

УДК 004.94:621.315.1
Шифр специальности ВАК 2.4.3.

СИММЕТРИЧНЫЕ СОСТАВЛЯЮЩИЕ ТОКОВ И НАПРЯЖЕНИЙ НАГРУЗОЧНЫХ И АВАРИЙНЫХ РЕЖИМОВ РАБОТЫ РАДИАЛЬНОЙ ЭЛЕКТРИЧЕСКОЙ СЕТИ 0,4 КВ

В настоящее время остается актуальной проблема выявления аварийных режимов работы электрических сетей 0,4 кВ. В литературных источниках отмечено, что контроль симметричных составляющих напряжений является одним из достоверных способов идентификации аварийных режимов. Исследование распределения симметричных составляющих токов и напряжений в нагрузочных и аварийных режимах работы электрической сети 0,4 кВ было реализовано на компьютерной модели. По результатам моделирования аварийных режимов, вызванных короткими замыканиями и обрывами проводов, были установлены зависимости распределения симметричных составляющих напряжений обратной и нулевой последовательностей вдоль протяженности линии.

При использовании устройств автоматизации и их установки на 50 % от общей протяженности линии электропередачи 0,4 кВ и более возможно использовать минимальную уставку по составляющей напряжения обратной последовательности со значением 20 % от номинального фазного напряжения сети, а по составляющей напряжения нулевой последовательности — 12 %. Это позволит идентифицировать аварийные режимы работы и повысить электробезопасность эксплуатации электрических сетей 0,4 кВ.

Благодарности: автор выражает благодарность команде «Проект РЗА» в лице главного редактора Дмитрия Василевского и научного редактора Андрея Ильинского за помощь в составлении аналитических выражений нагрузочных и аварийных режимов работы электрической сети 0,4 кВ, а также анонимному рецензенту за полезные замечания.

АВТОР:
А.А. Лансберг,
lansbergaa@vk.com,
ORCID ID 0000-0002-2834-6092,
младший научный сотрудник
лаборатории электроснабжения,
ФГБНУ «Федеральный научный
агроинженерный центр ВИМ»,
Москва, Россия

КЛЮЧЕВЫЕ СЛОВА:
#моделирование; #компьютерная
модель; #короткое замыкание;
#обрыв провода; #симметричные
составляющие

↓ ДЛ Я ЦИТИРОВАНИЯ:

Лансберг А.А. Симметричные составляющие токов и напряжений нагрузочных и аварийных режимов работы радиальной электрической сети 0,4 кВ // Энергия единой сети. 2026. № 1 (80). С. 34–42.



ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время воздушные линии электропередачи (ЛЭП) 0,4 кВ характеризуются низкой защищенностью от аварийных режимов работы и низкой надежностью электроснабжения. Это проявляется в том, что поток отказов достигает 29,06 отключений/100 км/год¹ [1], а среднее время аварийного перерыва в электроснабжении — 2,3 ч [2]. Из-за завышенной протяженности и использования устаревших типов защитных коммутационных аппаратов воздушные линии электропередачи 0,4 кВ недостаточно защищены от токов однофазного короткого замыкания (ОКЗ) [3]. Это приводит к невозможности отключения аварийного режима за время, установленное требованиями Правил устройства электроустановок¹. С целью исследования электрических параметров в режиме устойчивого ОКЗ в электрической сети 0,4 кВ [4] разработана физическая модель радиальной линии электропередачи 0,4 кВ. Для решения аналогичной задачи в работе [5] также разработана компьютерная модель воздушной линии электропередачи. Наиболее достоверное исследование электрических параметров в режиме ОКЗ было реализовано с использованием действующего полигона сети 0,4 кВ электросетевой организации — филиала ПАО «Россети» — «Челябинскэнерго» [6]. Эти работы обеспечили возможность разработать методы выбора места установки плавких предохранителей, предназначенных для секционирования электрических сетей 0,4 кВ, которые реагируют на ток в фазном проводе и позволяют защитить участок до точки установки следующего коммутационного аппарата [7].

С помощью упомянутой компьютерной модели было реализовано исследование режимов обрывов фазного и нейтрального проводов в радиальной электрической сети 0,4 кВ, которое позволило выявить соотношение фазных напряжений и симметричных составляющих напряжений на вводе у потребителя, подключенного в наиболее удаленной точке линии [8]. На основе результатов исследований была предложена концепция использования микропроцессорных приборов учета электроэнергии, позволяющих выявлять аварийные режимы [9].

Одним из широко распространенных аварийных режимов является обрыв фазного провода 6–10 кВ на вводе силового трансформатора 6–10/0,4 кВ, в результате которого не возникает однофазного замыкания на землю в сети с изолированной нейтралью [10]. Данный режим сопровождается значительным снижением фазных напряжений в сети 0,4 кВ, что было выявлено в результате исследований на физической модели [11] и экспериментальных исследований на действующем полигоне электрической сети 0,4 кВ [12]. Также были определены значения симметричных составляющих напряжений на вводе трансформаторной подстанции 0,4 кВ и в точке подключения потребителя электрической сети [13]. Полученные электрические параметры предлагается использовать

в качестве уставок микропроцессорных счетчиков электроэнергии, что позволит осуществлять выявление данного типа аварийного режима [14]. Отмечено, что симметричные составляющие напряжений обратной и нулевой последовательностей являются одними из электрических параметров, по значениям которых можно сделать вывод о возникновении аварийных режимов работы электрических сетей 0,4 кВ, в том числе вызванных обрывами проводов [14].

Разработана концепция применения высокоавтоматизированных устройств секционирования на ЛЭП 0,4 кВ, являющихся аналогами реклоузеров для сетей среднего класса напряжения [15]. Для включения и отключения участков электрической сети 0,4 кВ в устройстве используются вакуумные контакторы, управление которыми осуществляется микроконтроллерным блоком. Ранее для данных устройств были обоснованы уставки для защиты от коротких замыканий по токам, протекающим в фазных и нулевом проводах, а также по напряжениям, контролируемым в точке установки устройства [16]. В работе [17] рассматривалась возможность использования уставок по токам и напряжениям для устройств секционирования в аварийных режимах, вызванных обрывами фазных проводов. Установлено, что мониторинга только данных электрических параметров может быть недостаточно для выявления и распознавания аварийных режимов, вызванных обрывами проводов, при которых токи и напряжения вдоль протяженности линии электропередачи 0,4 кВ незначительно отличаются от электрических параметров нагрузочных режимов. В связи с этим предлагается рассмотреть возможность использования симметричных составляющих в качестве электрических параметров, позволяющих повысить достоверность распознавания аварийного режима в совокупности со значениями токов и напряжений.

▼ **Цель работы** заключается в исследовании распределения симметричных составляющих токов и напряжений вдоль радиальной линии электропередачи 0,4 кВ в нагрузочных и аварийных режимах работы.

МАТЕРИАЛЫ И МЕТОДЫ ИССЛЕДОВАНИЯ

Исследование распределения симметричных составляющих в нагрузочных и аварийных режимах работы электрической сети 0,4 кВ было реализовано на компьютерной модели, для которой погрешность получаемых результатов моделирования не превышает 10 % [18]. Внешний вид модели представлен на рис. 1. Принцип ее работы основан на построении схем замещения прямой, обратной и нулевой последовательностей электрической сети 10/0,4 кВ, на основе которых описывается матрица соединений элементов сети. Затем определяются ветви и контуры, которые используются для записи уравнения по законам Кирхгофа. В зависимости от моделируемого режима работы в уравнения вводятся граничные условия,

¹Правила устройства электроустановок [Текст] / Федеральная служба по экологическому, технол. и атомному контролю. — 7-е изд. — Санкт-Петербург: ДЕАН, 2013. — 701 с., [2] л. карты: ил., табл.; 21 см. — (Безопасность труда России).; ISBN 978-5-93630-923-6 (в пер.).

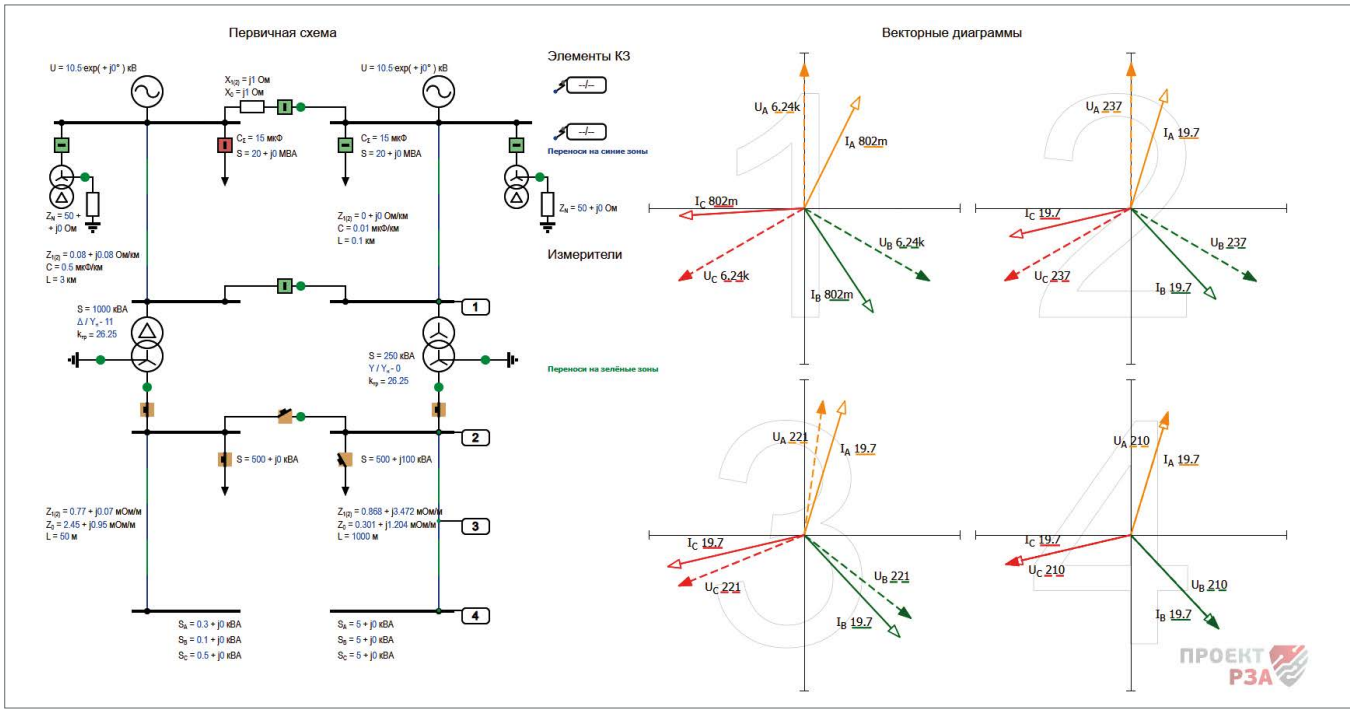


Рис. 1. Компьютерная модель электрической сети 10/0,4 кВ в нагрузочном режиме

характерные для аварийных режимов, вызванных обрывами проводов и короткими замыканиями. Составленная система уравнений решается методом Гаусса.

В настоящем исследовании данная модель была представлена в виде питающей энергосистемы 10 кВ с током короткого замыкания 1 кА в точке подключения силового трансформатора 10/0,4 кВ. В качестве значения мощности силового трансформатора было задано значение 250 кВА. При этом в качестве схем и групп соединения обмоток использовались:

- Y/Y_n-0;
- D/Y_n-11;
- Y/Z_n-11.

Протяженность ЛЭП 0,4 кВ была задана значением 1000 м, а в качестве используемого проводника был выбран неизолированный провод типа А-35. В качестве потребителя использовалась активная нагрузка суммарной мощностью 15 кВт, как симметричная, так и несимметричная, с разной мощностью по фазам. Данные параметры были выбраны в связи с тем, что их наиболее широко используют при электроснабжении сельскохозяйственных потребителей [19].

В качестве примера приведем аналитические уравнения нагрузочного режима и режима однофазного короткого замыкания. Для нагрузочного режима работы электрической сети 0,4 кВ система из n уравнений с n неизвестными, которыми являются симметричные составляющие токов и напряжений, имеет вид (1):

$$\left. \begin{aligned} I_{1H} \cdot (Z_{TP1} + Z_{Л1}) &= E - U_{1H}; \\ I_{2H} \cdot (Z_{TP1} + Z_{Л1}) &= -U_{2H}; \\ I_{0H} \cdot (Z_{TP0} + Z_{Л0}) &= -U_{0H}; \\ (U_{1H} + U_{2H} + U_{0H}) &= Z_{AH} \cdot (I_{1H} + I_{2H} + I_{0H}); \\ (a^2 \cdot U_{1H} + a \cdot U_{2H} + U_{0H}) &= Z_{BH} \cdot (a^2 \cdot I_{1H} + a \cdot I_{2H} + I_{0H}); \\ (a \cdot U_{1H} + a^2 \cdot U_{2H} + U_{0H}) &= Z_{CH} \cdot (a \cdot I_{1H} + a^2 \cdot I_{2H} + I_{0H}); \end{aligned} \right\} (1)$$

где, I_1, I_2 и I_0 – симметричные составляющие токов прямой, обратной и нулевой последовательностей, А; U_1, U_2, U_0 – симметричные составляющие напряжений прямой, обратной и нулевой последовательностей, В; E – электродвижущая сила питающей системы, В; Z_{AH}, Z_{BH}, Z_{CH} – фазные сопротивления нагрузок, Ом; α – оператор поворота, 120° и 240°.

Фазные сопротивления нагрузки в данной системе используются в уравнениях связи между симметричными составляющими токов и напряжений. Решение системы уравнений (1) осуществляется методом Гаусса. С учетом значений, представленных в системе (1), основную матрицу системы можно представить в виде (2):

$$A = \begin{pmatrix} I_1 & 0 & 0 & Z_{TP1} + Z_{Л1} & 0 & 0 \\ 0 & I_2 & 0 & 0 & Z_{TP1} + Z_{Л1} & 0 \\ 0 & 0 & I_0 & 0 & 0 & Z_{TP0} + Z_{Л0} \\ I_1 & I_2 & I_0 & -Z_{AH} & -Z_{AH} & -Z_{AH} \\ a^2 \cdot I_1 & a \cdot I_2 & I_0 & -a^2 \cdot Z_{BH} & -a \cdot Z_{BH} & -Z_{BH} \\ a \cdot I_1 & a^2 \cdot I_2 & I_0 & -a \cdot Z_{CH} & -a^2 \cdot Z_{CH} & -Z_{CH} \end{pmatrix} (2)$$

При этом матрица значений системы уравнений (1) имеет вид (3):

$$B = \begin{pmatrix} E \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \\ 0 \end{pmatrix}, (3)$$

Решение заданных матриц осуществляется по формуле (4):

$$X = A^{-1} \cdot B. (4)$$

Для режима однофазного короткого замыкания фазы «А» система уравнений имеет вид (5):

$$\left. \begin{aligned} I_{1Л} &= I_{1КЗ} + I_{1Н} \\ I_{1Л} \cdot (Z_{TP1} + Z_{Л1}) &= E - U_{1Н}; \\ U_{1Н} &= U_{1КЗ}; \\ I_{2Л} \cdot (Z_{TP1} + Z_{Л1}) &= -U_{2Н}; \\ U_{2Н} &= U_{2КЗ}; \\ I_{2Л} &= I_{2КЗ} + I_{2Н}; \\ I_{0Л} &= I_{0КЗ} + I_{0Н}; \\ I_{0Л} \cdot (Z_{TP0} + Z_{Л0}) &= -U_{0Н}; \\ U_{0Н} &= U_{0КЗ}; \\ (U_{1Н} + U_{2Н} + U_{0Н}) &= Z_{AH} \cdot (I_{1Н} + I_{2Н} + I_{0Н}); \\ (a^2 \cdot U_{1Н} + a \cdot U_{2Н} + U_{0Н}) &= Z_{BH} \cdot (a^2 \cdot I_{1Н} + a \cdot I_{2Н} + I_{0Н}); \\ (a \cdot U_{1Н} + a^2 \cdot U_{2Н} + U_{0Н}) &= Z_{CH} \cdot (a \cdot I_{1Н} + a^2 \cdot I_{2Н} + I_{0Н}); \\ U_{1КЗ} + U_{2КЗ} + U_{0КЗ} &= 0; \\ I_{1КЗ} &= I_{2КЗ}; \\ I_{2КЗ} &= I_{0КЗ}. \end{aligned} \right\} (5)$$

Для других аварийных режимов аналитические уравнения и матрицы составляются аналогично рассмотренным, с использованием граничных условий, представленных в источнике [20].

В качестве сопротивлений элементов сети использовались значения, представленные в таблице 1.

Для оценки распределения симметричных составляющих в аварийном режиме работы сети 0,4 кВ были смоделированы нагрузочные режимы с разной степенью

Таблица 1. Сопротивления электрооборудования, используемые при моделировании

Элемент сети	Элемент сети			
	Активное сопротивление прямой последовательности, r1, Ом (Ом/км)	Реактивное сопротивление прямой последовательности, x1, Ом (Ом/км)	Активное сопротивление нулевой последовательности, r0, Ом (Ом/км)	Реактивное сопротивление нулевой последовательности, x0, Ом (Ом/км)
Силовой трансформатор ТМ-250/10/0,4 кВ Y/Yn-0	0,0095	0,027	0,097	0,235
Силовой трансформатор ТМ-250/10/0,4 кВ D/Yn-11	0,0107	0,027	0,0107	0,027
Силовой трансформатор ТМ-250/10/0,4 кВ Y/Zn-11	0,0107	0,028	0,005	0,004
Воздушная линия электропередачи 0,4 кВ, выполненная проводом А-35	0,868	3,472	0,301	1,204

несимметрии нагрузок, с коэффициентами несимметрии напряжений по нулевой последовательности (k_{0U}) от 0 % до 17,4 %. Согласно ГОСТ 32144–2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения», предельно допустимыми значениями k_{0U} являются 2 % и 4 %, соответственно, в течение 95 % и 100 % времени за одну неделю. Однако электрические сети 0,4 кВ преимущественно характеризуются несимметричной коммунально-бытовой нагрузкой, которая может приводить к тому, что k_{0U} будет значительно превышать указанные значения [21]. Электрические параметры в точке подключения нагрузки представлены в таблице 2.

Таблица 2. Электрические параметры в точке подключения нагрузки

Обозначение	Фазные мощности нагрузки, кВт			Фазные токи, А			Фазные напряжения, В			Коэффициент несимметрии напряжений, k_{0U} , %	Ток нейтрالي, I(N), А
	P(A)	P(B)	P(C)	I(A)	I(B)	I(C)	U(A)	U(B)	U(C)		
S1	5	5	5	19,7	19,7	19,7	210	210	210	0,0%	0
S2	3	5	7	12,1	20,4	26	217	215	198	8,8%	12,3
S3	1	5	9	4,09	21	31,2	224	218	185	17,4%	22,9

Таблица 3. Симметричные составляющие напряжений в нагрузочных режимах

Протяженность линии, L , м	Коэффициент несимметрии нагрузки, k_{ou} , %								
	0 % (S1)			8,8 % (S2)			17,4 % (S3)		
	U_1	U_2	U_0	U_1	U_2	U_0	U_1	U_2	U_0
0	237	0	0	231	0,2	0,3	230	0,3	0,7
200	231	0	0	226	3,6	1,5	226	7,2	2,9
400	224	0	0	221	6,8	2,6	220	13,7	5
600	219	0	0	215	9,6	3,6	214	19,5	6,8
800	214	0	0	209	12,2	4,5	208	24,6	8,3
1000	210	0	0	203	14,4	5,2	201	29,1	9,7

В ходе моделирования нагрузочных режимов работы сети 0,4 кВ были выявлены электрические параметры, характерные для нагрузок с разной степенью несимметрии. Так, при суммарной мощности как симметричной, так и несимметричных нагрузок 15 кВт фазные напряжения в точке ее подключения изменялись в пределах 185–210 В, фазные токи – в пределах 4,09–31,2 А, а ток в нулевом проводе – от 0 до 22,9 А.

- Следует отметить, что при описании полученных результатов приняты следующие сокращения:
- составляющая напряжения прямой последовательности – U_1 ;
 - составляющая напряжения обратной последовательности – U_2 ;

- составляющая напряжения нулевой последовательности – U_0 ;
 - номинальное фазное напряжение – $U_{ф.ном}$;
 - составляющая тока прямой последовательности – I_1 ;
 - составляющая тока обратной последовательности – I_2 ;
 - составляющая тока нулевой последовательности – I_0 .
- Рассмотрим результаты распределения симметричных составляющих токов и напряжений в нагрузочных и аварийных режимах работы электрической сети 0,4 кВ.

РЕЗУЛЬТАТЫ ИССЛЕДОВАНИЯ И ИХ ОБСУЖДЕНИЕ

В ходе компьютерного моделирования нагрузочных и аварийных режимов работы электрической сети 0,4 кВ было установлено, что независимо от схемы и группы соединения обмоток силового трансформатора 10/0,4 кВ распределение симметричных составляющих токов и напряжений в конкретном рассматриваемом режиме является одинаковым.

В таблице 3 представлено распределение симметричных составляющих в нагрузочных режимах при разной степени несимметрии нагрузок (S1–S3).

Установлено, что в симметричном режиме отсутствуют составляющие U_2 и U_0 , а составляющая U_1 изменяется в пределах от 237 до 210 В. Составляющие U_2 и U_0 проявляются при значительной степени несимметрии нагрузки. Например, при $k_{ou} = 8,8\%$ U_2 возрастает от ввода 0,4 кВ до наиболее удаленной точки электрической сети 0,4 кВ до значения 14,4 В, а U_0 – до 5,2 В. А при $k_{ou} = 17,4\%$ U_2 возрастает до значения 29,1 В, а U_0 – до 9,7 В, что составляет 13 % и 4 % от $U_{ф.ном}$.

В таблице 4 представлено распределение симметричных составляющих напряжений в режимах симметричного и несимметричных коротких замыканий (КЗ) с нагрузкой S3, подключенной в наиболее удаленной точке электрической сети 0,4 кВ. Короткие замыкания моделировались на удалении 1000 м от ввода низкого напряжения 0,4 кВ

Таблица 4. Симметричные составляющие напряжений в режимах коротких замыканий с несимметричной нагрузкой

Протяженность линии, L , м	Однофазное КЗ и нагрузка S_3			Двухфазное КЗ и нагрузка S_3			Двухфазное КЗ на нулевой провод и нагрузка S_3			Трехфазное КЗ и нагрузка S_3		
	Симметричные составляющие напряжений прямой U_1 , обратной U_2 и нулевой последовательностей U_0 , В											
	U_1	U_2	U_0	U_1	U_2	U_0	U_1	U_2	U_0	U_1	U_2	U_0
0	237	0,1	0,9	237	1,5	0	236	1,3	1,4	236	0	0
200	210	17,4	6,4	213	19,9	0	199	10,7	10,8	190	0	0
400	186	35,3	11,8	186	44,2	0	163	20,2	20,4	144	0	0
600	160	53,9	17,2	161	66	0	122	29,6	29,7	98,4	0	0
800	137	70,6	22,5	136	88	0	85,9	38,8	38,8	46,1	0	0
1000	114	88,1	28	110	110	0	48,4	48,4	48,4	0	0	0

Таблица 5. Симметричные составляющие напряжений в режимах обрывов провода с несимметричной нагрузкой

Протяженность линии, L , м	Обрыв фазы 0,4 кВ при нагрузке S3, В			Обрыв нулевого провода 0,4 кВ при нагрузке S3, В			Обрыв фазы 10 кВ при нагрузке S3, В		
	U_1	U_2	U_0	U_1	U_2	U_0	U_1	U_2	U_0
0	237	-	-	237	0,6	90,2	127	119	0
200	230	-	-	230	6,8	90,2	121	117	0
400	224	-	-	226	13,2	90,2	115	115	0
600	145	71,4	68,9	222	19,8	90,2	109	113	0
800	140	71,9	67,3	218	26,6	90,2	103	113	0
1000	137	73,1	65,8	214	33,6	90,2	97,8	113	0

силового трансформатора непосредственно в точке подключения потребителя. Это обусловлено тем, что 52 % аварийных отключений электрических сетей 0,4 кВ вызваны повреждениями в точке подключения потребителя [22].

Исходя из результатов, представленных в таблице 4, следует, что в режимах несимметричных коротких замыканий присутствуют составляющие U_1 , U_2 и U_0 . Однако рассматривать составляющую U_1 в качестве электрического параметра, характеризующего аварийный режим, нецелесообразно: она присутствует как в нагрузочных, так и аварийных режимах работы.

В режиме однофазного короткого замыкания (ОКЗ) U_2 на удалении 20–100 % от общей протяженности ЛЭП 0,4 кВ составляет 7,6–38,3 % от $U_{ф.ном}$. В режиме двухфазного короткого замыкания (ДКЗ) ее значение – 8,6–47,8 % от $U_{ф.ном}$. При этом в режиме двухфазного короткого замыкания на нулевой провод (ДКЗНП) U_2 на удалении 30–100 % от общей протяженности ЛЭП составляет 6,6–21 % от $U_{ф.ном}$. В свою очередь, U_0 проявляется только при ОКЗ и ДКЗНП. Так, в режиме ОКЗ составляющая U_0 на удалении 60–100 % от общей протяженности ЛЭП 0,4 кВ равна 7,5–12 % от $U_{ф.ном}$, а при ДКЗНП на удалении 30–100 % – 6,7–21 % от $U_{ф.ном}$.

В таблице 5 представлены симметричные составляющие в режимах обрывов проводов со стороны как 10 кВ, так и 0,4 кВ. Обрыв со стороны 10 кВ моделировался непосредственно на вводе силового трансформатора 10 кВ, а обрывы проводов со стороны 0,4 кВ – в середине ЛЭП 0,4 кВ (500 м).

С учетом результатов, представленных в таблице 5, можно сделать вывод: в режимах обрывов проводов со стороны низкого напряжения, кроме составляющей U_1 , возникают U_2 и U_0 . При обрыве фазного провода (ОФП) со стороны высокого напряжения 10 кВ возникает только U_2 , а U_0 отсутствует.

В режиме обрыва фазного провода от ввода трансформатора 0,4 кВ до точки обрыва (0–500 метров) U_2 и U_0 на участке с замыканием изменяются в зависимости от режима однофазного короткого замыкания. Их значения сильно зависят от переходного сопротивления в точке падения провода на землю, поэтому

в данной таблице они не представлены. В свою очередь, на участке после обрыва со стороны потребителя составляющая U_2 равна 30,3–31,8 % от $U_{ф.ном}$, а U_0 – 31–28,6 % от $U_{ф.ном}$. В режиме обрыва нулевого провода со стороны 0,4 кВ составляющая U_2 увеличивается от ввода трансформатора 0,4 кВ до значения 14,6 % от $U_{ф.ном}$, при этом U_0 вдоль всей протяженности линии равна 39 % от $U_{ф.ном}$. В режиме ОФП со стороны 10 кВ составляющая U_2 вдоль всей протяженности ЛЭП – 49–52 % от $U_{ф.ном}$.

На рис. 2 показано распределение составляющей U_2 в исследованных режимах работы электрической сети 0,4 кВ.

Исходя из распределения составляющей U_2 в режимах, представленных на рис. 2, можно сделать вывод, что данный электрический параметр может использоваться для повышения достоверности выявления аварийных режимов работы электрической сети 0,4 кВ, в том числе, вызванных обрывами проводов. Это позволит распознавать режимы несимметричных коротких замыканий и ОФП со стороны как 0,4 кВ, так и 10 кВ. Режимом, который нельзя идентифицировать с использованием данного электрического параметра, является ОНП со стороны 0,4 кВ. Это связано с тем, что в данном режиме значение составляющей напряжения обратной последовательности (U_2) сопоставимо с ее значениями в нагрузочных режимах при значительной степени несимметрии нагрузки. В случае использования устройств секционирования линий электропередачи 0,4 кВ и их установки на 50 % от общей протяженности линии и более возможно использовать минимальную уставку по составляющей напряжения обратной последовательности (U_2) со значением 20 % от номинального фазного напряжения электрической сети 0,4 кВ. Это позволит идентифицировать аварийные режимы работы и повысить электробезопасность эксплуатации сети.

На рис. 3 представлено распределение составляющей напряжения нулевой последовательности (U_0) в исследованных режимах. В нагрузочных режимах при значительной степени несимметрии нагрузки значение U_0 не превышает 10 % от $U_{ф.ном}$ вдоль всей протяженности линии.

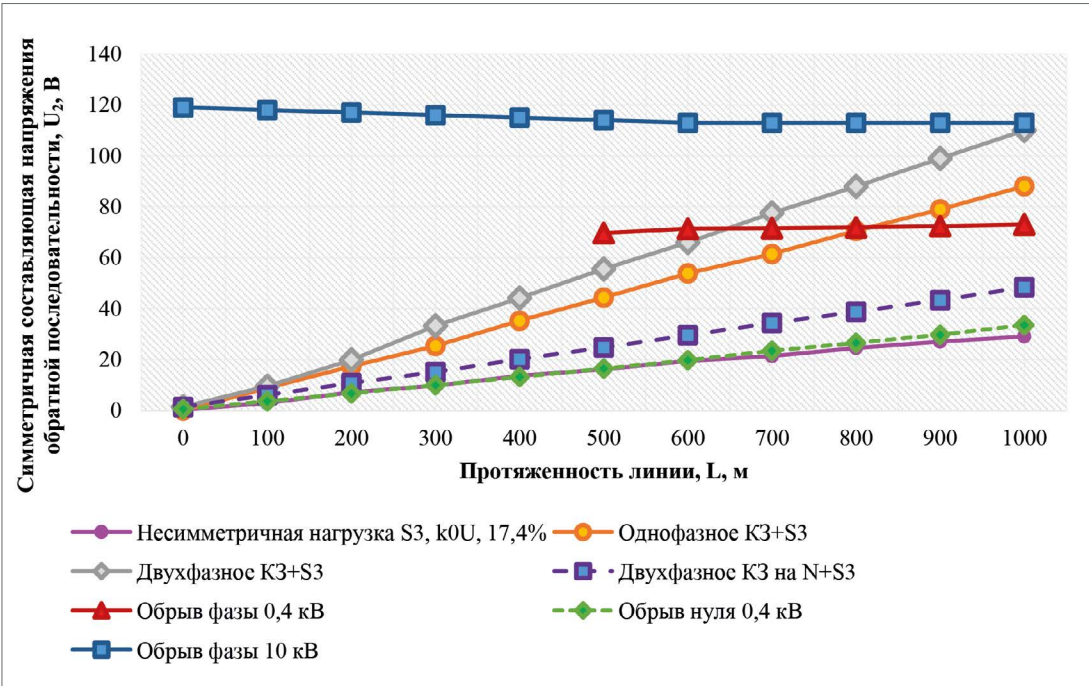


Рис. 2. Распределение симметричной составляющей напряжения обратной последовательности (U_2) в нагрузочных и аварийных режимах работы электрической сети 0,4 кВ

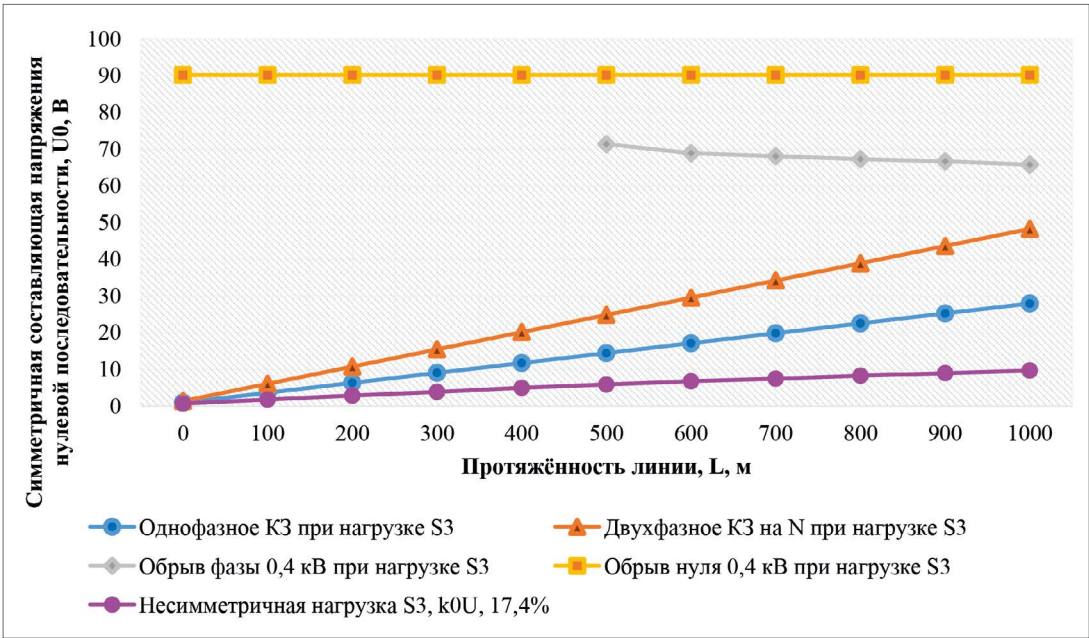


Рис. 3. Распределение напряжения нулевой последовательности (U_0) в нагрузочных и аварийных режимах работы электрической сети 0,4 кВ

В аварийных режимах ОКЗ ток в нулевом проводе может возрасти незначительно ввиду высоких протяженностей линий электропередачи 0,4 кВ и низких сечений проводов. В связи с этим, контроль электрического параметра U_0 позволит идентифицировать аварийные режимы работы сетей 0,4 кВ. При использовании устройств секционирования на удалении 50 % и более от общей протяженности линии электропередачи минимальная уставка по данному параметру может быть задана со значением 12 %.

В таблице 6 представлено распределение симметричных составляющих токов и токов в нейтрали в нагрузочных и аварийных режимах работы сети 0,4 кВ. Данные, представленные в таблице 6, позволяют сделать вывод: с использованием симметричных составляющих токов I_2 и I_0 выявить такие аварийные режимы, как обрывы проводов, не представляется возможным — их значения сопоставимы со значениями данных параметров в нагрузочных режимах. Использовать их можно

Таблица 6. Симметричные составляющие токов

Режим	Симметричные составляющие токов, А			Ток нейтрали, I(N), А
	I_1	I_2	I_0	
Нагрузочный режим с $k_{0U} = 0 \%$	19,7	0	0	0
Нагрузочный режим с $k_{0U} = 8,8 \%$	19,4	4,11	4,11	12,3
Нагрузочный режим с $k_{0U} = 17,2 \%$	18,7	8,3	7,62	22,9
Однофазное КЗ с нагрузкой	37,8	24,4	22,2	66,7
Двухфазное КЗ с нагрузкой	36,2	30,6	8	24
Двухфазное КЗ на нулевой провод с нагрузкой	52,5	13,4	38,4	115
Трехфазное КЗ с нагрузкой	65,9	0	0	0
Обрыв фазного провода 0,4 кВ	17,4	9,56	8,68	26
Обрыв нулевого провода 0,4 кВ	15,1	9,31	0	0
Обрыв фазного провода 10 кВ	11,7	12,8	0	5,15

для идентификации аварийных режимов, вызванных несимметричными короткими замыканиями. При этом параметр тока в нейтральном проводе может применяться для идентификации режима двухфазного короткого замыкания на нулевой провод. В свою очередь, в других аварийных режимах, в том числе однофазного короткого замыкания, у данного параметра невысокие значения — сопоставимые с нагрузочными режимами при значительной степени несимметрии. Это может привести к ложному срабатыванию защитного устройства.

В настоящее время в сельских электрических сетях 0,4 кВ используются только защитные коммутационные аппараты (автоматические выключатели и плавкие предохранители), которые реагируют на ток, протекающий в фазном проводе. Использование современных технических средств, обеспечивающих контроль симметричных составляющих напряжений вместе с контролем токов и напряжений, может повысить достоверность распознавания аварийных режимов работы сетей 0,4 кВ — в том числе вызванных обрывами проводов, при которых изменения токов и напряжений могут не отличаться от параметров нагрузочных режимов.

Длительное время разрабатывались технические решения для контроля симметричных составляющих напряжений обратной (U_2) и нулевой (U_0) последовательностей. При этом большинство из них относятся к высоковольтным сетям и представлены электромеханическими реле, подключаемыми через трансформаторы напряжения. В настоящее время для решения данной задачи используются микропроцессорные терминалы. Так, для контроля напряжения обратной последовательности (U_2) разработано электромеханическое реле РНФ 1 М. Аналогичные технические решения защищены патентами РФ № 2353943, 2316776. Существуют решения с похожим принципом и для контроля напряжения нулевой последовательности. Наиболее распространенное — реле типа РНН 57, аналогами которого являются технические реше-

ния с патентом РФ № 132566 и авторским свидетельством СССР № 805460. Таким образом, разработка датчиков контроля симметричных составляющих напряжения обратной последовательности (U_2) и напряжения нулевой последовательности (U_0) является актуальной научной задачей.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

По итогам оценки распределения симметричных составляющих токов и напряжений в нагрузочных и аварийных режимах работы вдоль радиальной электрической сети 0,4 кВ можно сделать следующие выводы:

- В ходе компьютерного моделирования нагрузочных режимов было выявлено, что составляющие U_2 и U_0 возникают при значительной степени несимметрии нагрузки и могут достигать 13 % и 4 %, соответственно от номинального фазного напряжения сети 0,4 кВ.
- При моделировании аварийных режимов работы сети 0,4 кВ были установлены зависимости распределения составляющих U_2 и U_0 . При применении устройств секционирования линий электропередачи 0,4 кВ наряду с защитами по току и напряжению возможно использовать защиты, основанные на контроле симметричных составляющих напряжений обратной и нулевой последовательностей. При установке технических средств на удалении 50 % от общей протяженности ЛЭП 0,4 кВ и более минимальная уставка по составляющей напряжения обратной последовательности (U_2) может быть задана со значением 20 % от номинального фазного напряжения сети 0,4 кВ, а по составляющей напряжения нулевой последовательности (U_0) — 12 %. Предложенный принцип контроля не только электрических параметров токов и напряжений, но и симметричных составляющих на-

пряжений позволит повысить достоверность распознавания аварийных режимов работы электрической сети 0,4 кВ и производить их отключение с помощью современных технических средств.

3. В ходе исследования установлено, что разработка датчиков мониторинга составляющих U_2 и U_0 для электрических сетей 0,4 кВ является актуальной научной задачей, решение которой позволит применять их в технических средствах повышения защищенности сетей и более достоверно идентифицировать аварийные режимы их работы.

Рисунки к статье предоставлены авторами.

↓ СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. Виноградова А.В., Виноградов А.В., Букреев А.В. Удельные показатели надежности электрических сетей 0,4 кВ. DOI 10.26897/2687-1149-2024-6-77-85 // Агроинженерия. 2024. Т. 26, № 6. С. 77–85.
2. Виноградова А.В. Коэффициенты сезонности по количеству и продолжительности отключений в сельских электрических сетях с учетом их причин. DOI 10.26897/2687-1149-2025-2-92-99 // Агроинженерия. 2025. Т. 27, № 2. С. 92–99.
3. Валеев Р.Г., Ершов А.М. Анализ факторов, влияющих на величину тока однофазного короткого замыкания в электрических сетях с воздушными линиями напряжением 380 В // Электробезопасность. 2015. № 2. С. 3–16.
4. 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.
5. 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.
6. 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.
7. 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.
8. Ершов А.М., Валеев Р.Г., Валеев Р.Г. Исследование на компьютерной модели режимов работы радиальной воздушной линии напряжением 380 В при обрывах фазных и нулевого проводов // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2016. № 9–10. С. 31–42.
9. Млоток А.В. Принцип выявления обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии напряжением 380 В // Вестник Южно-Уральского государственного университета. Серия: Энергетика. 2014. Т. 14, № 1. С. 41–47.
10. Ершов А.М., Хлопова А.В., Сидоров А.И. Сигнализация о возникновении обрыва фазного провода воздушной линии напряжением 6–10 кВ // Электрические станции. 2017. № 12 (1037). С. 34–40.
11. Ершов А.М., Хлопова А.В. Физическая модель электрической сети напряжением 10/0,38 кВ // Электробезопасность. 2016. № 2. С. 13–21.
12. Ершов А.М., Валеев Р.Г., Хлопова А.В. Методика проведения экспериментальных исследований параметров электрической сети напряжением 10/0,38 кВ при различных режимах ее работы // Электробезопасность. 2016. № 3. С. 27–36.
13. Ершов А.М., Хлопова А.В., Сидоров А.И. Моделирование системы обеспечения электробезопасности при обрыве одной из фаз. DOI 10.5281/zenodo.1408246 // Вестник Инженерной школы Дальневосточного федерального университета. 2018. № 3 (36). С. 134–145.
14. Ершов А.М., Хлопова А.В., Сидоров А.И. Система защиты воздушных линий напряжением 0,38 и 6–10 кВ от обрывов проводов // Электрические станции. 2020. № 4(1065). С. 28–32.
15. Виноградов А.В., Сейфуллин А.Ю., Букреев А.В. Определение рациональных мест размещения мультиточечных коммутационных систем. DOI 10.22314/2073-7599-2024-18-3-82-90 // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2024. Т. 18, № 3. С. 82–90.
16. Виноградов А.В., Лансберг А.А. Разработка способа и алгоритма защиты сельских электрических сетей 0,4 кВ от коротких замыканий с использованием устройства секционирования. DOI 10.30724/1998-9903-2025-27-4-56-68 // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2025. Т. 27, № 4. С. 56–68.
17. Лансберг А.А., Виноградов А.В. Компьютерное моделирование режима обрыва нулевого провода в радиальной сельской электрической сети 0,4 кВ // Энергия единой сети. 2025. № 1 (76). С. 26–33.
18. 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. DOI 10.30724/1998-9903-2023-25-6-14-28 // Известия высших учебных заведений. Проблемы энергетики. 2023. Т. 25, № 6. С. 14–28.
19. Виноградов А.В., Лансберг А.А., Виноградова А.В. Анализ конфигурации электрических сетей 0,4 кВ Орловской области. DOI 10.22314/2658-4859-2023-70-4-22-29 // Электротехнологии и электрооборудование в АПК. 2023. Т. 70, № 4 (53). С. 22–29.
20. Ульянов С.А. Электромагнитные переходные процессы в электрических системах: учебник. Москва: Энергия, 1970. С. 517.
21. Бородин М.В., Виноградов А.В., Голиков И.О., Лансберг А.А. Анализ показателей качества электроэнергии в распределительных электрических сетях 0,4 кВ и причин жалоб потребителей в филиале ПАО «Россети Центр» — «Орелэнерго» // Научный журнал молодых ученых. 2022. – № 3 (28). С. 72–80.
22. Виноградова А.В., Виноградов А.В. Систематизация причин отключений в сельских электрических сетях. DOI 10.53914/issn2071-2243_2025_1_103 // Вестник Воронежского государственного аграрного университета. 2025. Т. 18, № 1 (84). С. 103–111.