

Табаров Б. Д., Одинаев З. И.
B. D. Tabarov, Z. I. Odinaev

ИССЛЕДОВАНИЕ НЕПРЕРЫВНОГО РЕГУЛИРОВАНИЯ РЕАКТИВНОЙ МОЩНОСТИ КОНДЕНСАТОРНОЙ УСТАНОВКИ ПРИ ДИСКРЕТНОМ ПОВЫШЕНИИ НАГРУЗКИ

RESEARCH OF CONTINUOUS REGULATION OF THE REACTIVE POWER OF A CAPACITOR PLANT WITH A DISCRETE INCREASE IN LOAD

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, Assistant 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.

Одинаев Зикирё Исматуллоевич – студент кафедры «Электромеханика» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре); 681013, Хабаровский край, г. Комсомольск-на-Амуре, пр. Ленина, 27. E-mail: zikiryoodinaev25@gmail.com.

Zikire I. Odinaev – Student, Electromechanics Department, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur); 681013, Khabarovsk territory, Komsomolsk-on-Amur, 27 Lenin str. E-mail: zikiryoodinaev25@gmail.com.

Аннотация. В данной работе рассматриваются проблема низкой точности семиступенчатого регулирования реактивной мощности конденсаторной установки наиболее распространёнными в промышленности способами и её влияние на срок службы электрооборудования и эффективность работы системы электроснабжения всех отраслей промышленного комплекса при дискретном повышении нагрузки. Для устранения данных недостатков предложен новый алгоритм переключения конденсаторных батарей на основе трёх блоков конденсаторов с разными ёмкостями. Приводятся результаты исследования способа непрерывного регулирования реактивной мощности установки при стационарных и динамических процессах, которое было проведено в среде MATLAB.

Summary. This paper considers the problem of low accuracy of seven-stage regulation of the reactive power of a capacitor plant most common in industry and its impact on the service life of electrical equipment and the efficiency of power supply systems of all branches of the industrial complex with a discrete increase in load. To eliminate this drawback, a new algorithm for switching capacitor banks with a discrete increase in load is proposed. The results of the study of the method of continuous regulation of the reactive power of the installation for stationary and dynamic processes in the MATLAB environment are presented.

Ключевые слова: батареи конденсаторов, способ регулирования, тиристорный ключ, системы управления, сетевой выключатель, активно-индуктивная нагрузка, стационарный и динамический процесс.

Key words: capacitor banks, regulation method, thyristor switch, control systems, mains switch, active-inductive load, stationary and dynamic process.

Исследование выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (номер гранта МК-3799.2022.4).

УДК 621.314

Введение. В настоящее время батареи конденсаторов применяют в электрических сетях напряжением до 1 кВ и выше для улучшения пропускной способности линии электропередачи и комплексного повышения эффективности работы системы электроснабжения всех отраслей

промышленности и агропромышленного комплекса [1–5]. Область применения батареи конденсаторов показывает, что из-за неравномерного графика потребления реактивной мощности на сегодняшний день на промышленных предприятиях для обеспечения нормальной работы и повышения эффективности работы технологических установок достаточно широко применяют батареи конденсаторов, которые обеспечивают широкие пределы регулирования реактивной мощности. Из опыта эксплуатации батареи конденсаторов известно, что при многоступенчатом регулировании реактивной мощности число ступеней регулирования равно количеству батарей конденсаторов с одинаковыми параметрами [6–12]. Существующие конденсаторные установки, обеспечивающие многоступенчатое регулирование реактивной мощности, имеют недостатки, связанные с низкой точностью компенсации реактивной мощности и большим количеством коммутационной аппаратуры.

Для устранения вышеуказанных недостатков предлагается новый принцип построения семиступенчатого регулирования реактивной мощности на основе трёх блоков батареи конденсаторов с разной ёмкостью [13]. Функциональная схема предлагаемого семиступенчатого регулирования реактивной мощности в однолинейном исполнении и операции способа непрерывного регулирования реактивной мощности при плавном изменении нагрузки представлены в работе автора [14].

Целью работы являются повышение эффективности работы и качество электроэнергии, а также сохранение срока службы потребителей системы электроснабжения всех отраслей промышленности при плавном и дискретном изменении тока нагрузки за счёт применения предлагаемого многоступенчатого регулирования реактивной мощности и его специализированного способа переключения с одной ступени регулирования реактивной мощности на другую.

В работе для достижения этой цели рассматриваются и решаются нижеперечисленные задачи:

- разработка нового устройства и способа управления многоступенчатым регулированием реактивной мощности на основе трёх блоков батареи конденсаторов;
- исследование стационарных и динамических процессов предлагаемого устройства и способа многоступенчатого регулирования реактивной мощности при плавном и дискретном изменении тока нагрузки.

Применение предлагаемого устройства в реальной установке для обеспечения точности регулирования реактивной мощности позволяет уменьшить количество коммутационных аппаратов существующих батарей конденсаторов в 2 раза [13].

Как отмечалось в работе [13], цель достигается за счёт применения трёх блоков батареи конденсаторов с неравномерной ёмкостью конденсаторов и их специализированного способа управления при дискретном изменении тока нагрузки [14]. Следует отметить, что третья ступень непрерывного регулирования реактивной мощности при резком изменении тока нагрузки достигается при помощи первого и второго блоков батареи конденсаторов. Третий блок батареи конденсаторов на этом интервале времени не подключён к сети. Непрерывное регулирование реактивной мощности при резком изменении тока нагрузки с третьей ступени на пятую достигается при помощи первого и третьего блоков батареи конденсаторов, а второй блок батареи конденсаторов при этом выключен. Седьмая ступень непрерывного регулирования реактивной мощности при дискретном изменении тока нагрузки с пятой ступени на седьмую достигается при помощи всех трёх блоков батареи конденсаторов.

Учитывая нестабильности потребляемой реактивной мощности, рассмотрим принцип действия предлагаемого устройства и способ непрерывного многоступенчатого регулирования реактивной мощности при дискретном повышении промышленных нагрузок на четыре ступени.

Первая ступень регулирования достигается при помощи первого блока батареи конденсаторов БК-1 при выключенных втором БК-2 и третьем БК-3 блоках батареи конденсаторов. Как видно из схемы на рис. 1, подключение первого блока батареи конденсаторов БК-1 осуществляется при помощи первого блока тиристорного пускателя ТП-1. Первый блок

тиристорного пускателя ТП-1 специальным способом подключает первый блок батареи конденсаторов БК-1 к сети, сохраняя высокое значение эффективности работы потребителей электрической энергии и коммутационных аппаратов.

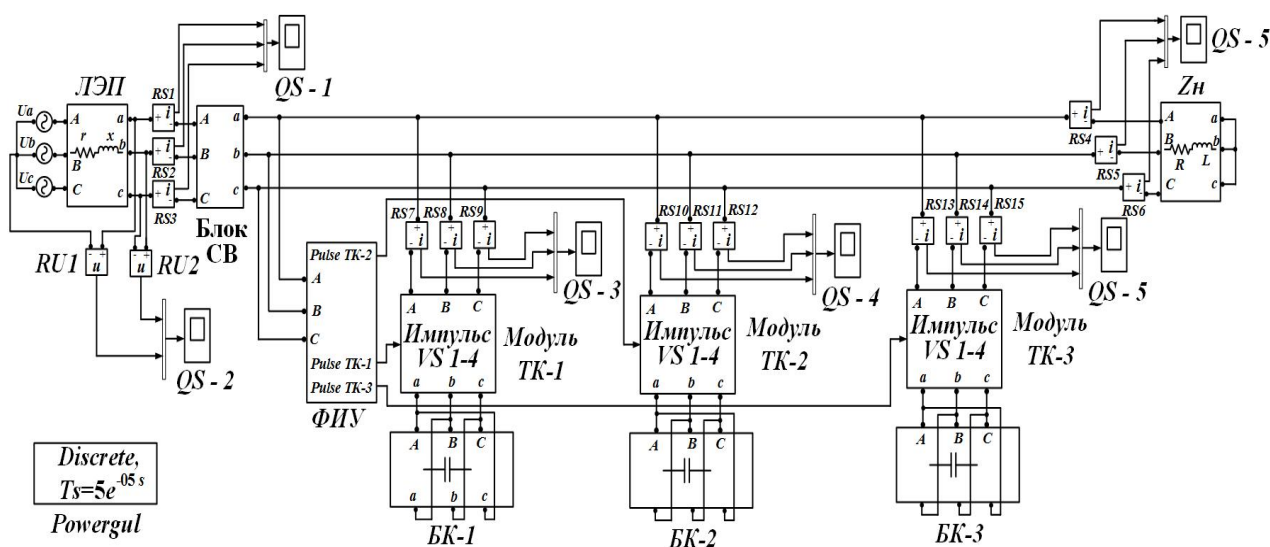


Рис. 1. Имитационная модель предлагаемой трёхкомплетной конденсаторной установки

Третья ступень регулирования достигается при помощи первого БК-1 и второго БК-2 блоков батареи конденсаторов и при выключенном третьем блоке конденсаторов БК-3. Подключение этих блоков батарей конденсаторов к сети осуществляется также специальными способами при помощи соответствующих блоков тиристорных пускателей (при помощи блоков ТП-1 и ТП-2).

Пятая ступень регулирования достигается при помощи первого БК-1 и третьего БК-3 блоков батареи конденсаторов при выключенном втором блоке батареи конденсаторов БК-2. Подключение этих блоков батареи конденсаторов к сети выполняется при помощи первого ТП-1 и третьего ТП-3 блоков тиристорных пускателей. Тиристорные пускатели ТП-1 и ТП-2 специальным способом подключают соответствующие блоки батареи конденсаторов к сети, сохраняя при этом также высокое значение эффективности работы систем электроснабжения и срок службы их электрооборудования.

Седьмая ступень регулирования достигается при включении второго блока батареи конденсаторов БК-2 параллельно к первому БК-1 и третьему БК-3 блокам конденсаторов при внезапном повышении тока нагрузки. Как отмечалось выше, тиристорные пускатели ТП-2 специальным способом вводят в работу второй блок батареи конденсаторов БК-2 без возникновения бросков токов и пропадов напряжения.

Моделирование предлагаемого устройства с многоступенчатым регулированием реактивной мощности. Цель моделирования данной установки, обеспечивающей многоступенчатое регулирование реактивной мощности при внезапном изменении тока нагрузки, заключается в следующем:

- проверка функционирования предлагаемого устройства и его специализированного способа управления при внезапном повышении тока нагрузки на четыре ступени;
- исследование стационарных и динамических процессов, а также оценка эффективности работы данного предлагаемого устройства при резком изменении тока нагрузки на четыре ступени.

Для достижения поставленной цели была разработана имитационная модель [15] предлагаемого устройства и проведены исследования при плавном и дискретном изменении тока нагрузки. Модель предлагаемой установки представлена 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.

Ниже рассмотрим результаты исследования компенсации реактивной мощности с одновременной стабилизацией напряжения у потребителей при неравномерном графике промышленных нагрузок. Следует отметить, что непрерывное регулирование реактивной мощности при изменении тока нагрузки в имитационной модели выполнялось в соответствии с вышеприведёнными операциями.

Полученные результаты исследования семиступенчатого регулирования реактивной мощности при плавном повышении тока нагрузки на семь ступеней и дискретном повышении на четыре ступени представлены на рис. 2. На осциллограммах приведены фазные токи сети (i_{cA} , i_{cB} и i_{cC}) и батареи конденсаторов ($i_{кА}$, $i_{кВ}$ и $i_{кС}$). Здесь Т-1, Т-2 ... Т-7 обозначают интервалы времени, на которых обеспечивается непрерывное и точное регулирование реактивной мощности при плавном и дискретном повышении нагрузки.

Как видно из рис. 2, а, нагрузка плавно возрастает до максимального значения и для плавного повышения эффективности работы сети и потребителей электроэнергии в работе специальными способами вводятся батареи конденсаторов без возникновения бросков тока и просадки напряжения в сети и на нагрузке, а также в самих конденсаторах [14].

На осциллограммах (см. рис. 2, б) на интервалах времени Т-3, Т-5 и Т-7 нагрузка внезапно дискретно повышается относительно минимального значения (интервал времени Т-1) и создаёт необходимость ввода в работу второго и/или третьего блока конденсаторов для уменьшения потери электроэнергии при передаче, распределении и потреблении электроэнергии. Здесь на интервале времени Т-1 первой ступени регулирование реактивной мощности у потребителей достигается благодаря работе первого блока батареи конденсаторов БК-1 при выключенных втором БК-2 и третьем БК-3 блоках батарей конденсаторов. Как показывают осциллограммы на рис. 2, б, на интервале времени Т-3 нагрузка относительно минимального уровня возрастает в 3 раза и в работу вводится второй блок конденсаторов при включённом первом блоке, которые обеспечивают третью ступень компенсации реактивной мощности потребителей электроэнергии. Третий блок конденсаторов при этом находится в отключённом состоянии. Как видно из интервала времени Т-5, нагрузка в конце интервала времени Т-3 внезапно также дискретно повышается и вводится в работу третий блок конденсаторов, а второй блок батареи конденсаторов выключается. На интервале времени Т-5 обеспечение пятой ступени компенсации реактивной мощности потребителей достигается при помощи первого и третьего блоков конденсаторов. Интервал времени Т-7 иллюстрирует седьмую ступень регулирования реактивной мощности потребителей при внезапном повышении тока нагрузки с пятой ступени на седьмую. Здесь, на этом интервале времени, к работе приступает второй блок батареи конденсаторов при нахождении в работе первого и третьего блоков конденсаторов.

Из приведённых результатов исследований семиступенчатого регулирования реактивной мощности видно, что предлагаемое техническое решение обладает способностью обеспечения непрерывного и точного регулирования реактивной мощности потребителей с хорошими энергетическими показателями. Полученные результаты исследований в динамических процессах также подтверждают, что при подключении конденсаторной установки и переключении её с одной ступени на другую регулирование выполняется без возникновения негативного влияния процесса переключения на сеть и нагрузку. Это позволяет обеспечить нормальную работу и сохранение срока службы электрооборудования.

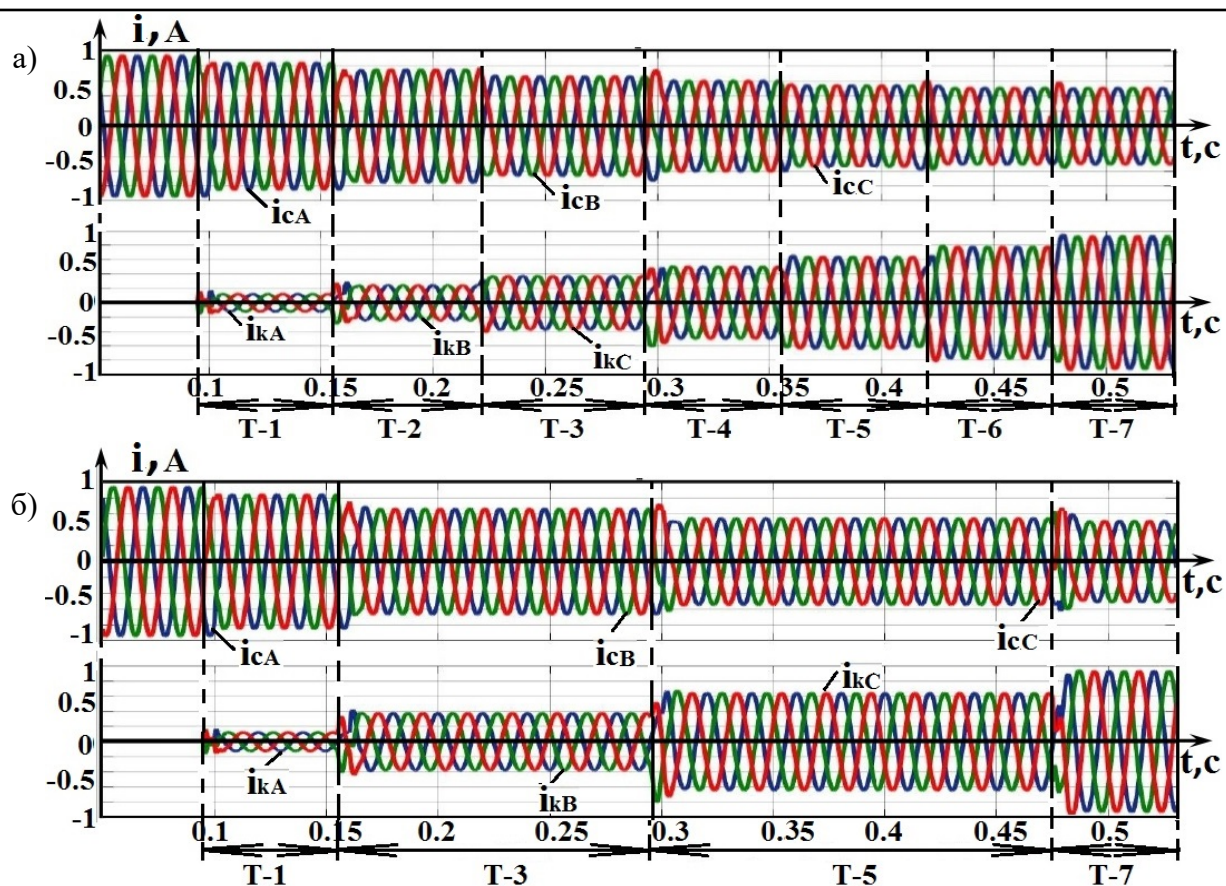


Рис. 2. Осциллограммы токов сети (сверху) и конденсаторов (снизу) при плавном (а) и дискретном (б) повышении нагрузки

Заключение. Результаты исследования показали, что реализация предлагаемого технического решения на существующих трансформаторных подстанциях позволяет уменьшить потери электроэнергии в сети, а также на силовых трансформаторах и у потребителей, что приводит к повышению качества напряжения и энергетической эффективности системы электроснабжения всех отраслей промышленности. Кроме этого, сохраняется срок службы электрооборудования благодаря обеспечению непрерывного и точного регулирования реактивной мощности, а также выполнению операции включения, переключения между ступенями и выключения батареи конденсаторов без возникновения электродинамических усилий и коммутационных потерь.

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 Российская Федерация, МПК Н 02 М 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 ДВГУПС. – 13 с.
14. Климаш, С. В. Повышения точности регулирования реактивной мощности конденсаторной установкой / 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.
16. Автоматизированный электромеханический привод вагонных дверей / К. К. Ким [и др.] // Электротехника. – 2019. – № 10. – С. 11-16.