



РАЗРАБОТКА СПОСОБА И АЛГОРИТМА ЗАЩИТЫ СЕЛЬСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ 0,4 кВ ОТ КОРОТКИХ ЗАМЫКАНИЙ С ИСПОЛЬЗОВАНИЕМ УСТРОЙСТВА СЕКЦИОНИРОВАНИЯ

Виноградов А.В.^{1,2}, Лансберг А.А.¹

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

²Орловский государственный аграрный университет, г. Орел, Россия
lansbergaa@vk.com

Резюме: **АКТУАЛЬНОСТЬ.** Сельские электрические сети 0,4 кВ характеризуются низкой защищённостью от токов аварийных режимов, особенно удалённого однофазного короткого замыкания, имеющих значения, сопоставимые с токами нагрузки. Защитные аппараты в начале линии электропередачи не срабатывают на эти токи. Повышение защищённости линии электропередачи от указанных режимов можно обеспечить за счёт использования устройств сетевого секционирования, устанавливаемых в расщелку линии. В том числе это устройства для секционирования линий с отпайками – мультиконтактные коммутационные системы. Значения токов и напряжений в точке установки секционирующих устройств отличаются от токов и напряжений в начале линии в разных режимах. Также имеют особенности и значения токов и напряжений при аварийных режимах в отпайки и продолжении магистрали линии. Это позволяет создавать новые, более достоверные способы и алгоритмы защиты электрической сети 0,4 кВ от аварийных режимов, выявления участков, на которых они произошли. **ЦЕЛЬ.** Разработка способа защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий с использованием устройства секционирования и алгоритма его реализации. **МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ.** В ходе разработки способа защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий и алгоритма его реализации использовались результаты компьютерного моделирования аварийных режимов работы сельской электрической сети 0,4 кВ. Полученные при моделировании зависимости легли в основу разработки способа. Способ позволяет выявлять вид короткого замыкания и участок линии, на котором оно произошло. При разработке алгоритма защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий использовались положения ГОСТ 19.701-90 «Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения». **РЕЗУЛЬТАТЫ.** Разработан способ защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от коротких замыканий, выявления вида короткого замыкания и участка линии, на котором оно произошло. Разработан алгоритм реализации указанного способа. **ЗАКЛЮЧЕНИЕ.** Полученные результаты будут использоваться при разработке технических средств секционирования сельских электрических сетей 0,4 кВ и обосновании уставок их срабатывания.

Ключевые слова: линия электропередачи 0,4 кВ; однофазное короткое замыкание; секционирование; вакуумный контактор; микроконтроллерный блок управления.

Для цитирования: Виноградов А.В., Лансберг А.А. Разработка способа и алгоритма защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий с использованием устройства секционирования // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 4. С. 56-68. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-56-68.

DEVELOPMENT OF A METHOD FOR PROTECTING RURAL 0.4 kV ELECTRICAL NETWORKS FROM SHORT CIRCUITS USING A PARTITIONING DEVICE AND AN ALGORITHM FOR ITS IMPLEMENTATION

Vinogradov A.V.^{1,2}, Lansberg A.A.¹

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

²Orel State Agrarian University, Orel, Russia
lansbergaa@vk.com

Abstract: *RELEVANCE.* Rural 0.4 kV electrical networks are characterized by low protection against emergency currents, especially remote single-phase short circuits, which have values comparable to load currents. The protective devices at the beginning of the power line do not work on these currents. An increase in the protection of the power transmission line from these modes can be achieved through the use of network partitioning devices installed in the dissection of the line. These include devices for sectioning lines with desoldering – multi-contact switching systems. The values of currents and voltages at the point of installation of the sectioning devices differ from the currents and voltages at the beginning of the line in different modes. There are also special features and values of currents and voltages during emergency modes in the desoldering and continuation of the main line. This allows us to create new, more reliable methods and algorithms for protecting the 0.4 kV electrical network from emergency conditions and identifying the areas where they occurred. *THE PURPOSE.* Development of a method for protecting rural 0.4 kV electrical networks from short circuits using a partitioning device and an algorithm for its implementation. *RESEARCH METHODS.* During the development of a method for protecting rural 0.4 kV electrical networks from short circuits and an algorithm for its implementation, the results of computer modeling of emergency modes of operation of a rural 0.4 kV electrical network were used. The dependencies obtained during modeling formed the basis for the development of the method. The method allows you to identify the type of short circuit and the section of the line where it occurred. When developing an algorithm for protecting rural 0.4 kV electrical networks from short circuits, the provisions of GOST 19.701-90 "Schemes of algorithms, programs, data and systems were used. Conditional designations and rules of execution". *RESULTS.* A method has been developed to protect a 0.4 kV power transmission line with desoldering from short circuits, identify the type of short circuit and the section of the line where it occurred. An algorithm for implementing this method has been developed. *CONCLUSION.* The results obtained will be used in the development of technical means for sectioning rural electrical networks of 0.4 kV and substantiating their operating settings.

Keywords: power transmission line 0.4 kV; single-phase short circuit; sectioning; vacuum contactor; microcontroller control unit.

For citation: Vinogradov A.V., Lansberg A.A. Development of a method for protecting rural 0.4 kV electrical networks from short circuits using a partitioning device and an algorithm for its implementation. *Power engineering: research, equipment, technology.* 2025; 27 (4): 56-68. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-4-56-68.

Введение (Introduction)

В электрических сетях 0,4 кВ, выполненных в воздушном исполнении, проблема низкой защищённости от токов удалённых коротких замыканий остаётся актуальной. Это обусловлено рядом особенностей таких сетей, являющихся, преимущественно, сельскими. Чаще всего они подключены к трансформаторам низкой мощности. Трансформаторы номинальных мощностей 63 кВА, 100 кВА, 160 кВА, 250 кВА в совокупности составляют более 70% от общего парка трансформаторов в электросетевых компаниях [1]. При этом средняя протяжённость сельских электрических сетей 0,4 кВ до наиболее удалённой точки в регионах Центрального и Приволжского Федеральных округов РФ варьируется от 747 до 985 метров [2], что значительно превышает рекомендуемые Правилами устройства электроустановок (ПУЭ) и технической политикой ПАО «Россети» 500 метров. В свою очередь, наиболее часто используемыми проводами в сельских электрических сетях 0,4 кВ являются неизолированные типа А-25 и А-35, которые в совокупности составляют более 50% от общей протяжённости электрических сетей 0,4 кВ в регионах [3]. Перечисленные технические особенности сельских электрических сетей 0,4 кВ приводят к высоким значениям сопротивления петли «фаза-ноль» и, соответственно, к низким значениям тока однофазного короткого замыкания. Таким образом, ток данного аварийного режима может быть сопоставим с током нагрузки или номинальным током защитного коммутационного аппарата, что не позволяет последнему произвести отключение за указанное в пункте 1.7.79 ПУЭ время.

Режим однофазного короткого замыкания является наиболее распространённым повреждением в сельских электрических сетях 0,4 кВ и может возникнуть при схлестывании проводов. Например, в электрических сетях 0,4 кВ филиала ПАО «Россети Центр»–«Орёлэнерго» схлестывание проводов, вызванное падением веток и деревьев, ветровыми нагрузками, стало причиной 14% аварийных отключений за 2018-2023 годы [4].

При этом в сельских электрических сетях 0,4 кВ, эксплуатируемых польской электросетевой компанией EPS, среди 10458 аварийных отключений за 10 лет 23,08% вызваны схлестыванием проводов [5].

В работах [6, 7] отмечено, что используемые в настоящее защитные коммутационные аппараты (плавкие предохранители и автоматические выключатели), установленные на вводе линии электропередачи 0,4 кВ, обеспечивают защиту только первых 250-300 метров при возникновении однофазного короткого замыкания. Это связано с высокой кратностью их срабатывания по отношению к номинальному току защитного коммутационного аппарата [8]. Одним из эффективных решений повышения защищённости сельских электрических сетей 0,4 кВ от однофазных коротких замыканий является использование автоматических выключателей с микропроцессорным и электронным расцепителями. В отличие от устаревших автоматических выключателей с электромагнитными расцепителями, характеризующимися высокой кратностью срабатывания расцепителя к номинальному току, например, 3 раза и более, – для микропроцессорных и электронных расцепителей данная кратность составляет 1,5 раза. Они также обеспечивают возможность регулировки номинального тока расцепителя в диапазоне 0,4-1 номинального тока автоматического выключателя [9].

Челябинскими учёными Южно-Уральского государственного университета Ершовым А.М., Валеевым Р.Г. и Сидоровым А.И. усовершенствована концепция построения защиты сельских электрических сетей напряжением 0,4 кВ, которая заключается в секционировании по длине воздушной линии плавкими предохранителями [10, 11]. Предложенная концепция была проиллюстрирована на примере защиты воздушной линии электропередачи 0,4 кВ протяжённостью 500 метров, выполненной с использованием провода сечением 35 мм², питание которой осуществляется от трансформатора номинальной мощностью 160 кВА со схемой и группой соединения обмоток Y/Y_n-0 [12]. Отмечено, что секционирование воздушных линий электропередачи 0,4 кВ позволяет повысить электробезопасность их эксплуатации в 50 и более раз [13].

Наиболее совершенным техническим решением является использование автоматизированных устройств секционирования, таких как пункты секционирования, в том числе с функцией АВР, мультиконтактные коммутационные системы. Так, разработанный Виноградовой А.В., Виноградовым А.В., Псарёвым А.И. секционирующий пункт для сельских электрических сетей 0,4 кВ, был внедрён в эксплуатацию в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» в 2016 году и после доработан с учётом возможностей диспетчерского управления. В качестве коммутационного аппарата, обеспечивающего включение и отключение электрической сети, в секционирующем пункте используется вакуумный контактор. Управление вакуумным контактором производится микроконтроллерным блоком управления, который также осуществляет измерение параметров электрической сети 0,4 кВ. Разработаны технические решения по установке и креплению секционирующего пункта на опорах сельской электрической сети 0,4 кВ [14]; произведено технико-экономическое обоснование его использования на примере линии электропередачи 0,4 кВ, обеспечивающей электроснабжение производственных сельскохозяйственных потребителей [15].

В рамках концепции использования высокоавтоматизированных устройств секционирования в июне 2023 года в филиале ПАО «Россети Центр»-«Орёлэнерго» было внедрено устройство сетевого секционирования – мультиконтактная коммутационная система с двумя контактными группами и тремя выводами (МКС-2-3В), предназначенное для секционирования линий с отпайками. Внешний вид разработанного устройства в ходе опытно-промышленной эксплуатации в ноябре 2023 года представлен на рисунке 1.

Устройство разработано в рамках гранта от Фонда содействия инновациям по договору №17749ГУ/2022 от 13 мая 2022 года и является аналогом реклоузера для электрических сетей 0,4 кВ. На разработанное устройство получен патент РФ №2802722.

Устройство МКС-2-3В содержит 2 низковольтных вакуумных контактора для секционирования магистрального участка и отпайки, так как 90% сельских электрических сетей 0,4 кВ имеют одну отпайку в одной рассматриваемой точке линии [3]. Управление контакторами осуществляется микроконтроллерным блоком, который также 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, при необходимости, управление

её конфигурацией за счёт включения, или отключения контакторов устройства. Одной из основных задач устройства МКС-2-3В является защита сети от удалённых однофазных коротких замыканий в отпайке и на участке магистрали за устройством, отключение и локализация повреждённого участка.



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

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

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

Описанный выше функционал МКС-2-3В и понимание соотношений параметров режимов работы сети в точке установки данного устройства позволяют разработать новый способ и алгоритм защиты участков линий электропередачи 0,4 кВ от аварийных режимов, в том числе удалённых однофазных коротких замыканий, выявления вида аварийного режима и участка его возникновения.

Цель исследования заключается в разработке способа защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий с использованием устройства секционирования и алгоритма его реализации.

Материалы и методы (Materials and methods)

Ранее была создана компьютерная модель и выполнен ряд работ по моделированию аварийных режимов работы электрической сети 0,4 кВ. Внешний вид компьютерной модели в программном комплексе MATLAB Simulink представлен на рисунке 2.

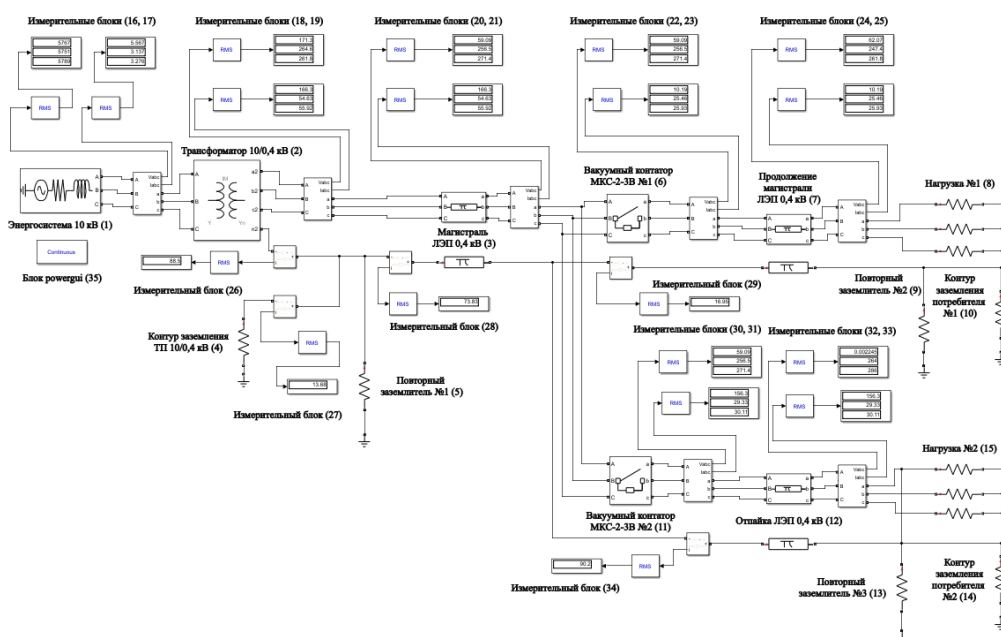


Рис. 2. Компьютерная модель электрической сети 0,4 кВ с устройством секционирования линий электропередачи

Fig. 2. A computer model of a 0.4 kV electrical network with a power line partitioning device

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

Компьютерная модель, представленная на рисунке 2, содержит: энергосистему 10 кВ (1), силовой трансформатор 10/0,4 кВ (2), общий магистральный участок ЛЭП 0,4 кВ (3), продолжение магистрального участка ЛЭП 0,4 кВ (7), отпайку от ЛЭП 0,4 кВ (12), контур заземления ТП 10/0,4 кВ (4), повторные заземлители совмещённого PEN-провода (5, 9, 13), нагрузки (8, 15), контуры заземления потребителей (10, 14), вакуумные контакторы устройства секционирования МКС-2-3В (6, 11), блоки измерения фазных токов и фазных напряжений (16-25, 30-33), блоки измерения тока в совмещённом PEN-проводнике (26, 27, 28, 29, 34), блок powergui (35).

В ходе имитационного моделирования нагрузочных и аварийных режимов работы в исследуемой электрической сети 0,4 кВ с устройством секционирования МКС-2-3В фиксировались токи в нейтральном проводе, протекающие на различных участках. Моделирование было реализовано для нагрузок суммарной мощностью 28,2 кВт. При этом была учтена возможная несимметрия нагрузки путём изменения их сопротивлений, что позволило добиться коэффициентов несимметрии по нулевой последовательности в точке их подключения со значениями 1,6%, 3,2%, 4,9% и 7,0%. При этом токи в нейтральном проводе фиксировались в пяти точках электрической сети 0,4 кВ: на вводе низкого напряжения 0,4 кВ трансформатора – $I(N)_T$; в заземляющем устройстве трансформатора – $I(N)_{З.Т}$; в общем участке магистрали линии электропередачи 0,4 кВ – $I(N)_{M1}$; на продолжении магистрали в точке установки вакуумного контактора №1 устройства секционирования типа МКС-2-3В – $I(N)_{M2}$; на отпайке в точке установки вакуумного контактора №2 устройства МКС-2-3В – $I(N)_O$. Результаты моделирования токов в нейтрали в различных режимах работы электрической сети 0,4 кВ представлены в таблице 1.

Таблица 1

Table 1

Токи нейтрали электрической сети 0,4 кВ в разных режимах
Neutral currents of the 0.4 kV electrical network in different modes

Коэффициент несимметрии, $K_{0\%}$, %	Ток нейтрали в нагрузочных режимах, А					Ток нейтрали в режимах однофазного КЗ, А				
	$I(N)_T$	$I(N)_{З.Т}$	$I(N)_{M1}$	$I(N)_{M2}$	$I(N)_O$	$I(N)_T$	$I(N)_{З.Т}$	$I(N)_{M1}$	$I(N)_{M2}$	$I(N)_O$
1,6	2,415	0,2102	2,19	1,095	1,095	88,5	13,68	73,83	16,95	90,2
3,2	4,871	0,4239	4,416	2,208	2,208	89,47	13,77	74,72	16,01	89,99
4,9	7,4	0,6438	6,708	3,354	3,354	90,39	13,85	75,56	15,07	89,72
7,0	10,85	0,944	9,832	4,916	4,916	91,96	14	76,99	13,81	89,5

*Источник: Получено по результатам компьютерного моделирования Source: Obtained from computer simulation results.

В ходе компьютерного моделирования с учётом результатов, представленных в таблице 1, было выявлено, что в аварийном режиме однофазного короткого замыкания ток в нейтральном проводе в точке подключения отпайки, в которой моделируется короткое замыкание, возрастает в 18,2-82,4 раза в зависимости от степени несимметрии нагрузок. Данный подход к контролю токов в нейтральном проводе позволит с высокой степенью достоверности определить возникновение аварийного режима и участок электрической сети 0,4 кВ, на котором произошло замыкание.

Также были определены зависимости отношения напряжений на неповреждённой фазе к повреждённым фазам при различных видах несимметричных коротких замыканий в электрической сети 0,4 кВ и разной удалённости точки измерения от начала линии. Исследование было реализовано без учёта влияния нагрузки, так как при её использовании соотношение напряжений увеличивается.

Распределение фазных напряжений в электрической сети 0,4 кВ в режиме однофазного короткого замыкания на примере радиальной линии протяжённостью 1023 метра, выполненной с использованием неизолированного провода А-35, подключенной к трансформатору ТМ-250/10/0,4 У/Ун-0 представлено на рисунке 3 [16]. Было выявлено, что при однофазных коротких замыканиях в электрической сети 0,4 кВ независимо от места возникновения аварийного режима от ввода низкого напряжения трансформатора 0,4 кВ данные зависимости сохраняются. Соотношение между фазными напряжениями неповреждённых фаз к фазному напряжению повреждённой фазы остается неизменным. Так, при удалённости до 25% от вывода низкого напряжения трансформатора до точки повреждения отношение составляет не более, чем 1,5 раза; при удалённости 25-50%

фазные напряжения неповрежденных фаз превышают напряжение поврежденной фазы в 1,6-2,4 раза, при удаленности 50-75% отношение составляет от 2,6 до 5 раз. В свою очередь, при удаленности от 75% и более отношение напряжений превышает значение 5 и более раз и при приближении к точке замыкания больше на порядки, т.е. десятки и сотни раз (теоретически до бесконечности). При этом в точке короткого замыкания напряжение поврежденной фазы принимает потенциал земли и составляет 0 В, а напряжения неповрежденных фаз возрастают в $\sqrt{2}$ раз [16].

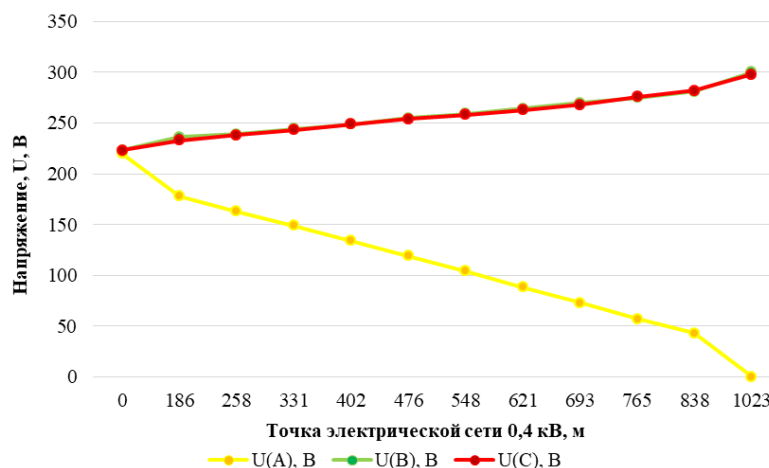


Рис. 3. Распределение напряжений при реализации опыта однофазного короткого замыкания в электрической сети 0,4 кВ

*Источник: Получено авторами в ходе исследования [16] Source: Obtained by the authors in the course of the study [16]

Аналогичные исследования были реализованы как для двухфазного короткого замыкания, так и для двухфазного короткого замыкания на нулевой проводник. Выявленные соотношения фазных напряжений представлены в таблице 2 [16, 17].

Таблица 2

Table 2

Соотношение фазных напряжений сельской электрической сети 0,4 кВ в аварийных режимах, вызванных несимметричными короткими замыканиями

The ratio of phase voltages of the rural electrical network is 0.4 kV in emergency modes caused by asymmetric short circuits

Вид аварийного режима	Процент от общей протяженности сельской электрической сети 0,4 кВ, %			
	0-25	25-50	50-75	75-100
Однофазное короткое замыкание, $I_{по(1)}$, А	$\leq 1,5$	1,5-2,6	2,6-5	≥ 5
Двухфазное короткое замыкание, $I_{по(2)}$, А	$\leq 1,27$	1,27-1,58	1,58-1,85	$\geq 1,85$
Двухфазное короткое замыкание на нулевой провод, $I_{по(2-N)}$, А	$\leq 1,52$	1,52-2,6	2,6-5,2	$\geq 5,2$

*Источник: Получено по результатам компьютерного моделирования [16, 17] Source: Obtained from computer simulation results [16, 17].

Значения отношения напряжений, представленные в таблице 2, характерны при любом значении тока аварийного режима. Это позволяет, при знании точки установки устройства секционирования в электрической сети 0,4 кВ, задать наименьшую уставку по соотношению напряжений, которое будет характерно при коротких замыканиях разных видов в наиболее удаленной точке сети. В свою очередь, при симметричном трёхфазном коротком замыкании в наиболее удаленной точке сети необходимо определить минимальную уставку по напряжению, которая будет характерна в точке установки устройства при протекании тока аварийного режима. При этом ток в нейтральном проводе увеличивается только в режимах однофазного короткого замыкания и двухфазного короткого замыкания на нулевой провод, а его значение в данных режимах

на порядок больше токов в нейтральном проводе, протекающих даже при значительной несимметрии фазных нагрузок. Это позволяет реализовать защиту электрической сети 0,4 кВ с использованием устройства секционирования, в которое будут заданы уставки по совокупности признаков, таких как соотношения напряжений по фазам, значения токов в нулевом проводнике в каждой из отпайки и магистрали, значение токов в фазных проводниках, характерных для каждого из аварийных режимов.

Часть соотношений, представленных в таблице 2, подтверждается результатами исследования режима однофазного короткого замыкания учёными Южно-Уральского государственного университета на компьютерной модели сельской электрической сети 0,4 кВ [18], на физической модели [19], а также на опытном полигоне с линией электропередачи 0,4 кВ на базе филиала ПАО «Россети Урал»-«Челябэнерго» [20].

Алгоритм реализации способа защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий с использованием устройства секционирования типа МКС-2-3В разработан в соответствии с ГОСТ 19.701-90 «Схемы алгоритмов, программ, данных и систем. Обозначения условные и правила выполнения».

Результаты (Results)

В ходе исследования был разработан способ защиты линии электропередачи с отпайками от коротких замыканий, выявления вида короткого замыкания и участка линии, на котором оно произошло. На разработанный способ подан патент на изобретение в ФИПС по заявке №2025101160 от 22.01.2025 года. Структурная электрическая схема предлагаемого способа представлена на рисунке 4.

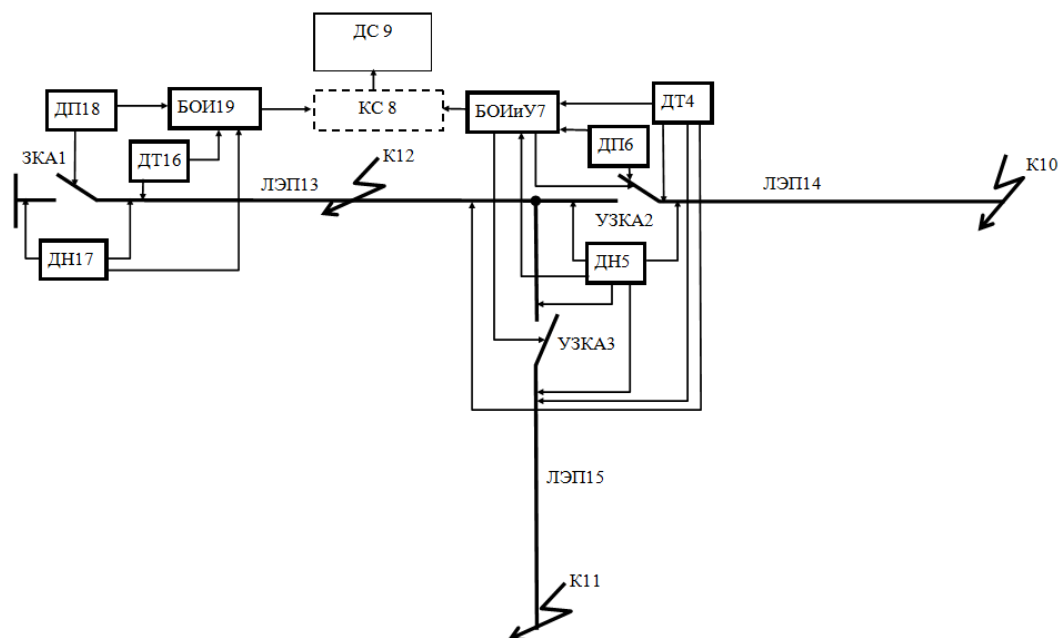


Рис. 4. Структурная электрическая схема способа защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от коротких замыканий, выявления вида короткого замыкания и участка линии, на котором оно произошло

Fig. 4. Structural electrical diagram of a method for protecting a 0.4 kV power transmission line with desoldering from short circuits, identifying the type of short circuit and the section of the line where it occurred

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

Представленная на рисунке 4 схема содержит: защитный коммутационный аппарат ЗКА1; управляемый защитный коммутационный аппарат УЗКА2, управляемый защитный коммутационный аппарат УЗКА3; датчик тока ДТ4; датчик напряжения ДН5; датчик положения ДП6; блок обработки информации и управления БОИиУ7; канал связи КС 8; диспетчер сети ДС9; точка короткого замыкания К10; точка короткого замыкания К11; точка короткого замыкания К12; начальный участок линии электропередачи ЛЭП13; первая отпайка ЛЭП14; вторая отпайка ЛЭП15; датчик тока ДТ16; датчик напряжения ДН17; датчик положения ДП18; блок обработки информации БОИ19.

Предлагаемый способ защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от удалённых коротких замыканий и выявления вида короткого замыкания и участка линии, на котором оно произошло, заключается в установке управляемых защитных коммутационных аппаратов в точке отпайки от линии электропередачи 0,4 кВ с учётом селективности их

работы с установленным в начале линии защитным коммутационным аппаратом. Способ обеспечивает возможность защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от коротких замыканий разных видов, в том числе возникающих в начале линии и удалённых симметричного и несимметричных коротких замыканий.

Согласно разработанному способу, управляемые защитные коммутационные аппараты оснащают датчиками тока, напряжения, положения, блоком обработки информации и управления и встроенным в него средством связи. С помощью данных средств контролируют ток в каждой фазе и нулевом проводнике, протекающие в магистрали линии и отпайке, фазные напряжения с обеих сторон от каждого установленного управляемого защитного коммутационного аппарата, положение каждого управляемого защитного коммутационного аппарата.

Выявление однофазного короткого замыкания реализуется следующим образом. Происходит фиксация повышения, по сравнению с заданной уставкой, тока в одной из фаз магистрали или отпайки и одновременно с этим повышение тока в нулевом проводнике. Затем выявляют понижение фазного напряжения той же фазы ниже установленной уставки, в которой зафиксирован повышенный ток, и повышение напряжения в двух других фазах. Исходя из этого, делают вывод о том, что в фазе на контролируемом участке сети, произошло однофазное короткое замыкание. Происходит отключение управляемого защитного коммутационного аппарата, установленного в устройстве секционирования, фиксируют изменение его положения и исчезновение напряжения после него. После этого делают вывод об успешном отключении аварийного режима и информируют диспетчера о факте однофазного короткого замыкания на данном участке с указанием повреждённой фазы, а также успешном его отключении. В алгоритме также предусмотрена реализация функции АПВ защитного коммутационного аппарата, отключившего повреждённый участок.

При возникновении других аварийных режимов, вызванных несимметричными короткими замыканиями, способ реализуется аналогичным образом с учётом характерных соотношений параметров. Опишем отличительные особенности электрических параметров, характерных для других режимов. В случае двухфазного короткого замыкания происходит выявление повышенного напряжения на одной из фаз и пониженного - на двух других фазах; при этом в двух фазах протекает повышенный ток. При двухфазном коротком замыкании на нулевой провод электрические параметры схожи с параметрами режима двухфазного короткого замыкания, но отличительной особенностью является дополнительно увеличение тока в нулевом проводе. Особенности трёхфазного короткого замыкания является значительное повышение тока в трёх фазах с одновременным падением фазных напряжений.

Устройство контролирует ток в отпайке и магистрали, что позволяет выявить участок, на котором возник аварийный режим.

Обсуждение (Discussions)

Предложенный выше способ осуществляется в соответствии с разработанными алгоритмами, который закладываются в микроконтроллерный блок управления устройством секционирования МКС-2-3В. На рисунке 5 показан пример алгоритма реализации способа при аварийном режиме однофазного короткого замыкания фазы «А» на нулевой проводник на участке магистрали, подключенной к устройству секционирования типа МКС-2-3В.

Алгоритм содержит: блоки «терминатор» (1, 18); блок «данные» (2); блоки «предопределённый процесс» (3, 5, 6, 8, 11, 12, 13, 14, 16, 17); блоки «решение» (4, 7, 15); блоки «соединитель» (9, 10).

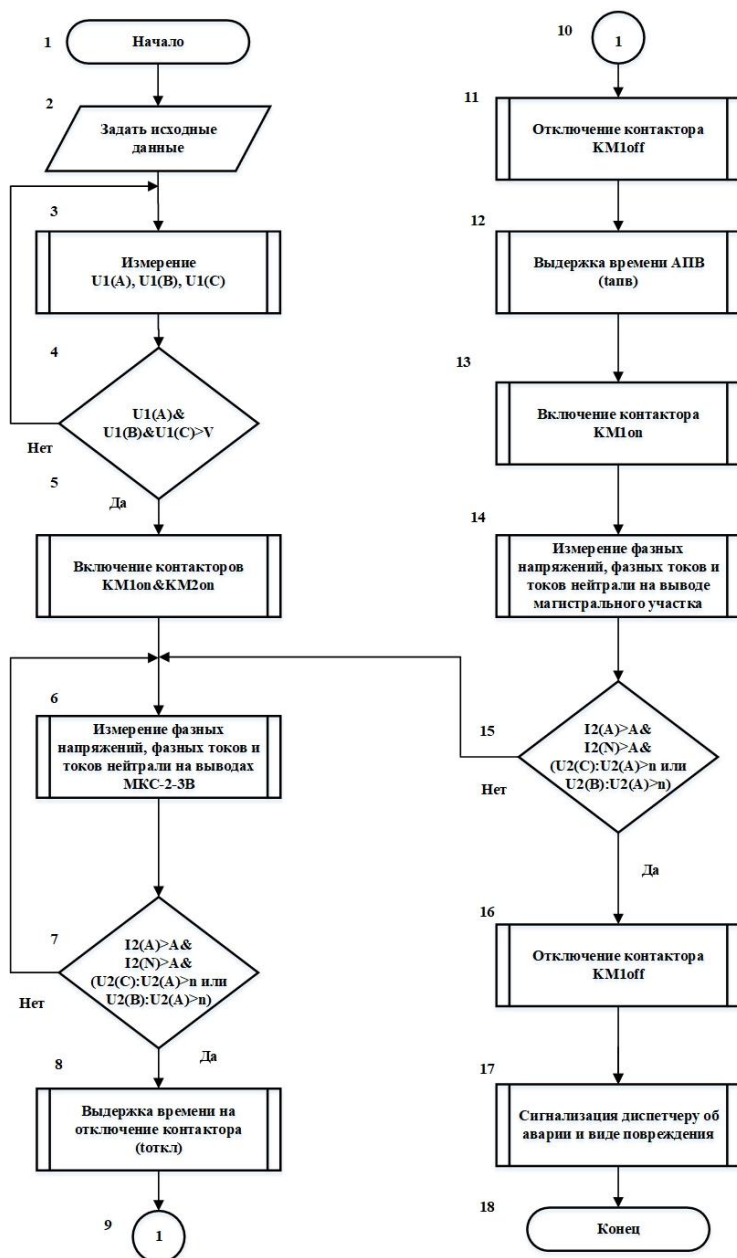


Рис. 5. Алгоритм реализации способа защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от удалённых коротких замыканий и выявления вида короткого замыкания и участка линии, на котором оно произошло

Fig. 5. Algorithm for implementing a method for protecting a 0.4 kV power transmission line with desoldering from remote short circuits and identifying the type of short circuit and the section of the line where it occurred

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

Запуск алгоритма осуществляется из ограничителя «Начало» (блок 1). Затем вводятся исходные данные (блок 2). К ним относятся: фазные напряжения на вводе устройства секционирования МКС-2-3В – $U1(A)$, $U1(B)$, $U1(C)$; фазные напряжения на выводе магистрали – $U2(A)$, $U2(B)$, $U2(C)$; фазные токи и ток нейтрали на выводе магистрали – $I2(A)$, $I2(B)$, $I2(C)$, $I2(N)$; фазные напряжения на выводе отпайки – $U3(A)$, $U3(B)$, $U3(C)$; фазные токи и ток нейтрали на выводе магистрали – $I3(A)$, $I3(B)$, $I3(C)$, $I3(N)$; команды на включение и отключение вакуумных контакторов устройства секционирования типа МКС-2-3В, обеспечивающих защиты магистрали и отпайки – $KM1on$, $KM2on$, $KM1off$, $KM2off$; выдержка времени на отключение вакуумного контактора при аварии – $t_{откл}$; выдержка времени на реализацию автоматического повторного включения вакуумных контакторов – $t_{АПВ}$; значение фазных напряжений на вводе устройства секционирования МКС-2-3В – V ; значение фазных токов и токов нейтрали на выводах устройства – A ; соотношение фазных напряжений на выводах устройства – n (зависят от места возникновения короткого замыкания и места установки устройства – таблица 2).

После задания исходных данных осуществляется измерение фазных напряжений $U1(A)$, $U1(B)$, $U1(C)$ на вводе устройства секционирования типа МКС-2-3В (блок 3). Затем осуществляется сравнение фазных напряжений $U1(A)$, $U1(B)$, $U1(C)$ на вводе устройства секционирования типа МКС-2-3В с минимально допустимым значением напряжения V (блок 4), при котором осуществляется включение вакуумных контакторов устройства. Если фазные напряжения $U1(A)$, $U1(B)$, $U1(C)$ ниже заданной уставки, осуществляется повторный процесс их измерения (блок 3) и последующего сравнения. Если они превышают заданную уставку, то микроконтроллерный блок управления устройством секционирования МКС-2-3В посылает сигналы на включение вакуумных контакторов (блок 5), к которым подключены отпайка и продолжение магистрали линии электропередачи 0,4 кВ.

Затем осуществляется измерение электрических параметров на выводах устройства (блок 6), к которым подключены защищаемые участки: фазных токов $I2(A)$, $I2(B)$, $I2(C)$, $I2(N)$, фазных напряжений $U2(A)$, $U2(B)$, $U2(C)$ и тока нейтрали $I2(N)$ на продолжении магистрали, а также фазных токов $I3(A)$, $I3(B)$, $I3(C)$, $I3(N)$, фазных напряжений $U3(A)$, $U3(B)$, $U3(C)$ и тока нейтрали $I3(N)$ на отпайке.

Продemonстрируем алгоритм выявления однофазного короткого замыкания фазы «А» на продолжении магистрали, подключенной к устройству секционирования. В блок 7 задаётся условие: $I2(A) > A \& I2(N) > A \& (U2(B)/U2(A) > n$ или $U2(C)/U2(A) > n$). В случае возникновения однофазного КЗ на фазе «В» условие будет иметь вид: $I2(B) > A \& I2(N) > A \& (U2(A)/U2(B) > n$ или $U2(C)/U2(B) > n$). А при повреждении фазы «С»: $I2(C) > A \& I2(N) > A \& (U2(C)/U2(B) > n$ или $U2(C)/U2(A) > n$). Аналогичные соотношения характерны в случае возникновения однофазных коротких замыканий на отпайке.

При этом значение коэффициента n , как ранее было отмечено, зависит от места установки устройства секционирования в электрической сети 0,4 кВ и регламентируется данными, полученными в ходе моделирования, представленными в таблице 2.

Если условие не соблюдается, производится повторный процесс измерения электрических параметров (блок 6). В случае превышения уставок контролируемыми электрическими параметрами производится выдержка времени (блок 7) на отключение вакуумного контактора $t_{откл}$ с целью отстройки от кратковременных ненормальных режимов и возможного срабатывания защитного коммутационного аппарата при повреждении на электрооборудовании потребителя. В ходе опытно-промышленной эксплуатации данное значение было принято равным 5 секунд. После выдержки времени производится процесс отключения вакуумного контактора (KM1off), к которому подключен участок продолжения магистрали линии электропередачи (Блок 11). Затем происходит отсчёт времени на автоматическое повторное включение (Блок 12). Реализация АПВ позволит восстановить электроснабжение потребителей в случае не устойчивого повреждения. После выдержки времени происходит повторное включение вакуумного контактора (KM1on), который осуществляет защиту продолжения магистрального участка электрической сети 0,4 кВ (Блок 13). После повторного включения вакуумного контактора (KM1on) осуществляется измерение электрических параметров в точке его установки (Блок 14).

Блок 15 осуществляет проверку схожую с той, которая реализуется в блоке 7. В случае повреждения других фаз и возникновения других видов симметричных и несимметричных коротких замыканий условия будут подобны тем, которые были сформулированы при описании блока 7. При неустойчивом повреждении и не превышении контролируемыми параметрами заданных уставок производится повторное измерение электрических параметров на выводах устройства (блок 6). В случае устойчивого повреждения и превышения заданных уставок производится повторный процесс отключения вакуумного контактора (KM1off) (блок 16). Затем осуществляется отправка сигнала диспетчеру о возникновении аварийного отключения и виде повреждения (блок 17).

Рассмотрим соотношения электрических параметров, характерных для других видов несимметричных коротких замыканий, которые используются в блоках 7 и 15. При возникновении двухфазного короткого замыкания на магистрали соотношения будут иметь вид:

- при замыкании фаз BC: $I2(B) > A \& I2(C) > A \& (U2(A)/U2(B) > n$ или $U2(A)/U2(C) > n$);
- при замыкании фаз AC: $I2(A) > A \& I2(C) > A \& (U2(B)/U2(A) > n$ или $U2(B)/U2(C) > n$);
- при замыкании фаз AB: $I2(A) > A \& I2(B) > A \& (U2(C)/U2(A) > n$ или $U2(C)/U2(B) > n$).

В случаях возникновения двухфазных коротких замыканий на нулевой провод на магистрали соотношения примут вид:

- при замыкании фаз BC на нулевой провод: $I2(B) > A \& I2(C) > A \& I2(N) > A \& (U2(A)/U2(B) > n$ или $U2(A)/U2(C) > n$);

– при замыкании фаз АС на нулевой провод:
 $I_2(A) > A \& I_2(C) > A \& I_2(N) > A \& (U_2(B)/U_2(A) > n \text{ или } U_2(B)/U_2(C) > n)$;

– при замыкании фаз АВ на нулевой провод:
 $I_2(A) > A \& I_2(B) > A \& I_2(N) > A \& (U_2(C)/U_2(A) > n \text{ или } U_2(C)/U_2(A) > n)$.

При возникновении трёхфазного короткого замыкания на продолжении магистрали, подключенной к устройству секционирования, соотношение будет иметь вид:
 $I_2(A) > A \& I_2(B) > A \& I_2(C) > A \& U_2(A) < V \& U_2(B) < V \& U_2(C) < V$.

В случае возникновения коротких замыканий на отпайке соотношения будут иметь аналогичный вид с учётом индекса отпайки.

Таким образом, разработанный алгоритм позволяет реализовывать способ защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайкой от коротких замыканий, выявлять вид короткого замыкания и участок линии, на котором оно произошло.

Заключение (Conclusions)

В результате проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1) Применение средств секционирования в линиях 0,4 кВ, в том числе в линиях с отпайками, требует создания достоверных способов выявления видов аварийных режимов и участков сети, на которых они возникают. Такие способы могут быть созданы на основе знания соотношений токов и напряжений в фазных и нулевых проводах в точке установки устройства секционирования, характерных для выявляемых режимов.

2) Разработанный способ защиты линии электропередачи 0,4 кВ с отпайками от коротких замыканий за счёт использования устройства сетевого секционирования типа МКС-2-3В обеспечивает возможность достоверного выявления вида короткого замыкания за счёт использования в качестве признаков не только значения тока, но и изменения соотношений напряжения по фазам. Также способ позволяет определить участок линии, на котором произошло короткое замыкание и повреждённую фазу. Также способ позволяет информировать диспетчера сети о результатах работы коммутационных аппаратов, установленных для защиты, что повышает наблюдаемость электрической сети 0,4 кВ и её управляемость, сокращает время перерывов в электроснабжении потребителей.

3) Алгоритм реализации предложенного способа учитывает характерные для разных аварийных режимов соотношения электрических параметров, что позволяет выявить не только вид аварийного режима, но и участок, на котором он возник, а также повреждённые фазы.

Литература

1. 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. Т. 23, №5. С. 34-45. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-34-45. EDN: TEJQYG.
2. 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. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-31-41. EDN: AJQSZN.
3. 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. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. EDN: LHIRSK.
4. Виноградова А.В. Причины отключений в сельских электрических сетях и их структурирование // Агротехника и энергообеспечение. 2024. №4(45). С. 12-19. EDN: FYMIMZ.
5. Łukasz GRAKOWSKI, Andrzej Ł. CHOJNACKI, Katarzyna GĘBCZYK, Kornelia BANASIK. Statistical Analysis and Modeling of the Reliability of Overhead Low Voltage Lines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 95 NR 12/2019. pp. 261-264. doi:10.15199/48.2019.12.59.
6. Ершов А.М., Валеев Р.Г. Методы и средства защиты воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий // Электробезопасность. 2016. №4. С. 33-46. EDN: YOQRNM.
7. Ершов А.М., Валеев Г.С., Валеев Р.Г. Режимы работы электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 7-8. С. 55-63. EDN: HXHWNL.
8. Ershov A.M., Valeev G.S., Valeev R.G. Protection of overhead lines with voltage of 380 v from the single-phase short circuits // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. Proceedings, Chelyabinsk, 2016. P. 7911457. DOI 10.1109/ICIEAM.2016.7911457. EDN: XNFJLQ.

9. Капустинский А.Ю., Константинова С.В. Повышение чувствительности защит в электрических сетях до 1 кВ путем применения микропроцессорных и полупроводниковых расцепителей // Энергетика. Известия высших учебных заведений и энергетических объединений СНГ. 2021. Т. 64, № 5. С. 393-407. DOI 10.21122/1029-7448-2021-64-5-393-407. EDN: AIJJA.W.
10. Ершов А.М., Сидоров А.И., Валеев Р.Г. Защита воздушных линий напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий с помощью секционирующих предохранителей // Промышленная энергетика. 2016. №11. С. 17-22. EDN: XELAQZ.
11. Валеев Р.Г., Тропин С.А., Ерунова А.В., Ермолаева Н.А. Методика расстановки секционирующих плавких предохранителей в сетях до 1000 В // Электробезопасность. 2014. №4. С. 3-16. EDN: UZNAVF.
12. Валеев Р.Г. Концепция построения защиты электрических сетей напряжением 380 В от однофазных коротких замыканий // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2013. Т. 13, №1. С. 30-34. EDN: QBUGVZ.
13. Валеев Р.Г. Повышение уровня электробезопасности путем секционирования воздушных линий 0,4 кВ // Электробезопасность. 2014. №2. С. 34-36. EDN: UZNART.
14. Псарев А.И., Виноградова А.В. Пункт секционирования с функцией АВР для электрических сетей 0,4 кВ: схемы и варианты установки // Агротехника и энергообеспечение. 2024. №3(44). С. 33-42. EDN: LHCUAC
15. Псарев А.И., Виноградова А.В. Техничко-экономическое обоснование применения секционирующих пунктов в сельских электрических сетях 0,4 кВ // Агротехника и энергообеспечение. 2024. №3(44). С. 65-74. EDN: QJADJW.
16. 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. EDN: WCTFZT.
17. 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. DOI 10.24412/2227-9407-2025-1-45-57. EDN: NENRPD.
18. 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.
19. Ершов А.М., Валеев Р.Г., Сидоров А.И., Млоток А.В. Разработка физической модели электрической сети напряжением 380 В // Электробезопасность. 2014. №1. С. 3-18. EDN: UZNANN.
20. 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.

Авторы публикации

Виноградов Александр Владимирович – д-р техн. наук, доцент, гл. науч. сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия.

Лансберг Александр Александрович – мл. науч. сотрудник ФГБНУ «Федеральный научный агроинженерный центр ВИМ», г. Москва, Россия. lansbergaa@vk.com

References

1. 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. Vol. 23, №5. pp. 34-45. DOI 10.30724/1998-9903-2021-23-5-34-45. EDN: TEJQYG.
2. 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. Vol. 69. №2(47). pp. 31-41. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-31-41. EDN: AJQSZN.
3. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Vinogradova A.V. Analysis of the configuration of 0.4 kV electrical grids of the Orel region // Electrical technologies and electrical equipment in the agro-industrial complex. 2023. Vol. 70, №4(53). pp. 22-29. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29. EDN: THIRSK.
4. Vinogradova A.V. Reasons for outages in rural electric networks and their structuring // Agrotechnics and energy supply. 2024. №4(45). pp. 12-19. EDN: FYMIMZ.

5. Łukasz GRAKOWSKI, Andrzej Ł. CHOJNACKI, Katarzyna GĘBCZYK, Kornelia BANASIK. Statistical Analysis and Modeling of the Reliability of Overhead Low Voltage Lines. PRZEGLĄD ELEKTROTECHNICZNY, R. 95 NR 12/2019. pp. 261-264. doi:10.15199/48.2019.12.59.
6. Ershov A.M., Valeev R.G. Methods and means of protecting overhead lines with 380 V voltage from single-phase short circuits // Electrical safety. 2016. №4. pp. 33-46. EDN: YOQRNM.
7. Ershov A.M., Valeev G.S., Valeev R.G. Modes of operation of an electric network with a voltage of 380 V with overhead lines // News of higher educational institutions. Energy problems. 2016. №7-8. pp. 55-63. EDN: XHXWNL.
8. Ershov A.M., Valeev G.S., Valeev R.G. Protection of overhead lines with voltage of 380 v from the single-phase short circuits // 2nd International Conference on Industrial Engineering, Applications and Manufacturing, ICIEAM 2016. Proceedings, Chelyabinsk, 2016. P. 7911457. DOI 10.1109/ICIEAM.2016.7911457. EDN: XNFJLQ.
9. Kapustinski A.Yu., Kanstantsinava S.V. Increasing the Sensitivity of Protections in Electrical Networks up to 1 kV by Using Microprocessor and Semiconductor Release Tripping Devices. Energetika. Proceedings of CIS higher education institutions and power engineering associations. 2021;64(5):393-407. DOI 10.21122/1029-7448-2021-64-5-393-407. EDN: AIJAW.
10. Ershov A.M., Sidorov A.I., Valeev R.G. Protection of overhead lines with 380 V voltage from single-phase short circuits using sectioning fuses // Industrial Power Engineering. 2016. №11. pp. 17-22. EDN: XELAQZ.
11. Valeev R.G., Tropin S.A., Yerunova A.V., Yermolayeva N.A. Placement technique of sectionalizing fuses in networks up to 1000 V // Electrical safety. 2014. №4. pp. 3-16. EDN: UZNAVF.
12. Valeev R.G. The concept of building protection of electric networks 380 V signal-phase shortcircuit// Bulletin of the South Ural State University. Series: Energy. 2013. Vol. 13, №1. pp. 30-34. EDN: QBUGVZ.
13. Valeev R.G. Improving an electrical safety by partitioning overhead lines of 0,4 kV // Electrical safety. 2014. №2. pp. 34-36. EDN: UZNAT.
14. Psarev A., Vinogradova A. Sectioning point with ats function for 0.4 kV electric networks: schemes and installation options// Agrotechnics and energy supply. 2024. №3(44). pp. 33-42. EDN: LHCUAC
15. Psarev A.I., Vinogradova A.V. Feasibility study of using sectionalizing points in rural electric networks of 0.4 kV // Agrotechnics and energy supply. 2024. №3(44). pp. 65-74. EDN: QJADJW.
16. 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. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28. EDN: WCTFZT.
17. Landsberg A. A., Bukreev A. V. Computer simulation of the modes of asymmetric short circuits in a rural 0.4 kV electrical network // Bulletin NGIEI. 2025. №1(164). P. 45–57. DOI: 10.24412/2227-9407-2025-1-45-57. EDN: NENRPD.
18. Valeev R.G., Mlotok A.V., Ershov A.M., Sidorov A.I. Modeling the power supply voltage 380 with overhead lines in the software environment MATLAB-Simulink // Izvestiya vysshikh uchebnykh zavedeniy. Energy problems. 2013. №9-10. PP. 116-128. EDN: RUHUEV.
19. Yershov A.M., Valeev R.G., Sidorov A.I., Mlotok A.V. The development of a physical model of the electrical network voltage of 380 V // Electrical safety. 2014. №1. pp. 3-18. EDN: UZNANN.
20. Mlotok A.V., Ershov A.M., Valeev R.G., Sidorov A.I. An experimental 380 V electrical network // Bulletin of the Engineering School of the Far Eastern Federal University. 2014. №2(19). pp. 96-107. EDN: SNZESB.

Authors of the publication

Alexander V. Vinogradov – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.

Alexander A. Lansberg – Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia.
lansbergaa@vk.com

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено 20.03.2025 г.

Отредактировано 30.06.2025 г.

Принято 03.07.2025 г.