

УДК 621.311+621.317.32+621.3.012
DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-65-74

МОДЕЛИРОВАНИЕ ЦЕПЕЙ ИЗМЕРЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЙ В ВЫСОКОВОЛЬТНЫХ РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВАХ

Д. И. ЗАЛИЗНЫЙ, Т. Н. САВКОВА, Л. И. ЕВМИНОВ

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

Предложена физическая модель высоковольтного распределительного устройства с однофазными измерительными трансформаторами напряжения, которая основана на схеме замещения электрической сети и реальных малогабаритных понижающих трансформаторах. На базе модели создан лабораторный стенд, позволяющий изучать схемы соединения измерительных трансформаторов и анализировать измеряемые значения напряжений для различных режимов: нормального, обрыва проводов, коротких замыканий между фазами, однофазных замыканий на землю. Показано, что значения напряжений, 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 стенда в учебном процессе позволит повысить уровень подготовки студентов энергетических специальностей университетов и колледжей.

Ключевые слова: высоковольтный, распределительное устройство, трансформатор напряжения, измерение, физическая модель, лабораторный стенд.

Для цитирования. 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 (102). – С. 65–74. – DOI 10.62595/1819-5245-2024-3-65-74

MODELING OF VOLTAGE MEASUREMENT CIRCUITS IN HIGH-VOLTAGE SWITCHGEAR

D. I. ZALIZNY, T. N. SAVKOVA, L. I. EVMINOV

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

A physical model of a high-voltage switchgear with single-phase measuring voltage transformers is proposed, which is based on the equivalent circuit of an electric network and real small-sized step-down transformers. A laboratory stand has been created on the basis of the model, which allows studying the connection diagrams of measuring transformers and analyzing the measured voltage values for various modes: normal, wire breaks, short circuits between phases, single-phase short circuits to ground. It is shown that the voltage values obtained on the laboratory stand correspond to the theoretical expected values, but are not equal to them, since the measurements are performed for a real electric network and its asymmetry affects the measurement results. The use of the developed laboratory stand in the educational process will improve the level of training of students of energy specialties of universities and colleges.

Keywords: high-voltage, switchgear, voltage transformer, measurement, physical model, laboratory stand.

For citation. 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 (102), pp. 65–74 (in Russian). DOI 10.62595/1819-5245-2025-3-65-74

Введение

Основными элементами для контроля напряжений в высоковольтных распределительных устройствах (РУ) систем электроснабжения являются измерительные трансформаторы напряжения. Схемы их подключения на сегодняшний день фактически идентичны для различных классов напряжения. Применяются, как правило, только однофазные трансформаторы напряжения, по три штуки на каждую контролируемую точку трехфазной электрической сети. Их первичные обмотки соединяются по схеме «звезда с нулевым проводом», основные вторичные обмотки – по схеме «звезда с нулевым проводом», а дополнительные обмотки – по схеме «разомкнутый треугольник» (рис. 1).

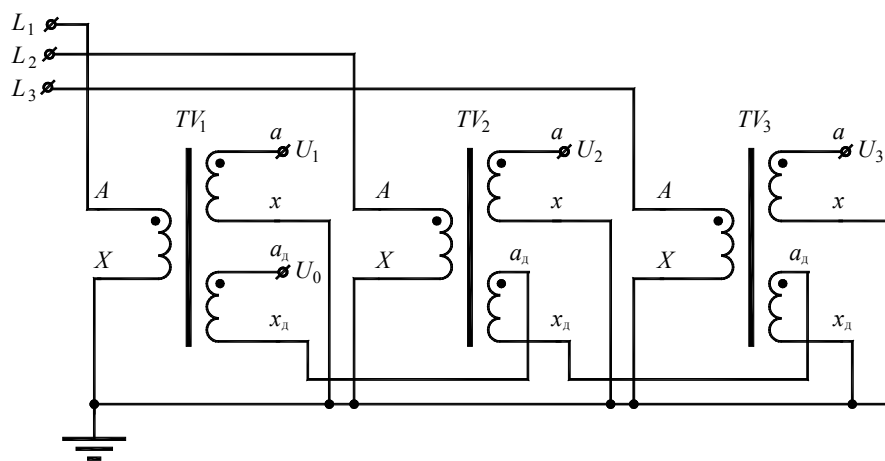


Рис. 1. Схема подключения однофазных измерительных трансформаторов напряжения

Схема работает следующим образом. Благодаря общей заземленной точке на выходах вторичных обмоток измерительных трансформаторов формируются значения фазных напряжений U_1 , U_2 , U_3 . Номинальное значение этих напряжений равно:

$\frac{100}{\sqrt{3}} = 57,7$ В. Первичные обмотки этих трансформаторов также оказываются под фазными напряжениями сети: $\frac{10000}{\sqrt{3}}$ В.

Дополнительные вторичные обмотки трансформаторов напряжения соединяются по схеме «разомкнутый треугольник» для контроля напряжения нулевой последовательности U_0 . В соответствии со вторым законом Кирхгофа такое соединение обмоток позволяет получить геометрическую сумму фазных напряжений, равную утроенному значению нулевой последовательности:

$$3\underline{U}_0 = \underline{U}_1 + \underline{U}_2 + \underline{U}_3. \quad (1)$$

Однако поскольку номинальное значение напряжения дополнительных вторичных обмоток равно: $\frac{100}{3} = \frac{100}{\sqrt{3} \cdot \sqrt{3}}$ В, то на выходе разомкнутого треугольника будет

формироваться значение напряжения, равное $\frac{3\underline{U}_0}{\sqrt{3}} = \sqrt{3}\underline{U}_0$.

В зависимости от вида аварии в электрической сети, значения напряжений, выдаваемые измерительными трансформаторами, меняются. Контролируя и анализируя эти значения, можно идентифицировать вид повреждения, а в некоторых случаях и место его возникновения. Корректная интерпретация значений напряжений в высоковольтной сети – важная составляющая при обучении студентов энергетических специальностей. Данная тематика представляет для многих студентов особую сложность и поэтому актуальны задачи создания наглядных и функциональных лабораторных установок для изучения связей и закономерностей между измеренными значениями напряжений и обусловивших эти значения процессами в системе электроснабжения.

Цель представленных исследований – создание физической модели цепей измерения напряжений в высоковольтных распределительных устройствах, а также лабораторной установки на базе этой модели.

Обзор литературных источников

Для организации процессов исследования электрических сетей с использованием программной библиотеки pandapower авторами [1] создана модель, для которой можно производить: расчет потоков мощности в ветвях сетей; определение тепловых режимов работы линий электропередачи; расчет токов коротких замыканий. Перечисленные виды расчетов позволили не только проверять режимы работы спроектированных сетей, но и оптимизировать их путем изменения топологии или подбора составляющих их элементов.

Авторы [2–6] для измерения параметров трехфазной распределительной электрической сети (РЭС) напряжением 0,4 кВ по параметрам векторов тока и напряжения используют данные от автоматизированной информационно-измерительной системы контроля и учета электроэнергии (АИИС КУЭ), а анализ режимов в РЭС выполняется по показаниям головного счетчика электроэнергии путем контроля изменения питающего напряжения или мощности, потребляемой абонентами. В этом случае невозможно смоделировать аварийный режим и исследовать его параметры.

В [7] описан процесс разработки физической модели распределительной сети, которая дает возможность проводить исследования электрических сетей различного сечения, длины и конфигурации, но нет возможности исследовать их параметры при аварийных режимах работы.

Физическая модель электрической сети для измерения значений напряжений

В качестве изучаемой будем использовать схему, показанную на рис. 2. Схема состоит из шин РУ 10 кВ, одного трехфазного ввода и трех отходящих кабельных линий КЛ₁, КЛ₂, КЛ₃.

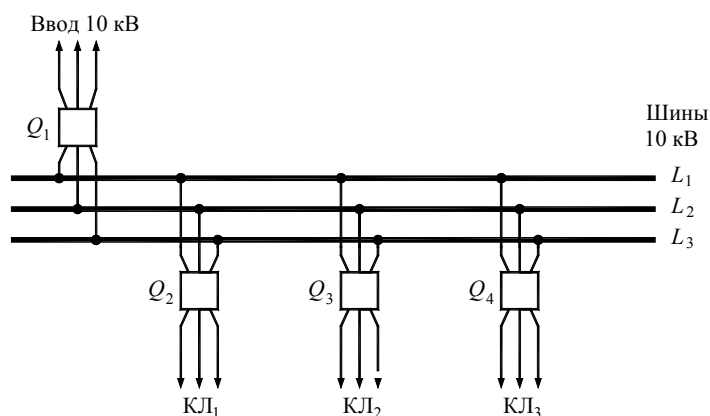


Рис. 2. Схема распределительного устройства для изучения

Примем следующий масштаб величин в физической модели: по напряжению 24 В на контактах модели будут соответствовать 10 кВ, а 5 мА тока в цепях модели будут соответствовать 5 кА. Тогда масштабирующий коэффициент K_R для расчета сопротивлений равен:

$$K_R = \frac{24}{\frac{10000}{\frac{0,005}{5000}}} = 2400. \quad (2)$$

Значения расчетных сопротивлений модели необходимо определять как произведение реальных значений этих сопротивлений на коэффициент K_R . Так, если принять, что ток трехфазного короткого замыкания (КЗ) на шинах РУ будет равен 5 кА, тогда реальное значение сопротивления системы X_c составит:

$$X_c = \frac{U_c}{\sqrt{3} \cdot I_{КЗ}} = \frac{10000}{\sqrt{3} \cdot 5000} = 1,2 \text{ Ом}, \quad (3)$$

где U_c – напряжение сети; $I_{КЗ}$ – ток трехфазного КЗ.

В этом случае сопротивление системы в физической модели $X_{с.м}$ будет равно:

$$X_{с.м} = X_c K_R = 1,2 \cdot 2400 = 2,9 \text{ кОм}. \quad (4)$$

Сопротивление кабеля в модели $X_{к.м}$ определяется по формуле

$$X_{к.м} = X_0 l K_R = X_k K_R, \quad (5)$$

где X_0 – удельное сопротивление кабеля Ом/км; l – длина кабеля, км; X_k – сопротивление кабеля, Ом.

Емкость кабеля в модели C_m можно рассчитать по значению его удельной зарядной мощности на основе уравнения

$$B = \frac{Q_0 l}{\left(\frac{U_c}{\sqrt{3}}\right)^2 \cdot K_R} = 2\pi f C_m, \quad (6)$$

где B – моделируемая проводимость от зарядной мощности в кабеле; Q_0 – удельная зарядная мощность кабеля, вар/км; l – длина кабеля, км; U_c – напряжение сети, В; f – частота сети.

Выразив C_m из (6), получим:

$$C_m = \frac{3Q_0 l}{2\pi f U_c^2 K_R}. \quad (7)$$

В табл. 1 приведены марки принимаемых для модели кабелей их длины, значения реальных и моделируемых сопротивлений.

Таблица 1

Расчетные параметры кабельных линий

Марка кабеля	Длина, км	X_k , Ом	Q_0 , квар	$X_{к.м}$, Ом	C_m , нФ
ААШВ-10 3 × 70	1	0,09	13,5	216	0,537
ААШВ-10 3 × 95	2	0,166	31,2	398	2,48
ААШВ-10 3 × 120	3	0,243	50,7	583	6,06

В табл. 1 обозначены величины: X_k – сопротивление кабеля; Q_0 – зарядная мощность кабеля; $X_{к.м}$ – сопротивление кабеля в физической модели; C_m – емкость кабеля в физической модели.

На рис. 3 показана схема физической модели для одной фазы.

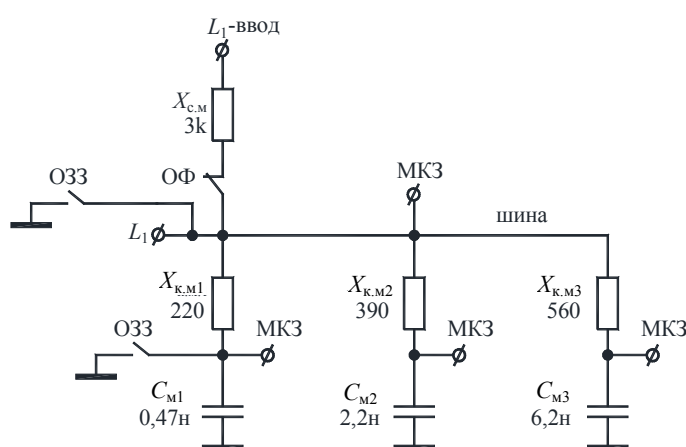


Рис. 3. Схема физической модели измерения напряжений для одной фазы

Схема работает следующим образом. Напряжение фазы подается относительно общей точки, изолированной от земли. Реактивные сопротивления $X_{с.м}$ и $X_{к.м}$ реализованы в схеме резисторами, так как предполагается, что все измерения будут осуществляться в установившемся режиме и только для напряжений. В этом случае по отношению к аварийным режимам активные сопротивления эквивалентны реактивным. Для имитации токов замыкания на землю в схеме применены конденсаторы, моделирующие емкости в кабеле, в соответствии с табл. 1. При этом общая точка конденсаторов изолирована от общей точки источника напряжения, что позволяет имитировать сеть с изолированной нейтралью.

В схеме предусмотрены аварийные режимы следующих видов:

- ОФ – обрыв фазы;
- МКЗ – междуфазное короткое замыкание;
- ОЗЗ – однофазное замыкание на землю.

МКЗ и ОЗЗ предусмотрены как на шинах РУ, так и на отходящих линиях.

Лабораторная установка для изучения цепей измерения напряжения в распределительных устройствах 10 кВ

Внешний вид лабораторного стенда, разработанного на кафедре «Электроснабжение» ГГТУ им. П. О. Сухого и реализующего описанную выше физическую модель, показан на рис. 4.

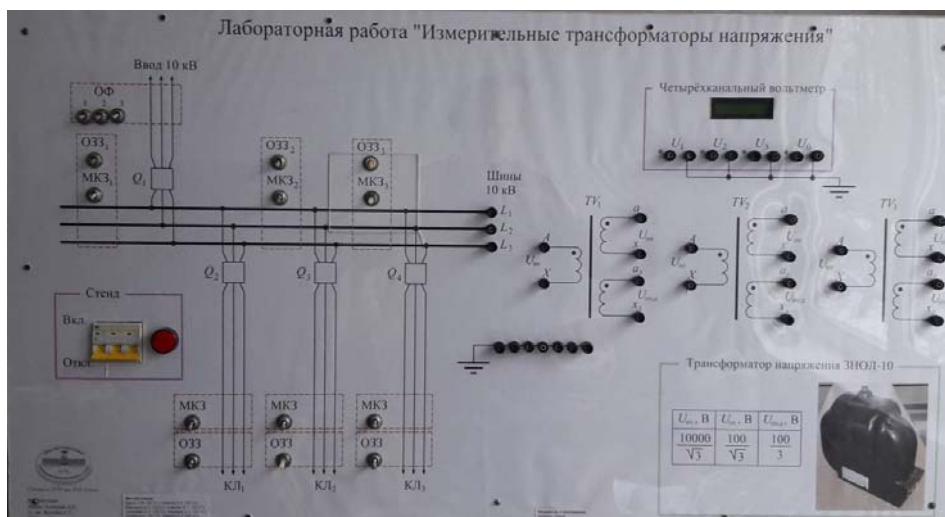


Рис. 4. Внешний вид лабораторного стенда
«Измерительные трансформаторы напряжения»

Стенд позволяет:

- выполнять сборку схемы соединения трансформаторов напряжения;
- измерять требуемые значения напряжений с помощью встроенного четырехканального вольтметра;
- имитировать аварийные режимы с помощью тумблеров.

В процессе выполнения лабораторной работы студенты должны собрать схему подключения трансформаторов напряжения, создать различные аварийные режимы, проанализировать показания вольтметров и сделать выводы о характере аварийных режимов. Также требуется построить векторные диаграммы для каждого из исследуемых режимов.

Анализ векторных диаграмм для напряжений на основе лабораторного стенда

Для проверки правильности показаний приборов в лабораторном стенде при различных аварийных режимах будем рассматривать схему замещения трехфазной сети с условными идеальными вольтметрами на шинах РУ, имитирующими измерительные трансформаторы напряжения (рис. 5).

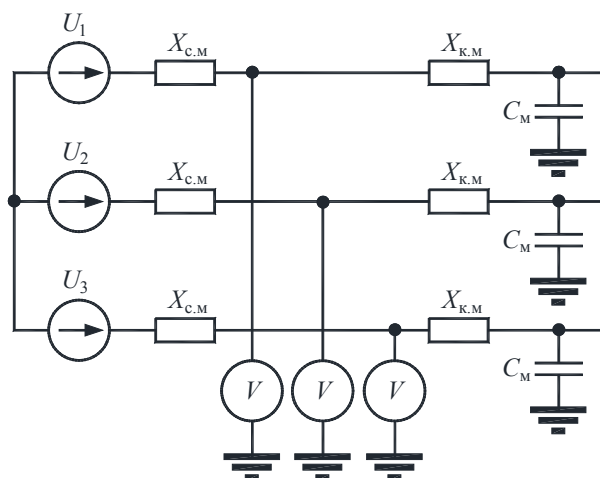


Рис. 5. Схема замещения трехфазной сети

Пусть в этой схеме будет одна отходящая кабельная линия, как показано на рис. 5, и значения сопротивлений равны соответствующим значениям сопротивлений в схеме на рис. 3. Сопротивление кабельной линии можно принять для любой из трех моделируемых на лабораторном стенде линий. Фазные значения напряжения U_1 , U_2 , U_3 будем считать равными номинальным напряжениям вторичных обмоток измерительных трансформаторов, т. е. $100/\sqrt{3} = 57,7$ В.

Отличие схемы разработанного лабораторного стенда от данной схемы заключается в конечных значениях сопротивлений измерительных трансформаторов и их влиянии на результаты.

Вначале рассмотрим режим обрыва фазы № 3. В этом случае на шинах РУ будет присутствовать линейное напряжение между фазами № 1 и 2, которое будет измерено двумя условными вольтметрами, включенными последовательно через цепь заземления. Показания этих вольтметров станут равны половине линейного напряжения, т. е. $0,5 \cdot \sqrt{3} = 0,87$ от фазного напряжения, что составит $0,87 \cdot 57,7 = 50,2$ В. Векторная диаграмма для этого случая показана на рис. 6, а. Поскольку векторы U'_1 и U'_2 после обрыва фазы находятся в противофазе, их сумма равна нулю. Это значит, что напряжение нулевой последовательности будет равно нулю: $3U_0 = 0$.

Далее рассмотрим короткое замыкание между фазами № 2 и 3 на шинах РУ. В этом режиме второй и третий условные вольтметры окажутся соединены между собой и покажут половину суммы векторов фазных напряжений. Так как сумма фазных векторов равна значению одного фазного вектора, то результат будет равен: $U'_2 = U'_3 = 0,5 \cdot 57,7 = 28,9$ В. Первый вольтметр должен показывать фазное значение напряжения: $U'_1 = 57,7$ В. Векторная диаграмма для данного режима приведена на рис. 6, б. Напряжение нулевой последовательности в этом случае также будет стремиться к нулю, так как сумма всех векторов стремится к нулю.

Следующий режим – короткое замыкание между фазами № 2 и 3 на кабельной линии. Здесь ситуация похожа на предыдущую, только второй и третий условные вольтметры покажут более высокие значения напряжения благодаря падению напряжения на сопротивлениях кабелей (рис. 6, в).

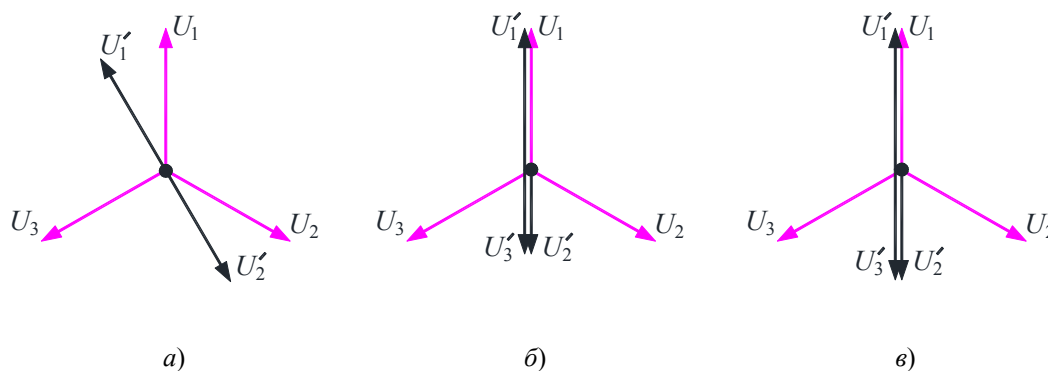


Рис. 6. Векторные диаграммы напряжений:

а – обрыв фазы № 3 на вводе; б – короткое замыкание между фазами № 2 и 3 на шинах РУ;
в – короткое замыкание между фазами № 2 и 3 на кабельной линии

В случае однофазного замыкания на землю на фазе № 3 шин РУ третий условный вольтметр окажется «закороченным» и будет показывать ноль. Оставшиеся вольтметры покажут разность потенциалов между фазными напряжениями на непо-

врежденных фазах и потенциалом фазы № 3, который будет приложен к заземлению (рис. 7, а). Это значит, что показания условных вольтметров будут близки к номинальному линейному напряжению: $U'_1 = U'_2 = 100$ В.

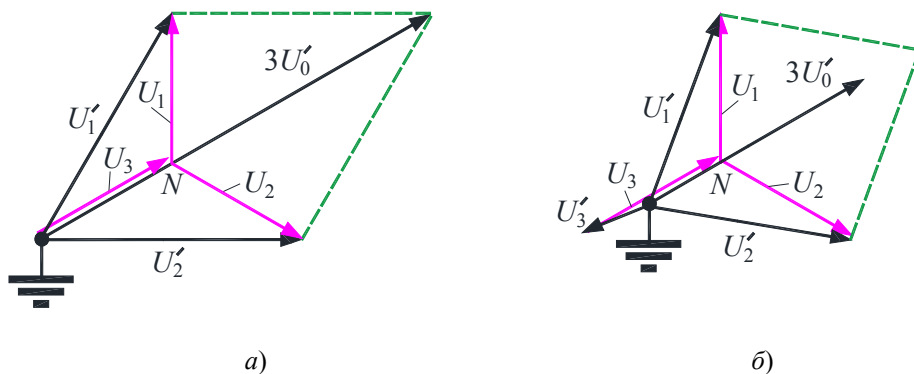


Рис. 7. Векторные диаграммы напряжений:

а – замыкание на землю фазы № 3 на шинах РУ;

б – замыкание на землю фазы № 3 на кабельной линии

Из рис. 7, а следует, что фазовый сдвиг между векторами U'_1 и U'_2 в рассматриваемом режиме равен 60° . Тогда значение напряжения нулевой последовательности составит: $3U'_0 = 2U'_1 \cdot \cos 30^\circ = 2 \cdot 100 \cdot 0,866 = 173,2$ В. Учитывая, что номинальное значение напряжения дополнительной обмотки измерительного трансформатора равно $100/3$, т. е. в $\sqrt{3}$ раз меньше, чем на основной обмотке (ее коэффициент трансформации равен $100/\sqrt{3}$), значение $3U'_0$ составит: $173,2/\sqrt{3} = 100$ В.

При однофазном замыкании на землю на кабельной линии (фаза № 3) условный вольтметр № 3 уже не будет закорочен и покажет падение напряжения на сопротивлении кабеля U'_3 , вызванное протеканием по нему тока замыкания на землю. Потенциал земли в этом случае переместится по направлению к потенциалу нейтрали (рис. 7, б), однако не точно по вектору фазного напряжения U_3 , а несколько в стороне от него, так как ток замыкания на землю имеет емкостный характер.

Из рис. 7, б следует, что показания первого и второго условных вольтметров снизятся, и значение $3U'_0$ также будет ниже, поскольку вектор U'_3 направлен по отношению к вектору $3U'_0$ под углом, близким к 180° .

Ожидаемые значения напряжений для рассмотренных режимов сведены в табл. 2.

Таблица 2

Ожидаемые значения напряжений

Режим работы схемы	Показания вольтметров, В			
	U_1	U_2	U_3	U_0
Нормальный	57,7	57,7	57,7	0
Обрыв фазы № 3	50,2	50,2	0	0
Короткое замыкание между фазами № 2 и 3 на шинах РУ	57,7	28,9	28,9	0
Однофазное замыкание на землю фазы № 3 на шинах РУ	100	100	0	100

Значения напряжений, измеренные четырехканальным вольтметром лабораторного стенда для различных режимов, приведены в табл. 3.

Таблица 3

Результаты измерений на лабораторном стенде

Режим работы схемы	Показания вольтметров, В			
	U_1	U_2	U_3	U_0
Нормальный	57,9	57,0	60,4	3,9
Обрыв фазы № 3	50,8	46,5	3,6	1,2
Короткое замыкание между фазами № 2 и 3 на шинах РУ	62,7	24,7	24,2	3,5
Короткое замыкание между фазами № 2 и 3 на КЛ	59,5	30,4	40,0	3,9
Однофазное замыкание на землю фазы № 3 на шинах РУ	81,9	95,2	1,8	84,4
Однофазное замыкание на землю фазы № 3 на КЛ	74,5	81,6	22,0	56,4

Из сравнения значений в табл. 2 и 3 следует, что показания вольтметров на лабораторном стенде несколько отличаются от их ожидаемых значений, хотя тенденция к изменению значений напряжений сохраняется. Это объясняется несимметричностью напряжений в сети и характеризуется ненулевым значением напряжения нулевой последовательности в нормальном режиме работы схемы. Данный фактор соответствует реальным процессам в системах электроснабжения, поэтому разработанный лабораторный стенд можно рассматривать как физическую модель цепей измерения напряжений в высоковольтных РУ.

Заключение

Разработанный на кафедре «Электроснабжение» лабораторный стенд «Измерительные трансформаторы напряжения в РУ 10 кВ» является физической моделью, позволяющей имитировать работу однофазных измерительных трансформаторов напряжения в РУ 10 кВ при различных режимах: нормальном, обрывах фаз, коротких замыканий между фазами, однофазных замыканий на землю. Использование этого стенда в учебном процессе позволит повысить уровень подготовки студентов энергетических специальностей университетов и колледжей, а также может быть полезно для научных исследований, проводимых магистрантами и аспирантами.

Литература

1. Ильичев, В. Ю. Исследование режимов работы электрических сетей с использованием программной библиотеки pandapower / В. Ю. Ильичев, Ю. М. Жукова // Научное обозрение. Технические науки. – 2024. – № 1. – С. 18–22. – URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1453> (дата обращения: 10.02.2025).
2. Оморев, Т. Т. Определение параметров распределительных сетей 0,4 кВ по данным АСКУЭ / Т. Т. Оморев, Б. К. Такырбашев, Р. Ч. Осмонова // Энергетик. – 2017. – № 6. – С. 37–40. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme> (дата обращения: 10.02.2025).
3. Оморев, Т. Т. Параметрическая идентификация распределительной сети в составе АСКУЭ / Т. Т. Оморев, Р. Ч. Осмонова, Т. Ж. Койбагаров // Вестник ЮУрГУ. Серия «Энергетика». – 2018. – Т. 18, № 1. – С. 46–52. – DOI 10.14529/power180106

4. Кононов, Ю. Г. Уточнение параметров участков линий сети среднего напряжения по данным синхронных измерений / Ю. Г. Кононов, О. С. Рыбасова, В. С. Михайленко // Известия высших учебных заведений. Электромеханика. – 2018. – Т. 61, № 1. – С. 77–84. – URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme> (дата обращения: 10.02.2025).
5. 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. – DOI 10.14529/power190410
6. 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).
7. Алаторцев, С. А. Физическая модель карьерной распределительной сети / С. А. Алаторцев, К. Б. Мусс, Н. К. Смирнов // Записки Горного института. – 1966. – Т. 53, № 1. – С. 77. – URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view> (дата обращения: 10.02.2025).

References

1. Pl'ichev V. Yu., Zhukova Yu. M. Research for the operating modes of electrical networks using the Pandapower software library. *Nauchnoe obozrenie. Tekhnicheskie nauki*, 2024, no. 1, pp. 18–22. URL: <https://science-engineering.ru/ru/article/view?id=1453> (accessed 10.02.2025) (in Russian).
2. Omorov T. T., Takyrbashev B. K., Osmonova R. Ch. Determination of parameters of distribution networks 0.4 kV according to ASKUE. *Energetik*, 2017, no. 6, pp. 37–40. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme> (accessed 10.02.2025) (in Russian).
3. Omorov T. T., Osmonova R. Ch., Koibagarov T. Zh. Parametric identification of the distribution network as part of ASKUE. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energetika = Bulletin of the South Ural State University. Energy series*, 2018, vol. 18, no. 1, pp. 46–52 (in Russian). DOI 10.14529/power180106
4. Kononov Yu. G., Rybasova O. S., Mikhailenko V. S. Clarification of the parameters of sections of the medium voltage network according to synchronous measurements. *Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedenii. Elektromekhanika*, 2018, vol. 61, no. 1, pp. 77–84. URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme> (accessed 10.02.2025) (in Russian).
5. Danilov M. I., Romanenko I. G. To the problem of determining current vectors and voltage in the distribution network according to AIIS KUE. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energetika = Bulletin of the South Ural State University. Energy series*, 2019, vol. 19, no. 4, pp. 87–94 (in Russian). DOI 10.14529/power190410
6. Danilov M. I., Romanenko I. G. To the problem of determining the parameters of the distribution network according to AIIS KUE. *Vestnik Yuzhno-Ural'skogo gosudarstvennogo universiteta. Seriya Energetika = Bulletin of the South Ural State University. Energy series*, 2020, vol. 20, no. 2, pp. 5–14 (in Russian). URL: <https://cyberleninka.ru/article/n/k-probleme> (accessed 10.02.2025).
7. Alatorsev S. A., Muss K. B., Smirnov N. K. Physical model of the career distribution network. *Zapiski Gornogo instituta*, 1966, vol. 53, no.1, p. 77. URL: <https://pmi.spmi.ru/pmi/article/view> (accessed 10.02.2025) (in Russian).

Поступила 05.05.2025 г.