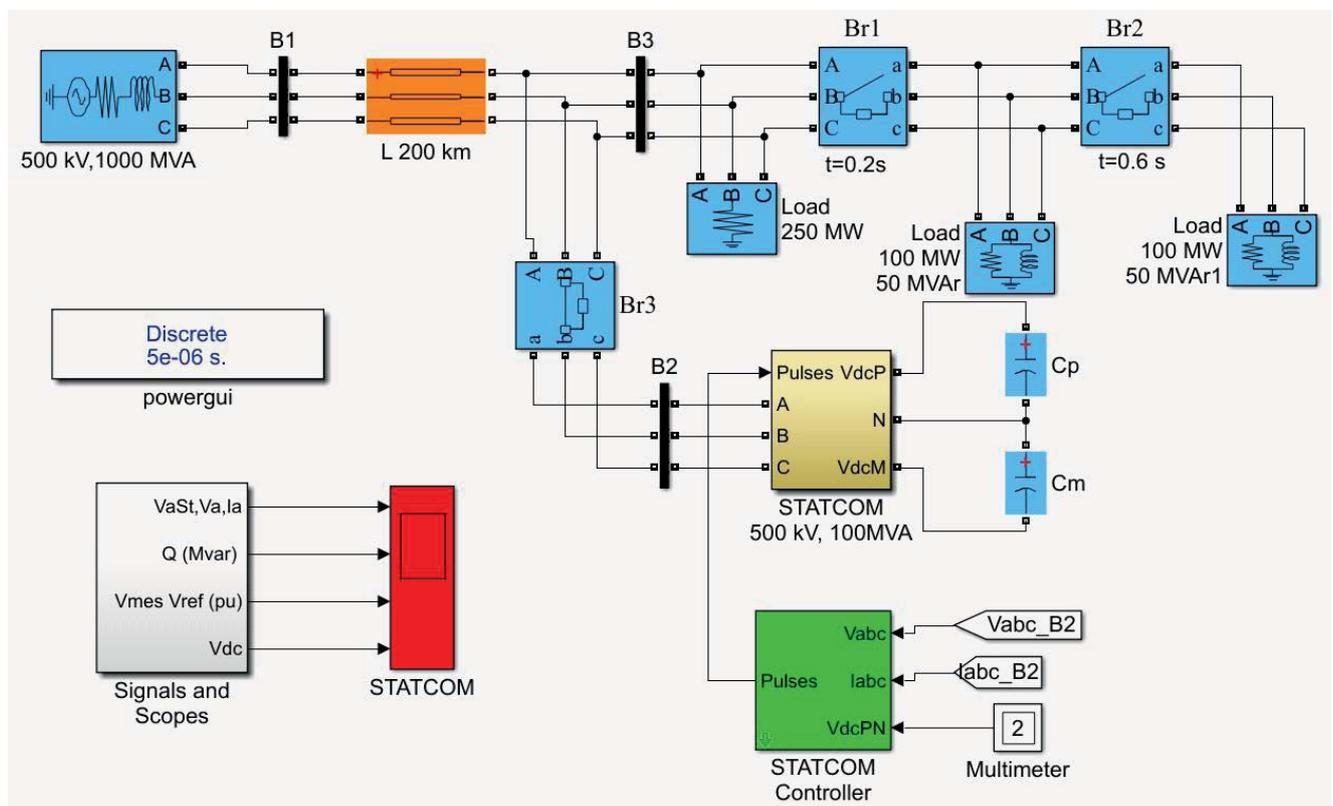
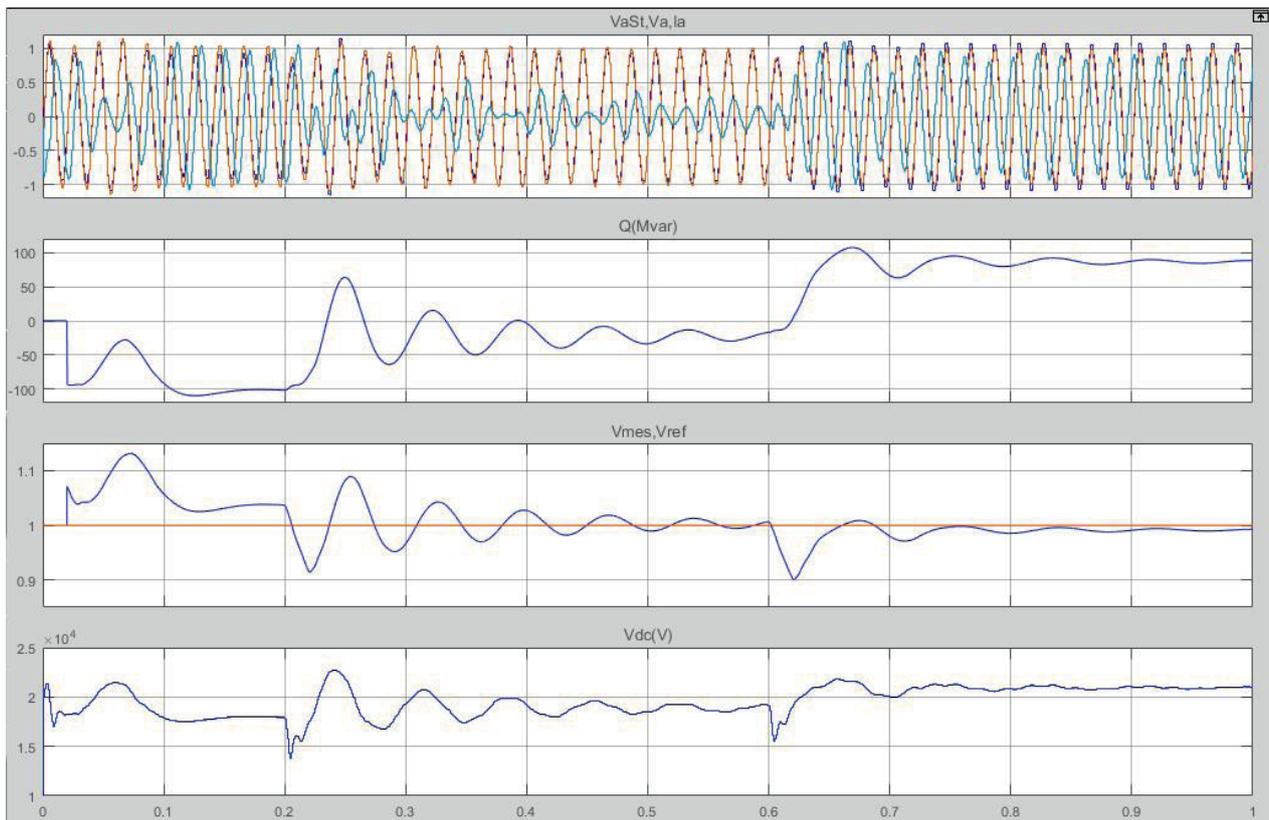


Рисунок 8 – Модель СТАТКОМ с четырьмя 3-уровневыми инверторами



$V_{aSt}$  – ЭДС;  $V_a$ ,  $I_a$  – выходное напряжение и ток;  $Q$  – реактивная мощность;  $V_{mes}$  и  $V_{ref}$  – измеренные и заданные напряжения в PCC;  $V_{dc}$  – напряжение на конденсаторе.

Рисунок 9 – Результаты моделирования несимметричной нагрузки. Характеристики СТАТКОМ

Тройные гармоники в сетевом напряжении будут равны нулю, когда угол переключения установлен на  $\alpha = 30^\circ$ . Также видно, что гармонические составляющие преобразователя находятся в порядках  $(6n \pm 1) \cdot f_o$ , где  $f_o$  – основная частота сетевого напряжения,  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Очевидно, что порядок гармоник 6-импульсного VSC – это 5-й, 7-й, 11-й, 13-й, ... и так далее, что является непрактичным для энергосистем. Чтобы справиться с этой проблемой, увеличенные уровни импульсов, такие как 12-импульсный, 24-импульсный и 48-импульсный, достигаются путём объединения основных 6-импульсных VSC вместе.

Проведём анализ системы электроснабжения с подключением СТАТКОМ. Модель СТАТКОМ с четырьмя 3-уровневыми инверторами показана на рисунке 8. Напряжение сети составляет 500 кВ, нагрузка разделена на 3 группы: 2 нагрузки по 100 МВт включаются за счёт выключателей  $Br_1$  и  $Br_2$  и одна нагрузка на 250 МВт. Коммутация силовых цепей СТАТКОМ осуществляется через выключатель  $Br_3$ .

Выключатель  $Br_1$  замыкается при  $t = 0,2$  с, а  $Br_2$  – при  $t = 0,6$  с. С помощью осциллографа «СТАТКОМ» можно наблюдать внутреннюю ЭДС СТАТКОМ ( $V_{aSt}$ ), его выходное напряжение и ток ( $V_a$ ,  $I_a$ ), его реактивную мощность  $Q$ , измеренные

( $V_{mes}$ ) и заданные ( $V_{ref}$ ) напряжения в PCC (точка общего подключения), а также напряжение на конденсаторе ( $V_{dc}$ ) (рис. 9).

Как видно из рисунка 9, система управления компенсатора выявила параметры тока сети и задавала определённый ток в фазах, который произвёл компенсацию реактивной мощности (снижение амплитуды напряжения) и несимметричной составляющей, что можно увидеть на осциллограммах при подключении СТАТКОМ. Повышение  $Q$  сопровождается увеличением  $V_{dc}$ . Видно, что величины  $V_a$ ,  $I_a$  почти синусоидальны.

**Выводы.** Таким образом, статические компенсаторы реактивной мощности СТАТКОМ в системе электроснабжения осуществляют регулирование активной и реактивной мощности в широком диапазоне. Это позволяет производить выбор оптимальных режимов работы данной системы с целью снижения потерь электрической энергии при её передаче. Моделирование в программе Simulink показало, что подключение СТАТКОМ к несимметричным электрическим сетям (активного и активно-индуктивного характера) обеспечивает стабилизацию напряжения в наиболее проблемных узлах системы электроснабжения и регулировку требуемых параметров в этих узлах в соответствии с нормативными документами.

*СПИСОК ИСТОЧНИКОВ*

1. Mokhtari Ahmed, Gherbi Fatima Z., Mokhtar Cherif, Kerrouche Kamel D. E., Aimer Ameer F. Study, analysis and simulation of static compensator D – STATKOM for distribution system of electric power // Leonardo Journal of Science. 2014. Is. 25. P. 117–130. ISSN 1583-0233.
2. Пешков М. В. Разработка и исследование системы управления статическим компенсатором реактивной мощности типа СТАТКОМ для электроэнергетических систем : специальности 05.14.02 «Электростанции и электроэнергетические системы», 05.09.12 «Силовая электроника» : дисс. ... канд. техн. наук / Пешков Максим Валерьевич ; филиал ОАО «НТЦ электроэнергетики» – «ВНИИЭ». М., 2009. 159 с.
3. Ramesh G. B., Pruthviraja L. Applications of D-STATKOM for Power Quality Improvement in Distribution System // International Journal of Current Engineering and Technology. 2016. Vol. 6, № 1. P. 5–12. ISSN 2347-5161.
4. Марикин А. Н., Кузьмин С. В., Виноградов С. А. Применение преобразования Парка – Горева для управления статическим компенсатором реактивной мощности тяговой сети переменного тока // Вестник Ростовского государственного университета путей сообщения. 2013. № 2 (50). С. 47–54. ISSN 0201-727X.
5. Суд Виджей К. HVDC and FACTS Controllers: применение статических преобразователей в энергетических системах : монография. М. : Научно-инженерное информационное агентство, 2009. 299 с. ISBN 978-5-903564-01-9.

*References*

1. Mokhtari Ahmed, Gherbi Fatima Z., Mokhtar Cherif, Kerrouche Kamel D. E., Aimer Ameer F. Study, analysis and simulation of static compensator D – STATKOM for distribution system of electric power // Leonardo Journal of Science. 2014. Is. 25. P. 117–130. ISSN 1583-0233.
2. Peshkov M. V. Razrabotka i issledovanie sistemy upravlenija staticheskim kompensatorom reaktivnoj moshhnosti tipa STATKOM dlja jelektrojenergeticheskikh sistem : special'nosti 05.14.02 «Jelektrostancii i jelektrojenergeticheskie sistemy», 05.09.12 «Silovaja jelektronika» : diss. ... kand. tehn. nauk / Peshkov Maksim Valer'evich ; filial OAO «NTC jelektrojenergetiki» – «VNIIJe». M., 2009. 159 s.
3. Ramesh G. B., Pruthviraja L. Applications of D-STATKOM for Power Quality Improvement in Distribution System // International Journal of Current Engineering and Technology. 2016. Vol. 6, № 1. P. 5–12. ISSN 2347-5161.
4. Marikin A. N., Kuz'min S. V., Vinogradov S. A. Primenenie preobrazovanija Parka – Goreva dlja upravlenija staticheskim kompensatorom reaktivnoj moshhnosti t'jagovoj seti peremennogo tokaj // Vestnik Rostovskogo gosudarstvennogo universiteta putej soobshhenija. 2013. № 2 (50). S. 47–54. ISSN 0201-727X.
5. Sud Vidzhej K. HVDC and FACTS Controllers: primenenie staticheskikh preobrazovatelej v jenergeticheskikh sistemah : monografija. M. : Nauchno-inzhenernoe informacionnoe agentstvo, 2009. 299 s. ISBN 978-5-903564-01-9.

*Сведения об авторах*

**Владимир Викторович Шмигель** – доктор технических наук, профессор, профессор кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия», spin-код: 5673-4145.

**Артем Сергеевич Угловский** – кандидат технических наук, доцент кафедры электрификации, Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Ярославская государственная сельскохозяйственная академия», spin-код: 3717-5731.

*Information about the authors*

**Vladimir V. Shmigel** – Doctor of Technical Sciences, Full Professor, Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agricultural Academy", spin-code: 5673-4145.

**Artem S. Uglovskiy** – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor of the Department of Electrification, Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Yaroslavl State Agricultural Academy", spin-code: 3717-5731.

**Конфликт интересов.** Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

**Conflict of interest.** The authors declare no conflict of interest.