

## ИССЛЕДОВАНИЕ ВКЛЮЧЕНИЯ И ВЫКЛЮЧЕНИЯ ТРАНСФОРМАТОРНЫХ ПОДСТАНЦИЙ С МНОГОСТУПЕНЧАТЫМ КОНДЕНСАТОРНО-РЕАКТОРНЫМ ПУСКОРЕГУЛИРУЮЩИМ УСТРОЙСТВОМ

Табаров Б.Д., Соловьев В.А.

*Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре*

### Аннотация

Рассматриваются совместное включение и выключение силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств трансформаторных подстанций при помощи нового многоступенчатого конденсаторно-реакторного пускорегулирующего устройства при нестабильности питающего напряжения и нагрузки. Данные исследования проводились на имитационной модели трансформаторной подстанции мощностью 25 МВА напряжением 35/10 кВ. Многоступенчатое конденсаторно-реакторное пускорегулирующее устройство подключается между сетевым высоковольтным выключателем и первичной обмотке силовых трансформаторов. Пускорегулирующее устройство в целом построено на основе комплектов компенсирующих устройств, блоков реакторов и контакторов, а также модулей тиристорных ключей. Предлагаемое техническое решение представляет собой комбинированное подключение к питающей сети и силовым трансформаторам по общепринятым электротехническим принципам. Совместное включение и выключение силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств трансформаторных подстанций осуществляется предложенным пускорегулирующим устройством после включения сетевого высоковольтного выключателя и формирования сигналов в системе импульсно-фазового управления и подача их специальными способами на управляющие входы многоступенчатого конденсаторно-реакторного пускорегулирующего устройства, а обесточивание предлагаемого устройства после одновременного выключения силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств с высокими энергетическими показателями осуществляется сетевым высоковольтным выключателем без возникновения негативных влияний на элементы электротехнических систем. Полученные результаты исследования подтверждают работоспособность предлагаемого пускорегулирующего устройства и существенное улучшения энергетических показателей не только электрооборудования трансформаторных подстанций, но и элементов питающей сети.

**Ключевые слова:** силовой трансформатор, комплект компенсирующего устройства, многоступенчатое конденсаторно-реакторное пускорегулирующее устройство, включение и выключение электрооборудования трансформаторной подстанции, бросок тока, просадка напряжения, электрическая дуга, коммутационные потери и перенапряжения, высокие энергетические показатели.

## INVESTIGATION OF SWITCHING ON AND OFF OF TRANSFORMER SUBSTATIONS BY A MULTI-STAGE CAPACITOR-REACTOR START-UP DEVICE

Bekhruz Tabarov, Vyacheslav Solovyov

*Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure*

### Abstract

The simultaneous switching on and off of power transformers and sets of compensating devices of transformer substations using a new multi-stage capacitor-reactor start-up device in case of insta-



bility of the supply voltage and load is considered. These studies were carried out on a simulation model of a transformer substation with a capacity of 25 MVA and a voltage of 35/10 kV. A multi-stage capacitor-reactor start-up device is connected between a mains high-voltage switch and the primary winding of power transformers. The control device as a whole is built on the basis of sets of compensating devices, reactor blocks and contactors, as well as modules of thyristor switches. The proposed technical solution is mixed connected to the supply network and power transformers according to electrotechnical principles. The combined switching on and off of power transformers and sets of compensating devices of transformer substations is carried out by the proposed start-up device after switching on a mains high-voltage switch and generating signals in a pulse-phase control system and supplying them by special methods to the control inputs of a multi-stage capacitor-reactor start-up device, and the de-energized devices of the proposed method, after simultaneous switching off of power transformers and sets of compensating devices with high energy indicators, are carried out by a mains high-voltage switch without negative effects on the elements of electrical systems. The obtained research results confirm the operability of the proposed start-up control device and significant improvements in the energy performance of not only the electrical equipment of transformer substations, but also the elements of the supply network.

**Keywords:** a power transformer, a set of compensating devices, a multi-stage capacitor-reactor start-up device, switching on and off the electrical equipment of a transformer substation, surge current, voltage drawdown, electric arc, switching losses and overvoltages, high energy performance.

## Введение

Совместное включение и выключение силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств, обеспечивающих повышенные энергетические показатели является актуальным и достаточно сложным вопросом в электротехнических системах [1-4]. В настоящее время включение и выключение силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств выполняются механическими высоковольтными выключателями, при этом в процессе включения возникают всплески тока, просадки напряжения и неравномерное распределение нагрузки между фазами, а при выключении появляется электрическая дуга, возникают коммутационные потери и перенапряжения на контактах коммутационных аппаратов [5,6]. Кроме этого, при выключении силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств создается также неравномерное распределение нагрузки по фазам, что отрицательно влияет не только на срок службы силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств, но и негативно влияет на элементы питающей сети. Эти недостатки сказываются на понижении точности и снижения быстродействия, что обуславливает необходимость создания нового технического решения или применить дополнительное устройство для улучшения энергетических показателей электрооборудования трансформаторных подстанций и элементов питающей сети. Как показывает практика, на сегодняшний день для смягчения запуска электромеханических устройств и влияния механических коммутационных аппаратов на повышение эффективности работы электродвигателей и сохранение их срока службы применяют разные дополнительные устройства такие как реостаты, реакторы, трансформаторы, тиристоры и т.д. Однако применение вышеперечисленных технических решений не позволяет полностью реализовать условия повышения эффективности работы электрооборудования, особенно силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств и сохранения их срока службы при их включении и выключении механическими коммутационными аппаратами [7, 8].

Опыт эксплуатации существующих силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств трансформаторных подстанций показывает, что их



включения и выключения осуществляется на повышенном (пониженном) напряжении из-за не точности функционирования механических коммутационных аппаратов и стабилизации напряжения с одновременной компенсацией реактивной мощности [1-6], в результате чего в электротехнических системах, особенно в силовых трансформаторах и комплектах компенсирующих устройствах создаются перенапряжения (провалы напряжения). Как показывает практика эти негативные влияния приводят к усугублению процесса включения и выключения, приостановлению технологического процесса и значительному сокращению срока службы электрооборудования электротехнических систем, в частности батареи косинусных конденсаторов и электромеханических устройств [1-6].

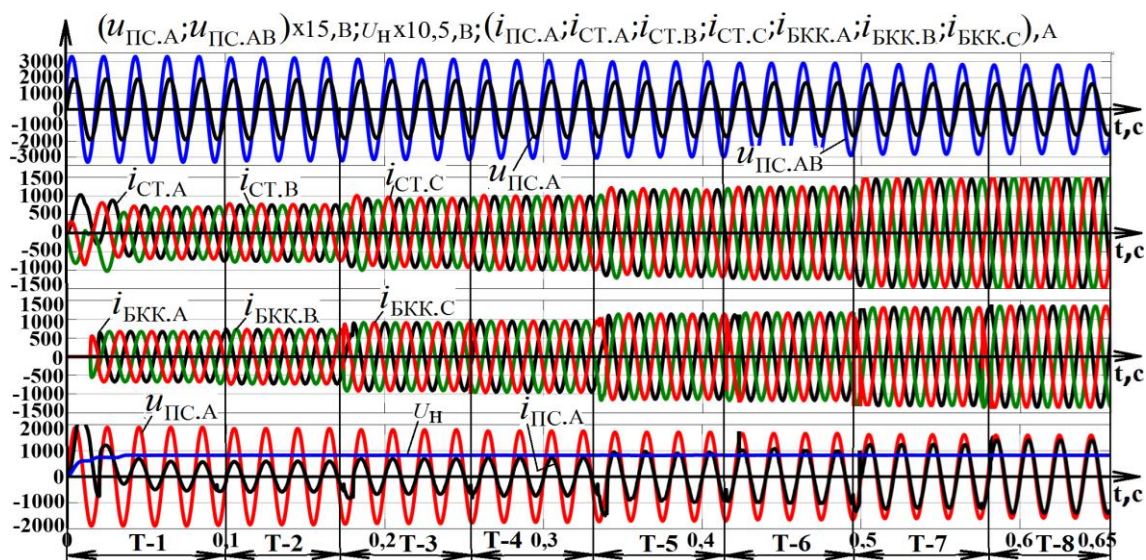
Авторы проанализировали функционирование известных механических устройств и вышеперечисленные их недостатков, в представленном материале с целью возможности их решения рассматривают эффективность применения нового технического решения на стороне высокого напряжения трансформаторных подстанций [7-10]. В работах [7-10] более подробно представлены применение предлагаемого устройства на стороне высокого напряжения трансформаторных подстанций, алгоритмы и способы его управления.

Исследование проводилось на разработанной имитационной модели трансформаторной подстанции оснащенным предложенным техническим решением, обеспечивающим включение и выключение силовых трансформаторов (СТ) и комплектов компенсирующих устройств (ККУ) при сохранении высоких технико-экономических показателей [7-10]. Оценка эффективности функционирования заявляемого устройства проводилась при нестабильности питаемого напряжения и нагрузки, на примере, отрицательного отклонения напряжения питаемого напряжения до -16 % и положительного отклонения нагрузки до +117 % относительно номинального уровня. Данные исследования проводились при угле сдвига фазы тока нагрузки равным  $\varphi = 70$  град. Полученные результаты исследования, которые иллюстрируют включение и выключение силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств на разных уровнях питаемого напряжения и нагрузки, представлены на рис. 1 и рис. 2.

Авторы с целью более наглядности исследования совместного включения и выключения СТ и ККУ при нестабильности электрических параметров в процессе включения и выключения СТ и ККУ, (см. рис.1) демонстрируют трехкоординатное функционирование заявляемого устройства, где несмотря на отклонение питаемого напряжения и тока нагрузки напряжение на входе и выходе СТ поддерживается на заданном уровне и при этом потребителям электроэнергии обеспечивается необходимый уровень реактивной энергии вырабатываемый предлагаемым ККУ [7-10]. На осциллограммах рис. 1, приведены соответствующие мгновенные значения фазных токов питающей сети ( $i_{ПСА}$ ), силового трансформатора ( $i_{СТ.А}$ ,  $i_{СТ.В}$ ,  $i_{СТ.С}$ ) и батареи косинусных конденсаторов ( $i_{БКК.А}$ ,  $i_{БКК.В}$ ,  $i_{БКК.С}$ ), а также мгновенные значения фазного ( $u_{ПСА}$ ) и линейного ( $u_{ПСАВ}$ ) напряжения питающей сети и действующее значение фазного напряжения нагрузки ( $U_n$ ). Здесь, напряжения питающей сети снижается до -16 % с шагом +2,5 %, а одновременно с этим ток на подстанции повышается до +117% от номинального уровня. На осциллограммах рис. 1 и рис. 2 эти изменения иллюстрируются интервалами времени T-2 – T-8, а интервал времени T-1 демонстрирует работу электротехнических системы при нормальном режиме работы.

Согласно рис. 1 предлагаемое устройство на всех интервалах времени поддерживает номинальное напряжения на входе и выходе (см. на кривой  $U_{н.А}$ ) силовых трансформаторов подстанции с высокими энергетическими показателями [7-10].





**Рис. 1. Осциллограммы токов и напряжений при совместном включении и выключении силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств при разных уровнях токов и напряжений**

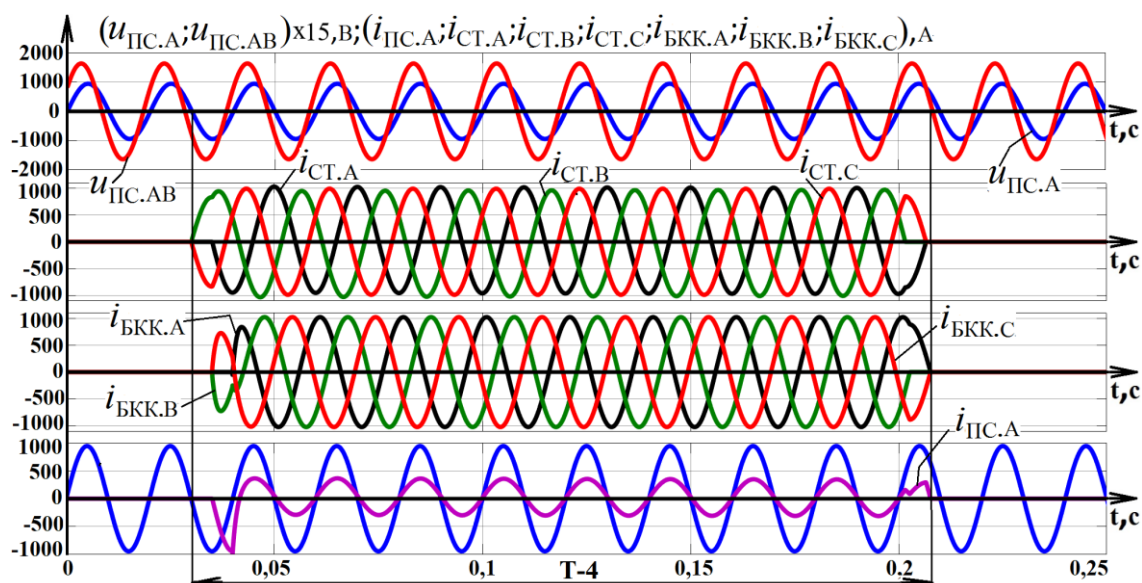
Совместное включение и выключение СТ и ККУ при разных уровнях питаемого напряжения и тока нагрузки иллюстрируется осциллограммами рис. 2, где на осциллограммах приведены соответствующие мгновенные значения фазных токов питающей сети ( $i_{ПС.А}$ ), силового трансформатора ( $i_{СТ.А}$ ,  $i_{СТ.В}$ ,  $i_{СТ.С}$ ) и батареи косинусных конденсаторов ( $i_{БКК.А}$ ,  $i_{БКК.В}$ ,  $i_{БКК.С}$ ), а также мгновенные значения фазного ( $u_{ПС.А}$ ) и линейного ( $u_{ПС.АВ}$ ) напряжения питающей сети. Здесь изменение уровня напряжения в питающей сети при включении и выключении подстанции иллюстрируется мгновенными значениями напряжения питающей сети ( $u_{ПС.А}$  и  $u_{ПС.АВ}$ ). Интервал времени T-1 иллюстрирует эффективность функционирования предлагаемого устройства при включении и выключении силового трансформатора при нормальном режиме, а интервалы времени T-2 – T-8 демонстрируют эффективности работы предлагаемого устройства при возникновении необходимости включения и выключения СТ и ККУ при ступенчатом снижении питаемого напряжения и повышении тока нагрузки от номинального уровня в вышеуказанных пределах.

Особенность принципа действия предлагаемого технического решения при совместном включении и выключении СТ и ККУ при снижении питаемого напряжения на -13,45 % и одновременном повышении тока нагрузки на +41 % от номинального уровня состоит в том, что при совместном включении и выключении СТ и ККУ с предложенным устройством необходимо учитывать величины отклонения и колебания напряжения питающей сети и(или) тока нагрузки, после чего в системе импульсно-фазового управления формируются импульсы и специальными способами подаются на управляющие входы соответствующих модулей тиристорных ключей предлагаемого технического решения для совместного включения и выключения СТ и ККУ с высокими энергетическими показателями [7-10].

Совместное включение и выключение СТ и ККУ на этом уровне напряжения питающей сети и тока нагрузки осуществляется модулями дополнительных и дополнительно-промежуточных тиристорных ключей через дополнительно-промежуточный реактор при выключенных силовом контакторе, основном, дополнительном и основно-промежуточном реакторах, модулях основных и основно-промежуточных тиристорных ключей блока многоступенчатого реакторно-тиристорного пускорегулирующего устройства, а включение и выключение первого, второго и четвертого ККУ



блока многоступенчатого конденсаторно-тиристорного пускорегулирующего устройства (МК-ТПРУ) достигается соответствующими модулями тиристорных ключей при выключенных блоках шунтирующих контакторов и разрядных устройств соответствующими ККУ, а также третьем ККУ блока МК-ТПРУ [7-10].



**Рис. 2 – Осциллограммы токов и напряжений при включении и выключении электрооборудования трансформаторных подстанций на интервале времени  $T-4$**

Результаты исследования включения и выключения электрооборудования трансформаторных подстанций подтверждают, что предлагаемое устройство не только повышает энергетические показатели электротехнических систем в частности СТ и ККУ, но и облегчает их функционирования за счет отсутствия повышения тока на входе и выходе трансформатора благодаря расширению функциональных возможностей заявляемого технического решения, которое не позволяет создать отклонение напряжения на подстанции несмотря на возникновение отклонения напряжения питающей сети и тока нагрузки в широких значениях [7-10].

## Выводы

Результаты анализа существующих электротехнических систем подтверждали, что совместное включение и выключение силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств при помощи известных механических коммутационных аппаратов при нестабильности питающего напряжения и тока нагрузки усугубляют функционирование электрооборудования электротехнических систем, прежде всего самых коммутационных аппаратов из-за значительного возникновения перенапряжения или провала напряжения, что приводят к снижению эффективности работы и значительному сокращению срока службы электрооборудования.

Результатами исследования совместного включения и выключения силовых трансформаторов и комплектов компенсирующих устройств с предложенным техническим решением установлено, что применение нового многоступенчатого конденсаторно-реакторного пускорегулирующего устройства на подстанции позволяет комплексно улучшить эффективности работы и энергетические показатели электрооборудования электротехнических систем, в частности самих коммутационных аппаратов, силовых трансформаторов и батареи косинусных конденсаторов при разных уровнях питающего напряжения и(или) тока нагрузки с высокими технико-экономическими показателями.



### Библиографический список

1. Сельменова Д.С., Лиске Е.Г., Шевцов Д.Е. Исследование переходных процессов при управлении включении силового трансформатора // Вестник Пермского национального исследовательского политехнического университета. Электротехника, информационные технологии, системы управления. – 2017. – № 24. – С. 161-177. EDN: [YLJHIW](#)
2. Стороженко Е.А., Осипов В.А. Снижение влияния апериодической составляющей тока элегазового выключателя ВЛ 220-500 кВ на процесс коммутации в послеаварийных режимах // Инженерный вестник Дона. – 2018. – № 2 (49). – С. 12. EDN: [YATEGD](#)
3. Евдокунин Г., Дмитриев М., Гольдштейн С., Иваницкий Ю. Высоковольтные ВЛ. Коммутации и воздействия на выключатели [Электронный ресурс] // Новости электротехники. – 2008. – № 3(51). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2008/51/08.php>.
4. Евдокунин Г., Дмитриев М., Гринёв Н. Элегазовые выключатели 110- 750 кВ. Особенности работы при отключении ненагруженных ВЛ с шунтирующими реакторами [Электронный ресурс] // Новости электротехники. – 2012. – № 4 (76). URL: <http://news.elteh.ru/arh/2012/76/04.php>.
5. Павлюченко Д.А., Шевцов Д.Е. Особенности управляемой коммутации при нормальных и аварийных режимах в электрических сетях среднего напряжения // Электро. Электротехника, электроэнергетика, электротехническая промышленность. – 2015. – № 5. – С. 41-44. EDN: [UQFFVH](#)
6. Рывкин А.М., Буйнов А.Л., Давыдов С.М., Лукацкая И.А., Ляшенко В.Д. Перенапряжения при отключении вакуумным выключателем трансформатора без нагрузки и с индуктивной нагрузкой // Электрические станции. – 1990. – № 5. – С. 62-67.
7. Пат. РФ RU 2838255 Рос. Федерация МПК: H02M 5/25. Многоступенчатое реакторно-тиристорное пускорегулирующее устройство трансформаторной подстанции / Б.Д. Табаров; заявитель и патентообладатель Табаров Б.Д. № 024132055; заявл. 23.10.2024; опубл. 14.04.2025, бюл. № 11. EDN: [BLOWRV](#)
8. Пат. РФ RU 2841517 Рос. Федерация МПК: H02M 5/257. Способ управления многоступенчатым реакторно-тиристорным пускорегулирующим устройством трансформаторной подстанции / Б.Д. Табаров; заявитель и патентообладатель Табаров Б.Д. № 2024135480; заявл. 25.11.2024; опубл. 09.06.2025, бюл. № 16. EDN: [QVCZBZ](#)
9. Пат. РФ RU 2841997 Рос. Федерация МПК: H02M 5/257. Многоступенчатый конденсаторно-реакторный регулятор напряжения и реактивной мощности на высокой стороне трансформаторной подстанции / Б.Д. Табаров; заявитель и патентообладатель Табаров Б.Д. № 2025101946; заявл. 28.01.2025; опубл. 18.06.2025, бюл. № 17. EDN: [INEOSG](#)
10. Пат. РФ RU 2850804 Рос. Федерация МПК: H02J 3/18. Многоступенчатое конденсаторно-тиристорное компенсирующее устройство трансформаторной подстанции / Б.Д. Табаров; заявитель и патентообладатель Табаров Б.Д. № 2025109500; заявл. 14.04.2025; опубл. 13.11.2025, бюл. № 32. EDN: [EXVWMY](#)

### References

1. Selmeneva, D. S., Liske, E. G., & Shevtsov, D. E. (2017). Research of transition process at the controlled inclusion of power transformer. *Vestnik Permskogo nacional'nogo issledovatel'skogo politexnicheskogo universiteta. E'lektrotexnika, informacionny'e texnologii, sistemy` upravleniya*, 24, 161-177. [In Russian]
2. Storozhenko E. A., & Osipov, V. A. (2018). Reducing the influence aperiodic component of the current gas-insulated switch hv lines 220-500 kv on the switchover process in a disaster modes. *Engineering Journal of Don*, 2(49), 12. [In Russian]
3. Evdokunin, G., Dmitriev, M., Goldstein, S., & Ivanitsky, Yu. (2008). Vy'sokovol'tny'e VL. Kommutacii i vozdeystviya na vy`klyuchateli [High-voltage overhead lines Switching and effects on switches]. *Novosti e'lektrotexniki*, 3. Retrieved 01 November, 2026 from <http://news.elteh.ru/arh/2008/51/08.php> [In Russian]
4. Evdokunin, G., Dmitriev, M., & Grinev, N. (2012). E'legazovy'e vy`klyuchateli 110- 750 kV. Osobennosti raboty` pri otklyuchenii nenagruzhenny`x VL s shuntiruyushhimi reaktorami [*Electric gas switches 110- 750 kV. Features of operation when disconnecting unloaded overhead*



- lines with shunting reactors]. *Novosti e'lektrotexniki*, 3. Retrieved 01 November, 2026 from <http://news.elteh.ru/arh/2012/76/04.php> [In Russian]
5. Pavlyuchenko, D. A., & Shevtsov, D. E. (2015). Osobennosti upravlyaemoj kommutacii pri normal'ny'x i avarijny'x rezhimax v e'lektricheskix setyax srednego napryazheniya [Features of controlled switching in normal and emergency modes in medium voltage electrical networks]. *E'lektr. E'lektrotexnika, e'lektroe'nergetika, e'lektrotexnicheskaya promy'shennost'*, 5, 41-44.
  6. Ryvkin, A. M., Buinov, A. L., Davydov, S. M., Lukatskaia, I. A., & Liashenko, V. D. (1990). Perenapryazheniya pri otklyuchenii vakuumnoy'm vy'klyuchatelem transformatora bez nagruzki i s induktivnoy nagruzkoj [Overvoltage during disconnection by a vacuum switch of a transformer without load and with an inductive load]. *E'lektricheskie stancii*, 5, 62-67. [In Russian]
  7. Tabarov, B. D. (2025). Patent RU 2838255. *Mnogostupenchatoe reaktorno-tiristornoe puskoreguliruyushhee ustrojstvo transformatornoj podstancii* [Multistage reactor-thyristor start-up device of a transformer substation]. FIPS. [In Russian].
  8. Tabarov, B. D. (2025). Patent RU 2841517. *Sposob upravleniya mnogostupencha-ty'm reaktorno-tiristorny'm puskoreguliruyushhim ustroystvom transformatornoj podstancii* [Method of controlling a multi-stage reactor-thyristor start-up control device of a transformer substation]. FIPS. [In Russian]
  9. Tabarov, B. D. (2025). Patent RU 2841997 *Mnogostupenchaty'j kondensatorno-reaktorny'j regulyator napryazheniya i reaktivnoj moshhnosti na vy'sokoj storone transformatornoj podstancii* [Multi-stage capacitor-reactor voltage and reactive power regulator on the high side of a transformer substation]. FIPS. [In Russian]
  10. Tabarov, B. D. (2025). Patent RU 2850804. *Mnogostupenchatoe kondensatorno-tiristornoe kompensiruyushhee ustrojstvo transformatornoj podstancii* [Multi-stage capacitor-thyristor compensating device of a transformer substation]. FIPS. [In Russian]

### Сведения об авторах

**Табаров Бехруз Довудходжаевич**, канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, [behruz.tabarov@mail.ru](mailto:behruz.tabarov@mail.ru), SPIN-код: [1493-7563](https://orcid.org/0000-0001-5878-3755), ORCID: [0000-0001-5878-3755](https://orcid.org/0000-0001-5878-3755).

**Соловьев Вячеслав Алексеевич**, д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок», Комсомольский-на-Амуре государственный университет, г. Комсомольск-на-Амуре, [epapu@knastu.ru](mailto:epapu@knastu.ru), SPIN-код: [7267-4896](https://orcid.org/7267-4896).

### Authors about

**Bekhruz Dovudkhodzhayevich Tabarov**, Cand. of Tech. Sciences, Ass. Prof., Ass. Prof. of the Department of Electric Drives and the Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, [behruz.tabarov@mail.ru](mailto:behruz.tabarov@mail.ru), ORCID: [0000-0001-5878-3755](https://orcid.org/0000-0001-5878-3755).

**Vyacheslav Alekseevich Solovyev**, Dr. of Tech. Sciences, Professor, Professor of the Department of Electric Drives and the Automation of Industrial Installations, Komsomolsk-na-Amure State University, Komsomolsk-na-Amure, [epapu@knastu.ru](mailto:epapu@knastu.ru).

### Ссылки для цитирования

Табаров Б.Д., Соловьев В.А. Исследование включения и выключения трансформаторных подстанций многоступенчатым конденсаторно-реакторным пускорегулирующим устройством // Энергетические системы. – 2025. – № 4. – С. 25-58.

Tabarov, B., & Solovyev, V. (2025). Investigation of switching on and off of transformer substations by a multi-stage capacitor-reactor start-up device. *Energy Systems*, 4, 52-58. <https://doi.org/10.34031/es.2025.4.05>

