

ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКА



УДК 621.314.21:621.316.1:621.3.027.2

DOI:10.30724/1998-9903-2025-27-1-59-69

ФИЗИЧЕСКОЕ МОДЕЛИРОВАНИЕ РЕЖИМА ОБРАТНОЙ ТРАНСФОРМАЦИИ В СЕЛЬСКОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 10/0,4 кВ

Лансберг А.А.¹, Виноградов А.В.¹, Панфилов А.А.²

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

²Орловский государственный аграрный университет, г. Орёл, Россия

lansbergaa@vk.com

Резюме: АКТУАЛЬНОСТЬ. В настоящее время существует опасность подачи несанкционированного напряжения в сельских электрических сетях 0,4 кВ, которое посредством обратной трансформации на трансформаторной подстанции может быть подано на сторону 10 кВ. Это может привести к смертельным несчастным случаям среди персонала электросетевых организаций, или сторонних лиц. ЦЕЛЬ. Исследование режима обратной трансформации в сельской электрической сети 10/0,4 кВ посредством физического моделирования. МЕТОДЫ. Исследование проводилось на физической модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ с применением однофазного трансформатора малой мощности в качестве источника несанкционированного напряжения, который подключался в сеть низкого напряжения на разном удалении от модели трёхфазного трансформатора 10/0,4 кВ. В опытах осуществлялись измерения электрических параметров на сторонах низкого и высокого напряжения модели трансформатора 10/0,4 кВ. Полученные значения, с использованием коэффициентов подобия, пересчитывались для сельской электрической сети 10/0,4 кВ, питающейся от трансформатора 10/0,4 кВ мощностью 250 кВА. РЕЗУЛЬТАТЫ. Выявлено, что подключение однофазного источника несанкционированного напряжения в сеть 0,4 кВ в зависимости от удаления его от трансформатора 10/0,4 кВ приводит к значениям напряжения на выводе 0,4 кВ трансформатора от 11 В до 81 В (при приближении к началу отходящей от трансформатора линии) на фазе, к которой подключен источник несанкционированного напряжения. На стороне 10 киловольт при этом напряжение изменяется от 234 В до 2579 В. Напряжения двух других фаз на стороне 10 кВ составляют от 66 до 421 В, а на стороне 0,4 кВ – от 4,4 В до 22 В. ЗАКЛЮЧЕНИЕ. Полученные результаты могут использоваться в качестве уставок срабатывания технических средств сигнализации и блокировки обратной трансформации, предотвращающих обратную трансформацию в электрических сетях 10/0,4 кВ.

Ключевые слова: обратная трансформация; несанкционированное напряжение; трансформатор; линия электропередачи; физическая модель; загрузка трансформатора; фазные напряжения.

Для цитирования: Лансберг А.А., Виноградов А.В., Панфилов А.А. Физическое моделирование режима обратной трансформации в сельской электрической сети 10/0,4 кВ // Известия высших учебных заведений. ПРОБЛЕМЫ ЭНЕРГЕТИКИ. 2025. Т. 27. № 1. С. 59-69. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-59-69.

PHYSICAL MODELING OF THE REVERSE TRANSFORMATION MODE IN A RURAL 0.4/10 kV ELECTRIC GRID

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

¹Federal Scientific Agroengineering Center VIM, Moscow, Russia

²Oryol State Agrarian University, Orel, Russia

lansbergaa@vk.com

Abstract: RELEVANCE. Currently, there is a danger of supplying unauthorized voltage in rural electrical networks of 0.4 kV, which through reverse transformation at a transformer substation

can be supplied to the 10 kV side. This can lead to fatal accidents among the staff of power grid organizations, or third parties. **THE PURPOSE.** Investigation of the reverse transformation mode in a rural 10/0.4 kV electric grid by means of physical modeling. **METHODS.** The study was conducted on a physical model of a 10/0.4 kV rural electric network using a single-phase low-power transformer as a source of unauthorized voltage, which was connected to a low-voltage network at different distances from the model of a three-phase 10/0.4 kV transformer. In the experiments, electrical parameters were measured on the low and high voltage sides of the 10/0.4 kV transformer model. The obtained values, using similarity coefficients, were recalculated for a rural 10/0.4 kV electric grid powered by a 10/0.4 kV transformer with a capacity of 250 kVA. **RESULTS.** It was revealed that connecting a single-phase unauthorized voltage source to a 0.4 kV network, depending on its removal from a 10/0.4 kV transformer, leads to voltage values at the 0.4 kV output of the transformer from 11 V to 81 V (when approaching the beginning of the line departing from the transformer) in the phase to which the unauthorized voltage source is connected. On the 10 kilovolt side, the voltage varies from 234 V to 2579 V. The voltages of the other two phases on the 10 kV side range from 66 to 421 V, and on the 0.4 kV side – from 4.4 V to 22 V. **CONCLUSION.** The results obtained can be used as setpoints for triggering technical means of signaling and blocking reverse transformation, preventing reverse transformation in electric networks of 10/0.4 kV.

Keywords: reverse transformation; unauthorized voltage; transformer; power line; physical model; transformer loading; phase voltages.

For citation: Lansberg A.A., Vinogradov A.V., Panfilov A.A. Physical modeling of the reverse transformation mode in a rural 0.4/10 kV electric grid. *Power engineering: research, equipment, technology*. 2025; 27 (1): 59-69. doi: 10.30724/1998-9903-2025-27-1-59-69.

Введение (Introduction)

В настоящее время в электросетевом комплексе происходит много несчастных случаев. Например, в электроэнергетических компаниях Греции с 1983 по 1996 гг. ежегодно происходило от 373 до 560 несчастных случаев. При этом 80% пострадавших имели должности оперативного персонала. Наиболее частыми причинами несчастных случаев стали нарушение правил охраны труда (18,84% от общего количества несчастных случаев) и неудовлетворительная организация безопасного выполнения работ (22,49%) [1]. При этом одними из наиболее частых поражающих факторов является попадание под наведённое напряжение на отключенных токоведущих частях электроустановок. Данное напряжение является несанкционированным, то есть неожиданно появившимся на токоведущих частях электроустановок для персонала электросетевых компаний, который встречает факт его наличия. Так, за 1998-2016 гг. в электросетевых компаниях России зафиксировано 34 несчастных случая от наведённого напряжения, 13 из которых произошли на воздушных линиях электропередачи 110 кВ [2]. Для минимизации возникновения несанкционированного напряжения на воздушных линиях электропередачи 110 кВ проводятся как технические и организационные мероприятия [3], реализуемые электросетевыми компаниями, так и разрабатываются новые способы и технические средства научными организациями. Например, разрабатываются новые методы расчёта наведённых напряжений [4], совершенствуются методы определения напряжений на отключенных линиях электропередачи [5], проводятся исследования влияния грозозащитного троса на величину наведённых напряжений на отключенных воздушных линиях электропередачи [6].

В работе [7] отмечено, что из 191 несчастного случая за 2014-2022 произошедших в электросетевых компаниях Российской Федерации такие поражающие факторы, как наведённое напряжение на отключенных электроустановках от высоковольтных установок, расположенных вблизи, привели к гибели 4 сотрудников. При этом наиболее редкий фактор обратной трансформации на трансформаторных подстанциях 10/0,4 кВ, вследствие которого несанкционированное напряжение появляется на токоведущих частях 0,4 кВ и 6-10 кВ, стал причиной 4 смертельных несчастных случаев.

Перечисленные выше факторы могут характеризоваться как несанкционированная подача напряжения на отключенные части электроустановок. Для высоковольтных электроустановок наиболее часто несанкционированное напряжение может появиться вследствие наведённого напряжения. При этом в низковольтных электроустановках факторов появления несанкционированного напряжения больше. Одним из факторов

является подача напряжения от резервного источника электроснабжения, который может быть на балансе у потребителя. Именно данный фактор стал причиной 4 несчастных случаев работников электросетевых компаний [7].

При этом несанкционированное напряжение может появиться не только от резервных источников генерации потребителей, но и от не правильных действий персонала с такими источниками, имеющимися в наличии у электросетевой компании. Например, в электросетевой компании ПАО «Россети Урал» используются 128 резервных дизельных генераторов [8]; а в ПАО «Россети Московский Регион» – 121 резервный дизельный генератор общей мощностью 34757 кВт [9]. В свою очередь, в ПАО «Россети Северо-Запад»-«Комиэнерго» используется дизельная электростанция мощностью 400 кВт для резервирования потребителей через ТП 20/0,4 кВ [10]. А в ПАО «Россети Волга» используется дизельная установка обратной трансформации мощностью 500 кВт для плавки гололеда на ВЛ 0,4 кВ и ВЛ 6-10 кВ [11].

Следует отметить, что дизельные и бензиновые генераторы на протяжении длительного периода времени остаются наиболее проработанным техническим решением не только при использовании их в качестве резервного источника электроснабжения электросетевыми компаниями, но и для резервирования промышленных потребителей агропромышленного комплекса [12] и сельских жилых домов [13], электроснабжения собственных нужд нефтепроводов [14-16], а также резервирования электроприёмников угольных шахт [17].

В работе [18] была проведена экспертная оценка вероятности несанкционированной подачи напряжения в сельских электрических сетях 10/0,4 кВ, которая позволила выявить удельное значение вероятности возникновения несанкционированного напряжения со значением 0,0056 случаев на один километр линии электропередачи 0,4 кВ в год. При этом фактические значения несанкционированного напряжения, которые характерны для сельских электрических сетей 10/0,4 кВ, в справочной литературе отсутствуют. Решить данную задачу, связанную с определением численных значений несанкционированного напряжения, возможно путём физического моделирования, которое является наиболее достоверным инструментом исследования процессов, происходящих в электрических сетях. Для решения данной задачи в лаборатории электроснабжения, электрооборудования и возобновляемой энергетики ФГБНУ ФНАЦ ВИМ была разработана физическая модель сельской электрической сети 10/0,4 кВ [19], на которой проводилось исследование режима несанкционированной подачи напряжения.

Цель исследования заключается в определении электрических параметров, характерных для режима несанкционированной подачи напряжения с последующей обратной трансформацией в сельской электрической сети 10/0,4 кВ на физической модели.

Материалы и методы (Materials and methods)

Для физической модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ были обоснованы коэффициенты подобия [19], которые позволяют производить пересчёт электрических параметров модели на промышленные, то есть получить характеристики действующей сельской электрической сети 0,4 кВ.

Пересчёт электрических параметров с помощью коэффициентов подобия производился для сельской электрической сети 0,4 кВ, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ-250 Y/Y_n 10/0,4 кВ с использованием провода А-35, потому что протяженность провода А-35 в сельских электрических сетях 0,4 кВ отдельных регионов достигает 27% [20], а трансформаторы мощностью 250 кВА составляют 13% от общего количества в парке трансформаторов 6-10 кВ [20]. Коэффициенты подобия для данных промышленных параметров представлены в таблице 1 [19].

Таблица 1

Table 1

Коэффициенты подобия для трансформатора ТМ-250 Y/Y_n 10/0,4 кВ и провода А-35
Similarity coefficients for transformer ONAN-250 Y/Y_n 10/0,4 kV and wire A-35

Мощность, S, кВА	Коэффициент подобия по напряжению, m_U , о.е.	Коэффициент подобия по сопротивлению, m_Z , о.е.	Коэффициент подобия по току, m_I , о.е.	Коэффициент подобия по мощности, m_S , о.е.
Коэффициенты подобия для стороны низкого напряжения НН				
250	0,1	21,44	0,0047	0,00047
Коэффициенты подобия для стороны низкого напряжения ВН				
250	0,038	3,42	0,011	0,0004

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

Опыты несанкционированной подачи напряжения реализовывались согласно принципиальной электрической схеме (рис. 1).

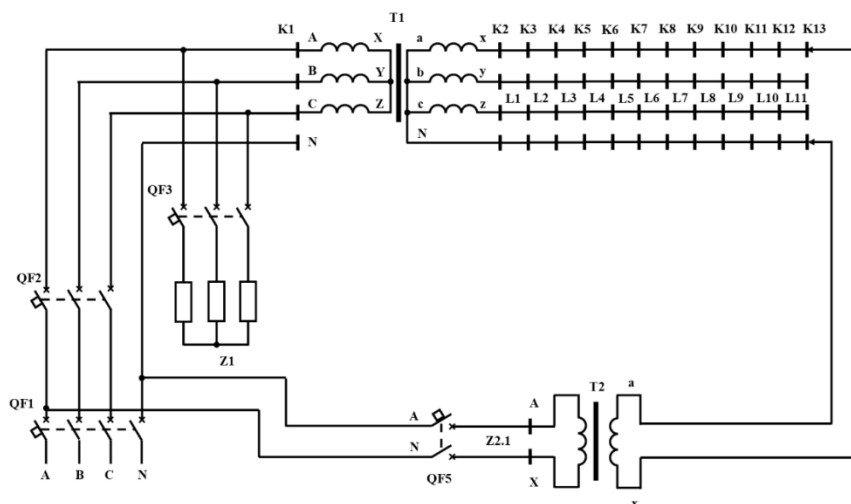


Рис. 1. Принципиальная электрическая схема реализации опыта несанкционированной подачи напряжения и обратной трансформации

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

Согласно рисунку 1, эксперименты осуществлялись следующим образом. Включался вводный автоматический выключатель лабораторного стенда QF1. При этом автоматический выключатель QF2, осуществляющий подачу напряжения на трёхфазный трансформатор малой мощности T1, предназначенный для питания физической модели, оставался в отключенном положении. В свою очередь, с помощью автоматического выключателя QF3 производилось включение нагрузки со стороны 10 кВ. Моделирование подачи несанкционированного напряжения в электрическую сеть 0,4 кВ реализовывалось путем включения двухполюсного автоматического выключателя QF5, в результате чего напряжение подавалось через однофазный трансформатор T2, использующийся в качестве источника несанкционированного напряжения (ИНН), на сторону 0,4 кВ электрической сети. Измерение электрических параметров производилось с использованием цифровых многофункциональных мультиметров типа Omix P99-MZ-3-0,5-RS485 и портативного мультиметра с щупами. Согласно рисунку 1, ИНН подключался к точке K13. В работе также рассматривались варианты приближения ИНН к модели трансформатора T1 и его подключение к точкам K10, K7, K4.

Во всех опытах в качестве источника несанкционированного напряжения (Т2) использовался однофазный трансформатор типа ТБС 2 0,1-220/22В мощностью 100 ВА с номинальным током 4,2 А. В реальности источником несанкционированного напряжения может быть резервный дизельный генератор, который может быть в наличии у потребителей электрических сетей 0,4 кВ и у персонала электросетевых организаций. Мощность модели источника несанкционированного напряжения составляла 62,5% от мощности используемого трёхфазного трансформатора модели типа ТТ 0,16-380/38 В с номинальным током 2,43 А.

В качестве нагрузки Z1 были использованы 2 вида одинаковых электроприёмников, а также в одном из опытов был выключен выключатель QF3, что имитировало работу модели трансформатора на холостом ходу. Так, были использованы лампы накаливания на 220 В мощностью 40 Вт (нагрузка №1), а также светодиодные лампы мощностью 15 Вт на напряжение 220 В (нагрузка №2). На физической модели было реализовано 12 опытов. Для каждого из 3 видов нагрузок исследовалось влияние обратной трансформации при подключении ИНН в 4 точках на модели сети 0.4 кВ.

Результаты (Results)

Одним из реализованных опытов было исследование явления обратной трансформации при использовании ламп накаливания и подключении источника несанкционированного напряжения к точке К4 (рис. 2).



Рис. 2. Внешний вид реализации опыта обратной трансформации на разработанной физической модели

Fig. 2. The appearance of the implementation of the experience of reverse transformation on the developed physical model

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

В ходе опыта при нагрузке №1 было измерено, что напряжения на модели электрической сети 0,4 кВ по фазам В и С находятся в диапазоне 2,2-4,5 В, а по фазе А, к которой подключен ИНН – 19,8-24,6 В, при номинальном напряжении физической модели 22 В. В свою очередь, на стороне 10 кВ модели трансформатора напряжение между фазой А и искусственной нейтралью (N) составило 98 В, между В и N – 15 В, между С и N – 16 В, при этом номинальное напряжение стороны высшего напряжения модели составляет 220 В.

При реализации опытов обратной трансформации были проведены измерения электрических параметров на физической модели (табл. 2).

Таблица 2

Table 2

Электрические параметры модели при реализации опыта обратной трансформации
Electrical parameters of the model during the implementation of the reverse transformation experience

Приборы	Активные мощности			Полные мощности		
	P(A), Вт	P(B), Вт	P(C), Вт	S(A), ВА	S(B), ВА	S(C), ВА
ОМХ1 (K1 – 10 кВ СТ)	10	0	0	10	0	0
ОМХ2 (K2 – 0,4 кВ СТ)	14	0	0	14	0	0
ОМХ3 (K4 – T2)	45	-	-	45	-	-
Приборы	Фазные токи			Коэффициенты мощности		
	I(A), А	I(B), А	I(C), А	cos φ(A), безразм.	cos φ(B), безразм.	cos φ(C), безразм.
ОМХ1 (K1 – 10 кВ СТ)	0,111	0,056	0,056	0,99	0,99	0,99
ОМХ2 (K2 – 0,4 кВ СТ)	1,701	0	0	0,99	1	1
ОМХ3 (K4 – T2)	1,701	-	-	0,99	-	-

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

С использованием коэффициентов подобия был осуществлен пересчёт значений на промышленные параметры для сельской электрической сети 0,4 кВ, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ 250 кВА 10/0,4 кВ со схемой и группой соединения обмоток Y/Yn и с использованием неизолированного провода А-35.

Обсуждение (Discussions)

Измеренные напряжения в рассматриваемом опыте были пересчитаны с использованием коэффициентов подобия на параметры сельской электрической сети, питания которой осуществляется от трансформатора ТМ-250 с использованием провода А-35 (рис. 3). Согласно рисунку 3, источник несанкционированного напряжения подключается к 258-ому метру линии электропередачи 0,4 кВ. Фазные напряжения на стороне высокого напряжения составляют 2579 В, 421 В и 395 В. То есть напряжение

между фазой А и нейтралью $U(A-N)$ составляет 45% от номинальных 5780 В, а для фаз $U(B-N)$ и $U(C-N)$ – 7% от номинального напряжения.

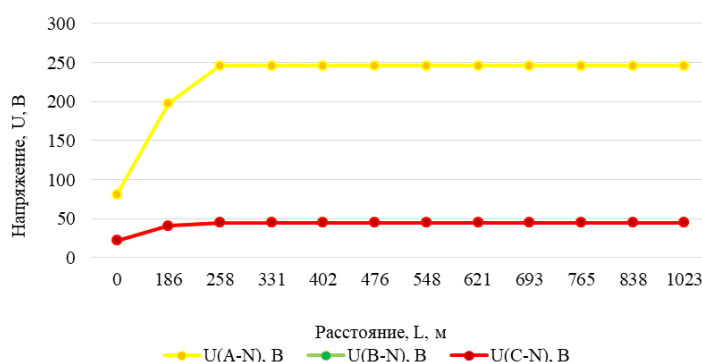


Рис. 3. Распределение напряжений в линии электропередачи 0,4 кВ

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

Исходя из результатов, представленных в таблице 2, следует, что коэффициенты активной мощности имеют значение 0,99 и являются характерными для сельских электрических сетей 0,4 кВ. При этом с помощью коэффициентов подобия было выявлено, что источник несанкционированного напряжения выдает 95,74 кВт. Исходя из значений мощности на сторонах высокого и низкого напряжения силового трансформатора, было выявлено, что потери в трансформаторе составляют 0,14 кВт, а в линии теряется 65,95 кВт. Ток модели 1,701 А на стороне 0,4 кВ соответствует току линии 362 А. Загрузка модели трёхфазного трансформатора модели составляет 70%, а источник несанкционированного напряжения Т2 выдает 41% своего номинального тока.

В ходе экспериментальных исследований режима несанкционированной подачи напряжения были получены значения напряжений на сторонах высокого и низкого напряжения силового трансформатора 10/0,4 кВ, характерные для прототипа электрической сети, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ-250 У/Ун 10/0,4 кВ с использованием провода А-35 (табл. 3). Так, при подключении источника несанкционированного напряжения от наиболее удалённой точки сельской электрической сети 0,4 кВ до удаления от трансформатора на 258 метров мощность нагрузки на стороне 10 кВ изменялась от значения 4,23 кВт до 29,64 кВт.

Так, исходя из результатов, представленных в таблице 3, следует, что при подключении источника несанкционированного напряжения на любом удалении от силового трансформатора фазное напряжение всех фаз на стороне 10 кВ является опасным и может привести к смертельным несчастным случаям. При этом на стороне 0,4 кВ подключение источника несанкционированного напряжения на удалении 1023 м от трансформатора приводит к возникновению фазного напряжения 11 В на выводе трансформатора, а на двух других фазах – 4,4-4,6 В. В свою очередь, приближение источника несанкционированного напряжения к выводу трансформатора 0,4 кВ приводит к увеличению напряжения на выводах трансформатора. Следует отметить, что напряжения на других фазах, к которым не подключен источник несанкционированного напряжения, являются наведёнными и появляются вследствие взаимоиндукции.

Таблица 3

Table 3

Напряжения на сторонах 10/0,4 кВ силового трансформатора в зависимости от точки подключения источника несанкционированного напряжения

The voltages on the sides of the 10/0.4 kV power transformer, depending on the connection point of the unauthorized voltage source

№ п/п	Точка подключения ИИН / Расстояние L от шин трансформатора 0,4 кВ, м	Сторона 10 кВ СТ (380 В модели)			Сторона 0,4 кВ СТ (38 В модели)		
		U(A), В	U(B), В	U(C), В	U(A), В	U(B), В	U(C), В
1	K4 / 258 м	2579	421	395	81	22	22
2	K7 / 476 м	1321	203	176	42	19	19
3	K10 / 693 м	658	124	111	24	9	9
4	K13 / 1023 м	234	68	66	11	4,6	4,4

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

В ходе экспериментов были получены промышленные параметры режимов несанкционированной подачи напряжения, полученные с помощью коэффициентов подобия, для сельской электрической сети 0,4 кВ, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ-250, при использовании нагрузки на стороне 10 кВ мощностью от 4,23 кВт до 29,64 кВт в зависимости от точки подключения источника несанкционированного напряжения в электрической сети 0,4 кВ (табл. 4-5).

Таблица 4

Table 4

Токи и нагрузка силового трансформатора и источника несанкционированного напряжения в зависимости от точки его подключения

Currents and loading of a power transformer and an unauthorized voltage source, depending on its connection point

№ п/п	Параметры стороны НН 0,4 кВ				Параметры стороны ВН 10 кВ		
	Точка подключения ИИН и расстояние L от шин 0,4 кВ, м	Ток I(A), А на стороне 0,4 кВ (38 В модели)	Загрузка СТ на вводе 0,4 кВ, β, %	Загрузка ИИН β, %	Ток I(A), А на стороне 10 кВ (380 В модели)	Ток I(B), А на стороне 10 кВ (380 В модели)	Ток I(C), А на стороне 10 кВ (380 В модели)
1	K4 / 258 м	362	70	41	10	5,1	5,1
2	K7 / 476 м	262	51	29	7,4	3,7	3,7
3	K10 / 693 м	203	39	23	5,7	2,8	2,8
4	K13 / 1023 м	141	27	16	4	2	2

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

Таблица 5

Table 5

Мощности в электрической сети и потери мощности в зависимости от точки подключения источника несанкционированного напряжения

Power in the electrical network and power loss depending on the connection point of the unauthorized voltage source

№ п/п	Точка подключения ИИН и расстояние L от шин 0,4 кВ, м	Мощность на выводе ИИН (T2), P(A), кВт	Мощность на вводе СТ (T1), P(A), кВт	Потери мощности в линии, ΔP(L), кВт	Суммарная мощность на стороне 10 кВ, ΣP 10кВ, кВт	Потери мощности в трансформаторе, ΔP(T), кВт
1	K4 / 258 м	95,74	29,79	65,95	29,64	0,14
2	K7 / 476 м	70,21	10,64	59,57	10,57	0,07
3	K10 / 693 м	53,19	4,26	48,93	4,23	0,03
4	K13 / 1023 м	36,17	0	36,17	0	0

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

В результате проведенного экспериментального исследования режимов несанкционированной подачи напряжения на физической модели сельской электрической сети 10/0,4 кВ с помощью коэффициентов подобия было выявлено, что при приближении источника несанкционированного напряжения к выводу трансформатора 0,4 кВ происходит увеличение токов и мощностей в электрической сети.

Следует отметить, что полученные результаты характерны для симметричной нагрузки на стороне 10 кВ мощностью от 4,23 кВт при подключении источника несанкционированного напряжения в наиболее удаленной точке электрической сети 0,4 кВ до 29,64 кВт при подключении ИИН на удалении 258 метров от трансформаторной подстанции 10/0,4 кВ.

Рассмотрим также результаты экспериментальных исследований при нагрузке №2 со стороны 10 кВ. Так, были получены электрические параметры режима несанкционированной подачи напряжения в сельской электрической сети 0,4 кВ, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ-250 с использованием провода А-35, при использовании симметричной нагрузки на стороне 10 кВ мощностью не более 3 кВт (табл. 6).

Таблица 6

Table 6

Напряжения на сторонах 10/0,4 кВ силового трансформатора в зависимости от точки подключения источника несанкционированного напряжения

The voltages on the sides of the 10/0.4 kV power transformer, depending on the connection point of the unauthorized voltage source

№ п/п	Точка подключения ИИН и расстояние L от шин 0,4 кВ, м	Сторона 10 кВ СТ (380 В модели)			Сторона 0,4 кВ СТ (38 В модели)		
		U(A), В	U(B), В	U(C), В	U(A), В	U(B), В	U(C), В
1	K4 / 258 м	4132	3342	2421	171	109	74
2	K7 / 476 м	3842	3000	1947	154	103	62
3	K10 / 693 м	3684	2737	1658	143	98	56
4	K13 / 1023 м	3610	2402	1302	132	93	49

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

В данных опытах напряжения имеют большие значения, чем при использовании нагрузки №1 на стороне 10 кВ мощностью 4,23-29,64 кВт. Например, фазное напряжение U(A-N) со стороны 10 кВ в 1,6-15,4 раза больше, чем при симметричной нагрузке на стороне 10 кВ мощностью 4,23-29,64 кВт, а фазные напряжения U(B-N) и (C-N) в 6,1-35,3 раза больше. При этом со стороны 0,4 кВ фазное напряжение U(A-N) больше в 2,1-12 раз для аналогичных точек подключения источника несанкционированного напряжения, а фазные напряжения U(B-N) и U(C-N) в 3,4-20,2 раза больше.

В опытах холостого хода напряжения как на вводе 10 кВ трёхфазного трансформатора, так и на выводе 0,4 кВ фактически совпадают с параметрами при использовании симметричной нагрузки №2 мощностью 3 кВт и отличаются не более, чем в 1,1 раза. Также друг от друга незначительно отличалось распределение мощностей в электрической сети 0,4 кВ при холостом ходе и нагрузке со стороны 10 кВ мощностью 3 кВт.

Таким образом, нагрузка №2 на стороне 10 кВ мощностью 3 кВт, практически соответствует режиму холостого хода трансформатора. При этом использование нагрузки №1 мощностью 4,23-29,64 кВт со стороны 10 кВ трансформатора, значение которой изменялось в зависимости от точки подключения источника несанкционированного напряжения, позволяет выявить минимальные значения напряжений, характерные при несанкционированной подаче напряжения в сельскую электрическую сеть 10/0,4 кВ.

Заключение (Conclusions)

В результате проведённого исследования можно сделать следующие выводы:

1) в настоящее время существует опасность возникновения несанкционированного напряжения в сельских электрических сетях 0,4 кВ, которое, посредством обратной трансформации на трансформаторной подстанции может быть подано на сторону 10 кВ;

2) для исследования режима обратной трансформации в электрической сети 0,4 кВ была разработана физическая модель, которая позволяет исследовать режим подачи несанкционированного напряжения со стороны 0,4 кВ, а полученные при экспериментальных исследованиях электрические параметры пересчитывать на промышленные с использованием коэффициентов подобия. Для проведения исследования был использован однофазный источник несанкционированного напряжения, мощность которого составила 62,5% мощности питающего трансформатора. Пересчёт измеренных значений осуществлялся для сельской электрической сети 0,4 кВ, питание которой осуществляется от трансформатора ТМ-250 с использованием неизолированного провода А-35;

3) было выявлено, что подключение однофазного источника несанкционированного напряжения в сеть 0,4 кВ в зависимости от удаления его от трансформатора 10/0,4 киловольт приводит к появлению значений напряжения на выводе 0,4 кВ трансформатора от 11 В до 81 В (при приближении к началу отходящей от трансформатора линии) на фазе, к которой подключен источник несанкционированного напряжения. На стороне 10 кВ при этом напряжение изменяется от 234 В до 2579 В. Напряжения двух других фаз на стороне 10 кВ составляют от 66 В до 421 В, а на стороне 0,4 киловольт – от 4,4 В до 22 В. Данные напряжения характерны для нагрузки со стороны 10 кВ мощностью 4,23-29,64 кВт, значения которой меняются по причине изменения места подключения источника несанкционированного напряжения в электрической сети 0,4 кВ.

Литература

1. Batra P.E., Ioannides M.G. Assessment of electric accidents in power industry. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries. 2002;12(2):151-169. <https://doi.org/10.1002/hfm.10005>.
2. Мюльбаер А.А. Анализ причин несчастных случаев при работах на воздушных линиях электропередачи, находящихся под наведённым напряжением // Новое в российской электроэнергетике. 2017. № 4. С. 71-77. EDN: YQFURN.
3. Муссонов Г.П., Снопкова Н.Ю. Исследование наведённых напряжений на отключенных воздушных линиях электропередачи с двупековыми опорами // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2015. №7(102). С. 187-194. EDN: UBLOPN.
4. Залесова О.В., Селиванов В.Н. Расчет наведённого напряжения на отключенных линиях электропередачи 110 кВ // Труды Кольского научного центра РАН. 2015. №2(28). С. 87-98. EDN: UYVJYB.
5. Мюльбаер А.А. Особенности расчета наведённого напряжения на отключенной цепи двухцепной воздушной линии электропередачи // Научный вестник Новосибирского государственного технического университета. 2016. №3(64). С. 146-160. EDN: WWTLYV.
6. Залесова О.В. Исследование влияния гроззащитного троса на величину наведённого напряжения на отключенной ВЛ // Труды Кольского научного центра РАН. 2018. Т. 9, №8(17). С. 102-108. DOI 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.102-108. EDN: MFTEXQ.
7. Виноградов А.В., Хименко А.В., Лансберг А.А. Анализ несчастных случаев в электросетевых компаниях // Агроинженерия. 2024. Т. 26, №2. С. 78-85. DOI 10.26897/2687-1149-2024-2-78-85. EDN: NSPOBM.
8. Иконников А., Парахин А. Использование передвижных электроустановок обратной трансформации // Электроэнергия. Передача и распределение. S2(29). 2023. С. 28-32. EDN: GRDPPS.
9. Иванов Р.В. Опыт применения в распределительных сетях 6-10 кВ областных филиалов «Россети Московский регион» передвижных электроустановок обратной трансформации 0,4/10(6) кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. №1(58). 2020. С. 106-111. EDN: DLNCGF.
10. Рогачева А., Курхули Г., Плотицын В. Опыт внедрения обратной трансформации 0,4/20 кВ с использованием установок резервной генерации // Электроэнергия. Передача и распределение. S1(28). 2023. С. 12-17. EDN: YLSVCF.
11. Толмачев Д., Багаев Д., Александров А. Многофункциональная автономная мобильная установка плавки гололеда на ВЛ на базе передвижной электроустановки обратной трансформации 0,4/10-6 кВ // Электроэнергия. Передача и распределение. S1(28). 2023. С. 28-32. EDN: UONTFF.
12. Попова М.В., Струков А.Н., Малышкин С.А. Резервирование электроэнергии с помощью дизельного генераторного устройства на объектах АПК // Вестник Российского государственного аграрного заочного университета. 2020. №34(39). С. 84-88. EDN: IYOODD.
13. Гусаров В.А., Баранов А.Ю. Автономное электроснабжение сельского жилого дома при использовании источников возобновляемой энергии и ДЭС для резерва // Инновации в сельском хозяйстве. 2019. №1(30). С. 58-66. EDN: ODDOQC.
14. Суслов К.В., Шушпанов И.Н., Воронцов Д.В. Использование возобновляемых источников энергии для питания собственных нужд нефтепровода // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2018. Т. 20, № 1-2. С. 70-79. EDN: XWBLNZ.
15. Воронцов Д.В., Уколова Е.В., Шушпанов И.Н. Виртуальные станции для электроснабжения аварийных задвижек магистральных нефтепроводов // Вестник Иркутского государственного технического университета. 2016. Т. 20, №9(116). С. 86-94. DOI 10.21285/1814-3520-2016-9-86-94. EDN: WMWEYF.
16. Шушпанов И.Н., Уколова Е.В. Применение возобновляемых источников электроэнергии для питания собственных нужд нефтегазопроводов // Электрооборудование: эксплуатация и ремонт. 2016. № 11-12. С. 74-81. EDN: XWVZBH.
17. Глушкова А.И., Долгопол Т.Л., Воробьева Д.Ю. Сравнительный анализ способов повышения надежности электроснабжения угольных шахт Кузбасса // Вестник Кузбасского государственного технического университета. 2016. №6(118). С. 140-145. EDN: XVKMYJ.
18. Виноградов А.В., Панфилов А.А. Оценка вероятности несанкционированной подачи напряжения в сельских электрических сетях 0,4-10 кВ // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2024. Т. 71, №2. С. 29-36. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-2-29-36. EDN: TPLJYA.
19. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Разработка физической модели сельской электрической сети 0,4 кВ // Техника и оборудование для села. 2024. №8. С. 39-43. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-8-39-43. EDN: YRWLCA.
20. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Сорокин Н.С. Характеристика электросетевых компаний по количеству и протяженности линий электропередачи, мощности подстанций //

Авторы публикации

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

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

Панфилов Александр Александрович – аспирант ФГБОУ ВО «Орловский государственный аграрный университет», г. Орёл, Россия.

References

1. Batra P.E., Ioannides M.G. Assessment of electric accidents in power industry. Human Factors and Ergonomics in Manufacturing & Service Industries. 2002;12(2):151-169. <https://doi.org/10.1002/hfm.10005>.
2. Mulbayer A.A. 2017. Analysis of the causes of accidents during work on overhead power transmission lines under induced voltage // New in the Russian electric power industry. №4. pp. 71-77. EDN: YQFURH.
3. Musonov G.P., Snopkova N.Yu. 2015. Investigation of induced voltages on disconnected overhead power lines with double-chain supports // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. №7(102). pp. 187-194. EDN: UBLOPN.
4. Zalesova O.V., Selivanov V.N. 2015. Calculation of induced voltage on disconnected 110 kV power lines // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. №2(28). pp. 87-98. EDN: UYBJYB.
5. Mulbayer A.A. 2016. Features of the calculation of induced voltage on a disconnected circuit of a two-chain overhead power transmission line // Scientific Bulletin of the Novosibirsk State Technical University. №3(64). pp. 146-160. EDN: WWTLYV.
6. Zalesova O.V. 2018. Investigation of the effect of a lightning protection cable on the magnitude of induced voltage on a disconnected overhead line // Proceedings of the Kola Scientific Center of the Russian Academy of Sciences. Vol. 9, №8(17). pp. 102-108. DOI 10.25702/KSC.2307-5252.2018.9.8.102-108. EDN: MFTEXQ.
7. Vinogradov A.V., Khimenko A.V., Lansberg A.A. Analysis of accidents in electric grid companies // Agroengineering. Vol. 26, №2. 2024. pp. 78-85. DOI 10.26897/2687-1149-2024-2-78-85. EDN: NSPOBM.
8. Ikonnikov A., Parakhin A. 2023. The use of mobile electrical installations of reverse transformation // Electricity. Translation and distribution. S2(29). C. 28-32. EDN: GRDPPS.
9. Ivanov R.V. 2020. Experience of using 0.4/10(6) kV mobile reverse transformation electrical installations in the distribution networks of 6-10 kV regional branches of Rosseti Moscow Region // Electric Power. Transmission and distribution. №1(58). pp. 106-111. EDN: DLNCGF.
10. Rogacheva A., Kurkhuli G., Plotitsyn V. 2023. Experience in implementing 0.4/20 kV reverse transformation using backup generation units // Electricity. Translation and distribution. S1(28). C. 12-17. EDN: YLSVCF.
11. Tolmachev D., Bagaev D., Alexandrov A. 2023. Multifunctional autonomous mobile ice melting plant on overhead lines based on a mobile electrical installation of reverse transformation 0.4/10-6 kV // Electric power. Transmission and distribution. S1(28). C. 28-32. EDN: UONTFF.
12. Popova M.V., Strukov A.N., Malyshkin S.A. Reservation of electricity using a diesel generator set at agricultural facilities // Bulletin of the Russian State Agrarian Correspondence University. 2020. No.34(39). pp. 84-88. EDN: IYOODD.
13. Gusarov V.A., Baranov A.Yu. Autonomous power supply of a rural residential building using renewable energy sources and DES for reserve // Innovations in agriculture. 2019. No.1(30). pp. 58-66. EDN: ODDOQC.
14. Suslov K.V., Shushpanov I.N., Vorontsov D.V. The use of renewable energy sources to power the pipeline's own needs // Izvestia of Higher educational institutions. Energy problems. 2018. Vol. 20, No. 1-2. pp. 70-79. EDN: XWBLNZ.

15. Vorontsov D.V., Ukolova E.V., Shushpanov I.N. Virtual stations for power supply of emergency valves of main oil pipelines // Bulletin of the Irkutsk State Technical University. 2016. Vol. 20, No. 9(116). pp. 86-94. DOI 10.21285/1814-3520-2016-9-86-94. EDN: WMWEYF.

16. Shushpanov I.N., Ukolova E.V. The use of renewable energy sources to power their own needs of oil and gas pipelines // Electrical equipment: operation and repair. 2016. No. 11-12. pp. 74-81. EDN: XWVZBH.

17. Glushkova A.I., Dolgopol T.L., Vorobyova D.Yu. Comparative analysis of ways to improve the reliability of power supply to Kuzbass coal mines // Bulletin of the Kuzbass State Technical University. 2016. No.6(118). pp. 140-145. EDN: XVKMYJ.

18. Vinogradov A.V., Panfilov A.A. 2024. Assessment of the likelihood of unauthorized power supply in rural electric networks of 0.4-10 kV // Electrotechnology and electrical equipment in the agro-industrial complex. Vol. 71, №2. pp. 29-36. DOI 10.22314/2658-4859-2024-71-2-29-36. EDN: TPLJYA.

19. Lansberg A.A., Vinogradov A.V. 2024. Development of a physical model of a 0.4 kV rural electric network // Machinery and equipment for rural areas. №8. pp. 39-43. DOI: 10.33267/2072-9642-2024-8-39-43. EDN: YRWLCA.

20. Vinogradov A.V., Lansberg A.A., Sorokin N.S. 2022. 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. Vol. 69. №2(47). pp. 31-41. DOI 10.22314/2658-4859-2022-69-2-31-41. EDN: AJQSZN.

Authors of the publication

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

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

Alexander A. Panfilov – Oryol State Agrarian University, Orel, Russia.

Шифр научной специальности: 2.4.3 Электроэнергетика

Получено 26.10.2024 г.

Отредактировано 05.11.2024 г.

Принято 15.11.2024 г.