



ОЦЕНКА ДОСТОВЕРНОСТИ МАТЕМАТИЧЕСКОЙ МОДЕЛИ СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,4 кВ В MATLAB SIMULINK НА ПРИМЕРЕ ИССЛЕДОВАНИЯ УСТАНОВИВШЕГОСЯ РЕЖИМА ОДНОФАЗНОГО КОРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

Лансберг А.А.¹, Виноградов А.В.^{1,2}, Панфилов А.А.²

¹Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ, г. Москва, Россия

²Орловский государственный аграрный университет, г. Орел, Россия

Резюме: *АКТУАЛЬНОСТЬ.* В настоящее время моделирование является одним из наиболее достоверных способов изучения нормальных и аварийных режимов работы электрических сетей. В связи с этим, была разработана математическая модель сельской электрической сети 0,4 кВ в программе MATLAB Simulink. *ЦЕЛЬ.* Оценка достоверности получаемых с помощью моделирования в MATLAB Simulink параметров режимов работы сельской электрической сети 0,4 кВ путем оценки значений тока установившегося однофазного короткого замыкания на разном расстоянии от трансформаторной подстанции. *МЕТОДЫ.* Токи, полученные на разработанной в MATLAB Simulink модели электрической сети 0,4 кВ, были сравнены с токами, полученными с применением других методов расчета (по ГОСТ 28249-93, упрощенному методу петли «фаза-ноль» и математической модели «Проект РЗА»). *РЕЗУЛЬТАТЫ.* Было выявлено, что расхождение результатов в отдельных точках составило 9-11%. При моделировании в MATLAB Simulink режима установившегося однофазного короткого замыкания установлено, что напряжение поврежденной фазы *A* уменьшается до 0 В, при этом напряжения на двух оставшихся неповрежденных фаз увеличиваются в 1,4-1,5 раза, т.е. в $\sqrt{2}$ раз до значений 335-354 В при замыкании на выводах трансформатора и до значений 329-338 В при замыканиях за участком линии электропередачи 0,4 кВ. *ВЫВОДЫ.* Полученная математическая модель сельской электрической сети 0,4 кВ в программе MATLAB Simulink может использоваться для исследования нормальных и аварийных режимов работы, исследования режимов совместной работы возобновляемых источников энергии с централизованной сетью, процессов включения резервных источников генерации.

Ключевые слова: моделирование, электрическая сеть 0,4 кВ, однофазное короткое замыкание, MATLAB Simulink, трансформатор, линия электропередачи, энергосистема, фазное напряжение, соединение обмоток.

Для цитирования: Лансберг А.А., Виноградов А.В., Панфилов А.А. Оценка достоверности математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в Matlab Simulink на примере исследования установившегося режима однофазного короткого замыкания // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2023. Т.25. № 6. С. 14-28. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28.

ASSESSMENT OF THE RELIABILITY OF THE MATHEMATICAL MODEL OF THE 0.4 kV RURAL ELECTRIC NETWORK IN MATLAB SIMULINK ON THE EXAMPLE OF A STUDY OF THE STEADY-STATE MODE OF A SINGLE-PHASE SHORT CIRCUIT

Lansberg ¹A.A., Vinogradov ¹A.V., Panfilov ²A.A.

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

²Orel State Agrarian University, Orel, Russia

Abstract: *PURPOSE.* Currently, modeling is one of the most reliable ways to study normal and emergency modes of operation of electrical networks. In this regard, a mathematical model of the 0.4 kV rural electric network was developed in the MATLAB Simulink program. *PURPOSE.* Evaluation of the accuracy of the parameters of the operating modes of the 0.4 kV rural electric

network obtained by modeling in MATLAB Simulink by estimating the values of the steady-state single-phase short circuit current at different distances from the transformer substation. METHODS. The currents obtained using the 0.4 kV electrical network model developed in MATLAB Simulink were compared with the currents obtained using other calculation methods (according to GOST 28249-93, the simplified phase-zero loop method and the mathematical model «Project RZA»). RESULTS. It was revealed that the discrepancy in the results at individual points was 9-11%. When simulating a steady-state single-phase short circuit in MATLAB Simulink, it was found that the voltage of the damaged phase A decreases to 0 V, while the voltages on the two remaining intact phases increase by 1.4-1.5 times, i.e. by a factor of 2 to the values of 335-354 V when short-circuiting at the transformer terminals and to the values of 329-338 V when short-circuiting behind a section of a 0.4 kV power line. CONCLUSIONS. The resulting mathematical model of a 0.4 kV rural electric network in the MATLAB Simulink program can be used to study normal and emergency operating modes, study the modes of joint operation of renewable energy sources with a centralized network, and the processes of switching on backup generation sources.

Key words: simulation, 0.4 kV electrical network, single-phase short circuit, MATLAB Simulink, transformer, power line, power system, phase voltage, connection of windings.

For citation: Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Panfilov A.A. Assessment of the reliability of the mathematical model of the 0.4 kV rural electric network in Matlab Simulink on the example of a study of the steady-state mode of a single-phase short circuit. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2023; 25 (6): 14-28. doi:10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28.

Введение (Introduction)

В настоящее время большое количество работ как зарубежных, так и отечественных ученых направлено на моделирование электрических сетей, которое является одним из наиболее достоверных способов изучения процессов, происходящих в них. Например, в работе [1] произведено моделирование неисправностей в программном комплексе *MATLAB/Simulink* на примере действующей в Нигерии распределительной сети, питающей от двухтрансформаторной подстанции 132/33 кВ с единичной мощностью трансформатора 30 МВА, с целью оценки её надежности в разных режимах. Автором произведено моделирование симметричных и несимметричных коротких замыканий. Оценено, что при двухфазном коротком замыкании индексы надежности распределительной сети SAIDI и SAIFI составляют, соответственно, 1,125 о.е. и 8 о.е., при трехфазном коротком замыкании – 2,7 о.е. и 4 о.е., а при однофазном замыкании на землю – 3 о.е. и 5 о.е.

Азербайджанскими учеными для участка энергосистемы 110 кВ Азербайджана, состоящей из кольцевой электрической сети с семью подстанциями, была произведена оценка нагрузочных потерь в зависимости от температуры окружающей среды от 25,1°C до 40,9°C, что позволило выявить изменение суммарных потерь исследуемой схемы энергосистемы с 4,4 МВт до 4,67 МВт, т.е. на 6,3% [2].

Коллективом южноамериканских ученых в источнике [3] произведено исследование влияния высших гармоник и несимметрии на работу электродвигателей. На примере электрической машины мощностью 37,3 кВт выявлено, что только ввиду гармоник из-за дополнительных потерь возникает снижение КПД на 2%, а вызванное гармониками искажение качества электроэнергии приводит к снижению КПД на 4%.

Иранскими учеными в источнике [4] в программе *MATLAB/Simulink* произведен анализ качества электроэнергии на примере распределительной сети с частотой 50 Гц, питающейся от энергосистемы напряжением 33 кВ и мощностью 50 МВА по линии протяженностью 33 кВ через трансформатор 33/11 кВ с номинальной мощностью 20 МВА. В работе исследовано влияние на синусоидальную форму кривой напряжения и значение фазных напряжений процессов включения различных типов нагрузок на стороне 11 кВ: рабочей нагрузки, нелинейной и несинусоидальной нагрузки, аварийной нагрузки, индуктивной нагрузки, представленной асинхронным электродвигателем. Для каждого из указанных режимов учеными приведены осциллограммы.

В работе [5] польскими учеными было произведено сравнение результатов выработки электроэнергии солнечной панелью *ST-STP020S-12/Cb*, установленной в районе с солнечной инсоляцией 1187-1400 кВт·ч/м²·год, с аналогичной моделью в программе *MATLAB/Simulink*. Результаты моделирования фактически совпали с реальной выработкой солнечной панели за год, составившей 20 кВт·ч год, при этом годовое моделирование в программе осуществлялось порядка 16 часов. В работе [6] в программе *MATLAB/Simulink*

предложена модель солнечной панели мощностью 55 Вт с номинальным током 3,5 А и выходным напряжением 18,5 В постоянного тока с уровнем солнечной инсоляции 1000 Вт/м² и температурой 25°C, позволяющая в простейшем виде исследовать выдачу солнечной панели на изменяющуюся нагрузку. В свою очередь, моделирование тонкопленочных солнечных элементов со структурой халькопирита CuInSe₂ в программе *COMSOL Multiphysics* позволило выявить, что при солнечной инсоляции 8-10 кВт/м² КПД установки составляет 14,8% [7], при этом tandemный солнечный модуль из того же материала позволяет при среднем уровне солнечной инсоляции в Минске позволяет поддерживать температуру модуля 2,35°C в январе и не более 14,23°C в июле благодаря стабилизации температуры обратной стороны подложки предлагаемого устройства [8]. Также белорусскими учеными были разработана новая модель фотоэлектрического модуля типа SF-P672300, состоящая из 72 фотоэлементов, и *OSP XTP 250* [9] для программы *MATLAB/Simulink*, работоспособность по выработке электричества от которых была сравнена с действующими установками таких же типов, при этом погрешность составила не более 15% и 12%, соответственно.

Для работы возобновляемых источников энергии также актуальным вопросом является исследование работоспособности систем накопления электроэнергии. В работе [10] путем моделирования в *MATLAB Simulink* произведена оценка эффективности работы гибридного накопителя при заданном графике нагрузки. Отмечено, что при выборе накопителей необходимо учитывать не только их стоимость, но и параметры сети. На примере модели свинцово-кислотной батареи *Delta GEL-12-55* выявлено, что оптимальное состояние заряда для наибольшего срока службы составляет не более 95%, что позволит прослужить батарее более 1200 циклов заряда-разряда или порядка 17 лет [11]. Также выявлено, что при выходе из строя одной секции в указанной ранее батарее, произойдет уменьшение емкости батареи на 10%, что вызывает сокращение времени разряда исследуемой аккумуляторной батареи на 2,9% [12].

Наиболее близкой к предлагаемой является работа по оценке тока однофазного короткого замыкания в наиболее удаленной точке электрической сети 0,4 кВ, выполненная российскими учеными [13] на полигоне ПАО «Россети Урал»-«Челябэнерго». Опытная сеть имеет небольшую протяженность в 481 м и включает 2 типа провода: СИП-2 3х30+1х50 и АС-35. Для указанной линии разработана идентичная модель в *MATLAB Simulink* [14], но её недостатком является то, что она содержит всего 2 измерительных блока в точке короткого замыкания и на выводах 0,4 кВ понижающего трансформатора, что не дает возможности исследования распределения напряжения вдоль линии при установившихся аварийных несимметричных режимах. При этом разработанная авторами аналогичная физическая модель [15] характеризуется теми же недостатками, что и математическая, а также не является наглядной и не отвечает требованиям электробезопасности при имитации аварийных режимов ввиду ее питания от трансформатора ТС-0,5-380/177 В.

Следует отметить, что любая модель отражает определённое состояние оборудования, в том числе сопротивление контактов коммутационных аппаратов, сопротивление проводов, которое изменяется как в зависимости от сроков нахождения в эксплуатации, так и от температуры [16]. Оценка влияния контактов, сопротивления проводов в перспективе позволит улучшить показатели моделирования, не только для определения потерь электроэнергии [17, 18], но и для расчёта токов короткого замыкания. Для этого важно повышать точность расчета эквивалентных сопротивлений систем электроснабжения [19].

В данной работе приводится анализ собственной разработанной математической модели в программном комплексе *MATLAB Simulink* и проверка ее достоверности.

Цель исследования (*The purpose of the study*) заключается в оценке достоверности разработанной математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ путем сравнения значений токов однофазного короткого замыкания в ней с расчетными значениями, полученными с применением других методов и моделей.

Материалы и методы (*Materials and methods*)

Для проведения исследования были разработаны 2 компьютерные модели сельской электрической сети 0,4 кВ в программе *MATLAB Simulink*, представленные на рисунках 1-2. Представленные модели были выполнены с использованием положений и функциональных блоков, рассмотренных в источнике [20].

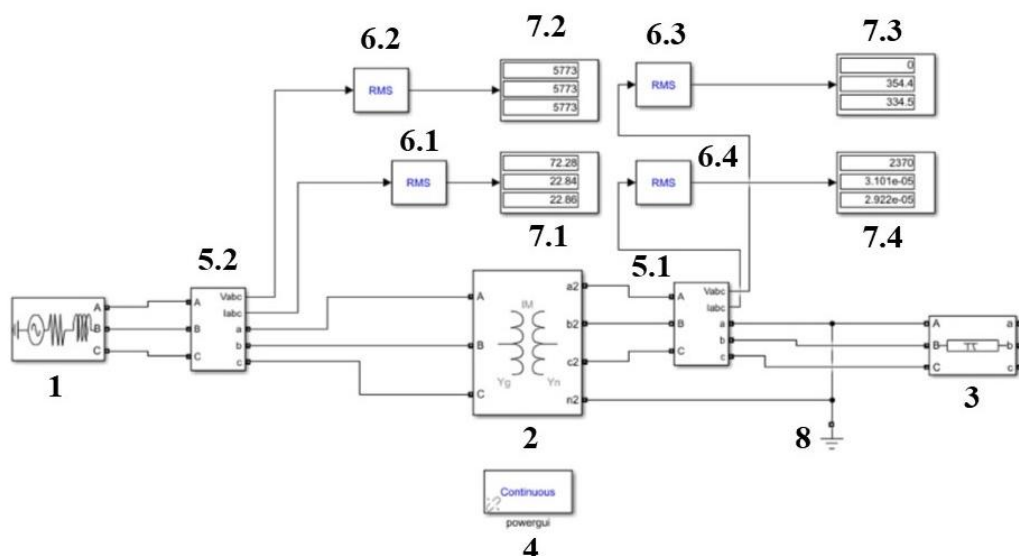


Рис. 1. Модель сельской электрической сети 0,4 кВ при работе в установившемся режиме однофазного короткого замыкания за силовым трансформатором (1 – трехфазный источник с номинальным напряжением 10 кВ; 2 – двухобмоточный силовой трансформатор 10/0,4 кВ; 3 – модель фазных проводов линии электропередачи 0,4 кВ; 4 – блок PowerGui; 5.1, 5.2 – трехфазные блоки измерения токов и напряжений; 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 – блоки вычисления среднеквадратичного значения; 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 – дисплеи; 8 – электрическое заземление)

Fig.1. A model of a 0.4 kV rural electrical network when operating in a stable single-phase short circuit mode behind a power transformer (1 – a three-phase source with a rated voltage of 10 kV; 2 – a 10/0.4 kV two-winding power transformer; 3 – a model of 0.4 kV phase wires of a power transmission line; 4 – a PowerGUI unit; 5.1, 5.2 – three-phase units for measuring currents and voltages; 6.1, 6.2, 6.3, 6.4 – units for calculating the RMS value; 7.1, 7.2, 7.3, 7.4 – displays; 8 – electrical grounding)

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

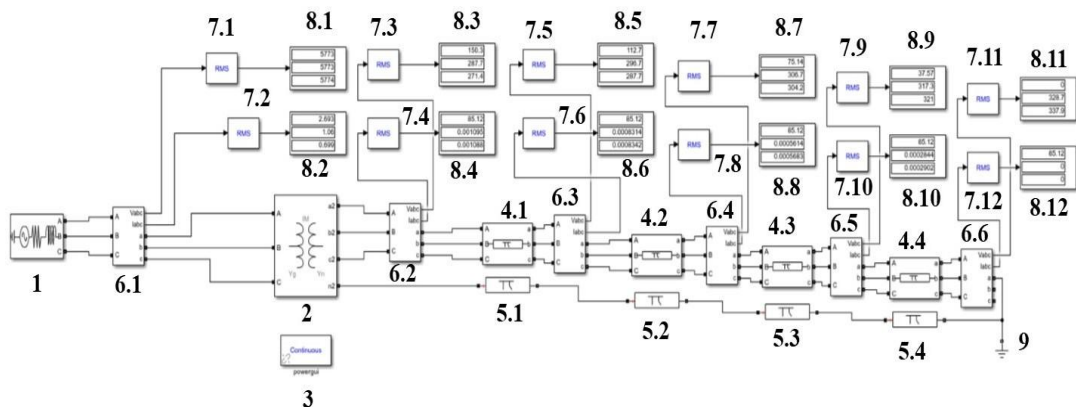


Рис. 2. Модель сельской электрической сети 0,4 кВ при работе в установившемся режиме однофазного короткого замыкания в наиболее удаленной точке линии электропередачи (1 – трехфазный источник с номинальным напряжением 10 кВ; 2 – двухобмоточный силовой трансформатор 10/0,4 кВ; 3 – блок PowerGui; 4.1-4.4 – модель фазных проводов линии электропередачи 0,4 кВ; 5.1-5.4 – модель нейтрального провода линии электропередачи 0,4 кВ; 6.1-6.6 – трехфазные блоки измерения токов и напряжений; 7.1-7.12 – блоки вычисления среднеквадратичного значения; 8.1-8.12 – дисплеи; 9 – электрическое заземление)

Fig. 2. A model of a rural 0.4 kV electrical network when operating in a stable single-phase short circuit mode at the most remote point of the power line (1 – a three-phase source with a rated voltage of 10 kV; 2 – a 10/0.4 kV two-winding power transformer; 3 – a PowerGUI unit; 4.1-4.4 – a model of phase wires of a 0.4 kV power line 5.1-5.4 – model of the neutral wire of the power line 6.1-6.6 – three-phase units for measuring currents and voltages; 7.1-7.12 – units for calculating the RMS value; 8.1-8.12 – displays; 9 – electrical grounding)

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

Следует отметить, что в настоящей работе были сделаны отступления от математической модели, представленной в источнике [20]. Было принято решение не использовать блок *Three-Phase Fault* для моделирования аварийных режимов, вызванных короткими замыканиями, а непосредственно использовать электрическое соединение фазного и нейтрального проводников с блоком электрическое заземление, что позволяет создавать токи нулевой последовательности в месте электрического контакта и снизить время моделирования при исследовании установившихся режимов работы.

На рисунке 1 представлена математическая модель сельской электрической сети 0,4 кВ, предназначенная для моделирования однофазного короткого замыкания за силовым трансформатором 10/0,4 кВ. Она содержит энергосистему 10 кВ, силовой трансформатор 10/0,4 кВ, блоки вычисления среднеквадратичного значения и дисплеи отображения информации.

В свою очередь, математическая модель, представленная на рисунке 2, отличается от представленной на рисунке 1 модели только наличием блоков фазных и нейтрального проводников, а также большим количеством измерительных блоков, которые установлены через каждые 1/4 длины моделируемой линии электропередачи 0,4 кВ. При этом электрическое соединение блоков фазного 4.4 и нейтрального 5.4 проводников для моделирования однофазного короткого замыкания непосредственно выполнено на измерительном блоке 6.6.

Рассмотрим параметры электрического оборудования, которые были использованы при моделировании. В качестве основного параметра питающей системы было принято значение тока трехфазного короткого замыкания на вводе 10 кВ трансформатора со значением 1 кА, потому что приблизительно токи трехфазного короткого замыкания данной величины являются характерными для сельских электрических сетей 10 кВ [21]. В качестве провода для линии 0,4 кВ был выбран проводник марки А-35 в связи с тем, что среди голых неизолированных проводов он является наиболее распространенным сечением и типом провода в сельских электрических сетях 0,4 кВ. В некоторых линиях его протяженность достигает 40-100% от общей протяженности всех проводников без учета потребительских отпаяк, т.е. «перекидок» [22]. Протяженность линии при моделировании принята равной до 1000 м, так как наибольшая средняя протяженность воздушных линий электропередачи 0,4 кВ в Центральном и Приволжском Федеральных Округах РФ – 985 м [23].

Следует отметить, что в качестве питающего силового трансформатора (СТ) можно было использовать ТМ-100, но для сравнения не только с расчетными методами, но и другой математической моделью [24] в качестве прототипа источника питания будет использоваться трансформатор мощностью 250 кВА.

При этом трансформаторы мощностью 250 кВА широко распространены и их количество в электросетевой организации филиале ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго» составляет 802 единицы от общего количества электроустановок 6206, т.е. 13% [25].

Для сравнения адекватности данных, получаемых с помощью разработанной математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в программном комплексе MATLAB Simulink произведем определение численных значений токов однофазных коротких замыканий по другим методам:

1) по упрощенному методу петли фаза-ноль, предложенному И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской¹, который позволяет определить значение тока однофазного короткого замыкания за счет алгебраического сопротивления элементов до точки короткого замыкания;

2) по методике ГОСТ 28249-93 «Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ», предполагающим определение тока однофазного короткого замыкания геометрическим сложением активного и реактивного сопротивлений элементов до точки короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ;

3) с использованием математической модели «Проект РЗА» [24], которая для имитации аварийного режима предполагает использование метода симметричных составляющих, в ходе которого все элементы схемы задаются сопротивлениями и указывается базисное напряжение модели, что позволяет осуществить расчет фазных токов и других электрических параметров.

Так, расчет токов однофазного короткого замыкания по методу И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской производится по формуле (1):

¹ Электроснабжение сельского хозяйства / И.А. Будзко, Т.Б. Лещинская, В.И. Сукманов. – М.: Колос, 2000. – 536 с.: ил

$$I_{\text{кз}}^1 = \frac{U_{\phi}}{\frac{Z_{\text{T}}}{3} + Z_{\phi-0}}, \text{ А} \quad (1)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети, В;

Z_{T} – полное сопротивление трансформатора току однофазного замыкания на корпус, Ом;

$Z_{\phi-0}$ – полное сопротивление петли фаза-нуль от трансформатора до точки КЗ, Ом.

В свою очередь, в электроустановках, питающихся от понижающих трансформаторов напряжением до 1 кВ значение тока однофазного короткого замыкания в соответствии с ГОСТ 28249-93 рассчитывается по формуле (2):

$$I_{\text{кз}}^1 = \frac{\sqrt{3} \cdot U_{\text{ср.нн}}}{\sqrt{(2r_1 + r_0)^2 + (2x_1 + x_0)^2}}, \text{ А} \quad (2)$$

где $U_{\text{ср.нн}}$ – среднее номинальное напряжение сети, в которой произошло замыкание, В;

r_1, x_1 – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления прямой последовательности цепи КЗ, Ом,

r_0, x_0 – соответственно суммарное активное и суммарное индуктивное сопротивления нулевой последовательности цепи КЗ, Ом.

Следует отметить, что режим однофазного короткого замыкания, согласно ГОСТ 26522-85 «Короткие замыкания в электроустановках. Термины и определения», это режим короткого замыкания на землю в трехфазной электроэнергетической системе с глухо или эффективно заземленной нейтралью силового трансформатора, при котором с землей соединяется только одна фаза. В связи с этим, согласно теории переходных процессов, примем в настоящем исследовании за особую (поврежденную) фазу А, т.е. параметры которой будут отличаться от параметров других фаз, и отметим то, что по ней будет протекать ток короткого замыкания, при этом в других он будет отсутствовать, т.е. они будут работать в режиме холостого хода. Также следует отметить, что в точке короткого замыкания напряжение поврежденной фазы А будет равно 0 В.

Результаты исследования (Research results)

Результаты расчетов тока однофазного короткого замыкания с использованием двух расчетных методов и двух математических моделей представлены на рисунке 3.

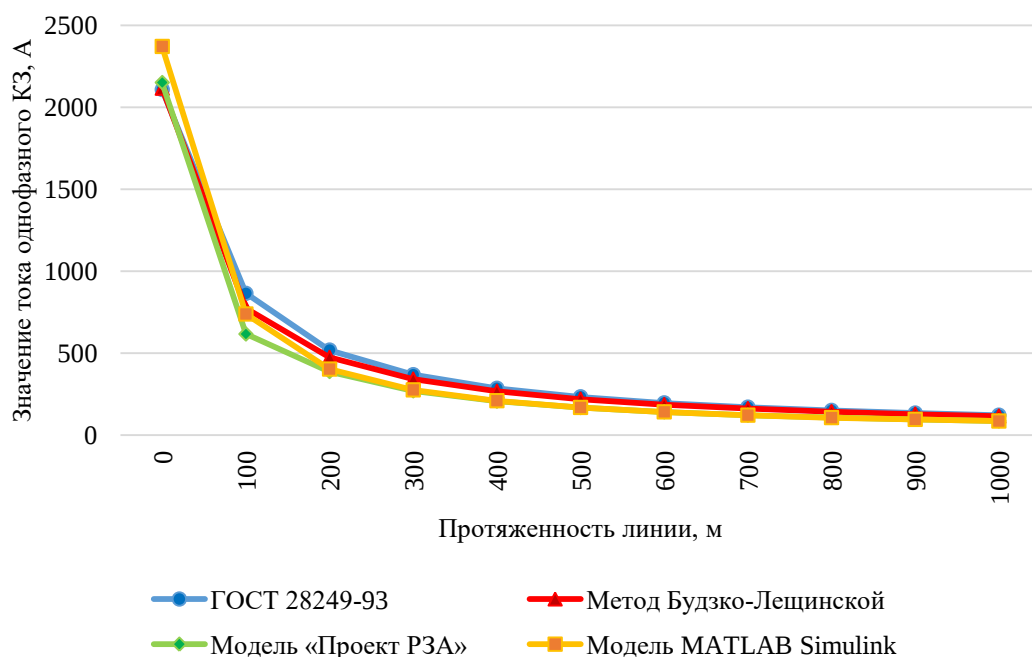


Рис. 3. Результаты расчетов токов однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ при использовании трансформатора ТМ-250 и провода А-35

Fig. 3 - Results of calculations of single-phase short-circuit currents in the 0.4 kV electrical network when using a TM-250 transformer and A-35 wire

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

Произведем сравнение полученных результатов и оценим достоверность разработанной математической модели сельской электрической сети 0,4 кВ в программе MATLAB Simulink.

Исходя из результатов исследования, представленных на рисунке 1, было получено, что ток однофазного короткого замыкания на выводе трансформатора 0,4 кВ по ГОСТ 28249-93 составляет 2107 А, по упрощенному методу петли «фаза-ноль» И.А. Будзко и Т.Б. Лещинской – 2115 А, по модели «Проект РЗА» - 2150 А. В свою очередь, значение тока однофазного короткого замыкания на выводе трансформатора 0,4 кВ, что соответствует рисунку 1, составляет 2370 А. Оценим расхождение полученных результатов по методу определения абсолютной погрешности. Так, расхождение результатов расчета тока однофазного короткого замыкания, полученное в MATLAB Simulink по сравнению с ГОСТ 28249-93 составляет 11%, с упрощенным методом петли «фаза-ноль» - 10%, а с математической моделью «Проект РЗА» - 9%. То есть при замыкании на выводе трансформатора 0,4 кВ разница не значительна. Произведем сравнения при замыканиях в других точках, чтобы оценить достоверность блоков модели линий электропередачи 0,4 кВ.

Значения токов однофазного короткого замыкания на удалении 500 м от трансформатора составили: по ГОСТ 28249-93 - 233 А; по упрощенному методу петли «фаза-ноль» – 219 А; по модели «Проект РЗА» - 169 А. В свою очередь, моделирование в MATLAB Simulink однофазного короткого замыкания на данном удалении от трансформаторной подстанции позволило получить значение 168 А, что фактически идентично математической модели «Проект РЗА», а расхождение результатов с ГОСТ 28249-93 и упрощенным методом петли «фаза-ноль» составляет 27% и 23%, соответственно.

Аналогичные результаты получаются и при определении значений токов однофазного короткого замыкания в наиболее удаленной точке электрической сети 0,4 кВ (1000 м от трансформатора). Результаты, полученные по математическим моделям MATLAB Simulink и «Проект РЗА», составили 85 А и 86 А, а расхождение с ГОСТ 28249-93 и упрощенным методом петли «фаза-ноль» - 29% и 26%. В целом, обе математические модели сельской электрической сети 0,4 кВ в результате моделирования тока однофазного короткого замыкания позволяют выявить значения меньшие, чем получаемые с помощью расчетных методов.

Полученные с помощью моделей результаты характеризуются схожей зависимостью с полученными расчетными значениями. Это позволяет использовать, как разработанную модель сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink, так и ее аналог, разработанный командой «Проект РЗА», для исследования электрических параметров сети 0,4 кВ при нормальных и аварийных режимах работы.

Дополнительно модель сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink позволяет исследовать распределение напряжений на разном удалении от точки короткого замыкания и трансформаторной подстанции. В работе измерительные датчики были установлены на расстояние $\frac{1}{4}$ длины линии при различных моделируемых расстояниях. Результаты моделирования распределения напряжений вдоль электрической сети 0,4 кВ при устойчивом однофазном коротком замыкании представлены в таблице 1. При этом распределение фазных напряжений вдоль электрической сети 0,4 кВ при устойчивом однофазном коротком замыкании на удалении 1000 м от трансформаторной подстанции представлено на рисунке 4.

Таблица 1

Table 1

Электрические измерения токов и напряжений от блоков 6.2-6.6 на стороне низкого напряжения 0,4 кВ при устойчивом однофазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ

Electrical measurements of currents and voltages from blocks 6.2-6.6 on the low voltage side of 0.4 kV with a stable single-phase short circuit in the 0.4 kV network

Удаленность ОКЗ в фазе А на стороне 0,4 кВ, м		0	100	200	300	400	500	600	700	800	900	1000
Ток ОКЗ в фазе А на стороне 0,4 кВ, А		2370	738	402	275	209	168	141	121	106	95	85
Измеритель 6.2	Ua, В	0	130	142	146	147	148	149	150	150	150	150
	Ub, В	354	311	299	294	292	290	290	289	288	288	288
	Uc, В	335	267	268	269	270	270	271	271	271	271	271

Продолжение таблицы 1
Continuation of table 1

Измеритель 6.3	Ua, B	-	98	107	109	111	111	112	112	112	113	113
	Ub, B	-	315	305	302	300	299	298	298	297	297	297
	Uc, B	-	283	284	285	286	287	287	287	287	288	288
Измеритель 6.4	Ua, B	-	65	71	73	74	74	75	75	75	75	75
	Ub, B	-	319	312	310	309	308	308	307	307	307	307
	Uc, B	-	299	301	302	303	303	304	304	304	304	304
Измеритель 6.5	Ua, B	-	33	36	36	37	37	37	37	38	38	38
	Ub, B	-	324	320	319	318	318	318	318	318	317	317
	Uc, B	-	315	318	319	320	320	320	321	321	321	321
Измеритель 6.6	Ua, B	-	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Ub, B	-	330	329	329	329	329	328	329	329	329	329
	Uc, B	-	331	334	336	336	337	337	338	338	338	338

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

В точке однофазного короткого замыкания, как было отмечено ранее, напряжение поврежденной фазы А уменьшается до 0, при этом напряжения на двух оставшихся «здоровых фазах» увеличиваются в 1,4-1,5 раза по сравнению с номинальным напряжением электрической сети - 230 В, фактически в $\sqrt{2}$ раз. Например, при замыкании на выводе трансформатора 0,4 кВ они изменяются в диапазоне 335-354 В, а при замыкании за участками линий электропередачи 0,4 кВ на разном удалении от силового трансформатора они находятся в диапазоне 329-338 В.

Независимо от удаления точки однофазного короткого замыкания от выводов трансформатора 0,4 кВ напряжения неповрежденных фаз вдоль линии больше в 1,2-1,4 раза номинального напряжения и варьируются в диапазоне 288-324 В.

Рассмотрим зависимость распределения напряжения поврежденной фазы А. Так, при замыканиях на удалении до 100 метров от трансформаторной подстанции напряжение уменьшается в 1,8 раза по сравнению с номинальным фазным напряжением электрической сети 0,4 кВ 230 В и составляет не более 130 В. При замыканиях на удалении 100-500 метров напряжение фазы А уменьшается в 1,6 раза по сравнению с номинальным и находится в диапазоне 142-148 В. А при замыканиях на удалении более 500 метров от трансформаторной подстанции напряжение фазы А уменьшается не более, чем в 1,5 раза по сравнению с номинальным напряжением и составляет не менее 150 В.

Следует отметить, что независимо от удаления точки однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ от трансформатора (не рассматривается непосредственное замыкание на выводе трансформатора) на $\frac{1}{4}$ длины электрической сети напряжение фазы А уменьшается по сравнению с номинальным напряжением в 2-2,3 раза и находится в диапазоне 98-113 В, на $\frac{1}{2}$ длины линии от трансформатора к точке короткого замыкания напряжение фазы А уменьшается в установившемся режиме однофазного короткого замыкания в 3,1-3,5 раза по сравнению с номинальным напряжением и находится в диапазоне 65-75 В, а на $\frac{3}{4}$ длины от трансформатора к точке короткого замыкания оно меньше номинального напряжения 230 В в 6,1-7 раз и составляет 33-39 В.

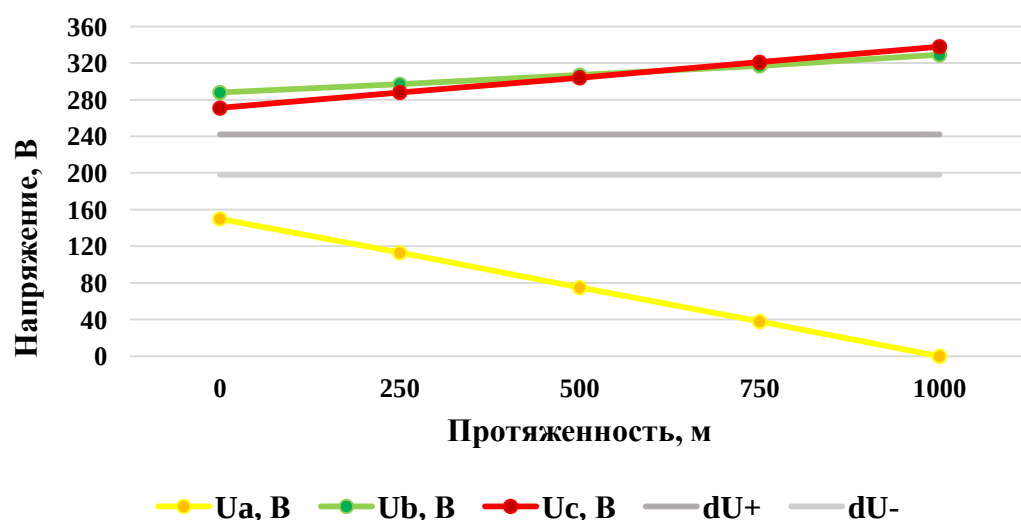


Рис. 4. Распределение напряжений вдоль воздушной линии электропередачи 0,4 кВ, выполненной проводом А-35, питающейся от трансформатора ТМ-250, при установившемся однофазном коротком замыкании на удалении 1000 метров от ТП 10/0,4 кВ

Fig. 4. Voltage distribution along the 0.4 kV overhead power line made by А-35 wire, powered by a ТМ-250 transformer, with a stable single-phase short circuit at a distance of 1000 meters from the transformer substation 10/0.4 kV

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

Результаты, представленные на рисунке 4 позволяют сделать вывод о том, что, например, в установившемся режиме однофазного короткого замыкания на удалении 1000 метров от трансформатора фазные напряжения по всей протяженности электрической сети 0,4 кВ не соответствуют ГОСТ 32144-2013 «Межгосударственный стандарт. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». Так, согласно указанному ГОСТ 32144-2013 допустимые верхняя и нижняя граница отклонения напряжения составляют 198 В и 242 В, соответственно.

Дополнительно проиллюстрируем отношение фазных напряжений неповрежденных фаз к поврежденной фазе на протяжении электрической сети 0,4 кВ в виде рисунка 5.

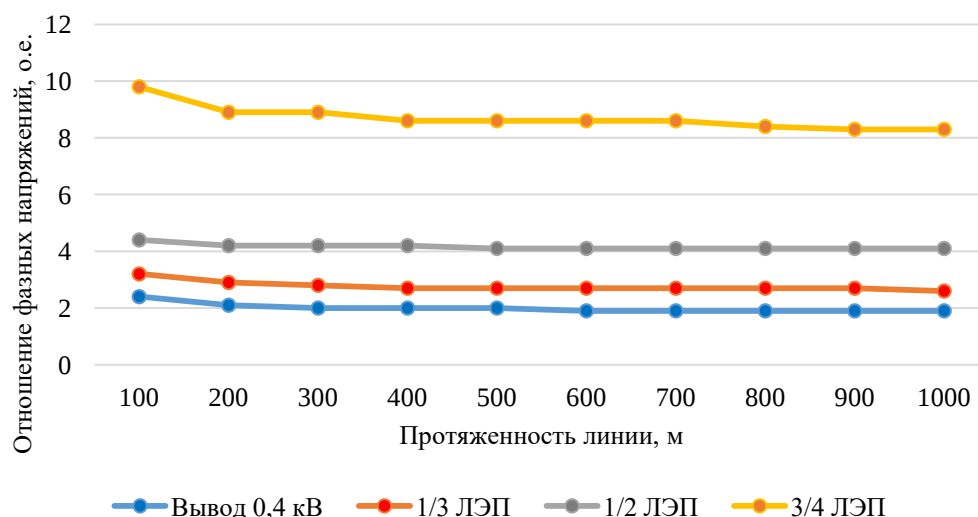


Рис. 5. Отношение фазных напряжений на неповрежденных фазах к напряжению на поврежденной фазе А при устойчивом однофазном коротком замыкании в электрической сети 0,4 кВ

Fig. 5. The ratio of phase voltages on undamaged phases to the voltage on the damaged phase A with a stable single-phase short circuit in the 0.4 kV electrical network

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

Было выявлено, что до 100 метров на шинах трансформаторной подстанции напряжение фазы А в 2,4 раза меньше напряжения неповрежденных фаз, при замыканиях от 100 до 500 метров – в 2-2,1 раза, а при замыканиях более 500 метров – в 1,9 раза и менее. В свою очередь, на расстоянии $\frac{1}{4}$ длины линии между трансформатором и точкой короткого замыкания напряжение поврежденной фазы А при замыкании до 100 метров меньше напряжений неповрежденных фаз в 3,2 раза и более, при замыкании на удалении 100-300 метров в 2,8-2,9 раза, а свыше 300 метров 2,7 раза и менее. На расстоянии $\frac{1}{2}$ длины линии напряжение поврежденной фазы А при замыкании до 100 метров меньше в 4,9 раза, от 100 до 200 метров – в 4,4 раза, а свыше 200 метров – в 4,2 раза и менее. На расстоянии $\frac{3}{4}$ длины линии напряжение фазы А меньше напряжений неповрежденных фаз при замыкании на удалении до 100 метров в 9,8 раза и более, от 100 до 300 метров 8,9 раза, от 300 до 700 метров – 8,6 раза, а свыше 700 метров – в 8,4 раза и менее.

В таблице 2 представлены результаты измерения токов и напряжений на стороне высшего напряжения 10 кВ трансформатора 10/0,4 кВ со схемой соединения обмоток Y/Yn-0 при устойчивом однофазном коротком замыкании в электрической сети 0,4 кВ (блок 5.2 – рисунок 1, блок 6.1 – рисунок 2).

Таблица 2

Table 2

Электрические измерения токов и напряжений (блок 6.1) на стороне высокого напряжения 10 кВ при устойчивом однофазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ

Electrical measurements of currents and voltages from the 6.1 unit on the 10 kV high voltage side with a stable single-phase short circuit in the 0.4 kV network

Удаленность ОКЗ в фазе А на стороне 0,4 кВ, м	Ток ОКЗ в фазе А на стороне 0,4 кВ, А	Измерения от блока 6.1					
		Ua, В	Ub, В	Uc, В	Ia, А	Ib, А	Ic, А
0	2370	5773	5773	5773	72	23	23
100	738	5773	5773	5773	22,6	7,3	7
200	402	5773	5773	5773	12,4	4,1	3,7
300	275	5773	5773	5773	8,5	2,9	2,5
400	209	5773	5773	5773	6,5	2,3	1,9
500	168	5773	5773	5773	5,2	1,9	1,5
600	141	5773	5773	5774	4,4	1,6	1,2
700	121	5773	5773	5774	3,8	1,4	1
800	106	5773	5773	5774	3,3	1,3	0,9
900	95	5773	5773	5774	3	1,2	0,8
1000	85	5773	5773	5774	2,7	1,1	0,7

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

Исходя из результатов, представленных в таблице 2 можно сделать вывод, что аварийный режим установившегося однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ не влияет на искажение напряжений в сети 10 кВ при любой удаленности до точки повреждения ввиду большого коэффициента трансформации силового трансформатора. В свою очередь, проиллюстрируем распределение токов в линии на стороне 10 кВ по схеме, представленной на рисунке 6.

Так, при устойчивом однофазном коротком замыкании в электрической сети 0,4 кВ ток замыкания $I_{K(1)}$ протекает по фазе А трансформатора и, соответственно, по фазе А линии, после чего замыкается через точку замыкания и проходит через нейтраль силового трансформатора на стороне 0,4 кВ ввиду соединения обмоток в схему Yn-0. В свою очередь, этот же ток протекает по фазе А трансформатора и выходит в линию на стороне 10 кВ, у которой соединение обмоток выполнено в звезду (Y) (на рис. 6 векторы токов показаны для случая идеального трансформатора, так как на стороне 10 кВ в действительности они будут в разы меньше токов на стороне 0,4 кВ). Ввиду того, что самопроизвольно ток в фазе А возникнуть не может при схеме соединения обмоток в звезду и ввиду отсутствия нейтрали, через которую протекает этот ток на стороне низшего

напряжения, ток фазы А $I_{A(T)}$ на стороне 10 кВ будут формировать пополам 2 другие фазы, ввиду чего в каждой из них будет протекать $0,5I_{A(T)}$.

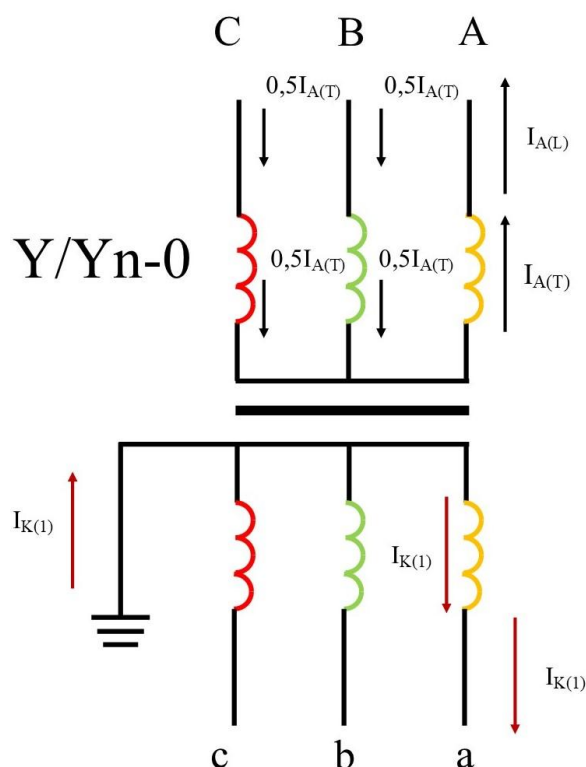


Рис. 6. Схема распределения токов в обмотках трансформатора 10/0,4 кВ и отходящих линиях при устойчивом однофазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ

Fig. 6. Diagram of current distribution in the transformer windings of 10/0.4 kV and outgoing lines with a stable single-phase short circuit in the 0.4 kV network

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

При этом в линиях будут протекать схожие значения токов, которые фиксирует измеритель в модели (блок 5.2 – рисунок 1, блок 6.1 – рисунок 2) $I_{A(L)}$ в фазе А и $0,5I_{A(T)}$ в фазах В и С. Они не искажаются как это могло бы быть вызвано при использовании разных схем и групп соединения обмоток, т.е. в случае использования треугольника на стороне высшего напряжения при соединении обмотки низшего напряжения в звезду или при соединении обмотки высшего напряжения в звезду и соединения обмотки низшего напряжения в зигзаг.

Данная схема поясняет значения токов на стороне 10 кВ, представленных в таблице 2. Фактически, $0,5I_a = I_b = I_c$. Основные положения, описанный выше, были обоснованы с учетом теоретического материала².

Заключение (Conclusions)

По результатам исследования можно сделать следующие выводы:

1) В работе была разработана математическая модель сельской электрической сети 0,4 кВ в программе *MATLAB Simulink*, достоверность которой был оценена путем сравнения значений токов однофазного короткого замыкания, полученных другими методами: с использованием ГОСТ 28249-93, упрощенного метода петли «фаза-ноль» и математической модели «Проект РЗА». Расхождение результатов в отдельно исследованных точках составило 9-29%, что в целом является большим диапазоном. При этом расхождение с расчетными методами по ГОСТ 28249-93 и упрощенным методом петли «фаза-ноль» значительно, то есть в пределах 10-29% процентов в разных точках, ввиду того, что в них расчет тока однофазного короткого замыкания производится путем алгебраического и геометрического сложения сопротивлений до точки короткого замыкания, представленных натуральными числами. При этом результаты математических моделей, полученные при помощи решения программами системы дифференциальных уравнений практически не

² Каминский Е.А. Звезда и треугольник. М. – Л., Госэнергоиздат, 1961. 64 с. с илл. (Б-ка электромонтера. Вып. 44).

отличаются. Так, погрешность при замыкании на выводе трансформатора 0,4 кВ – 9%, а в других точках за сопротивлением линии – не более 1%. Исходя из этого следует, что предпочтительнее для выбора уставок защитных коммутационных аппаратов использовать значения математических моделей, что обеспечит более высокую вероятность их срабатывания к току аварийного режима;

2) При исследовании режима устойчивого однофазного короткого замыкания было выявлено, что напряжение поврежденной фазы А уменьшается до 0 В, при этом напряжения на двух оставшихся «здоровых фазах» увеличиваются в 1,4-1,5 раза, т.е. в $\sqrt{2}$ раз до значений 335-354 В при замыкании на выводах трансформатора и до значений 329-338 В при замыканиях за участком линии электропередачи 0,4 кВ;

3) Установлено, что при устойчивом однофазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ напряжения неповрежденных фаз вдоль линии больше в 1,2-1,4 раза номинального напряжения и варьируются в диапазоне 288-324 В по всей протяженности линии независимо от удаления точки короткого замыкания;

4) В работе были представлены полученные зависимости распределения напряжения поврежденной фазы А вдоль линии при устойчивом однофазном коротком замыкании в электрической сети 0,4 кВ, а также отношения фазных напряжений поврежденной фазы А и неповрежденных фаз В и С на различных участках электрической сети 0,4 кВ;

5) Было установлено, что установившийся режим однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ не влияет на искажение фазных напряжений на стороне 10 кВ силового трансформатора. При этом для трансформатора 10/0,4 кВ со схемой и группой соединения обмоток Y/Yn-0 было установлено, что при данном режиме по фазе А линии протекает ток, идентичный току короткого замыкания на стороне 0,4 кВ, а по фазам В и С на стороне 10 кВ протекает часть тока фазы А;

6) В целом можно сделать вывод, что полученная математическая модель сельской электрической сети 0,4 кВ в программе MATLAB Simulink может использоваться для исследования нормальных и аварийных режимов работы, исследования режимов совместной работы возобновляемых источников энергии с централизованной сетью, процессов включения резервных источников генерации и др.

Литература

1. Dauda A. Folarin. Modeling and Simulation of Faults in Distribution Network System Using MATLAB/Simulink // IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE) 12.3 (2018): 43-51.
2. Баламетов А.Б., Халилов Э.Д. Моделирование режимов электрических сетей на основе уравнений установившегося режима и теплового баланса // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. №63(1). С. 66–80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80>.
3. Martínez Adrián, Navarro Isaac, Quispe Enrique, Donolo Pablo, Santos Vladimir. MATLAB/Simulink modeling of electric motors operating with harmonics and unbalance // International Journal of Electrical and Computer Engineering. 2022. 12. 4640-4648. 10.11591/ijece.v12i5.pp4640-4648.
4. Ahmed Salam Hussein, Majli Nema Hawas. Power quality analysis based on simulation and MATLAB/Simulink // Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science. №16(3), December 2019, pp. 1144-1153. DOI: 10.11591/ijeecs.v16.i3.pp. 1144-1153.
5. Jarmuda T, Mikulski S, Nawrowski R, Tomczewski A. The use of the MATLAB & SIMULINK environment to simulate the operation of a PV panel with an actual input function // Computer Applications in Electrical Engineering. 2014;12:497-510.
6. Can Hayrettin. Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink // Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences. 2013. №21(2). Article 1. <https://doi.org/10.3906/elk-1105-29>.
7. Esman A.K., Zykov G.L., Potachits V.A., Kuleshov V.K. Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe2 Chalcopyrite Structure // Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. 2020. 63(1), 5–13. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13>.
8. Esman A.K., Kuleshov V.K., Potachits V.A., Zykov G.L. Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of CuInSe2 // Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc. 2018. 61(5) 385–395. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395>.
9. Зализный Д. И. Модель фотоэлектрического модуля для библиотеки SimPowerSystems пакета MatLab/Simulink // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2020. №63(6). С. 515–525. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-515-525>.
10. Доброго К.В., Козначеев И.А. Моделирование функционального взаимодействия блоков гибридного накопителя электроэнергии // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2023. №66(5). С. 405–422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422>.

11. Доброго К.В., Козначеев И.А. Универсальная имитационная модель деградации аккумуляторных батарей с оптимизацией параметров по генетическому алгоритму // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2022. №65(6). С. 481–498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498>.
12. Доброго К.В., Бладыко Ю.В. Моделирование аккумуляторных батарей и их сборок с учетом деградации параметров // Энергетика. Изв. высш. учеб. заведений и энерг. объединений СНГ. 2021. №64(1). С. 27–39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>.
13. Млотов А.В., Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И. Опытная электрическая сеть напряжением 380 В // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2014. №2(19). С. 96-107.
14. Валеев Р.Г., Млотов А.В., Ершов А.М., Сидоров А.И. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB-Simulink // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2013. №9-10. С. 116-128.
15. Ершов А.М., Хлопова А.В. Физическая модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ // Электробезопасность. 2016. № 2. С. 13-21.
16. Петров, А. Р. Комплексный подход к исследованию функциональных параметров низковольтных коммутационных аппаратов / А. Р. Петров, Е. И. Грачева // Электрические станции. – 2023. – № 11(1108). – С. 29-36. – DOI 10.34831/EP.2023.1108.11.004. – EDN JHFKYO.
17. Грачева Е.И., Горлов А.Н., Алимова А.Н. Исследование и оценка потерь электроэнергии в системах внутрицехового электроснабжения // Вестник Казанского государственного энергетического университета. 2019. Т. 11. №4(44). С. 22-29.
18. Грачева Е.И., Алимова А.Н. Возможные погрешности расчетов потерь электроэнергии в цеховых промышленных сетях // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2018. Т. 20. № 11-12. С. 81-92. DOI:10.30724/1998-9903-2018- 20-11-12-81-92
19. Повышение точности расчета эквивалентных сопротивлений систем электроснабжения промышленных предприятий / Е. И. Грачева, А. Н. Горлов, З. М. Шакурова, Т. В. Табачникова // Приборостроение и автоматизированный электропривод в топливно-энергетическом комплексе и жилищно-коммунальном хозяйстве : Материалы VII Национальной научно-практической конференции, Казань, 09–10 декабря 2021 года. – Казань: Казанский государственный энергетический университет, 2022. – С. 545-549. – EDN LPICJA.
20. Лансберг А.А. Обоснование параметров компьютерной модели сельской электрической сети 0,4 кВ в MATLAB Simulink // Агротехника и энергообеспечение. 2023. №3(40). С. 36-47.
21. Виноградов А.В., Капитонов А.И., Лансберг А.А., Сорокин Н.С., Фомин И.Н. Определение токов коротких замыканий в сельской электрической сети 10 кВ, секционированной реклоузерами для осуществления дистанционного контроля их срабатывания // Вестник аграрной науки Дона. 2021. №1(53). С. 34-43.
22. Балабин А.А., Виноградов А.В., Лансберг А.А. Анализ работы и рекомендации по совершенствованию системы накопления электрической энергии, установленной в сельской электрической сети 0,4 кВ // Агроинженерия. 2022. №24(1). С. 72-79.
23. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С. Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2022. Т. 69. №2(47). С. 31-41.
24. Проект РЗА. Лаборатория РЗА. URL: <https://pro-rza.ru/laboratoriya-rza/> (дата обращения: 22.08.2023 г.).
25. Лансберг А.А., Виноградов А.В., Виноградова А.В. Структура парка силовых трансформаторов с высшим напряжением 6-10 кВ на примере электросетевой организации филиала ПАО «Россети Центр»-«Орелэнерго», обслуживающей сельские электрические сети // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2021. №23(5). С. 34-45.

Авторы публикации

Виноградов Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, заведующий лабораторией электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ». Email: schkolamolen@gmail.com.

Лансберг Александр Александрович – специалист лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики. E-mail: lansbergaa@vk.com

Панфилов Александр Александрович – аспирант, Орловского государственного аграрного университета. E-mail: ra3ed@mail.ru

References

1. Dauda A. Folarin. Modeling and Simulation of Faults in Distribution Network System Using MATLAB/Simulink. *IOSR Journal of Electrical and Electronics Engineering (IOSR-JEEE)*. 12.3 (2018): 43-51
2. Balametov A.B., Khalilov E.D. Modeling of electric grid modes based on steady-state equations and thermal balance // *getika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2020;63(1):66-80. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-66-80>.
3. Martínez Adrián, Navarro Isaac, Quispe Enrique, Donolo Pablo, Santos Vladimir. MATLAB/Simulink modeling of electric motors operating with harmonics and unbalance. *International Journal of Electrical and Computer Engineering*. 2022. 12. 4640-4648. 10.11591/ijece.v12i5.pp4640-4648.
4. Ahmed Salam Hussein, Majli Nema Hawas. Power quality analysis based on simulation and MATLAB/Simulink. *Indonesian Journal of Electrical Engineering and Computer Science*. 2019;16(3);1144-1153. DOI: 10.11591/ijeecs.v16.i3.pp. 1144-1153.
5. Jarmuda T, Mikulski S, Nawrowski R, Tomczewski A. The use of the MATLAB & SIMULINK environment to simulate the operation of a PV panel with an actual input function // *Computer Applications in Electrical Engineering*. 2014;12:497-510.
6. Can Hayrettin. Model of a photovoltaic panel emulator in MATLAB-Simulink. *Turkish Journal of Electrical Engineering and Computer Sciences*. 2013;21(2):Article 1. <https://doi.org/10.3906/elk-1105-29>.
7. Esman A. K., Zykov G. L., Potachits V. A., Kuleshov V. K. Simulation of Thin-Film Solar Cells with a CuInSe2 Chalcopyrite Structure. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2020;63(1):5–13. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-1-5-13>.
8. Esman A.K., Kuleshov V.K., Potachits V.A., Zykov G.L. Simulation of Tandem Thin-Film Solar Cell on the Basis of CuInSe2. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2018. 61(5) 385–395. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2018-61-5-385-395>.
9. Zaluzny D. I. Model of a photovoltaic module for the SimPowerSystems library of the MatLab/Simulink package. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2020;63(6):515-525. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2020-63-6-515-525>.
10. Dobrego K.V., Kaznacheev I.A. Modeling of functional interaction of hybrid power storage units. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2023;66(5):405-422. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2023-66-5-405-422>.
11. Dobrego K.V., Kaznacheev I.A. Universal simulation model of degradation of batteries with optimization of parameters by genetic algorithm. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2022;65(6):481-498. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2022-65-6-481-498>.
12. Dobrego K.V., Bladyko Yu.V. Modeling of batteries and their assemblies taking into account the degradation of parameters. *Energetika. Proc. CIS Higher Educ. Inst. and Power Eng. Assoc.* 2021; 64(1):27-39. <https://doi.org/10.21122/1029-7448-2021-64-1-27-39>.
13. Molotok A.V., Ershov A.M., Valeev R.G., Sidorov A.I. Experimental electrical network with a voltage of 380 V // *Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University*. 2014;2(19):96-107.
14. Valeev R.G., Molotok A.V., Ershov A.M., Sidorov A.I. Modeling of an electric network with 380 V voltage with overhead lines in the MATLAB-Simulink software environment. *Izvestia of higher educational institutions. Energy problems*. 2013;9-10:116-128.
15. Ershov A.M., Khlopova A.V. Physical model of an electric network with a voltage of 10/0.38 kV. *Electrical safety*. 2016;2:13-21.
16. Petrov, A. R. Kompleksnyj podhod k issledovaniyu funkcional'nyh parametrov nizkovolt'nyh kommutacionnyh apparatov / A. R. Petrov, E. I. Gracheva // *Elektricheskie stancii*. – 2023. – № 11(1108). – S. 29-36. – DOI 10.34831/EP.2023.1108.11.004. – EDN JHFKYO.
17. Gracheva E.I., Gorlov A.N., Alimova A.N. Issledovanie i ocenka poter' elektroenergii v sistemah vnutricekhovogo elektrosnabzheniya // *Vestnik Kazanskogo gosudarstvennogo energeticheskogo universiteta*. 2019.T. 11. №4(44). S. 22-29.
18. Gracheva E.I., Alimova A.N. Vozmozhnye pogreshnosti raschetov poter' elektroenergii v cekhovyh promyshlennyh setyah // *Izvestiya vysshih uchebnyh zavedenij. PROBLEMY ENERGETIKI*. 2018. T. 20. № 11-12. S. 81-92. DOI:10.30724/1998-9903-2018- 20-11-12-81-92
19. Povyshenie tochnosti rascheta ekvivalentnyh soprotivlenij sistem elektrosnabzheniya promyshlennyh predpriyatij / E. I. Gracheva, A. N. Gorlov, Z. M. SHakurova, T. V. Tabachnikova // *Priborostroenie i avtomatizirovannyj elektroprivod v toplivno-energeticheskom komplekse i zhilishchno-kommunal'nom hozyajstve : Materialy VII Nacional'noj nauchno-prakticheskoy konferencii, Kazan', 09–10 dekabrya 2021 goda*. – Kazan': Kazanskij gosudarstvennyj energeticheskij universitet, 2022. – S. 545-549. – EDN LPICJA.
20. Lansberg A.A. Substantiation of the parameters of a computer model of a 0.4 kV rural electric network in MATLAB Simulink. *Agrotechnics and energy supply*. 2023;3(40):36-47.

21. Vinogradov A.V., Kapitonov A.I., Lansberg A.A., Sorokin N.S., Fomin I.N. Determination of short-circuit currents in a rural 10 kV electrical network sectioned by reclosers for remote monitoring of their operation // *Bulletin of Agrarian Science of the Don*. 2021;1(53):34-43.

22. Balabin A.A., Vinogradov A.V., Landzberg A.A. Analysis of the work and recommendations for improving the electric energy storage system installed in the rural 0.4 kV electric grid // *Agroengineering*. 2022. №24(1). pp. 72-79.

23. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Sorokin N.S. Characteristics of electric grid companies by the number and length of power transmission lines, substation capacity. *Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex*. 2022;69.2(47):31-41.

24. The RZA project. RZA Laboratory. URL: <https://pro-rza.ru/laboratoriya-rza/> (accessed: 08/22/2023).

25. Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Vinogradova A.V. The structure of the park of power transformers with a higher voltage of 6-10 kV on the example of the electric grid organization of the branch of PJSC «Rosseti Center»-«Orelenenergo», serving rural electric networks // *News of higher educational institutions. Energy problems*. 2021;23(5):34-45.

Authors of the publication

Alexander V. Vinogradov - Federal Scientific Agroengineering Center VIM. Email: schkolamolen@gmail.com.

Alexander A. Lansberg - Federal Scientific Agroengineering Center VIM. E-mail: lansbergaa@vk.com

Alexander A. Panfilov, Orel State Agrarian University. E-mail: ra3ed@mail.ru

Шифр научной специальности: 2.4.3. «Электроэнергетика»

Получено

04.12.2023 г.

Отредактировано

05.12..2023 г.

Принято

07.12.2023 г.