Diod-tiristor zanjirlarining trigger effektidan foydalangan holda o’zgaruvchan tok elektr yuritmalarini samarali boshqarish

Erkin X. Abduraimov

PhD, dots., Toshkent davlat texnika universiteti, Toshkent, 100095, O‘zbekiston; abduraimoverkin69@gmail.com https://orcid.org/0000-0002-8864-936X

Dolzarbligi: so‘nggi yillarda O‘zbekistonda energiya sohasiga zamonaviy energiya tejamkor texnologiyalarni joriy etish bo‘yicha ishlar olib borilmoqda. Ishlab chiqarish jarayonlarini avtomatlashtirishning keng tarqalishi, sanoatda avtomatik boshqaruv tizimlarining joriy etilishi munosabati bilan elektr jihozlarining ishonchliligi, tezligi va chidamliligiga qo'yiladigan talablar sezilarli darajada oshdi va shu bilan birga, ish jarayonida uskunaga texnik xizmat ko'rsatish minimal darajaga tushirilishi kerak. Bu talablar asosan kontaktsiz elektr jihozlari tomonidan qondiriladi. O'zgaruvchan tok zanjirlari uchun elektr jihozlarining elementlari sifatida ishonchli va tejamkor ishga tushirish va kommutatsiya qurilmalari va apparatlarini yaratish muammosi elektr jixozlar va boshqa energiya qurilmalarining ishlashi uzluksizligi, aniqligi va tezligini ta'minlash uchun katta ahamiyatga ega. Ayniqsa, yarim o'tkazgichli kontaktsiz kommutatsiya qurilmalarini qiyin iqlim sharoitida, turli sanoat tarmoqlarida, elektr yuritmalarni avtomatik boshqarish sohasida va elektr ta'minoti tizimlarida qo'llash istiqbolli hisoblanadi.
Maqsad: o'zgaruvchan tok elektr yuritmalarini ishga tushirish va minimal kuchlanishlarida ishlatilishidan himoya qilish uchun kontaktsiz yarim o'tkazgichli qurilmani ishlab chiqishdan iborat.
Usullari: taklif etilayotgan qurilmani yaratishda nazariy tadqiqotlar asosida diod-tiristorli zanjirlarida aniqlangan trigger effekti yordamida eksprimental tarzida asinxron motorni boshqarishda yani ishga tushirish va minimal kuchlanishda ishlatilishidan himoyalash amalga oshirildi.
Natijalar: ushbu o'rganilgan zanjirlardan foydalanib, o'zgaruvchan tok elektr motorlarining minimal kuchlanishlarda ishlashidan himoya qilish va ishga tushirish uchun kontaktsiz qurilmani ishlab chiqish mumkinligi aniqlandi. Elektr motorlarni tez-tez ishga tushirish va tarmoq kuchlanishining pasayishi bilan ishlashini oldini olgan holda, asinxron elektr motorining kontaktsiz uch fazali tiristorli ishga tushirgichi moslamasi taklif etildi.
Kalit so'zlar: tiristorli kontaktsiz boshqarish, kommutatsiyalovchi va himoyalovchi kontaktsiz moslamasi, o'zgaruvchan tok elektr motorlarini kontaktsiz boshqarish.

For citation: Abduraimov E.Kh. Efficient control of AC electric drives using the trigger effect of diode-thyristor circuits. Scientific and technical journal of Problems of Energy and Sources Saving, 2025, no. 2, pp. 169-175. https://doi.org/10.5281/zenodo.16942114

Received: 10.01.2025
Revised: 14.03.2025
Accepted: 27.05.2025
Published: 27.06.2025

Эффективное управление электроприводами переменного тока с применением явления триггерного эффекта диодно тиристорных цепей

Эркин Х. Абдураимов

PhD, доц., Ташкентский государственный технический университет, Ташкент, 100095, Узбекистан; abduraimoverkin69@gmail.com https://orcid.org/0000-0002-8864-936X

Актуальность: в последние годы в Узбекистане проводятся работы по внедрению в энергетику современных энергосберегающих технологий. В связи с повсеместной автоматизацией производственных процессов, внедрением в промышленности систем автоматического управления значительно возросли требования к надежности, быстродействию и долговечности электрооборудования, и в то же время обслуживание оборудования в процессе эксплуатации должно быть сведено к минимуму. Этим требованиям в основном отвечает бесконтактное электрооборудование. Проблема создания надежных и экономичных пуско-коммутационных устройств и аппаратов как элементов электрооборудования цепей переменного тока имеет большое значение для обеспечения бесперебойности, точности и быстродействия работы электроприводов и других энергетических устройств. В частности, перспективным считается применение полупроводниковых бесконтактных коммутационных устройств в сложных климатических условиях, в различных отраслях промышленности, в области автоматического управления электроприводами и в системах электроснабжения.
Цель: разработка бесконтактного полупроводникового устройства для запуска и защиты, от работы при минимальных напряжениях электроприводов переменного тока.
Методы: экспериментально-теоретические исследования предлагаемого устройства выявили триггерный эффект в диодно-тиристорной цепи, с помощью которого осуществлялась запуск и защита от работы при минимальном напряжении асинхронным двигателем.
Результаты: с помощью этих изученных схем было установлено, что на их основе можно разработать бесконтактное устройство пуска электродвигателей переменного тока и защита от работы при минимальных напряжениях. Предложена схема бесконтактного трехфазного тиристорного пускателя асинхронного электродвигателя, позволяющая избежать работы электродвигателей с частым запуском и падением сете-

вого напряжения.
Ключевые слова: бесконтактное тиристорное управление, коммутационно-защитное устройство, управление электродвигателями переменного тока.

Efficient control of AC electric drives using the trigger effect of diode-thyristor circuits

Erkin Kh. Abduraimov

PhD., assoc.prof., Tashkent State Technical University, Tashkent, 100095, Uzbekistan; abduraimoverkin69@gmail.com
https://orcid.org/0000-0002-8864-936X

Relevance: in recent years, Uzbekistan has been working to introduce modern energy-saving technologies into the energy sector. Due to the widespread automation of production processes and the introduction of automatic control systems in industry, the requirements for reliability, speed and durability of electrical equipment have significantly increased, and at the same time, maintenance of equipment during operation should be minimized. Contactless electrical equipment mainly meets these requirements. The problem of creating reliable and economical start-up and switching devices and apparatuses as elements of electrical equipment for alternating current circuits is of great importance for ensuring uninterrupted operation, accuracy and speed of electric drives and other energy devices. In particular, the use of semiconductor contactless switching devices in difficult climatic conditions, in various industries, in the field of automatic control of electric drives and in power supply systems is considered promising.
Aim: development of a non-contact semiconductor device for starting and trip protection at minimum voltages of AC electric drives.
Methods: experimental and theoretical studies of the proposed device revealed a trigger effect in a diode-thyristor circuit, which was used to start and protect against operation at a minimum voltage of an asynchronous motor.
Results: with the help of these studied circuits, it was found that on their basis it is possible to develop a contactless device for starting AC electric motors and protecting them from operation at minimum voltage. A scheme of a contactless three-phase thyristor starter of an asynchronous electric motor is proposed, which makes it possible to avoid the operation of electric motors with frequent starts and a drop in mains voltage.
Keywords: contactless control of thyristors, switching protection device, control of AC electric motors.

1. Введение (Introduction)

Перспективным направлением развития коммутационной аппаратуры является создание электрических аппаратов с управляемой коммутацией, которая обеспечивается применением силовых полупроводниковых приборов для осуществления бездуговой коммутации электрической цепи, предотвращения опасных бросков тока и перенапряжений, увеличения ресурса оборудования и его надежности [1].

Проблема создания надёжных и экономичных пускозащитных и коммутирующих устройств и аппаратов как элементов электрооборудования для цепей переменного тока имеет весьма большое значение для обеспечения бесперебойности, чёткости и быстродействия работы электроприводов и других энергетических устройств. Особенно имеют перспективу применения полупроводниковых бесконтактных коммутирующих и регулирующих устройств, в трудно климатических условиях, в различных отраслях промышленности, в области автоматического управления электроприводами и в системах электроснабжения[2].

2. Методы и материалы (Methods and materials)

В электродвигателях переменного тока, если не учитывать момент сопротивления $\Delta M_{\text{мех}}$ вследствие механического трения, то можно сказать, что $M_{\text{вр}} = M$, тогда можем писать;

$$M = C\Phi_m I_2 \cos\psi_2. \quad (1)$$

Если

$$\Phi_m = \frac{E_1}{4{,}44 w_1 f_1 K_{r_1}} I_2 = \frac{E_1 S}{K\sqrt{R_2^2 + (X_2 S)^2}};$$

$$E_2 = \frac{E_1}{K}; \quad \cos\psi_2 = \frac{R_2}{\sqrt{R_2^2 + (X_2 S)^2}}$$

учитывая, что если подставить их в (1), то получим следующее:

$$M = C_1 E_1^2 S \frac{R_2}{R_2^2+(X_2 S)^2}. \qquad (2)$$

С учетом падения напряжения в обмотках статора ($E_1 \approx U_1$) можно записать следующее:

$$M = C_1 U_1^2 S \frac{R_2}{R_2^2+(X_2 S)^2} \qquad (3)$$

Из выражения (3) видно, что величина момента на валу асинхронного двигателя зависит от квадрата исходного напряжения и скольжения. И так, небольшое изменение напряжения вызывает резкое изменение крутящего момента.

1. При $S = 0, n_2 = n_1$, то есть $M = 0$ в идеальном режиме холостого хода, ротор тормозится.
2. Когда $S = 1, n_2 = 0$, крутящий момент называется *пусковым моментом.*

$$M_{\text{пуск}} = CU_1^2 \frac{R_2'}{R'^2_2+X_2^2}. \qquad (4)$$

Для нахождения максимального (критического) крутящего момента, который может создать асинхронный двигатель, возьмем производную от выражения (5) по скольжению S и приравняем ее к нулю, т.е

$$\frac{dM}{dS} = C_1 U_1^2 R_2 \frac{R_2^2 - (X_2 S)^2}{[R_2^2 + (X_2 \cdot S]^2} = 0$$

Отсюда

$$S_{kr} = \pm \frac{R_2}{X_2}. \qquad (5)$$

Когда асинхронная машина работает в двигательном режиме, $S_{\text{кр}}>0$. Учитывая критическое значение скольжения, максимальный крутящий момент двигателя можно определить:

$$M_{kr} = C_1 U_1^2 \frac{1}{2X_2} \qquad (6)$$

Если учесть, что $X_2 \approx 5R_2$ в асинхронном двигателе, $S_{кр}=0,2$. Решая совместно выражения (5.6), (5.7) и (5.8), можно записать следующее упрощенное выражение (формула Клосса) момента двигателя:

$$M = \frac{2M_{KP}}{\frac{S}{S_{KP}}+\frac{S_{KP}}{S}}. \qquad (7)$$

Из этого выражения можно определить критическое скольжение с учетом номинального значения скольжения:

$$S_{kr} = S_{\text{ном}}(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1}) \qquad (8)$$

здесь: $S_{\text{ном}} = \frac{n_1 - n_{\text{ном}}}{n_1}$ номиналное значение скольжения; $\lambda = \frac{M_{kr}}{M_{nom}}$ – коэффициент загрузки.

В асинхронных двигателях с фазным ротором, поскольку к обмотке ротора подключено дополнительное сопротивление, крутящий момент определяется следующим образом:

$$M = C_1 U_1^2 S \frac{R_2+R_P}{(R_2+R_p)^2+(X_2 S)^2} \qquad (9)$$

Из выше приведенных можем сказать, при снижении напряжения питания асинхронных двигателей уменьшается уровень магнитного потока, а, следовательно, и крутящего момента. При этом увеличивается потребление тока, ведущее к снижению уровня напряжения в электросети, что отражается на работе других устройств, подключенных к ней. Помимо этого не следует забывать о пусковых токах, образующихся при запуске двигателей. Самопроизвольный запуск, происходящий при восстановлении напряжения после его исчезновения или при включении общего рубильника станка магистрали и т. д., для двигателей большинства механизмов промышленных предприятий недопустим по условиям безопасности обслуживающего персонала, из-за опасности поломки механизма, вследствие возможного брака продукции и по ряду других причин. Поэтому при значительном снижении напряжения в сети или его исчезновении двигатели, как правило, должны автоматически отключаться специальной защитой минимального напряжения.

В настоявшее время защита минимального напряжения в схемах управления двигателями осуществляется линейными контакторами и электромагнитными пускателями или специальными реле минимального напряжения. Которые осуществляют включение автомата при напряжении сети не ниже 80 % от номинального и автоматически отключают автомата при исчезновении напряжения или снижении его до 50% от номинального. [1,2].

Результаты и обсуждение (Results and discussion)

Нами для запуска и защиты от минимального напряжения электродвигателей переменного тока предлагается схема бесконтактного полупроводникового устройства для управления асинхронным электродвигателем, которые были изучены теоретическим и эксприциментальними исследованиями. Теоретическими исследованиями составных частей предлагаемого устройства, были рассмотрены следующие цепи, показанные на рисунках 1 и 3.

На рисунке 1 представлена диодно тиристорная цепь, где выявлена релейный эффект, с помощью которого предлагается, осуществит запуск и защиту от минимального напряжения в схемах управления асинхронных двигателей. Разъяснения явления релейного эффекта можно провести на примере диодно-тиристорной цепи, когда тиристор *VT* последовательно подключается к сети через $R_н$ активное сопротивление, а в цепь управления подается ток из сети через активное сопротивление *R* и диода *VD*.

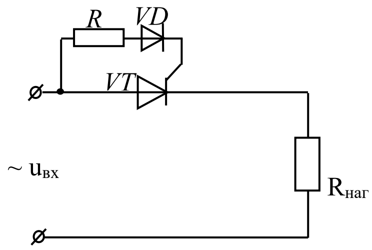

Рис.1. Схема включения тиристора
Fig.1. Thyristor connection diagram

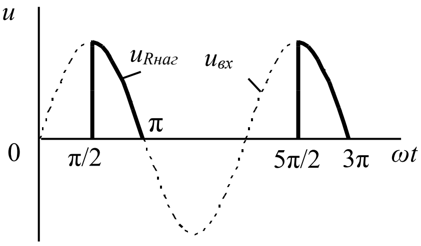

Рис.2. Кривые напряжения сети и нагрузки
Fig.2. Network voltage and load curves

Если медленно повышать величину входного напряжения, то при определенном значении $\boldsymbol{U_{вх}}$, амплитудное значение сигнала управления будет равно току открывания тиристора, в этот момент тиристор *VT* открывается скачком при угле $\alpha = 90^0$ (рис.2). Дальнейшее увеличение напряжения приводит к уменьшению угла $\boldsymbol{\alpha}$ почти до нуля, т.е. тиристор будет пропускать полную положительную полуволну тока. Величина напряжения, при котором тиристор открывается скачком, зависит от величины параметров *R* и R_L. Таким образом, открытие тиристора скачком или явления резкого изменение напряжения или тока на нагрузке в рассмотренной цепи можем назвать триггерным или иначе релейным эффектом.

Также, рассмотрени режим работы цепи, состоящей из последовательно соединенных тиристора, активного сопротивления и индуктивной катушки, зная что, обмотки электродвигателей имеют активно - индуктивный характер нагрузки, и учитываем работу при напряжениях сети (рис.3).

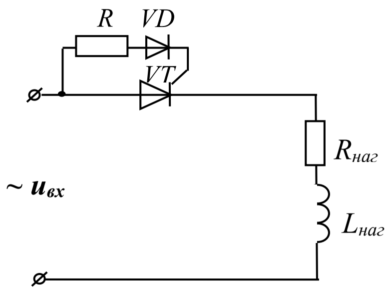

Рис. 3. Исследуемая схема
Fig. 3. The circuit under study

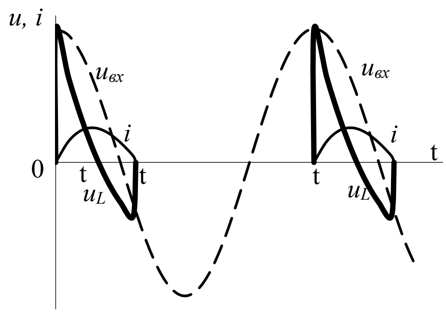

Рис. 4. Кривые тока и напряжения
Fig. 4. Current and voltage curves

Уравнение данной цепи имеет следующий вид:

$$u_{вх} = u_{тир} + L\frac{di}{dt} + Ri \tag{10}$$

$$\frac{di}{dt} = \frac{U_m Cos\,\omega t}{L} - \frac{R}{L}i$$

Для значении ***t***, задаваясь шагом интегрирования ***h,*** имеем:

$$i_n = i_{n-1} + \left(\frac{U_m Cos\,\omega t_{n-1}}{L} - \frac{R}{L}i_{n-1}\right)h \tag{11}$$

На рис.4 показаны кривые напряжения и тока на зажимах элементов L и R, построенных решением уравнения (11). численным методом.

Как видно из этого графика, ток постепенно нарастает и происходит затягивание момента прекращения тока относительно момента перехода фазного напряжения через нулевое значение. Необходимо отметить, что форма кривой тока зависит от соотношения параметров цепи L и R. [3.4,5]

Используя, эти исследованные цепи на их основе можно разработать бесконтактное устройство для запуска и защиты от работы минимального напряжения электродвигателей переменного тока, по предложенной схеме асинхронного электропривода (рис. 5). Учитывая, частые режимы пуска электродвигателей и работы при пониженных напряжениях сети, предложена схема бесконтактного трехфазного тиристорного пускателя асинхронного электродвигателя, состоящее из шести тиристоров, шести диодов и резисторов, и автомата включателя.

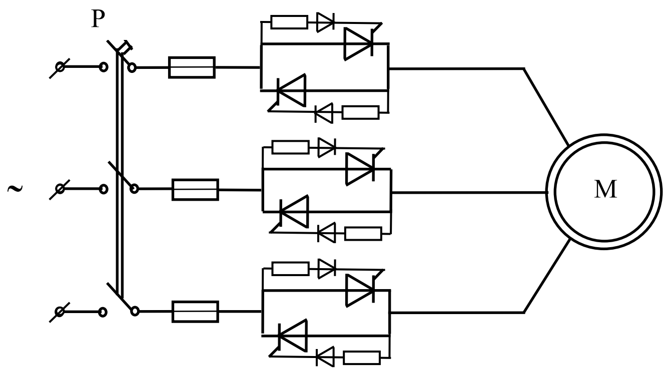

Рис.5. Схема тиристорного пускателя асинхронного двигателя с защитой от минимального напряжения.
Fig. 5. Schematic diagram of a thyristor starter for an asynchronous motor with under voltage protection.

Пуск двигателя осуществляется с включением автомата Р, тем самым подаются сигналы к управляющим электродам тиристоров через резисторно-диодную цепь с анодной части самих тиристоров. Открытие тиристоров приводить к подаче сетевого напряжения к двигателю, и оно запускается. Во время работы, если номинальное значение напряжения сети будет уменьшаться от допустимого значения, то токи в цепи управления тиристоров, которые подаются с анодной части через резистор и диода самых тиристоров, также уменьшаются, и это приводить к закрытию или отключению всех тиристоров, и соответственно к отключению от сети двигателя.

3. Заключение (Conclusion)

Таким образом, при анализе диодно-тиристорной цепи открытие тиристора скачком или явления резкого изменение напряжения или тока на нагрузке можем назвать триггерным (релейным) эффектом, и оно использовано в создании автоматической установки. В цепи соединенных тиристора, активного сопротивления и индуктивной катушки, были анализированы работа схемы на активно- индуктивную нагрузку учитывая характер нагрузки обмотки электродвигателей. Для анализа применили численный метод, позволяющий производить качественный анализ переходных процессов и установившихся режимов. В предлагаемой схеме управления запуском и зашитой асинхронных электродвигателей, можно осуществить эффективное управление запуском и одновременно защитой от минимального напряжения, то есть работы электродвигателя при пониженных напряжениях сети.

ЛИТЕРАТУРА

1. Аллаев К.Р. Электроэнергетика Узбекистана и мира. –Ташкент: Фан ва технология. 2009. - 463 с.

2. Поскробко А.А., Братолюбов В.Б. Бесконтактные коммутирующие и регулирующие полупроводниковые устройства на переменном токе // Москва. Энергия, 1998, 192 стр.

3. Карпов Ф.Ф., «Как проверить возможность подключения к электрической сети двигателей с короткозамкнутым ротором», М. «Энергия», 1971, 267 стр.

4. Atabekov G I, Kupalyan S D, Timofeev L B and Khukhrikov S S 2010 Theoretical foundations of electrical engineering. Nonlinear electrical circuits (Moscow: Lan)

5. E Kh Abduraimov and others, *Theoretical research and development optoelectronic communication devices*, Journal of Physics: Conf.: Ser. **1515** 022055 (2020). doi:10.1088/1742-6596/1515/2/022055

6. Erkin Abduraimov, *Research of the trigger effect in diode-thyristor circuits of contactless relay devices*. E3S Web of Conferences 216, **01105** (2020). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601105

7. E Kh Abduraimov, D Kh Khalmanov, *Development of contactless solid state voltage relay*, E3S Web of Conferences 216, **01106**, (2020), https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601106

8. E Abduraimov and others *Control of quality and modes of power supply systems using contactless devices*, E3S Web of Conf.: 289, **07026** (2021), https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907026

9. E Kh Abduraimov et al *Analysis of dynamic circuits of contactless switching devices.* Journal of Physics: Conference Series **2094** 022072 (2021) IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2094/2/022072

10. E Kh Abduraimov *Automatic control of reactive power compensation using a solid state voltage relays.* J. Phys.: Conf. Ser. **2373** 072009 (2022) IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2373/7/072009

11. E Kh Abduraimov and D Kh Khalmanov, *Invention of a contactless voltage relay with an adjustable reset ratio.* J. Phys.: Conf. Ser. **2373** 072010 (2022) IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2373/7/072010 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2373/7/072010

12. Erkin Abduraimov and others. *Development of contactless device for maintaining the rated voltage of power supply systems.* Cite as: AIP Conference Proceedings **2552**, 040012 (2023); https://doi.org/10.1063/5.0116235

13. Erkin Abduraimov, *Efficient protection and control of electric drives using solid state circuits*. E3S Web of Conferences **384**, 01051 (2023); https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401051

14. Erkin Abduraimov, Baxtiyor Nurmatov, *Application of numerical and graphical methods of analysis in nonlinear resistive circuits of electronic devices*, E3S Web of Conferences **384**, 01052 (2023)https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401052

15. Erkin Abduraimov and others. *Application of semiconductor contactless devices to improve the quality and reliability of power supply systems.* Cite as: AIP Conference Proceedings **3152**, 040023 (2024); https://doi.org/10.1063/5.0218898

16. A. Alimov, Erkin Abduraimov and others. *Analysis of the basic circuit of ferroresonant transistor parametric DC voltage stabilizers with built - in functional converter AIP Conf. Proc.* 3152, 050016 (2024) https://doi.org/10.1063/5.0218823

REFERENCES

1. Allaev K.R. Electric power industry of Uzbekistan and the world. - Tashkent: Fan va technology. 2009. - 463 p.

2. Poskrobko A.A., Bratolyubov V.B. Contactless switching and regulating semiconductor devices on alternating current // Moscow. Energy, 1998, 192 p.

3. Karpov F.F., "How to check the possibility of connecting to the electrical network of motors with a squirrel-cage rotor", M. "Energy", 1971, 267 p.

4. Atabekov G I, Kupalyan S D, Timofeev L B and Khukhrikov S S 2010 Theoretical foundations of electrical engineering. Nonlinear electrical circuits (Moscow: Lan)

5. E Kh Abduraimov and others, *Theoretical research and development optoelectronic communication devices*, Journal of Physics: Conf.: Ser. **1515** 022055 (2020). doi:10.1088/1742-6596/1515/2/022055

6. Erkin Abduraimov, *Research of the trigger effect in diode-thyristor circuits of contactless relay devices*. E3S Web of Conferences 216, **01105** (2020). https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601105

7. E Kh Abduraimov, D Kh Khalmanov, *Development of contactless solid state voltage relay*, E3S Web of Conferences 216, **01106**, (2020), https://doi.org/10.1051/e3sconf/202021601106

8. E Abduraimov and others *Control of quality and modes of power supply systems using contactless devices*, E3S Web of Conf.: 289, **07026** (2021), https://doi.org/10.1051/e3sconf/202128907026

9. E Kh Abduraimov et al *Analysis of dynamic circuits of contactless switching devices.* Journal of Physics: Conference Series **2094** 022072 (2021) IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2094/2/022072

10. E Kh Abduraimov *Automatic control of reactive power compensation using a solid state voltage relays.* J. Phys.: Conf. Ser. **2373** 072009 (2022) IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2373/7/072009

11. E Kh Abduraimov and D Kh Khalmanov, *Invention of a contactless voltage relay with an adjustable reset ratio.* J. Phys.: Conf. Ser. **2373** 072010 (2022) IOP Publishing doi:10.1088/1742-6596/2373/7/072010 https://iopscience.iop.org/article/10.1088/1742-6596/2373/7/072010

12. Erkin Abduraimov and others. *Development of contactless device for maintaining the rated voltage of power supply systems.* Cite as: AIP Conference Proceedings **2552**, 040012 (2023); https://doi.org/10.1063/5.0116235

13. Erkin Abduraimov, *Efficient protection and control of electric drives using solid state circuits*. E3S Web of Conf. **384**, 01051 (2023); https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401051

14. Erkin Abduraimov, Baxtiyor Nurmatov, *Application of numerical and graphical methods of analysis in nonlinear resistive circuits of electronic devices*, E3S Web of Conferences **384**, 01052 (2023)https://doi.org/10.1051/e3sconf/202338401052

15. Erkin Abduraimov and others. *Application of semiconductor contactless devices to improve the quality and reliability of power supply systems.* Cite as: AIP Conference Proceedings **3152**, 040023 (2024); https://doi.org/10.1063/5.0218898

16. A. Alimov, Erkin Abduraimov and others. *Analysis of the basic circuit of ferroresonant transistor parametric DC voltage stabilizers with built - in functional converter AIP Conf. Proc.* 3152, 050016 (2024) https://doi.org/10.1063/5.0218823