



ИССЛЕДОВАНИЕ ДИНАМИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ НЕЛИНЕЙНЫХ РЕЗИСТИВНЫХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ ЦЕПЕЙ МЕТОДОМ ЛАГРАНЖА

Бобожанов¹ М.К., Усманов¹ Э.Г., Каримов¹ Р.Ч., Попкова² О.С., Хушвактов¹ Д.Ш.

¹Ташкентский государственный технический университет
имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан

²Казанский государственный энергетический университет, г. Казань, Россия
ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3007-6853>. E-mail: oksiniy@mail.ru

Резюме: ЦЕЛЬЮ данной работы является изучение динамических процессов в нелинейных резистивных электрических цепях с использованием метода Лагранжа, выявление особенностей их математического описания и анализа переходных процессов, а также совершенствование схем бесконтактных коммутационных устройств. РЕЗУЛЬТАТЫ. В статье приводится результат исследования динамического процесса в нелинейной резистивной электрической цепи с использованием метода Лагранжа и разработана её математическая модель. Кроме того, на основе разработанной математической модели проведён анализ изменения напряжения на ёмкости во времени при различных параметрах. Результаты исследования свидетельствуют о том, что определением точного значения напряжения на ёмкости можно эффективно управлять как управляющим напряжением тиристора, так и процессом "заряда-разряда" конденсатора. Таким образом, установлено, что при достижении конденсатором точки насыщения обеспечивается задание выдержки времени для бесконтактных коммутационных устройств. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. В рамках данного исследования был выполнен теоретический анализ и численные расчёты динамических процессов в нелинейной резистивной электрической цепи. Применение метода Лагранжа позволило получить решение дифференциального уравнения электрической цепи, и данное исследование в определённой степени способствует изучению динамических процессов в нелинейных резистивных цепях.

Ключевые слова: нелинейная резистивная электрическая цепь; динамический процесс; метод Лагранжа; дифференциальное уравнение; процесс «заряда-разряда» конденсатора; система управления; бесконтактное коммутационное устройство.

Для цитирования: Бобожанов М.К., Усманов Э.Г., Каримов Р.Ч., Попкова О.С., Хушвактов Д.Ш. Исследование динамических процессов нелинейных резистивных электрических цепей методом Лагранжа // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2026. Т. 28. № 2. С. 34-51. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-34-51.

INVESTIGATION OF DYNAMIC PROCESSES IN NONLINEAR RESISTIVE ELECTRIC CIRCUITS USING THE LAGRANGE METHOD

Bobojanov¹ M.K., Usmanov¹ E.G., Karimov¹ R.Ch., Popkova^{*2} O.S. Hushvaktov¹ D.Sh.

¹Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan

²Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia

*ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3007-6853>. E-mail: oksiniy@mail.ru

Abstract: THE PURPOSE of this work is to study the dynamic processes in nonlinear resistive electrical circuits using the Lagrange method, to identify the features of their mathematical description and analysis of transient processes, as well as to improve the circuits of contactless switching devices. RESULTS. The article presents the results of a study of the dynamic process in a nonlinear resistive electrical circuit using the Lagrange method and describes the development of its mathematical model. In addition, based on the developed mathematical model, an analysis of the time-dependent variation of the voltage across the capacitance under different parameters was

carried out. The results of the study indicate that by determining the exact value of the voltage across the capacitance, it is possible to effectively control both the control voltage of the thyristor and the charging-discharging process of the capacitor. Thus, it has been established that when the capacitor reaches the saturation point, a time delay is provided for contactless switching devices. CONCLUSION. As part of this study, a theoretical analysis and numerical calculations of dynamic processes in a nonlinear resistive electrical circuit were carried out. The application of the Lagrange method made it possible to obtain the solution of the differential equation of the electrical circuit, and this study, to a certain extent, contributes to the investigation of dynamic processes in nonlinear resistive circuits.

Keywords: *nonlinear resistive electrical circuit; dynamic process; Lagrange method; differential equation; capacitor charging-discharging process; control system; contactless switching device.*

For citation: Bobojanov M.K., Usmanov E.G., Karimov R.Ch., Popkova O.S., Hushvaktov D.Sh. Investigation of dynamic processes in nonlinear resistive electric circuits using the Lagrange method. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2026; 28 (2): 34-51. doi: 10.30724/1998-9903-2026-28-2-34-51.

Введение (Introduction).

В современном обществе особое внимание уделяется одной из наиболее актуальных задач в сфере энергетики — обеспечению потребителей качественной, стабильной и надежной электрической энергией в распределительных электрических сетях, работающих на напряжениях от 0,4 до 10 кВ. Эта проблема становится все более важной, так как от качества поставляемой электроэнергии зависит не только комфорт и безопасность потребителей, но и эффективность работы различных производств. В последние годы наблюдается активное развитие исследований, нацеленных на улучшение качества электроэнергии, а также на создание режимов работы, которые способствуют экономии энергии и ресурсов. Это связано с растущими требованиями к надежности и устойчивости электроснабжения, что в свою очередь требует внедрения новых технологий и подходов в управление электрическими сетями. Качество электроэнергии является критически важным аспектом, поскольку оно напрямую влияет на эффективность производственных процессов, автоматизацию технических средств, а также на работу систем защиты и интеллектуального управления. Низкое качество электроэнергии может привести к серьезным последствиям, таким как сбой в работе оборудования, его преждевременный выход из строя и, как следствие, экономические потери. Поэтому в настоящее время все больше усилий направляется не только на развитие различных отраслей промышленности, но и на проведение исследований, которые помогают выявлять негативные последствия, связанные с качеством электроэнергии. Эти исследования позволяют лучше понять, как различные факторы влияют на стабильность и надежность электроснабжения, а также разрабатывать меры по улучшению ситуации. Внедрение новых технологий в производство, основанных на полученных данных, может значительно повысить уровень надежности и качества электроэнергии, что, в свою очередь, скажется на общем уровне производительности и конкурентоспособности предприятий. Таким образом, задача обеспечения качественной и стабильной электроэнергии становится не только вопросом технического характера, но и важным элементом стратегического развития экономики в целом [1-3, 22].

В последние годы в Узбекистане наблюдается явная тенденция к внедрению новейших технологических решений в различных отраслях экономики. Эта инициатива направлена на значительное снижение энергоёмкости, с целью уменьшения её в полтора раза к 2030 году. В рамках Стратегии развития Нового Узбекистана на 2022-2026 годы были четко обозначены ключевые задачи, которые включают в себя обеспечение стабильного и бесперебойного снабжения экономики электрической энергией. Одной из главных целей является активное внедрение технологий зелёной экономики во все сферы, что подразумевает не только использование возобновляемых источников энергии, но и повышение общей энергоэффективности экономики на 20%. Для достижения поставленных целей особое внимание уделяется научным исследованиям и разработкам. В частности, приоритетными становятся проекты, направленные на создание и внедрение программного обеспечения для систем управления батареями конденсаторов. Эти системы предназначены для автоматического регулирования реактивной мощности, что

особенно актуально для потребителей, подключённых к распределительным электрическим сетям с напряжением от 0,4 до 10 кВ. Кроме того, важным направлением является разработка технологий бесконтактной коммутации обмоток устройств регулирования напряжения под нагрузкой (РПН), а также автотрансформаторов и добавочных трансформаторов напряжения. Эти разработки позволят значительно повысить эффективность работы энергетических систем, минимизируя потери энергии и обеспечивая более стабильное функционирование электрических сетей. Таким образом, Узбекистан активно движется к реализации своей стратегии по модернизации энергетического сектора, что не только улучшит качество жизни граждан, но и создаст новые возможности для экономического роста и устойчивого развития. Внедрение современных технологий в энергетическую инфраструктуру страны станет важным шагом на пути к более эффективному и экологически чистому будущему [1-4].

В Республике активно продолжают исследовательские работы, направленные на цифровизацию и развитие энергетической отрасли. Это включает в себя проектирование, совершенствование и экспериментальную проверку энергосберегающих бесконтактных коммутационных устройств. В рамках этой работы выделяются несколько приоритетных задач, которые требуют особого внимания. Одной из таких задач является создание бесконтактных коммутационных устройств, которые должны продемонстрировать свою эффективность в различных климатических условиях. Это особенно важно, поскольку климатические факторы могут существенно влиять на работу электрических устройств и систем. Кроме того, в рамках этих исследований разрабатываются математические модели нелинейных резистивных электрических цепей. Эти модели помогают глубже понять динамические процессы, происходящие в таких цепях, а также позволяют находить способы снижения энергозатрат при их использовании. Это, в свою очередь, способствует совершенствованию систем управления, что является актуальной задачей в условиях растущих требований к энергоэффективности. Одновременно с этим стоит задача повышения эффективности производственных процессов. Это включает в себя внедрение технологий энерго- и ресурсосбережения, основанных на создании и исследовании бесконтактных коммутационных устройств в системе управления устройствами, предназначенными для улучшения качества электрической энергии в распределительных электрических сетях с напряжением 0,4-10 кВ. Такие устройства играют ключевую роль в обеспечении стабильности и надёжности электроснабжения, что крайне важно для функционирования современного общества.

Спрос на современные решения автоматизации технологических процессов производства открывает широкие перспективы для внедрения инновационных технологий в промышленную экономику. Это не только способствует повышению производительности труда, но и позволяет оптимизировать затраты, что в условиях конкурентной среды является залогом успешного развития предприятий. Реализация вышеупомянутых задач, в частности создание и исследование бесконтактных коммутационных устройств, которые способны управлять высокими нагрузками при низком собственном энергопотреблении, становится одной из важнейших задач. Разработка математических моделей и вычислительных программ для этих устройств также занимает центральное место в исследовательской деятельности. Все эти усилия направлены на создание более эффективной и устойчивой энергетической системы, которая сможет справляться с растущими требованиями современного общества и обеспечивать надёжное электроснабжение для всех потребителей [2, 4-5].

С точки зрения современных технологий, создание и исследование компактных, простых и высоконадёжных бесконтактных коммутационных устройств, которые находят применение в системах электроснабжения, представляет собой одну из наиболее актуальных задач [6-8, 13]. В условиях стремительного развития электроники и автоматизации, необходимость в таких устройствах становится всё более очевидной. В связи с этим научные исследования, направленные на разработку математических моделей для анализа нелинейных резистивных электрических цепей, а также на изобретение новых схем энергосберегающих бесконтактных коммутационных устройств, становятся важными и востребованными. Эти исследования охватывают широкий спектр задач, включая проведение экспериментов, совершенствование существующих технологий, моделирование процессов и внедрение новых решений в практику. Все эти аспекты составляют основу для успешной реализации проектов, связанных с разработкой и применением бесконтактных коммутационных устройств. Важно отметить, что в системе управления такими устройствами можно использовать различные виды нелинейных резистивных электрических цепей, что открывает новые горизонты для их

применения и улучшения характеристик.

Разработка эффективных методов анализа нелинейных резистивных электрических цепей имеет ключевое значение для создания надёжных и высококачественных бесконтактных коммутационных устройств. Эти устройства играют важную роль в автоматизации процессов и в вычислительной технике, особенно в контексте систем электроснабжения. Бесконтактные коммутационные устройства, основанные на принципах работы нелинейных резистивных электрических цепей, находят широкое применение в различных областях, включая автоматику, радиоэлектронику и системы электроснабжения. Таким образом, исследование и разработка бесконтактных коммутационных устройств не только способствуют улучшению существующих технологий, но и открывают новые возможности для их применения в современных системах. Важно продолжать работу в этом направлении, чтобы обеспечить надёжность и эффективность работы электроснабжения, что является одной из приоритетных задач для учёных и инженеров в нашей быстро меняющейся технологической среде [9-13].

В большинстве случаев экспериментальные исследования состоят из нескольких ключевых этапов. Во-первых, осуществляется разработка прототипов, в процессе которой используются элементы нелинейных резистивных цепей. Затем проводится анализ временных характеристик, чтобы оценить, как быстро и эффективно реагируют эти компоненты. Также важно исследовать их устойчивость к различным внешним воздействиям, чтобы понять, как они будут вести себя в реальных условиях. В заключение, для моделирования процессов применяются специализированные программные средства, такие как *Workbench* или *MATLAB Simulink*, что позволяет более точно прогнозировать поведение системы [6-8, 11-13].

Результаты, полученные в ходе математического моделирования, занимают центральное место в процессе оценки эффективности работы бесконтактных коммутационных устройств. Это связано с тем, что математическое моделирование позволяет глубже понять и проанализировать динамические процессы, происходящие в нелинейных резистивных электрических цепях. В рамках данного подхода решаются несколько ключевых задач, каждая из которых играет важную роль в исследовании и проектировании таких устройств. Во-первых, необходимо выбрать эквивалентную схему устройства, что подразумевает создание упрощенной модели, которая будет отражать основные характеристики реального устройства. На этом этапе также производится расчет параметров элементов, входящих в эту схему. Это может включать в себя определение сопротивлений, индуктивностей и емкостей, которые будут использоваться для дальнейшего анализа. Во-вторых, важно составить систему математических уравнений, которые будут описывать эквивалентную схему. Эти уравнения позволяют нам определить значения токов и напряжений, протекающих через различные элементы схемы, в различных режимах работы исследуемого устройства. Это особенно актуально, когда устройство функционирует в условиях, отличающихся от стандартных, например, при изменении температуры или напряжения питания. Третьим важным шагом является оценка достоверности полученных результатов. Это необходимо для того, чтобы убедиться, что результаты моделирования действительно отражают реальное поведение устройства и могут быть использованы для практических рекомендаций. Достоверность результатов может быть проверена с помощью сравнений с экспериментальными данными или другими методами анализа. Наконец, на основе полученных результатов разрабатываются рекомендации для системы защиты и управления устройством. Это включает в себя подбор параметров элементов эквивалентной схемы, что позволяет оптимизировать работу устройства и повысить его надёжность. Важно отметить, что одним из ключевых аспектов математического моделирования является степень достоверности, с которой определяются зависимости получаемых результатов от блок-схемы, основанной на определенных допущениях. Эти допущения, как правило, упрощают расчеты, однако могут влиять на точность итоговых данных, поэтому их выбор требует особого внимания. Таким образом, математическое моделирование представляет собой сложный и многогранный процесс, который включает в себя выбор схемы, составление уравнений, оценку достоверности и разработку рекомендаций. Каждый из этих этапов играет важную роль в создании эффективных и надёжных бесконтактных коммутационных устройств [2-15].

В современном мире, где энергетические ресурсы становятся все более дефицитом, а требования к качеству и эффективности электроэнергии продолжают расти, автоматизация и оптимизация управления электросетями становятся важнейшими задачами. В связи с этим, ведутся активные научные исследования, направленные на

создание и изучение бесконтактных коммутационных устройств. Эти устройства предназначены для систем управления батареями конденсаторов, которые играют ключевую роль в автоматическом регулировании реактивной мощности в распределительных электрических сетях, работающих на напряжении от 0,4 до 10 кВ. Одним из основных направлений этих исследований является разработка устройств, которые способны регулировать напряжение под нагрузкой, таких как релейные преобразователи напряжения (РПН), автотрансформаторы и добавочные трансформаторы напряжения. Эти устройства необходимы для обеспечения стабильности и надежности электроснабжения, что особенно важно в условиях растущих нагрузок и изменяющихся условий эксплуатации. Научные исследования в этой области ведутся в ведущих научных центрах и высших учебных заведениях по всему миру. К числу таких учреждений относятся известные университеты и научные организации, которые располагаются в различных странах. Например, *Technical University of Munich* в Германии и *Massachusetts Institute of Technology* в США являются одними из самых престижных научных учреждений, где проводятся передовые исследования в области электроэнергетики и автоматизации управления. Также стоит отметить *University of California, Berkeley*, который славится своими инновациями в области электротехники и энергетических систем. В Китае *Huazhong University of Science and Technology* и *Hong Kong Polytechnic University* активно занимаются разработкой новых технологий в энергетической сфере, что способствует улучшению качества электроэнергии и повышению энергоэффективности. В России Московский государственный энергетический институт и Московский государственный горный университет также вносят значительный вклад в развитие технологий управления электроэнергией. Белгородский государственный технологический университет и Томский государственный технический университет продолжают исследования в области повышения надежности и эффективности электрических систем. Не менее важны и другие университеты, такие как *University of Tehran* в Иране и Казанский государственный энергетический университет в России, которые активно участвуют в международных проектах и исследованиях по улучшению систем управления электроэнергией. Белорусский национальный технический университет в Белоруссии и Туркменский политехнический институт в Туркменистане также занимаются разработками в этой области, что свидетельствует о глобальном интересе к вопросам энергоэффективности. Казахский национальный исследовательский технический университет имени К.И. Сатпаева и Алматинский университет энергетики и связи имени Гумарбека Даукеева в Казахстане, а также Таджикский технический университет и Киргизский государственный технический университет активно развивают научные исследования, направленные на улучшение энергетической инфраструктуры в своих странах. В Узбекистане такие учреждения, как Ташкентский государственный технический университет и Ташкентский государственный транспортный университет, занимаются разработкой новых технологий и методов управления электрическими сетями, что также способствует повышению надежности и качества электроснабжения. Таким образом, исследования в области бесконтактных коммутационных устройств и автоматизации управления энергосистемами ведутся в разных уголках мира. Это свидетельствует о глобальном стремлении к улучшению качества электрической энергии и повышению энергоэффективности, что, безусловно, является важным шагом к устойчивому развитию энергетического сектора в целом [7-8, 13-15].

Теоретический анализ нелинейных резистивных электрических цепей, а также их практическое применение, представляет собой важную область исследований, в которой активно работают такие ученые, как Л. Бессонов, Г. Атабеков, Я. С. Кублановский, Л. В. Шопен, Б. Н. Иванчук, Л. В. Данилов, П. Н. Матханов, Р. А. Липман, Ю. К. Розанов, Г. Р. Рахимов, П. Ф. Хасанов, З. И. Исмаилов, А. С. Каримов, Т. М. Кадыров, Б. Абдуллаев, М. Ибадуллаев, С. Ф. Амиров, Ш. Э. Бегматов, А. А. Алимов и многие другие исследователи [2, 4-6, 11-12, 16-17]. Эти ученые изучают различные аспекты нелинейных электрических цепей, что позволяет разрабатывать новые технологии и улучшать существующие системы. Важным направлением их работы является создание и исследование бесконтактных устройств, которые находят применение в самых разных областях, от промышленности до бытовой электроники. В этом контексте значительный вклад внесли зарубежные ученые, такие как R. A. Hamilton, G. R. Lezan, S. Martinenas, K. Knezovi, M. Marinelli, K. I. Khosiljonovich, а также ряд исследователей из России и других стран, включая В. П. Иляшова, Г. М. Рубашова, А. А. Поскробко и многих других [11, 13, 15, 18-21]. Их работы касаются различных аспектов разработки бесконтактных технологий, что позволяет значительно улучшить качество и эффективность электрических систем.

Научные исследования, проведенные учеными Узбекистана, сосредоточены на решении актуальных задач, таких как повышение качества электрической энергии в электрических сетях и снижение потерь энергии. Это особенно важно для обеспечения надежности и устойчивости электроснабжения. В рамках этих исследований разрабатываются методы расчета и совершенствования систем управления, основанных на бесконтактных коммутационных устройствах. Эти устройства позволяют значительно улучшить параметры работы электрических сетей и повысить их эффективность. Результаты научных исследований, проведенных такими учеными, как Х. Ф. Фозилов, Т. Х. Насиров, Т. М. Кадыров, М. Саъдуллаев, К. Р. Аллаев, Т. Ш. Гаипов, А. Д. Таслимов, А. Н. Расулов, Э. Х. Абдураимов, И. Х. Холлидинов и другими, продемонстрировали значительные достижения в области обеспечения качества электрической энергии [2-6, 11-14, 16]. Эти исследования не только способствуют развитию теории, но и находят практическое применение в реальных условиях, что позволяет улучшить качество жизни людей и повысить эффективность работы различных отраслей экономики. Таким образом, работа многих ученых, как отечественных, так и зарубежных, в области нелинейных резистивных электрических цепей и бесконтактных устройств является важным вкладом в развитие электротехники и энергетики. Их исследования помогают решать актуальные проблемы, связанные с качеством электрической энергии, и способствуют внедрению инновационных технологий, что, в свою очередь, открывает новые горизонты для дальнейших научных изысканий и практических разработок.

Несмотря на достигнутые значительные результаты, вопросы, касающиеся улучшения качества электрической энергии и уменьшения потерь напряжения, остаются недостаточно исследованными. Это связано с необходимостью усовершенствования простых, надежных и экономичных бесконтактных коммутационных устройств, основанных на нелинейных резистивных электрических цепях, которые используются в автоматических системах управления распределительными электрическими сетями с напряжением от 0,4 до 10 кВ. В рамках данного исследования предлагается разработка поэтапного бесконтактного коммутационного устройства, которое будет управляться изменениями тока нагрузки. Основная цель этой разработки заключается в повышении качества электрической энергии, улучшении надежности электроснабжения и снижении энергетических потерь.

Постановка задачи исследования (*Formulation of the research problem*).

Актуальность задачи. В системах управления устройствами РПН трансформаторов, предназначенных для улучшения качества электрической энергии в распределительных сетях напряжением 0,4-10 кВ, при разработке и исследовании бесконтактных коммутирующих устройств широко применяются нелинейные элементы, такие как диоды, тиристоры, транзисторы, симисторы, варисторы, оптопары, а также другие полупроводниковые компоненты. В указанных полупроводниковых элементах зависимость тока от напряжения (вольт-амперная характеристика) имеет сложный нелинейный характер, поэтому традиционные методы исследования, основанные на линейных приближениях, не позволяют с достаточной точностью описывать динамические процессы в таких нелинейных резистивных электрических цепях, особенно в условиях высокочастотных и переменных нагрузок. В связи с этим задача разработки бесконтактных коммутирующих устройств на основе универсальных и энергетически обоснованных методов для исследования динамических процессов в нелинейных резистивных электрических цепях является актуальной в области электротехники [2, 4-21].

Важность задачи. Исследование динамических процессов в нелинейных резистивных электрических цепях имеет важное значение для бесконтактного коммутационного управления современными системами, способствующими повышению качества электрической энергии, снижению энергетических потерь и проектированию аналоговых электронных устройств. Корректное описание динамических процессов в нелинейных электрических цепях напрямую влияет на стабильность работы системы, её энергоэффективность и электромагнитную совместимость. Анализ нелинейных резистивных электрических цепей с использованием метода Лагранжа позволяет перейти от традиционных вольт-амперных характеристик к энергетическим подходам. Это, в свою очередь, включает возможности более точного моделирования нелинейных эффектов, обоснования энергетических взаимосвязей между элементами, а также оптимизации бесконтактных коммутационных схем управления с точки зрения повышения энергетической эффективности и снижения потерь энергии [2, 4-21].

Таким образом, решение данных задач имеет важное значение не только с

теоретической, но и с практической точки зрения, поскольку служит научной основой для разработки и исследования конструктивных схем бесконтактного коммутационного управления устройствами, такими как оборудование РПН трансформаторов, предназначенное для повышения качества электрической энергии в распределительных сетях напряжением 0,4-10 кВ [7-15, 18-21].

Цель данной работы является разработка и анализ математической модели динамических процессов в нелинейной резистивной электрической цепи.

Материалы и методы (Materials and methods)

Из вышеизложенного становится очевидной актуальность создания простой по конструкции, но в то же время надёжной схемы бесконтактных коммутационных устройств, обеспечивающих коммутацию в цепях с высокими токовыми нагрузками. В рамках настоящего исследования основное внимание уделяется анализу нелинейной резистивной электрической цепи, обосновывающая разработанные бесконтактные коммутационные устройства для систем управления автоматических устройств в системе электроснабжения. В рассматриваемой электрической цепи VD_1 - диод, R_1 - активное сопротивление, а ёмкости C параллельно подключено резистивное сопротивление R_2 . Последовательно с ними в нагрузочной части подключены оптопара VU , диодный мост VD_2 - VD_5 и нагрузочное сопротивление $R_{наг}$ [2, 4-6, 11-13, 16-17].

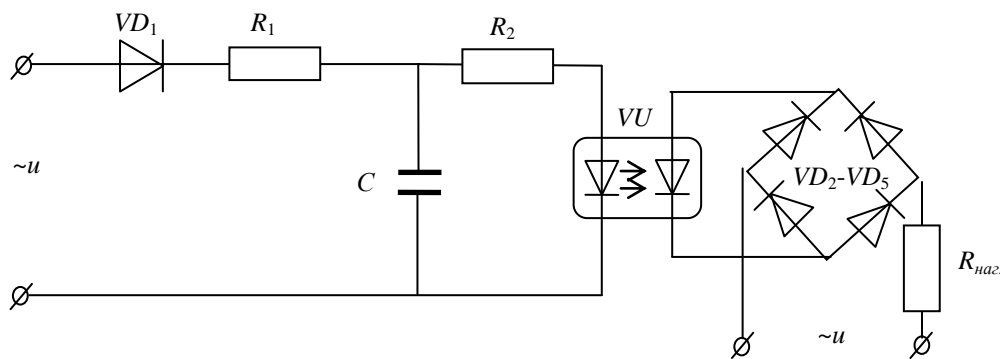


Рис.1. Схема нелинейной резистивной электрической цепи

Fig.1. Diagram of a nonlinear resistive electrical circuit

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

В настоящее время для анализа подобных электрических цепей применяются различные математические подходы, включая методы Эйлера, Лагранжа, Бернулли, Риккати, а также теоремы Клеро и Коши. С этой точки зрения теоретическое исследование динамического процесса нелинейной резистивной электрической цепи, представленной на рисунке 1, проведено с использованием общего метода решения неоднородных нелинейных уравнений, а именно произвольного метода Лагранжа. В этой связи была построена математическая модель численного решения дифференциального уравнения нелинейной электрической цепи с помощью метода Лагранжа и решим это дифференциальное уравнение [2, 4-6, 11-13, 16-17].

Поскольку в большинстве рабочих схем бесконтактных коммутационных устройств из-за использования диода применяется выражение «идеальный диод» или «идеальный ключ», то для данной цепи диод принят в качестве «идеального ключа», а форма напряжения является синусоидальной [16-17].

Напряжение рассматриваемой цепи изменяется по следующему закону:

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) \tag{1}$$

Исходя из идеальности характеристики диода, принимаем, что $u_{ex} = U_m \sin \omega t$, и при этом для интервала от $t=0$ до t_1 диод считается открытым. При выполнении условия $0 \leq t \leq t_1$ уравнение цепи запишем в следующем виде [16-17]:

$$U_m \sin \omega t = R_1 i + u_c \tag{2}$$

с учётом того, что $i = C \frac{du_c}{dt}$, получаем выражение

$$U_m \sin \omega t = R_1 \left(C \frac{du_c}{dt} + \frac{u_c}{R_2} \right) + u_c \tag{3}$$

Примем угол подключения ψ к напряжению источника цепи равным нулю. Отсюда уравнение, характеризующее напряжение на ёмкости, примет следующий вид:

$$u_c = U_m \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \left(1 - e^{-\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C} t} \right) \quad (4)$$

Здесь, U_m – максимальное значение сетевого напряжения, а R_1 , R_2 и C элементы цепи.

Из приведённого уравнения (3) находим $\frac{du_c}{dt}$:

$$\begin{aligned} R_1 C \frac{du_c}{dt} + R_1 \frac{u_c}{R_2} &= U_m \sin \omega t - u_c \\ R_1 C \frac{du_c}{dt} &= U_m \sin \omega t - u_c - R_1 \frac{u_c}{R_2} \\ \frac{du_c}{dt} &= \frac{U_m \sin \omega t}{R_1 C} - \frac{u_c}{R_1 C} - \frac{R_1 u_c}{R_1 C R_2} \end{aligned} \quad (5)$$

Из этого, в результате решения дифференциального уравнения, получаем выражение в следующем виде.

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{1}{R_1 C} \left(U_m \sin \omega t - u_c \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right) \right) \quad (6)$$

Общий метод решения неоднородного нелинейного дифференциального уравнения - это метод вариации произвольных постоянных Лагранжа. Поэтому рассмотрим уравнение (6), полученное из решения дифференциального уравнения нелинейной резистивной электрической цепи [16-17].

При этом уравнение (6) умножаем на $\frac{1}{R_1 C}$ и выполняем вычисления:

$$\frac{du_c}{dt} = \frac{U_m \sin \omega t}{R_1 C} - u_c \left(\frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{R_1 C} \right) \quad (7)$$

Преобразовав уравнение, получаем следующее:

$$\frac{du_c}{dt} + u_c \left(\frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{R_1 C} \right) = \frac{U_m \sin \omega t}{R_1 C} \quad (8)$$

Приведённое выражение представляет собой дифференциальное уравнение нелинейной электрической цепи. Его решим, используя метод вариации постоянных, и, приравняв левую часть уравнения к нулю, найдём решение его однородной части [16-17]:

$$\frac{du_c}{dt} + u_c \left(\frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{R_1 C} \right) = 0$$

В результате решения данного дифференциального уравнения получаем следующее выражение:

$$\frac{du_c}{dt} = -u_c \left(\frac{1 + \frac{R_1}{R_2}}{R_1 C} \right) \quad (9)$$

Умножим уравнение (9) на $\frac{dt}{u_c}$ и проинтегрируем его:

$$\int \frac{du_c}{u_c} = - \int \frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C} dt \quad (10)$$

Натуральный логарифм данного уравнения вычисляем следующим образом:

$$\ln u_c = - \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C} \right) t \quad (11)$$

Здесь, определив u_c , внесём следующее преобразование:

$$u_c = A(t) \cdot e^{-\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C} \right) t} \quad (12)$$

Отсюда следует выражение:

$$\frac{du_c}{dt} = A(t) \cdot e^{-\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C} \right) t} - A(t) \cdot \left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C} \right) \cdot e^{-\left(\frac{R_1 + R_2}{R_1 R_2 C} \right) t} \quad (13)$$

На основе внесённого преобразования уравнение (9) выражаем следующим образом:

$$A'(t) \cdot e^{-\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2C}\right)t} - A(t) \cdot \left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2C}\right) \cdot e^{-\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2C}\right)t} + A(t) \cdot \left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2C}\right) \cdot e^{-\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2C}\right)t} = \frac{U_m}{R_1C} \sin \omega t \quad (14)$$

После необходимых сокращений получаем следующее:

$$A'(t) = \frac{U_m}{R_1C} \sin \omega t \cdot \left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2C}\right) dt \quad (15)$$

Здесь обозначим как $\frac{R_1+R_2}{R_1R_2C} = a$.

В процессе вычислений интегрируем уравнение (15):

$$A(t) = \frac{U_m}{R_1C} \int \sin \omega t \cdot e^{at} dt \quad (16)$$

Аналогично, уравнение (16) интегрируем по частям:

$$I = \int \sin \omega t \cdot e^{at} dt = \left| \begin{array}{l} \sin \omega t = u \quad dv = e^{at} dt \\ \omega \cos \omega t dt = du \quad v = \frac{1}{a} \cdot e^{at} \end{array} \right| = \frac{1}{a} \cdot e^{at} \sin \omega t - \int \frac{\omega}{a} \cdot e^{at} \cos \omega t dt = \quad (17)$$

$$= \left| \begin{array}{l} \cos \omega t = u \quad dv = e^{at} dt \\ -\omega \sin \omega t dt = du \quad v = \frac{1}{a} \cdot e^{at} \end{array} \right| = \frac{1}{a} \cdot e^{at} \sin \omega t - \frac{\omega}{a^2} \cdot e^{at} \cos \omega t - \frac{\omega^2}{a^2} \int e^{at} \cdot \sin \omega t dt$$

Здесь обозначим $I = \sin \omega t \cdot e^{at} dt$: используем формулу поэлементного интегрирования для $\sin \omega t = u$; $e^{at} dt = dv$; $\int u dv = uv - \int v du$:

Отсюда упрощаем уравнение (17):

$$\begin{aligned} \int \sin \omega t \cdot e^{at} dt &= \frac{1}{a} e^{at} \sin \omega t - \frac{\omega}{a^2} e^{at} \cos \omega t - \frac{\omega^2}{a^2} \int e^{at} \sin \omega t dt \\ \int \sin \omega t \cdot e^{at} dt \left(1 + \frac{\omega^2}{a^2}\right) &= e^{at} \left(\frac{1}{a} \sin \omega t - \frac{\omega}{a^2} \cos \omega t\right) \\ \int \sin \omega t \cdot e^{at} dt &= \frac{a^2}{a^2 + \omega^2} \cdot e^{at} \left(\frac{1}{a} \sin \omega t - \frac{\omega}{a^2} \cos \omega t\right) \\ \int \sin \omega t \cdot e^{at} dt &= \frac{1}{a^2 + \omega^2} \cdot (a \cdot \sin \omega t - \omega \cdot \cos \omega t) e^{at} + const \end{aligned} \quad (18)$$

Подставляя постоянные значения в выражение (18), выполняем операции замены, используя интегралы данного дифференциального уравнения из выражений (12) и (16), и получаем следующее [16-17]:

$$u_c = \frac{U_m}{R_1C} \cdot \left(\frac{1}{\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2C}\right)^2 + \omega^2} \right) \left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2C} \sin \omega t - \omega \cos \omega t \right) + const \cdot e^{-\left(\frac{R_1+R_2}{R_1R_2C}\right)t} \quad (19)$$

Основываясь на вышеописанные математические расчёты, в работе рассматривается практическое применение метода Лагранжа к анализу нелинейной резистивной электрической цепи, изображённой на рисунке 1. При подключения данной цепи к источнику напряжения, возникает необходимость анализа динамического процесса. Используя метод Лагранжа, и решив соответствующее дифференциальное уравнение с помощью выражения (6), становится возможным вычисление динамического процесса. В частности, полученное уравнение (19) позволяет определить зависимость напряжения на конденсаторе во времени, отражая характер изменения параметров цепи в переходных режимах [2, 4-6, 11-13, 16-17].

Результаты и их обсуждение (Results and Discussions)

Решив составленное дифференциальное уравнение, получаем выражение (19), определяющее напряжение на ёмкости цепи, и исследуем изменение напряжения на ёмкости во времени при различных параметрах, при этом принимаем нулевые начальные условия. Анализ динамических процессов нелинейной резистивной электрической цепи, представленной на рисунке 1, выполнен с использованием метода Лагранжа; результаты изменения напряжения на ёмкости цепи во времени приведены на рисунках 2, 3 и 4 [16].

На рисунке 2 показано изменение напряжения на ёмкости нелинейной резистивной электрической цепи во времени $U_c=f(t)$ при следующих постоянных значениях: напряжение источника $U_m=18$ В, ёмкость $C=1$ мкФ, сопротивление $R_2=3,0$ кОм и шаг интегрирования $h=0,001$, для различных значений сопротивления R_1 : 1 — $R_1=0,3$ кОм;

2 — $R_1=0,5$ кОм; 3 — $R_1=0,8$ кОм; 4 — $R_1=1,0$ кОм; 5 — $R_1=1,2$ кОм.

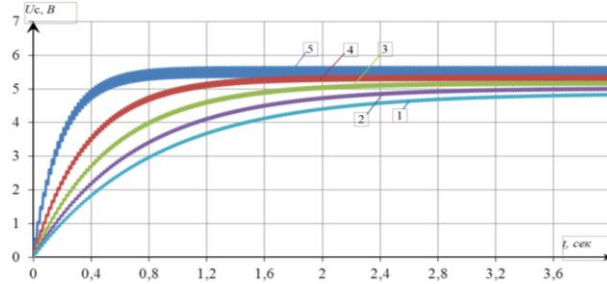


Рис.2. Графики изменения напряжения на ёмкости - $U_c=f(t)$: C и $R_2=const$; $R_1=Var$

Fig.2. Graphs of the capacitor voltage variation - $U_c=f(t)$: C and $R_2=const$; $R_1=Var$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 3 показано изменение напряжения на ёмкости нелинейной электрической цепи во времени $U_c=f(t)$ при следующих постоянных значениях: напряжение источника $U_m=18$ В ёмкость $C=1$ мкФ, сопротивление $R_1=0,3$ кОм и шаг интегрирования $h=0,001$, для различных значений сопротивления R_2 : 1 — $R_2=3,0$ кОм; 2 — $R_2=2,0$ кОм; 3 — $R_2=1,0$ кОм; 4 — $R_2=0,5$ кОм; 5 — $R_2=0,25$ кОм.

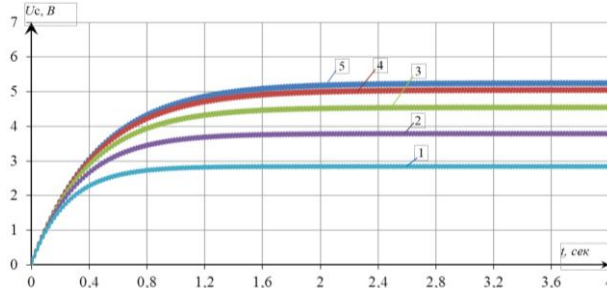


Рис.3. Графики изменения напряжения на ёмкости - $U_c=f(t)$: C и $R_1=const$; $R_2=Var$

Fig.3. Graphs of the capacitor voltage variation - $U_c=f(t)$: C в $R_1=const$; $R_2=Var$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

На рисунке 4 показано изменение напряжения на ёмкости цепи во времени $U_c=f(t)$ при следующих постоянных значениях: напряжение источника $U_m=18$ В, сопротивления $R_1=1,2$ кОм и $R_2=3,0$ кОм, шаг интегрирования $h=0,001$, для различных значений ёмкости C : 1 — $C=1,0$ мкФ; 2 — $C=2,0$ мкФ; 3 — $C=3,0$ мкФ; 4 — $C=4,0$ мкФ; 5 — $C=5,0$ мкФ.

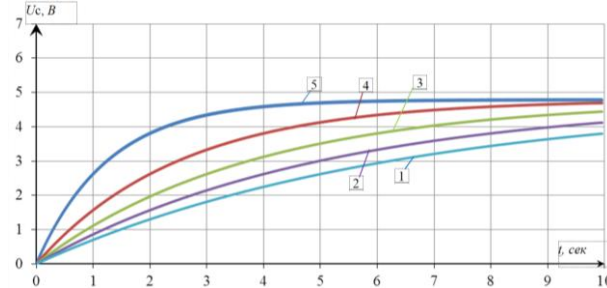


Рис.4. Графики изменения напряжения на ёмкости - $U_c=f(t)$: R_1 и $R_2=const$; $C=Var$

Fig.4. Graphs of the capacitor voltage variation - $U_c=f(t)$: R_1 and $R_2=const$; $C=Var$

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Из приведённых характеристик следует, что изменение напряжения на ёмкости во времени напрямую зависит от значения сопротивления R_1 , и за счёт его корректировки можно существенно сократить время срабатывания управляющей цепи. Кроме того, анализ динамического процесса нелинейной резистивной электрической цепи с помощью метода Лагранжа позволил определить изменение напряжения на ёмкости во времени [11-13, 17].

Для проверки достоверности результатов математического моделирования схемы нелинейной электрической цепи, приведённой на рисунке 1, в рамках данного исследования использовались два вида современного программного обеспечения для моделирования: Electronics Workbench и MATLAB. В рамках исследования нелинейная резистивная электрическая цепь, приведённая на рисунке 1, была смоделирована с помощью программы Electronics Workbench, и результат анализа графика изменения напряжения на ёмкости $U_c=f(t)$ представлен на рисунке 5 [2, 4-6, 11-13, 16-17].

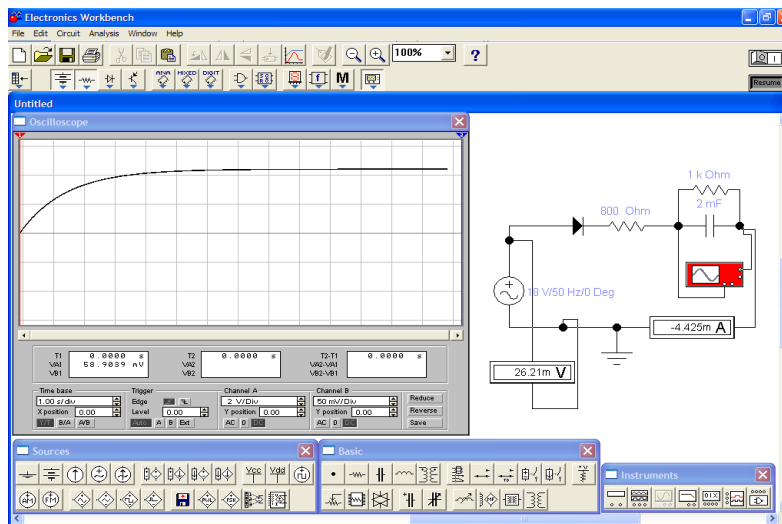


Рис.5. Моделирование нелинейной резистивной электрической цепи в программе Electronics Workbench

Fig.5. Modeling of a nonlinear resistive electrical circuit in Electronics Workbench software

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Приведённая на рисунке (1) нелинейная резистивная электрическая цепь была смоделирована и проанализирована с помощью программы Electronics Workbench (рис.5). В результате был проведён анализ динамического процесса во временной области и выполнен в частотных диапазонах. Кроме того, программа предоставила возможность анализа как аналоговых, так и цифровых устройств [2, 4-6, 11-13, 16-17].

Современные разработчики программного обеспечения для компьютеров предлагают для моделирования, с целью автоматического выполнения математических вычислений, помимо Electronics Workbench, такие программные комплексы, как MATLAB, Mathcad, Mathematica и другие. Среди них программа MATLAB выделяется высокой функциональностью. По этой причине нелинейная резистивная электрическая цепь, приведённая на рисунке 1, была смоделирована в MATLAB R2014a с использованием Simulink Library Browser и блоков SimPowerSystems, а график изменения напряжения на ёмкости $U_c=f(t)$ и результаты анализа представлены на рисунке 6.

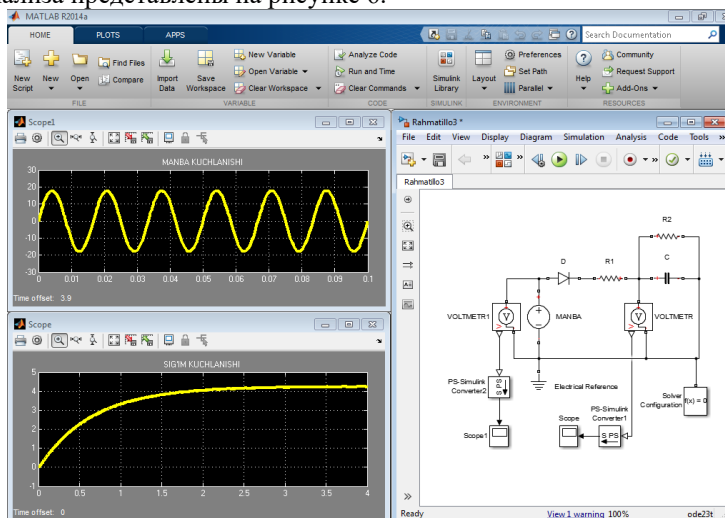


Рис.6. Моделирование нелинейной резистивной электрической цепи в программе MATLAB R2014a

Fig.6. Modeling of a nonlinear resistive electrical circuit in MATLAB R2014a software

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Нелинейная резистивная электрическая цепь, приведённая на рисунке, была смоделирована с помощью блока Simulink в MATLAB R2014a, а динамический процесс был проанализирован во временной области и выполнен в частотных диапазонах. Полученные результаты показывают, что блок Simulink в MATLAB R2014a позволяет проводить анализ изменения напряжения во времени [2, 4-6, 16-17].

На рисунке 7 показано сравнительное изображение результатов анализа нелинейной электрической цепи, выполненного вышеуказанными методами. При сравнении: a —

программа Electronics Workbench; δ — блок Simulink в MATLAB R2014a; ϵ — результаты анализа исследования в программе Microsoft Excel, смоделированные на основе математических вычислений с использованием метода Лагранжа; ζ — сопоставление с результатами экспериментального анализа. Разница между результатами анализа графиков изменения напряжения на ёмкости составляет 1,5-2%. Эта разница возникла при решении рассматриваемой цепи методом Лагранжа с введением постоянных величин. Результаты моделирования нелинейной резистивной электрической цепи совпали с результатами, полученными аналитическими методами, и соответствовали кривым теоретических вычислений [2, 4-6, 11-13, 16-17].

Известно в области электроники, что, управляя временем открытия тиристора, можно влиять на форму кривой тока нагрузки. Если смещение фазы ϕ между началом положительной полуволны анодного напряжения и началом протекания прямого тока равно нулю, форма кривой тока нагрузки будет синусоидальной [11-15, 18-21].

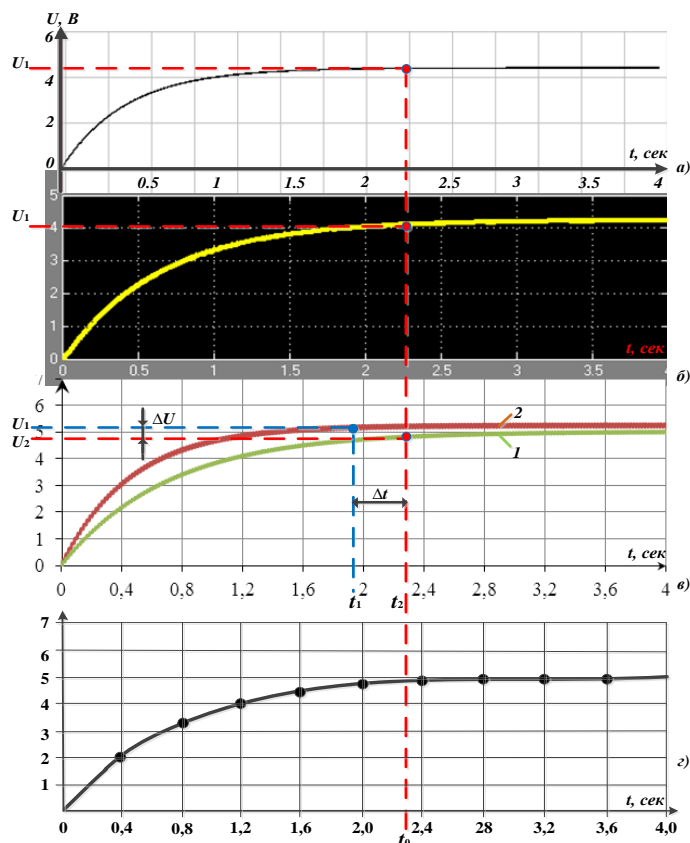


Рис.7. Сравнительный анализ результатов анализа нелинейной резистивной электрической цепи

Fig.7. Comparative analysis of the results of the nonlinear resistive electrical circuit analysis

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Как отмечалось выше, одним из основных показателей, определяющих качество электроэнергии, является стабильность и симметричность напряжения у бытовых потребителей электроэнергии. В этом случае с помощью регулирующего устройства под нагрузкой (РПН) или трансформатора с добавочным напряжением можно улучшить качество напряжения у бытовых потребителей электроэнергии. Для выполнения этих задач требуется подключение и переключение секций обмоток трансформатора с добавочным напряжением. Для выполнения функции переключения была разработана схема управляемого бесконтактного коммутационного устройства [11-15, 18-21].

Очень важные технические преимущества трансформаторов и электромагнитных реле (гальваническая развязка цепи управления и нагрузки) также присущи оптоэлектронным устройствам. Кроме того, оптоэлектронные реле обладают высокой надёжностью, долговечностью и существенно превосходят электромагнитные реле по переходным и частотным характеристикам. Компактные и быстро реагирующие оптоэлектронные устройства, основанные на интегральных схемах цифровой техники

(трансформатор, переключающее оборудование, защитные реле и др.), обеспечивают надёжное управление без специальных электрических средств согласования [10-15].

Бесконтактное реле напряжения, разработанное на основе оптоэлектронных устройств и тиристоров с улучшенными массогабаритными параметрами, служит для обеспечения синусоидальной формы напряжения на нагрузке. На рисунке 8 приведена принципиальная схема оптоэлектронного бесконтактного реле напряжения с выдержкой времени [13-15, 18-21].

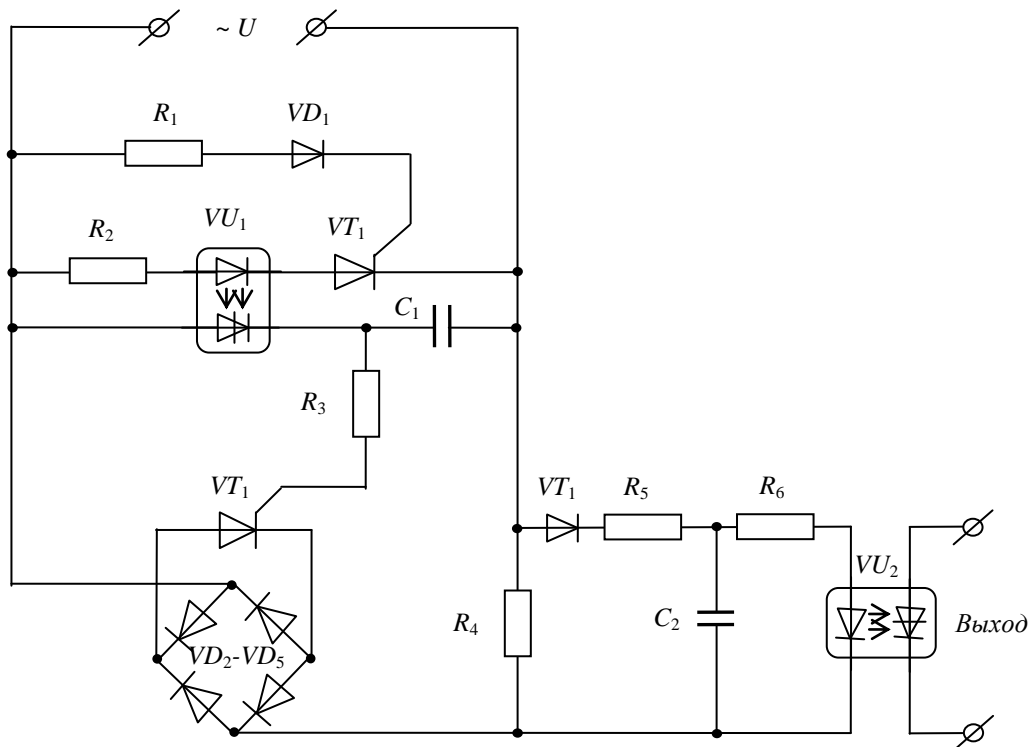


Рис.8. Принципиальная схема бесконтактного коммутирующего устройства

Fig.8. Schematic diagram of a contactless switching device

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Бесконтактное коммутационное устройство работает следующим образом: когда входное напряжение достигает определённого значения, сигнал открытия на управляющем электроде открывает тиристор VT_1 под углом 90^0 , и через сопротивление R_2 соединяется тиристорный оптоэлектрон VU_1 с диодной цепью. Это обеспечивает протекание тока через диодную часть тиристорного оптоэлектрона VU_1 , а через открытие тиристорной части тиристорного оптоэлектрона VU_1 конденсатор C_1 подключается к сети. Поскольку постоянный токовый сигнал подается на управляющий электрод тиристора VT_2 через конденсатор C_1 и сопротивление R_3 , он остаётся постоянно открытым, при этом диод R_6 , сопротивление R_5 и конденсатор C_2 подключаются к источнику напряжения с синусоидальной формой. Время включения тиристорного оптоэлектрона VU_2 регулируется с помощью сопротивлений R_5 и R_6 , а время отключения — выбирается параметрами сопротивления R_6 [4-6, 11-13, 15].

По результатам исследования форма «вход-выход» напряжения оптоэлектронного бесконтактного коммутационного устройства с выдержкой времени представлена на рисунке 9, изменение кривой напряжения на ёмкости — на рисунке 10, а имитационная модель, выполненная с помощью блока Simulink в MATLAB R2014a, показана на рис.11.

Данное бесконтактное коммутационное устройство было испытано в научно-исследовательских лабораториях «Технологии энергосбережения в системах электроснабжения» кафедры «Электроснабжение» факультета энергетической инженерии Ташкентского государственного технического университета, а также «Технологии энергосбережения в системах электротехники, электроники и электромеханики» кафедры «Электротехника» того же университета. В этом случае в качестве тиристоров VT_1 и VT_2 использованы КУ202Н и КУ201Н, диоды VD_1 и VD_2 — Д226Б, активные сопротивления R_1 , R_2 , R_3 , R_4 , R_5 составляют 3 кОм, 15 кОм, 3,8 кОм, 16 кОм и 12 кОм соответственно, конденсаторы C_1 и C_2 — ёмкостью 1 мкФ и рассчитанные на напряжение 500 В, диодный

мост VD_2 - VD_5 — КЦ402В, а оптоэлектронны VU_1 и VU_2 — тиристорные оптопары типа АОУ103В.

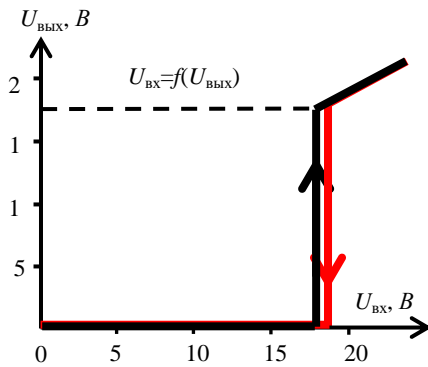


Рис.9. Характеристика напряжения "вход-выход" бесконтактного коммутирующего устройства

Fig.9. Voltage "input-output" characteristic of the contactless switching device

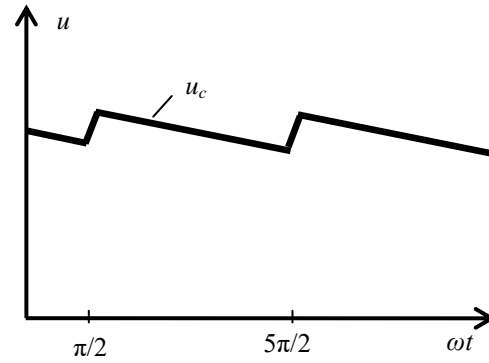


Рис.10. Форма изменения кривой напряжения на ёмкости бесконтактного коммутационного устройства

Fig.10. Waveform of the voltage variation across the capacitance of the contactless switching device

*Источник: Составлено авторами Source: compiled by the author.

Согласно результатам исследования, бесконтактное коммутационное устройство при напряжении 18 В с учётом полного заряда конденсатора C_2 подключает нагрузку к сети с выдержкой времени за 0,23 секунды. Таким образом, на выходе оптоэлектронного бесконтактного коммутационного устройства с выдержкой времени удалось обеспечить сохранение синусоидальной формы напряжения [11-13].

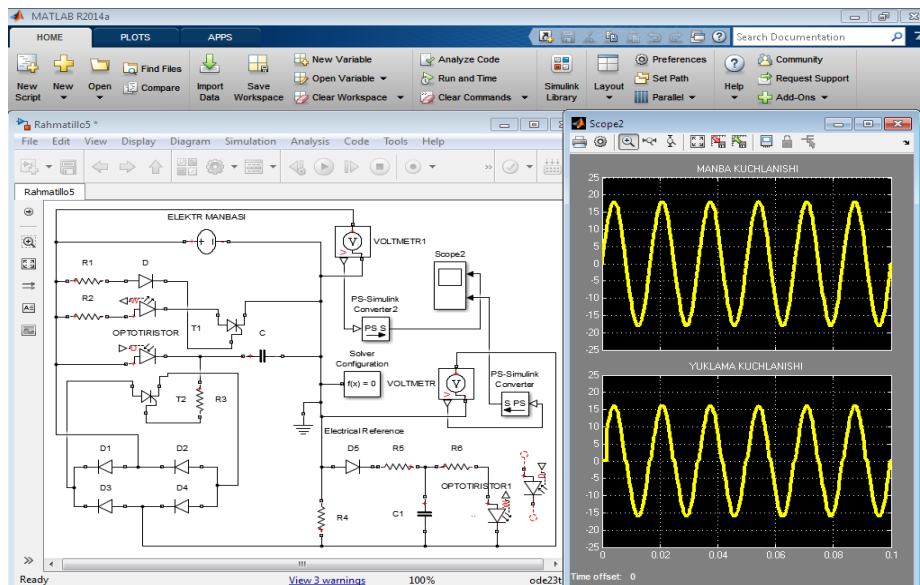


Рис.11. Имитационная модель бесконтактного коммутирующего устройства

Fig.11. Simulation model of the contactless switching device

Выводы (Conclusions)

В данной статье рассмотрен вопрос анализа динамических процессов в нелинейной резистивной электрической цепи с использованием метода Лагранжа. По результатам выполненных работ, сделаны следующие основные выводы:

1. С учётом динамических процессов в нелинейной резистивной электрической цепи с помощью метода Лагранжа были разработаны математические решения. В результате было получено возможность определить время изменения напряжения на ёмкости нелинейной резистивной электрической цепи.

2. С учётом исследования нелинейной резистивной электрической цепи предложена новая схема бесконтактного коммутационного устройства. В результате исследование динамических процессов позволило усовершенствовать бесконтактное управление системой РПН-трансформатора с целью повышения технических возможностей устройства.

3. На основе нелинейной резистивной электрической цепи схема предлагаемых бесконтактных коммутационных устройств была усовершенствована. В результате усовершенствование схемы оптоэлектронного бесконтактного реле напряжения с выдержкой времени позволило исключить ложные срабатывания коммутационных аппаратов и повысить селективность устройства.

4. На основе нелинейной резистивной электрической цепи имитационная модель предлагаемых бесконтактных коммутационных устройств была разработана с помощью практической программы MATLAB R2014a. В результате стало возможным определить синусоидальную форму выходного напряжения бесконтактных коммутационных устройств.

5. Внедрение современных дискретных систем управления для комплексной автоматизации производственных процессов и во всех отраслях народного хозяйства, вместе с усовершенствованием электронных устройств, позволило обосновать возможность обеспечения высокой надёжности, быстродействия, простоты обслуживания и работы в загрязнённой среде с помощью бесконтактных коммутационных устройств, разработанных на основе нелинейных цепей.

6. По результатам исследований было установлено, что в рассматриваемой нелинейной резистивной электрической цепи определение напряжения на ёмкости позволяет задавать управляющее напряжение тиристора, а управление процессом «заряд-разряд» ёмкости обеспечивает установку выдержки времени в бесконтактных коммутационных устройствах при достижении конденсатором точки насыщения, что подтверждает возможность их практического применения.

Литература

1. Государственный стандарт Узбекистана O'zDSt 1044:2003. Методы измерений и анализа показателей качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (протокол №05-19 от 18 июля 2003 г. – С.27).

2. Абдураимов Э.Х., Авлакулов Х.П. и др. Анализ динамических процессов в нелинейной электрической цепи // Научный журнал «ВЕСТНИК ТашГТУ». – Ташкент. 2010; №1-2: – С.72-75.

3. Межгосударственный стандарт ГОСТ 32144-2013. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения (протокол № 55-П от 25 марта 2014 г. – С.15).

4. Каримов Р.Ч. Исследование нелинейная динамическая цепи с диодные элементов в системе электроснабжения // Сборник материалов IV-международной научной конференции "Современные тенденции технической наук". – Казань. 2015; – С.33-35.

5. Расулов А.Н., Абдураимов Э.Х., и др. Использование транзисторных резистивных цепей в системе электроснабжения // Научный журнал «ВЕСТНИК ТашГТУ». – Ташкент. 2015; №3(92): – С.108-113.

6. Каримов Р.Ч. Исследование нелинейная динамическая цепи с тиристорные элементов в системе электроснабжения // Сборник материалов IV-международной научной конференции "Современные тенденции технической наук". – Казань. 2015; – С.30-33.

7. Савина Н.В., Бодруг Н.С. Проблемы нормирования качества электроэнергии при переходе на интеллектуальные электроэнергетические системы // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2016; №5-6: – С.19-26. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-5-6-19-26>

8. Лукина Г.В., Бондаренко С.И., Самаркина Е.В. Экспериментальное исследование показателей качества электрической энергии на физической модели сети 0.38 кВ с симметрирующим устройством // «Вестник ИрГСХА». 2016; №72: – С.138-146.

9. Martinenas S., Knezović K., Marinelli M. Management of power quality issues in low voltage networks using electric vehicles: Experimental validation // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016; Vol.32; №2: p.971-979.

10. Khosiljonovich K.I. Electric power quality analysis 6-10/0.4 kV distribution networks // Energy and Power Engineering. 2016; Vol.8; №6: p.263-269.

11. Каримов И.Ч., и др. Управляемые коммутирующие цепи на базе нелинейных резистивных элементов // Сборнике материалов IV-международной научно-практической конференции «Наука и современное общество: взаимодействие и развитие». Уфа (Россия). 2017; Том 2: – С.59-62.

12. Бобожанов М.К., Каримов Р.Ч. Исследование оптоэлектронных резистивных цепей в системе электроснабжения // Научный журнал «ВЕСТНИК ТашГТУ». – Ташкент. 2017; №4(101): – С.53-57.

13. Клевцов А. Бесконтактные коммутационные устройства в системах автоматизации и электропривода // В записную книжку инженера. – М.: 2017; №4: – С.100-103.

14. Фетисов Л.В., Роженцова Н.В., Булатов О.А. Повышение качества электрической энергии в сетях низкого напряжения // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018; №20(11-12): – С.99-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>

15. Асабин А.А., и др. Способы плавного регулирования величины выходного напряжения тиристорного регулятора вольтодобавки // Энергетические системы и комплексы. Труды НГТУ им. Р.Е.Алексеева. – М.: 2018; №4(123): – С.69-75.

16. Расулов А.Н., и др. Программа определения процессов в нелинейной динамической электрической цепи // Агентство по интеллектуальной собственности при Министерстве Юстиции Республики Узбекистан. Свидетельство №DGU 05406 о официальной регистрации программы для электронно-вычислительных машин. 13.06.2018.

17. Расулов А.Н., Рузиназаров М.Р., и др. Программа расчёта динамических процессов в нелинейных электрических цепях методом вариации постоянной // Агентство по интеллектуальной собственности при Министерстве Юстиции Республики Узбекистан. Свидетельство №DGU 06134 о официальной регистрации программы для электронно-вычислительных машин. 05.02.2019.

18. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н. Определение потерь электроэнергии моделированием низковольтных сельских электрических сетей // Известия Тульского государственного университета. Технические науки. 2020; №4: – С.440-449.

19. Усманов Э.Г., Хусанов Б.М. Устройство для автоматического изменения коэффициента трансформации у трансформаторов 6-10/0,4 кВ // Проблемы энерго- и ресурсосбережения. – Ташкент. 2021; Специальный выпуск: – С.115-118.

20. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н., Грачева Е.И. Экспериментальное исследование показателей качества и потерь электроэнергии в низковольтных сельских электрических сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2021; №23(3): – С.209-222. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222>

21. Кротенок В.В., Бохан А.Н. Экспериментальное исследование динамических характеристик нелинейных ограничителей перенапряжений // ВЕСТНИК ГТТУ им. П.О.Сухого. 2023; №2: – С.67-78.

22. Экспериментальное исследование бесконтактных коммутационных устройств, управляемых на основе нелинейных резистивных элементов / Э. Г. Усманов, М. К. Бобожанов, Р. Ч. Каримов [и др.] // Электричество. – 2025. – № 11. – С. 57-66. – DOI 10.24160/0013-5380-2025-11-57-66.

Авторы публикации:

Бобожанов Максуд Каландарович – д-р техн. наук, профессор, профессор кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9655-2683>. E-mail: mbobojanov@yahoo.com.

Усманов Эльдор Ганиевич – канд. техн. наук, доцент, профессор кафедры «Электроснабжение» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-3681-3770>. E-mail: eusmonov@gmail.com.

Каримов Рахматилло Чориевич – д-р философии (PhD) по техническим наукам, доцент, заведующий кафедрой «Электротехника» Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-0129-5643> E-mail: raxmatillo82@mail.ru.

Попкова Оксана Сергеевна – канд. техн. наук, доцент, доцент кафедры «Автоматизация технологических процессов и производств» Казанского государственного энергетического университета, г. Казань, Россия. ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-3007-6853>. E-mail: oksiniy@mail.ru.

Хушвактов Дилмурод Шухратович – ассистент Ташкентского государственного технического университета имени Ислама Каримова, г. Ташкент, Узбекистан. ORCID: <https://orcid.org/0009-0002-1278-4124> E-mail: dilmurodxushvaktov5@gmail.com.

References

1. State Standard of Uzbekistan O'zDSt 1044:2003. Methods of measurement and analysis of electric power quality indicators in general-purpose power supply systems (Protocol №05-19 dated July 18, 2003; p.27).
2. Abduraimov E.Kh., Avlakulov Kh.P., et al. Analysis of dynamic processes in a nonlinear electrical circuit // Scientific Journal "Bulletin of TSTU". Tashkent. 2010; №1-2: pp.72-75.
3. Interstate Standard GOST 32144-2013. Electric Energy. Electromagnetic Compatibility of Technical Equipment. Power Quality Standards in General-Purpose Power Supply Systems (Protocol №55-P dated March 25, 2014; p.15).
4. Karimov R.Ch. Study of a Nonlinear Dynamic Circuit with Diode Elements in the Power Supply System // Proceedings of the 4th International Scientific Conference "Modern Trends in Technical Sciences". Kazan. 2015; pp.33-35.
5. Rasulov A., Abduraimov E., et al. The Use of Transistor Resistive Circuits in the Power Supply System // Scientific Journal "Bulletin of TSTU". Tashkent. 2015; №3(92): pp.108-113.
6. Karimov R.Ch. Study of a Nonlinear Dynamic Circuit with Thyristor Elements in the Power Supply System // Proceedings of the 4th International Scientific Conference "Modern Trends in Technical Sciences". Kazan. 2015; pp.30-33.
7. Savina N.V., Bodrug N.S. The problem of normalizing electrical energy quality while transferring to intellectual electrical energy systems // POWER ENGINEERING: research, equipment, technology. 2016; №5-6: pp.19-26. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2016-0-5-6-19-26>
8. Lukina G.V., Bondarenko S.I., Samarkina E.V. Experimental Study of Power Quality Indicators on a Physical Model of a 0.38 kV Network with a Symmetrizing Device // Bulletin of Irkutsk State Agricultural Academy. 2016; №72: pp.138-146.
9. Martinenas S., Knezović K., Marinelli M. Management of power quality issues in low voltage networks using electric vehicles: Experimental validation // IEEE Transactions on Power Delivery. 2016; Vol.32; №2: p.971-979.
10. Khosiljonovich K.I. Electric power quality analysis 6-10/0.4 kV distribution networks // Energy and Power Engineering. 2016; Vol.8; №6: p.263-269.
11. Karimov I.Ch., et al. Controlled Switching Circuits Based on Nonlinear Resistive Elements // Proceedings of the IV International Scientific and Practical Conference "Science and Modern Society: Interaction and Development". Ufa (Russia). 2017; Vol.2: pp.59-62.
12. Bobojanov M., Karimov R.Ch. Study of Optoelectronic Resistive Circuits in the Power Supply System // Scientific Journal "Bulletin of TSTU". Tashkent. 2017; №4(101): pp.53-57.
13. Klevtsov A. Contactless Switching Devices in Automation and Electric Drive Systems // In the Engineer's Notebook. Moscow. 2017; №4: pp.100-103.
14. Fetisov L.V., Rozhencova N.V., Bulatov O.A. Improving the quality of electric power in low voltage networks // POWER ENGINEERING: research, equipment, technology. 2018; №20(11-12): pp.99-106. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2018-20-11-12-99-106>
15. Asabin A., et al. Methods of Smooth Regulation of the Output Voltage Magnitude of a Thyristor Voltage Booster Regulator // Energy Systems and Complexes. Proceedings of Nijniy Novgorod State Technical University named after R.Aleksev. Moscow. 2018; №4(123): pp.69-75.
16. Rasulov A.N., et al. Program for Determining Processes in a Nonlinear Dynamic Electrical Circuit // Agency for Intellectual Property under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan. Certificate №DGU 05406 of Official Registration of a Computer Program. June 13, 2018.
17. Rasulov A.N., Ruzinazarov M.R., et al. Program for Calculating Dynamic Processes in Nonlinear Electrical Circuits Using the Method of Variation of Constant // Agency for Intellectual Property under the Ministry of Justice of the Republic of Uzbekistan. Certificate №DGU 06134 of Official Registration of a Computer Program. February 5, 2019.
18. Rakhimov O.S., Mirzoev D.N. Determination of Electric Power Losses by Modeling Low-Voltage Rural Electric Networks // Proceedings of Tula State University. Technical Sciences. 2020; №4: pp.440-449.
19. Usmanov E.G., Khusanov B.M. Device for Automatic Change of the Transformation Ratio in 6–10/0.4 kV Transformers // Problems of Energy and Resource Saving. Tashkent. 2021; Special Issue; pp.115-118.
20. Rakhimov O.S., Mirzoev D.N., Grachieva E.I. Experimental study of quality and electricity losses in low voltage rural electric networks. Power engineering: research, equipment, technology. 2021; №23(3): pp.209-222. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2021-23-3-209-222>
21. Krotенок V.V., Bokhan A.N. Experimental Study of the Dynamic Characteristics of Nonlinear Surge Arresters // Bulletin of GSTU named after P.O.Sukhoi. 2023; №2: pp.67-78.

22. Experimental study of non-contact switching devices controlled based on nonlinear resistive elements / E. G. Usmanov, M. K. Bobozhanov, R. Ch. Karimov [et al.] // *Elektrichestvo*. – 2025. – No. 11. – Pp. 57-66. – DOI 10.24160/0013-5380-2025-11-57-66.

Authors of the publication:

Maksud K. Bobojanov – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan.

Eldor G. Usmanov – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan.

Rakhmatillo C. Karimov – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan.

Oksana S. Popkova – Kazan State Power Engineering University, Kazan, Russia.

Dilmurod S Xushvaktov – Tashkent State Technical University named after Islam Karimov, Tashkent, Uzbekistan.

Шифр научной специальности: 2.2.8. Методы и приборы контроля и диагностики материалов, изделий, веществ и природной среды

Получено ***09.01.2026 г.***

Отредактировано ***13.02.2026 г.***

Принято ***27.02.2026 г.***