ISSN 1816-4528 (Print) **ISSN 2949-0634 (Online)**

Научная статья

УДК 621.31
DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-32-40

Сытник Владимир Анатольевич

Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева

* для корреспонденции: sytnik.va@mail.ru

ИМИТАЦИОННОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РАБОТЫ СТАТКОМ В РЕЖИМЕ КОМПЕНСАЦИИ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ

Аннотация.
В статье рассматривается задача анализа работы статического синхронного компенсатора (СТАТКОМ) в режиме компенсации реактивной мощности с применением метода имитационного моделирования. Актуальность исследования обусловлена современными тенденциями развития электроэнергетических систем, характеризующимися ростом доли нелинейных и быстропеременных нагрузок, а также интеграцией возобновляемых источников энергии, что приводит к ухудшению качества электроэнергии и колебаниям напряжения. Имитационная модель системы управления СТАТКОМ реализована на основе двухконтурной системы автоматического регулирования в среде динамического моделирования Simintech. Регулирование баланса мощности в узле электрической сети производится за счет создания СТАТКОМ тока, компенсирующего реактивную составляющую тока нагрузки. Формирование тока компенсации осуществляется посредством векторного управления в d–q системе координат, что обеспечивает высокую точность и быстродействие регулирования. Переход от ABC-системы координат к d-q системе координат осуществляется при помощи преобразования Кларк. Для заданных параметров электрической сети выполнен расчет установленной мощности устройства, включая параметры дросселя и конденсатора силовой части. Настройка ПИД-регуляторов выполнена по методу Скогестада, обеспечивающему требуемое качество переходных процессов и устойчивость системы в широком диапазоне рабочих режимов. Результаты моделирования демонстрируют эффективность предложенной модели для динамической компенсации реактивной мощности. Показано снижение тока в линии электропередачи за счет разгрузки от реактивной составляющей. Переходные процессы характеризуются высокой скоростью и точностью. Разработанная имитационная модель обеспечивает необходимую точность и может эффективно применяться для анализа, оптимизации режимов работы СТАТКОМ и дальнейших исследований в области современных интеллектуальных электроэнергетических систем.

CC BY

Информация о статье
Поступила:
26 мая 2026 г.

Одобрена после рецензирования:
01 сентября 2026 г.

Принята к печати:
15 сентября 2026 г.

Ключевые слова:
СТАТКОМ, компенсация реактивной мощности, имитационное моделирование, векторное управление, ПИД-регулятор, Simintech

Для цитирования: Сытник В.А. Имитационное моделирование работы СТАТКОМ в режиме компенсации реактивной мощности // Горное оборудование и электромеханика. 2026. № 4 (186). С. 32-40. DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-32-40, EDN: MLNQRD

Введение

В современных условиях развития электроэнергетических систем вопросы обеспечения качества электроэнергии, поддержания уровней напряжения и компенсации реактивной мощности приобретают особую актуальность. Рост доли нелинейных и быстропеременных нагрузок, а также интеграция возобновляемых источников энергии приводят к увеличению колебаний напряжения и ухудшению показателей качества электроэнергии [1, 2]. В этой связи статические синхронные компенсаторы (СТАТКОМ) находят все более широкое применение как эффективное средство локальной компенсации реактивной мощности и стабилизации напряжения в узлах сети [1–4].

СТАТКОМ (статический компенсатор реактивной мощности) или, на английском, STATCOM (Static Synchronous Compensator) – это устройство

FACTS второго поколения, используемое для управления реактивной мощностью в электрических системах. Оно способно быстро и точно регулировать реактивную мощность и напряжение в электрической сети, что позволяет поддерживать стабильность и качество электроснабжения. СТАТКОМ является эволюционным продолжением статического компенсатора. Силовая часть СТАТКОМ состоит из полупроводниковых ключей, поэтому он лишен недостатков электромеханического синхронного компенсатора [5]. СТАТКОМ – многофункциональное устройство, способное выполнять как функции статического тиристорного компенсатора, так и функции активного фильтра. Возможные режимы работы СТАТКОМ:

– Динамическая компенсация реактивной мощности. Работа электрических преобразователей и трансформаторов в режимах ниже номинальной мощности и тем более на холостом ходу приводит к ухудшению коэффициента мощности tgφ сети. Использование СТАТКОМ позволяет восстановить заданный уровень tgφ и снизить потери на транспорт электроэнергии за счет снижения передаваемой по сети реактивной мощности [6].

– Поддержание заданного уровня напряжения. Изменение уровня напряжения возможно из-за влияния нагрузки, схемно-режимной ситуации в сети, сезонно-климатических факторов.

– Приведение параметров сети к симметричной синусоидальной системе. Неравномерность загрузки фаз может возникать из-за случайного характера однофазной нагрузки, ошибок при проектировании.

– Устранение высших гармоник, возникающих из-за работы мощных выпрямителей и других полупроводниковых устройств, что приводит к улучшению энергетических характеристик (КПД) электромеханических преобразователей и другого электрооборудования.

Исходя из общей тенденции к повышению управляемости распределительных сетей, логичным направлением видится широкое внедрение устройств FACTS и, в частности, STATCOM, а также совершенствование элементной базы и алгоритмов управления этих устройств [7].

Особое значение приобретает задача анализа динамических режимов работы СТАТКОМ, поскольку от качества и скорости реакции устройства на возмущения напрямую зависит устойчивость и надежность всей энергосистемы. Традиционные методы исследования, основанные на аналитических расчетах, зачастую не позволяют учесть все нелинейности и особенности реальных систем управления. В связи с этим имитационное моделирование становится ключевым инструментом для детального исследования процессов, протекающих в СТАТКОМ, и оптимизации его параметров.

В работе предложена имитационная модель СТАТКОМ для режима компенсации реактивной мощности, созданная в среде динамического моделирования Simintech. Для заданных параметров узла электрической сети выполнен расчет мощности компенсирующего устройства СТАТКОМ, а также параметры его узлов. Составлена система дифференциальных уравнений, описывающая электрическое состояние узла электрической сети в различных режимах с компенсацией реактивной мощности. На основании полученных расчетных параметров СТАТКОМ, системы дифференциальных уравнений, а также на основании положений теории автоматического управления получены передаточные функции узлов СТАТКОМ. Дано представление о векторном управлении в системе d-q координат. Предложена методика расчета параметров ПИД-регуляторов системы управления. Корректность предложенной методики подтверждена устойчивой работой СТАТКОМ при моделировании режимов динамической компенсации реактивной мощности.

Методы

Целью настоящей работы является разработка и исследование имитационной модели СТАТКОМ, работающего в режиме компенсации реактивной мощности. В общем виде идею регулирования в режиме компенсации реактивной мощности можно сформулировать следующим образом: СТАТКОМ должен сформировать такой ток на дросселе, чтобы компенсировать на заданный уровень реактивную составляющую тока нагрузки, поддерживая заданный уровень напряжения на своем конденсаторе. Основная сложность при моделировании – разработать систему управления, способную рассчитать управляющее воздействие, которое быстро и точно приведет силовую часть к необходимому состоянию.

Объектом управления принят процесс изменения баланса реактивной мощности в узле. Управляющим воздействием определено напряжение на выходе инвертора. Основной технологической переменной – ток СТАТКОМ.

За исходные данные для определения параметров модели принят узел электрической сети 0,4 кВ, который состоит из источника ЭДС, группы потребителей и поперечно подключенного СТАТКОМ, схема подключения изображена на Рис. 1. Суммарная активная мощность группы потребителей составляет 50 кВт с коэффициентом мощности в номинальном режиме $tg(\varphi_{ном})$ = 0,75. В неноминальных реактивная мощность остается неизменной, а активная изменяется до значения, соответствующе-

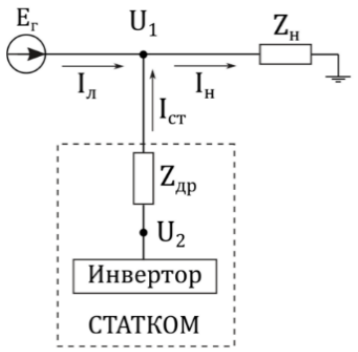

Рис. 1. Узел с нагрузкой с поперечно подключенным СТАТКОМ
Fig. 1. Node with a load with a cross-connected STATCOM

го $tg(\varphi_{мин})$=1,02. При любом режиме требуется поддерживать $tg(\varphi_з)$ = 0,484.

Расчет мощности компенсации проведен по наиболее неблагоприятному режиму, в котором активная мощность $P_{мин}$ = 36,76 кВт, а $tg(\varphi_з)$ = 0,484. В этом режиме необходимая для компенсации мощность:

$$Q_к = Q_{ном} - P_{мин} \cdot tg(\varphi_з).$$

СТАТКОМ способен потреблять активную мощность и одновременно выдавать реактивную мощность, поэтому для расчета его установленной мощности определяющей является скорость обмена энергией между фазами, и эта скорость определяется допустимой токовой нагрузкой дросселей.

Выбор дросселя проведен по наиболее тяжелому режиму по току – фаза СТАТКОМ выдает реак-

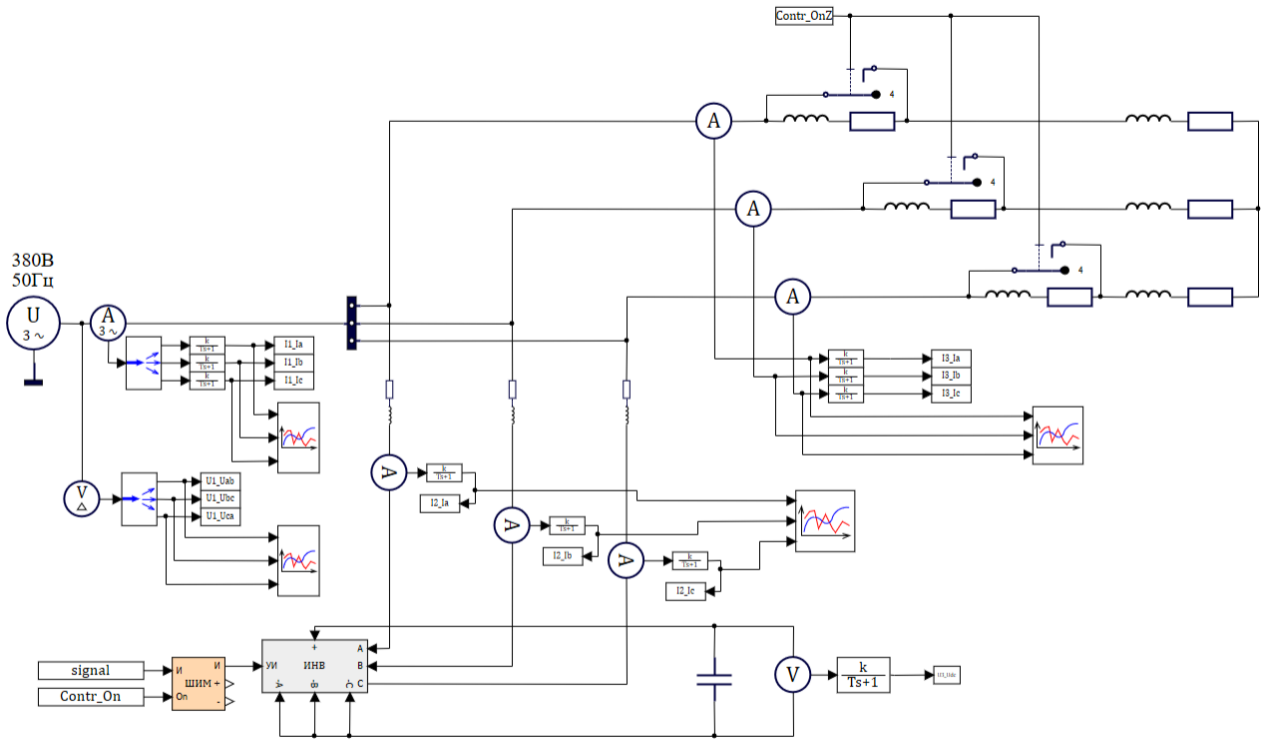

Рис. 2. Модель силовой части СТАТКОМ, выполненная в Simintech
Fig. 2. STATCOM power part model created in Simintech

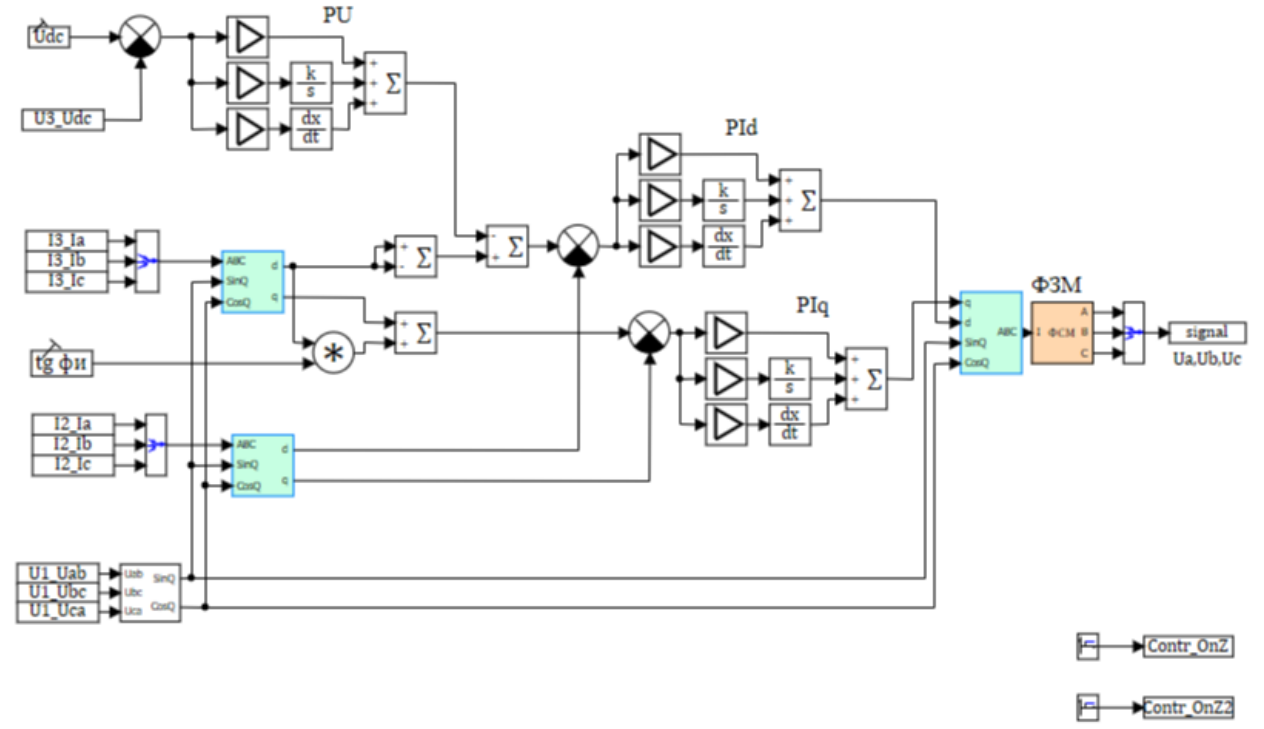

Рис. 3. Модель системы управления СТАТКОМ, реализованная в Simintech
Fig. 3. STATCOM control system model implemented in Simintech

тивную составляющую тока компенсации и одновременно потребляет активную составляющую тока [10], действующие значения тока активной и реактивной составляющих тока за период равны:

$$I_{st} = \sqrt{I_{\text{а}}^2 + I_{\text{р}}^2}\ .$$

При равенстве активной и реактивной составляющих ток в фазе СТАТКОМ должен быть в $\sqrt{2}$ больше тока компенсации.

Реактивную составляющую тока можно рассчитать как ток компенсации:

$$I_{\text{р}} = I_{\text{к}} = \frac{\text{Q}_{\text{к}}}{\sqrt{3}\cdot U_1}.$$

Мощность фазы дросселя:

$$S_{\text{др}} = 2\sqrt{3}\cdot U_1 \cdot I_{st}\ .$$

Для $I_{\text{р}}$=29,9 А I_{st}=42,3 А и трехфазного дросселя мощностью $S_{\text{др}}$= 30 ВА по справочным данным [11] определены индуктивность $L_{\text{др}}$ = 6 мГн и активное сопротивление $R_{\text{др}}$ = 0,1 Ом.

Выбор конденсатора осуществлен по току и напряжению. В режиме максимальной нагрузки к одной из обкладок конденсатора будет подключена одна фаза дросселя, к другой обкладке – две [10]. Соответственно, действующее значение тока конденсатора в режиме максимальной токовой нагрузки можно определить как действующее значение тока одной фазы дросселя. При этом максимально тяжелый режим по напряжению – амплитуда линейного напряжения сети. Отсюда мощность конденсатора:

$$\text{Q}_{\text{dc}} = \sqrt{2}U_{23}\cdot I_{st}\ .$$

Емкость конденсатора:

$$\text{C} = \frac{\text{Q}_{\text{dc}}}{2\cdot(U_{23})^2\cdot\omega}\ .$$

Рассчитана емкость конденсатора C = 116,633 мкФ. Влияние высших гармоник (THD) при расчете силовой части модели не учитывалось. Силовая часть модели, выполненная в Simintech, представлена на Рис. 2.

Разложение в ряд Фурье позволяет точно вычислять ток компенсации, но требует данных половины периода кривой тока, что не подходит для динамических режимов, для которых предназначен СТАТКОМ, поэтому для управления инвертором выбрана система векторного управления в d-q координатах.

Система координат d-q – ортогональная, вращающаяся со скоростью ω система координат, ось d которой совпадает с обобщенным вектором напряжения сети $\vec{\text{U}}_1$. Для каждого момента времени d-q преобразования позволяют получить простые зависимости между токами, напряжениями, активными и реактивными мощностями.

В SimInTech переход от ABC к d-q системе координат осуществляется стандартными блоками из раздела «Регулирование» библиотеки «Электроприводы» по формулам, позволяющим получить обобщенный вектор длиной в амплитудное значение фазной величины:

$$d = \frac{B-C}{\sqrt{3}}\sin\theta + A\cos\theta$$

$$q = \frac{B-C}{\sqrt{3}}\cos\theta - A\sin\theta.$$

Обратное преобразование от d-q к ABC-системе координат также осуществляется стандартными блоками библиотеки «Электроприводы» SimInTech по формулам:

$$A = d\cos\theta - q\sin\theta$$

$$B = \frac{\sqrt{3}}{2}(d\sin\theta + q\cos\theta) - \frac{1}{2}(d\cos\theta - q\sin\theta)$$

$$C = -\frac{1}{2}(d\cos\theta - q\sin\theta) - \frac{\sqrt{3}}{2}(d\sin\theta + q\cos\theta).$$

Уравнения электрического состояния для узла электрической сети на Рис. 1:

$$u_1 = u_2 + i_{st}R_{\text{др}} + L_{\text{др}}\frac{di_{st}}{dt}$$

$$u_1 = i_{\text{н}}R_{\text{н}} + L_{\text{н}}\frac{di_{\text{н}}}{dt}$$

$$i_{\text{л}} = i_{\text{н}} - i_{\text{ст}}\ .$$

СТАТКОМ при помощи ШИМ формирует на входе каждой фазы инвертора значение u_2, определяющее ток i_{st}:

$$u_1 - u_2 = i_{st}R_{\text{др}} + L_{\text{др}}\frac{di_{st}}{dt}\ ,$$

где $R_{\text{др}}$ – активное сопротивление дросселя, L – индуктивность дросселя.

Для вращающейся d-q системы координат:

$$u_{1d} - u_{2d} = i_dR_{\text{др}} + L_{\text{др}}\frac{di_d}{dt}$$

$$u_{1q} - u_{2q} = i_qR_{\text{др}} + L_{\text{др}}\frac{di_q}{dt}\ .$$

i_d, i_q – активная и реактивная составляющие тока СТАТКОМ. Вектор i_d совпадает по фазе с обобщенным вектором напряжения u_1. При компенсации реактивной мощности i_q опережает u_1 на 90°, при потреблении i_q – отстает на 90°.

Для управления устройством была синтезирована двухконтурная система регулирования в d-q системе координат, модель которой приведена на Рис. 3. Внешний контур регулирования при помощи ПИД-регулятора поддерживает заданное напряжение U_{dc}^* в звене постоянного тока u_{dc}. Поддержание необходимого баланса реактивной мощности достигается за счет задания $tg(\varphi_{\text{з}})$. ПИД-регулятор напряжения PU преобразует сигнал ошибки u_{dc} в сигнал задания активной составляющей входного тока i_d. ПИД-регулятор тока PId преобразует сигнал ошибки активного тока в u_{2d}^* – сигнал задания напряжения по оси d. ПИД-регулятор тока PIq преобразует сигнал ошибки реактивного тока в u_{2q}^* – сигнал задания напряжения по оси q. Инверсия заданий токов i_d, i_q происходит из-за учета положительного направления тока СТАТКОМ. Положительное направление токов: фазный ток СТАТКОМ от инвертора в узел, ток нагрузки – от узла, ток источника ЭДС – к узлу.

Для определения параметров ПИД-регуляторов получены передаточные функции функциональных частей СТАТКОМ. Передаточная функция дросселя $W_{\text{др}}(s)$:

$$W_{\text{др}}(s) = \frac{k_{\text{др}}}{T_{\text{др}}\cdot s+1}\ ,$$

где $k_{\text{др}} = \frac{1}{R_{\text{др}}}$ – коэффициент передачи; $T_{\text{др}} = \frac{L_{\text{др}}}{R_{\text{др}}}$ – постоянная времени; s – оператор дифференцирования. $T_{\text{др}}$=0,06; $k_{\text{др}}$=10.

Влияние дискретной системы управления и инвертора на формирование напряжение u_2 можно описать передаточной функцией чистого запаздывания:

$$W_{\text{у}}(s) = k_{\text{у}} e^{-T_{\text{у}} s}.$$

Наибольшая постоянная времени определяется звеном ШИМ и в худшем случае равна периоду повторения $T_{\text{у}} = 1/f$, где f – частота пилообразного, $k_{\text{у}} = 1/U_{\text{ПМ}}$, $U_{\text{ПМ}}$ – размах пилообразного сигнала [12–14].

Чистое запаздывание можно аппроксимировать разложением в ряд Поде:

$$W_{\text{у}}(s) = k_{\text{у}} e^{-T_{\text{у}} s} \approx \frac{k_{\text{у}}(1-0{,}5T_{\text{у}}s)}{1+0{,}5T_{\text{у}}s}.$$

С использованием параметров силовой части модели рассчитаны параметры: $k_{\text{у}} = 0{,}5$; $T_{\text{у}} = 0{,}0001$.

Перемножением передаточных функций $W_{\text{др}}(s)$ и $W_{\text{у}}(s)$ получим передаточную функцию СТАТКОМ, вид ее аналогичен полученному в [15]:

$$W_{\text{ст}}(s) = W_{\text{с}}(s) * W_{\text{у}}(s).$$

Передаточная функция ПИД-регулятора представлена в виде выражения:

$$W_{\text{рег}}(s) = k_{\text{п}} + \frac{k_{\text{и}}}{s} + k_{\text{д}} s \ ,$$

где $k_{\text{п}}$ – коэффициент пропорциональной составляющей; $k_{\text{и}}$ – коэффициент интегральной составляющей; $k_{\text{д}}$ – коэффициент дифференциальной составляющей.

Параметры регулятора рассчитаны по методу Скогестада (Skogestad) [16].

Коэффициент усиления регулятора:

$$k_{\text{п}} = \frac{1}{k_{\text{у}} k_{\text{др}}} \cdot \frac{T_{\text{др}}}{T_{\text{у}} + \tau_c},$$

где τ_c – желаемое время регулирования, которое на практике обычно выбирается равным $T_{\text{у}}$ или чуть больше.

Постоянная времени интегрирования $\tau_{\text{и}}$ выбирается как минимальное значение из $T_{\text{ст}}$ и $4(\theta + \tau_c)$.

Постоянная времени дифференцирования:

$$\tau_{\text{д}} = \tau_c .$$

Настроечный параметр принят $\tau_c = 0{,}001$ с.

Интегральный коэффициент:

$$k_{\text{и}} = \frac{k_{\text{п}}}{\tau_{\text{и}}}.$$

Дифференциальный коэффициент

$$k_{\text{д}} = k_{\text{п}} \tau_{\text{д}}$$

Рассчитанные значения параметров: $k_{\text{п}}$=10,91; $\tau_{\text{и}} = 0{,}0044$; $\tau_d = T_{\text{у}} = 0{,}0001$; $k_{\text{и}} = 2479$; $k_{\text{д}} = 0{,}0011$.

Фактором эксперимента выбрано изменение $tg(\varphi)$ при снижении активной мощности и неизменной реактивной мощности нагрузки, что по характеру соответствует, например, переходу асинхронной машины в недогруженный режим.

Согласно положениям теоретических основ электротехники, выполнен расчет сопротивления нагрузки. В режиме с номинальным с $tg(\varphi_{\text{ном}})$ активное сопротивление нагрузки $R_{\text{н ном}}$=1,848 Ом, индуктивность нагрузки $L_{\text{н ном}}$ = 0,0044 Гн. В режиме с номинальной реактивной мощностью и минимальным $tg(\varphi_{\text{мин}})$ активное сопротивление нагрузки $R_{\text{н мин}}$=1,925 Ом, индуктивность нагрузки $L_{\text{н мин}}$ = 0,00625 Гн. Заданное значение напряжения u^*_{dc}=700 В. Заданный $tg(\varphi_{\text{з}})$=0,484. Переход в режим с минимальной активной мощностью происходит в 0,15 с отключением части нагрузки.

Результаты исследования

На Рис. 4 показаны осциллограммы фазы «А» напряжения u_1 и токов $i_{\text{н}}$, $i_{\text{л}}$, $i_{\text{ст}}$. Значения токов приведены к нормирующему значению 200 А, напряжение приведено к нормирующему значению 310 В. На Рис. 5 показано напряжение звена постоянного тока инвертора СТАТКОМ u_{dc}, оно приведено к значению 1000 В.

В режиме номинальной нагрузки с 0 до 0,149 с:

– ток нагрузки номинальный $I_{\text{н}}$= 97,439; начальная фаза 40,5°, 0,0222 с;

– ток линии $I_{\text{л}}$=94,455; начальная фаза 27,9°;

– ток СТАТКОМ $I_{\text{ст}}$=23,207; начальная фаза 93,06°;

– время переходного процесса по току СТАТКОМ 0,006 с.

В режиме минимальной нагрузки с 0,15 до 0,3 с:

– ток нагрузки до $I_{\text{н}}$= 79,9 А; начальная фаза 50,4°;

– ток линии $I_{\text{л}}$=62,22 А; начальная фаза 28,8°;

– ток СТАТКОМ $I_{\text{ст}}$=33,23 А; начальная фаза 93,6°;

– время переходного процесса по току СТАТКОМ 0,0033 с.

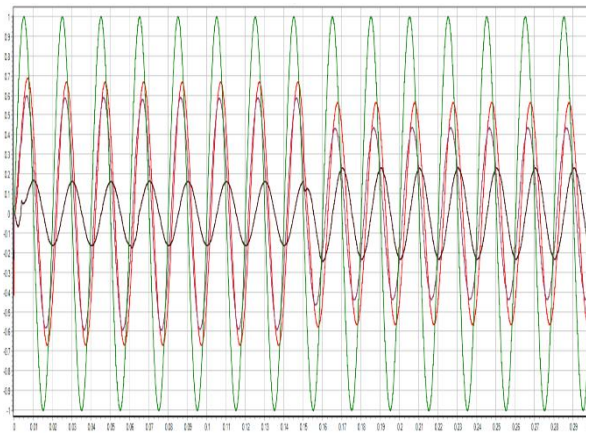

Рис. 4. Осциллограммы для фазы «А» в порядке убывания амплитуды: напряжения u_1, тока в нагрузке $i_{\text{н}}$, тока в линии $i_{\text{л}}$, тока в СТАТКОМ $i_{\text{ст}}$
Fig. 4. Oscillograms for phase "A" in descending order of amplitude: voltage u_1, load current $i_{\text{н}}$, line current $i_{\text{л}}$, and STATCOM current $i_{\text{ст}}$

Осциллограмма изменения напряжения u_{dc} представлена на Рис. 5. Переходный процесс в режиме номинальной нагрузки длится 0,13 с при пиковом напряжении на конденсаторе 1000 В и установившемся значении 695 В. Переходный процесс в режиме с минимальной нагрузкой длится 0,05с (с 0,15 с до 0,20 с) при колебаниях напряжения от 660 до 720 В и установившемся значении 700 В.

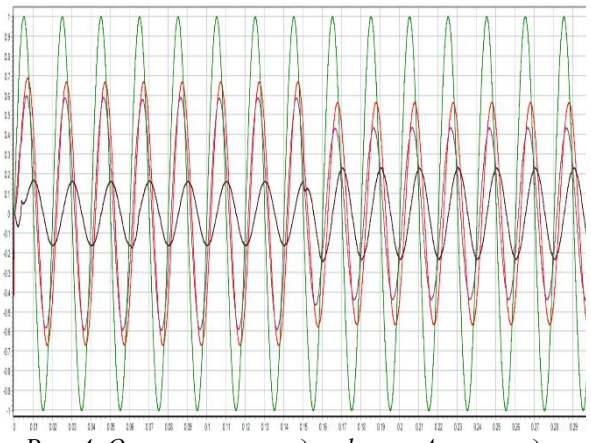

Рис. 4. Осциллограммы для фазы «А» в порядке убывания амплитуды: напряжения u_1, тока в нагрузке $i_н$, тока в линии $i_л$, тока в СТАТКОМ $i_{ст}$
Fig. 4. Oscillograms for phase "A" in descending order of amplitude: voltage u_1, load current $i_н$, line current $i_л$, and STATCOM current $i_{ст}$

Обсуждение

Моделирование начинается с режима с номинальной нагрузкой. СТАТКОМ в работе с момента включения.

В режиме номинальной нагрузки в период времени с 0 до 0,149 с действующее значение тока в линии меньше действующего значения тока в нагрузке. Ток в линии меньше отстает по фазе от напряжения сети по сравнению с током нагрузки, что подтверждает способность СТАТКОМ компенсировать реактивную мощность. Переходный процесс по току СТАТКОМ длится меньше 0,005 с, соответственно, приведение к заданному значению тока в линии занимает меньше четверти периода.

Переходный процесс по напряжению u_{dc} длится 0,13 с, такая длительность объясняется нулевым зарядом конденсатора в первый момент времени.

В период времени от 0 до 3,5 мс происходит заряд конденсатора звена постоянного тока инвертора СТАТКОМ. Пиковое напряжение на конденсаторе достигает 1000 В в момент t=3,5 мс, что является допустимым. При установившемся значении напряжения на конденсаторе 695 В отклонение составляет 0.714%. Пиковое значение напряжения на конденсаторе возможно снизить включением на время заряда токоограничивающего резистора в звено постоянного тока, либо плавным изменением сигнала задания. При значительном отклонении напряжения u_{dc} от заданного значения искажается форма тока СТАТКОМ, так как в таком режиме значительная часть тока СТАТКОМ идет на заряд конденсатора. После заряда конденсатора и при напряжении от 660 до 720 В ток СТАТКОМ становится синусоидальным.

В момент времени 0,15 с происходит отключение части нагрузки, при этом активная мощность уменьшается, а реактивная остается неизменной. Это приводит к снижению действующего значения тока нагрузки и к увеличению его начальной фазы. Коэффициент нагрузки ухудшается до значения $tg(\varphi_{мин})$. Ток компенсации СТАТКОМ становится больше из-за снижения активной мощности и неизменного $tg(\varphi_з)$. Действующее значение тока в линии уменьшается, начальная фаза остается практически неизменной по сравнению с режимом номинальной нагрузки за счет поддержания СТАТКОМ заданного значения $tg(\varphi_з)$. Отклонение по начальной фазе тока в линии составляет 3,23%. Переходный процесс по току СТАТКОМ длится меньше 0,005 с.

Переходный процесс в режиме с минимальной нагрузкой длится 0,05с (с 0,15 с до 0,20 с) при колебаниях напряжения от 660 до 720 В и установившемся значении 700 В. При таких значениях напряжения на конденсаторе форма тока СТАТКОМ синусоидальна.

Результаты моделирования демонстрируют, что применение СТАТКОМ позволяет динамически компенсировать реактивную мощность, разгрузить линию электропередачи от реактивной составляющей тока (ток в линии снижен в первом случае с 97,439 до 94,455 А; во втором с 79,9 до 62,22 А).

Устойчивость переходных процессов по току СТАТКОМ и напряжению на конденсаторе подтверждает корректность методики определения параметров ПИД-регуляторов по передаточным функциям отдельных звеньев СТАТКОМ. А быстродействие системы подтверждает возможность реализации системы управления инвертором на основе векторного управления в d-q координатах.

Выводы

При помощи СТАТКОМ возможно динамически регулировать реактивную мощность в узле сети. Предложенная модель устойчиво работает при заданных для эксперимента параметрах. Использование векторного управления в системе d–q обеспечивает быстродействие и точность регулирования.

Разработанная модель может быть использована для дальнейших исследований и применяться для анализа и оптимизации режимов работы СТАТКОМ в электроэнергетических системах, в том числе для анализа работы в условиях несимметричных и несинусоидальных режимов, а также при интеграции с другими устройствами FACTS.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Рожков А. И., Логвин В. В., Козлов А. В., Грудницкий О. М., Феклистов А. В. Об эффективности системы статических тиристорных компенсаторов на примере ОАО «БМЗ» // Литье и металлургия. 2017. № 1 (86). С. 80–85.

2. Ахмедов С. Б., Климов П. Л. Влияние распределенной генерации на базе возобновляемых источников энергии с использованием силовой электроники на резонанс на гармонических частотах // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2020. Т. 24. № 1. С. 97–111. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-97-111.

3. Мальцев И. А., Тюленев М. Е., Чабанов Е. А. Компенсация реактивной мощности в узле нагрузки с использованием устройства «СТАТКОМ» // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. 2022. № 41. С. 215–250. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.1.10.

4. Петухов Р. А., Сизганова Е. Ю., Сизганов Н. В., Филатов А. Н. К вопросу автоматизации управления потоками реактивной мощности в системах электроснабжения // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2018. Т. 22. № 7 (138). С. 123–146. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-123-146.

5. Сычев Ю. А. Фильтрокомпенсирующие устройства с активными преобразователями для повышения качества электроэнергии в электротехнических комплексах нефтегазовых предприятий. Диссертация ... доктора технических наук. Санкт-Петербург, 2021.

6. Беляевский Р. В. Повышение энергоэффективности территориальных сетевых организаций при оптимизации потребления реактивной мощности. Диссертация ... кандидата технических наук. Кемерово, 2015.

7. Уваров Г. Г., Зацепин Е.П. Статком как средство решения вопросов энергосбережения // Агротехника и энергообеспечение. 2018. № 4 (21). С. 157–164.

8. Правила устройства электроустановок (ПУЭ) : [нормативный документ] / утв. Минэнерго России. 7-е изд., доп. и испр. Москва : Издательство НЦ ЭНАС, 2020. 464 с.

9. Кабели и провода. Технические характеристики [Электронный ресурс] // Справочник. 2010. URL: https://eti.su/articles/spravochnik/spravochnik_1749.html (дата обращения: 05.05.2026).

10. Бурман А. П., Розанов Ю. К., Шакарян Ю. Г. Управление потоками электроэнергии и повышение эффективности электроэнергетических систем. Москва : Издательство МЭИ, 2014. 312 с.

11. Каталог дросселей [Электронный ресурс] // Интернет-магазин промышленной электроники и автоматики «Delta-kip». 2024. URL: https://delta-kip.ru (дата обращения: 05.05.2026).

12. Усольцев В. К. Транзисторные импульсные преобразователи : учебно-методическое пособие для студентов направления подготовки 13.04.02 «Автоматизированные электротехнические комплексы и системы». Министерство образования и науки Российской Федерации, Дальневосточный федеральный университет, Инженерная школа. Владивосток : Дальневосточный федеральный ун-т, 2017. 47 с. ил., табл.; 30 см. ISBN 978-5-7444-4057-2.

13. Васильев А. С. Программно-технические средства всережимного моделирования в реальном времени статических синхронных компенсаторов в электроэнергетических системах : диссертация ... кандидата технических наук.Томск, 2013.

14. Мэк Р. Импульсные источники питания. Теоретические основы проектирования и руководство по практическому применению: пер. с англ. М. : Додэка-XXI, 2008. 272 с.

15. Астапович Ю. М., Радионова М. В., Митяшин Н. П. Построение передаточных функций автономных инверторов // Современные проблемы науки и образования. 2013. № 1. С. 152.

16. Демин И. О., Саблина Г. В. Исследование методов настройки параметров ПИД-регулятора // Автоматика и программная инженерия. 2020. № 1(31). С. 174–181.

© 2026 Авторы. Эта статья доступна по лицензии CreativeCommons «Attribution» («Атрибуция») 4.0 Всемирная (https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/)

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Об авторах:
Сытник Владимир Анатольевич, старший преподаватель, Кузбасский государственный технический университет имени Т. Ф. Горбачева, (650000, Россия, г. Кемерово, ул. Весенняя, 28), e-mail: sytnik.va@mail.ru

Заявленный вклад авторов:
Сытник Владимир Анатольевич – постановка исследовательской задачи, научный менеджмент, обзор соответствующей литературы, концептуализация исследования, сбор и анализ данных, обзор соответствующей литературы, выводы, написание текста.

Все авторы прочитали и одобрили окончательный вариант рукописи.

Original article

DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-32-40

Vladimir A. Sytnik

T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University

* for correspondence: sytnik.va@mail.ru

SIMULATION OF STATCOM OPERATION IN REACTIVE POWER COMPENSATION MODE

Abstract.
The article discusses the task of analyzing the operation of a static synchronous compensator (STATCOM) in the mode of reactive power compensation using the method of simulation modeling. The relevance of the study is due to the current trends in the development of electric power systems, characterized by an increase in the share of nonlinear and rapidly changing loads, as well as the integration of renewable energy sources, which leads to a deterioration in the quality of electricity and voltage fluctuations.
The simulation model of the STATCOM control system is implemented based on a two-loop automatic control system in the Simintech dynamic modeling environment. The power balance in the electrical network node is regulated by creating a STATCOM current that compensates for the reactive component of the load current. The compensation current is generated using vector control in the d–q coordinate system, which ensures high accuracy and fast response. The transition from the ABC coordinate system to the d-q coordinate system is performed using the Clark transformation. For the specified parameters of the electrical network, the installed power of the device is calculated, including the parameters of the inductor and capacitor of the power part. The PID controllers are configured using the Skogestad method, which ensures the required quality of transient processes and system stability in a wide range of operating modes. The simulation results demonstrate the effectiveness of the proposed model for dynamic reactive power compensation. The reduction of current in the power line due to the unloading of the reactive component is shown. The transient processes are characterized by high speed and accuracy. The developed simulation model provides the necessary accuracy and can be effectively used for analysis, optimization of STATCOM operation modes, and further research in the field of modern intelligent power systems.

Article info
Received:
26 May 2026

Accepted for publication:
01 September 2026

Accepted:
15 September 2026

Keywords: *STATCOM, reactive power compensation, simulation modeling, vector control, PID controller, Simintech*

For citation: Sytnik V.A. Simulation of STATCOM operation in reactive power compensation mode. Mining Equipment and Electromechanics, 2026; 4(186):32-40 (In Russ., abstract in Eng.). DOI: 10.26730/1816-4528-2026-4-32-40, EDN: MLNQRD

REFERENCES

1. Rozhkov A.I., Logvin V.V., Kozlov A.V., Grudnitskiy O.M., Feklistov A.V. On the efficiency of the static thyristor compensator system on the example of JSC "BMZ". *Lit'e i Metallurgiya.* 2017; 1(86):80-85.

2. Akhmedov S.B., Klimov P.L. Influence of distributed generation based on renewable energy sources using power electronics on resonance at harmonic frequencies. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2020; 24(1):97-111. DOI: 10.21285/1814-3520-2020-1-97-111.

3. Maltsev I.A., Tyulenev M.E., Chabanov E.A. Reactive power compensation in a load node using a STATCOM device. *Vestnik PNIPU. Elektrotekhnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniya.* 2022; 41:215-250. DOI: 10.15593/2224-9397/2022.1.10.

4. Petukhov R.A., Sizganova E.Yu., Sizganov N.V., Filatov A.N. On the issue of automation of reactive power flow control in power supply systems. *Vestnik Irkutskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta.* 2018; 22(7(138):123-146. DOI: 10.21285/1814-3520-2018-7-123-146.

5. Sychyov Yu.A. Filter-compensating devices with active converters for Improving power quality in electrical complexes of oil and gas enterprises. A dissertation submitted for the degree of Doctor of Technical Sciences. Saint Petersburg: Saint Petersburg Mining University; 2021. 365 p.

6. Belyaevskiy R.V. Improving the energy efficiency of eerritorial grid organizations by optimizing reactive power consumption. A dissertation submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences. Kemerovo; 2015.

7. Uvarov G.G., Zatsepin E.P. STATCOM as a means of solving energy saving issues. *Agrotekhnika i energoobespechenie.* 2018; 4(21):157-64.

8. Rules for the installation of electrical installations (PUE): [regulatory document] / approved by the Ministry of Energy of Russia. 7th ed., ext. and rev. Moscow: NTs ENAS Publishing House; 2020. 464 p.

9. Cables and wires. Technical characteristics. *Handbook*. [Internet]. 2010. URL: https://eti.su/articles/spravochnik/spravochnik_1749.html (accessed: May 5, 2026).

10. Burman A.P., Rozanov Yu.K., Shakaryan Yu.G. Management of electricity flows and increasing the efficiency of electric power systems. Moscow: MEI Publishing House; 2014. 312 p.

11. Catalog of chokes. Internet store of industrial electronics and automation "Delta-kip". [Internet].

2024. URL: https://delta-kip.ru (accessed: May 5, 2026).

12. Usoltsev V.K. Transistor pulse converters: a textbook. Ministry of Education and Science of the Russian Federation, Far Eastern Federal University, School of Engineering. Vladivostok: Far Eastern Federal University; 2017. 47 p.

13. Vasil'ev A.S. Software and hardware for all-mode real-time simulation of static synchronous compensators in electric power systems: A dissertation submitted for the degree of Candidate of Technical Sciences. Tomsk; 2013. 165 p.

14. Mack R. Switching power supplies: theoretical foundations of design and a practical application guide / translated from English. Moscow: Dodeka-XXI; 2008. 272 p.

15. Astapovich Yu.M., Radionova M.V., Mityashin N.P. Construction of transfer functions of autonomous inverters. *Sovremennye problemy nauki i obrazovaniya.* 2013; 1:152.

16. Demin I.O., Sablina G.V. Investigation of methods for setting PID controller parameters. *Avtomatika i programmnaya inzheneriya.* 2020; 1(31):174-181.

© 2026 The Authors. This is an open access article under the CC BY license (http://creativecommons.org/licenses/by/4.0/).

The authors declare no conflict of interest.

About the author:
Vladimir A. Sytnik, Graduate student, Senior Lecturer, T.F. Gorbachev Kuzbass State Technical University, (650000, Russian Federation, Kemerovo, Vesennyaya street, 28.), e-mail: sytnik.va@mail.ru

Contribution of the authors:
Vladimir A. Sytnik – research problem statement; scientific management, reviewing the relevant literature; conceptualization of research, data collection, data analysis, reviewing the relevant literature, drawing the conclusions, writing the text.

Authors have read and approved the final manuscript.