

**Табаров Б. Д., Соловьев В. А.**  
**B. D. Tabarov, V. A. Solovyev**

**ИССЛЕДОВАНИЕ УПРАВЛЕНИЯ СЕМИСТУПЕНЧАТОГО КОМПЕНСАТОРА  
РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ ПРИ ДИСКРЕТНОМ РЕГУЛИРОВАНИИ РЕАКТИВНОЙ  
МОЩНОСТИ**

**CONTROL STUDY OF A SEVEN-STAGE REACTIVE POWER COMPENSATOR UNDER  
DISCRETE REACTIVE POWER CONTROL**

**Табаров Бехруз Довудходжаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: behruz.tabarov@mail.ru.

**Bekhruz D. Tabarov** – PhD in Engineering, Associate Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: behruz.tabarov@mail.ru.

**Соловьев Вячеслав Алексеевич** – доктор технических наук, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: epapu@knastu.ru.

**Vyacheslav A. Solovyev** – Doctor of Technical Sciences, Professor, Electric Drive and Automation of Industrial Installations Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: epapu@knastu.ru.

**Аннотация.** В статье исследуются режимы работы семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при дискретном переходе с одной ступени регулирования реактивной мощности на другую без возникновения флуктуации тока, потребляемого из сети, и динамических усилий. Для проведения данного исследования в среде MATLAB была разработана имитационная модель семиступенчатого компенсатора реактивной мощности на основе трёх блоков батареи конденсаторов. Полученные результаты этого физического процесса в стационарных и динамических режимах работы показали целесообразность применения предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности в различных областях применения систем электроснабжения.

**Summary.** The paper studies the operating modes of a seven-stage reactive power compensator at discrete transition from one stage of reactive power control to another without fluctuations of the current consumed from the network and dynamic forces. To carry out this study, a simulation model of a seven-stage reactive power compensator based on three capacitor bank units was developed in MATLAB environment. The obtained results of this physical process in stationary and dynamic modes of operation have shown the feasibility of the proposed seven-stage reactive power compensator in various applications of power supply systems.

**Ключевые слова:** семиступенчатый компенсатор реактивной мощности, регулирование реактивной мощности, тиристорный ключ, дискретное управление, формирование импульсов управления, имитационная модель.

**Key words:** seven-stage reactive power compensator, reactive power regulation, thyristor switch, discrete control, control pulse generation, simulation model.

*Научно-исследовательская работа выполнена при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (номер гранта: МК-3799.2022.4).*

**Введение.** Передача электрической энергии на большие расстояния и распределение её между потребителями с наименьшими потерями являются актуальными задачами проектирования и эксплуатации систем электроснабжения [1–3]. Несмотря на возрастающие тенденции развития новых технологий и совершенствование путей по решению задач, связанных со снижением потерь электроэнергии при производстве, передаче и распределении, на сегодняшний день существуют проблемы, которые не нашли окончательного решения, особенно в динамических режимах работы энергетических систем [4; 5]. Как известно, одним из путей решения этой проблемы является применение конденсаторной компенсирующей установки [6; 7]. Опыт эксплуатации систем электроснабжения с такими установками показывает, что при индивидуальной компенсации реактивной мощности, когда величина активно-индуктивной нагрузки постоянна, использование такого подхода является своевременным и эффективным [8; 9]. Анализ результатов исследования информационных источников и опыт эксплуатации существующих систем электроснабжения с устройствами многоступенчатой компенсации реактивной мощности позволили оценить эффективность их работы в электротехнических системах [10]. На основании этих результатов можно констатировать, что существующие многоступенчатые компенсаторы реактивной мощности разгружают электрические сети от потребления реактивной мощности, но обеспечение потребителей реактивной энергии происходит со сравнительно низкими технико-экономическими показателями. Это связано с тем, что, во-первых, в качестве коммутационных аппаратов используются механические аппараты, которые обладают низкими показателями по быстродействию. Кроме того, большое количество коммутационных аппаратов при многоступенчатом регулировании создаёт проблемы при включении и выключении блоков батареи конденсаторов, а также при их переключении. Во-вторых, низкая точность регулирования реактивной мощности приводит к перекомпенсации или недокомпенсации [11; 12]. Эти факторы не только сказываются на эффективности работы предлагаемых систем, но и влияют на нормальную работу и срок службы элементов систем электроснабжения, в результате чего возникают приостановки технологических процессов и выходит из строя электрооборудование [12].

Использование технического решения, описанного в [13; 14], позволяет ослабить влияние вышеотмеченных недостатков многоступенчатых компенсаторов реактивной мощности и обеспечить непрерывное и точное регулирование реактивной мощности при плавном и дискретном изменении тока нагрузки. Кроме того, указанное техническое решение позволяет сохранить высокое значение энергетических показателей при включении и выключении блоков батареи конденсаторов, а также при переключении ступеней компенсатора.

**Цель работы** – выявление возможности сохранения эффективности работы и расширения функциональных возможностей предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при возникновении необходимости дискретного регулирования реактивной мощности в системах электроснабжения.

Для достижения поставленной цели на разработанном программном комплексе [15] в среде MATLAB создана имитационная модель предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности на основе трёх блоков батареи конденсаторов. Функциональная схема имитационной модели предлагаемого компенсатора показана на рис. 1 и 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 ( $Z_n$ ), измерительные датчики тока и напряжения и другие вспомогательные элементы.

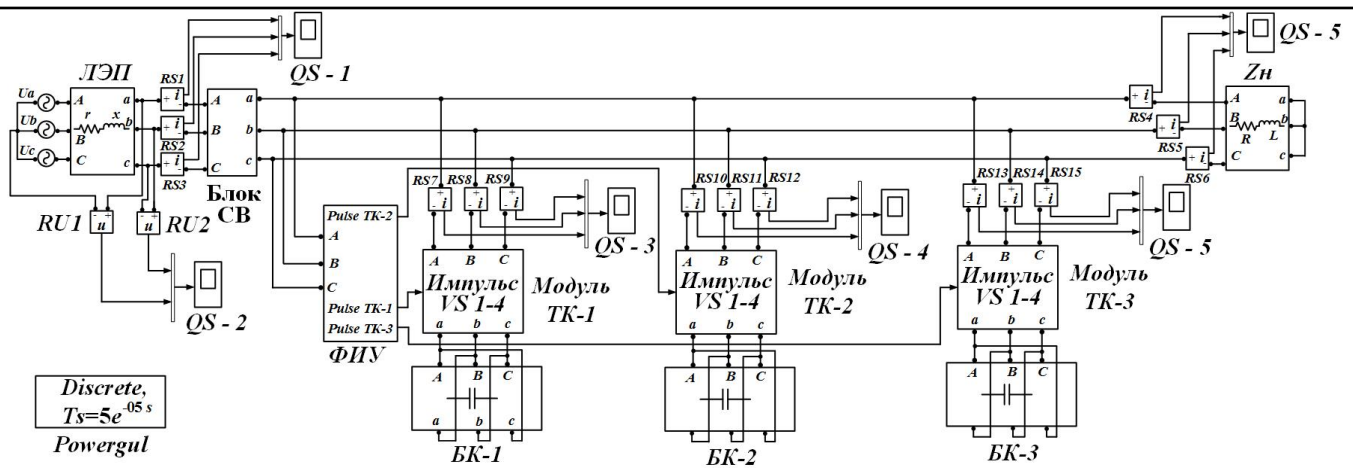


Рис. 1. Блочно-модульная модель семиступенчатого компенсатора реактивной мощности на основе трёх блоков батареи конденсаторов

Ниже (см. рис. 2 и 3) приведены полученные результаты исследования при дискретном изменении реактивной мощности в анализируемой схеме семиступенчатого компенсатора реактивной мощности. Важно отметить, что данные исследования выполнялись в соответствии с алгоритмом нового способа непрерывного регулирования реактивной мощности [13].

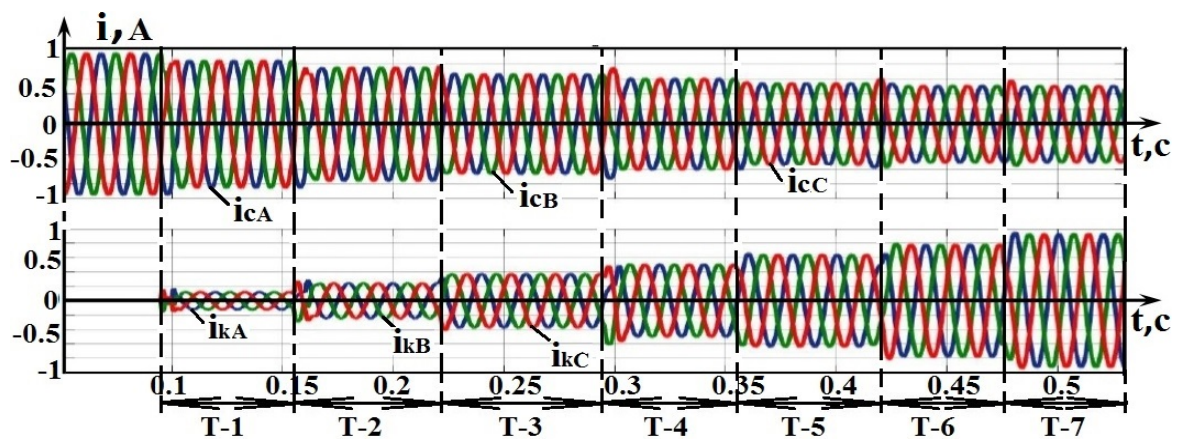


Рис. 2. Осциллограммы токов сети (сверху) и предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности (снизу) при плавном регулировании реактивной мощности

На осциллограммах (см. рис. 2 и 3) введены следующие обозначения: фазных токов сети ( $i_{cA}$ ,  $i_{cB}$  и  $i_{cC}$ ), токов конденсаторов ( $i_{kA}$ ,  $i_{kB}$  и  $i_{kC}$ ) и интервалов работы компенсатора реактивной мощности на семи ступенях (T-1, T-2 ... T-7). Следует отметить, что полученные результаты исследования, показанные на рис. 2 и 3, приведены в относительных единицах. Осциллограммы, приведённые на рис. 2, иллюстрируют работу предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при плавном изменении (повышении) тока нагрузки и непрерывном регулировании реактивной мощности предлагаемого компенсатора. Анализ кривых токов, приведённых на осциллограммах, наглядно иллюстрирует, что предлагаемый семиступенчатый компенсатор реактивной мощности при плавном изменении тока нагрузки обеспечивает плавное и непрерывное регулирование реактивной мощности, не создавая при этом бросков токов, просадки напряжения и появления электродинамических усилий в сети и на нагрузке, а также в самих конденсаторах [14]. Это и служит гарантом нормального функционирования системы электроснабжения и сохранения срока службы электрооборудования.

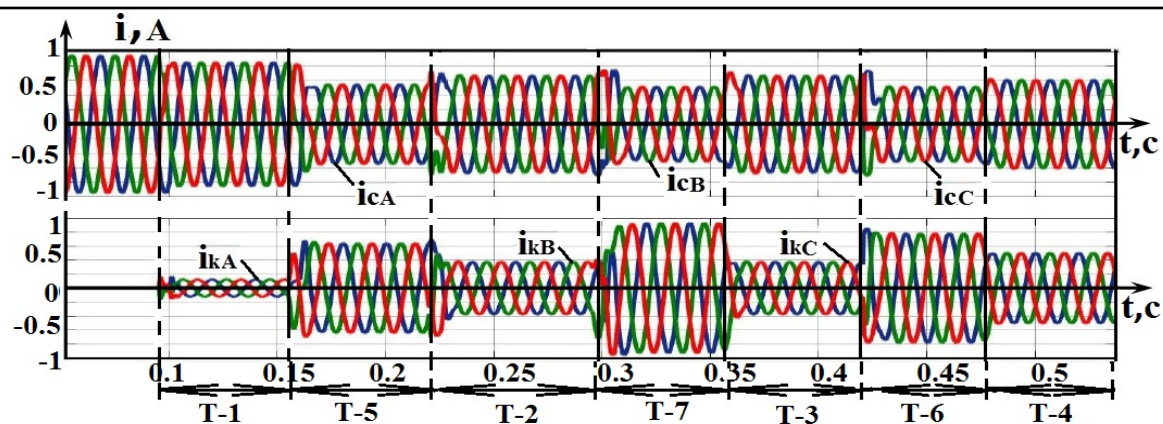


Рис. 3. Осциллограммы токов сети (сверху) и предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности (снизу) при дискретном регулировании реактивной мощности

Рассмотрим результаты исследования дискретного регулирования реактивной мощности при скачкообразном изменении тока нагрузки, имеющей активно-индуктивный характер. Как следует из кривых осциллограмм, приведённых на рис. 3, на интервалах времени  $T-1 \dots T-4$  нагрузка претерпевает скачкообразное изменение относительно номинального значения, что приводит к необходимости регулирования реактивной энергии в системах электроснабжения для того, чтобы сохранить эффективность работы установки. Алгоритм функционирования состоит из следующих управляющих действий. В начале интервала времени  $T-1$  предлагаемый компенсатор реактивной мощности вводит в работу первый блок батареи конденсаторов при выключенных блоках БК-2 и БК-3, который реализует первую ступень регулирования реактивной мощности. Как видно из осциллограмм на рис. 3, в конце интервала времени  $T-1$  и начале интервала времени  $T-5$  нагрузка скачкообразно возрастает в несколько раз, что создаёт нехватку реактивной мощности в системах электроснабжения. Такое изменение активно-индуктивной нагрузки приводит к формированию блоком ФИУ управляющих импульсов, подаваемых на входы тиристорного ключа ТК-3 для включения в работу блока БК-3. Включение блока БК-3 приводит к генерированию дополнительной реактивной мощности, которая необходима для обеспечения питания потребителей реактивной энергии и снижения потерь электроэнергии в системах электроснабжения. Стоит отметить, что на интервале времени  $T-5$  в работе находятся блоки БК-1 и БК-3 при выключенном блоке БК-2. Интервал времени  $T-2$  иллюстрирует работу предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности на второй ступени регулирования реактивной мощности. Здесь, в конце интервала времени  $T-5$  и начале интервала времени  $T-2$ , нагрузка резко снижается, а это, как известно из опыта работы существующих компенсаторов реактивной мощности, в системах электроснабжения приводит к перекомпенсации, в результате чего возникают перенапряжения и генерируется дополнительная реактивная энергия, что в конечном результате приводит к снижению эффективности работы системы и сокращению срока службы электрооборудования систем электроснабжения. На данном интервале времени предлагаемый семиступенчатый компенсатор реактивной мощности получает с блока ФИУ команды на снижение уровня генерируемой реактивной мощности. Управляющие сигналы с блока ФИУ подаются на тиристорные ключи ТК-1 и ТК-3 для отключения блоков БК-1 и БК-3, и параллельно с этим формируются импульсы, которые подаются на управляющие входы тиристорного ключа ТК-2 для включения блока БК-2, в результате чего одновременно с отключением блоков БК-1 и БК-3 вводится в работу блок БК-2, который и генерирует необходимую реактивную мощность. Интервал времени  $T-7$  иллюстрирует работу предлагаемого компенсатора при максимальном уровне тока нагрузки. Здесь, в конце интервала времени  $T-2$  и начале интервала времени  $T-7$ , происходит внезапное повышение тока нагрузки до максимального уровня, в результате чего блок ФИУ реагирует на это изменение и подаёт команды на управляющие входы тиристорных ключей ТК-1 и ТК-3 для включения в работу первого БК-1 и

третьего БК-3 блоков батареи конденсаторов. Блоки БК-1 и БК-3 в начале интервала времени T-7 включаются, на протяжении всего интервала времени работают вместе с блоком БК-2 и генерируют необходимую реактивную мощность. Стоит отметить, что на этом уровне (седьмая ступень регулирования) предлагаемый компенсатор реактивной мощности работает на полной мощности. Фрагменты из результатов исследования дискретного управления на третьей ступени регулирования реактивной мощности представлены на рис. 3 на интервале времени T-3. Как видно из осциллограмм в конце интервала времени T-7 и начале интервала времени T-3, нагрузка в системах электроснабжения резко падает и предлагаемое устройство снижает уровень генерируемой реактивной мощности до необходимого значения. На это изменение нагрузки также реагирует блок ФИУ – и подаёт импульсы на управляющие входы тиристорного ключа ТК-3 для отключения блока БК-3, в результате чего выводится из работы блок БК-3 и в работе остаются батареи конденсаторов БК-1 и БК-2. На рис. 3 фрагменты осциллограмм, приведённые на интервале времени T-6, иллюстрируют шестую ступень регулирования реактивной мощности при дискретном повышении тока нагрузки с третьей ступени на шестую. На этом интервале времени к работе приступает третий блок батареи конденсаторов БК-3 и параллельно с этим выключается первый блок батареи конденсаторов БК-1, но в работе по-прежнему остаётся второй блок батареи конденсаторов БК-2. Интервал времени T-4 иллюстрирует работу на четвёртой ступени регулирования реактивной мощности при резком снижении тока нагрузки с шестой ступени на четвёртую. Здесь, на этом интервале времени, блок ФИУ формирует одновременные импульсы на тиристорные ключи ТК-1, ТК-2 и ТК-3 для включения третьего блока батареи конденсаторов БК-3 и выключения первого БК-1 и второго БК-2 блоков конденсаторов.

Областью применения предлагаемого семиступенчатого компенсатора реактивной мощности являются не только системы электроснабжения с протяжёнными линиями электропередач, но и системы электроснабжения, где электрическая нагрузка плавно или дискретно меняется.

**Заключение.** Результаты исследования работы нового семиступенчатого компенсатора реактивной мощности при дискретном регулировании реактивной мощности подтвердили, что предлагаемое устройство при разработанном алгоритме управления сохраняет эффективность функционирования систем электроснабжения, несмотря на нестабильность и колебания нагрузки в широких пределах, за счёт повышения точности регулирования реактивной мощности, генерируемой блоками конденсаторных батарей. Кроме того, предлагаемое устройство благодаря новому способу управления семиступенчатым компенсатором реактивной мощности при переключении блоков батареи конденсаторов между ступенями регулирования реактивной мощности позволяет повысить надёжность работы и срок службы систем электроснабжения благодаря исключению всплесков тока, просадки напряжения, снижению коммутационных потерь и исключению электрической дуги на контактах коммутационных аппаратов.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Panfilov, D. I., Elgebaly, A. E. Modified Thyristor Controlled Reactors for Static VAR Compensators // 2016 IEEE 6th International Conference on Power and Energy (PECON 2016), Melaka, Malaysia, 2016.
2. 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 / Я. Ю. Солодуха. – М.: Информэлектро, 1981. – 67 с.
3. Panfilov, D. I., Elgebaly, A. E., Astashev, M. G. Design and Optimization of New Thyristors Controlled Reactors with Zero Harmonic Content // 18th International Conference of Young Specialists on Micro. Nanotechnologies and Electron Devices, 2017.
4. Panfilov, D. I., Elgebaly, A. E., Astashev, M. G. Thyristors Controlled Reactors for Reactive Power Control with Zero Harmonics Content // 17th IEEE International Conference on Smart Technologies IEEE EUROCON 2017, Ohrid, Macedonia, 2017.
5. Dionise, T. J., Morello, S. Comprehensive Analysis to Specify a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace Upgrade // IEEE IAS Annual Meeting Conference Record, 2014.

6. Dionise, T. J. Assessing the Performance of a Static Var Compensator for an Electric Arc Furnace // IEEE Industry Applications Society Annual Meeting, Las Vegas, NV, 2012.
7. Kawamura, A. An Optimal Control Method Applied for the Compensation of the Fundamental VAR Fluctuations in the Arc Furnace // IEEE Transactions of Industry Applications, 1983, vol. 1A-19, iss. 3. P. 414-423. doi: 10.1109/TIA.1983.4504217.
8. Кабышев, А. В. Компенсация реактивной мощности в электроустановках промышленных предприятий: учеб. пособие / А. В. Кабышев; под. ред. Томского политехнического университета. – Томск: Изд-во ТПУ, 2012. – 234 с.
9. Компенсирующие и регулирующие устройства в электротехнических системах / Г.Е. Поспелов [и др.]. – СПб.: Энергоатомиздат, 1983. – 112 с.
10. Akagi, H., Kanazawa, Y., Nabae, A. Generalized Theory of the Instantaneous Reactive Power in Three-Phase Circuits // IPEC 83 – Int. Power Electronics Conf., Tokyo, Japan, 1983, p. 1375-1386.
11. Edson, H. W., Richard, M. S., Mauricio, A. New Concepts of Instantaneous Active and Reactive Power in Electrical Systems With Generic Loads // IEEE Transactions on Power Delivery, 1993. Vol. 8.
12. Дерюжкова, Н. Е. Нечёткие алгоритмы управления статическим тиристорным компенсатором в системе электроснабжения с переменной нагрузкой / Н. Е. Дерюжкова, А. В. Купова, В. А. Соловьёв // Учёные записки Комсомольского-на-Амуре государственного технического университета. Науки о природе и технике. – 2020. – № I-1 (41). – С. 51-58.
13. Патент 2746796 РФ, МПК H02M 3/18 (2006.01). Способ регулирования реактивной мощности конденсаторной установкой: № 2020133987/07: заявлено 15.10.2020; опубликовано 21.04.2021 / Климаш С. В., Константинов А. М., Табаров Б. Д., Климаш В. С.; заявитель ФГБОУ ВО «ДВГУПС». – 13 с.
14. Климаш, С. В. Повышение точности регулирования реактивной мощности конденсаторной установки / С. В. Климаш, Б. Д. Табаров, В. С. Климаш // Вестник ПНИПУ. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2021. – № 40. – Т. 4. – С. 27-43.
15. Блочно-модульная модель для исследования физических процессов электротермической установки с компенсацией реактивной мощности / В. С. Климаш, Б. Д. Табаров: св-во о гос. регистр. программы для ЭВМ. – М.: ФИПС, 2021. – № 2021614296 от 22 марта 2021 г.