

На правах рукописи



**НГО ДЫК ТУАН**

**ЦИФРОВОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ  
УСТРОЙСТВ КОММУТАЦИИ СИСТЕМ УПРАВЛЕНИЯ В  
ЭНЕРГЕТИКЕ**

2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы  
(технические науки)

**АВТОРЕФЕРАТ**

диссертация на соискание ученой степени  
кандидата технических наук

Волгоград – 2025

Работа выполнена на кафедре «Электротехника» в федеральном государственном бюджетном образовательном учреждении высшего образования «Волгоградский государственный технический университет».

**Научный руководитель** доктор технических наук, профессор,  
**Шилин Александр Николаевич.**

**Официальные оппоненты:** **Калашников Александр Александрович,**  
доктор технических наук,  
Акционерное общество «Русатом  
автоматизированные системы управления»  
(АО «РАСУ»), отдел научных исследований и  
опытно-конструкторских работ, начальник.

**Стрижиченко Александр Васильевич,**  
кандидат технических наук,  
филиал ФГБОУ ВО «Национальный  
исследовательский университет «МЭИ» в г.  
Волжском, кафедра «Энергетика», доцент.

**Ведущая организация** ФГБОУ ВО «Саратовский государственный  
технический университет имени Гагарина  
Ю.А.», г. Саратов.

Защита состоится «27» февраля 2026 г. в 15.00 часов на заседании  
диссертационного совета 24.2.282.03, созданного на базе ФГБОУ ВО  
«Волгоградский государственный технический университет» по адресу:  
400005, г. Волгоград, пр. им. В.И. Ленина, 28, ауд. 209.

С диссертацией можно ознакомиться в научной библиотеке ФГБОУ ВО  
Волгоградского государственного технического университета и на  
официальном сайте [www.vstu.ru](http://www.vstu.ru) по ссылке  
<http://www.vstu.ru/upload/iblock/bec/bec3a51d9e204fcdb3899750b26c2160.pdf>.

Автореферат разослан «\_\_\_» \_\_\_\_\_ 2026 г.

Ученый секретарь  
диссертационного совета



Завьялов Дмитрий Викторович

## ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА РАБОТЫ

**Актуальность темы.** В настоящее время в электротехнике и электроэнергетике в качестве элементов коммутации широко используются электромагнитные реле, которые обладают идеальными характеристиками, а именно в замкнутых и разомкнутых состояниях (контактные сопротивления равны нулю или бесконечности) в сравнении с полупроводниковыми элементами. Кроме того, в некоторых областях техники в целях безопасности не рекомендовано использовать полупроводниковые элементы. Однако эти электромагнитные устройства обладают и недостатками: невысокое быстродействие из-за механических элементов, нелинейная вольтамперная характеристика электрической цепи и сложность коррекции этой характеристикой для повышения быстродействия. В различных областях науки и техники для линеаризации характеристики устройств используется аппроксимация нелинейных участков линейными участками, что позволяет использовать аналитические методы анализа и расчета. Эти операции и могут иметь большую погрешность аппроксимации, которую сложно оценить. В тоже время в связи с широким внедрением в инженерную практику компьютеров многие сложные задачи решаются численными методами и с высокой точностью. В настоящее время в электроэнергетике внедряются интеллектуальные сети (*Smart Grid*). Интеллектуальные сети это комплекс технических средств, которые в автоматическом режиме выявляют наиболее слабые и аварийно опасные участки сети, а затем изменяют характеристики и схему сети с целью предотвращения аварии и снижения потерь. Поэтому интеллектуальная сеть должна обладать функциями самодиагностики и самовосстановления и включать в свой состав передовые сенсорные, коммуникационные и управляющие технологии для повышения эффективности передачи и распределения энергии. Очевидно, что коммутационные устройства должны управляться цифровыми системами, и поэтому для эффективного управления коммутационными процессами необходим цифровой двойник устройств коммутации. Из этого следует, что при проектировании и эксплуатации электроустановок и систем, а также для решения целого ряда различных технических вопросов, анализ динамических

процессов в устройствах коммутации электрических сетей имеет важнейшее значение. С внедрением в электроэнергетику цифровых технологий и интеллектуальных электрических систем (*Smart Grid*) возникает задача цифрового моделирования всех элементов энергетической системы. Решение этой задачи позволит привести их модели к единой цифровой форме. Таким образом, необходимость цифрового моделирования коммутационных электромагнитных устройств систем управления цифровой энергетикой с анализом их динамических характеристик в электроэнергетике является актуальной научно-технической задачей.

**Степень разработанности темы исследования.** Одним из направлений устройств коммутации являются устройства релейной защиты и автоматики (РЗА) и процесс их развития включал несколько этапов, одним из которых стал переход от электромеханических реле к цифровым, содержащим микропроцессоры. Основные характеристики микропроцессорных защит существенно превосходят характеристики электромеханических защит.

В развитие данной отрасли науки и техники внесли неоценимый вклад Российские и зарубежные учёные, которые, как: Я. З. Цыпкин, Л. Т. Кузин, Э. И. Джури, Б. Куо, К. Острем, В. П. Шипилло, А. Н. Шилин, Я. С. Гельфанда, Н. А. Дони, А. С. Засыпкина, А. Н. Кожина, В. Н. Козлова, С. Л. Кужекова, Ю. С. Кузника, А. Л. Куликова, Ю. Я. Лямеца, И. Ф. Маруды, В. И. Нагая, К. И. Никитина, Г. С. Нудельмана, А. О. Павлова, Joseph Henry, Samuel Morse, Reinhold Rudenberg, Robert G. Olsen, Tapani O. Seppa, Vincent T. Morgan, Viktor Lovrenčić и др.

**Объектом исследования** являются электромагнитные устройства и система релейной защиты в электроэнергетике.

**Предметом исследования** являются методы анализа динамических процессов в электромагнитных устройствах и системах релейной защиты в электроэнергетике.

**Целью работы** является разработка методик цифрового моделирования динамических процессов систем коммутации и выбора корректирующих

элементов для повышения быстродействия систем коммутации в электроэнергетике.

**Задачи исследования:**

1. Провести анализ существующих электромагнитных контактных устройств коммутации, используемых в электроэнергетике и проблем исследования их динамических характеристик;

2. Провести анализ методов моделирования динамических характеристик нелинейных электромагнитных контактных устройств, учитывающих зависимость параметров модели от величины и среды зазора в магнитной цепи устройства;

3. Разработать методику и алгоритм анализа переходных процессов при коммутации с учетом обратной связи величины воздушного зазора на индуктивность цепи устройства;

4. Разработать методику исследования влияние параметров электрической цепи реле на динамические процессы устройств коммутации и методику выбора схемы коррекции переходных процессов;

5. Разработать методику и алгоритм цифрового моделирования динамических характеристик электромагнитных контактных устройств коммутации с помощью z-преобразования, которое позволяет сравнительно просто осуществлять переход от моделей к устройствам;

6. Определить z-преобразования всех основных элементов системы электроснабжения, что позволит описать все элементы энергетической системы на едином преобразовании.

**Методы и средства исследований.** При выполнении исследований и поставленных задач применялись методы математического анализа, теоретических основ электротехники, теории автоматического управления, аппарата z-преобразования, теории вероятности и математической статистики, теории электрических цепей, теории погрешностей, а также методы имитационного моделирования на ЭВМ с использованием пакетов математических программ.

**Достоверность результатов исследования** основана на корректных теоретических построениях и строгих математических выводах, также подтверждена исследованиями, полученными в результате лабораторных и компьютерных экспериментов, и что применяемые в работе допущения не противоречат физики рассматриваемых процессов.

**Научная новизна диссертационной работы.**

1. Разработаны методика и алгоритм численного анализа переходных процессов тока в цепи электромагнитного реле при коммутации с учетом обратной связи величины воздушного зазора на индуктивность цепи устройства, позволяющие проводить анализ влияния конструктивных факторов на качество переходного процесса.

2. Разработана методика коррекции переходных процессов тока в цепи электромагнитного реле с помощью электрических корректирующих цепей в цепи реле, позволяющая выбирать наиболее оптимальную форму переходного процесса, а также повышать быстродействие реле.

3. Разработаны методика и алгоритм цифрового моделирования динамических характеристик электромагнитных контактных устройств коммутации на основе аппарата z-преобразования с помощью операторных схем замещения, которые позволяют сравнительно просто без вычислений осуществлять переход от операторных схем к техническим устройствам.

**Теоретическая и практическая значимость работы.**

1. Получены методики и алгоритмы численного анализа динамических процессов в нелинейных устройствах, основанных на использовании операторных схем замещения, которые могут быть использованы для решения подобных задач в других областях техники.

2. Разработана методика цифрового моделирования динамических процессов в нелинейных устройствах, основанная на использовании аппарата z-преобразования с помощью операторных схем замещения, которая может быть использована при внедрении цифровых технологий в энергетике.

3. Разработаны функциональные и принципиальные схемы электромагнитных реле с коррекциями характера переходного тока в реле для увеличения их быстродействия.

4. Разработаны пакеты программ для моделирования динамических характеристик в электромагнитных реле, которые позволяют повысить производительность исследований влияния различных факторов на качество переходных процессов.

5. Разработаны цифровые динамические модели основных элементов энергетических сетей, основанные на использовании аппарата z-преобразования, описать все элементы энергетической системы на едином алгоритмическом языке.

#### **Основные положения и результаты, выносимые на защиту:**

1. Анализ существующих электромагнитных контактных устройств коммутации, используемых в электроэнергетике и проблем исследования их динамических характеристик.

2. Методики и алгоритмы численного анализа переходных процессов при коммутации с учетом обратной связи величины воздушного зазора на индуктивность цепи устройства, на основе использования операторных схем замещения.

3. Методика коррекции переходных процессов тока в цепи с помощью электрических корректирующих цепей в цепи реле, позволяющая выбирать наиболее оптимальную форму переходного процесса, а также повышать быстродействие реле.

**Соответствие паспорту специальности.** Указанная диссертационная работа была исследована в соответствии с паспортом специальности 2.2.11. Информационно-измерительные и управляющие системы, а именно: по пункту 1 «Научное обоснование перспективных информационно-измерительных и управляющих систем, систем их контроля, испытаний и метрологического обеспечения, повышения эффективности существующих систем» и пункту 2 «Исследование возможностей и путей совершенствования существующих и создания новых элементов структуры

и образцов информационно-измерительных и управляющих систем, улучшение их технических, эксплуатационных, экономических и эргономических характеристик, разработка новых принципов построения и технических решений».

**Внедрение результатов работы.** Научные результаты диссертационной работы внедрены на предприятиях Вьетнама: электронной компании «ХИЕУ ТХАО»; и компании «MP TECH VINA».

**Апробация работы.** Основные научные результаты диссертации были доложены автором на следующих научно-технических конференциях: XV Международная научная конференция «Прикладная оптика – 2022» (г. Санкт-Петербург, 15-16 декабря 2022 г.); XVI Всероссийская научно-практическая студенческая конференция «России – творческую молодёжь» (г. Камышин, 19-20 апреля 2023 г.); Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики. Всероссийская школа молодых ученых (г. Севастополь, 29-30 мая 2024 г.); Всероссийская научно-практическая молодежная конференция «Студенческая научная весна – 2025» (г. Волгодонск, 14-18 апреля 2025 г.)

**Личный вклад автора.** Автор принимал непосредственное и основное участие в разработке методик и алгоритмов численного анализа переходных процессов тока в цепи электромагнитного реле при коммутации с учетом обратной связи величины воздушного зазора на индуктивность цепи устройства и методик коррекции переходных процессов тока в цепи электромагнитного реле с помощью электрических корректирующих цепей в цепи реле, а также в разработке пакета программ.

**Публикации.** По основным результатам диссертационной работы опубликованы 12 работы, в том числе 5 статей в российских научных журналах по списку ВАК РФ, 1 статья в зарубежных научных изданиях, индексируемых в наукометрической базе данных Scopus, получены 2 свидетельства о государственной регистрации программы для ЭВМ.

**Структура и объем диссертации.** Диссертация состоит из введения, четырёх глав, заключения, списка литературы и приложения. Работа



изложена на 146 страницах основного текста, содержит 65 рисунков, 12 таблиц, 99 формул и 139 библиографических наименований.

## СОДЕРЖАНИЕ РАБОТЫ

**Во введении** обоснована актуальность работы, выявлены проблемы, определены цель и задачи исследования, сформулированы положения, выносимые на защиту.

**В первой главе** диссертации был проведен анализ существующих устройств коммутации в системах управления энергетическими объектами и системами, выявлены проблемы их проектирования и эксплуатации, сформулированы задачи исследований.

**Во второй главе** рассмотрены методы цифрового моделирования. При цифровом моделировании непрерывных звеньев систем целесообразно использовать  $z$ -преобразование, основанного на применении метода  $z$ -форм. Преобразование аналоговой операторной модели системы в дискретную форму выполняется с помощью уравнения перехода  $z = e^{pT} \approx 1 + pT$ . Метод  $z$ -форм основан на приближенной замене связи между операторами  $p$  и  $z$  первыми членами степенного ряда Тейлора для функции  $z = e^{pT}$ .

$$\begin{aligned} z &= e^{pT} \approx 1 + pT && \text{(прямая разность, или метод Эйлера),} \\ z &= e^{pT} \approx 1/(1 - pT) && \text{(обратная разность),} \\ z &= e^{pT} \approx \frac{1+pT/2}{1-pT/2} && \text{(метод трапеций, или метод Тустена).} \end{aligned} \quad (1)$$

Из эти выражений следуют формулы перехода:

$$p = \frac{z-1}{T}; \quad p = \frac{z-1}{zT}; \quad p = \frac{2}{T} \left( \frac{z-1}{z+1} \right). \quad (2)$$

Математический аппарат теории  $z$ -преобразования включает в себя анализ в области  $z$ -изображений и обратный переход к временным функциям посредством теоремы обращения. Важнейшим свойством  $z$ -преобразования является способность нахождения оригинала функции способом, не использующим вычисления полюсов функции изображения.

Например, если известна импульсная передаточная функция устройства

$$W(z) = \frac{F_{\text{ВЫХ}}(z)}{F_{\text{ВХ}}(z)} = \frac{a_0 + a_1 z^{-1} + a_2 z^{-2} + \dots + a_m z^{-m}}{1 + b_1 z^{-1} + b_2 z^{-2} + \dots + b_h z^{-h}}, \quad (3)$$

где  $m, h$  – максимальные степени полиномов числителя и знаменателя передаточной функции соответственно, то для нахождения отклика  $f_{\text{ВЫХ}}[n]$  на входное воздействие  $f_{\text{ВХ}}[n - k]$  в тактовые моменты времени может быть использовано разностное уравнение

$$f_{\text{ВЫХ}}[n] = \sum_{k=0}^m a_k f_{\text{ВХ}}[n - k] - \sum_{k=1}^h b_k f_{\text{ВЫХ}}[n - k]. \quad (4)$$

коэффициенты  $a_k, b_k$  разностного уравнения определяются непосредственно по уравнению без дополнительных вычислительных операций.

Так же сравнительно просто по диаграмме состояния определяется структурная блок-схема устройства.

**В третьей главе** рассмотрено моделирование электромагнитных реле с расчётом динамических характеристик. Для анализа переходных процессов тока в реле рассмотрено моделирование электромеханических процессов электромагнитного реле постоянного тока с конструкцией, представленной на рисунке 1.

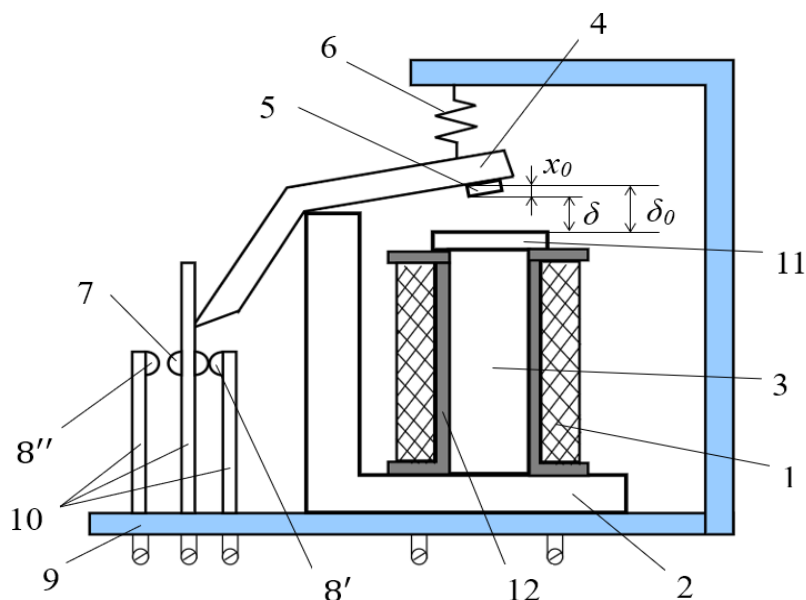


Рисунок 1. Конструкция электромагнитных реле постоянного тока

1 – обмотка; 2 – ярмо; 3 – сердечник; 4 – якорь; 5 – штифт отлипания (немагнитная прокладка); 6 – возвратная пружина; 7 – подвижные контакты; 8 – неподвижные контакты; 9 – общее изоляционное основание; 10 – плоская пружина; 11 – полюсный наконечник; 12 – каркас.

Индуктивность обмотки  $L$  определяется отношением потокоцепления  $\Phi$  к силе тока  $I$ :

$$L = \frac{w\Phi}{I} \quad (5)$$

где  $\Phi$  – магнитный поток сердечника, Вб;  $w$  – число витков.

Принимаем, что весь магнитный поток проходит через воздушный зазор, т.е. потоки рассеяния отсутствуют. Тогда

$$\Phi = \frac{Iw}{R_M} \quad (6)$$

где  $R_M$  – сопротивление магнитопровода, Гн<sup>-1</sup>. Это сопротивление включает в себя сопротивления стали сердечника и якоря  $R_{ст}$ , и воздушного зазора  $R_B$ :

$$R_M = R_{ст} + R_B; \quad R_B = \frac{\delta}{\mu_0 S} \quad (7)$$

где  $\delta$  – величина воздушного зазора;  $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Гн/м – магнитная постоянная;  $S = \frac{\pi D^2}{4}$  – поперечное сечение магнитопровода м<sup>2</sup>;  $D$  – диаметр обмотки.

В большинстве конструкций магнитное сопротивление воздушного зазора значительно больше магнитного сопротивления стального сердечника, т. е.  $R_B \gg R_{ст}$ . Если пренебречь проводимостью для потока рассеяния и сопротивлением в стали, то выражение индуктивности имеет следующий вид:

$$L = \frac{w^2}{R_M} \approx \frac{w^2}{R_B} = \frac{w^2 \mu_0 S}{\delta} \quad (8)$$

Электромагнитная сила тяги определяется по формуле

$$F_{\text{э}} = \frac{\mu_0 (Iw)^2 S}{2\delta^2} \quad (9)$$

Противодействующая сила пружины определяется по формуле

$$F_M = \frac{GJ}{2\pi r_n^3} (\delta - x) + F_{\text{нач}} \quad (10)$$

где  $G$  – модуль упругости при сдвиге;  $J$  – момент инерции при кручении;  $r$  – радиус витка пружины;  $n$  – число витков;  $F_{\text{нач}}$  – сила предварительного натяга пружины;  $x$  – перемещение пружины в точке приложения силы.

Противодействующая сила пружины определяется формулой:

$$F_M = F_{\text{нач}} + M(\delta_0 - \delta_j) \quad (11)$$

где  $M = \frac{GJ}{2\pi r n^3}$ ;  $\delta_j$  – значение воздушного зазора в момент времени  $t_j$ .

Ускорение движения якоря определяется суммарной силой, которая притягивает якорь:

$$F_j = F_{\text{э}j} + F_{Mj} = m a_j \quad (12)$$

где  $m$  – масса якоря;  $a_j$  – ускорение движения якоря в момент времени  $t_j$ .

С учетом направления действия сил (сила  $F_M$  всегда направлена по положительному направлению оси абсциссы  $Ox$ , а сила  $F_{\text{э}}$  – по отрицательному), то при проекции на оси  $Ox$  получена формула суммарной силы в скалярной форме (рисунок 2):

$$F_j = F_{Mj} - F_{\text{э}j} = m a_j \quad (13)$$

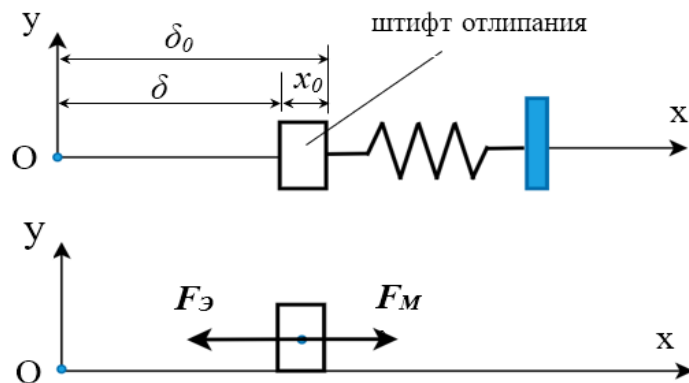


Рисунок 2. Электромагнитная и противодействующая сила при проекции на оси  $Ox$

Из выше проведенных расчетов может быть получена функциональная зависимость величины воздушного зазора от времени по формуле

$$\delta_{j+1} = \delta_j + a_j \frac{\Delta t^2}{2} \quad (14)$$

Для рассмотрения переходных процессов и расчета быстродействия реле, цепь обмотки электромагнитного реле постоянного тока можно

представить в виде схемы замещения с последовательным соединением элементов реле  $R$  и  $L$ , и дополнительных элементов  $R_1$  и  $C$  (рисунок 3). Расчет схемы выполнялся операторным методом

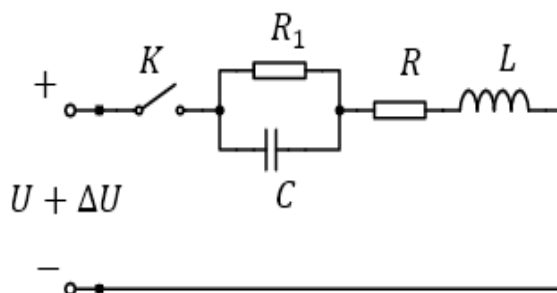


Рисунок 3. Схема замещения реле с дополнительными элементами  $R_1$  и  $C$

Для расчета значений тока написана компьютерная программа, блок-схема расчета которой представлена на рисунке 4.

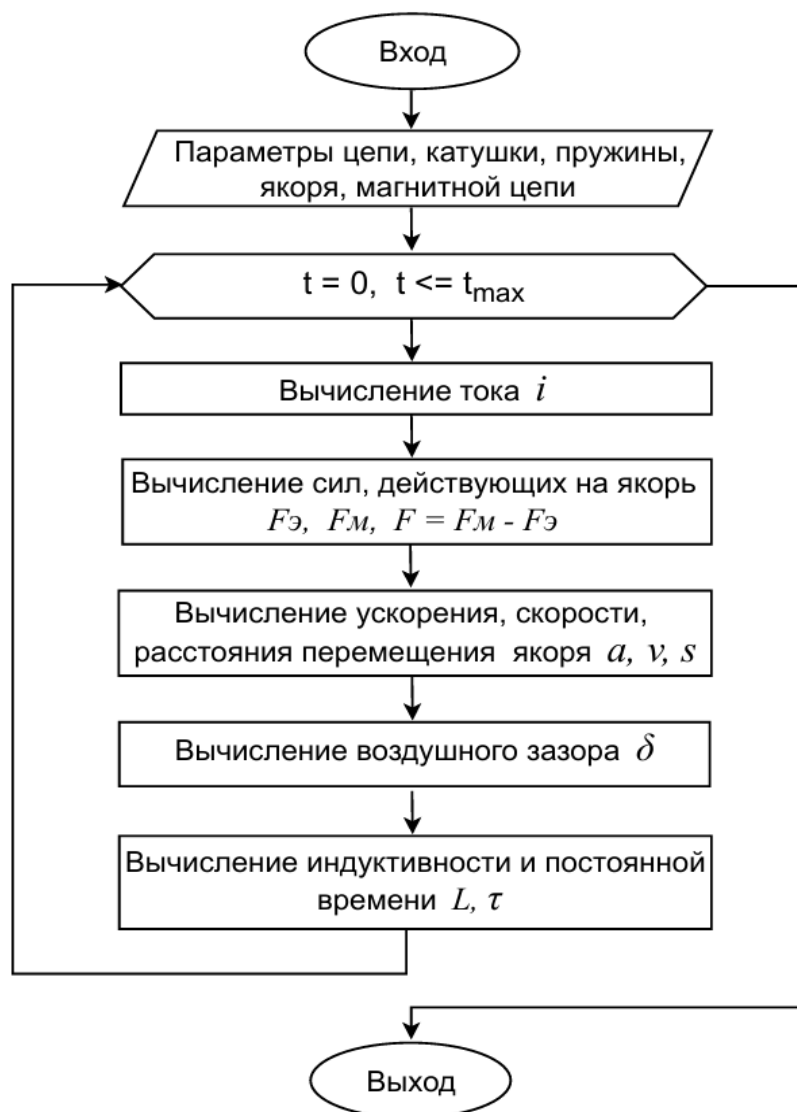


Рисунок 4. Блок-схема программы расчета параметров и переходного процесса тока в реле

*Результаты исследования.* Получены графики переходных процессов и параметры переходных процессов реле с различными цепями коррекции.

В качестве объекта для исследования использовали следующие параметры:  $U = 30$  В,  $\Delta U = 5,1$  В,  $R = 3000$  Ом,  $R_1 = 510$  Ом,  $C = 4,60211 \cdot 10^{-4}$  Ф,  $D = 3 \cdot 10^{-2}$  м,  $w = 11500$  вит,  $\delta_0 = 1,0 \cdot 10^{-3}$  м,  $\delta_k = 0,5 \cdot 10^{-3}$  м,  $m = 2 \cdot 10^{-3}$  кг,  $F_{\text{нач}} = 4$  Н,  $M = \frac{GJ}{2\pi r_n^3} = 4 \cdot 10^3$ .

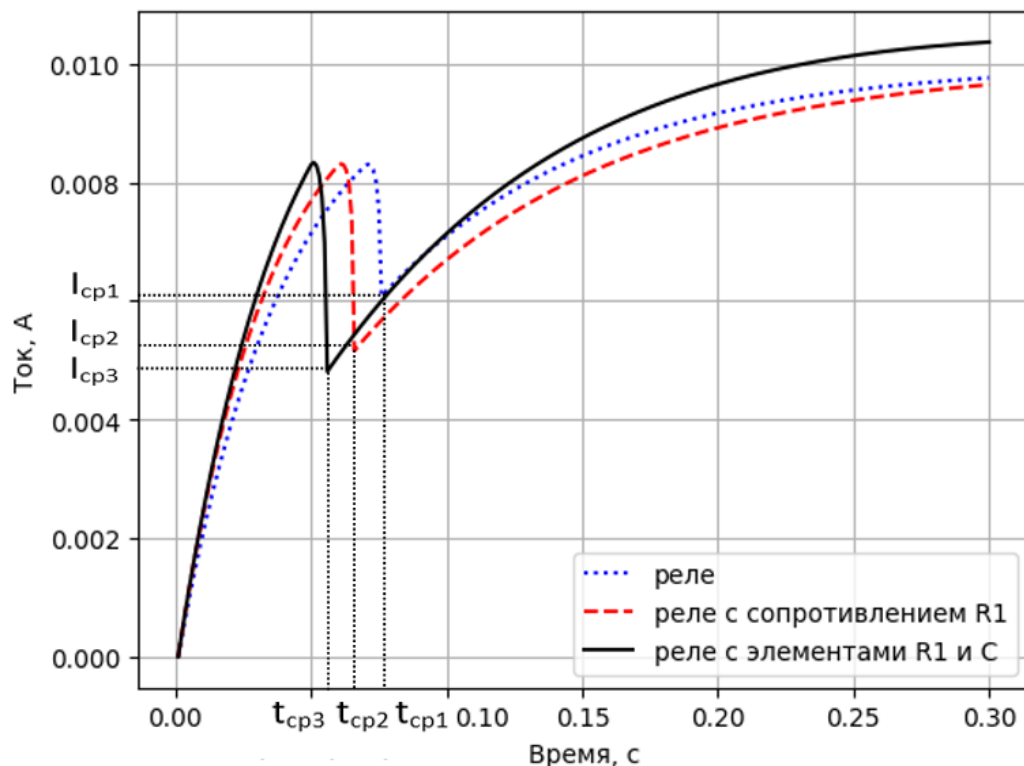


Рисунок 5. Зависимость тока реле от времени

С помощью компьютерной программы получены графики переходных процессов (рисунок 5) и параметры переходных процессов реле с различными цепями коррекции (таблица 1).

Таблица 1. Параметры переходных процессов реле

Электрическая схема	$t_{\text{тр}}, \text{с}$	$I_{\text{тр}}, \text{А}$	$t_{\text{ср}}, \text{с}$	$I_{\text{ср}}, \text{А}$	$t_{\text{дв}}, \text{с}$
Реле	0,070	0,008304	0,075	0,006082	0,005
Реле с сопротивлением $R_1$	0,060	0,008312	0,065	0,005165	0,005
Реле с элементами $R_1$ и $C$	0,051	0,008334	0,056	0,004811	0,005

В четвертой главе рассмотрена методика цифрового моделирования в реле. При разработке методики цифрового моделирования была предварительно решена задача моделирования динамического процесса тока в электромагнитных реле операторным методом с учетом обратной связи величины воздушного зазора с индуктивностью электрической цепи. Цифровом моделировании цифровые модели обычно разрабатываются по аналоговым моделям. Основой цифрового моделирования является z-преобразования, для перехода от операторной модели с p-переменной к цифровой модели с z-переменной использована формула перехода методом прямой разности  $p = \frac{z-1}{T}$ , где  $T$  – период дискретизации. Период дискретизации определяется по теореме Котельникова. Для расчета переходного процесса в реле была разработана компьютерная программа на языке программирования Python, блок-схема расчета которой представлена на рисунке 6.

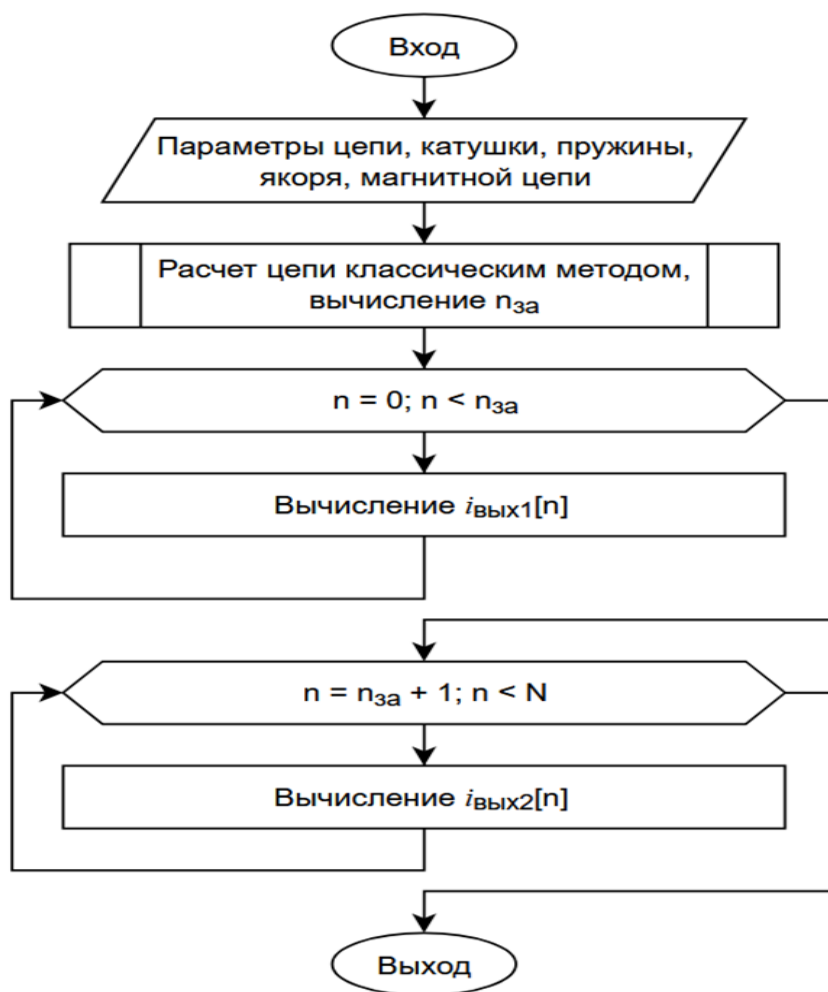


Рисунок 6. Блок-схема компьютерной программы расчета переходного процесса в реле

Динамические процессы в электромагнитных реле, полученные с помощью классических и цифровых методов, показаны на рисунке 7.

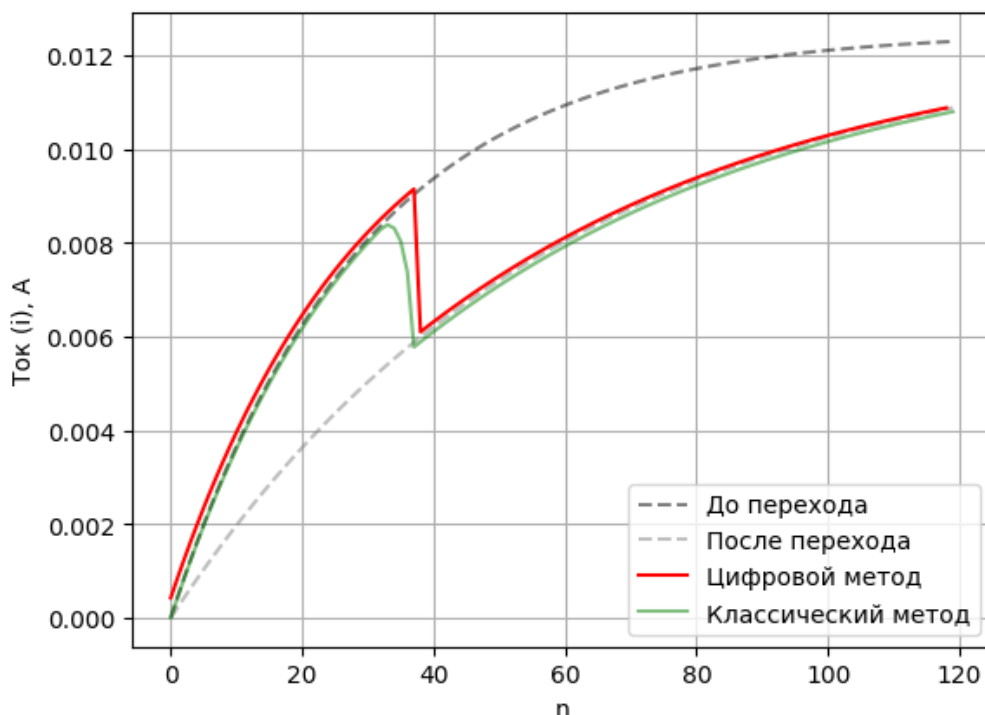


Рисунок 7. Переходные функции тока в реле, полученные разными методами

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. На основе проведенного анализа существующих устройств коммутации в системах управления, защиты и автоматизации электроэнергетики следует, что электромагнитные контактные устройства широко используются в системах и имеют ряд существенных преимуществ перед полупроводниковыми бесконтактными устройствами. Однако характеристиками электромагнитных контактных устройств управлять довольно сложно. Поэтому из проведенного анализа сформулирована задача исследования — моделирование коммутационных электромагнитных устройств с анализом их динамических характеристик.

2. Из анализа методов моделирования динамических процессов выявлено, что для цифрового моделирования целесообразно использовать аппарат z-преобразования, который позволяет решать большой круг задач, а именно моделировать линейные и нелинейные системы, системы с распределенными параметрами, параметрические и стохастические системы,



кроме того, позволяет сравнительно просто получать из выражения передаточной функции структурную блок-схему цифрового устройства.

3. Разработана методика численного моделирования переходных характеристик тока в электромагнитных реле при коммутации. На основе предложенной методики получены математические модели переходных процессов, и функциональные зависимости величины перемещения якоря реле от тока и значения индуктивности от величины воздушного зазора, а также разработан алгоритм моделирования с обратной связью по параметру цепи – индуктивности с величиной воздушного зазора.

4. Разработанная на основе алгоритма обратной связи по параметру цепи компьютерная программа позволяет исследовать динамические характеристики электромагнитных реле с учетом параметров основных элементов реле и среды зазора и может быть эффективно использована в электроэнергетической отрасли для проектирования и исследования выключателей и переключателей в системах управления электроэнергетики.

5. Предложена методика регулирования характера переходного процесса, в том числе и для повышения скорости срабатывания реле за счет включения в цепь дополнительных элементов электрической цепи, а для решения сложных задач выбора цепей коррекции могут быть использованы методы синтеза корректирующих цепей из теории автоматического управления.

6. Разработана с помощью метода z-преобразования цифровая модель схемы энергетической системы, содержащей последовательное соединение энергетического оборудования (синхронный генератор, трансформатор, линия электропередачи и синхронный двигатель), позволяющая определить форму сигнала на входе релейного устройства, обусловленную искажениями участка электрической системы от аварии до реле.

7. Получены оценки погрешностей моделирования линий с распределенными параметрами при использовании упрощенных моделей путем сравнения с результатами точных численных решений, что позволяет обоснованно выбирать параметры моделей.

8. На основании методики цифрового моделирования был предложен структурный метод анализа быстродействия цифрового фильтра, позволяющий повышать быстродействие обработки сигнала, а для количественного исследования разработана программа *Proteus*.

9. Разработана методика цифрового моделирования электромагнитных реле, использующая z-преобразование, которое учитывает внутреннюю обратную связь влияние величины зазора на индуктивность и использует сравнительно простой рекурсивный алгоритм вычисления переходной функции.

## **СПИСОК РАБОТ, ОПУБЛИКОВАННЫХ ПО ТЕМЕ ДИССЕРТАЦИИ**

### **Статьи в журналах из перечня ВАК РФ**

1. Кузнецова, Над.С. Цифровое моделирование динамических процессов в системах релейной защиты / Над.С. Кузнецова, Д.Т. Нго, Ч.З. Нгуен // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. - 2024. – № 1 (46). – С. 33-37.

2. Шилин, А.Н. Цифровое моделирование динамических процессов в линиях с распределенными параметрами / А.Н. Шилин, Д.Т. Нго, Над.С. Кузнецова // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2024. - № 2 (47). – С. 18-30. - DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-18-30.

3. Шилин, А.Н. Структурный метод повышения быстродействия цифровых фильтров / А.Н. Шилин, Д.Т. Нго, Над.С. Кузнецова // Энерго- и ресурсосбережение: промышленность и транспорт. – 2024. - № 2 (47). – С. 6-12. – DOI: 10.35211/2500-0586-2024-2-47-6-12.

4. Шилин, А.Н. Моделирование динамических процессов в электромагнитных реле / А.Н. Шилин, Д.Т. Нго, М.С. Сергейко // Контроль. Диагностика. – 2025. – Т. 28, № 8. – С. 55-61. – DOI: 10.14489/td.2025.08.pp.055-061.

5. Шилин, А.Н. Цифровое моделирование динамических процессов в электромагнитных реле в системах управления / А.Н. Шилин, А.А. Шилин,

Д.Т. Нго, М.С. Сергейко // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2025. – № 11. – С. 39-47. – DOI 10.25791/asu.11.2025.1625.

### **Публикации в изданиях, индексируемых МБД Scopus**

6. Improvement of the Accuracy of Transient Process Analysis in Complex Power Systems Using the Z-Transform Method / A. N. Shilin, A. A. Shilin, P. V. Dikarev, D. T. Ngo // Problems of the Regional Energetics. – 2025. – № 4 (68). – P. 118-130. – DOI: <https://doi.org/10.52254/1857-0070.2025.4-68.09>.

### **Публикации в других изданиях:**

7. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025618315 от 3 апреля 2025 г. Российская Федерация. Моделирование динамических процессов в электромагнитном реле / А.Н. Шилин, Д.Т. Нго, М.С. Сергейко; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2025.

8. Свид. о гос. регистрации программы для ЭВМ № 2025666206 от 24 июня 2025 г. Российская Федерация. Моделирование динамических процессов в электромагнитном реле / А.Н. Шилин, А.А. Шилин, Д.Т. Нго, М.С. Сергейко; ФГБОУ ВО ВолгГТУ. – 2025.

9. Шилин, А.Н. Повышение быстродействия цифровых фильтров структурным методом в оптико-электронных приборах / А.Н. Шилин, Д.Т. Нго // Прикладная оптика – 2022 : сб. тез. XV Междунар. науч. конф. (г. Санкт-Петербург, 15-16 декабря 2022 г.) / НПО «Гос. оптический институт им. С. И. Вавилова», Оптическое общество им. Д. С. Рождественского, Институт физиологии им. И. П. Павлова РАН [и др.]. – Санкт-Петербург, 2023. – С. 195-196.

10. Нго, Д.Т. Исследование структурного метода увеличения быстродействия цифровых регуляторов в электроэнергетических оборудованях / Д.Т. Нго, А.Н. Шилин // России – творческую молодежь : материалы XVI Всерос. науч.-практ. студ. конф. (г. Камышин, 19-20 апреля 2023 г.). В 4 т. Т. 3 / под общ. ред. И. В. Степанченко ; ВолгГТУ, КТИ (филиал) ВолгГТУ. – Волгоград, 2023. – С. 114-117.

11. Шилин, А.Н. Методика цифровой модернизации электроэнергетических систем / А.Н. Шилин, Над.С. Кузнецова, Д.Т. Нго // Цифровизация, декарбонизация и децентрализация современной электроэнергетики. Всероссийская школа молодых ученых (г. Севастополь, 29-30 мая 2024 г.) : сб. науч. тр. / редкол.: П. В. Илюшин (гл. ред.) [и др.] ; ФГАОУ ВО «Севастопольский гос. университет». – Севастополь, 2024. – С. 130-137.

12. Сергейко, М.С. Исследование динамических характеристик электромагнитных реле / М.С. Сергейко, Д.Т. Нго // Студенческая научная весна - 2025 : сб. тез. Всерос. науч.-практ. молодежн. конф. (г. Волгодонск, 14-18 апреля 2025 г.) / Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ», Волгодонский инженерно-технический институт НИЯУ МИФИ. - Москва ; Волгодонск, 2025. – С. 192-194. – URL: [https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/sbornik\\_tezisov\\_snv-2025\\_2\\_2.pdf](https://viti-mephi.ru/sites/default/files/pages/docs/sbornik_tezisov_snv-2025_2_2.pdf).

Подписано в печать \_\_\_\_\_. 2026 г. Заказ № \_\_\_\_\_. Тираж \_\_\_\_ экз. Печ. л. 1,0  
Формат 60 × 84 1/16. Бумага офсетная. Печать трафаретная.

Отпечатано в типографии издательства ВолгГТУ  
400005, г. Волгоград, проспект им. В.И. Ленина, 28, корпус № 7