

## 2.4.3 Электроэнергетика

Научная статья

УДК 621.314

<https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.4.3>

## РАЗРАБОТКА ФАЗОПОВОРОТНОГО КОМПЛЕКСА ДЛЯ СЕТИ СВЕРХВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ

Сергей Александрович Ситников<sup>1\*</sup>, Николай Михайлович Шайтор<sup>2</sup>

- <sup>1,2</sup> Севастопольский государственный университет (д. 33, ул. Университетская, Севастополь, 299053, Российская Федерация)  
<sup>1</sup> Системный оператор Единой энергетической системы, филиал Объединенного диспетчерского управления энергосистем Юга (д. 26, ул. Подстанциионная, Пятигорск, Ставропольский край, 357506, Российская Федерация)  
<sup>1</sup> sergey5\_96@mail.ru  
<sup>2</sup> shaytor1950@mail.ru  
 \* Автор, ответственный за переписку

**Аннотация. Введение.** Бурное развитие дистанционного управления и цифровых технологий в энергетике являются двигателем внедрения новых подходов и методов в управлении энергосистемой. Одно из направлений развития энергетического комплекса – повышение его устойчивости и надежности. Для выполнения этой задачи в данной работе разработаны технические решения, направленные на повышение эффективности фазоповоротного комплекса с тиристорным управлением и интеграцию устройства в структуру электрической сети. Благодаря тиристорному управлению стало возможным погружение данного комплекса в структуру дистанционного управления энергосистемой, что позволяет задействовать его при оперативном и противоаварийном управлении. Разработанные решения являются актуальными в настоящее время. **Цель.** Исследование существующих фазоповоротных комплексов и разработка схемы и алгоритма тиристорного управления. **Материалы и методы.** Исследование построено на анализе работы существующих фазоповоротных систем и их алгоритмов управления, создании модели в программных комплексах MatLAB и RastrWin3 и исследования их влияния на параметры электроэнергетического режима. **Результаты и обсуждение.** В ходе работы обнаружены существенные преимущества тиристорной системы управления, позволяющие внедрять фазоповоротный комплекс в структуру сложной сети сверхвысокого напряжения, а также использовать данный комплекс при противоаварийном управлении. **Заключение.** По итогам проведенного исследования можно сделать вывод о том, что разработанный фазоповоротный комплекс с тиристорным управлением эффективно регулирует перетоки активной мощности по сети сверхвысокого напряжения, повышает устойчивость энергосистемы и повышает надежность работы сетевого оборудования. По итогам проведенных исследований, намечены дальнейшие цели по разработке методов повышения устойчивости за счет применения фазоповоротных комплексов.

**Ключевые слова:** фазоповоротный комплекс, тиристорный коммутатор, система управления, последовательный трансформатор, шунтовой трансформатор

**Для цитирования:** Ситников С. А., Шайтор Н. М. Разработка фазоповоротного комплекса для сети сверхвысокого напряжения // Вестник Северо-Кавказского федерального университета. 2025. № 4 (109). С. 27–41. <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.4.3>

**Конфликт интересов:** авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

Статья поступила в редакцию 26.04.2025;  
 одобрена после рецензирования 05.06.2025;  
 принята к публикации 11.06.2025.

Research article

## DEVELOPMENT OF PHASE-SHIFTING COMPLEX FOR AN ULTRA-HIGH VOLTAGE NETWORK

Sergey A. Sitnikov<sup>1\*</sup>, Nikolay M. Shaytor<sup>2</sup>

- <sup>1,2</sup> Sevastopol State University (33, Universitetskaya Str., Sevastopol, 299053, Russian Federation)  
<sup>1</sup> Russian Power System Operator, branch of the Combined Dispatch Management of the Energy System of the South (26, Substationskaya St., Pyatigorsk, Stavropol Territory, 357506, Russian Federation)  
<sup>1</sup> sergey5\_96@mail.ru  
<sup>2</sup> shaytor1950@mail.ru  
 \* Corresponding author

**Abstract. Introduction.** Rapid development of remote control and digital technologies in the energy sector is driving the introduction of new approaches and methods in energy system management. One of the directions of development of the energy complex is to increase its stability and reliability. To accomplish this task, technical solutions have been developed in this work aimed at increasing the efficiency of the phase-shifting complex with thyristor control and integrating the device into the structure of the electrical network. Thanks to thyristor control, it became possible to immerse this complex in the structure of remote control of the power system, which allows it to be used for operational and emergency management. The developed solutions are currently relevant. **Goal.** Investigation of existing phase-shifting complexes and development of a thyristor control circuit and algorithm. **Materials and methods.** The research is based on the analysis of the operation of existing phase-shifting systems and their control algorithms, the creation of a model in the software complexes MatLAB and RastrWin3 and the study of their influence on the parameters of the elec-

tric power regime. **Results and discussion.** In the course of the work, significant advantages of the thyristor control system were discovered, allowing the introduction of a phase-shifting complex into the structure of a complex ultrahigh voltage network, as well as the use of this complex in emergency management. **Conclusion.** Based on the results of the study, it can be concluded that the developed phase-shifting complex with thyristor control effectively regulates the flow of active power through the ultrahigh voltage network, increases the stability of the power system and increases the reliability of network equipment. Based on the results of the conducted research, further goals have been outlined for the development of methods to increase stability through the use of phase-shifting complexes.

**Keywords:** phase-shifting complex, thyristor switch, control system, serial transformer, shunt transformer

**For citation:** Sitnikov SA, Shaytor NM. Development of phase-shifting complex for an ultra-high voltage network. Newsletter of North-Caucasus Federal University. 2025;4(109):27-41. (In Russ.). <https://doi.org/10.37493/2307-907X.2025.4.3>

**Conflict of interest:** the authors declare no conflicts of interests.

The article was submitted 26.04.2025;

approved after reviewing 05.06.2025;

accepted for publication 11.06.2025.

**Введение / Introduction.** Заданный вектор цифровизации энергетики ставит новые задачи перед наукой и промышленностью. За последние десять лет в вопросе цифровизации российская энергетика сделала большой шаг вперед. Повсеместно ведется внедрение технологий дистанционного управления из диспетчерских центров системного оператора. Данная технология позволяет управлять с рабочего места диспетчера энергосистемы коммутационными аппаратами, функциями релейной защиты и автоматики (РЗА), активной и реактивной мощностью станций на основе возобновляемых источников энергии (ВИЭ), а также возможно управление мощностью тепловых и гидравлических станций (ТЭС и ГЭС).

Тенденции развития энергетического комплекса диктуют необходимость внедрения новых технических решений, направленных на повышение эффективности генерации, распределения и потребления электрической энергии. Так, на базе диспетчерских центров внедряются цифровые системы мониторинга запаса устойчивости, позволяющие полноценно использовать пропускную способность электрической сети.

Вопросы устойчивости и надежности электроэнергетической системы эффективно решаются за счет внедрения новых управляемых систем передачи переменного тока (устройств FACTS), микропроцессорных комплексов противоаварийной автоматики (ПА). Все упомянутые выше мероприятия направлены на создание структуры активно-адаптивной электрической сети. Отличительными особенностями такой системы станут: высокая надежность, устойчивость, управляемость и экономическая эффективность [1–3].

Одной из перспективных разработок в области устройств FACTS является создание фазоповоротного комплекса (ФПК). Данное устройство имеет большой спектр возможных применений: регулирование перетоков активной мощности в сети, повышение устойчивости энергосистемы, повышение пропускной способности сети, снижение потерь в сети и даже использование в противоаварийном управлении [3–5]. Однако существующие ФПК имеют ряд недостатков, ограничивающих их применение: узкий диапазон регулирования, слабое быстроедействие, ненадежность конструкции [5, 6]. Цель данной работы – исследование и разработка технических решений, направленных на повышение эффективности ФПК и интеграцию устройства в структуру электрической сети.

**Материалы и методы исследований / Materials and methods of research.** Обзор существующих технических решений. Первым проектом по внедрению фазоповоротного комплекса на территории стран СНГ стала установка фазоповоротного трансформатора (ФПТ) на ПС 500 кВ Ульке в объединенной энергосистеме Казахстана в 2009 году. Данное устройство, установленное в цепи автотрансформатора 500/220 кВ, позволило увеличить загрузку ВЛ 500 кВ Житкара – Ульке, тем самым разгрузить сеть 220 кВ, снизить потери в сети и стабилизировать уровни напряжения [6].

Аналогичной конструкции устройство было введено в эксплуатацию в 2019 году на Волжской ГЭС, что позволило обеспечить выдачу мощности станции за счет перераспределения выдаваемой мощности из сети 220 кВ в сеть 500 кВ. При этом, по расчетам, без ФПК требовалось ограничение выдачи мощности Волжской ГЭС до 700 МВт (~25 % от установленной мощности) в зависимости от сезона и режима нагрузок энергосистемы [7].

Конструктивно фазоповоротный комплекс Волжской ГЭС состоит из двух частей: группы однофазных автотрансформаторов связи (3×АОДЦТН-267000/500/220) (АТ) и вновь вводимого вольтодобавочного трансформатора ТДЦТНФ-195260/220-У1 (ВДТ) производства ООО «Силовые машины – Тошиба. Высоковольтные трансформаторы». Трёхфазная схема фазоповоротного комплекса представлена на рис. 1.

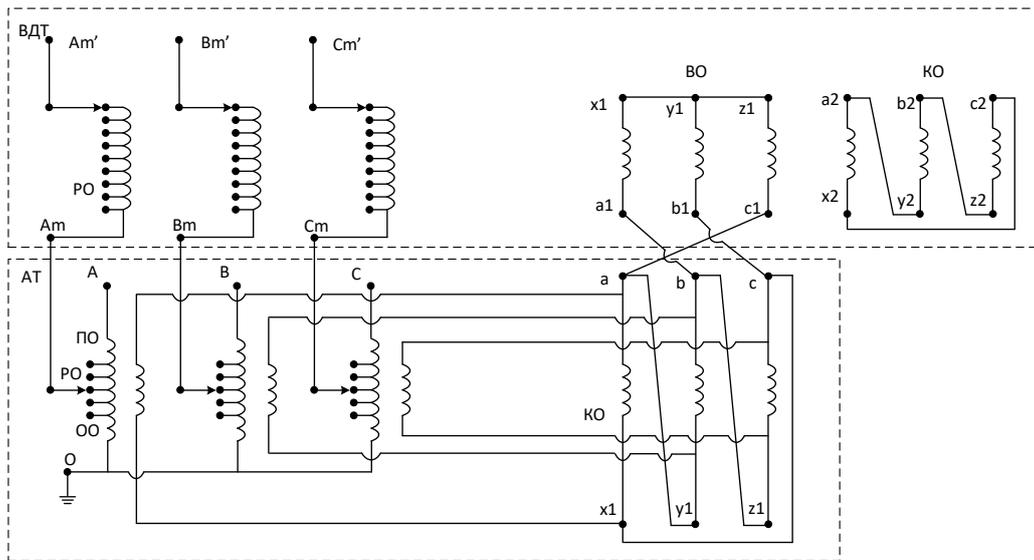


Рис. 1. Трёхфазная схема фазоворотного комплекса:

PO – регулировочная обмотка РПН; ПО – последовательная обмотка АТ; ОО – общая обмотка АТ;  
 ВО – возбуждающая обмотка; КО – компенсирующая обмотка /

Fig. 1. Three-phase circuit of the phase-reversal complex: PO – adjusting winding RPN; PO – sequential winding AT; OO – the general winding of AT; VO – the exciting winding; KO – the compensating winding.

\*Источник: составлено авторами по данным [7] / Source: compiled by the authors according to data [7]

Оба трансформатора имеют устройства, обеспечивающие регулирование напряжения под нагрузкой (РПН) за счет изменения количества витков. Устройство РПН, установленное на стороне среднего напряжения АТ, предназначено для продольного регулирования напряжения на зажимах АТ в пределах  $\pm 8 \times 1,5 \%$ . Устройство РПН, установленное на ВДТ, предназначено для поперечного регулирования напряжения, которое изменяет величину потока мощности через АТ. Число ступеней регулирования ВДТ составляет 14 (у АТ – 17 ступеней), при этом диапазон регулирования угла изменяется в пределах от 4 до 13,57 электрических градусов при номинальном напряжении СН автотрансформатора АОДЦТН-267000/500/220 в режиме холостого хода [7].

Для описания регулирующего эффекта от использования ФПК рассмотрим простейшую схему, приведенную на рис. 2. Здесь показаны две параллельные ветви сети одного класса напряжения с индуктивными сопротивлениями  $X_1$  и  $X_2$ .

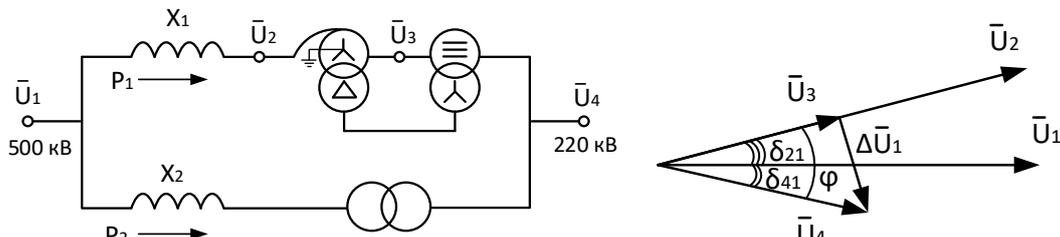


Рис. 2. Схема замещения участка сети и векторная диаграмма напряжений /

Fig. 2. Network section replacement scheme and vector voltage diagram

\*Источник: составлено авторами по данным [7] / Source: compiled by the authors according to data [7]

На рис. 2 приведена схема замещения сети и векторная диаграмма напряжений при наличии ФПК в верхней ветви схемы. При передаче активных мощностей  $P_1$  и  $P_2$  без ФПК в направлении, указанном на рис. 2, вектор напряжения  $\bar{U}_1$  опережал бы векторы  $\bar{U}_2$  и  $\bar{U}_4$ , так как активная мощность передавалась бы от опережающего вектора к отстающему (на рис. 2 не показано) [7].

Для снижения передаваемой мощности  $P_1$  через автотрансформатор в сторону 220 кВ, и увеличения перетоков мощности  $P_2$  по шунтирующей связи, необходимо уменьшить взаимный угол между вектором  $\bar{U}_2$ , принимающего узла, и вектором  $\bar{U}_1$  передающего узла или даже выполнить опережение

вектором  $\bar{U}_2$  вектора  $\bar{U}_1$ . Данную задачу возможно решить путем ввода дополнительного угла  $\varphi$  с помощью ФПК, так чтобы  $|\varphi| > |\delta_{41}|$ . При некотором заданном угле  $\varphi$  активные мощности будут равны

$$P_1 = \frac{U_1 U_2}{x_1} \sin \delta_{21} = \frac{U_1 U_2}{x_1} \sin(\delta_{21} - \varphi), P_2 = \frac{U_1 U_4}{x_2} \sin \delta_{41}.$$

Из-за чисто поперечного регулирования, которое осуществляется изменением модуля ортогонального вектора напряжения  $\Delta U$ , вместе с изменением фазы вектора напряжения  $\bar{U}_4$  происходит увеличение его модуля. Такая особенность создает угрозу превышения допустимых уровней напряжения в сети при увеличении угла  $\varphi$  (рис. 3).

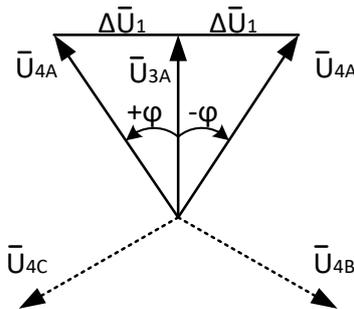


Рис. 3. Векторная диаграмма напряжений при чисто поперечном регулировании /  
Fig. 3. Vector stress diagram for purely transverse control

\*Источник: составлено авторами по данным [7] / Source: compiled by the authors according to data [7]

К недостаткам рассмотренного выше ФПК относится то, что реализованный в нем способ поперечного регулирования фазового сдвига ограничивает диапазон углов поворота фазы напряжения значением не более  $\pm 18$  град. эл. (недостаток связан с ограниченным числом отпаяк РПН). При значениях угла поворота фазы, превышающих  $\pm 18$  град. эл., модуль выходного напряжения ФПК начинает существенно превышать допустимые в линии электропередачи значения. Поэтому рассмотренное ФПК непригодно в случаях глубокого регулирования угла поворота фаз [8–10].

Другим недостатком является использование в качестве устройства РПН механических контакторных переключателей: прерывание тока в контакторном переключателе сопровождается возникновением дуги на контактах, что приводит к их износу и эрозии, а также загрязнению масла продуктами горения дуги, что делает необходимым регулярные проверки качества масла и периодическую его замену. Кроме того, на устройстве должны быть установлены специальные механизмы, предотвращающие нежелательные последствия в случае повреждения приводного вала. Все это снижает надежность и срок службы трехфазного высоковольтного коммутатора, к тому же, переключение РПН с контакта на контакт занимает определенное время (5–6 с), т. е. происходит достаточно медленно, что обуславливает его малое быстродействие [5, 9, 11].

*Фазоповоротный комплекс с тиристорным управлением.* Для обеспечения быстродействия регулирования угла опережения вектора напряжения разработан фазоповоротный комплекс с тиристорным управлением (ФПКТУ). Такая технология позволяет осуществлять продольно-поперечное регулирование, что, в свою очередь, дает возможность выполнить сдвиг фазы вектора напряжения более чем на 40 град. эл. без увеличения модуля напряжения [5, 9, 11].

Схема такого фазоповоротного комплекса приведена на рис. 4.

ФПКТУ состоит из:

- трехфазного серийного (последовательного) трансформатора Т2, вторичные обмотки которого включены в рассечку фаз высоковольтной линии электропередачи;
- шунтового (параллельного) трансформатора Т1, первичные обмотки которого соединены по схеме звезды, низковольтные выводы которой заземлены, высоковольтные выводы подключены к фазам высоковольтной линии электропередачи со стороны входа ФПУ или могут быть подключены к средней точке серийного трансформатора, а вторичные обмотки каждой фазы выполнены в виде гальванически развязанных обмоток, выводы которых подключены к входным клеммам трехфазного высоковольтного коммутатора;
- трехфазного высоковольтного коммутатора УТ (тиристорных ключей), обеспечивающего формирование вектора напряжения с необходимым углом поворота.

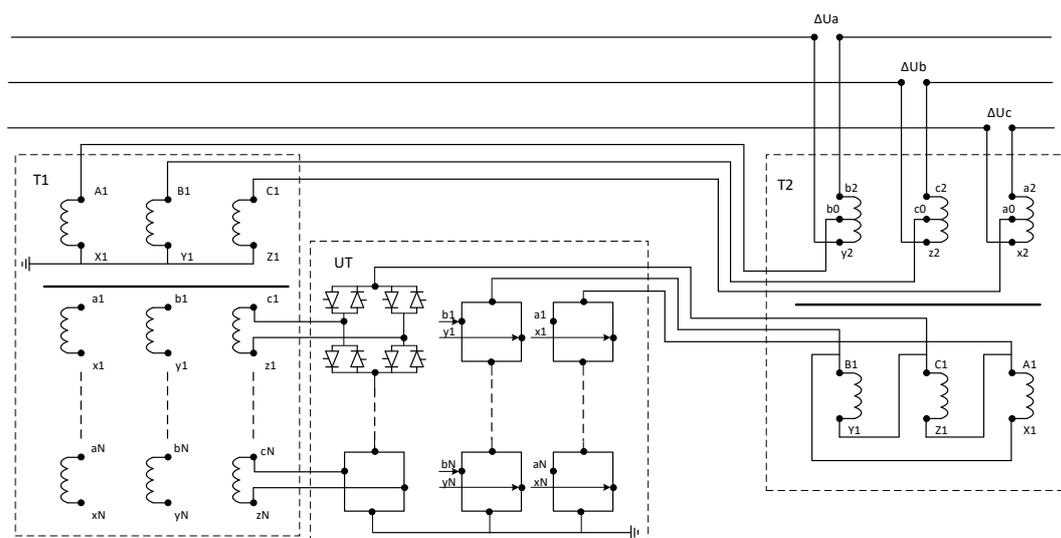


Рис. 4. Функциональная схема ФПКТУ / Fig. 4. Functional scheme of the FSCTR

\*Источник: составлено авторами по данным [5, 9] / Source: compiled by the authors according to data [5, 9]

Управление значением фазового сдвига выходного напряжения ФПКТУ осуществляется путём изменения состояний тиристорных мостов. Возможные состояния тиристорных мостов коммутатора приведены на рис. 5.

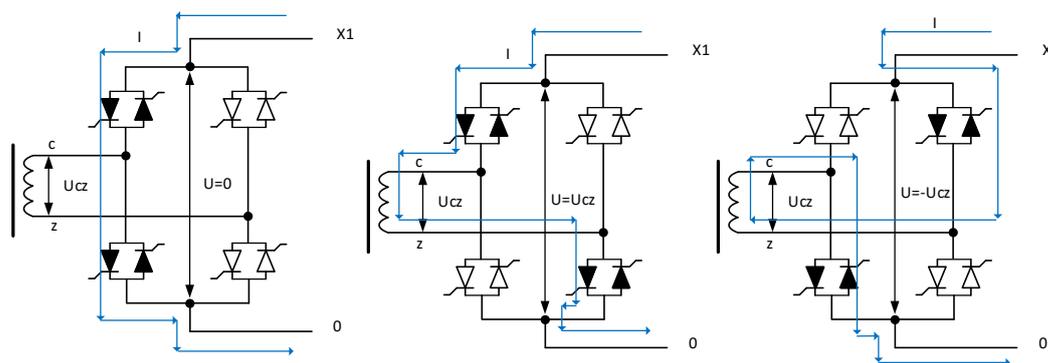


Рис. 5. Состояние тиристорных мостов ФПКТУ / Fig. 5. The condition of the FSCTR thyristor bridges

\*Источник: составлено авторами по данным [5, 9] / Source: compiled by the authors according to data [5, 9]

Каждое плечо моста содержит два встречно включённых тиристорных ключа, что обеспечивает возможность двухсторонней проводимости тока первичной обмотки серийного трансформатора. При одновременном включении вертикальных плеч одной стороны тиристорного моста (например, рис. 5а) коммутируемая им секция вторичной обмотки шунтового трансформатора исключается из контура протекания тока моста и, соответственно, не участвует в процессе формирования выходного напряжения ФПКТУ. Диагональная коммутация плеч позволяет включать соответствующую секцию вторичной обмотки шунтового трансформатора в контур первичной обмотки серийного трансформатора согласно (рис. 5б) и встречно (рис. 5в). Такой мостовой коммутатор позволяет при неизменной мощности и конструкции электромагнитных элементов ФПКТУ обеспечивать симметричное формирование как положительных, так и отрицательных углов фазового сдвига. Другие комбинации включения плеч мостов недопустимы, поскольку приводят к КЗ секции вторичной обмотки шунтового трансформатора. Если, например, каждая фаза вторичной обмотки шунтового трансформатора имеет по четыре изолированных секции, коммутируемых четырьмя тиристорными мостами, то за счёт описанных выше свойств тиристорных мостов в каждом направлении (положительном либо отрицательном) обеспечивается  $2^4$  ступеней фазового сдвига (т. е. 16 с учётом нуля). При соотношении числа витков секций вторичной обмотки шунтового трансформатора 1:2:4:8 обеспечивается равномерное изменение фазового сдвига между соседними ступенями [5, 9].

При аналогичной конструкции вторичной обмотки шунтового трансформатора РПН позволило бы получить всего по четыре ступени изменения фазового сдвига в каждом направлении.

Таким образом, мостовой коммутатор позволяет добиться существенно более высокой дискретности изменения фазового сдвига ФПКТУ. Полное изменение угла фазового сдвига на выходе ФПКТУ по каждой фазе, достигаемое за счёт изменения состояний тиристорных мостов, в предельном случае может быть реализовано на одном периоде сетевого напряжения, что не превышает 20 мс. При этом максимальное число коммутаций тиристорных ключей коммутатора не лимитируется, что позволяет существенно улучшить показатели надёжности устройства в целом [5, 9].

Совокупность рассмотренных особенностей ФПКТУ, включающая высокое быстродействие, высокую дискретность изменения фазового сдвига, повышенную надёжность, даёт возможность формировать практически любой закон изменения фазового сдвига напряжения на выходе ФПКТУ. В конечном счёте это позволяет получить качественно новые характеристики ФПКТУ, необходимые для использования устройства в активно-адаптивных электрических сетях.

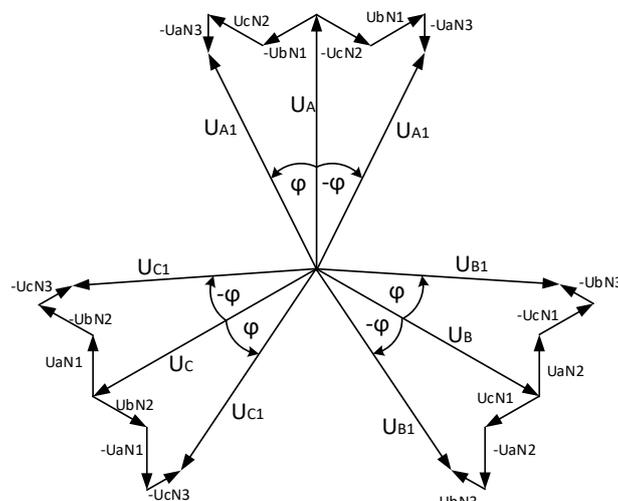


Рис. 6. Векторная диаграмма напряжений при регулировании взаимного угла /  
Fig. 6. Vector diagram of stresses during adjustment of the mutual angle.

\*Источник: составлено авторами по данным [9, 11] / Source: compiled by the authors according to data [9, 11]

Задачи, которые позволяет решать ФПКТУ направлены на:

- перераспределение потоков мощности в сложных замкнутых электрических сетях;
- увеличение пропускной способности сечений энергосистемы;
- ограничение перегрузок ЛЭП, шунтированных ЛЭП высшего напряжения;
- снижение потерь активной мощности;
- повышение статической и динамической устойчивости энергосистемы;
- удаление гололедо-изморозевых отложений с воздушных ЛЭП.

Современные разработки направлены на оптимизацию и упрощение конструкции серийного и шунтового трансформаторов, а также тиристорного коммутатора и системы его управления для снижения конечной стоимости устройства и повышения КПД. Ведется работа по созданию методик выбора оптимальных улов регулирования ФПКТУ, а также разработки по внедрению фазопоротных комплексов в структуру энергосистемы для повышения надёжности и устойчивости [5, 9, 12, 13].

**Результаты исследований и их обсуждение / Research results and their discussion.** Разработка схемы управления и математической модели ФПКТУ. Опираясь на современные тенденции развития энергетики, а также используя опыт в области разработки фазопоротных комплексов, предложена эффективная схема, обеспечивающая поворот фазы вектора напряжения в диапазоне углов от  $-50$  до  $+50$  град. эл. Такое глубокое регулирование фазы вектора напряжения в точке установки ФПКТУ позволит решить ряд сложных задач по управлению и оптимизации режима энергосистемы, а также повысит ее надёжность и устойчивость.

Изменение состояния (включено / отключено) тиристорных ключей выполнено за счет команд системы управления, следующих заданной логике. Логика системы управления УТ позволяет для каждой

ступени ФПКТУ собрать определённую схему соединения вторичных обмоток параллельного трансформатора и выполнить необходимую схему чередования фаз.

Векторная диаграмма напряжений, поясняющая принцип поворота фазы напряжения, приведена на рис. 7.

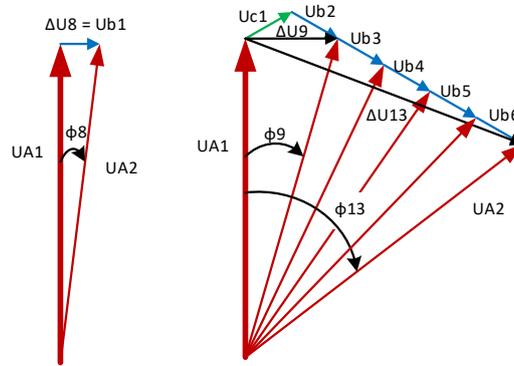


Рис. 7. Векторные диаграммы напряжений ступеней регулирования ФПКТУ на примере фазы А / Fig. 7. Vector diagrams of the voltages of the control stages of the FSCTR using the example of phase A.

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

$W_1$  – количество витков первичной обмотки,  $w_1$  – ... –  $w_6$  – количество витков вторичной обмотки. При этом вторичные обмотки Т1 равны по количеству витков, что делает возможным создавать различные комбинации схем соединений с использованием одних и тех же обмоток в разных ступенях регулирования.

Разработанный ФПКТУ предполагает наличие параллельного трансформатора (Т1) с шестью вторичными обмотками с равным числом витков, последовательного трансформатора (Т2) вторичная обмотка, которого включена в рассечку фаз линии 500 кВ, а также тиристорного коммутатора (УТ). Схема соединений обмоток ФПКТУ приведена на рис. 8.

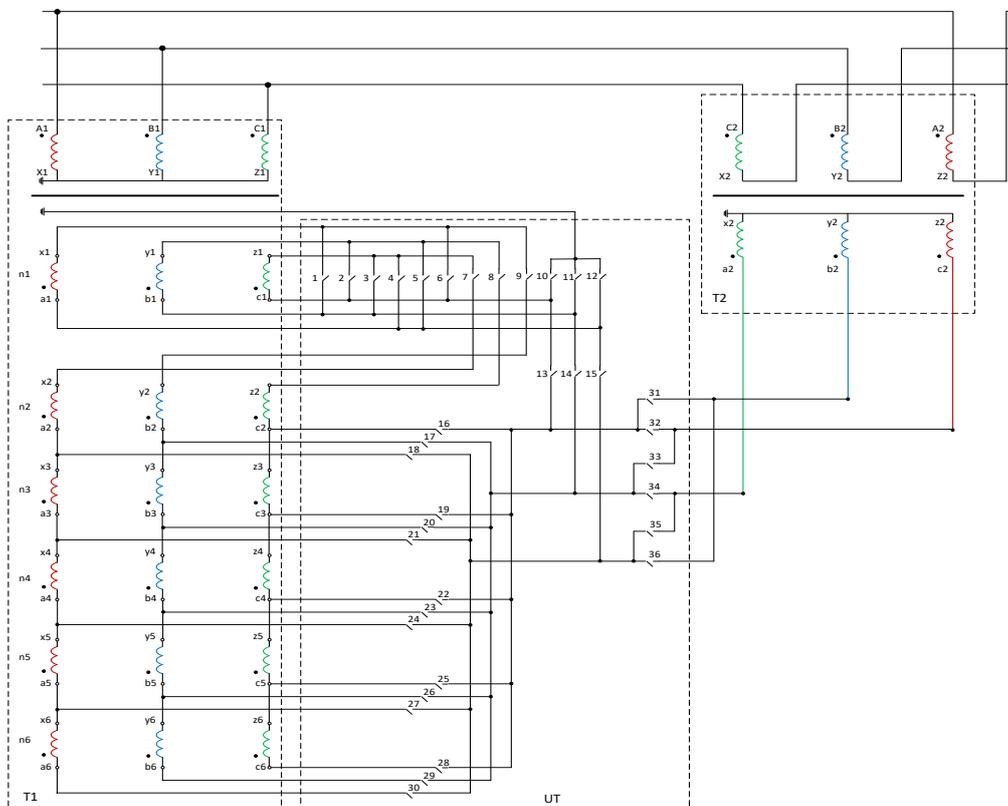


Рис. 8. ФПКТУ с большим углом регулирования фазы напряжения / Fig. 8. FSCTR with a large voltage phase control angle

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Принцип ступенчатого регулирования фазы напряжения за счет изменения группы и схемы соединения вторичных обмоток Т1 приведен в табл. 1.

Заданный в таблице 1 принцип регулирования позволяет первую вторичную обмотку Т1 использовать во всех ступенях ФПКТУ. При этом в 6-м и 8-м положениях первая обмотка собирается по схеме треугольника, во всех остальных положениях по схеме звезды с подключением ко второй обмотке с изменением чередования фаз (x1 к y2, y1 к z2, z1 к x2). Дальнейшее увеличение продольно-поперечного регулирования происходит за счет последовательного подключения дополнительных вторичных обмоток. Ступени регулирования с 1-й по 6-ю создают отрицательный угол сдвига, а ступени с 8-й по 13-ю – положительный.

Таблица 1 / Table 1

**Карта положений тиристорных ключей UT для перевода ступеней ФПКТУ /  
UT Thyristor key position map for step translation FSCTR**

Ключ	Номер ступени ФПТ												
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
3	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
4	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
6	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0	0	0	0
7	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
8	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
9	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
10	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
11	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
12	1	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1
13	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
14	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
15	0	0	0	0	0	1	0	1	0	0	0	0	0
16	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
17	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
18	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	0
19	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
20	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
21	0	0	0	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0
22	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
23	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
24	0	0	1	0	0	0	0	0	0	0	1	0	0
25	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
26	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
27	0	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0
28	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
29	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
30	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1
31	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
32	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
33	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
34	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
35	0	0	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
36	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Рассмотрим формирование ступеней регулирования на примере схем создания положительного угла  $\phi$  (8–13-я ступени). Для 8-й ступени регулирования ФПКТУ вторичная обмотка n1 за счет включения тиристорных ключей 3, 5, 6 собирается в схему треугольника, а ключами 13, 14, 15, 31, 33, 35

подключается к первичной обмотке последовательного трансформатора Т2. При этом вектор напряжения  $\Delta U_8$  ортогонален исходному вектору напряжения и равен

$$\Delta U_8 = \frac{U_1}{\sqrt{3}} \times \frac{w_1}{W_1}.$$

Также определим положительный угол  $\varphi$ , на который происходит поворот вектора напряжения  $U_2$  относительно исходного  $U$ :

$$\varphi_8 = \arctg \frac{\Delta U_8}{U_1}.$$

Для целей моделирования ступеней ФПУ требуется определить продольный (вещественный) и поперечный (мнимый) коэффициенты трансформации. Для 8-й ступени вещественный коэффициент трансформации будет равен 1, а мнимый определяется по формуле

$$K_M = \frac{\Delta U_8}{U_1}.$$

Напряжение на выходе из ФПУ после перевода в 8-ю ступень регулирования будет равно

$$U_{A2} = \frac{\Delta U_8}{\sin \varphi_8}.$$

Для 9-й ступени регулирования ФПКТУ вторичная обмотка  $n_1$  за счет включения ключей 7–12 собирается в схему звезды с заземленной нейтралью, при этом в нейтральную точку собираются начала обмоток ( $a_1, b_1, c_1$ ), а концы обмоток ( $x_1, y_1, z_1$ ) с изменением чередования фаз подключаются к концам обмотки  $n_2$  ( $y_2, z_2, x_2$ ). На выходе вторичных обмоток Т1 получаем ортогональный вектор напряжения  $\Delta U_9$ , который равен

$$\Delta U_9 = \sqrt{U_{c1}^2 + U_{b2}^2 - 2 U_{c1} U_{b2} \cos 120}.$$

При этом угол  $\varphi$  и мнимый коэффициент трансформации определяются по формулам:

$$\varphi_9 = \arctg \frac{\Delta U_9}{U_1}, K_M = \frac{\Delta U_9}{U_1}.$$

Напряжение на выходе из ФПУ после перевода в 9-ю ступень регулирования будет равно

$$U_{A2} = \frac{\Delta U_9}{\sin \varphi_9}.$$

Для крайней 13-й ступени ФПКТУ определим соответствующие параметры. Изменения относительно 9-й ступени будут лишь в том, что к вектору напряжения  $U_{b2}$  последовательно добавятся векторы напряжений обмоток  $n_3$ – $n_6$ :

$$\Delta U_{13} = \sqrt{U_{c1}^2 + (5U_{b2})^2 - 2 U_{c1} (5U_{b2}) \cos 120}.$$

Вещественный коэффициент трансформации 13-й ступени регулирования ФПКТУ будет равен

$$K_B = 1 - \frac{\Delta U_{13}}{2U_1}.$$

Мнимый коэффициент трансформации 13-й ступени регулирования ФПКТУ будет равен:

$$K_M = \frac{\sqrt{3} \Delta U_{13}}{2U_1}, \varphi_{13} = \arctg \frac{\sqrt{3} \Delta U_{13}}{2U_1}.$$

Напряжение на выходе из ФПУ после перевода в 13-ю ступень регулирования будет равно

$$U_{A2} = \frac{\sqrt{3} \Delta U_{13}}{2 \sin \varphi_{13}}.$$

Выполнив аналогичный расчет, получим параметры всех ступеней регулирования ФПКТУ (табл. 2).

Таблица 2 / Table 2

**Параметры ступеней регулирования ФПКТУ /  
Parameters of the control stages of the FSCTR**

№ ст. ФПУ	Угол сдвига фазы напряжения $\varphi$		Модуль напряжения отн. ед.	Модуль напряжения для ВЛ 500 кВ	Коэф. трансформации, отн. ед.	
	град. эл.	мкс			$K_{вещ}$	$K_{мним}$
1	2	3	4	5	6	7
1	-52,41	2911,7	1,093	546,5	0,667	-0,866
2	-43,9	2438,8	1,041	520,4	0,75	-0,722
3	-34,7	1928,6	1,014	506,9	0,833	-0,577
4	-25,3	1404,7	1,014	506,9	0,917	-0,433
5	-16,1	894,6	1,041	520,4	1	-0,289
6	-9,5	305,4	1,014	506,9	1	-0,167
7	0	0	1	500	1	0

1	2	3	4	5	6	7
8	9,5	305,4	1,014	506,9	1	0,167
9	16,1	894,6	1,041	520,4	1	0,289
10	25,3	1404,7	1,014	506,9	0,917	0,433
11	34,7	1928,6	1,014	506,9	0,833	0,577
12	43,9	2438,8	1,041	520,4	0,75	0,722
13	52,41	2911,7	1,093	546,5	0,667	0,866

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

Полученные теоретические результаты могут быть опробованы при моделировании режимов работы энергосистемы. Верификацию расчетной модели возможно сделать путем сравнения полученных при моделировании углов сдвига фазы напряжений, и углов  $\phi$ , представленных в таблице 2.

Моделирование ФПКТУ в ПК MatLAB и ПК RastrWin3. Исходя из результатов разработки схемы управления и математической модели выполнено моделирование всех ступеней ФПКТУ в ПК MatLAB. Для этого с помощью стандартных модулей собрана схема, представленная на рисунке 9. Данная модель соответствует схеме, приведенной на рисунке 7.

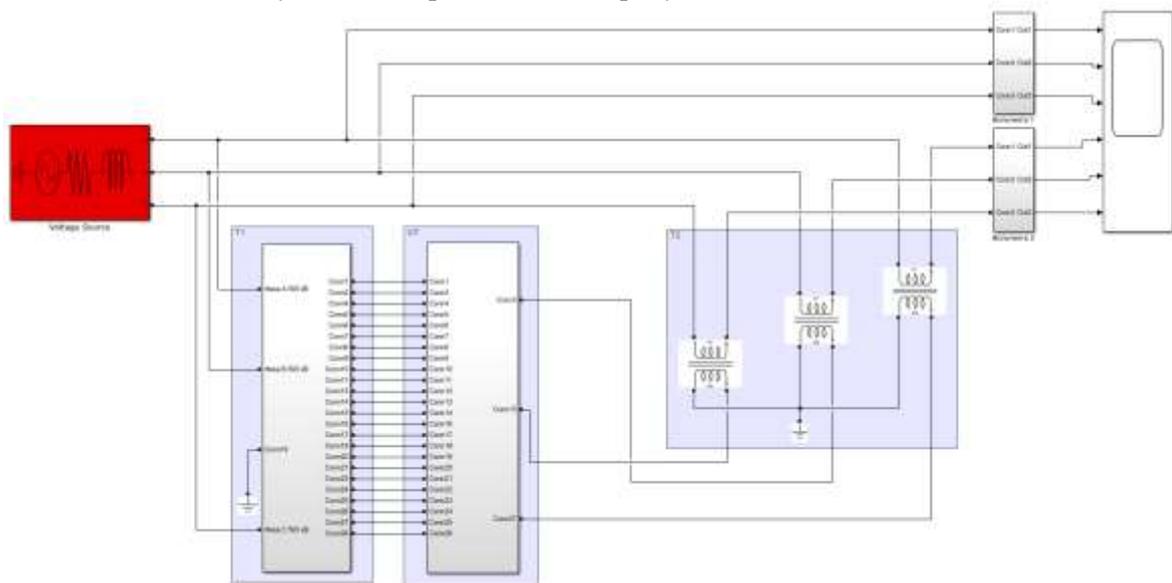


Рис. 9. Схема подключения ФПКТУ к линии 500 кВ / Fig. 9. Connection diagram of the FSCTR to the 500 kV line

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

На рисунке 10 представлены осциллограммы напряжений фазы С на входе и выходе ФПКТУ при различных ступенях регулирования. Для наглядности представлены 1-я, 4-я, 7-я, 10-я и 13-я ступени регулирования. Сравнив полученные графики с расчетными характеристиками из таблицы 2, можно сделать вывод о достоверности разработанной модели. Модель позволяет получить данные о токовых нагрузках и величин напряжений в тиристорном коммутаторе как при изменении ступеней регулирования, так и при изменении параметров электрической сети. Исследование ФПКТУ в ПК MatLAB подтвердило возможность получения значительного угла сдвига фазы (более 20 град. эл.).

На рисунках 10а–10д отчетливо виден эффект от продольно-поперечного регулирования фазы напряжения: ФПКТУ позволяет без увеличения модуля изменять фазу напряжения в большом диапазоне углов.

Для подтверждения эффективности регулирования перетоков активной мощности в электрической сети за счет изменения угла сдвига фазы напряжения выполнено математическое моделирование установившихся режимов в сети 500 кВ с использованием ПК RastrWin3.



а) / а)



б) / б)



в) / в)



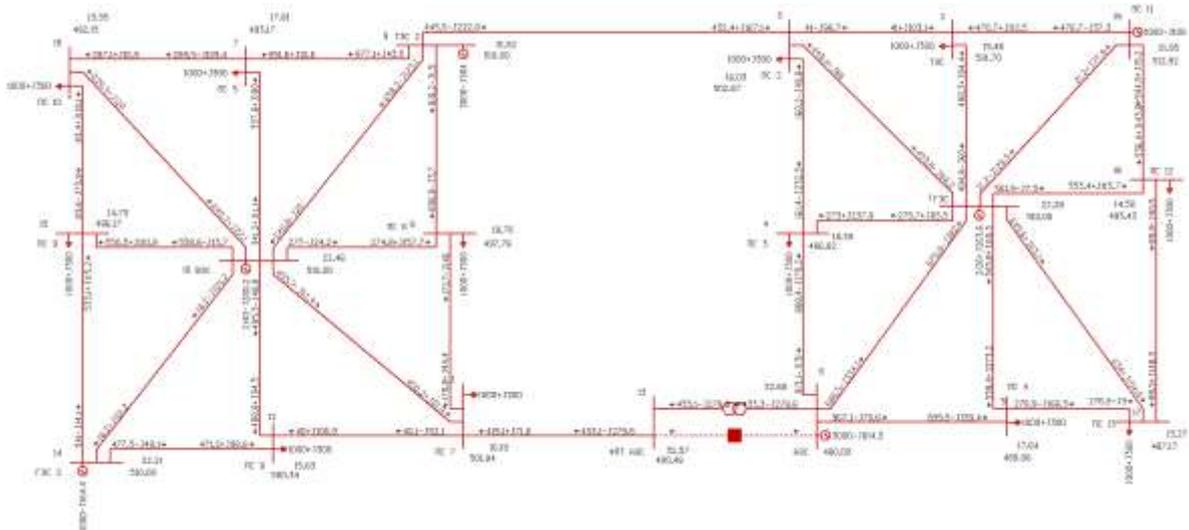
г) / г)



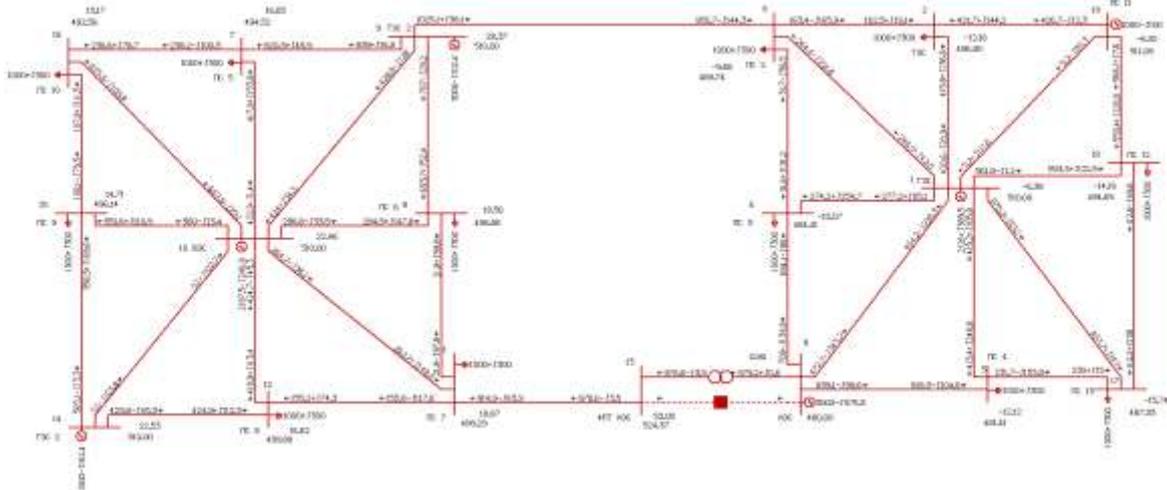
д) / д)

Рис. 10. Осциллограммы напряжений фазы С на входе и выходе из ФПКТУ: а) 1 ступень регулирования; б) 4 ступень регулирования; в) 7 ступень регулирования; г) 10 ступень регулирования; д) 13 ступень регулирования / Fig10. Oscillograms of phase C voltages at the input and output of FSCTR: а) 1 stage of regulation; б) 4 stage of regulation; в) 7 stage of regulation; г) 10 stage of regulation; д) 13 stage of regulation.

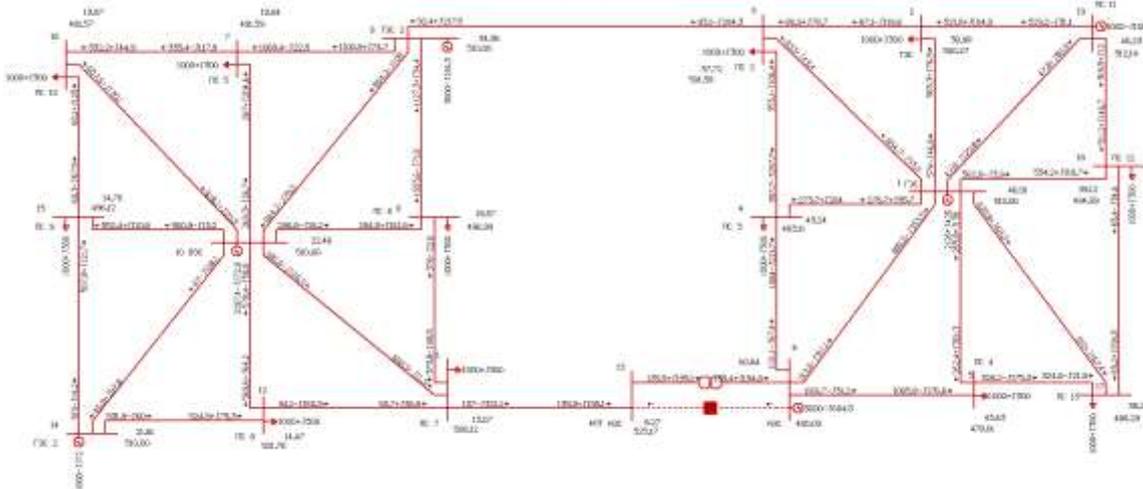
\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors



а) / а)



б) / б)



в) / в)

Рис. 11. Схемы из ПК RastrWin3: а) ФПКТУ – 7-е положение, б) ФПКТУ – 1-е положение, в) ФПКТУ – 13-е положение / Fig. 11. Diagrams from RastrWin3 PC: а) FSCTR – 7 stage of regulation, б) FSCTR – 1 stage of regulation, в) FSCTR – 13 stage of regulation

\*Источник: составлено авторами / Source: compiled by the authors

В качестве фазоповоротного устройства в ПК RastrWin3 использована трансформаторная ветвь с коэффициентами трансформации: вещественным (для продольного регулирования) и мнимым (для поперечного регулирования). Экспериментальная схема сети 500 кВ смоделирована таким образом, чтобы получить явно выраженное сечение (совокупность связей, отключение которых приведет к разделению энергосистемы) и две части энергосистемы. Режим нагрузок и генерации в модели заложен таким образом, чтобы получить неравномерное распределение перетоков мощности по сети и в том числе по связям сечения.

На рисунке 11а показан установившийся режим с учетом промежуточной ступени регулирования ФПКТУ 7, как видно, переток активной мощности по ветви 11–13 равен 433 МВт и направлен из 13-го узла в линию. При переводе ФПУ в 1-ю ступень (рисунок 11б) переток по линии 500 кВ увеличивается до 979 МВт, то есть изменение угла вектора напряжения на 52 град. эл. загружает линию на 546 МВт и, соответственно, загружает шунтирующую связь в обратном направлении.

При переводе ФПУ в 13-ю ступень (рисунок 11в) переток по линии 500 кВ уменьшается до –136 МВт, то есть изменение угла вектора напряжения на –52 град. эл. загружает линию относительно промежуточного положения на 566 МВт и при этом также разгружается шунтирующая связь.

Исходя из приведенных расчетов можно сделать вывод о существенном регулирующем эффекте ФПУ. Отклонение угла вектора напряжения на 52 град. эл. позволяет изменить перетоки активной мощности по сети более чем на 500 МВт, а весь регулировочный диапазон в данной модели равен 1112 МВт.

**Заключение / Conclusion.** Фазоповоротный комплекс предназначен для регулирования перетока активной мощности в электрической цепи с целью недопущения перегрузок ЛЭП, снижения потерь активной мощности, повышения статической и динамической устойчивости энергосистемы [5, 7, 14, 15]. Среди недостатков, существующих ФПК можно выделить: ограниченный диапазон регулирования фазы напряжения, медленное изменение ступеней регулирования, слабая надёжность конструкции [8, 9].

Новым этапом в развитии фазоповоротных систем стала разработка ФПК с тиристорным управлением (ФПКТУ). Использование тиристорного управления повышает надежность и быстродействие устройства, а также расширяет диапазон регулирования угла  $\phi$  более чем на 20 град. эл. без изменения модуля напряжения.

Такие характеристики ФПКТУ позволяют решать новые задачи:

- 1) регулирование перетоков активной мощности в контролируемых сечениях энергосистемы;
- 2) увеличение пропускной способности сети сверхвысокого напряжения за счет равномерно распределения перетоков активной мощности;
- 3) использование поворота фазы напряжения в качестве управляющего воздействия от устройств противоаварийной автоматики как для разгрузки сетевых элементов по току, так и для повышения пределов передаваемой мощности.

С использованием существующих технических решений разработана модель ФПКТУ и эффективная схема управления. Такой комплекс имеет ряд преимуществ:

- 1) для создания диапазона регулирования  $\pm 52$  град. эл. использовано всего лишь шесть вторичных обмоток параллельного трансформатора (Т1);
- 2) первая вторичная обмотка Т1 используется во всех схемах ступеней регулирования за счет сложной схемы тиристорного коммутатора;
- 3) разработанную модель ФПКТУ возможно использовать для различных диапазонов и дискретности регулирования, достаточно изменить количество витков вторичных обмоток Т1.

## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. К расчету режимов работы линий электропередачи с управляемыми фазоповоротными устройствами / М. Г. Асташев, М. А. Новиков, Д. И. Панфилов [и др.] // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2016. № 1. С. 15–23. EDN VVGBLJ.
2. Применение фазоповоротных устройств с тиристорным управлением при больших углах регулирования фазового сдвига / В. П. Жмуров, В. Н. Стельмаков, А. Н. Тарасов, Б. И. Гринштейн // Известия Российской академии наук. Энергетика. 2010. № 5. С. 132–142. EDN MUWPKP.
3. Жмуров В. П., Стельмаков В. Н., Тарасов А. Н. Применение фазоповоротных устройств с тиристорным управлением как элемента управляемых (гибких) линий электропередачи переменного тока // Электротехника. 2014. № 1. С. 2–10. EDN RNMDNL.

4. Воденников Д. А. Применение фазоповоротного устройства для увеличения пропускной способности электрической сети // Вестник Московского энергетического института. 2020. № 3. С. 75–80. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>. EDN ITYVSF.
5. Асташев М. Г., Новиков М. А., Панфилов Д. И. Применение фазоповоротных устройств с тиристорными коммутаторами в активноадаптивных электрических сетях // Энергия единой сети. 2013. № 5(10). С. 70–77. EDN VXBIDX.
6. Оптимизация режимов работы энергосистемы с помощью фазоповоротного трансформатора на подстанции 500 кв / М. В. Одинцов, Д. А. Акимов, Н. В. Коровкин, О. В. Фролов // Научно-технические ведомости Санкт-Петербургского государственного политехнического университета. 2014. № 3(202). С. 139–145. EDN SUFINF.
7. Фазоповоротный трансформатор в схеме выдачи мощности крупной гидроэлектростанции / А. С. Брилинский, Г. А. Евдокунин, В. А. Крицкий [и др.] // Известия НТЦ Единой энергетической системы. 2019. № 1(80). С. 6–14. EDN BCOXBD.
8. Шойко В. П., Духанина К. В. Оценка эффективности применения фазоповоротного трансформатора для повышения пропускной способности электропередачи с учетом режима прилегающей сети // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2021. Т. 25. № 3(158). С. 369–379. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-369-379>. EDN FMONDH.
9. Асташев М. Г., Панфилов Д. И. Фазоповоротные устройства с тиристорными коммутаторами для активноадаптивных электрических сетей // Электричество. 2013. № 8. С. 60–65. EDN QIZOQZ.
10. Узденов Х. А., Альжанов Р. Ш., Коршунов Е. А. Применение фазоповоротных устройств для увеличения пропускной способности электрической сети и оптимизации перетоков активной мощности // Электроэнергетика глазами молодежи – 2017: материалы VIII Международной научно-технической конференции, Самара, 02–06 октября 2017 года. Т. 2. Самара: Самарский государственный технический университет, 2017. С. 185–188. EDN ZIWZMH.
11. Патент на полезную модель № 110558 U1 Российская Федерация, МПК H02J 3/12. полупроводниковое фазоповоротное устройство: № 2011122939/07: заявл. 08.06.2011: опубл. 20.11.2011 / В. П. Жмуров, В. Н. Стельмаков, А. Н. Тарасов; заявитель Открытое Акционерное Общество «Энергетический институт им. Г. М. Кржижановского». EDN SJEGRU.
12. Кралин А. А., Асабин А. А., Крюков Е. В. Фазоповоротное устройство для распределительных сетей среднего напряжения // Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева. 2017. № 2(117). С. 62–67. EDN ZBMYHF.
13. Патент № 2711365 C1 Российская Федерация, МПК H02H 7/18, H02J 3/18. Фазоповоротное устройство: № 2019126348: заявл. 21.08.2019: опубл. 16.01.2020 / М. И. Петров, М. Г. Асташев, Д. И. Панфилов; заявитель Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Национальный исследовательский университет "МЭИ" (ФГБОУ ВО "НИУ "МЭИ")». EDN UYSXYJ.
14. Шакарян Ю. Г., Фокин В. К., Лихачев А. П. Установившиеся режимы электроэнергетических систем с фазоповоротными устройствами (Ч. 1) // Электричество. 2014. № 7. С. 16–25. EDN SFUONT.
15. Шакарян, Ю. Г., Фокин В. К., Лихачев А. П. Установившиеся режимы работы электроэнергетических систем с фазоповоротными устройствами (Ч. 2) // Электричество. 2014. № 8. С. 9–18. EDN SHDJPH.

## REFERENCES

1. Astashev MG, Novikov MA, Panfilov DI. On the calculation of operating modes of power transmission lines with controlled phase-rotating devices. *Izvestiya Rossiiskoi akademii nauk. Energy*. 2016;(1):15-23. EDN VVGBLJ. (In Russ.).
2. Zhmurov VP, Stelmakov VN, Tarasov AN, Grinstein BI. Application of phase-rotating devices with thyristor control at large angles of phase shift regulation. *Proceedings of the Russian Academy of Sciences. Energy*. 2010;(5):132-142. EDN MUWPKP. (In Russ.).
3. Zhmurov VP, Stelmakov VN, Tarasov AN. Application of phase-rotating devices with thyristor control as an element of controlled (flexible) AC power transmission lines. *Electrical Engineering*. 2014;(1):2-10. EDN RNMDNL. (In Russ.).
4. Vodennikov DA. The use of a phase-rotating device to increase the capacity of an electric grid. *Bulletin of the Moscow Power Engineering Institute. Bulletin of the Moscow Institute of Energy*, 2020;(3):75-80. <https://doi.org/10.24160/1993-6982-2020-3-75-80>. – EDN ITYVSF. (In Russ.).
5. Astashev MG, Novikov MA, Panfilov DI. The use of phase-reversal devices with thyristor switches in active adaptive electric networks. 2013;5(10):70-77. EDN VXBIDX. (In Russ.).
6. Odintsovo MV, Akimov DA, Korovkin NV, Frolov OV. Optimization of the operating modes of the power system using a phase-reversal transformer at a 500 kV substation. *Scientific and Technical Bulletin of St. Petersburg State Polytechnic University*. 2014;3(202):139-145. EDN SUFINF. (In Russ.).
7. Brilinsky AS, Evdokunin GA, Kritsky VA. Phase-reversal transformer in the scheme of power output of a large hydroelectric power plant [et al.]. *Izvestiya STC Unified Energy System*. 2019;1(80):6-14. EDN BCOXBD. (In Russ.).
8. Shoiko VP, Dukhanina KV. Evaluation of the effectiveness of using a phase-reversal transformer to increase the transmission capacity, taking into account the mode of the adjacent network. *Bulletin of Irkutsk State Technical University*. 2021;25(3(158)):369-379. <https://doi.org/10.21285/1814-3520-2021-3-369-379>. EDN FMONDH. (In Russ.).
9. Astashev MG, Panfilov DI. Phase-rotating devices with thyristor switches for active adaptive electric networks. *Electricity*. 2013;(8):60-65. EDN QIZOQZ. (In Russ.).

10. Uzdenov HA, Alzhanov RS, Korshunov EA. The use of phase-rotating devices to increase the capacity of the electric grid and optimize active power flows. Electric power industry through the eyes of youth – 2017: Proceedings of the VIII International Scientific and Technical Conference, Samara, October 02-06, 2017. Vol. 2. Samara: Samara State Technical University; 2017. P. 185-188. EDN ZIWZMH (In Russ.).
11. Utility model Patent No. 110558 U1 Russian Federation, IPC H02J 3/12. semiconductor phase-reversal device: No. 2011122939/07: application 08.06.2011: published 20.11.2011 / Zhmurov VP, Stelmakov VN, Tarasov AN; applicant Open Joint Stock Company "Power engineering institute named after GM. Krzhizhanovsky". EDN CJEGRU. (In Russ.).
12. Kralin AA, Asabin AA, Kryukov EV. Phase-rotating device for medium voltage distribution networks. Proceedings of the RE. Alekseev NSTU. 2017;2(117):62-67. EDN ZBMYHF. (In Russ.).
13. Patent No. 2711365 C1 Russian Federation, IPC H02H 7/18, H02J 3/18. Phase-rotating device: No. 2019126348: application 08/21/2019: published 01/16/2020 / MI. Petrov, MG. Astashev, DI. Panfilov; applicant Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "National Research University "MEI" (FSBEI HE "NIU "MEI"). – EDN UYSXYJ. (In Russ.).
14. Shakaryan YuG, Fokin VK, Likhachev AP. Established modes of electric power systems with phase-rotating devices (Part 1). Electricity. 2014;(7):16-25. EDN SFUONT. (In Russ.).
15. Shakaryan YuG, Fokin VK, Likhachev AP. Established operating modes of electric power systems with phase-rotating devices (Part 2). Electricity. 2014;(8):9-18. EDN SHDJPH. (In Russ.).

### ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

**Сергей Александрович Ситников** – аспирант кафедры энергетических систем и комплексов традиционных и возобновляемых источников, Институт ядерной энергии и промышленности, Севастопольский государственный университет.

**Николай Михайлович Шайтор** – доктор технических наук, доцент кафедры энергетических систем и комплексов традиционных и возобновляемых источников, Институт ядерной энергии и промышленности, Севастопольский государственный университет.

### ВКЛАД АВТОРОВ

**Сергей Александрович Ситников**

Проведение исследования – сбор, интерпретация и анализ полученных данных, проведение расчетов и моделирование.

Утверждение окончательного варианта – принятие ответственности за все аспекты работы, целостность всех частей статьи и ее окончательный вариант.

**Николай Михайлович Шайтор**

Подготовка и редактирование текста – составление черновика рукописи и формирование его окончательного варианта, участие в научном дизайне.

### INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

**Sergey S. Sitnikov** – a Postgraduate Student at the Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Sources, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University.

**Nikolay M. Shaytor** – Dr. Sci. (Techn.), Associate Professor, Department of Energy Systems and Complexes of Traditional and Renewable Sources, Institute of Nuclear Energy and Industry, Sevastopol State University.

### CONTRIBUTION OF THE AUTHORS

**Sergey A. Sitnikov**

Conducting research is the collection, interpretation and analysis of the data obtained, calculations and modeling.

The approval of the final version is the acceptance of responsibility for all aspects of the work, the integrity of all parts of the article and its final version.

**Nikolai M. Shaytor**

Text preparation and editing – drafting a manuscript and forming its final version, participating in scientific design.