

УДК 621.311+621.317.32+621.3.012
DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-95-104

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕПЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ ТОКОВ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, Т. Н. САВКОВА, Г. И. СЕЛИВЕРСТОВ

*Учреждение образования «Гомельский государственный
технический университет имени П. О. Сухого»,
Республика Беларусь*

Предложена физическая модель высоковольтного распределительного устройства с измерительными трансформаторами тока, которая основана на схеме замещения электрической сети. На базе модели создан лабораторный стенд, позволяющий изучать схемы соединения измерительных трансформаторов и анализировать измеряемые значения токов для различных режимов: нормально-го, обрыва проводов, коротких замыканий между фазами, однофазных замыканий на землю. Выполнен анализ векторных диаграмм для этих режимов. Показано, что значения токов, получаемых на лабораторном стенде, соответствуют теоретическим ожидаемым значениям, но не равны им, так как измерения выполняются для реальной электрической сети и ее несимметричность влияет на результаты измерений. Использование разработанного лабораторного стендла в учебном процессе позволит повысить уровень подготовки студентов энергетических специальностей университетов.

Ключевые слова: электрическая сеть, распределительное устройство, трансформатор тока, физическая модель, лабораторный стенд, векторная диаграмма.

Для цитирования. Зализный, Д. И. Моделирование цепей измерения токов в высоковольтных распределительных устройствах / Д. И. Зализный, Т. Н. Савкова, Г. И. Селиверстов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 4 (103). – С. 95–104. – DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-95-104

MODELING OF CURRENT MEASUREMENT CIRCUITS IN HIGH-VOLTAGE SWITCHGEARS

D. I. ZALIZNY, T. N. SAVKOVA, G. I. SELIVERSTOV

*Sukhoi State Technical University of Gomel,
the Republic of Belarus*

A physical model of a high-voltage switchgear with measuring current transformers is proposed, based on the equivalent circuit diagram of an electrical network. Based on this model laboratory setup has been created, which allows to study the measuring transformer connection diagrams and to analyse measured current values for various modes: normal, wire breaks, phase-to-phase short circuits, and single-phase ground faults. Vector diagrams for these modes are analyzed. It is shown that the current values obtained on the laboratory setup correspond to theoretical expected values, but are not equal to them, since measurements are performed on a real electrical network, and its asymmetry affects the measurement results. Using the developed laboratory setup in the educational process will improve the training of students majoring in energy specialties at universities.

Keywords: electrical network, switchgear, current transformer, physical model, laboratory stand, vector diagram.

For citation. Zalizny D. I., Savkova T. N., Seliverstov G. I. Modeling of current measurement circuits in high-voltage switchgears. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 4 (103), pp. 95–104 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-4-95-104

Введение

Основными компонентами для контроля токов в высоковольтных распределительных устройствах (РУ) систем электроснабжения являются измерительные трансформаторы тока. Трансформаторы тока изготавливаются в однофазном исполнении и в электрических сетях устанавливаются в каждой фазе контролируемых линий. Их вторичные обмотки заземляются и соединяются, как правило, по схеме «полная звезда». В сетях напряжением 6–35 кВ применяются также трансформаторы тока нулевой последовательности.

В зависимости от вида повреждения в электрической сети значения токов в цепях трансформаторов тока изменяются. Контролируя и анализируя эти значения, можно определить вид повреждения, а в некоторых случаях и место его повреждения. Правильная интерпретация значений токов в высоковольтной электрической сети является важным аспектом в обучении студентов энергетических специальностей. Однако понимание физики этих процессов представляет определенные трудности для многих студентов. Поэтому существует необходимость создания наглядных и удобных лабораторных установок, которые будут способствовать изучению и пониманию взаимосвязей и закономерностей между измеренными значениями токов, а также процессами, определяющими эти значения в системах электроснабжения.

Цель данной работы заключается в создании физической модели цепей измерения токов в высоковольтных РУ, а также в разработке лабораторного стенда на основе этой модели.

Обзор литературных источников

Авторами [1] проводилось моделирование режимов электрических сетей с изолированной нейтралью. Схема реализована на напряжении 230/36/21 В на индуктивно-емкостных и резистивных элементах без использования трансформаторов тока и не позволяет рассматривать несимметричные режимы в разных точках, что существенно сужает область исследований.

В моделях [2–4] рассмотрена линия электропередачи 10 кВ с изолированной нейтралью в программном пакете MatLab Simulink, где исходными данными являлись входные сопротивления трансформатора и проводов линии 10 кВ. Данная модель позволяла изменять место короткого замыкания, но авторами не рассматривалась работа трансформаторов токов при различных режимах несимметрии.

Для реализации модели режимов электрических сетей с изолированной нейтралью авторами [5] использовался метод графа электрической цепи, который позволил наглядно представить изменение величин, характеризующих переходный процесс. Данный метод значительно затрудняет анализ параметров электрической сети в ряде аварийных режимов.

Авторы [6, 7] применяли данные, полученные с автоматизированной информационно-измерительной системы контроля и учета электроэнергии для оценки параметров трехфазной распределительной сети с напряжением 0,4 кВ на основе векторов тока и напряжения. Анализ режимов распределительной сети осуществлялся с использованием показаний главного счетчика электроэнергии, который контролирует изменения тока или мощности потребителей. Однако данная модель не дает возможности моделировать аварийные режимы сети и изучить ее параметры.

В [8] рассмотрена физическая модель установки для измерения напряжений в высоковольтных РУ.

Физическая модель электрической сети для измерения значений тока

В качестве изучаемой схемы будем использовать схему, показанную на рис. 1. Она включает шины РУ 10 кВ, трехфазный ввод 10 кВ и одну отходящую кабельную линию.

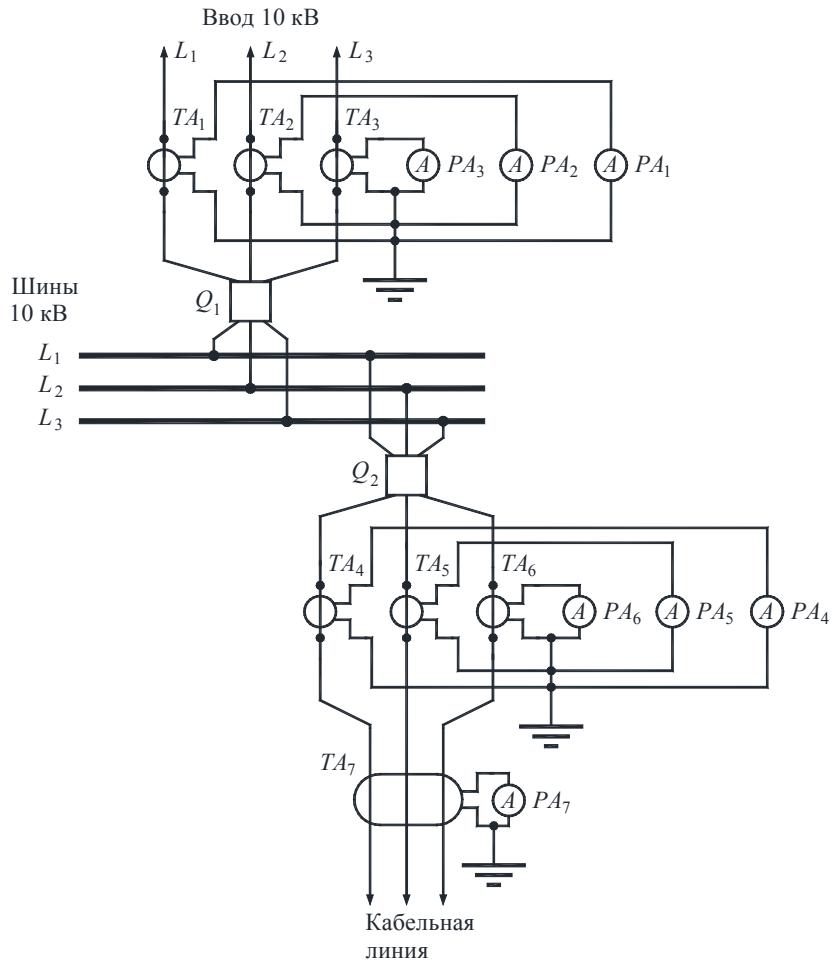


Рис. 1. Электрическая схема подключения измерительных трансформаторов тока в РУ 10 кВ

В схеме представлены шесть линейных трансформаторов тока $TA_1 - TA_6$ с подключенными к их вторичным обмоткам амперметрами $PA_1 - PA_6$. Вторичные обмотки трансформаторов тока на вводе и на отходящей линии соединены по схеме «полная звезда».

На входе кабельной линии установлен проходной трансформатор тока TA_7 с амперметром PA_7 , для измерения тока нулевой последовательности.

Для моделирования изучаемых процессов примем следующий масштаб величин в физической модели рассматриваемой схемы: напряжению 6 В на контактах модели будут соответствовать напряжение 10 кВ, а току в цепях модели 0,16 А – реальный ток 4800 А, соответствующий току трехфазного короткого замыкания на шинах РУ.

Тогда масштабирующий коэффициент K_R для расчета сопротивлений равен:

$$K_R = \frac{K_U}{K_I} = \frac{6/10000}{0,16/4800} = \frac{6 \cdot 10^{-4}}{3,33 \cdot 10^{-5}} = 18, \quad (1)$$

где K_U , K_I – масштабирующие коэффициенты по напряжению и току.

Значения расчетных сопротивлений физической модели необходимо определять как произведение реальных значений этих сопротивлений на коэффициент K_R [7].

С учетом выражения (1) значение сопротивления системы $X_{c.m}$ в модели будет равно:

$$X_{c.m} = K_R \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I_{K3}} = 18 \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 4800} = 21,7 \text{ Ом}, \quad (2)$$

где U_c – напряжение сети; I_{K3} – ток трехфазного короткого замыкания.

Полное сопротивление кабеля в модели $Z_{k.m}$ будет определяться по формуле

$$Z_{k.m} = K_R l \sqrt{(R_k)^2 + (X_k)^2}, \quad (3)$$

где R_k , X_k – удельные активное и реактивное сопротивления кабеля, Ом/км; l – длина кабеля, км.

Емкость кабеля в модели $C_{k.m}$ можно рассчитать по значению его удельной рабочей емкости [9, с.127] на основе уравнения

$$C_{k.m} = \frac{C_p l}{K_R}, \quad (4)$$

где C_p – удельная рабочая емкость кабеля, Ом/км; l – длина кабеля, км.

В табл. 1 приведена марка принимаемого для модели кабеля, его длина, значения реальных и моделируемых сопротивлений.

Таблица 1

Параметры кабельной линии

| Марка кабеля | Параметры кабеля | | | | | |
|----------------|------------------|---------------|---------------|----------------|----------------|-----------------|
| | l , км | R_k , Ом/км | X_k , Ом/км | C_p , мкФ/км | $Z_{k.m}$, Ом | $C_{k.m}$, мкФ |
| ААШВ-10 3 × 95 | 1,6 | 0,35 | 0,08 | 0,35 | 10,4 | 0,033 |

Необходимое сопротивление нагрузки в модели $R_{h.m}$ найдем по формуле

$$R_{h.m} = K_R \frac{U_c}{\sqrt{3} I_{h2} K_{TA}}, \quad (5)$$

где I_{h2} – требуемый ток нагрузки, получаемый на вторичной обмотке трансформатора тока; K_{TA} – коэффициент трансформации трансформатора тока.

Пусть ток нагрузки $I_{h2} = 1,5$ А. Тогда при моделировании трансформатора тока с коэффициентом трансформации $K_{TA} = 100/5 = 20$ получим $R_{h.m} = 3,47$ кОм.

На рис. 2 показана схема предлагаемой физической модели для одной фазы. Значения сопротивлений и емкостей, выпускаемых в промышленности, в модели подобраны как ближайшие к расчетным.

Схема работает следующим образом. Фазное напряжение подается на ввод физической модели. Сопротивления $X_{c.m}$ и $Z_{k.m}$ реализованы в схеме резисторами, так как предполагается, что все измерения будут осуществляться в установившемся режиме и только для токов. Для имитации токов замыкания на землю в схеме применены конденсаторы, моделирующие емкости кабеля $C_{k.m}$, в соответствии с параметрами табл. 1. При этом общая точка конденсаторов изолирована от общей точки источника напряжения и нагрузки, что позволяет имитировать сеть с изолированной нейтралью.

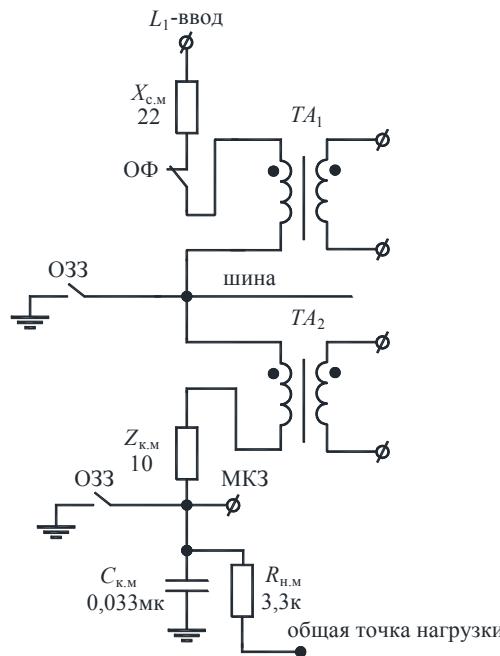


Рис. 2. Схема физической модели измерения токов для одной фазы

В модели предусмотрены аварийные режимы на шинах и отходящих линиях: обрыв фазы (ОФ), однофазное замыкание на землю (ОЗЗ), междуфазное короткое замыкание (МКЗ).

Лабораторный стенд для изучения цепей измерения токов в РУ 10 кВ

Внешний вид лабораторного стенда «Измерительные трансформаторы тока в РУ 10 кВ», разработанного на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого и реализующего описанную выше физическую модель, показан на рис. 3.



Рис. 3. Внешний вид лабораторного стенда «Измерительные трансформаторы тока в РУ 10 кВ»

На стенде представлены клеммы для сборки схем, тумблеры для включения аварийных режимов ОФ, ОЗЗ, МКЗ, шесть трансформаторов тока $TA_1 - TA_6$, один трансформатор тока нулевой последовательности TA_7 и семиканальный микропроцессорный амперметр.

Амперметр отградуирован таким образом, чтобы отображать реальные моделируемые значения токов, а не значения токов, непосредственно протекающих в цепях физической модели.

Анализ векторных диаграмм для токов на основе лабораторного стенда

Для проверки правильности показаний приборов в лабораторном стенде при различных аварийных режимах будем рассматривать схему замещения трехфазной сети с параметрами по рис. 2 и с условными идеальными амперметрами, имитирующими измерительные трансформаторы тока (рис. 4).

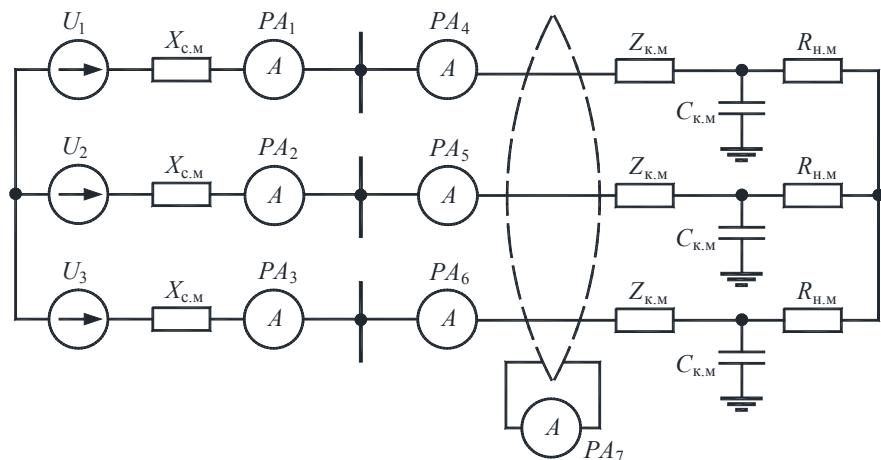


Рис. 4. Схема замещения трехфазной сети

Значения токов $I_{\text{норм}}$, измеряемых условными амперметрами $PA_1 - PA_6$, в нормальном режиме в симметричной трехфазной системе будут равны:

$$I_{\text{hopm}} = \frac{U_{\text{c}}}{\sqrt{3} \cdot Z_{\text{m}}}, \quad (6)$$

где U_c – напряжение сети; Z_m – суммарное сопротивление в цепи одной фазы модели.

Вначале рассмотрим режим обрыва фазы № 3. В этом случае на шинах РУ будут присутствовать токи в фазах № 1 и 2, измеряемые двумя условными амперметрами PA_1 , PA_2 , которые оказываются включенными последовательно со всеми сопротивлениями в фазах № 1 и 2. Напряжение между фазами № 1 и 2 остается равным линейному напряжению.

Значение тока $I_{\text{ОФ}}$, отображаемого амперметрами, определяется по формуле

$$I_{\text{O}\Phi} = \frac{U_{\text{c}}}{2Z_{\text{v}}}. \quad (7)$$

Далее, разделив (7) на (6), получим:

$$\frac{I_{\text{O}\Phi}}{I_{\text{h}\Phi\text{DM}}} = \frac{\sqrt{3}}{2} = 0,87. \quad (8)$$

Из результата, полученного по выражению (8), следует, что ожидаемое значение измеряемого тока при обрыве фазы отличается от тока нормального режима в 0,87 раза.

Векторная диаграмма для рассматриваемого случая показана на рис. 5, *а*. На этой диаграмме: I_1 – I_3 – токи нормального режима, равные $I_{\text{норм}}$; I'_1 , I'_2 – токи после обрыва фазы № 3.

Далее рассмотрим режим трехфазного короткого замыкания на шинах РУ. В такой ситуации условные амперметры PA_1 – PA_3 покажут равные токи. В этом случае в формулу (6) вместо сопротивления всей модели входит только сопротивление системы $X_{\text{с.м.}}$.

При коротком замыкании на шинах РУ между фазами № 1 и 3 токи, измеряемые условными амперметрами PA_1 и PA_3 , будут соответствовать токам, получаемым по выражению (7), в котором вместо сопротивления Z_m будет входить сопротивление $X_{\text{с.м.}}$.

Таким образом, токи двухфазного короткого замыкания отличаются от токов трехфазного короткого замыкания в 0,87 раза, находятся в противофазе друг к другу и располагаются параллельно вектору линейного напряжения между фазами № 1 и 3, как изображено на рис. 5, *б*.

При этом в случае отсутствия существенного снижения напряжения в фазе № 2 условный амперметр PA_2 покажет практическое значение тока нормального режима.

Векторная диаграмма для токов короткого замыкания между фазами № 1 и 3 показана на рис. 5, *б* без строгого соблюдения масштаба по отношению к векторной диаграмме токов, изображенной на рис. 5, *а*.

На рис. 5, *б* обозначено: I_1 – I_3 – токи при трехфазном коротком замыкании; I'_1 , I'_3 – токи при коротком замыкании между фазами № 1 и 3.

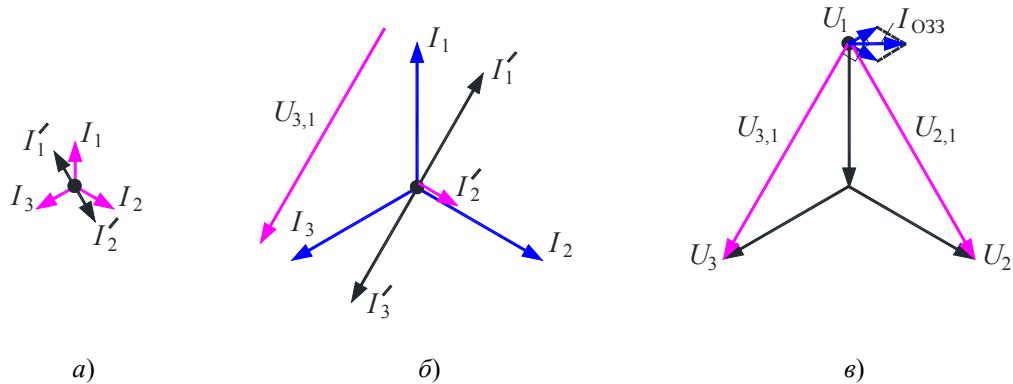


Рис. 5. Векторные диаграммы токов и напряжений:
а – обрыв фазы № 3; *б* – короткое замыкание между фазами № 1 и 3 на шинах РУ; *в* – замыкание на землю фазы № 3

В случае однофазного замыкания на землю одной фазы, например, фазы № 1, появятся два тока, протекающие через землю и емкости фаз № 2 и 3. При этом к фазам № 2 и 3 (и емкостям этих фаз) будут приложены линейные напряжения $U_{2,1}$ и $U_{3,1}$ [10, с. 289]. В результате ток замыкания на землю $I_{0,33}$ будет представлять собой сумму токов, опережающих на 90° напряжения $U_{2,1}$ и $U_{3,1}$, как это показано на рис. 5, *в* (без строгого соблюдения масштаба по отношению к векторным диаграммам токов, изображенных на рис. 5, *а*, *б*). Этот ток измеряется амперметром PA_7 .

В рассматриваемой физической модели значения емкостей кабелей выбраны 0,033 мкФ, т. е. модуль сопротивления емкостной цепи составляет:

$$X_c = \frac{1}{2\pi \cdot 50 \cdot 0,033 \cdot 10^{-6}} = 96,5 \text{ кОм},$$

что намного больше сопротивления нагрузки, равного 3,3 кОм (см. рис. 2). В связи с этим токи замыкания на землю несущественно влияют на значения измеряемых линейных токов.

В табл. 2 приведены результаты измерений, выполненных на разработанном лабораторном стенде, из которых следует, что полученные значения токов при обрыве фазы и коротких замыканиях согласуются с изложенными выше теоретическими результатами. Некоторые отличия от ожидаемых значений объясняются несимметрией реальной трехфазной сети, а также погрешностями амперметров.

При ОЗЗ на шинах РУ значение тока на амперметре PA_7 , равное нулю (табл. 2), объясняется тем, что трансформатор тока нулевой последовательности установлен ниже шин РУ.

При ОЗЗ на кабельной линии ток замыкания на землю составил 0,14 А. В соответствии с [10, с. 291] ток I_{O33} равен:

$$I_{O33} = \frac{3U_\phi}{X_c}, \quad (9)$$

где U_ϕ – фазное значение напряжения; X_c – сопротивление емкости модели $C_{k.m.}$.

Ток нагрузки I_h определяется по формуле

$$I_h = \frac{U_\phi}{R_{h.m.}}. \quad (10)$$

Разделив выражение (9) на выражение (10), получим:

$$\frac{3U_\phi / X_c}{U_\phi / R_{h.m.}} = \frac{3R_{h.m.}}{X_c} = \frac{3 \cdot 3,3}{96,5} \approx 0,1. \quad (11)$$

Из результата, полученного по уравнению (11), следует, что ожидаемое значение тока I_{O33} составляет около 0,1 от рабочего тока нагрузки.

Таблица 2

Результаты измерений токов в нормальном режиме и при различных аварийных режимах на лабораторном стенде

| Режим работы схемы | Показания амперметров, А | | | | | | |
|---|--------------------------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | PA_1 | PA_2 | PA_3 | PA_4 | PA_5 | PA_6 | PA_7 |
| Нормальный | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 1,5 | 0,0 |
| Обрыв фазы № 3 | 1,3 | 1,2 | 0 | 1,2 | 1,1 | 0,0 | 0,0 |
| Трехфазное короткое замыкание на шинах РУ | 51,9 | 51,2 | 49,9 | 0,4 | 0,7 | 0,5 | 0,0 |
| Короткое замыкание между фазами № 1 и 3 на шинах РУ | 44,6 | 1,6 | 42,3 | 0,3 | 1,4 | 0,4 | 0,0 |

Окончание табл. 2

| Режим работы схемы | Показания амперметров, А | | | | | | |
|--|--------------------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| | PA ₁ | PA ₂ | PA ₃ | PA ₄ | PA ₅ | PA ₆ | PA ₇ |
| Трехфазное короткое замыкание на кабельной линии | 43,0 | 43,3 | 40,9 | 41,6 | 41,2 | 41,5 | 0,0 |
| Короткое замыкание между фазами № 2 и 3 на кабельной линии | 1,6 | 36,3 | 35,5 | 1,5 | 35,5 | 36,2 | 0,0 |
| Однофазное замыкание на землю фазы № 2 на шинах РУ | 1,7 | 1,6 | 1,4 | 1,4 | 1,5 | 1,6 | 0,0 |
| Однофазное замыкание на землю фазы № 1 на кабельной линии | 1,6 | 1,4 | 1,5 | 1,4 | 1,3 | 1,6 | 0,14 |

Заключение

Разработанный лабораторный стенд «Измерительные трансформаторы тока в распределительных устройствах 10 кВ» представляет собой физическую модель, которая позволяет имитировать функционирование измерительных трансформаторов тока в РУ на напряжении 10 кВ в различных режимах. Применение данного стендса в образовательном процессе повысит качество подготовки студентов энергетических специальностей в университетах, а также будет полезным для магистрантов и аспирантов, занимающихся научными исследованиями в области моделирования физических процессов в электроэнергетике.

Литература

1. Искаков, У. К. Моделирование режимов работы устройств релейной защиты в сетях с изолированной нейтралью / У. К. Искаков, И. В. Брейдо, К. К. Смагулова // Электротехника. – 2016. – № 10. – С. 45–49.
2. Козлов, В. К. Исследование влияния переходного сопротивления на определение места однофазного замыкания на землю в распределительных сетях с изолированной нейтралью / В. К. Козлов, Е. Р. Киржацких, Р. А. Гиниатуллин // Вестник Чувашского университета. – 2019. – № 1. – С. 39–46.
3. Сбитнев, Е. А. Исследование однофазного замыкания на землю в электрических сетях 6–35 кВ с изолированной нейтралью / Е. А. Сбитнев, В. Л. Осокин, М. С. Жужин // Агронженерия. – 2022. – Т. 24, № 3. – С. 73–79.
4. Иваницкий, В. А. Модель для анализа режимов однофазного замыкания на землю в сетях электроснабжения / В. А. Иваницкий, М. Е. Тюленев // Интеллектуальные системы в производстве. – 2013. – № 2. – С. 185–189.
5. Новожилов, А. Н. Моделирование токов однофазного замыкания в кабельной сети с изолированной нейтралью с помощью Electronics Workbench / А. Н. Новожилов, Ж. Б. Исабеков, Т. А. Новожилов // ПМУ ХАБАРШЫСЫ. – 2017. – С. 102.
6. Данилов, М. И. К проблеме определения векторов тока и напряжения в распределительной сети по данным АИИС КУЭ / М. И. Данилов, И. Г. Романенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2019. – Т. 19, № 4. – С. 87–94.
7. Данилов, М. И. К проблеме определения параметров распределительной сети по данным АИИС КУЭ / М. И. Данилов, И. Г. Романенко // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2020. – Т. 20, № 2. – С. 5–14. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme> (дата обращения: 10.02.2025).
8. Зализный, Д. И. Моделирование цепей измерения напряжений в высоковольтных распределительных устройствах / Д. И. Зализный, Т. Н. Савкова, Л. И. Евминов // Вестник Гомельского государственного технического университета имени П. О. Сухого. – 2025. – № 3. – С. 65–74.

9. Макаров, Е. Ф. Справочник по электрическим сетям 0,4–35 кВ и 110–1150 кВ / Е. Ф. Макаров. – М. : Папирус ПРО, 2004. – Т. 3. – 679 с.
10. Чернобровов, Н. В. Релейная защита энергетических систем / Н. В. Чернобровов, В. А. Семенов. – М. : Энергоатомиздат, 1998. – 799 с.

References

1. Iskakov U. K., Breido I. V., Smagulova K. K. Modeling the operating modes of relay protection devices in networks with an isolated neutral. *Elektrotehnika = Electrical engineering*, 2016, no. 10, pp. 45–49 (in Russian).
2. Kozlov V. K., Kirzhatskikh E. R., Giniatullin R. A. Investigation of the effect of transient resistance on determining the location of a single-phase earth fault in distribution networks with an isolated neutral conductor. *Vestnik Chuvashskogo universiteta = Bulletin of the Chuvash University*, 2019, no. 1, pp. 39–46 (in Russian).
3. Sbitnev E. A., Osokin V. L., Zhuzhin M. S. Investigation of single-phase earth closure in 6–35 kV electrical networks with an isolated neutral. *Agroinzheneriya = Agroengineering*, 2022, vol. 24, no. 3, pp. 73–79 (in Russian).
4. Ivanitsky V. A., Tyulenev M. E. A model for analyzing single-phase earth connection modes in power supply networks. *Intelligent systems in production*, 2013, no. 2, pp. 185–189 (in Russian).
5. Novozhilov A. N., Isabekov Zh. B., Novozhilov T. A. Modeling of single-phase short-circuit currents in a cable network with an isolated neutral using Electronics Workbench. *PMU KHA-BARSHYSY*, 2017, p. 102 (in Russian).
6. Danilov M. I., Romanenko I. G. On the problem of determining current and voltage vectors in a distribution network according to the data of the AIS KUE. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya "Energetika" = Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 87–94 (in Russian).
7. Danilov M. I., Romanenko I. G. On the problem of determining the parameters of the distribution network according to the data of the AIS KUE. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta Seriya "Energetika" = Bulletin of South Ural State University. Series "Power Engineering"*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 5–14. Available at: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme> (accessed 2 November 2025) (in Russian).
8. Zalizny D. I., Savkova T. N., Evminov L. I. Modeling of voltage measurement circuits in high-voltage switchgear. *Vestnik Gomel'skogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta imeni P. O. Sukhogo*, 2025, no. 3, pp. 65–74 (in Russian).
9. Makarov E. F. *Handbook of 0.4–35 kV and 110–1150 kV*. Moscow, Papyrus PRO Publ., 2004, vol. 3. 679 p. (in Russian).
10. Chernobrovov N. V., Semenov V. A. Relay protection of energy systems. Moscow, Energoatomizdat Publ., 1998. 799 h. (in Russian).

Поступила 11.11.2025 г.