

Электротехнические комплексы и системы

Научная статья

Статья в открытом доступе

УДК 621.311.001.57

doi: 10.30987/2658-6436-2025-3-80-88

МОДЕЛИРОВАНИЕ АНОМАЛЬНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ ЭЛЕКТРОСЕТИ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Александр Николаевич Баранов¹, Игорь Дмитриевич Мурашкин²✉

^{1,2} Донбасский государственный технический университет, г. Алчевск, Россия

¹ to_anb@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7111-9256>

² ols5566@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7205-0182>

Аннотация. Целью исследования являлся анализ аномальных и аварийных режимов работы электросети силовых трансформаторов с использованием имитационной модели. Для реализации поставленной цели был проведен аналитический обзор токовых релейных защит силовых трансформаторов. Разработана имитационная модель электросети силового трансформатора в программной среде MATLAB/Simulink. Модель позволяет имитировать рабочий, аномальные и аварийные режимы работы электросети силового трансформатора. Для электросети силового трансформатора проведены расчеты тока короткого замыкания и параметров срабатывания токовых релейных защит. Разработана имитационная модель релейной защиты и автоматики силового трансформатора, которая позволяет анализировать поведение токовых релейных защит при аномальных и аварийных режимах работы. Разработана методика анализа аномальных и аварийных режимов работы электросети силовых трансформаторов. Выполнены имитационные эксперименты по моделированию рабочего режима электросети силового трансформатора, а также аномальных и аварийных режимов работы, при которых срабатывает токовая отсечка, максимально-токовая защита и защита от замыкания на землю. Результатом экспериментов стали осциллограммы токов в электросети для каждого режима работы. При анализе полученных результатов установлено, что разработанная имитационная модель позволяет моделировать аномальные и аварийные режимы работы электросети силового трансформатора, адекватно отражает алгоритмы работы его токовых релейных защит и может быть использована при эксплуатации электросетей и подготовке энерготехнического персонала.

Ключевые слова: моделирование электросети, силовой трансформатор, аномальные и аварийные режимы, релейная защита и автоматика, имитационная модель

Для цитирования: Баранов А.Н., Мурашкин И.Д. Моделирование аномальных и аварийных режимов работы электросети силовых трансформаторов // Автоматизация и моделирование в проектировании и управлении. 2025. №3 (29). С. 80-88. doi: 10.30987/2658-6436-2025-3-80-88.

Original article

Open Access Article

SIMULATING ABNORMAL AND EMERGENCY OPERATING MODES OF POWER TRANSFORMER ELECTRICAL NETWORKS

Alexander N. Baranov¹, Igor D. Murashkin²✉

^{1,2} Donbass State Technical University, Alchevsk, Russia

¹ to_anb@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7111-9256>

² ols5566@mail.ru, <https://orcid.org/0009-0009-7205-0182>

Abstract. The aim of the study is to analyse abnormal and emergency operating modes of power transformer electrical networks using a simulation model. To achieve this aim, the authors conduct an analytical review of current

relay protections for power transformers; develop a simulation model of the power transformer electrical network in the MATLAB/Simulink software environment. The model allows simulating the normal, abnormal, and emergency operating modes of the power transformer electrical network. The paper performs calculations of short-circuit currents and parameters of current relay protection operation for the power transformer electrical network; develops a simulation model of the power transformer relay protection and automation, which allows analysing the behaviour of current relay protections under abnormal and emergency operating conditions. The work carries out a methodology for analysing abnormal and emergency operating modes of power transformer electrical networks; fulfils simulation experiments to model the normal operating mode of the power transformer electrical network, as well as abnormal and emergency operating modes, during which the current cutoff, maximum current protection, and ground fault protection are activated. The result of the experiments are oscillograms of currents in the electrical network for each operating mode. The analysis of the obtained results shows that the developed simulation model allows modelling abnormal and emergency operating modes of the power transformer electrical network, adequately reflects the algorithms of its current relay protections, and can be used in operating electrical networks and training energy personnel.

Keywords: electrical network simulation, power transformer, abnormal and emergency modes, relay protection and automation, simulation model

For citation: Baranov A.N., Murashkin I.D. Simulating Abnormal and Emergency Operating Modes of Power Transformer Electrical Networks. Automation and modeling in design and management, 2025, no. 3 (29). pp. 80-88. doi: 10.30987/2658-6436-2025-3-80-88.

Введение

Силовые трансформаторы являются одними из самых распространенных и важнейших элементов энергосистем. В электросетях, питающих такие трансформаторы, могут возникать различные повреждения, которые могут привести к авариям, нарушающим работу всей энергосистемы. Распространенными причинами повреждения электрических сетей являются короткие замыкания. Для ликвидации коротких замыканий и недопущения их влияния на смежные участки электросети применяется релейная защита и автоматика (РЗА). Основное назначение релейной защиты и автоматики – определение поврежденного участка и подача команды на его отключение с целью быстрее восстановления нормальной работы остальной части электрической системы и прекращения разрушения оборудования на поврежденном участке. Дополнительным назначением релейной защиты является необходимость ее реагирования на аномальные и аварийные режимы работы элементов системы. В зависимости от вида таких режимов и условий эксплуатации энергосистемы РЗА действует на сигнализацию или на отключение коммутационных аппаратов, питающих электроустановки [1, 2].

Поскольку в электросетях силовых трансформаторов могут возникать различные аномальные и аварийные режимы работы, для их исследования и минимизации последствий, целесообразно применять имитационное моделирование. Также имитационные модели полезны для обучения и тренировки энерготехнического персонала. Они позволяют создать имитационную среду, в которой персонал может практиковать свои навыки для принятия решений в реальных условиях [3].

Целью данной статьи является анализ аномальных и аварийных режимов работы электросети силовых трансформаторов с использованием имитационной модели.

Поставленная цель потребовала решения следующих задач:

- аналитического обзора токовых релейных защит силовых трансформаторов;
- разработки имитационной модели электросети типового силового трансформатора, реализующей применяемые в ней токовые релейные защиты;
- разработки методики анализа наиболее распространенных аномальных и аварийных режимов работы электросети силовых трансформаторов.

Обзор токовых релейных защит силовых трансформаторов

Основными аварийными режимами работы электросетей силовых трансформаторов являются межфазные короткие замыкания и перегрузки по току. Также в таких электросетях периодически могут возникать замыкания на землю, которые относят к аномальным режимам работы [4].

Для ликвидации аномальных и аварийных режимов работы электросетей силовых трансформаторов применяются следующие виды токовых релейных защит [5]:

– токовая отсечка – релейная защита, действие которой связано с повышением силы тока на защищаемом участке электросети, которая срабатывает мгновенно при достижении уровня тока порогового значения срабатывания защиты;

– максимально-токовая защита – релейная защита, принцип действия которой заключается в токовой отсечке, срабатывающей через заданную выдержку времени;

– защита от замыкания на землю – релейная защита, принцип действия которой связан с контролем токов нулевой последовательности, возникающих в случае замыкания электросети на землю, и срабатывания, если величина этих токов выше заданного значения.

На рис. 1 приведена структурная схема защиты электросети силового трансформатора.

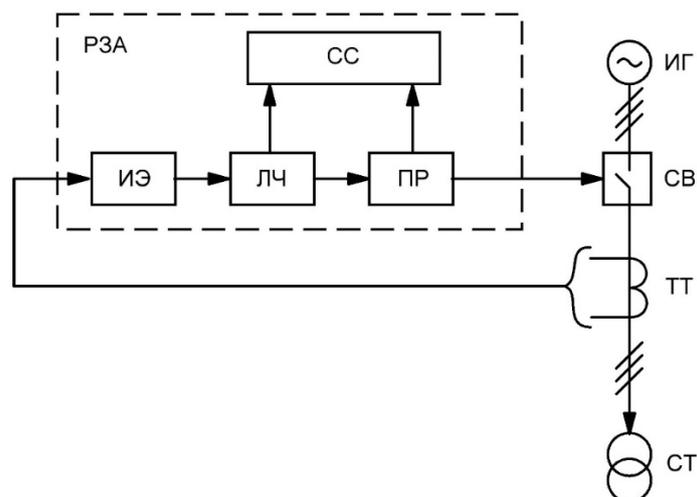


Рис. 1. Структурная схема защиты электросети силового трансформатора
Fig. 1. Structural diagram of the protection of the power transformer power grid

На схеме (см. рис. 1) используются следующие обозначения: ИЭ – измерительный элемент; ЛЧ – логическая часть; ПР – промежуточное реле; СС – схема сигнализации; ИГ – источник генерации; СВ – силовой выключатель; ТТ – трансформаторы тока; СТ – силовой трансформатор.

Блок РЗА работает следующим образом. На вход ИЭ поступает аналоговая информация о величине тока в электросети СТ. Измерительный элемент представляет собой аналого-цифровой преобразователь, на выходе которого формируется цифровой код, пропорциональный току в электросети силового трансформатора. Цифровой код с выхода ИЭ подается на вход ЛЧ, в которой происходит сравнение величины тока силового трансформатора с уставками по току в цифровом виде. Если цифровой код о величине тока превышает значения уставок, то ЛЧ формирует воздействие срабатывания для ПР, в соответствии с заложенным алгоритмом функционирования. Сигналы о срабатывании ЛЧ и ПР поступают в СС, которая выполняется в виде световых индикаторов, информационных табло, звуковых оповещателей и систем телемеханики [6, 7].

Разработка имитационной модели электросети силового трансформатора

Имитационная модель электрической сети силового трансформатора разработана в программной среде *MATLAB/Simulink*. Модель приведена на рис. 2.

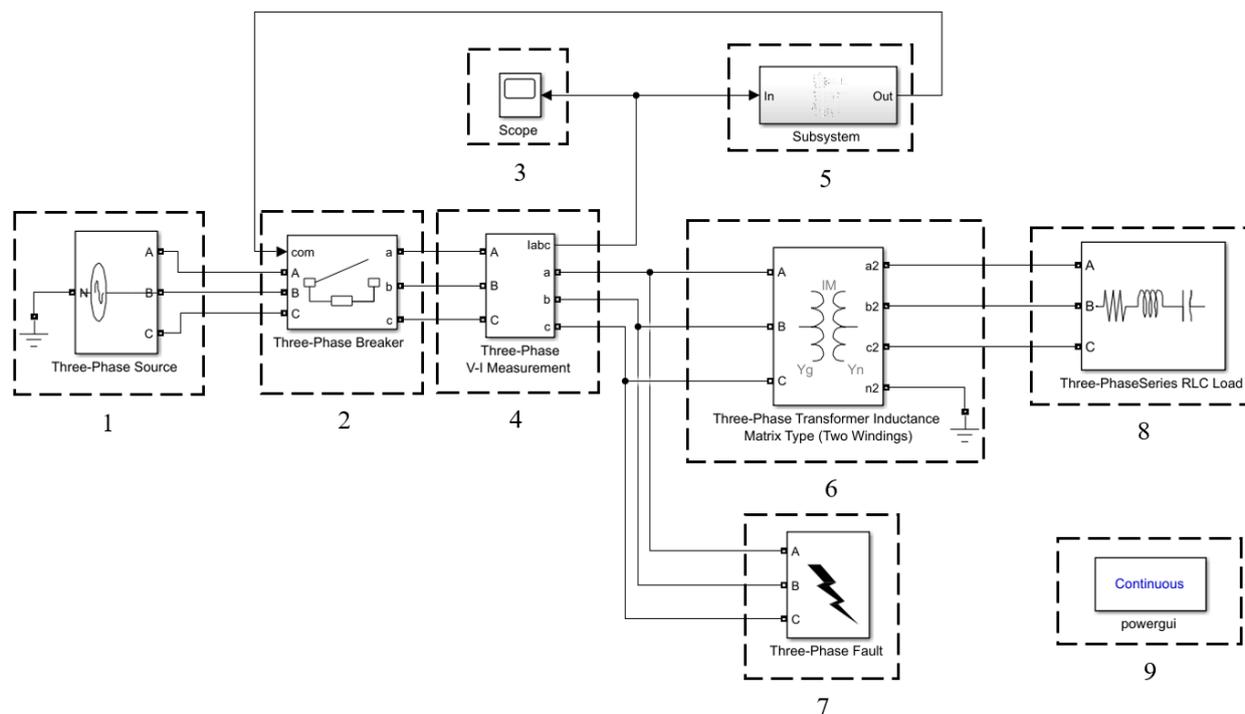


Рис. 2. Имитационная модель электросети силового трансформатора
Fig. 2. Simulation model of the electrical network of a power transformer

На имитационной модели (рис. 2) функциональные блоки обозначены следующим образом: 1 – источник генерации ($U = 6000 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$); 2 – силовой выключатель; 3 – амперметр (осциллограф); 4 – трансформаторы тока; 5 – РЗА; 6 – силовой трансформатор ($U = 6000/380 \text{ В}$, $f = 50 \text{ Гц}$, $P = 1\,000\,000 \text{ ВА}$); 7 – блок имитации межфазного короткого замыкания; 8 – блок имитации нагрузки 380 В; 9 – служебный блок Simulink.

Разработка имитационной модели РЗА силового трансформатора

На рис. 3 приведена имитационная модель РЗА силового трансформатора.

На имитационной модели (рис. 3) группы функциональных блоков (ГФБ) обозначены следующим образом: 1 – защиты от замыкания на землю; 2 – максимально-токовая защита; 3 – токовая отсечка.

С выхода блока *In* на входы ГФБ 1, ГФБ 2, ГФБ 3 поступает информация пропорциональная величине тока в фазах электросети силового трансформатора. В ГФБ 1 производится вычисление тока нулевой последовательности с помощью блоков *Transport Delay* и сумматоров. Далее в ГФБ 1, ГФБ 2 и ГФБ 3 осуществляется аналого-цифровое преобразование входной информации о токе и ее сравнение с уставками по току с помощью блоков *Comparison*. Если величина тока превышает значения уставок по току, с помощью блоков *Set-Reset Flip-Flop*, генерируется сигнал о срабатывании определенной токовой защиты. Сигналы о срабатывании ГФБ 1, ГФБ 2 и ГФБ 3 поступают на входы блоков *Display 1*, *Display 2* и *Display 3* соответственно, в которых отображается единица и тем самым имитируется срабатывание сигнализации. Также в случае срабатывания ГФБ 2 или ГФБ 3, через блок *Out*, РЗА выдает сигнал на отключение силового выключателя.

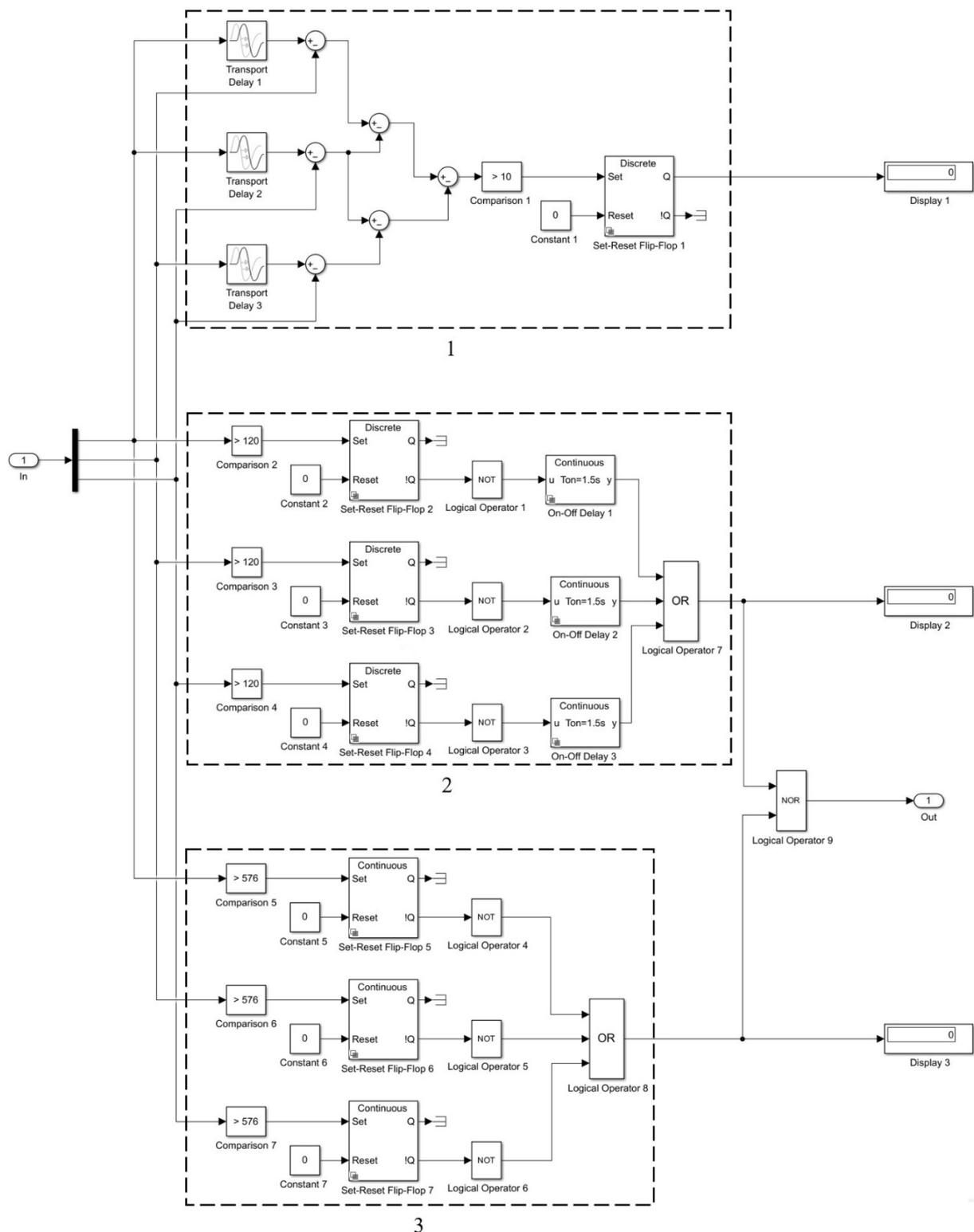


Рис. 3. Имитационная модель РЗА силового трансформатора
Fig. 3. Simulation model of the RPA of a power transformer

Расчет тока трехфазного короткого замыкания для модели проводился по методике, приведенной в [8]. В результате расчета ток короткого замыкания составил 10 100 А. Расчет параметров срабатывания используемых релейных защит проводился по методике, приведенной в [9]. Результаты расчета сведены в табл. 1.

Параметры срабатывания релейных защит

Table 1

<i>Parameters of operation of relay protections</i>	
Вид РЗА	Величина срабатывания
Токовая отсечка	576 А
Максимально-токовая защита	120 А; 1,5 с
Защита от замыкания на землю	10 А

Для силовых трансформаторов токовая отсечка и максимально-токовая защита действуют на отключение силового выключателя, а защита от замыкания на землю – на схему сигнализации [10].

Анализ аномальных и аварийных режимов работы электросети силового трансформатора

Анализ рабочего режима, а также аномальных и аварийных режимов работы электросети силового трансформатора, был проведен с использованием разработанных моделей, представленных на рис. 2 и рис. 3. Результаты моделирования приведены на рис. 4 – 7 в виде осциллограмм токов трехфазной сети.

На рис. 4 приведена осциллограмма токов в электросети силового трансформатора при нормальном режиме работы. На осциллограмме токов наблюдается трехфазный синусоидальный сигнал, со смещением фаз относительно друг друга на 120 градусов. Величина тока нагрузки составляет 96 А, что является нормальным показателем для силовых трансформаторов подобного типа.

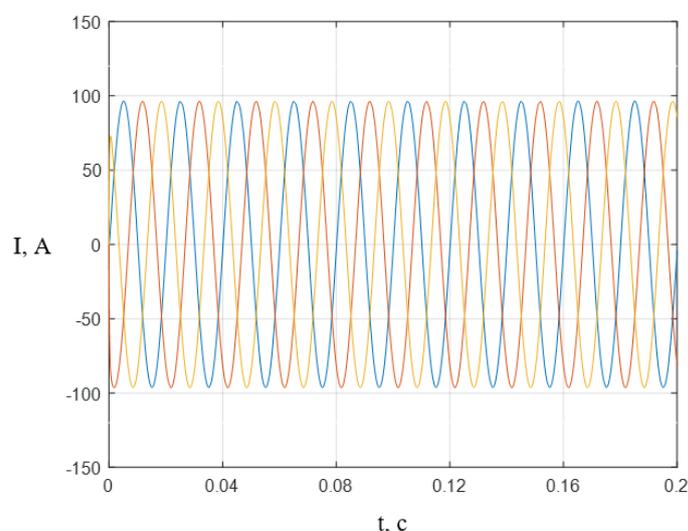


Рис. 4. Осциллограмма токов в электросети силового трансформатора при нормальном режиме работы
Fig. 4. An oscilloscope of currents in the power transformer's electrical network during normal operation

На рис. 5 приведена осциллограмма токов в электросети силового трансформатора при имитации межфазного короткого замыкания. Моделирование короткого замыкания проводилось между фазами *A* и *B* на 0,5 секунды. Амплитуда синусоидального сигнала фаз *A* и *B* увеличилась до 10 160 А, что соответствует ранее проведенному расчету. Такая величина тока превышает уставку срабатывания токовой отсечки, поэтому данная защита мгновенно подала сигнал на отключение силового выключателя. Небольшая задержка с отключением силовой цепи после короткого замыкания, составляющая 0,02 с, обусловлена временем срабатывания РЗА, что соответствует правилам устройства электроустановок [10]. При моделировании трехфазного короткого замыкания имитационная модель показала аналогичные результаты.

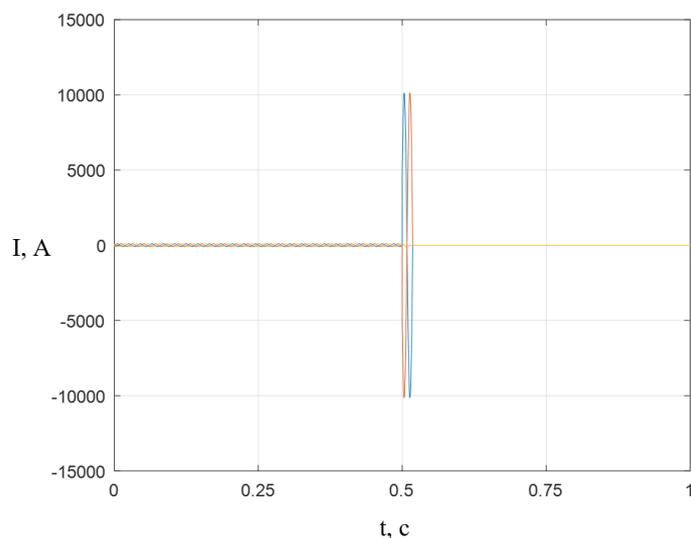


Рис. 5. Осциллограмма токов в электросети силового трансформатора при имитации межфазного короткого замыкания
Fig. 5. An oscillogram of currents in the electrical network of a power transformer when simulating a two-phase short circuit

На рис. 6 приведена осциллограмма токов в электросети силового трансформатора при моделировании перегрузки по току. Моделирование проводилось на 0,5 секунде. Амплитуда трехфазного синусоидального сигнала увеличилась до 150 А. Такая величина тока превышает уставку срабатывания максимально-токовой защиты, поэтому через заданную уставку по времени – 1,5 с, данная защита подала сигнал на отключение силового выключателя.

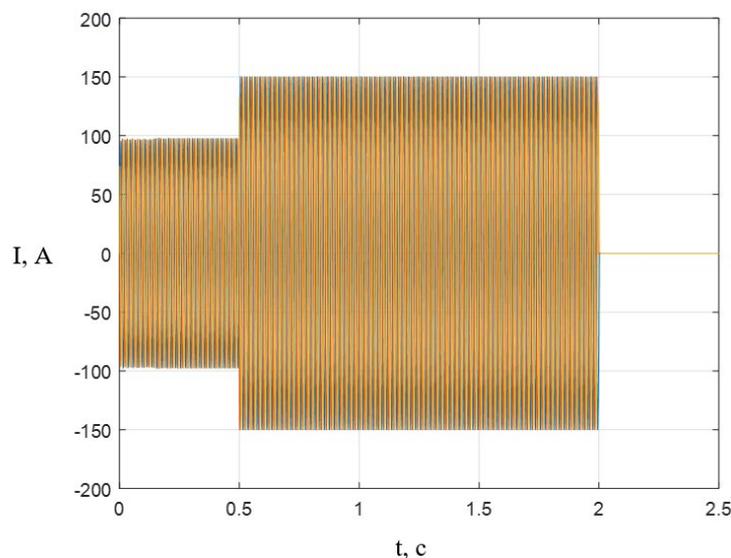


Рис. 6. Осциллограмма токов в электросети силового трансформатора при имитации перегрузки по току
Fig. 6. An oscilloscope of currents in the electrical network of a power transformer when simulating overcurrent

На рис. 7 приведена осциллограмма токов в электросети силового трансформатора при моделировании однофазного замыкания на землю. Моделирование проводилось на 0,5 секунде. На полученной осциллограмме в промежутке 0...0,5 с наблюдается номинальный ток силового трансформатора – 96 А. После замыкания фазы С на землю, величины тока для фаз А, В и С изменяются до 162 А, 165 А и 5 А соответственно. Вследствие этого в электросети силового трансформатора появляется ток нулевой последовательности, что приводит к срабатыванию защиты от замыкания на землю.

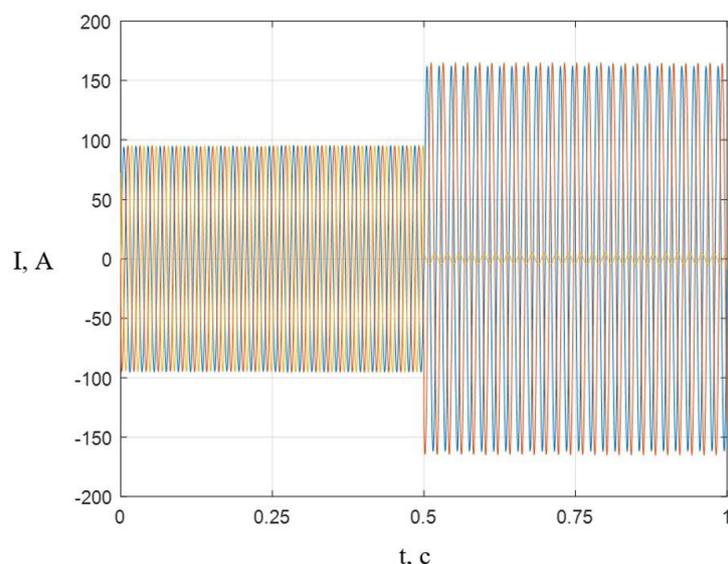


Рис. 7. Осциллограмма токов в электросети силового трансформатора при имитации однофазного замыкания на землю

Fig. 7. An oscillogram of currents in the electrical network of a power transformer when simulating a single-phase earth fault

Таким образом, для анализа аномальных и аварийных режимов работы электросети силового трансформатора было проведено моделирование нормального режима работы (см. рис. 4), а также межфазного короткого замыкания (см. рис. 5), перегрузки по току (см. рис. 6) и однофазного замыкания на землю (см. рис. 7). На полученных осциллограммах тока продемонстрировано срабатывание токовой отсечки, перегрузки по току и защиты от замыкания на землю.

Заключение

В результате проведенных исследований были получены следующие выводы:

- разработана имитационная модель электросети силового трансформатора;
- разработана методика анализа аномальных и аварийных режимов работы электросети силового трансформатора с использованием разработанной модели;
- установлено, что разработанная имитационная модель позволяет моделировать аномальные и аварийные режимы работы электросети силового трансформатора, адекватно отражает алгоритмы работы его токовых релейных защит и может быть использована при эксплуатации электросетей и подготовке энерготехнического персонала.

Список источников:

1. Федосеев А.М., Федосеев М.А. Релейная защита электроэнергетических систем. – М.: Энергоатомиздат, 1992. – 266 с.
2. Кузьмин И.Л., Иванов И.Ю., Писковацкий Ю.В. Микропроцессорные устройства релейной защиты. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2015. – 310 с.
3. Акопов А.С. Имитационное моделирование: Учебник и практикум для академического бакалавриата. – Люберцы: Юрайт, 2016. – 389 с.
4. Киреева Э.А., Цырук С.А. Релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: Академия, 2010. – 290 с.
5. Андреев В.А. Релейная защита и автоматика систем электроснабжения. М.: Высшая школа, 1991. – 248 с.
6. Дьяков А.Ф. Микропроцессорная релейная защита и автоматика электроэнергетических систем. – М.: МЭИ, 2000. – 156 с.

References:

1. Fedoseev A.M., Fedoseev M.A. Relay Protection of Power Systems. Moscow: Energoatomizdat; 1992.
2. Kuzmin I.L., Ivanov I.Yu., Piskovatsky Yu.V. Microprocessor-Based Relay Protection Devices. Kazan: Kazan State Energy University; 2015.
3. Akopov A.S. Simulation Modelling. Lyubertsy: Yurayt; 2016.
4. Kireeva E.A., Tsyruk S.A. Relay Protection and Automation of Power Systems. Moscow: Academy; 2010.
5. Andreev V.A. Relay Protection and Automation of Electric Power Systems. Moscow: Vysshaya Shkola; 1991.
6. Dyakov A.F. Microprocessor-Based Relay Protection and Automation of Power Systems. Moscow: Moscow Power Engineering Institute; 2000.

7. Шнеерсон Э.М. Цифровая релейная защита. – М: Энергоатомиздат, 2007. – 549 с.

8. Голубев М.Л. Расчет токов короткого замыкания 0,4–35 кВ. – М.: Энергия, 1980. – 47 с.

9. Методические указания для выбора параметров настройки и срабатывания МП устройств РЗА оборудования 6-35 кВ объектов ЕНЭС. Утв. прик. ПАО "ФСК ЕЭС" от 15 мая 2020 г. № 178.

10. Правила устройства электроустановок (ПУЭ 7). Утв. прик. Минэнерго России от 20 мая 2003 г. № 187.

7. Shneerson E.M. Digital Relay Protection. Moscow: Energoatomizdat; 2007.

8. Golubev M.L. Calculation of Short-Circuit Currents 0.4-35 kV. Moscow: Energiya; 1980.

9. Guidelines for Selecting Setting Parameters and Operation of Microprocessor-Based Relay Protection and Automation Equipment for 6-35 kV Facilities of the Unified National Electric Grid. Moscow: Federal Grid Company of Unified Energy System JSC, Order No. 178; 2020 May 15.

10. Electrical Installation Rules (EIR 7). Order of the Ministry of Energy of Russia No. 187; 2003 May 20.

Информация об авторах:

Баранов Александр Николаевич

кандидат технических наук, доцент, заведующий кафедрой «Информационных технологий» Донбасского государственного технического университета, ORCID 0009-0009-7111-9256

Мурашкин Игорь Дмитриевич

аспирант Донбасского государственного технического университета, ORCID 0009-0009-7205-0182

Information about the authors:

Baranov Alexander Nikolaevich

Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Head of the Department of Information Technologies of Donbass State Technical University, ORCID: 0009-0009-7111-9256

Murashkin Igor Dmitrievich

Postgraduate student of Donbass State Technical University, ORCID: 0009-0009-7205-0182

Вклад авторов: все авторы сделали эквивалентный вклад в подготовку публикации.

Contribution of the authors: the authors contributed equally to this article.

Авторы заявляют об отсутствии конфликта интересов.

The authors declare no conflicts of interests.

Статья поступила в редакцию 22.07.2025; одобрена после рецензирования 11.08.2025; принята к публикации 01.09.2025.

The article was submitted 22.07.2025; approved after reviewing 11.08.2025; accepted for publication 01.09.2025.

Рецензент – Малаханов А.А., кандидат технических наук, доцент, Брянский государственный технический университет.

Reviewer – Malakhanov A.A., Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Bryansk State Technical University.

Учредитель и издатель: Федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение высшего образования «Брянский государственный технический университет»

Адрес редакции и издателя: 241035, Брянская область, г. Брянск, бульвар 50 лет Октября, 7

ФГБОУ ВО «Брянский государственный технический университет»

Телефон редакции журнала: (4832) 56-02-61. E-mail: aim-ru@mail.ru

Вёрстка А.Г. Малаханова. Редактор Д.А. Гулина.

Сдано в набор 15.09.2025. Выход в свет 30.09.2025.

Формат 60 × 84 1/8. Бумага офсетная. Усл. печ. л. 10,23.

Тираж 500 экз. Свободная цена.

Отпечатано в лаборатории оперативной полиграфии

Федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Брянский государственный технический университет»

241035, Брянская область, г. Брянск, ул. Институтская, 16

12+