

УДК 621.311.1

# НОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ В РАСПРЕДЕЛИТЕЛЬНЫХ ГОРОДСКИХ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ НАПРЯЖЕНИЕМ 10–20 КВ С НИЗКООМНЫМ ЗАЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

Проанализированы вопросы обеспечения электробезопасности в городских электрических сетях напряжением 10–20 кВ с низкоомным заземлением нейтрали. Выполнен анализ нормативных требований для обеспечения электробезопасности по нормированию сопротивления заземляющих устройств, обеспечению допустимых уровней напряжения прикосновения и напряжения повреждения. Проведена оценка обеспечения условий электробезопасности для электрических сетей 10–20 кВ с резистивно-заземленной нейтралью по условию обеспечения напряжения повреждения.

АВТОРЫ:

**Майоров А.В.**, к.т.н.,  
Филиал  
ПАО «Россети» —  
МЭС Центра

**Львов М.Ю.**, д.т.н.,  
**Челазнов А.А.**, д.т.н.,  
**Никитина С.Д.**,  
АО «Объединенная энергетическая компания»

#электробезопасность;  
#городская электрическая сеть;  
#низкоомное заземление нейтрали;  
#напряжение повреждения

## ВВЕДЕНИЕ

Электробезопасность — система организационных мероприятий и технических средств, предотвращающих вредное и опасное воздействие на работающих электрического тока, электрической дуги, электромагнитно-

го поля и статического электричества. Электробезопасность должна обеспечиваться конструкцией электроустановок, техническими способами и средствами защиты, организационными и техническими мероприятиями. Электроустановки и их части должны быть

выполнены таким образом, чтобы работающие не подвергались опасным и вредным воздействиям электрического тока и электромагнитных полей.

Развитие городской электрической сети в СССР начиналось с сетей напряжением 6 кВ, что было связано с использованием данного класса напряжения в системах электроснабжения промышленных предприятий, от подстанций которых питались потребители городской сети. В конце 50-х годов прошлого века в СССР в Правила устройства электроустановок (ПУЭ) были внесены требования о необходимости построения городских электрических сетей среднего напряжения на номинальное напряжение 10 кВ. При этом внедрение напряжения 10 кВ в ряде городов было осуществлено еще в 30-х годах прошлого века.

Следует подчеркнуть, что все городские электрические сети напряжением 6–10 кВ традиционно строились с изолированной нейтралью или нейтралью заземленной через дугогасящий реактор для компенсации емкостных токов.

В общем случае для обеспечения электробезопасности электроустановок нормативными документами устанавливаются параметры заземляющего устройства (ЗУ), к которым применяются требования ПУЭ [1] по величинам  $R_{ЗУ}$  сопротивления ЗУ (п. 1.7.96, п. 1.7.97, п. 1.7.101 ПУЭ), или нормируются предельные величины напряжения прикосновения  $U_{пр}$ , установленные п. 1.3 ГОСТ 12.1.038–82 [2]. Нормируемые значения этих параметров для сети с изолированной нейтралью приведены в таблице 1.

Заземляющие устройства предназначены для защиты от поражения персонала при коротком замыкании фазы на корпус оборудования за счет уменьшения напряжения между землей и токоведущими частями электроустановок.

Если подтвержденные (расчетные) значения сопротивления ЗУ меньше или равны нормируемым значениям, то электробезопасность считается обеспеченной.

## УСЛОВИЯ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ В ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЯХ С НИЗКООМНЫМ ЗАЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

Согласно п. 1.2.16 ПУЭ [1], работа электрических сетей напряжением 6–35 кВ может предусматриваться как с изолированной нейтралью, так и с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор.

С начала 2000-х годов на территории г. Москвы положено начало развитию новой сети классом напряжения 20 кВ с резистивным заземлением нейтрали. Данное решение обусловлено необходимостью повышения пропускной способности кабельных линий среднего напряжения для питания крупных деловых, административных, многофункциональных и торгово-развлекательных комплексов, потребляющих мощность порядка 10–30 МВт и более. В соответствии с Энергетической стратегией города Москвы на период до 2025 года, утвержденной постановлением Правительства Москвы от 2 декабря 2008 г. № 1075-ПП, переход на класс напряжения 20 кВ принят как пер-

спективное направление развития топливно-энергетического комплекса города. К настоящему времени электрические сети 20 кВ получили определенное развитие в Санкт-Петербурге и Екатеринбурге. Также в ряде городов осуществляются проекты по переводу в отдельных энерго-районах действующих электрических сетей 10 кВ на режим низкоомного заземления нейтрали.

Однофазные замыкания на землю (ОЗЗ) в электрических сетях среднего напряжения составляют более половины от всех видов повреждений. Применение резистивного заземления нейтрали в сетях среднего напряжения позволяет осуществить автоматическое селективное отключение ОЗЗ и уменьшить длительность воздействия перенапряжений на изоляцию электрооборудования.

Требования ПУЭ [1] к электробезопасности сетей 2–35 кВ нормируют в п. 1.7.96 значения параметров  $R_{ЗУ}$  для сетей с малыми токами замыкания на землю. Установленная п. 1.2.16 возможность работы электрических сетей напряжением 2–35 кВ с нейтралью, заземленной через дугогасящий реактор или резистор, предполагает применение норм п. 1.7.96 к высокоомному реактору или резистору в нейтрали, подключение которых не приводит к увеличению тока выше указанных в п. 1.2.16 значений.

## ТРЕБОВАНИЯ НОРМАТИВНЫХ ДОКУМЕНТОВ К ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

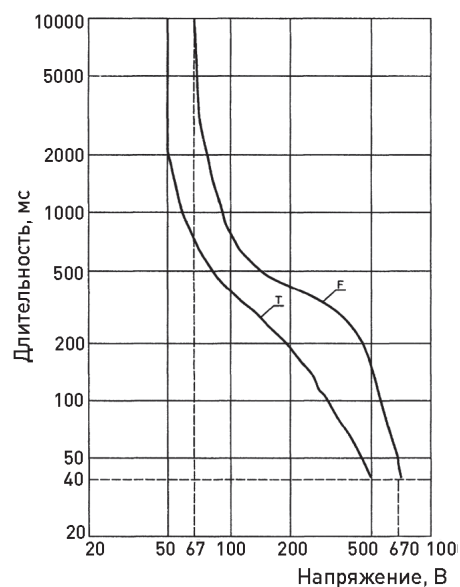
Таблица 1

Требования ПУЭ к величинам $R_{ЗУ}$ сети с изолированной нейтралью, Ом						
ЗУ сети напряжением выше 1 кВ			ЗУ сети напряжением выше 1 кВ, объединенного с ЗУ сети до 1 кВ			
$R_{ЗУ} \leq 250 / I_{ОЗЗ}$			$R_{ЗУ} \leq 250 / I_{ОЗЗ}$			
			$R_{ЗУ} \leq 4 \text{ Ом}$			
Требования ГОСТ 12.1.038–82 к напряжению прикосновения, В						
t, с	0,01	0,1	0,2	0,5	1,0	>1,0
$U_{пр}$ , В	550	340	160	105	60	20



ЗАВИСИМОСТЬ ДОПУСТИМЫХ ЗНАЧЕНИЙ НАПРЯЖЕНИЯ ЗАМЫКАНИЯ (КРИВАЯ F) И ОЖИДАЕМЫХ НАПРЯЖЕНИЙ ПРИКОСНОВЕНИЯ (КРИВАЯ T) МЕЖДУ ОТКРЫТОЙ ПРОВОДЯЩЕЙ ЧАСТЬЮ И ЛОКАЛЬНОЙ ЗЕМЛЕЙ В ЭЛЕКТРОУСТАНОВКЕ ДО 1 кВ ДЛЯ РАЗЛИЧНОГО ВРЕМЕНИ СРАБАТЫВАНИЯ ЗАЩИТЫ ОТ ЗАМЫКАНИЙ НА ЗЕМЛЮ ПО ГОСТ Р 50571.18–2000

Рис. 1.

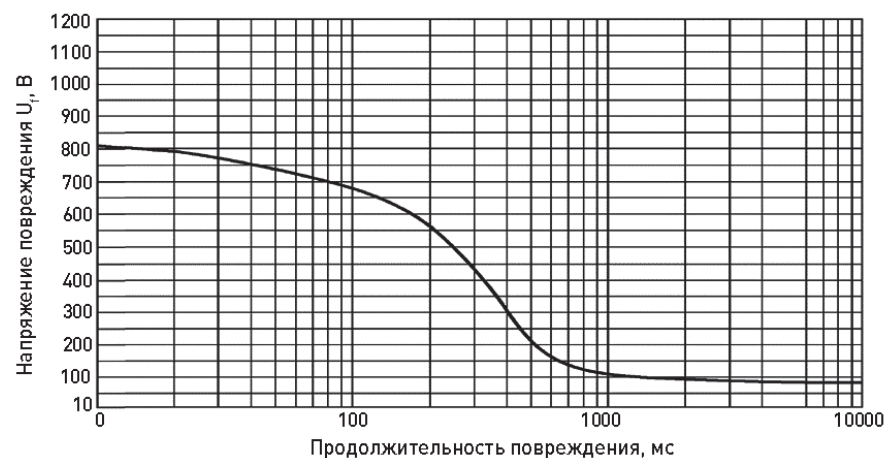


При реализации низкоомного сопротивления нейтрали токи через ЗУ, необходимые для организации селективного отключения ОЗЗ, могут достигать величин 1000–2000 А. Использование этих значений токов для определения сопротивления ЗУ по выражению п. 1.7.96 ПУЭ, применяемому для сетей с малыми токами замыкания на землю, неприменимо, поскольку приводит к малым, нереализуемым на практике значениям  $R_{ЗУ} = 0,125–0,25 \text{ Ом}$ .

В случае невозможности выполнения ЗУ по нормам на допустимое сопротивление ЗУ, согласно п. 1.7.88 ПУЭ [1], оценка условий электробезопасности должна выполняться по величинам допустимого напряжения прикосновения, устанавливаемого

ДОПУСТИМОЕ НАПРЯЖЕНИЕ ПОВРЕЖДЕНИЯ В НИЗКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЕ ПРИ ЗАМЫКАНИИ НА ЗЕМЛЮ В ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ СИСТЕМЕ, СОГЛАСНО ГОСТ Р 50571.4.44–2019

Рис. 2.



ГОСТ 12.1.038–82 [2]. Нормирование условий электробезопасности по величинам напряжения прикосновения  $U_{пр}$  является первичным условием и должно выполняться как для сетей с изолированной нейтралью, так и для сетей с резистивно-заземленной нейтралью. Для выполнения требований по электробезопасности расчетные значения напряжения прикосновения не должны превышать нормированные п. 1.3, 1.4 ГОСТ 12.1.038–82 величины.

Основным затруднением прямого применения нормативных значений по ГОСТ 12.1.038–82 является определение величин напряжений прикосновения. Расчет значений напряжения прикосновения в электрической сети является многопараметрической задачей и не может быть проведен с достаточной степенью обоснованности и точности.

В общем случае для расчета напряжения прикосновения необходимы следующие данные [3]:

- ток заземлителя;
- удельное электрическое сопротивление земли;

- расстояние от заземлителя до расчетной точки;
- расстояние между расчетными точками прикосновения;
- потенциальная кривая заземлителя;
- электрическое сопротивление основания, на котором стоит человек.

При этом следует отметить, что в системе действующих в России нормативно-технических документов отсутствуют методики или методические указания, позволяющие выполнить расчеты напряжений прикосновения для электрической сети, в т.ч. с резистивным заземлением нейтрали.

Результаты проведенных исследований показывают целесообразность перехода на оценку условий соблюдения электробезопасности по величинам напряжения, формирующегося на контуре заземления установки при протекании аварийного тока через ЗУ [4].

Такую оценку можно произвести с помощью комплекса государственных стандартов на электроустановки

зданий, разработанных на основе стандартов Международной электротехнической комиссии МЭК 364 «Электроустановки зданий». Впервые оценка уровня электробезопасности по величине напряжения на контуре заземления представлена в ГОСТ Р 50571.18–2000.

**ГОСТ Р 50571.18–2000** [5], актуализированный с международным стандартом МЭК 60364–4–442–93 «Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Глава 44. Защита от перенапряжений. Раздел 442. Защита электроустановок до 1 кВ от перенапряжений, вызванных замыканиями на землю в электроустановках выше 1 кВ», устанавливает требования по обеспечению электробезопасности путем защиты от перенапряжений, которые могут возникнуть в электроустановках до 1 кВ из-за замыканий на землю в электроустановках выше 1 кВ.

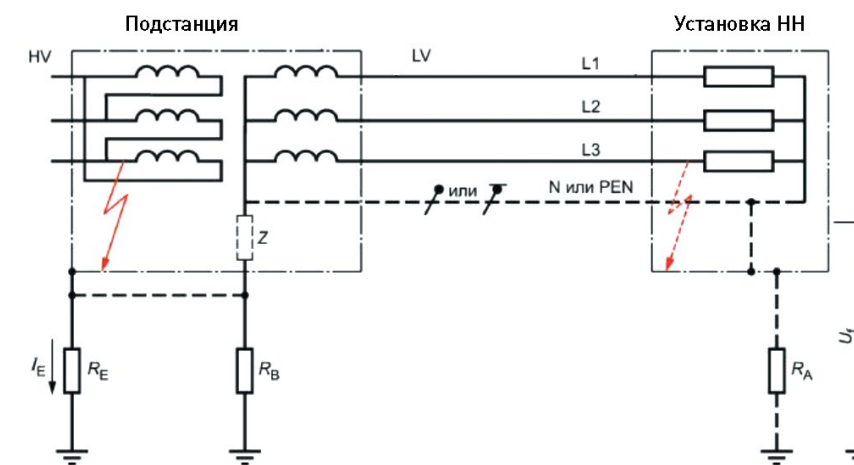
В п. 442.1.2 этого документа приведена зависимость допустимых значений напряжения замыкания и ожидаемых напряжений прикосновения при замыкании на землю в электроустановке выше 1 кВ.

Вызванные однофазным замыканием напряжение замыкания и напряжение прикосновения между открытой проводящей частью и локальной землей в электроустановке до 1 кВ не должны превышать значений, определяемых соответственно кривой F и кривой T на рис. 1 для заданного времени срабатывания защиты от замыканий на землю в электроустановках выше 1 кВ [5].

Под напряжением замыкания в данном стандарте принимается напряжение на заземляющем устройстве в точке заземления электроустановки выше 1 кВ в момент замыкания на землю токоведущей части этой электроустановки, равное произведению сопротивления заземляюще-

ХАРАКТЕРНАЯ УПРОЩЕННАЯ СХЕМА ВОЗМОЖНЫХ СПОСОБОВ ЗАЗЕМЛЕНИЯ ПОДСТАНЦИИ НИЗКОВОЛЬТНОЙ УСТАНОВКИ И ПЕРЕНАПРЯЖЕНИЙ, ВОЗНИКАЮЩИХ В СЛУЧАЕ ПОВРЕЖДЕНИЙ

Рис. 3.



го устройства на стекающий с него в землю ток.

Начиная с 2011 года этот стандарт заменен на ГОСТ Р 50571.4.44–2011 [6], расширяющий требования к напряжению замыкания и определяющий порядок расчетов напряжения на контуре заземления в режиме однофазного замыкания. В 2019 году ГОСТ Р 50571.4.44–2011 [6] заменен на ГОСТ Р 50571.4.44–2019 [7].

**ГОСТ Р 50571.4.44–2019** [7], актуализированный с международным стандартом МЭК 60364–4–44:2007 «Электроустановки низковольтные. Часть 4–44. Защита для обеспечения безопасности. Защита от резких отклонений напряжения и электромагнитных возмущений», устанавливает допустимые значения напряжения, возникающего в сети высокого напряжения на корпусе электрооборудования при повреждении.

Данный стандарт предназначен для обеспечения требований электробезопасности в электроустановках при возникновении резких отклоне-

ний напряжения и электромагнитных возмущений по различным из указанных причинам.

В п. 442.2.1 этого документа приведена зависимость допустимых значений напряжения повреждения  $U_{п}$ , которое возникает в низковольтной установке между открытыми проводящими частями и землей, от длительности воздействия  $t$  (рис. 2).

Величины напряжения повреждения не должны превышать нормируемые значения для соответствующей продолжительности повреждения, приведенные на кривой (рис. 2). Выполнение этого условия обуславливает выполнение требований по обеспечению электробезопасности.

Достоинством ГОСТ Р 50571.4.44–2019 является представление методики расчета напряжения повреждения промышленной частоты, что позволяет с достаточной точностью определить его ожидаемые значения и сделать вывод о выполнении условий электробезопасности в соответствующих аварийных режимах.

УПРОЩЕННАЯ СХЕМА ДЛЯ ОПРЕДЕЛЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ В СЕТИ С РЕЗИСТИВНО-ЗАЗЕМЛЕННОЙ НЕЙТРАЛЬЮ

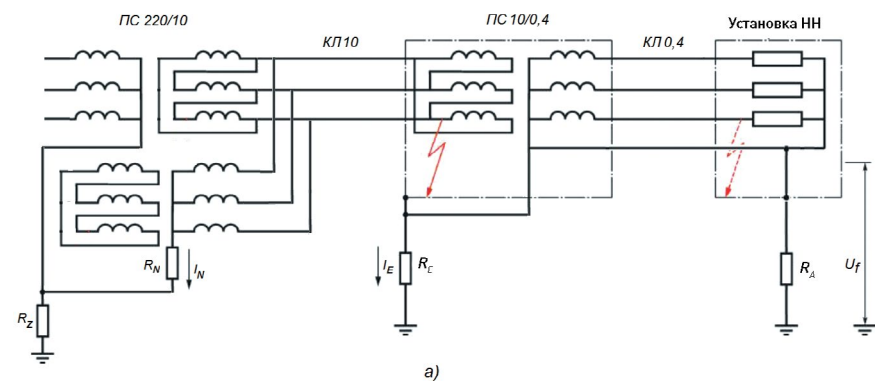


Рис. 4.

В разделе 442.2 стандарта [7] приведена схема возможных способов заземления подстанции низковольтной установки для определения напряжений, возникающих в случае повреждения (рис. 3).

На схеме использованы следующие обозначения:

$I_E$  — часть тока замыкания на землю в высоковольтной системе, которая протекает по заземляющему устройству подстанции;

$R_E$  — активное сопротивление заземляющего устройства трансформаторной подстанции;

$R_A$  — активное сопротивление заземляющего устройства открытых проводящих частей оборудования низковольтной установки;

$R_B$  — активное сопротивление заземляющего устройства нейтрали низковольтной системы с электрически независимыми заземляющими устройствами трансформаторной подстанции и нейтрали низковольтной системы;

$Z$  — полное сопротивление между низковольтной системой и заземляющим устройством;

$U_f$  — напряжение повреждения промышленной частоты, возникающее в низковольтной системе между открытыми проводящими частями и землей во время повреждения.

Если низковольтная система расположена на территории высоковольтного заземляющего устройства, то заземляющие устройства высоковольтного и низковольтного оборудования соединены между собой.

При подключении нагрузки низкого напряжения к питающей подстанции по четырехпроводной схеме TN или TT, согласно ПУЭ [1], напряжение повреждения  $U_f$  равно напряжению,

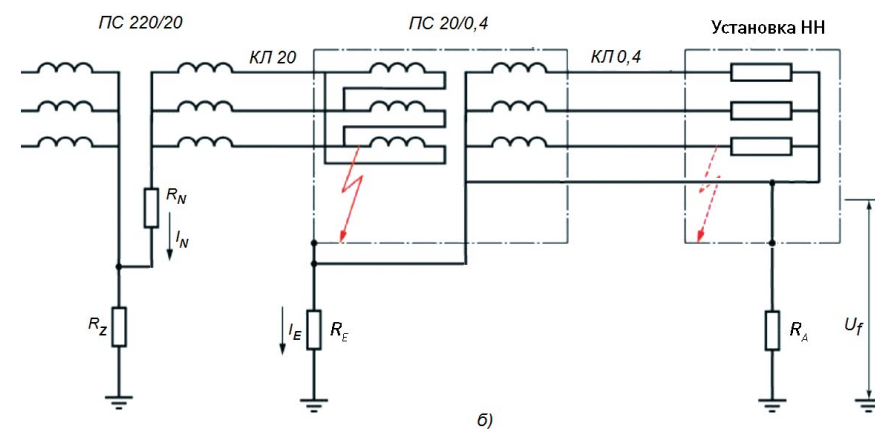
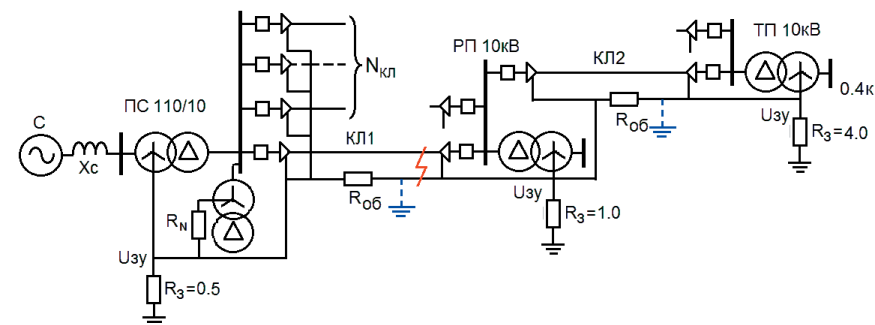


Рис. 5.

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА УЧАСТКА СЕТИ



ПАРАМЕТРЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Таблица 2

Тип	$S_{ном},$ МВ·А	Расчетные данные					
		$U_{ном}$ обмоток, кВ		$i_k, \%$	$\Delta P_{квт},$ кВт	$R_T, \text{ Ом}$	$X_T, \text{ Ом}$
ВН	НН						
ТРДН-40000/110	40	115	10,5	10,5	172	1,4	34,7
ТМ-630/10	0,63	10	0,4	5,5	7,6	1,91	8,73
ТМ-400/10	0,4	10	0,4	4,5	5,5	3,44	11,25
ФМЗ0-875/11	0,875	11	–	6,0	6,0	0,95	8,30
ТДЦН-100000/220-У1	100	220	20	17,3	410	1,98	83,7
ТМГ-1600/20	1,6	20	0,4	6,5	16	2,5	16,2

возникающему на контуре заземления подстанции при протекании аварийного тока  $I_E$  по сопротивлению контура заземления трансформаторной подстанции  $R_E$ .

Для системы TN с электрическим соединением между  $R_E$  и  $R_A$  (рис. 3) напряжение повреждения равно:

$$U_f = I_E \times R_E \quad (1)$$

При питании подстанции потребителей от сети с резистивно-заземленной нейтралью приведенная в ГОСТ Р 50571.4.44-2019 схема (рис. 3) возможных способов заземления подстанции низковольтной установки для определения напряжений, возникающих в случае повреждения, преобразуется в схему на рис. 4 (а, б).

Схема рис. 4 (а) характерна для сети 10 кВ, в которой резистивное заземление нейтрали осуществляется с помощью специальных заземляющих трансформаторов.

Схема рис. 4 (б) применяется в сети 20 кВ, в которой резистивное заземление нейтрали осуществляется с помощью подключения резисторов в нейтраль 20 кВ силовых трансформаторов питающей подстанции.

Схемы рис. 4 (а, б) дополнены следующими обозначениями:

$R_Z$  — активное сопротивление заземляющего устройства питающей подстанции;

$R_N$  — активное сопротивление в нейтрали среднего напряжения питающей подстанции.

Согласно рис. 4 напряжение повреждения в сети с резистивно-заземленной нейтралью численно равно напряжению на контуре заземления  $R_E$  питающей подстанции при протекании по нему аварийного тока.

СОПРОТИВЛЕНИЕ ОБОЛОЧЕК КАБЕЛЯ АСБ

Таблица 3

Сечение жилы	Сопротивление свинцовой оболочки, Ом/км	Сопротивление стальной брони, Ом/км	Параллельное соединение оболочки и экрана, Ом/км
120 мм <sup>2</sup>	0,76	1,91	0,544
240 мм <sup>2</sup>	0,57	1,59	0,42

ТИП И ДЛИНЫ КАБЕЛЕЙ

Таблица 4

Подстанция	Длина КЛ, м	Изоляция	Тип кабеля
Питание РП и ПС кабелями с бумажно-масляной изоляцией			
ПС – РП	1410	Б-М	АСБ 10 3*240
РП – ТП	546,6	Б-М	АСБл 10 3*120
Питание РП и ПС кабелями с изоляцией из сшитого полиэтилена			
ПС – РП	1512	СПЭ	АПвПуг 3*(1х400/70)
РП – ТП	509	СПЭ	АПвП 3*(1*240/50)

ПАРАМЕТРЫ КАБЕЛЕЙ ПРИ ЗАМКНУТЫХ ПО КОНЦАМ ЭКРАНАХ

Таблица 5

Тип кабеля	X, Ом/км	C, мкФ/км	R, Ом/км
АСБл 10-3*240	0,099	0,41	0,125
АСБл 10-3*120	0,108	0,31	0,253
АПвПуг 3*(1x400/70)	0,090	0,57	0,0778
АПвПуг 3*(1x120/35)	0,108	0,35	0,253
АПвПуг 3*(1x240/35)	0,107	0,29	0,125
АПвПуг 3*(1x500/70)	0,093	0,39	0,0605

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЗУ ПРИ НИЗКООМНОМ ЗАЕМЛЕНИИ НЕЙТРАЛИ СЕТИ 10 КВ

Таблица 6

Режим	U <sub>зу пс</sub> , В	U <sub>зу рп</sub> , В	U <sub>зу тп</sub> , В
033 в начале КЛ1			
СПЭ	0,56	0,61	0,71
Б-М	0,74	0,32	0,38
033 в конце КЛ1			
СПЭ	46	128	119
Б-М	56	97	78
033 в конце КЛ2			
СПЭ	57	110	230
Б-М	60	69	176

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЙ НА ЗУ ПРИ НИЗКООМНОМ ЗАЕМЛЕНИИ НЕЙТРАЛИ ПРИ ЧЕТЫРЕХ ПОДХОДЯЩИХ К ТП КЛ

Таблица 7

Режим	U <sub>зу пс</sub> , В	U <sub>зу рп</sub> , В	U <sub>зу тп</sub> , В
033 в начале КЛ1			
СПЭ	0,90	0,23	0,29
Б-М	0,90	0,17	0,20
033 в конце КЛ1			
СПЭ	17	97	71
Б-М	19	81	52
033 в конце КЛ2			
СПЭ	19	65	150
Б-М	20	47	128

Для сети с резистивно-заземленной нейтралью наибольшее значение тока в контуре заземления подстанции наблюдается в режиме однофазного замыкания, когда ток  $I_E$  в контуре ЗУ потребителей может достигать величины тока резистора  $I_E \leq I_N = U/R_N$  (рис. 4). Этот предельный случай использован при оценке условий выполнения требований по электробезопасности в сети с резистивным заземлением нейтрали в упрощенной методике Тяжпромэлектропроекта [8], в которой напряжение на контуре заземления определяется в предположении протекания всего тока резистора через контур заземления подстанции. Для питающей подстанции ПС 20/0,4, к шинам 20 кВ которой подходит несколько кабельных линий, необходим более точный анализ, учитывающий растекание токов по экранам всех КЛ, подключенных к контуру заземления.

Поскольку при возникновении ОЗ3 в развитой городской кабельной сети ток от места однофазного замыкания растекается по экранам присоединенных кабелей и контурам заземления всех подключенных подстанций, в расчетах необходимо учитывать конкретную конфигурацию анализируемой сети, коммутацию экранов кабелей, сопротивления контуров заземления подстанций, пути реального протекания тока замыкания.

### ЭЛЕКТРИЧЕСКАЯ СЕТЬ 10 КВ С НИЗКООМНЫМ ЗАЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

В общем случае городская кабельная сеть 10 кВ имеет развитую структуру, содержащую питающие подстанции (ПС) 110–220/10 кВ, от шин 10 кВ которых запитаны распределительные пункты (РП) и подстанции потребителей (ТП).

Анализ величин напряжений на контурах заземления подстанций в режиме однофазного замыкания проведен на примере выделенного радиального участка сети 10 кВ, расчетная схема которого представлена на рис. 5.

В рассмотренной схеме от ПС 110/10 кВ по кабельной линии КЛ1 10 кВ запитан РП 10 кВ, от которого по линии КЛ2 получает питание ТП 10 кВ.

В расчетной модели КЛ представлены частотно-независимыми линиями с распределенными параметрами, определенными по геометрии кабеля и электрическим характеристикам конструктивных материалов. На ПС 110/10 кВ установлены трансформаторы типа ТРДН-40000/110 со схемой соединения обмоток  $Y_n/D$ . На РП 10/0,4 установлены двухобмоточные трансформаторы типа ТМ-630/10 со схемой соединения обмоток  $D/Y_n$ , на ТП 10/0,4 установлены трансформаторы типа ТМ-400/10. Подключение резистора к нейтрали сети 10 кВ осуществлялось через фильтр ФМ30-875. Параметры трансформаторов приведены в таблице 2.

Рассмотрено два варианта электропитания РП и ТП от подстанции 110/10 кВ: кабелем типа АСБ с бумажно-масляной (Б-М) изоляцией и кабелем типа АПвПуг с изоляцией из сшитого полиэтилена (СПЭ).

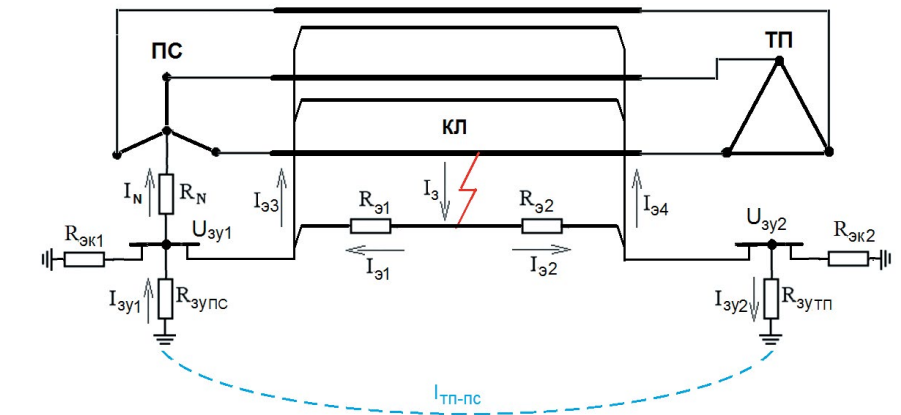
Использование в кабелях с Б-М изоляцией общей свинцовой оболочки со стальной броней обеспечивает хороший электрический контакт с потенциалом земли. В этом случае любое замыкание жилы кабеля на общую защитную свинцовую оболочку будет однофазным замыканием на землю, что обеспечивает растекание тока ОЗ3 по оболочке кабеля и земляному каналу.

При использовании кабелей с СПЭ изоляцией замыкание жилы кабеля на экран приводит к протеканию тока однофазного замыкания (ОЗ) по экрану с пропусканием в контур заземления значительной доли тока.

Значения сопротивления оболочки и параметры кабелей приведены в таблицах 3–5.

ПРОТЕКАНИЕ ТОКОВ ПРИ ОЗ В СЕТИ 20 КВ

Рис. 6.



«ОЦЕНКА УСЛОВИЙ ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СЕТЕЙ С НИЗКООМНЫМ ЗАЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ НЕ МОЖЕТ ПРОВОДИТЬСЯ С ОРИЕНТАЦИЕЙ НА ВЕЛИЧИНЫ СОПРОТИВЛЕНИЙ ЗУ СОГЛАСНО П.1.7.96 ПУЭ. НОРМИРОВАНИЕ УСЛОВИЙ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ В СЕТЯХ С НИЗКООМНЫМ ЗАЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ ДОЛЖНО ОСУЩЕСТВЛЯТЬСЯ ПО ВЕЛИЧИНАМ НАПРЯЖЕНИЯ ПРИКОСНОВЕНИЯ, ЛИБО ПО СВЯЗАННЫМ С ЭТИМ ПАРАМЕТРОМ НОРМАТИВАМ ПО НАПРЯЖЕНИЮ ПОВРЕЖДЕНИЯ СОГЛАСНО ТРЕБОВАНИЯМ ГОСТ Р 50571.4.44-2019»

Сопротивление экрана кабеля АПвПуг сечением 35 мм<sup>2</sup> составляет 0,525 Ом/км, для 70 мм<sup>2</sup>–0,2625 Ом/км. Сопротивление ЗУ питающей подстанции равно 0,5 Ом, ЗУ РП  $R_{зу рп} = 0,96$  Ом, ЗУ ТП  $R_{зу тп} = 4,0$  Ом.

К нейтрали сети 10 кВ питающей подстанции через фильтр ФМ30 подключен резистор  $R_N$  с активным током  $I_R = 500$  А, что соответствует сопротивлению резистора в нейтрали  $R_N = 11,6$  Ом. Суммарный емкостный ток ОЗ3 секции шин 10 кВ равен  $I_C = 33$  А. Замыкание на землю моделировалось замыканием жилы кабеля на экран.

В таблице 6 приведены значения напряжений повреждения  $U_{зу}$  на заземляющих устройствах ПС, РП и ТП при возникновении ОЗ3 в начале КЛ1, в конце КЛ1 и конце КЛ2 [9]. Проведены расчеты для кабелей с Б-М и СПЭ изоляцией.

Анализ расчетных значений напряжения повреждения в рассматриваемой кабельной сети 10 кВ показал, что для кабелей с СПЭ изоляцией напряжения на ЗУ РП и ТП имеют более высокие значения, по сравнению с расчетными значениями для кабелей с Б-М изоляцией. Это объясняется тем, что при изоляции экранов кабелей от земли, выполняемой для кабелей с СПЭ изоляцией, ток ОЗ на экран не ответвляется в землю

РАСЧЕТНАЯ СХЕМА РЕЖИМА ЗАМКЫВАНИЯ КАБЕЛЯ СЕТИ 20 кВ

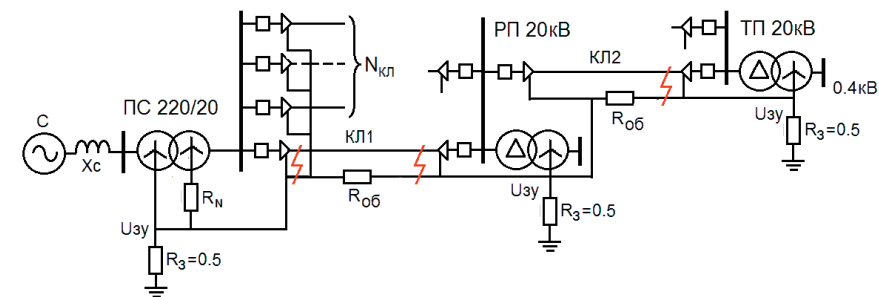


Рис. 7.

и полностью протекает по ЗУ РП и ТП. В наиболее опасном случае при ОЗ вблизи ТП максимальное напряжение на ЗУ достигает  $U_{3y} = 230$  В.

Кабели с Б-М изоляцией и свинцовым экраном имеют хороший электрический контакт оболочки и брони с потенциалом земли. В этом случае часть тока ОЗЗ по всей длине кабеля ответвляется в землю, доля тока через ЗУ ТП уменьшается, что приводит к уменьшению напряжения повреждения.

С увеличением числа КЛ, подключенных к ЗУ ТП, доля тока, оттекающая в экраны кабелей, увеличивается, ток в ЗУ уменьшается и напряжение на ЗУ снижается.

В таблице 7 показаны величины напряжений на контуре ЗУ для типовой конфигурации ТП с увеличенным количеством подключенных кабельных линий, когда к ТП подходят две КЛ и две КЛ отходят.

При подключении к шинам 10 кВ ТП четырех КЛ максимальные напряжения на ЗУ ТП уменьшаются и при токе резистора  $I_R = 500$  А не превышают  $U_{3y \text{ ТП}} = 150$  В.

Для таких величин напряжений повреждения допустимое время отключения замыкания по нормам

ГОСТ Р 50571-4-44-2019 должно быть не более  $t_{откл} = 0,7$  с.

### СЕТЬ 20 кВ С НИЗКООМНЫМ ЗАЕМЛЕНИЕМ НЕЙТРАЛИ

Особенностью сетей 20 кВ является использование кабелей с СПЭ изоляцией. Замыкание экранов СПЭ кабелей на контур заземления питающей и приемной подстанций образует замкнутую сеть, обеспечивающую хорошую электрическую связь контуров и возможность протекания аварийных токов через контуры заземления удаленных подстанций с возможным появлением значительных напряжений повреждения [4].

Для оценки условий обеспечения электробезопасности в конкретной сети 20 кВ выполнены расчеты растекания тока ОЗ с учетом дополнительной металlosвязи всех РП и ТП с ЗУ центров питания 220/20 кВ.

Поскольку сеть 20 кВ выполнена с использованием однофазных экранированных СПЭ кабелей, рассматривается замыкание одной фазы на экран кабеля и замыкание фазы непосредственно на подстанции на заземленное оборудование.

При возникновении ОЗ жилы кабеля на экран, как показано на рис. 6, ток растекается в обе стороны от ме-

ста замыкания. Величины токов  $I_{31}$ ,  $I_{32}$  определяются сопротивлениями экрана  $R_{31}$ ,  $R_{32}$  и сопротивлениями контуров заземления  $R_{3y \text{ ПС}}$  и  $R_{3y \text{ ТП}}$ . При удалении места ОЗ от шин ПС все большая доля тока ответвляется в контур  $R_{3y \text{ ТП}}$  и возвращается через контур  $R_{3y \text{ ПС}}$ . Экраны  $R_{3y \text{ эк}}$  кабельных линий, подключенных к шинам 20 кВ, помимо аварийного, оказывают шунтирующее действие, в результате чего часть тока ОЗ ответвляется в экраны подключенных линий. В этом случае напряжение на контуре ЗУ ПС и ЗУ ТП формируется только той частью тока ОЗ, которая непосредственно протекает через контур заземления.

Анализ величин напряжений на контурах заземления подстанций 20 кВ в режиме однофазного замыкания проведен на примере выделенного радиального участка сети 20 кВ, расчетная схема которого представлена на рис. 7.

В анализируемой схеме от питающей подстанции ПС 220/20 кабелем АПвПуг 3\*500 с СПЭ изоляцией запитан РП 20 кВ (КЛ1, рис. 7), от которого кабелем АПвПуг 3\*240 получает питание ТП 20/0,4 кВ (КЛ2, рис. 7). К шинам 20 кВ подключено 10 КЛ 20 кВ с суммарным емкостным током секции шин  $I_c = 210$  А, к шинам 20 кВ РП и ТП подключено по 4 КЛ 20 кВ. Параметры кабелей приведены в таблице 5.

На ПС 220/20 кВ установлены трансформаторы типа ТДЦН100000/220-У1 со схемой соединения обмоток  $Y_n/Y/D$  с резистором 12 Ом в нейтрали обмотки 20 кВ. На РП и ТП 20/0,4 установлены двухобмоточные трансформаторы типа ТМГ-1600/20 со схемой соединения обмоток  $D/Y_n$ . Параметры трансформаторов приведены в таблице 2.

Сопротивление контура заземления питающей подстанции соответствует требованиям ПУЭ к сети с глухоза-

земленной нейтралью и составляет  $R_3 = 0,5$  Ом. Сопротивление контура заземления подстанции 20/0,4 кВ выполнено со значением  $R_3 = 0,5$  Ом.

Результаты расчета напряжений повреждения на заземляющих устройствах  $U_{3y}$  при ОЗЗ вблизи шин ПС, на РП и ТП представлены в таблице 8.

Наибольшее значение напряжения повреждения на ЗУ наблюдается в случае возникновения ОЗ в конце КЛ2, когда наибольшая часть тока ОЗ вытесняется в контуры заземления ТП и ПС.

Для типовой схемы подключения ТП при подключении к шинам 20 кВ ТП четырех КЛ максимальные напряжения на ЗУ ТП при токе резистора  $I_R = 1000$  А не превышают  $U_{3y \text{ ТП}} = 154$  В.

Для таких величин напряжений повреждения допустимое время отключения замыкания по нормам ГОСТ Р 50571-4-44-2019 должно быть не более  $t_{откл} = 0,6$  с.

### ВЫВОДЫ

1. Оценка условий обеспечения электробезопасности электрических сетей с низкоомным заземлением нейтрали не может проводиться с ориентацией на величины сопротивлений ЗУ согласно п. 1.7.96 ПУЭ, поскольку большие значения тока в нейтрали приводят к малым, нереализуемым на практике расчетным значениям сопротивления контура ЗУ.

2. Нормирование условий электробезопасности в сетях с низкоомным заземлением нейтрали должно осуществляться по величинам напряжения прикосновения либо по связанным с этим параметром нормативам по напряжению повреждения.

3. Требования действующих нормативных документов относительно оценки условий обеспечения электробезопасности должны быть до-

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА НАПРЯЖЕНИЯ ПОВРЕЖДЕНИЯ НА ЗУ

Таблица 8

Место ОЗЗ	$U_{3y \text{ ПС}}$ , В	$U_{3y \text{ РП}}$ , В	$U_{3y \text{ ТП}}$ , В
ОЗЗ на экран в начале КЛ1	14,8	3,0	2,4
ОЗЗ на экран в конце КЛ1	98	115	32
ОЗЗ на экран в конце КЛ2	106	24	154

полнены разделами, определяющими параметры сети с низкоомным заземлением нейтрали.

4. В настоящее время условия обеспечения электробезопасности в режиме однофазного замыкания сети 10–20 кВ с низкоомным резистивным заземлением нейтрали необходимо оценивать согласно требованиям ГОСТ Р 50571.4.44-2019 по величине напряжения повреждения.

5. В существующих схемных решениях сети 20 кВ питание подстанций потребителей по радиальной двухлинейной схеме обуславливает в сети с низкоомным заземлением нейтрали повышенные уровни напряжений на заземляющем устройстве в режиме однофазного замыкания. Для радиальной кабельной сети 20 кВ, оснащенной резистором в нейтрали с током 1000 А, расчетное значение напряжения повреждения на ЗУ удаленной ТП может достигать 100–150 В, что требует отключения повреждения за время не более 0,6 с.

### ЛИТЕРАТУРА

1. Правила устройства электроустановок. — 7-е изд. — М.: Издательство НЦ ЭНАС, 2007.
2. ГОСТ 12.1.038-82. Система стандартов безопасности труда. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжения прикосновения и токов. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
3. Белявин К. Е., Кузнецов Б. В. Электробезопасность при эксплуатации электроустано-

4. вок. — Минск: Белорусская наука, 2007. — 195 с.
4. Майоров А.В., Львов М.Ю., Челазнов А.А., Никитина С.Д. Обеспечение электробезопасности в электрических сетях 20 кВ с низкоомным заземлением нейтрали. — Электрические станции, 2022. № 5. — С. 20–26.
5. ГОСТ Р 50571.18-2000 (МЭК 60364-4-442-93). Государственный стандарт Российской Федерации. Электроустановки зданий. Часть 4. Требования по обеспечению безопасности. Глава 44. Защита от перенапряжений. Раздел 44.2. Защита электроустановок до 1 кВ от перенапряжений, вызванных замыканиями на землю в электроустановках выше 1 кВ. — М.: ИПК Издательство стандартов, 2001.
6. ГОСТ Р 50571-4-44-2011 (МЭК 60364-4-44:2007) Национальный стандарт Российской Федерации. Электроустановки низковольтные. Часть 4.44. Требования по обеспечению безопасности. Защита от отклонений напряжения и электромагнитных возмущений. — М.: Стандартиформ, 2012.
7. ГОСТ Р 50571.4.44-2019 (МЭК 60364-4-44:2007) Национальный стандарт Российской Федерации. Электроустановки низковольтные. Часть 4.44. Защита для обеспечения безопасности. Защита от резких отклонений напряжения и электромагнитных возмущений. — М.: Стандартиформ, 2019.
8. Заземление нейтрали в промышленных установках 6–35 кВ. Руководящие указания. — Тяжпромэлектропроект им. Ф.Б. Якубовского. — Москва, 1991.
9. Болотин В.А., Челазнов А.А., Широковец А.И. Обеспечение электробезопасности при комбинированном и резистивном заземлении нейтрали в кабельной сети 10 кВ. — Релейная защита и автоматизация. 2021. № 3. — С. 88–93.