

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ И АВТОМАТИЗАЦИЯ СЕЛЬСКОГО ХОЗЯЙСТВА

ОРИГИНАЛЬНАЯ СТАТЬЯ

УДК 621.315.1:621.3.064.1:001.57

<https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-90-99>

Физическое моделирование разных видов двухфазных коротких замыканий в сельской электрической сети 0,4 кВ

А.В. Виноградов¹, А.А. Лансберг²^{1,2} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; г. Москва, Россия¹ winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6141-984X>² lansbergaa@vk.com; <https://orcid.org/0000-0002-2834-6092>

Аннотация. Двухфазные и двухфазные на нулевой проводник короткие замыкания в сельских электрических сетях возникают при схлестывании неизолированных проводов или повреждении изолированных проводов. Выявление параметров данных режимов на практике невозможно, поэтому их следует определять расчетным методом. Однако в нормативных документах и в источниках литературы не представлены зависимости, позволяющие идентифицировать данные режимы на всем протяжении линии электропередачи, в том числе в точке установки устройств секционирования. С целью определения электрических параметров, характерных для режимов двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий в сельских электрических сетях 0,4 кВ, проведено исследование с помощью метода физического моделирования. Физическая модель сельской электрической сети содержала трансформатор ТТ-0,16-380/38 У/У_н-0. Соотношение междуфазного и фазного напряжений – 38/22 В. Использовали нихромовую проволоку из сплава Х20Н80 сечением 0,5 мм², сопротивлением 5,6 Ом/м. Сопротивление заземления нейтрали трансформатора приняли как 4 Ом, для двух повторных заземлений нулевого провода – 30 Ом. В результате выявлено, что при двухфазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ токи в поврежденных фазах равны, а соотношение напряжений на неповрежденной и поврежденных фазах составило 1,3...1,9. При двухфазном коротком замыкании на нулевой проводник в одной из фаз значение тока равно алгебраической сумме тока нейтрали и тока, протекающего в другой фазе. При этом соотношение напряжений неповрежденной фазы к поврежденным фазам изменяется в зависимости от приближения к точке замыкания. Выявленные зависимости можно использовать для идентификации данных режимов микроконтроллерными блоками управления секционирующих устройств, что позволит диспетчеру сети получать информацию об их возникновении и сократить время на поиск и выявление причин повреждений.

Ключевые слова: электрическая сеть; сельские электрические сети; двухфазное короткое замыкание; моделирование; моделирование режимов; физическая модель сельской электрической сети; трансформатор

Для цитирования: Виноградов А.В., Лансберг А.А. Физическое моделирование разных видов двухфазных коротких замыканий в сельской электрической сети 0,4 кВ // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 3. С. 90-99. <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-90-99>

ORIGINAL ARTICLE

Physical simulation of different types of two-phase short circuits in a rural 0.4 kV power supply network

A.V. Vinogradov¹, A.A. Lansberg²^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; Moscow, Russia¹ winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6141-984X>² lansbergaa@vk.com; <https://orcid.org/0000-0002-2834-6092>

Abstract. Rural power supply networks feature two-phase and two-phase zero-conductor short-circuits in in case of crossed uninsulated wires or damaged insulated wires. It is practically impossible to detect the parameters

of these modes, so they should be calculated. However, normative documents and literature sources do not provide dependencies to identify these modes along the entire length of the transmission line, including at the point of installation of sectionalizing devices. In order to determine the electrical parameters characteristic for the modes of two-phase and two-phase zero-conductor short circuits in rural 0.4 kV power supply networks, the authors used the method of physical simulation. The physical model of a rural power supply network contained a transformer TT-0.16-380/38 Y/Yn-0. The phase-to-phase voltage ratio was 38/22 V. The authors used a nichrome wire of the X20H80 alloy with a cross-section of 0.5 mm² and a resistance of 5.6 Ohm/m. The transformer neutral grounding resistance was taken as 4 Ohm, and that of 30 Ohm – for two repeated neutral wire grounding. As a result, it was found that in a two-phase short circuit in a 0.4 kV network, the currents in the damaged phases are equal, and the ratio of voltages on the undamaged and damaged phases was 1.3 to 1.9. In the case of a two-phase short circuit to the neutral conductor in one of the phases, the current value is equal to the algebraic sum of the neutral current and the current flowing in the other phase. At the same time, the voltage ratio of the undamaged phase to the damaged phases changes depending on the proximity to the fault point. The revealed dependencies can be used to identify these modes by microcontroller control units of sectionalizing devices, which will provide the network dispatcher with information about their occurrence and reduce the time for search and identification of the causes of damage.

Keywords: electric network; rural power supply networks; two-phase short circuit; simulation; mode simulation; physical model of a rural power supply network; transformer

For citation: Vinogradov A.V., Lansberg A.A. Physical simulation of different types of two-phase short circuits in a rural 0.4 kV power supply network. *Agricultural Engineering (Moscow)*. 2025;27(3):90-99 (In Russ.). <https://doi.org/10.26897/2687-1149-2025-3-90-99>

Введение

Моделирование режимов работы электрических сетей 0,4 кВ позволяет правильно настраивать работу средств релейной защиты и автоматики. Внедрение в сельские электрические сети средств секционирования и резервирования (секционирующие пункты, мультиконтактные коммутационные системы¹) позволяет защищать участки сети от аварийных режимов и информировать диспетчера сети о возникновении аварийных режимов на конкретном участке сети. Правильная работа данных устройств требует определения параметров режимов работы электрической сети по всей ее протяженности. Для эффективной защиты электрической сети микроконтроллерные блоки управления устройств секционирования должны правильно идентифицировать аварийные режимы, в том числе двухфазные, двухфазные на нулевой проводник короткие замыкания. Зависимости токов и напряжений в этих аварийных режимах можно определить методами математического, компьютерного и физического моделирования.

Моделирование как метод исследования применяется для изучения режимов электрических сетей 0,4 кВ [1], электробезопасности [2, 3], оценки эффективности устройств защиты электрических сетей [4], выбора значения тока аварийного режима

для настройки уставок защитного коммутационного аппарата [5, 6].

С использованием методов моделирования выполняется оценка эффективности действующих защит электрических сетей 0,4 кВ [7], а также осуществляется разработка способов повышения электробезопасности их эксплуатации [8].

Одним из актуальных вопросов является моделирование режима устойчивого однофазного короткого замыкания на воздушных линиях электропередачи 0,4 кВ, которое можно выполнить разными методами и программными средствами [9-11]. Исследование данного режима осуществлялось также путем физического моделирования [12] и с использованием компьютерных моделей в программном комплексе MATLAB Simulink [13, 14]. Промышленные исследования данного режима в действующей электрической сети 0,4 кВ впервые были реализованы на полигоне ПАО «Россети Урал»-«Челябэнерго» [15]. В научных работах [16, 17] отмечена необходимость моделирования аварийного режима однофазного короткого замыкания для правильной настройки уставок защитных коммутационных аппаратов ввиду трудности его распознавания.

Действующий ГОСТ 28249-93 не предлагает методики расчета токов двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник. Такие режимы чаще всего возможны при схлестывании проводов воздушных линий, выполненных неизолированными проводниками, при выходе из строя изоляции изолированных

¹ Виноградов А.В. Принципы управления конфигурацией сельских электрических сетей и технические средства их реализации: Монография. Орёл: Изд-во «Картуш», 2022. 392 с. EDN: DOFZZD.

проводников по причине перегрузок, перетирания, механического повреждения и в других обстоятельствах. Для правильной их идентификации и осуществления защиты от них средствами секционирования важно понимать особенности указанных режимов, их отличия друг от друга и от других режимов.

При обзоре исследований не выявлены зависимости, характеризующие соотношение напряжений на неповрежденной и поврежденных фазах по длине линии в двух рассматриваемых режимах, а также соотношений токов в поврежденных фазах при двухфазном коротком замыкании на нулевой проводник. Знание таких соотношений позволит выполнять идентификацию двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий устройствами секционирования электрических сетей 0,4 кВ. В рамках концепции секционирования сельских электрических сетей, обоснованной в работе², в июне 2023 г. в филиале ПАО «Россети Центр»–«Орёлэнерго» внедрено устройство сетевого секционирования электрических сетей 0,4 кВ типа МКС-2-3В (патент РФ № 2802722)». Устройство МКС-2-3В предназначено для повышения надежности электроснабжения и защищенности от удаленных однофазных коротких замыканий, значения которых могут быть сопоставимы и ниже рабочих токов сети или номинального тока защитного коммутационного аппарата. Это приводит к тому, что при фазном напряжении 220 В защитные коммутационные аппараты не срабатывают за требуемые 0,4 секунды (согласно п. 1.7.79 Правил устройства электроустановок (ПУЭ) при возникновении аварийного режима).

Разработанное устройство сетевого секционирования типа МКС-2-3В введено в эксплуатацию в январе 2024 г. (рис. 1).

Устройство МКС-2-3В содержит два низковольтных вакуумных контактора, управляемых микроконтроллерным блоком, который с использованием датчиков тока и напряжения обеспечивает мониторинг фазных напряжений, фазных токов и токов в нейтральных проводах в точке его установки. Данные электрические параметры в совокупности с положением вакуумных контакторов передаются в центр управления сетями с использованием SCADA-системы ОИК «СИСТЕЛ». Это позволяет диспетчеру электросетевой компании непрерывно получать данные о состоянии электрической сети и обеспечивать управление ее конфигурацией.

² Виноградов А.В. Принципы управления конфигурацией сельских электрических сетей и технические средства их реализации: Монография. Орёл: Изд-во «Картуш», 2022. 392 с. EDN: DOFZZD.

Для разработанного устройства типа МКС-2-3В были обоснованы уставки для защиты электрических сетей 0,4 кВ от удаленных однофазных коротких замыканий [18]. Расширение функционала устройства заключается в обеспечении возможности идентификации микроконтроллерным блоком устройства двухфазных коротких замыканий и двухфазных коротких замыканий на нулевой провод, определении и отключении участков сети, на которых выявлены данные режимы, и в уведомлении диспетчера о данных режимах, об участке их возникновения и их отключении. Это позволит сократить время поиска и выявления вида повреждений и, следовательно, сократить время устранения аварии и время перерывов в электроснабжении сельских потребителей. Важно исследовать характер соотношения токов и фазных напряжений при режимах двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий посредством моделирования режимов на физической модели электрической сети.

Цель исследований: определить зависимости токов и напряжений, присущих режимам двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий в сельских электрических сетях 0,4 кВ, для идентификации указанных режимов и защиты от них с помощью устройств секционирования, применив метод физического моделирования.



Рис. 1. Устройство секционирования линий электропередачи 0,4 кВ типа МКС-2-3В в ходе опытно-промышленной эксплуатации

Fig. 1. Sectionalizing device for 0.4 kV power transmission lines of the MKS-2-3V type during pilot operation

Материалы и методы

Для исследования аварийных режимов устойчивых двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий использовалось физическое моделирование на разработанной модели электрической сети 10/0,4 кВ, принцип работы которой подробно изложен в работе [18]. Для физической модели, согласно теории подобия, обосновали коэффициенты подобия по току, напряжению, мощности, сопротивлению, исходя из опыта короткого замыкания используемого трансформатора малой мощности и промышленных трансформаторов типов ТМ-63, ТМ-100, ТМ-160, ТМ-250 [18]. В качестве модели трансформатора использовали трансформатор малой мощности ТТ-0,16-380/38 Y/Y_n-0. Соотношение между фазного и фазного напряжений – 38/22 В. Для моделирования участков линий электропередачи 0,4 кВ на физической модели использовали нихромовую проволоку из сплава Х20Н80 сечением 0,5 мм², сопротивлением 5,6 Ом/м [18]. Пересчет значения полного сопротивления модели линии электропередачи на полное сопротивление провода (Z , Ом/км) действующей сельской электрической сети 0,4 кВ был реализован с использованием коэффициента подобия по сопротивлению [18].

В действующих электрических сетях 0,4 кВ заземление нейтральной точки трансформатора и повторные заземления нулевого провода воздушной линии 0,4 кВ должны выполняться с учетом требований пунктов 1.7.100-1.7.104 ПУЭ. В качестве сопротивления заземления нейтрали трансформатора приняли значение 4 Ом, а в качестве двух повторных заземлений нулевого провода – 30 Ом.

Используемая в исследованиях модель апробирована в ходе моделирования устойчивого однофазного короткого замыкания и показала высокую достоверность (отклонение – менее 8,5%) по отношению к ГОСТ 28249-93 [18]. Внешний вид модели представлен на рисунке 2.

Для исследования рассматриваемых режимов использовали часть электрической схемы модели, представленной на рисунке 3.

Представленная на рисунке 2 схема физической модели содержит: коммутационные аппараты QF1, QF2, модель силового трансформатора 10/0,4 кВ Т1, клеммы К1-К13, участки ЛЭП L1-L11; автоматический выключатель для имитации аварийных режимов (QF6) и коммутации фаз физической модели, подключенных к его клеммам с целью безопасного выполнения эксперимента.

Для моделирования двухфазного и двухфазного на нулевой проводник замыканий использовали коммутационный аппарат QF6 с шунтированием фаз согласно данным рисунка 3. Двухфазное короткое замыкание имитировалось включением коммутационного аппарата QF6 с подключением к нему только проводов В и С. Для моделирования двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник к третьей клемме коммутационного аппарата QF6 также подключался провод N. При моделировании обоих режимов нагрузка отсутствовала, при этом провод фазы А той же протяженности, что и провода поврежденных фаз В и С, находился в режиме холостого хода.

В ходе экспериментальных исследований по длине линии при каждом аварийном режиме измеряли



Рис. 2. Внешний вид физической модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ [19]

Fig. 2. View of the physical model of the rural power supply network 10/0.4 kV [19]

фазные токи и напряжения в контрольных точках цифровым мультиметром Omix P99-MZ5-3-RS485 класса точности 0,5. Данный прибор фиксировал токи на выводе трансформатора, напряжение вдоль модели линии электропередачи измеряли мультиметром. На выводе нейтрали трансформатора установлен аналоговый амперметр класса точности 0,5. Ток в нейтрали в режиме двухфазного замыкания на нулевой проводник определен как разность токов поврежденных фаз с учетом показаний амперметра,

установленного в нейтральном проводе. Результаты измерений представлены в таблице 1.

Результаты измеренных на модели электрических параметров соотнесем с теми же параметрами промышленной электрической сети. Наиболее часто протяженность сельских электрических сетей 0,4 кВ до наиболее удаленной точки составляет не более 985 м. При этом используются неизолированный провод А-35 и трансформатор типа ТМ-250/10/0,4 кВ Y/Y_н. Указанные параметры

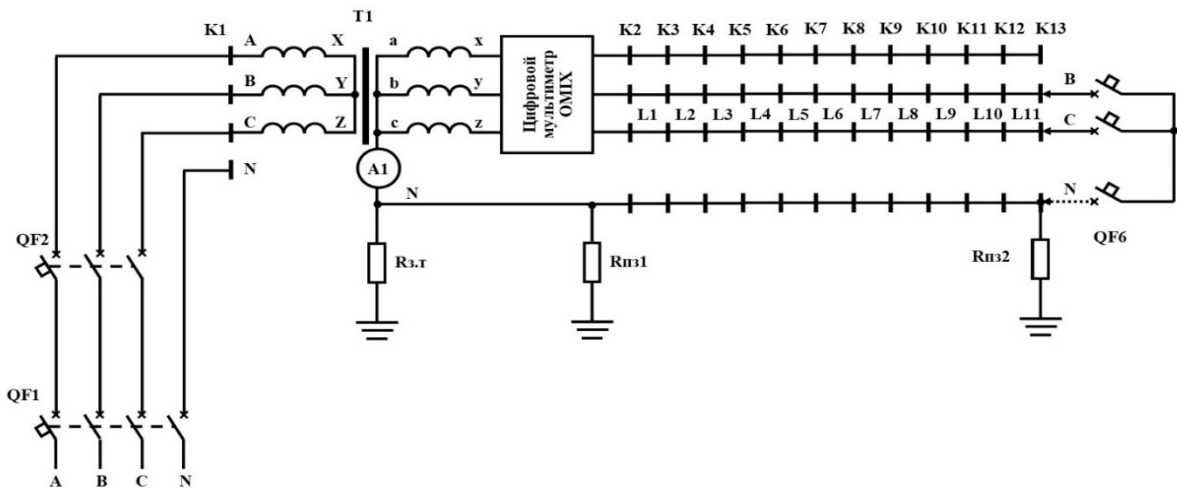


Рис. 3. Схема измерения электрических параметров аварийных режимов физической модели электрической сети 10/0,4 кВ

Fig. 3. Measurement diagram for the electrical parameters of emergency modes of a physical model of a 10/0.4 kV power supply network

Электрические параметры модели в аварийных режимах

Таблица 1

Electrical parameters of the model in emergency modes

Table 1

Точка КЗ на модели Short-circuit point on the model	Ток 2-фазного КЗ на нулевой проводник, Ik2-0, А Two-phase fault current on the zero conductor; Ik2-0, A			Ток 2-фазного КЗ, Ik2, А Current of two-phase short-circuit, Ik2, A		Полная мощность 2-фазного КЗ на нулевой проводник, Sk2-0, ВА Total power of a two-phase fault on the zero conductor; Sk2-0, VA	Полная мощность 2-фазного КЗ, Sk2, ВА Total power of a two-phase short-circuit, Sk2, VA	Сопротивление до точки КЗ на модели, Z, Ом Resistance to the short-circuit point on the model, Z, Ohm
	I(B)	I(C)	I(N)	I(B)	I(C)			
K2	Опыт не проводили, чтобы не допустить выхода из строя трансформатора The experiment was not performed to avoid transformer failures							0
K3								3,6
K4								5,0
K5								6,4
K6	2,270	2,186	0,084	2,336	2,336	88	100	7,8
K7	1,959	1,886	0,074	2,015	2,015	77	87	9,2
K8	1,740	1,669	0,072	1,776	1,776	69	76	10,6
K9	1,556	1,486	0,07	1,596	1,596	64	69	12,0
K10	1,343	1,277	0,066	1,447	1,447	53	63	13,4
K11	1,230	1,170	0,06	1,315	1,315	49	57	14,8
K12	1,143	1,086	0,057	1,208	1,208	45	57	16,2
K13	0,899	0,843	0,056	0,996	0,996	36	57	19,8

наиболее часто применяются в электрических сетях 0,4 кВ, к которым подключены коммунально-бытовые сельскохозяйственные потребители [20, 21].

Коэффициенты подобия для физической модели и выбранного прототипа сельской электрической сети представлены в таблице 2 [18]. Под коэффициентами подобия для стороны низкого напряжения (НН) и стороны высокого напряжения (ВН) понимаются две группы коэффициентов, позволяющих пересчитывать электрические параметры на разных сторонах физической модели напряжением 380/38 В на промышленные параметры сельской электрической сети 10/0,4 кВ.

Электрические параметры прототипа действующей электрической сети 0,4 кВ определяли по формулам, изложенным нами ранее [18].

С учетом коэффициентов подобия для стороны низкого напряжения (табл. 2) и принятого в качестве прототипа оборудования с использованием формулы (2) определили, что полное сопротивление нихромовой проволоки со значением 19,8 Ом соответствует 1023 м протяженности линии электропередачи 0,4 кВ, выполненной неизолированным проводом А-35. Для моделирования сопротивления 4 Ом, через

которое осуществляется заземление трансформатора, также использовали нихромовую проволоку сопротивлением 85,7 Ом. Для моделирования двух повторных заземлений нулевого провода использовали нихромовую проволоку с сопротивлением 643,2 Ом.

Токи и мощность аварийного режима в действующей электрической сети 0,4 кВ определяли также с использованием формул [18].

Результаты и их обсуждение

Полученные в ходе моделирования результаты сравнивали с результатами, полученными при расчетах с применением методики, изложенной в ГОСТ 28249-93. На рисунке 4 показаны графики зависимости тока короткого замыкания, полученные методами физического моделирования и ГОСТ 28249-93.

С учетом результатов, представленных на рисунке 3, разница результатов не превышает 1,5%.

В таблице 3 представлены значения токов в режимах двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий, полученных физическим моделированием.

Коэффициенты подобия для трансформатора ТМ-250 Y/Y_n 10/0,4 кВ и провода А-35

Table 2

Similarity coefficients for transformer ONAN-250 Y/Y_n 10/0.4 kV and wire A-35

Сторона физической модели <i>Physical model side</i>	Коэффициент подобия / <i>Similarity coefficient</i>			
	по напряжению, <i>M_v, О.Е. for voltage, Mu, relative units</i>	по сопротивлению, <i>M_r, О.Е. for resistance, Mz, relative units</i>	по току, <i>M_i, О.Е. for current, Mi, relative units</i>	по мощности, <i>M_p, О.Е. for power, Ms, relative units</i>
Низкого напряжения, НН <i>Low voltage, LV</i>	0,1	21,44	0,0047	0,00047
Высокого напряжения, ВН <i>High voltage, HV</i>	0,038	3,42	0,011	0,0004

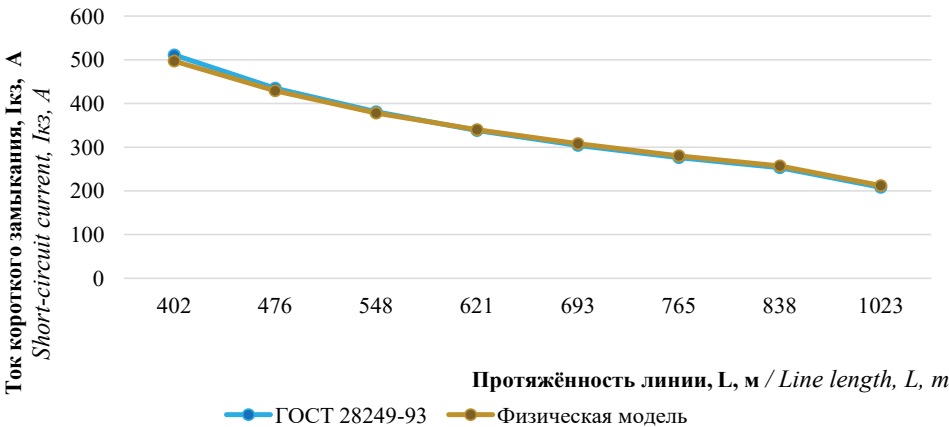


Рис. 4. Ток двухфазного короткого замыкания, определенный расчетным методом и физическим моделированием

Fig. 4. Two-phase short-circuit current determined by calculation and physical simulation

Таблица 3

Токи двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий
в электрической сети 0,4 кВ, полученные физическим моделированием

Table 3

Currents of two-phase and two-phase to zero-conductor conductor short circuits
in a 0.4 kV power supply network determined by physical simulation

Удаленность КЗ от вывода 0,4 кВ трансформатора, L, м <i>Distance of short-circuit from the 0.4 kV transformer output, L, m</i>	Режим / Mode				
	Двухфазное КЗ <i>Two-phase short circuit</i>		Двухфазное КЗ на нулевой проводник <i>Two-phase short-circuit on the zero conductor</i>		
	ток фазы В, I(B), А <i>phase B current, I(B), A</i>	ток фазы С, I(C), А <i>phase C current, I(C), A</i>	ток фазы В, I(B), А <i>phase B current, I(B), A</i>	ток фазы С, I(C), А <i>phase C current, I(C), A</i>	ток в нейтрали, I(N), А <i>neutral current, I(N), A</i>
402	497	497	483	465	18
476	429	429	416	402	16
548	378	378	370	355	15
621	340	340	331	316	15
693	308	308	286	272	14
765	280	280	261	249	13
838	257	257	244	231	12
1023	212	212	192	180	12

Токи двухфазного короткого замыкания выше токов двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник. Полные мощности режима двухфазного короткого замыкания, полученные с использованием формулы (4), при возникновении аварии от 402 до 1023 м от вывода низкого напряжения трансформатора изменяются от 121 до 213 кВА, а для двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник при тех же точках аварии – от 77 до 187 кВА.

В режиме двухфазного короткого замыкания токи протекают в фазах «В» и «С» (при экспериментальном исследовании было принято, что повреждаются эти фазы), при этом значения токов равны, что можно выразить в виде соотношения [19]:

$$I_{\text{по}}^{(2)}(B) = I_{\text{по}}^{(2)}(C), \quad (1)$$

где $I_{\text{по}}^{(2)}(B)$ – начальное значение периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания в фазе В, А; $I_{\text{по}}^{(2)}(C)$ – начальное значение периодической составляющей тока двухфазного короткого замыкания в фазе С, А [19].

Это соответствует основным положениям теории переходных процессов в электрических сетях, которые отмечают, что токи являются противоположно направленными. В фазе «А» токи короткого замыкания отсутствуют, как это выявлено и в ходе компьютерного моделирования [19].

При двухфазном коротком замыкании на нулевой проводник соотношение (1) не выполняется. При этом в нулевом проводнике протекает ток, равный разнице токов фаз «В» и «С», то есть выполняется

соотношение, также подтвержденное в ходе компьютерного моделирования [19]:

$$I_{\text{по}}^{(2-N)}(B) = I_{\text{по}}^{(2-N)}(C) + I_{\text{по}}^{(2-N)}(N), \quad (2)$$

где $I_{\text{по}}^{(2-N)}(N)$ – ток в нейтрали при двухфазном коротком замыкании на нулевой провод, А [19].

Соотношение (2) присуще замыканию на нулевой проводник фаз «В» и «С». При замыкании на нулевой проводник фаз «А» и «С» наибольший ток будет в фазе «С», при замыкании «А» и «В» – в фазе «А». Моделирование проведено для трансформаторов со схемой соединения «звезда-звезда с нулем» и группой соединения «0». Для других схем и групп соединения соотношения токов могут отличаться [19].

Распределение напряжений в электрической сети 0,4 кВ при двухфазном коротком замыкании на удалении 1023 м от вывода низкого напряжения силового трансформатора показано на рисунке 5.

Напряжение фаз «В» и «С», между которыми произошло короткое замыкание, имеет одинаковое значение по всей протяженности линии. Напряжения неповрежденной и поврежденных фаз отличаются в 1,3...1,9 раза с увеличением соотношения при удалении от трансформатора. Эта зависимость получена и при компьютерном моделировании [19].

Таким образом, при установке устройств секционирования на расстоянии уже от 200 м от вывода трансформатора их микроконтроллерные блоки управления могут достоверно определить разницу в напряжениях поврежденных и неповрежденных фаз.

Распределение напряжений по фазам при двухфазном коротком замыкании на нулевой провод показано на рисунке 6 [19].

При двухфазном коротком замыкании на нулевой проводник напряжения на замкнувших фазах в точке замыкания равны 0 В. Напряжение неповрежденной фазы превышает номинальное в 1,3 раза (в опыте превысило 292 В), как и при компьютерном моделировании [19]. Отношение напряжения неповрежденной фазы к напряжениям поврежденных фаз изменяется в 1,1...2,7 раза на протяженности линии до 50% от ее общей длины до точки короткого замыкания и при приближении к точке замыкания может увеличиваться практически в десятки раз (теоретически – до бесконечности). Здесь также при установке устройств секционирования на расстоянии от 200 м от вывода трансформатора их микроконтроллерные блоки управления могут достоверно определить

разницу в напряжениях поврежденных и неповрежденных фаз, причем заметно отличие друг от друга и напряжений двух поврежденных фаз.

Выявленные зависимости токов и напряжений по протяженности линий электропередачи позволяют отличать режимы двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий друг от друга и от других режимов. Это позволяет использовать полученные зависимости для идентификации данных режимов микроконтроллерными блоками управления секционирующих устройств и отключения участков сети с выявленными аварийными режимами. Средства секционирования оснащаются устройствами передачи данных. Поэтому идентификация исследуемых режимов позволяет получать диспетчеру сети информацию об их возникновении, на участках, где они произошли, что сократит время на поиск и выявление причин повреждений.

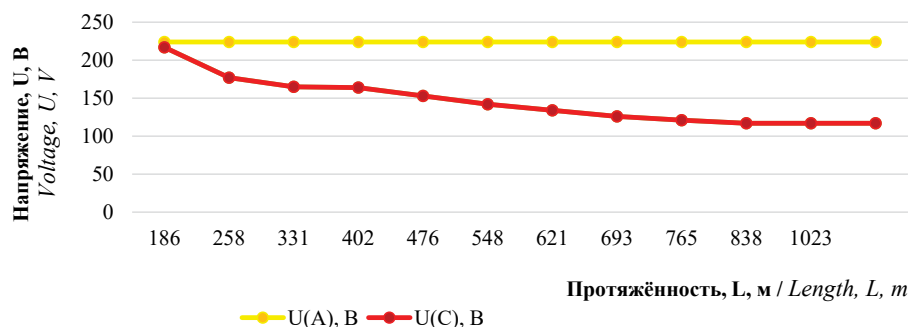


Рис. 5. Распределение напряжений в электрической сети 0,4 кВ при двухфазном коротком замыкании на удалении 1023 м от вывода низкого напряжения силового трансформатора

Fig. 5. Voltage distribution in the 0.4 kV power supply network with a two-phase short circuit at a distance of 1023 m from the low voltage output of the power transformer

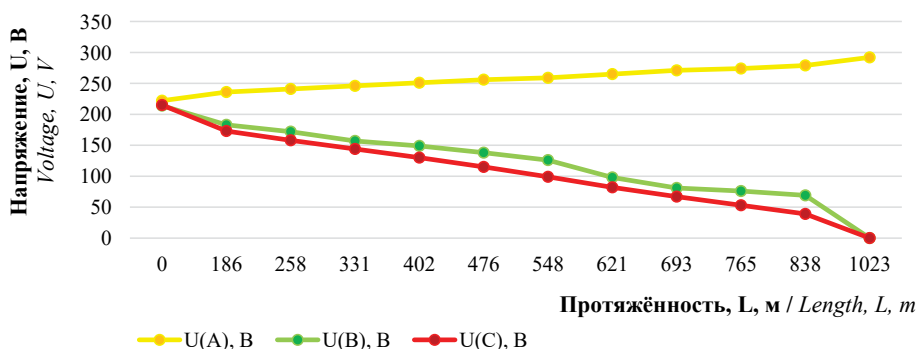


Рис. 6. Распределение напряжений по фазам при двухфазном коротком замыкании на нулевой провод

Fig. 6. Distribution of voltages by phases during a two-phase zero-conductor short circuit

Выводы

1. Особенности режимов двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий в электрических сетях 0,4 кВ недостаточно изучены. В нормативных документах не содержатся указания по расчету двухфазного короткого

замыкания на нулевой проводник, что затрудняет математическое моделирование данного режима и его идентификацию.

2. Выполненное физическое моделирование выявило, что при двухфазном коротком замыкании в сети 0,4 кВ токи в поврежденных фазах равны,

а соотношение напряжений на неповрежденной и поврежденных фазах составляет 1,3...1,9 раза, и оно возрастает при отдалении от вывода низкого напряжения трансформатора. При двухфазном коротком замыкании на нулевой проводник в одной из фаз протекает ток, значение которого равно алгебраической сумме тока нейтрали и тока, протекающего в другой фазе. Отношение напряжений неповрежденной и поврежденных фаз находится в диапазоне 1,1...2,7 раза на длине линии до 50% от общей до точки замыкания и при приближении к точке замыкания может увеличиваться практически в десятки раз (теоретически – до бесконечности).

Список источников

1. Mohammed T., Allali M., Boumediene B., Toufik T. Electrical Network's Modeling & Simulation Tools: The State of the Art. *Journal of Electrical and Control Engineering*. 2013;3:1-12 https://www.researchgate.net/publication/258120777_Electrical_Network's_Modeling_Simulation_Tools_The_State_of_the_Art
2. Комаров В.И., Кит Ю.В., Стэц Р.Е. Использование компьютерного моделирования для анализа электробезопасности в электрических сетях до 1 кВ // Актуальные научные исследования в современном мире. 2019. № 2-1 (46). С. 37-41. EDN: YZAQXR
3. Рахимов О.С., Мирзоев Д.Н. Моделирование низковольтных сельских электрических сетей 10/0,4 кВ // Вестник ПИТТУ имени академика М.С. Осими. 2018. № 4 (9). С. 37-42. EDN: FHEINT
4. Приходько В.М., Приходько И.В., Лучкин В.Ю. Особенности расчетов токов короткого замыкания с учетом сопротивления электрической дуги в судовых электроэнергетических системах // Вестник государственного университета морского и речного флота им. адмирала С.О. Макарова. 2016. № 5 (39). С. 185-195. EDN: WVOQUL
5. Попов М.Г., Лapidус А.А., Соловьева С.Н. Особенности выбора расчетного вида короткого замыкания при определении чувствительности защитных аппаратов в сетях 0,4 кВ // Релейная защита и автоматизация. 2022. № 2 (47). С. 11-15. EDN: WJWHQB
6. Попов М.Г., Соловьева С.Н., Лapidус А.А. и др. Повышение эффективности защит дальнего резервирования в распределительных сетях электроснабжения до 1 кВ // Вестник Чувашского университета. 2020. № 1. С. 155-166. EDN: USEGSY
7. Фоминич Э.Н., Колесник И.В., Тишков А.А., Курьяков Е.А. Система контроля состояния электрической изоляции в сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью // Электроэнергия. Передача и распределение. 2018. № 3 (48). С. 102-106. EDN: XQNIFF
8. Савицкий Л.В. Способ повышения уровня электробезопасности в трехфазных электрических сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью // Вестник Забайкальского государственного университета. 2013. № 4 (95). С. 84-89. EDN: SECKIR
9. Попов Н.М., Молодов И.А. Анализ переходных процессов в электрических сетях 0,38 кВ при однофазном коротком замыкании // Достижения науки и техники АПК. 2011. № 8. С. 71-73. EDN: OBGJZT
10. Смирнов Е.С., Мамедов Т.А., Загинайлов В.И. Сравнение токов однофазного короткого замыкания в сетях с глухозаземленной нейтралью // Агротехника и энергообеспечение. 2023. № 2 (39). С. 14-21. EDN: RBHCRV
11. Сорокин Н.С., Виноградова А.В. Расчет трехфазных и однофазных коротких замыканий в электрических сетях 0,4 кВ для

3. Выявленные зависимости токов и напряжений по протяженности линий электропередачи позволяют отличать режимы двухфазного и двухфазного на нулевой проводник коротких замыканий друг от друга и от других режимов. Это позволяет использовать полученные зависимости для идентификации данных режимов микроконтроллерными блоками управления секционирующих устройств и отключения участков сети с выявленными аварийными режимами. Идентификация исследуемых режимов позволяет получать диспетчеру сети информацию об их возникновении, участке, на которых они произошли, что сократит время на поиск и выявление причин повреждений.

References

1. Mohammed Tamali, Allali Malika, Boumediene Bouzidi, Toufik Toumi. Electrical Network's Modeling & Simulation Tools: The State of the Art. *Journal of Electrical and Control Engineering*. 2013;3:1-12. https://www.researchgate.net/publication/258120777_Electrical_Network's_Modeling_Simulation_Tools_The_State_of_the_Art
2. Komarov V.I., Kit Yu.V., Stets R.E. Using computer simulation to analyze electrical safety in power supply networks up to 1 kV. *Aktualnye nauchnye issledovaniya v sovremennom mire*. 2019;2-1(46):37-41. (In Russ.)
3. Rakhimov O.S., Mirzoev D.N. Modeling of low-voltage rural electric networks 10/0.4 kV. *Vestnik PITTU imeni akademika M.S. Osimi*. 2018;4(9):37-42. (In Russ.)
4. Prikhodko V.M., Prikhodko I.V., Luchkin V.Yu. Features of payments current short circuit in view of resistance arc in the ship electric power system. *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admirala S.O. Makarova*. 2016;5(39):185-195. (In Russ.)
5. Popov M.G., Lapidus A.A., Solovjeva S.N. The specifics of choosing the design type of short circuit when determining the sensitivity of protective devices in 0.4 kV networks. *Relevnaya zashchita i avtomatizatsiya*. 2022;2(47):11-15. (In Russ.)
6. Popov M.G., Solovjeva S.N., Lapidus A.A., Semenov K.N., Tereshkin A.V., Bogdanov A.V., Vasilyeva O.A. Improving efficiency of long-distance protection in distribution power supply networks up to 1 kV. *Vestnik Chuvashskogo universiteta*. 2020;1:155-166. (In Russ.)
7. Fominich E.N., Kolesnik I.V., Tishkov A.A., Kuryakov E.A. System of electrical insulation state control in networks with voltages up to 1000 volts with dead-earthed neutral. *Electric Power: Transmission and Distribution*. 2018;3(48):102-106. (In Russ.)
8. Savitskiy L.V. Method of increasing the level of electrical safety in three-phase electric network with voltage up to 1000 V with grounded neutral. *Trans-Baikal State University Journal*. 2013;4(95):84-89. (In Russ.)
9. Popov N.M., Molodov I.A. Electric networks, transient process, phase coordinates, single-phase short circuit. *Achievements of science and technology of agro-industrial complex*. 2011;8:71-73. (In Russ.)
10. Smirnov E.S., Mammadov T.A., Zaginailov V.I. Comparison of single-phase short-circuit currents in networks with a deeply earthed neutral. *Agrotekhnika i Energoobespechenie*. 2023;2(39):14-21. (In Russ.)
11. Sorokin N.S., Vinogradova A.V. calculation of three-phase and single-phase short circuits in 0.4 kV electric networks for checking the sensitivity of protective devices. *Agrotekhnika i energoobespechenie*. 2020;4(29):25-34. (In Russ.)

проверки чувствительности защитных аппаратов // Агротехника и энергообеспечение. 2020. № 4 (29). С. 25-34. EDN: MKNXTA

12. Ершов А.М., Хлопова А.В. Физическая модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ // Электробезопасность. 2016. № 2. С. 13-21. EDN: WKGUN

13. Валеев Р.Г., Млоток 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. EDN: RUHUEV

14. 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. <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28>

15. Млоток 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. EDN: SNZESB

16. Егорушкин И.О., Костюченко Л.П. Выбор автоматических выключателей для защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ с учетом допустимого времени отключения // Вестник КрасГАУ. 2007. № 5. С. 191-196. EDN: IARSNX

17. Егорушкин И.О., Костюченко Л.П., Кунгс Я.А. Учет допустимого времени отключения при выборе автоматических выключателей для защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ // Промышленная энергетика. 2009. № 2. С. 25-30. EDN: KGBEHL

18. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Разработка физической модели сельской электрической сети 0,4 кВ // Техника и оборудование для села. 2024. № 8 (326). С. 39-43. EDN: YRWLCA

19. Лансберг А.А., Букреев А.В. Компьютерное моделирование режимов несимметричных коротких замыканий в сельской электрической сети 0,4 кВ // Вестник НГИЭИ. 2025. № 1 (164). С. 45-57. EDN: NENRPD

20. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 4 (53). С. 22-29. EDN: LHIRSK

21. 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. EDN: AJQSZN

12. Ershov A.M., Khlopova A.V. The physical model of the mains voltage of 10/0.38 kV. *Electrical Safety*. 2016;2:13-21. (In Russ.)

13. Valeev R.G., Molotok A.V., Ershov A.M., Sidorov A.I. Modeling the power supply voltage 380 with overhead lines in the software environment Matlab-Simulink. *Izvestia vysshikh uchebnykh zavedeniy. Problemy energetiki*. 2013;9-10:116-128. (In Russ.)

14. Lansberg A.A., Vinogradov A.V., 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. (In Russ.) <https://doi.org/10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28>

15. Mlotok A.V., Ershov A.M., Valeev R.G., Sidorov A.I. An experimental 380 V electrical network. *Vestnik inzhenernoy shkoly dalnevostochnogo federalnogo universiteta*. 2014;2(19):96-107. (In Russ.)

16. Egorushkin I.O., Kostyuchenko L.P. Choosing circuit breakers for the protection of rural power supply networks of 0.4 kV, taking into account the permissible shutdown time. *Bulletin of KSAU*. 2007;5:191-196. (In Russ.)

17. Egorushkin I.O., Kostyuchenko L.P., Kungs Ya.A. Accounting for the permissible shutdown time when choosing circuit breakers to protect rural power supply networks of 0.4 kV. *Promyshlennaya Energetika*. 2009;2:25-30. (In Russ.)

18. Lansberg A.A., Vinogradov A.V. Development of a physical model of a rural 0.4 kV electric network. *Machinery and Equipment for Rural Area*. 2024;8(326):39-43. (In Russ.)

19. Landsberg A.A., Bukreev A.V. Computer simulation of the modes of asymmetric short circuits in a rural 0.4 kV electrical network. *Vestnik NGIEI*. 2025;1(164):45-57. (In Russ.)

20. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Analysis of the configuration of 0.4 kV electrical grids in the Orel region. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2023;4(53):22-29. (In Russ.)

21. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Sorokin N.S. Characteristics of electric companies by the number and length of transmission lines and substation capacity. *Electrical Engineering and Electrical Equipment in Agriculture*. 2022;2(47):31-41. (In Russ.)

Информация об авторах

¹ Виноградов Александр Владимирович, д-р техн. наук, доцент; winaleksandr@gmail.com; SPIN-код: 6652-9426, AuthorID: 690615

² Лансберг Александр Александрович, аспирант; lansbergaa@vk.com; SPIN-код: 5921-1955, AuthorID: 1032281

^{1,2} Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ; 109428, Российская Федерация, г. Москва, 1-й Институтский проезд, 5

Вклад авторов

А.В. Виноградов – научное руководство, концептуализация, анализ полученных данных, разработка рекомендаций, критический анализ, доработка текста;

А.А. Лансберг – методология, моделирование, визуализация, анализ полученных данных, формирование выводов исследования.

Статья поступила 23.11.2024, после рецензирования и доработки 28.04.2025; принята к публикации 29.04.2025

Author Information

Aleksandr V. Vinogradov¹, DSc (Eng), Associate Professor, Head of the Laboratory of Power Supply; winaleksandr@gmail.com; <https://orcid.org/0000-0001-6141-984X>

Aleksandr A. Lansberg², postgraduate student; lansbergaa@vk.com; <https://orcid.org/0000-0002-2834-6092>

^{1,2} Federal Scientific Agroengineering Center VIM; 109428, Russian Federation, Moscow, 1st Institutskiy Proezd Str., 5

Author Contribution

A.V. Vinogradov – research supervision, conceptualization, formal analysis, development of recommendations, critical analysis, writing – review and editing of the manuscript;

A.A. Lansberg – methodology, modeling, visualization, formal analysis, research conclusions.

Received 23.11.2024; Revised 28.04.2025; Accepted 29.04.2025