

**Табаров Б. Д., Ляпин В. В.**  
**B. D. Tabarov, V. V. Lyapin**

**РАЗРАБОТКА И ИССЛЕДОВАНИЕ НОВОГО СПОСОБА УПРАВЛЕНИЯ ПЕЧНОГО  
ТРАНСФОРМАТОРА ЭЛЕКТРОТЕРМИЧЕСКОЙ УСТАНОВКИ СОВМЕСТНО  
С БАТАРЕЯМИ КОСИНУСНЫХ КОНДЕНСАТОРОВ**

**DEVELOPMENT AND RESEARCH OF A NEW CONTROL METHOD FOR THE FURNACE  
TRANSFORMER OF AN ELECTROTHERMAL INSTALLATION TOGETHER  
WITH BATTERIES COSINE CAPACITORS**

**Табаров Бехруз Довудходжаевич** – кандидат технических наук, доцент кафедры «Электропривод и автоматизация промышленных установок» Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**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).

**Ляпин Владимир Владимирович** – магистрант Комсомольского-на-Амуре государственного университета (Россия, Комсомольск-на-Амуре).

**Vladimir V. Lyapin** – Master's Degree Student, Komsomolsk-na-Amure State University (Russia, Komsomolsk-on-Amur).

**Аннотация.** В данной статье рассматривается вопрос повышения энергетической эффективности и динамических свойств электротермической установки (ЭУ) за счёт применения предлагаемого тиристорного пускателя и специального способа включения и выключения печного трансформатора и батареи косинусных конденсаторов установки. Предлагаемый тиристорный пускатель и специальный способ включения и выключения обеспечивают безударное включение печного трансформатора и батареи косинусных конденсаторов без бросков токов и снижения напряжения, а также их выключение без возникновения коммутационных потерь, перенапряжения и электрической дуги между контактами сетевого высоковольтного выключателя. Приводятся результаты исследования переходных процессов по известному и новому способу включения печного трансформатора совместно с батареями косинусных конденсаторов посредством упрощённого гибридного аппарата и выключение его без возникновения дуги на механических контактах сетевого высоковольтного выключателя.

**Summary.** This article discusses the issue of improving the energy efficiency and dynamic properties of an electrothermal installation (EC) with the proposed thyristor starter and its special method of switching on and off the furnace transformer and the battery of cosine capacitors of the installation. The proposed thyristor starter and its special method of switching on and off provides shock-free activation of the furnace transformer and the battery of cosine capacitors without current surges and voltage reduction, as well as their shutdown without the occurrence of switching losses, overvoltage and electric arc between the contacts of the mains high-voltage switch. The results of a study of transients using the known and new method of switching on a furnace transformer together with batteries of cosine capacitors by means of a simplified hybrid apparatus and turning it off without arcing on the mechanical contacts of a high-voltage mains switch are presented.

**Ключевые слова:** печной трансформатор, батареи косинусных конденсаторов, тиристорный пускатель, способ мягкого включения, отключение без электрической дуги, установка электротермического воздействия.

**Key words:** furnace transformer, batteries of cosine capacitors, thyristor starter, method of soft switching on, disconnection without electric arc, installation of electrothermal action.

*Разработка и исследование нового способа управления печного трансформатора электротермической установки совместно с батареями косинусных конденсаторов выполнено при финансовой поддержке Совета по грантам Президента Российской Федерации для государственной поддержки молодых российских учёных – кандидатов наук (номер гранта: МК-3799.2022.4).*

**Введение.** В настоящее время в электротермической установке (ЭУ) операция включения и выключения высоковольтного электрооборудования осуществляется при помощи коммутационных электрических аппаратов, обладающих механическими контактами, которые создают ряд недостатков, связанных с низкими энергетическими показателями при выполнении операции включения и выключения электротермической установки [1–9].

Приведённые выше недостатки обусловлены тем, что включение ЭУ приводит к возникновению большого пускового тока в одной из фаз сети и просадке фазного напряжения. Помимо этого, возникают асимметричные токи в трёхфазных сетях, ударные электродинамические усилия в катушках и дополнительные пусковые потери в сети. Выключение ЭУ сопровождается возникновением электрической дуги, выжигающей серебряные контакты сетевого выключателя, это усугубляется к тому же всплеском тока и усилением дуги при разрыве электрической цепи с конденсатором на входе устройства.

Существует научная работа, в которой предлагаются новый способ и устройство для включения и выключения ЭУ [1].

Плюсом данного способа и устройства является то, что установка включается без скачков токов и провалов напряжения, а выключение – без возникновения электрической дуги и перенапряжений на контактах коммутационных аппаратов. Однако устройство имеет недостатки, связанные с низкой энергоэффективностью, вызванной загрузкой электрической сети реактивной мощностью, увеличением тока и, как следствие, значительными электрическими потерями из-за квадрата тока в процессе работы установки. В сочетании с конденсаторной установкой включение и выключение печного трансформатора ЭУ с большими индуктивными сопротивлениями обмоток требуют разработки специального способа управления динамическими процессами для поддержания высоких показателей качества электроэнергии в сети.

С учётом всего вышесказанного, актуальной является разработка нового устройства электротехнических систем с улучшенными энергетическими эффективностями и динамическими свойствами ЭУ. Кроме того, существует необходимость совершенствования электросталеплавильных комплексов с печными трансформаторами мощностью 120 МВА напряжением 35 кВ и токами 2 кА, для которых разработана более сложная электротехническая система [10; 12], но с теми же принципами построения, которым, в частности, посвящена данная статья.

*Целью работы* является улучшение технико-экономических показателей электротермической установки.

Для достижения поставленной цели в работе ставились и решались следующие задачи:

1. выполнить аналитическое исследование информационных источников по проблеме обеспечения нормальной работы ЭУ, улучшения качества электроэнергии и эффективности её работы, а также сохранения срока службы её электрооборудования при стационарных и динамических режимах работы;
2. разработать новое устройство для устранения недостатков существующих механических коммутационных аппаратов и улучшения технико-экономических показателей электротермической установки во всех режимах её работы;
3. разработать новый способ включения и выключения печного трансформатора электротермической установки совместно с батареями косинусных конденсаторов;
4. разработать блочно-модульную модель электротермической установки с известным и предлагаемым устройством для проведения исследований и оценки эффективности работы электротермической установки в стационарных и динамических процессах;
5. исследовать напряжения и токи при одновременном подключении печного трансформатора и батарей косинусных конденсаторов к питающей сети по штатной схеме пускателя;
6. исследовать напряжения и токи при одновременном подключении печного трансформатора и батарей косинусных конденсаторов к питающей сети по новой схеме пускателя.

Применение предлагаемого способа управления ЭУ и устройства для его функционирования позволяет повысить энергетические показатели ЭУ во всех режимах её работы. Помимо этого, улучшается пропускная способность электропередачи и снижаются дополнительные потери электроэнергии при транспортировке и распределении электроэнергии во всех режимах работы электрической сети и ЭУ. Предлагаемый способ и устройство для его функционирования также улучшают работу электрооборудования ЭУ, в частности коммутационных аппаратов, при отключении установки с высокими энергетическими показателями [10–12].

На рис. 1 в трёхфазном исполнении представлена функциональная схема анализируемой системы с предлагаемыми устройствами, которые разработаны на основе электронно-электрических аппаратов. Она состоит из высоковольтного выключателя Q; печного трансформатора ПТ; активно-индуктивной нагрузки Zн; первого блока тиристорного пускателя ТП-1 с управляемыми тиристорными ключами VS1-2 и VS3-4; блока батареи косинусных конденсаторов БКК; второго блока тиристорного пускателя ТП-2 с управляемыми тиристорными ключами VS5-6 и VS7-8; блока формирователя импульсов управления ФИУ с синхронизирующим входом СВ, управляющим входом УВ и четырьмя выходами 1, 2, 3, 4, которые предназначены для подключения к цепям управления соответствующих тиристорных ключей.

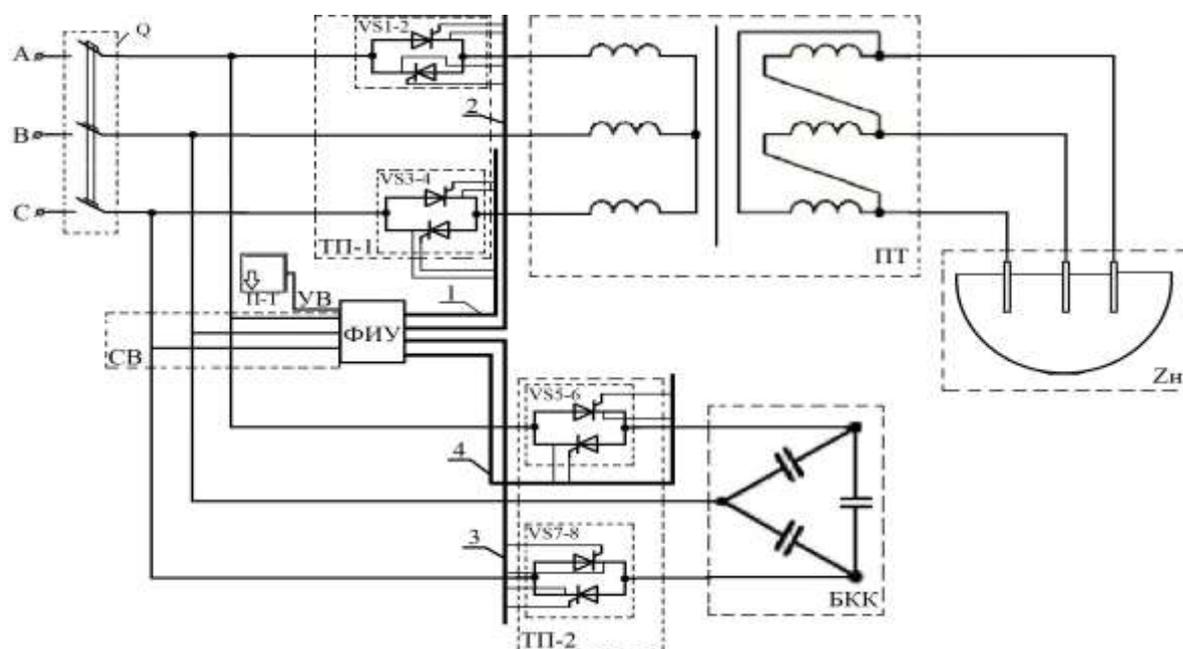


Рис. 1. Функциональная схема анализируемой системы

Предлагаемый способ управления электрооборудованием электротермической установки с высокими технико-экономическими показателями и устройства для его функционирования работают по следующей последовательности.

**Подготовка силовых модулей и блоков к работе.** На этом этапе управления анализируемой системой подготавливают силовые модули и блоки к работе. Здесь после подачи команды на катушку включения высоковольтного выключателя Q и его включения на электронные модули ТП-1 и ТП-2 и блок управления ФИУ поступает напряжение (предвключение установки).

**Первая операция способа включения электрооборудования электротермической установки.** Здесь с блока ФИУ через выход 1 в момент перехода через ноль фазного напряжения фазы «А» для включения тиристорного ключа VS3-4 фазы «С» формируется импульс управления, в результате чего вводится в работу тиристорный ключ VS3-4, и после его включения на печной трансформатор ПТ подаётся линейное напряжение между фазами «В» и «С».

**Вторая операция способа включения электрооборудования электротермической установки.** При переходе линейного напряжения между фазами «В» и «С» трансформатора через ноль, блок ФИУ подаёт одновременно импульсы через выход 2 на управляющие входы тиристорного ключа VS1-2 фазы «А» печного трансформатора ПТ для полного (все три фазы) его включения, и через выход 3 для включения фазы «С» батареи косинусных конденсаторов БКК на тиристорный ключ VS7-8, в результате чего одновременно с плавным включением печного трансформатора на полную мощность на конденсаторы БКК подаётся линейное напряжение между фазами «В» и «С».

**Третья операция способа включения электрооборудования электротермической установки.** После плавного включения печного трансформатора ПТ и двух фаз («В» и «С») батареи косинусных конденсаторов БКК блок ФИУ формирует импульс управления на выходе 4 для включения тиристорного ключа VS5-6 фазы «А», в результате чего тиристорный ключ VS5-6 включается и плавно вводит батарею косинусных конденсаторов БКК в работу на полной мощности с высокими энергетическими показателями.

Выключение электрооборудования электротермической установки без негативного влияния на работу электрооборудования и питающей сети также достигается в три операции, но в обратной последовательности.

**Результаты исследования динамических и стационарных процессов анализируемой системы по известным и предложенным устройствам.** Для проведения исследования динамических и стационарных процессов анализируемой системы по известным и предложенным устройствам в среде MATLAB была разработана имитационная модель электротермической установки [12]. Она представлена на рис. 2 и состоит из трёхфазного источника питания  $U_a$ ,  $U_b$  и  $U_c$ , трёхфазного высоковольтного выключателя Q, трёхфазного печного трансформатора ПТ, блока трёхфазной активно-индуктивной нагрузки  $Z_H$ , первого тиристорного пускателя с тиристорными ключами VS1 – VS4, блока трёхфазной батареи косинусных конденсаторов БКК, второго тиристорного пускателя с тиристорными ключами VS5 – VS8, блока формирователя импульсов управления ФИУ, который синхронизирован с сетью, а также других измерительных приборов.

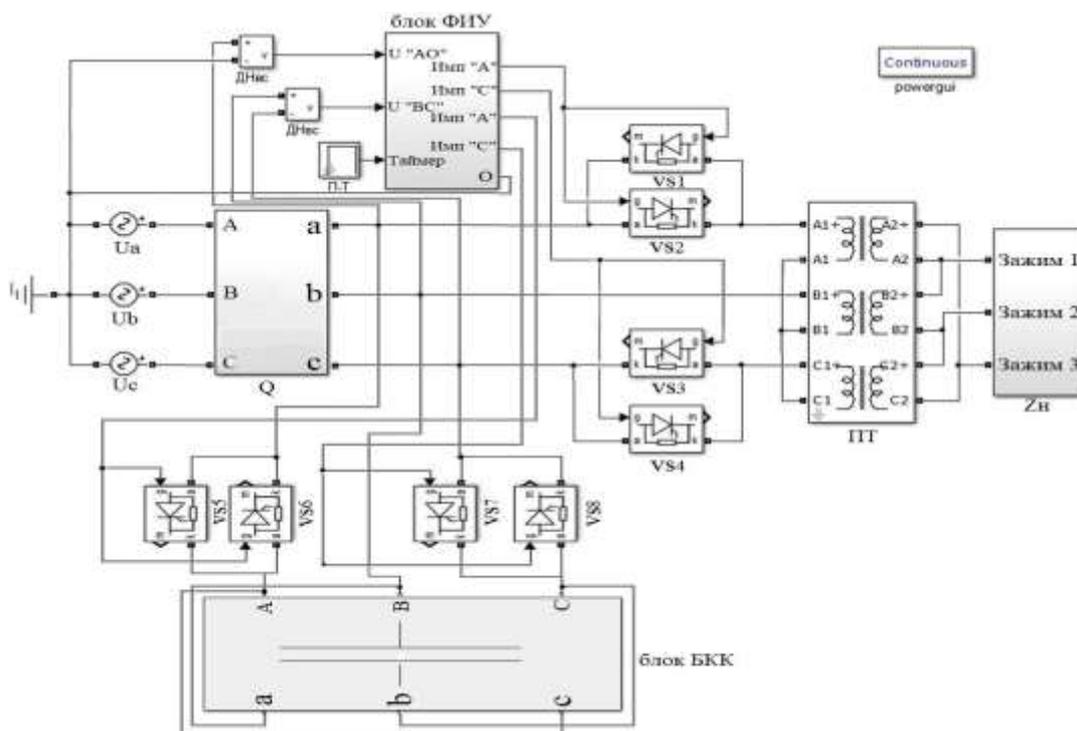


Рис. 2. Имитационная модель анализируемой системы в среде MATLAB

Ниже представлены результаты численных экспериментов токов и напряжений трёхфазного печного трансформатора и БКК, которые были смоделированы в среде MATLAB на имитационной модели анализируемой системы по штатной (см. рис. 3) и новой схеме пускателя (см. рис. 4).

На рис. 3, представлены осциллограммы напряжений и токов при включении и выключении электрооборудования анализируемой системы по известной схеме пускателя. На осциллограммах введены следующие обозначения:  $U^*_A$  и  $U^*_{BC}$  – синхронизирующие сигналы, пропорциональные соответственно фазному  $U_A$  и линейному  $U_{BC}$  напряжениям сети;  $U_A$  – фазное напряжение сети;  $i_A$ ,  $i_B$  и  $i_C$  – фазные токи сети;  $i_{kA}$ ,  $i_{kB}$  и  $i_{kC}$  – фазные токи батареи косинусных конденсаторов.

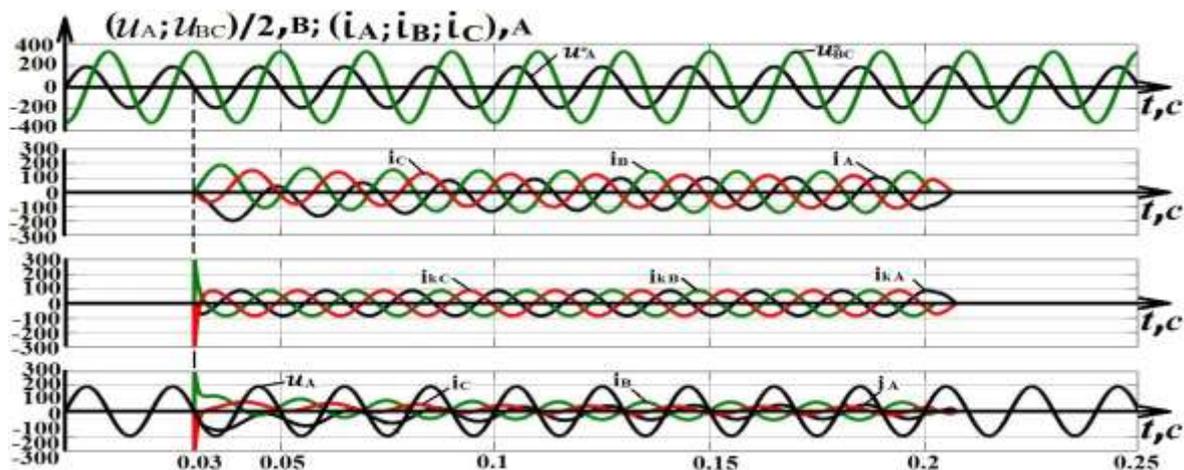


Рис. 3. Осциллограммы фазных напряжений и токов при одновременном подключении печного трансформатора и батарей косинусных конденсаторов к питающей сети по штатной схеме пускателя

Как показано на рис. 3, известный пускатель (механические высоковольтные выключатели) в момент времени  $t = 0.03$  с одновременно с печным трансформатором вводит в работу батареи косинусных конденсаторов. Результат этого физического процесса иллюстрируют осциллограммы, приведённые на рис. 3, и подтверждают, что высоковольтные выключатели к сети подключают одновременно все три фазы печного трансформатора и БКК, в результате чего возникает всплеск тока на конденсаторах, а в печном трансформаторе возникает переходный процесс с неравномерным током по фазам. В результате всё это приводит к изнашиванию изоляции и преждевременному выходу из строя электрооборудования [1; 2; 9].

На рис. 4 приведены осциллограммы напряжений и токов, иллюстрирующие способ включения и выключения электрооборудования анализируемой системы по новой схеме пускателя. На осциллограммах введены следующие обозначения:  $U^*_A$  и  $U^*_{BC}$  – синхронизирующие сигналы, пропорциональные соответственно фазному  $U_A$  и линейному  $U_{BC}$  напряжениям сети;  $U_A$  – фазное напряжение сети;  $i_A$ ,  $i_B$  и  $i_C$  – фазные токи сети;  $i_{kA}$ ,  $i_{kB}$  и  $i_{kC}$  – фазные токи батареи косинусных конденсаторов.

Полученные результаты исследования включения и выключения печного трансформатора одновременно с батареями косинусных конденсаторов к питающей сети по новой схеме пускателя подтверждают, что применение предлагаемых тиристорных пускателей в реальной установке комплексно улучшает эффективность работы электрооборудования анализируемой системы. Целесообразной областью применения предлагаемого устройства являются ЭУ различного класса напряжения и мощности.

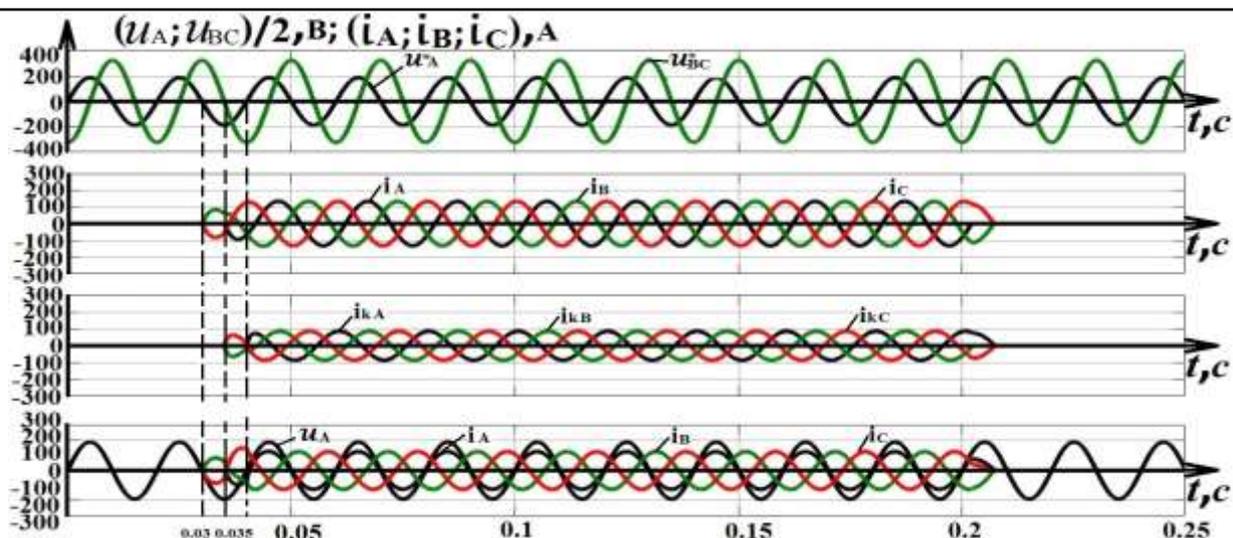


Рис. 4. Осциллограммы фазных напряжений и токов при одновременном подключении печного трансформатора и батарей косинусных конденсаторов к питающей сети по новой схеме пускателя

**Заключение.** По результатам проведения численных экспериментов способа ограничения пускового тока и выключения электрооборудования электротермической установки без возникновения электрической дуги, коммутационных потерь и перенапряжения при помощи предлагаемых тиристорных пускателей можно сделать следующие выводы.

Разработаны новые тиристорные пускатели и способ управления для улучшения энергетических показателей и динамических свойств электрооборудования ЭУ.

Результатами численных экспериментов установлено, что применение предлагаемых тиристорных пускателей обеспечивает плавное включение печного трансформатора одновременно с батареями косинусных конденсаторов без возникновения пусковых токов, просадки напряжения и неравномерного распределения токов по фазам, а также при выполнении операции выключения электротермической установки не создаёт электрической дуги, перенапряжения и коммутационных потерь на контактах высоковольтных выключателей.

Применение предлагаемых тиристорных пускателей позволяет улучшить технико-экономические показатели за счёт сокращения количества тиристорных ключей и упростить схему управления исследуемого объекта.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Установки индукционного нагрева: учеб. пособие / А. Е. Слухоцкий, В. С. Немков, Н. А. Павлов, А. В. Бамунэр; под ред. А. Е. Слухоцкого. – М.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 270 с.
2. Чунихин, А. А. Электрические аппараты: общий курс: учеб. для вузов / А. А. Чунихин. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 720 с.
3. Тельманова, Е. Д. Электрические и электронные аппараты: учеб. пособие / Е. Д. Тельманова. – 2-е изд., перераб. и доп. – Екатеринбург: Изд-во ГОУ ВПО «Рос. гос. проф.-пед. ун-т», 2010. – 131 с.
4. Родштейн, Л. А. Электрические аппараты: учеб. для техникумов / Л. А. Родштейн. – 3-е изд., перераб. и доп. – Л.: Энергоиздат. Ленингр. отд-ние, 1981. – 304 с.
5. Алексеенко, Г. В. Состояние и перспективы развития электроэнергетики и электропромышленности / Г. В. Алексеенко // Электричество. – 1970. – № 4. – С. 122-131.
6. Кукеков, Г. А. Выключатели переменного тока высокого напряжения / Г. А. Кукеков. – 2-е изд., перераб. – Л.: Энергия, 1972. – 336 с.
7. ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения = Electric energy. Electromagnetic compatibility of technical equipment. Power quality limits in the public power supply systems: межгосударственный стандарт: издание официальное: введён в действие Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 22 июля 2013 г. № 400-ст: дата введения 2014-07-01 /

Разработан обществом с ограниченной ответственностью «ЛИНВИТ» и техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств». – Москва: Стандартинформ, 2014. – 20 с.

8. Свиридов, В. А. Обеспечение электродинамической стойкости силовых трансформаторов / В. А. Свиридов, Н. П. Бахарев // Молодой учёный. – 2017. – № 32. – С. 20-25.

9. Аншин, В. Ш. Электропечные трансформаторы для металлургической промышленности, выпускаемые ОАО «ЭЛЕКТРОЗАВОД» / В. Ш. Аншин // Электро. – 2006. – № 4. – С. 16-20.

10. Климаш, В. С. Способ включения и выключения печного трансформатора электротермической установки и устройство для его реализации / В. С. Климаш, Б. Д. Табаров, Р. Р. Ниматов // Известия ТулГУ. – 2020. – № 6. – С. 255-262.

11. Патент № 2746220 Российская Федерация, МПК H02J 3/12 (2020.08), H02M 5/257 (2020.08). Способ и устройство для включения и выключения электротермической установки: № 2020124993; заявлено 20.07.2020; опубликовано 09.04.2021 / Климаш В. С., Табаров Б. Д.; заявитель и патентообладатель Климаш В. С., Табаров Б. Д. – 11 с.

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