

УДК 621.314

DOI: 10.15593/2224-9397/2021.4.02

**С.В. Клиماش<sup>1</sup>, Б.Д. Табаров<sup>2</sup>, В.С. Клиماش<sup>2</sup>**<sup>1</sup>Комсомольская дистанция электроснабжения ОАО РЖД,  
Комсомольск-на-Амуре, Россия<sup>2</sup>Комсомольский-на-Амуре государственный университет,  
Комсомольск-на-Амуре, Россия

## ПОВЫШЕНИЕ ТОЧНОСТИ РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ

Рассмотрена проблема низкой точности регулирования реактивной мощности наиболее распространённых в промышленности трёхкомплектных конденсаторных установок и ее влияния на показатели качества электроэнергии и эффективность энергопотребления в системах промышленного электроснабжения. **Цель исследования:** повышение точности регулирования реактивной мощности трёхкомплектной конденсаторной установки за счет увеличения числа ступеней регулирования с трех до семи без изменения количества коммутационных аппаратов. Для достижения поставленной цели предложен новый принцип построения конденсаторной установки со специальным способом семиступенчатого переключения конденсаторных батарей. **Практическая значимость** работы заключается в новом способе построения конденсаторной установки, состоящей из трех комплектов конденсаторных батарей с коммутационной аппаратурой и способе семиступенчатого регулирования реактивной мощности. Для проведения исследований использовался **метод математического моделирования** с применением программного средства MatLab. На модели выполнена апробация способа включения трехфазных конденсаторных батарей в сочетании со способом регулирования реактивной мощности на основе предложенного переключения трёх батарей конденсаторов, у которых емкость каждой последующей батарее в 2 раза больше, чем у предыдущей. **Результаты:** в ходе проведения численного эксперимента показана возможность реализации способа семиступенчатого регулирования известных трёхкомплектных промышленных установок. Показано также мягкое безударное переключение при переходе с одной ступени регулирования реактивной мощности на другую за счет специального способа подключения сначала двух фаз конденсаторной батареи, а затем третьей. Совмещение операций этих двух способов улучшило регулировочные свойства с повышением быстродействия и точности компенсации реактивной мощности. Приводятся результаты исследования физических процессов, позволяющие выявить эти свойства. На модели отработывались действия для автоматизации процессов включения, выключения конденсаторной установки и переключения батарей конденсаторов для регулирования реактивной мощности, которые лягут в основу дальнейших исследований стационарных и динамических режимов работы емкостного компенсатора реактивной мощности в замкнутой системе авторегулирования.

**Ключевые слова:** батареи конденсаторов, способ включения трехфазных конденсаторов, способ регулирования реактивной мощности, соотношение параметров конденсаторов, тиристорные ключи с естественной коммутацией.

**S.V. Klimash<sup>1</sup>, B.D. Tabarov<sup>2</sup>, V.S. Klimash<sup>2</sup>**

<sup>1</sup>Komsomolskaya power supply Distance open Joint Stock Company Russian Railways, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

<sup>2</sup>Komsomolsk-on-Amur State University, Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation

## **IMPROVING THE ACCURACY OF REACTIVE POWER REGULATION BY A CAPACITOR PLANT**

The problem of low accuracy of reactive power regulation by the most common three-part condenser installations in the industry and its impact on electricity quality indicators and energy consumption efficiency in industrial power supply systems is considered. The **purpose** of the study: to increase the accuracy of reactive power regulation by a three-piece capacitor plant by increasing the control stages from three to seven without changing the number of switching devices. To achieve this goal, a new principle of constructing a capacitor plant with a special method of seven-stage switching of capacitor banks is proposed. The **practical significance** of the work lies in the new construction of a capacitor bank consisting of three sets of capacitor banks with switching equipment and a method of seven-stage regulation of reactive power. The **method of mathematical modeling** using the Matlab software was used to conduct the research. The model has tested a method for switching on three-phase capacitor banks in combination with a method for regulating reactive power based on the proposed switching of three capacitor banks, in which the capacity of each subsequent battery is 2 times greater than that of the previous one. **Results:** numerical experiments have shown the possibility of implementing the method of seven-stage regulation by known three-part industrial installations. Soft shockless switching is also shown when switching from one stage of reactive power regulation to another due to a special method of connecting first two phases of the capacitor bank, and then the third. Combining the operations of these two methods improved the adjustment properties with an increase in the speed and accuracy of reactive power compensation. The results of the study of physical processes are presented, which make it possible to identify these properties. The model was used to work out actions for automating the processes of switching on and off the capacitor bank and switching capacitor banks for reactive power regulation, which will form the basis for further studies of stationary and dynamic modes of operation of a capacitive reactive power compensator in a closed auto-regulation system.

**Keywords:** capacitor banks, a method for switching on three-phase capacitors, a method for regulating reactive power, the ratio of capacitor parameters, thyristor switches with natural switching.

### **Введение**

Конденсаторные установки достаточно широко применяют в системах промышленного электроснабжения с протяженными линиями электропередачи. Они разгружают электрические сети от реактивной мощности, снижают потери электроэнергии и выравнивают напряжение у потребителей [1–10]. Наибольшее применение получили трёхкомплектные конденсаторные установки с трёхступенчатым регулированием. В каждый комплект установки входят одинаковые батареи конденсаторов и коммутационная аппаратура. В зависимости от графика работы технологического оборудования применяют также и многоступенчатое регулирование реактивной мощности конденсаторных установок, в которых

число ступеней регулирования реактивной мощности равно количеству батарей конденсаторов, имеющих одинаковые параметры [11–15].

Недостатком существующих конденсаторных установок с трёхступенчатым регулированием является низкая точность компенсации реактивной мощности, а многоступенчатых – большое количество коммутационной аппаратуры [16–20].

Для устранения указанных недостатков предлагается альтернативное техническое решение. В трёхкомплектной конденсаторной установке предлагается выполнить конденсаторные батареи с разной емкостью. Емкость второй батареи остается без изменения, емкость первой батареи в два раза меньше второй, а емкость третьей батареи в два раза больше второй. Кроме этого в соответствии с параметрами батарей конденсаторов необходимо произвести выбор коммутационных аппаратов без изменения их количества. И, последнее, применить операции способа мягкого включения конденсаторов (сначала включают две фазы, а затем третью) [21, 22] совместно с операциями способа семиступенчатого регулирования реактивной мощности в трехкомплектной конденсаторной установке на основе нового алгоритма переключения конденсаторных батарей. Совместное применение этих двух способов позволит создавать установки с улучшенными динамическими характеристиками и точностью регулирования [23, 24].

Известные конденсаторные установки с трехступенчатым регулированием (трехкомплектные) имеют одинаковую емкость  $C_K$  всех батарей.

В предлагаемой конденсаторной установке при неизменной емкости второй батареи емкость всех последующих батарей в 2 раза больше, чем у предыдущих:

$$C_{K1} = 1/2 C_K, C_{K2} = 1 C_K, C_{K3} = 2 C_K.$$

Емкости конденсаторов на семи ступенях

$$C1 = 0,5C_K, C2 = 1C_K, C3 = 1,5C_K, C4 = 2C_K, C5 = 2,5C_K,$$

$$C6 = 3C_K, C7 = 3,5C_K.$$

Приведенное соотношение параметров позволяет с минимальными изменениями и дополнениями производить семиступенчатые установки из трехступенчатых.

Поставленная цель достигается тем, что емкость второй батареи конденсаторов в два раза больше, чем у первой, а емкость третьей

батареи конденсаторов в два раза больше, чем у второй. Кроме этого порядок переключения конденсаторных батарей и ступеней регулирования реактивной мощности следующий [23]. Включение второй ступени регулирования реактивной мощности производится включением второй батареи конденсаторов при завершении отключения первой батареи конденсаторов, включение третьей ступени производится подключением первой батареи конденсаторов параллельно ко второй батарее конденсаторов. Включение четвертой ступени регулирования реактивной мощности производится включением третьей батареи конденсаторов при завершении отключения первой и второй батарей конденсаторов, включение пятой ступени производится подключением первой батареи конденсаторов параллельно к третьей батарее конденсаторов. Включение шестой ступени производится подключением второй батареи конденсаторов параллельно к третьей батарее конденсаторов при завершении отключения первой батарей конденсаторов, а включение седьмой ступени регулирования реактивной мощности производится подключением первой батареи конденсаторов параллельно ко второй и третьей батареям конденсаторов.

На рис. 1 приведена функциональная схема предлагаемой конденсаторной установки с семиступенчатым регулированием реактивной мощности.

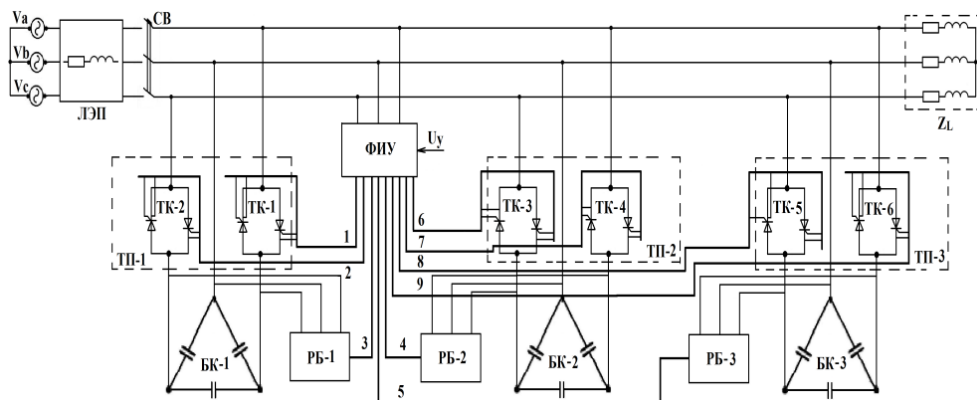


Рис. 1. Функциональная схема предлагаемой трёхкомплектной конденсаторной установки с семиступенчатым регулированием реактивной мощности

Она содержит трёхфазную сеть ( $V_a$ ,  $V_b$ ,  $V_c$ ), линию электропередачи (ЛЭП), сетевой выключатель (СВ), активно-индуктивную нагрузку ( $Z_L$ ), первую батарею конденсаторов (БК-1) с резистивным блоком

(РБ-1) разряда конденсаторов первой батареи, первый тиристорный пускатель (ТП-1) с тиристорными ключами ТК-1 и ТК-2, вторую батарею конденсаторов (БК-2) с резистивным блоком (РБ-2) разряда конденсаторов второй батареи, второй тиристорный пускатель (ТП-2) с тиристорными ключами ТК-3 и ТК-4, третью батарею конденсаторов (БК-3) с резистивным блоком (РБ-3) разряда конденсаторов третьей батареи, третий тиристорный пускатель (ТП-3) с тиристорными ключами ТК-5 и ТК-6, формирователь импульсов управления (ФИУ), на управляющий вход которого подано напряжение управления  $U_u$ , а девять его выходов 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9 предназначены для подключения к цепям управления соответствующих тиристорных ключей и к ключам резистивных блоков разряда конденсаторов.

### **Описание принципа действия конденсаторной установки и способа регулирования реактивной мощности**

Суть предлагаемого способа регулирования реактивной мощности конденсаторной установки заключается в последовательности выполнения известных и вновь введенных операций [23].

Рассмотрим последовательность реализации предлагаемого способа в соответствии со схемой (см. рис. 1) конденсаторной установки.

**Операция № 1.** Заключается в подготовке к работе силовой части и микроэлектронной системы управления конденсаторной установки. Для этого в произвольный момент времени сетевым выключателем СВ подают напряжение на тиристорные пускатели ТП-1, ТП-2, ТП-3 и формирователь импульсов управления ФИУ с непосредственным подключением одной фазы батарей конденсаторов БК-1, БК-2 и БК-3, например фазы «В», к сети.

**Операция № 2.** Заключается в включении первой ступени (интервал времени  $T-1$ ). Выполняется подключением к сети первой батареи конденсаторов БК-1 посредством первого тиристорного пускателя ТП-1 при выключенных второй БК-2 и третьей БК-3 батареи конденсаторов. Сначала включают один тиристорный ключ, например, для фазы «С» ключ ТК-2 в момент перехода через ноль линейного напряжения между фазами «В» и «С» сети, а затем включают другой тиристорный ключ ТК-1 в момент перехода через ноль фазного напряжения фазы «А». Включение тиристорных ключей ТК-1 и ТК-2 производится путём подачи импульсов управления соответственно с выходов 1 и 2 формирователя импульсов управления ФИУ.

**Операция № 3.** Заключается в включении второй ступени (интервал времени Т-2). Выполняется подключением к сети второй батареи конденсаторов БК-2 вторым тиристорным пускателем ТП-2 и отключением первой батареи конденсаторов БК-1 первым тиристорным пускателем ТП-1. Выключение первого тиристорного пускателя ТП-1 производится снятием импульсов управления с его тиристорных ключей ТК-1, ТК-2 (с выходов 1, 2 формирователя импульсов управления). При подключении к сети второй батареи конденсаторов БК-2 вторым тиристорным пускателем ТП-2 сначала включают один тиристорный ключ, например, в фазе «С» ключ ТК-3, в момент перехода через ноль линейного напряжения между фазами «В» и «С» сети, а затем включают другой тиристорный ключ ТК-4 в момент перехода через ноль фазного напряжения фазы «А». Включение тиристорных ключей ТК-3 и ТК-4 производится подачей импульсов управления соответственно с выходов 6 и 7 формирователя импульсов управления ФИУ.

**Операция № 4.** Состоит в включении третьей ступени (интервал времени Т-3). Выполняется подключением к сети первой батареи конденсаторов БК-1 посредством первого тиристорного пускателя ТП-1 при подключенной к сети второй батареи конденсаторов БК-2. Процедура выполняется аналогично второй операции.

**Операция № 5.** Заключается в включении четвертой ступени (интервал времени Т-4). Выполняется подключением к сети третьей батареи конденсаторов БК-3 третьим тиристорным пускателем ТП-3 и отключением первой БК-1 и второй БК-2 батареи конденсаторов первым ТП-1 и вторым ТП-2 тиристорными пускателями. Отключение первого ТП-1 и второго ТП-2 тиристорного пускателя производится снятием импульсов управления с их тиристорных ключей ТК-1, ТК-2, ТК-3, ТК-4 (с выходов 1 и 2, 6 и 7 формирователя этих импульсов). При подключении к сети третьей батареи конденсаторов БК-3 третьим тиристорным пускателем ТП-3 сначала включают один тиристорный ключ, например, в фазе «С» ключ ТК-5, в момент перехода через ноль линейного напряжения между фазами «В» и «С» сети, а затем включают другой тиристорный ключ ТК-6 в момент перехода через ноль фазного напряжения фазы «А». Включение тиристорных ключей ТК-5 и ТК-6 производится подачей импульсов управления соответственно с выходов 8 и 9 формирователя импульсов управления ФИУ.

**Операция № 6.** Заключается в включении пятой ступени (интервал времени Т-5). Выполняется подключением к сети первой батареи конденсаторов БК-1 посредством первого тиристорного пускателя ТП-1 при подключенной к сети третьей батарее конденсаторов БК-3. Вторая батарея конденсаторов БК-2 при этом отключена. Процедура выполняется аналогично второй операции.

**Операция № 7.** Заключается в включении шестой ступени (интервал времени Т-6). Выполняется подключением к сети второй батареи конденсаторов БК-2 посредством второго тиристорного пускателя ТП-2 и отключением первой батареи конденсаторов БК-1 первым тиристорным пускателем ТП-1 при подключенной к сети третьей батарее конденсаторов БК-3. Процедура выполняется по аналогии с третьей операцией.

**Операция № 8.** Состоит в включении седьмой ступени (интервал времени Т-7). Выполняется подключением к сети первой батареи конденсаторов БК-1 посредством первого тиристорного пускателя ТП-1 при подключенных к сети второй БК-2 и третьей БК-3 батареями конденсаторов. Процедура происходит аналогично второй операции.

Переключение ступеней регулирования реактивной мощности с уменьшением емкости конденсаторной установки производится также проведением восьми операций, но в обратной последовательности.

### **Моделирование трёхкомплектной конденсаторной установки с семиступенчатым регулированием реактивной мощности**

Целями моделирования являются проверка функционирования семиступенчатого регулирования реактивной мощности конденсаторной установки, выполненной в виде трёх комплектов конденсаторных батарей с коммутационными аппаратами, а также исследование физических процессов, происходящих при новом способе семиступенчатого регулирования реактивной мощности. Для достижения этих целей в среде MATLAB разработана модель установки и выполнены исследования при включении и выключении семи ступеней регулирования реактивной мощности конденсаторной установки, а также при переходе с одной ступени регулирования реактивной мощности на другую [25]. Модель представлена на рис. 2.

Модель содержит трёхфазную сеть ( $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ ), линию электропередачи (ЛЭП), блок сетевого выключателя (СВ), первую (БК-1),

вторую (БК-2) и третью (БК-3) батареи конденсаторов, модули первого (ТК-1), второго (ТК-2) и третьего (ТК-3) тиристорных ключей с синхронизированным и фазированным с сетью блоком формирования импульсов управления (ФИУ), активно-индуктивную нагрузку (Зн), измерительные датчики тока и напряжения и другие вспомогательные элементы.

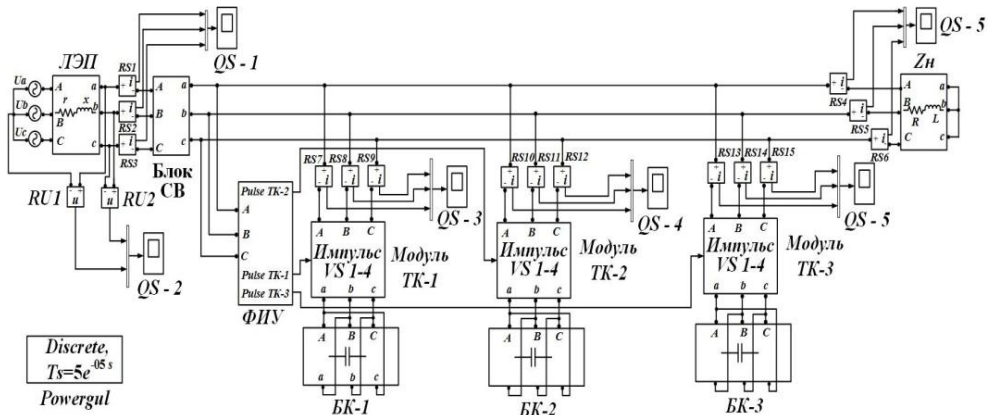


Рис. 2. Блочно-модульная модель предлагаемой конденсаторной установки с семиступенчатым регулированием реактивной мощности

Рассмотрим результаты моделирования конденсаторной установки с семиступенчатым регулированием реактивной мощности. Отметим, что переключение ступеней в модели выполнялось в соответствии с указанными операциями.

На рис. 3 приведены результаты исследования трехфазной системы токов сети и конденсаторов модели семиступенчатого компенсатора реактивной мощности. На осциллограммах показан процесс увеличения емкости конденсаторной установки. На рис. 3, а (сверху) в увеличенном масштабе также показаны два фрагмента процесса изменения тока сети при переключении со второй на третью ступень и с четвертой на пятую ступень в соответствии с четвертой и шестой операциями (см. описание предлагаемого способа регулирования).

На осциллограммах (см. рис. 3–5) введены обозначения фазных токов сети ( $i_{cA}$ ,  $i_{cB}$  и  $i_{cC}$ ), конденсаторов ( $i_{kA}$ ,  $i_{kB}$  и  $i_{kC}$ ) и интервалов работы конденсаторной установки на семи ступенях (Т-1, Т-2 ... Т-7). На осциллограммах (см. рис. 3) показано, что подключение конденсаторной установки и переключения между ступенями конденсаторов выполняются



без превышения токов их установившихся значений и практически сразу производится переход от одного установившегося уровня к другому.

На рис. 4 приведены осциллограммы для одной фазы «А» на интервалах (Т-1, Т-2 ... Т-7) работы семи ступеней конденсаторной установки. Здесь можно наблюдать за изменением напряжения и тока сети ( $u_{CA}$ ,  $i_{CA}$ ), тока конденсаторной установки ( $i_{KA}$ ). Осциллограммы объединяют мгновенные (см. рис. 4, а, б) и действующие (см. рис. 4, в) значения этих величин в процессе компенсации реактивной мощности.

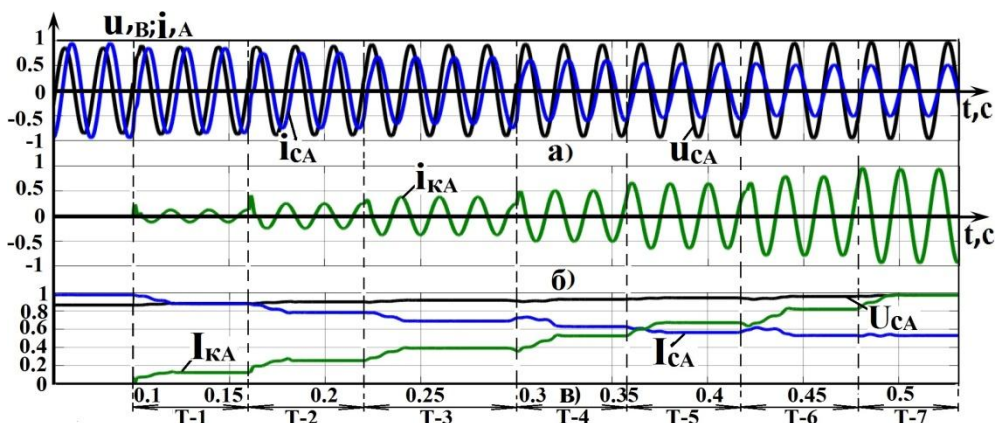


Рис. 4. Осциллограммы напряжения и токов одной фазы при семиступенчатом увеличении емкости конденсаторной установки

Из полученных осциллограмм (см. рис. 4, а, б) видно, что с увеличением ступеней переключения конденсаторов практически плавно производится компенсация реактивной мощности. Видно также уменьшение тока потребления ( $i_{CA}$ ) и, следовательно, потерь электроэнергии в сети, повышение напряжения сети ( $u_{CA}$ ) и, как следствие, выравнивание напряжения у потребителей. В результате повышаются качество напряжения и энергетическая эффективность системы электроснабжения.

На рис. 5 приведены результаты исследования трехфазной системы токов сети ( $i_c$ ) и конденсаторов ( $i_k$ ) при переключении семи ступеней в сторону уменьшения емкости конденсаторной установки. На рис. 5, а (сверху) показаны фрагменты процесса отключения пятой и третьей ступеней регулирования реактивной мощности посредством тиристорных ключей с естественной коммутацией, которые сначала отключают одну фазу соответствующей конденсаторной батареи, а затем две и производят переключение ступеней регулирования реактивной мощности практически в установившемся режиме.

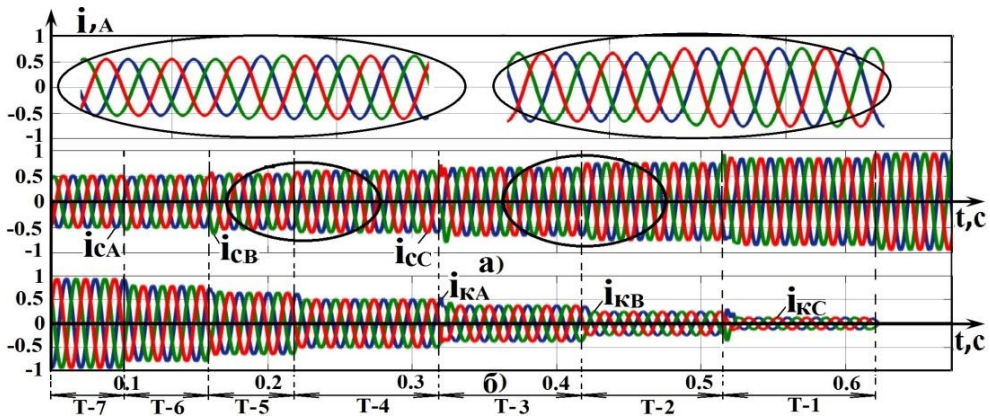


Рис. 5. Осциллограммы токов сети (а) и конденсаторов (б) при семиступенчатом уменьшении емкости конденсаторной установки

Осциллограммы (рис. 6) иллюстрируют для одной фазы мгновенные (см. рис. 6, а, б) и действующие (см. рис. 6, в) значения напряжений и токов сети ( $u_{cA}$ ,  $i_{cA}$ ), а также тока конденсаторов ( $i_{kA}$ ) при поочередном отключении семи ступеней конденсаторной установки на интервалах (Т-7, Т-6 ... Т-1).

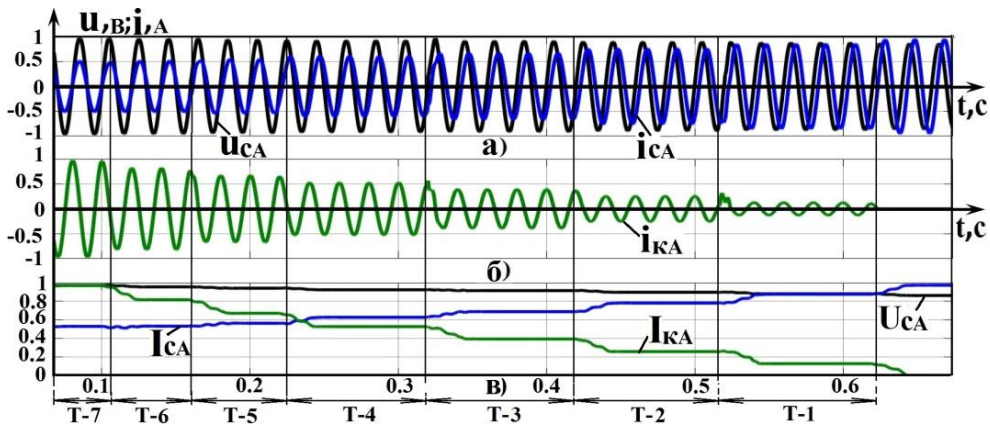


Рис. 6. Осциллограммы напряжения и токов одной фазы при семиступенчатом уменьшении емкости конденсаторной установки

Областью применения предлагаемого способа являются системы электроснабжения с протяженными линиями электропередач. Предлагаемый способ как более совершенный обладает улучшенной точностью регулирования реактивной мощности за счет увеличения ступеней регулирования без увеличения количества электрических и электронных коммутационных аппаратов в конденсаторной установке.

## **Заключение**

Основные научные и практические результаты выполненной работы заключаются в следующем:

– предложены принцип построения и способ семиступенчатого регулирования реактивной мощности посредством трёх батарей конденсаторов;

– установлено, что подключение трёхфазных батарей конденсаторов к сети (сначала подключаются две фазы, а затем третья) по аналогии с обратным процессом их естественного отключения тиристорными ключами (сначала отключаются одна фаза, а затем две) позволяет производить переключение ступеней регулирования реактивной мощности, практически приближаясь к установившемуся режиму работы конденсаторной установки.

На основе предложенных принципа построения конденсаторной установки и способа регулирования реактивной мощности в дальнейшем планируется проведение исследований стационарных и динамических режимов работы емкостного компенсатора реактивной мощности в замкнутой системе авторегулирования.

## **Библиографический список**

1. Климаш В.С., Табаров Б.Д. Исследование трансформаторной подстанции с двухподдиапазонным реакторно-тиристорным регулирующим устройством // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника. Информационные технологии, системы управления. – 2018. – № 28. – С. 92–107.

2. Klimash V.S., Tabarov B.D. Application of a reactor-thyristor device at a transformer substation // Lecture notes in networks and systems, Germany. – 2021. – P. 614–621.

3. Солодуха Я.Ю. Состояние и перспективы внедрения в электропривод статических компенсаторов реактивной мощности (обобщение отечественного и зарубежного опыта). Реактивная мощность в сетях с несинусоидальными токами и статические устройства для её компенсации. – М.: Информэлектро, 1981. – 67 с.

4. Герасименко А.А., Федин В.Т. Передача и распределение электрической энергии. – 2-е изд. – Ростов н/Д: Феникс; Красноярск: Издательские проекты, 2008. – 720 с.

5. Железко Ю.С. Потери электроэнергии. Реактивная мощность. Качество электроэнергии: руководство для практических расчетов. – М.: ЭНАС, 2009. – 456 с.

6. Klimash V.S., Tabarov B.D. The Method and Structure of Switching on and off, and Regulating the Voltage of a Transformer Substation // 2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon). – Vladivostok, 2018. – P. 8602876. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602876

7. Князевский Б.А., Липкин Б.Ю. Электроснабжение промышленных предприятий: учебник. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Высшая школа, 1979. – 431 с.

8. Поспелов Г.Е., Сыч Н.М., Федин В.Т. Компенсирующие и регулирующие устройства в электротехнических системах. – СПб.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.

9. Edson H. Watanabe, Richard M. Stephan, Mauricio Aredes. New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Power in Electrical Systems with Generic Loads // IEEE Transactions on Power Delivery. – April 1993. – Vol. 8, № 2,

10. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits // Int. Power Electronics Conf. IPES 83, Tokyo, Japan, 1983. – P. 1375–1386.

11. Ильяшов В.П. Автоматическое регулирование мощности конденсаторных установок. – 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергия, 1977. – 104 с.

12. Кочкин В.И., Нечаев О.П. Применение статических компенсаторов реактивной мощности в электрических сетях энергосистем и предприятий. – М.: Изд-во НИЦ ЭНАС, 2002. – 248 с.

13. Лиске Е.Г., Сельменева Д.С., Шевцов Д.Е. Исследование переходных процессов при управляемом включении конденсаторной батареи // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 24. – С. 121–133.

14. Ибрагим Э.А.Э. Разработка и исследование статических компенсаторов реактивной мощности на основе тиристорно-переключаемых схем: дис. ... канд. техн. наук. – М.: Изд-во НИУ «МЭИ», 2018. – 143 с.

15. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Design and Assessment of Static VAR Compensator on Railways Power Grid Operation under

Normal and Contingencies Conditions // 16th IEEE conference (Florence, Italy, 7–10 June 2016). – Florence, Italy, 2016.

16. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Design and Optimization of New Thyristors Controlled Reactors with Zero Harmonic Content // 18<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices (June 29 – July 3, 2017), Novosibirsk, 2017.

17. Smith L.M. A practical approach in substation capacitor bank applications to calculating, limiting and reducing the effects of transient currents // IEEE Transactions on industry applications. – 1995. – Vol. 31, iss. 4. – P. 721–724.

18. Working group 13.04. Shunt capacitor bank switching stresses and test methods (1st part) // Electra. – 1999. – № 182. – P. 165–189.

19. Шишкин С.А. Автоматическое управление конденсаторными установками по току нагрузки // Электрика. – 2002. – № 5. – С. 33–35.

20. Шишкин С.А. Выбор мощности и количества ступеней регулирования конденсаторных установок // Вестник МГАУ. Электротехнологии, электрификация и автоматизация сельского хозяйства. – 2003. – Вып. 3. – С. 18–23.

21. Климаш В.С., Тараканов В.И. Способы и устройства для включения и отключения трёхфазных нагрузок // Электротехнические комплексы и системы управления. – 2015. – № 2. – С. 24–28.

22. Иньков Ю.М., Климаш С.В., Климаш В.С. Электронно-электрические аппараты для компенсаторов реактивной мощности в промышленных и тяговых сетях // Практическая силовая электроника. – 2018. – № 2(70). – С. 31–35.

23. Пат. 2746796 Рос. Федерация, МПК Н 02 М 3/18 (2006.01). Способ регулирования реактивной мощности конденсаторной установкой / С.В. Климаш, А.М. Константинов, Б.Д. Табаров, В.С. Климаш. – № 2020133987/07; заявл. 15.10.2020; опубл. 21.04.2021. Бюл. № 12.

24. Пат. 2749606 Рос. Федерация, МПК Н 02 J 3/18 (2006.01). Способ трехступенчатого регулирования реактивной мощности конденсаторной установкой / В.С. Климаш, Б.Д. Табаров, Р.Р. Ниматов, Е.М. Антонов. – № 2020128868/07; заявл. 31.08.2020; опубл. 16.06.2021. Бюл. № 17.

25. Климаш В.С., Табаров Б.Д. Блочно-модульная модель для исследования физических процессов электротермической установки с компенсацией реактивной мощности: св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ. – М.: ФИПС, 2021. – № 2021614296 от 22 марта 2021 г.

## References

1. Климаш В.С., Табаров Б.Д. Исследование трансформаторной подстанции с двухподдиапазонным реакторно-тиристорным регулирующим устройством [Investigation of a transformer substation with a two-band reactor-thyristor regulating device]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2018, no. 28, pp. 92-107.
2. Klimash V.S., Tabarov B.D. Application of a reactor-thyristor device at a transformer substation. *Lecture notes in networks and systems, Germany*, 2021, pp. 614-621.
3. Solodukha Ia.Iu. Sostoianie i perspektivy vnedreniia v elektroprivod staticheskikh kompensatorov reaktivnoi moshchnosti (obobshchenie otechestvennogo i zarubezhnogo opyta). Reaktivnaia moshchnost' v setiakh s nesinusoidal'nymi tokami i staticheskie ustroistva dlia ee kompensatsii [State and prospects of implementation of static reactive power compensators in electric drive (generalization of domestic and foreign experience). Reactive power in networks with non-sinusoidal currents and static devices for its compensation]. Moscow: Informelektro, 1981, 67 p.
4. Gerasimenko A.A., Fedin V.T. *Peredacha i raspredelenie elektricheskoi energii* [Transmission and distribution of electric energy]. 2nd ed. Rostov n/D: Feniks, Krasnoiarsk: Izdatel'skie proekty, 2008, 720 p.
5. Zhelezko Iu.S. *Poteri elektroenergii. Reaktivnaia moshchnost'. Kachestvo elektroenergii: rukovodstvo dlia prakticheskikh raschetov* [Electricity losses. Reactive power. The quality of electricity]. Moscow: ENAS, 2009, 456 p.
6. Klimash V.S., Tabarov B.D. The Method and Structure of Switching on and off, and Regulating the Voltage of a Transformer Substation. *2018 International Multi-Conference on Industrial Engineering and Modern Technologies (FarEastCon)*. Vladivostok, 2018, 8602876 p. DOI: 10.1109/FarEastCon.2018.8602876
7. Kniazevskii B.A., Lipkin B.Iu. *Elektrosnabzhenie promyshlennykh predpriatii* [Power supply of industrial enterprises]. 2nd ed. Moscow: Vysshaia shkola, 1979, 431 p.

8. Pospelov G.E., Sych N.M., Fedin V.T. Kompensiruiushchie i reguliruiushchie ustroystva v elektrotekhnicheskikh sistemakh [Compensating and regulating devices in electrical systems]. Saint Petersburg: Energoatomizdat, 1983, 112 p.

9. Edson H. Watanabe, Richard M. Stephan, Mauricio Aredes. New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Power in Electrical Systems with Generic Loads. *IEEE Transactions on Power Delivery*. April 1993, vol. 8, no. 2,

10. Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits. *Int. Power Electronics Conf. IPEC 83*, Tokyo, Japan, 1983, pp. 1375-1386.

11. Il'iashov V.P. Avtomaticheskoe regulirovanie moshchnosti kondensatornykh ustanovok [Automatic power control of condenser installations]. 2nd ed. Moscow: Energiia, 1977, 104 p.

12. Kochkin V.I., Nechaev O.P. Primenenie staticheskikh kompensatorov reaktivnoi moshchnosti v elektricheskikh setiakh energosistem i predpriatii [Application of static reactive power compensators in electric networks of power systems and enterprises]. Moscow: NTs ENAS, 2002, 248 p.

13. Liske E.G., Sel'meneva D.S., Shevtsov D.E. Issledovanie perekhodnykh protsessov pri upravliaemom vkluchenii kondensatornoi batarei [Investigation of transients during controlled activation of a capacitor bank]. *Vestnik Permskogo natsional'nogo issledovatel'skogo politekhnicheskogo universiteta. Elektrotehnika, informatsionnye tekhnologii, sistemy upravleniia*, 2017, no. 24, pp. 121-133.

14. Ibragim E.A.E. Razrabotka i issledovanie staticheskikh kompensatorov reaktivnoi moshchnosti na osnove tiristorno-perekliuchaemykh skhem [Development and research of static reactive power compensators based on thyristor-switchable circuits]. Ph. D. thesis. Moscow: Natsional'nyi issledovatel'skii universitet "Moskovskii energeticheskii institut", 2018, 143 p.

15. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Design and Assessment of Static VAR Compensator on Railways Power Grid Operation under Normal and Contingencies Conditions. *16th IEEE conference (Florence, Italy, 7-10 June 2016)*. Florence, Italy, 2016.

16. Panfilov D.I., Elgebaly A.E., Astashev M.G. Design and Optimization of New Thyristors Controlled Reactors with Zero Harmonic Content. *18<sup>th</sup> International Conference of Young Specialists on Micro/Nanotechnologies and Electron Devices* (June 29 - July 3, 2017), Novosibirsk, 2017.

17. Smith L.M. A practical approach in substation capacitor bank applications to calculating, limiting and reducing the effects of transient currents. *IEEE Transactions on industry applications*, 1995, vol. 31, iss. 4, pp. 721-724.

18. Working group 13.04. Shunt capacitor bank switching stresses and test methods (1st part). *Electra*, 1999, no. 182, pp. 165-189.

19. Shishkin S.A. Avtomaticheskoe upravlenie kondensatornymi ustanovkami po toku nagruzki [Automatic control of capacitor installations by load current]. *Elektrika*, 2002, no. 5, pp. 33-35.

20. Shishkin S.A. Vybor moshchnosti i kolichestva stupenei regulirovaniia kondensatornykh ustanovok [The choice of power and the number of stages of regulation of condenser installations]. *Vestnik Michurinskogo gosudarstvennogo agrarnogo universiteta. Elektrotekhnologii, elektrifikatsiia i avtomatizatsiia sel'skogo khoziaistva*, 2003, iss. 3, pp. 18-23.

21. Klimash V.S., Tarakanov V.I. Sposoby i ustroistva dlia vklucheniia i otkliucheniia trekhfaznykh nagruzok [Methods and devices for switching on and off three-phase loads]. *Elektrotekhnicheskie komplekisy i sistemy upravleniia*, 2015, no. 2, pp. 24-28.

22. In'kov Iu.M., Klimash S.V., Klimash V.S. Elektronno-elektricheskie apparaty dlia kompensatorov reaktivnoi moshchnosti v promyshlennykh i tiagovykh setiakh [Electronic and electrical devices for reactive power compensators in industrial and traction networks]. *Prakticheskaia silovaia elektronika*, 2018, no. 2(70), pp. 31-35.

23. Klimash S.V., Konstantinov A.M., Tabarov B.D., Klimash V.S. Sposob regulirovaniia reaktivnoi moshchnosti kondensatornoi ustanovkoi [Method of regulating reactive power by a condenser installation]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2746796 (2021).

24. Klimash V.S., Tabarov B.D., Nimatov R.R., Antonov E.M. Sposob trekhstupenchatogo regulirovaniia reaktivnoi moshchnosti kondensatornoi ustanovkoi [Method of three-stage regulation of reactive power by a condenser unit]. Patent Rossiiskaia Federatsiia no. 2749606 (2021).

25. Klimash V.S., Tabarov B.D. Blochno-modul'naia model' dlia issledovaniia fizicheskikh protsessov elektrotermicheskoi ustanovki s



kompensatsiei reaktivnoi moshchnosti [A block-modular model for studying the physical processes of an electrothermal installation with reactive power compensation]. Svidetel'stvo o gosudarstvennoi registratsii programmy dlia EVM no. 2021614296 (2021).

### **Сведения об авторах**

**Климаш Степан Владимирович** (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, начальник РЭС Комсомольской дистанции электроснабжения ОАО «РЖД» (681000, Комсомольск-на-Амуре, e-mail: klimash907@mail.ru).

**Табаров Бехруз Довудходжаевич** (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (681024, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, e-mail: behruz.tabarov@mail.ru).

**Климаш Владимир Степанович** (Комсомольск-на-Амуре, Россия) – доктор технических наук, профессор кафедры «Промышленная электроника» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (681000, Комсомольск-на-Амуре, ул. Ленина, 27, e-mail: klimash10@mail.ru).

### **About the authors**

**Stepan V. Klimash** (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, head of the Komsomolskaya power supply Distance open Joint Stock Company Russian Railways (681000, Komsomolsk-on-Amur, e-mail: klimash907@mail.ru).

**Bekhruz D. Tabarov** (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Ph. D. in Technical Sciences, Associate Professor of the Department of "Electric Drive and Automation of Industrial Installations" of Komsomolsk-on-Amur State University (681024, Komsomolsk-on-Amur, 27, str. Lenin, e-mail: behruz.tabarov@mail.ru).

**Vladimir S. Klimash** (Komsomolsk-on-Amur, Russian Federation) – Doctor of Technical Sciences, Professor of the Department of "Industrial electronics" (681000, Komsomolsk-on-Amur, 27, str. Lenin, e-mail: klimash10@mail.ru).

Получено 20.09.2021