

УДК 621.31

**ПОДДЕРЖАНИЕ НАПРЯЖЕНИЯ В УЗЛЕ СЕТИ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ  
СТАТКОМ: ФИЗИКО-ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ АСПЕКТЫ И  
ПРЕИМУЩЕСТВА ПЕРЕД ТИРИСТОРНЫМИ КОМПЕНСАТОРАМИ****Глеб Артемович Кондулевич<sup>1</sup>, Владимир Анатольевич Сытник<sup>2</sup>, Кирилл  
Сергеевич Лашин<sup>3</sup>**<sup>1,2,3</sup> Кузбасский государственный технический университет имени Т.Ф.  
Горбачева, Кемерово, Россия

**Аннотация.** Статья посвящена исследованию применения статических компенсаторов реактивной мощности СТАТКОМ на базе IGBT-транзисторов для поддержания стабильности напряжения в узлах энергосистем. Рассмотрены физические принципы работы устройства, математические модели регулирования и преимущества перед тиристорными компенсаторами (СТК). Приведены примеры практического внедрения.

**Ключевые слова.** СТАТКОМ, реактивная мощность, качество электроэнергии, напряжение, высшие гармоники, векторное управление, IGBT-транзисторы.

Современные энергосистемы сталкиваются с растущими вызовами, связанными с обеспечением стабильности напряжения в условиях динамично меняющихся нагрузок, интеграции возобновляемых источников энергии (ВИЭ) и увеличения доли нелинейных потребителей [1]. Колебания реактивной мощности, вызванные резкими изменениями спроса, неравномерной генерацией ВИЭ и инерционностью традиционных систем компенсации, приводят к недопустимым просадкам или перенапряжениям в узлах сети [2]. Эти явления снижают качество электроэнергии, увеличивают потери и создают риски аварийных отключений. Традиционные тиристорные компенсаторы (СТК), хотя и эффективны для ступенчатой регулировки, обладают ограниченной скоростью отклика и не способны подавлять высшие гармоники, что усугубляет проблему в условиях высокочастотных возмущений [3]. В этой связи актуальной задачей становится внедрение статических компенсаторов реактивной мощности СТАТКОМ на базе IGBT-транзисторов, обеспечивающих непрерывное и точное управление напряжением за счёт адаптивного формирования реактивной составляющей мощности [3, 4].

Принцип действия СТАТКОМ основан на генерации или поглощении реактивной мощности посредством управляемого инвертора, преобразующего постоянное напряжение конденсатора в переменное с регулируемой амплитудой и фазой. Схема подключения СТАТКОМ к узлу электрической сети приведена на рис. 1.

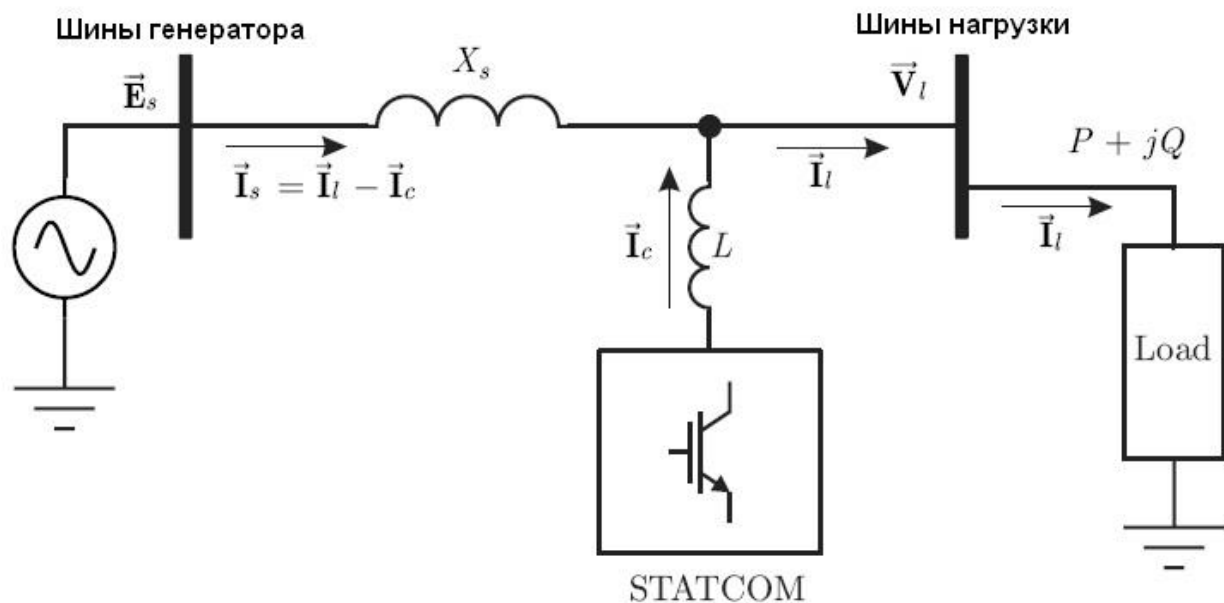


Рис. 1. Схема подключения СТАТКОМ к узлу электрической сети

Ключевым элементом является векторное управление, позволяющее динамически корректировать выходное напряжение устройства  $\dot{U}_{\text{СТАТКОМ}}$  относительно сетевого  $\dot{U}_{\text{СЕТЬ}}$  для компенсации отклонений. Уравнение для напряжения в узле подключения СТАТКОМ можно представить, как:

$$\dot{U}_{\text{УЗЕЛ}} = \dot{U}_{\text{СЕТЬ}} - \dot{I}_s X_s + \Delta \dot{U}_{\text{СТАТКОМ}}, \quad (1)$$

где  $\Delta \dot{U}_{\text{СТАТКОМ}} = k * \dot{I}_c$  – корректирующая составляющая напряжения, зависящая от коэффициента регулирования  $k$  и тока компенсации [5], генерируемого компенсатором,  $\dot{I}_s$  – ток в ЛЭП.

Реактивная мощность  $Q$ , выдаваемая СТАТКОМ в узел сети, определяется величиной напряжения в узле и выходным напряжением устройства, а также разностью фаз ( $\delta$ ) между этими напряжениями:

$$Q = \frac{U_{\text{УЗЕЛ}} * (U_{\text{УЗЕЛ}} - U_{\text{СТАТКОМ}} * \cos(\delta))}{X}, \quad (2)$$

где  $X$  – фазное сопротивление преобразователя. При  $\delta > 0$  устройство генерирует емкостную мощность, повышая напряжение, а при  $\delta < 0$  – индуктивную, снижая его. Использование ШИМ-модуляции с частотой до нескольких кГц позволяет минимизировать гармонические искажения ( $\text{THD} < 2\%$ ), что критично для чувствительного оборудования.

Одним из ключевых преимуществ СТАТКОМ перед тиристорными компенсаторами (СТК) является возможность точной установки целевого значения напряжения (уставки) в узле сети. Это достигается благодаря полностью управляемым IGBT-транзисторам, которые позволяют генерировать или поглощать реактивную мощность  $Q$  в непрерывном режиме.

Изменение напряжения в узле зависит от значения компенсации реактивной мощности, что описывается формулой:

$$U_{\text{УСТАВКИ}} - U_{\text{УЗЕЛ}} \approx \frac{Q \cdot X_{\text{ЛЭП}}}{U_{\text{УСТАВКИ}}}, \quad (3)$$

СТАТКОМ позволяет напрямую задавать  $U_{\text{УСТАВКИ}}$  через систему управления, которая автоматически вычисляет необходимую  $Q$  для компенсации отклонений. Например, если напряжение падает ниже уставки ( $U_{\text{УЗЕЛ}} < U_{\text{УСТАВКИ}}$ ), устройство генерирует емкостную мощность ( $Q > 0$ ), увеличивая  $U_{\text{УЗЕЛ}}$  до заданного значения.

Пусть требуется поддерживать  $U_{\text{УСТАВКИ}} = 10,5$  кВ. При падении напряжения до 10,2 кВ ( $\Delta U = 0,3$  кВ) и  $X_{\text{ЛЭП}} = 2$  Ом, необходимое для компенсации значение реактивной мощности составит:

$$Q \approx \frac{\Delta U \cdot U_{\text{УСТАВКИ}}}{X_{\text{ЛЭП}}} = \frac{(0,3 \cdot 10^{-3}) \cdot 10,5 \cdot 10^3}{2} = 1,575 \text{ МВар} \quad (4)$$

СТАТКОМ мгновенно корректирует  $\delta$  и амплитуду  $\bar{U}_{\text{СТАТКОМ}}$ , возвращая  $U_{\text{УЗЕЛ}}$  к 10,5 кВт.

В СТК регулировка напряжения осуществляется дискретно через подключение/отключение конденсаторных батарей или реакторов. Реактивная мощность здесь определяется уравнением:

$$Q_{\text{СТК}} = n \cdot Q_{\text{СТУПЕНЬ}}, \quad (5)$$

где  $n$  – число активных ступеней, а  $Q_{\text{СТУПЕНЬ}}$  – мощность одной ступени. Это приводит к запаздыванию (до 100 мс) и колебаниям напряжения возле значения уставки [6]. Кроме того, СТК не может подавлять высшие гармоники, так как тиристоры коммутируют целые секции конденсаторов, а не формируют синусоиду [3].

Преимущества СТАТКОМ:

1. Непрерывное управление: время отклика не превышает 1 мс, что позволяет компенсировать субцикловые возмущения.
2. Подавление гармоник: алгоритмы пространственно-векторной модуляции (SVPWM) обеспечивают синтез почти идеальной синусоиды (THD < 2%).
3. Энергоэффективность: КПД системы достигает 98% против 92–94% у СТК.
4. Компактность: отсутствие громоздких фильтров сокращает занимаемую площадь.

### **Заключение**

Внедрение СТАТКОМ в энергосистемы решает проблему поддержания напряжения за счёт скорости, точности и адаптивности. Устройство эффективно подавляет фликер-эффект, стабилизирует сети с высокой долей ВИЭ и снижает эксплуатационные затраты. Возможность задания уставки напряжения, недоступная для СТК, делает СТАТКОМ незаменимым инструментом для современных энергосистем. Дальнейшие исследования могут быть направлены на интеграцию СТАТКОМ в цифровые подстанции с использованием IoT-технологий и машинного обучения для прогнозирования нагрузок.

### **Список источников**

1. Качество электроэнергии, источники и средства компенсации реактивной мощности в электроэнергетических системах : учебное пособие / С. Е. Герасимов, С. А. Иванов, А. А. Кузнецов [и др.]. — Санкт-Петербург : Санкт-Петербургский политехнический университет Петра Великого, 2021. — 100 с. — ISBN 978-5-7422-7361-5.
2. ГОСТ Р 54149-2010. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. — М. : Стандартинформ, 2012.
3. Приходько В.М., Ивлев М.А., Приходько И.В. Транзисторный компенсатор реактивной мощности // Силовая электроника. — 2017. — № 1. — С. 65–68. — URL: <https://power-e.ru/quality/tranzistornyj-kompensator/>
4. Ершов С.В., Карницкий В.Ю. Разработка системы адаптивного регулирования компенсации реактивной мощности // Известия ТулГУ. Технические науки. — 2014. — № 8. — С. 32–39.
5. Шидловский А.К., Федий В.С. Частотно-регулируемые источники реактивной мощности. — Киев : Наукова думка, 1980. — 304 с.
6. Рожков А.И., Логвин В.В., Козлов А.В. и др. Об эффективности системы статических тиристорных компенсаторов на примере ОАО «БМЗ» // Литье и металлургия. — 2017. — № 1. — С. 80–85. URL: <https://rep.bntu.by/handle/data/29338>

### **Информация об авторах**

**Г.А. Кондулевич** – студент кафедры электропривода и автоматизации.

**В.А. Сытник** – старший преподаватель кафедры электропривода и автоматизации.

**К.С. Лашин** – студент кафедры электропривода и автоматизации.

**Вклад авторов:** все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.