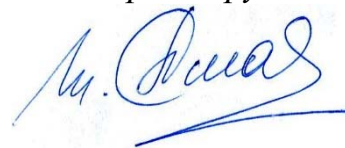


Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего
образования «Южно-Уральский государственный университет
(национальный исследовательский университет)»

На правах рукописи



САИДАЛИЕВ ШАХРИЁР САЪДУЛОВЕВИЧ

**ОБОСНОВАНИЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛЕНИЯ
НЕЙТРАЛИ И ПОВТОРНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ
В СИСТЕМЕ ЗАНУЛЕНИЯ**

Специальность 05.26.01 – «Охрана труда (электроэнергетика)»

Диссертация

на соискание учёной степени кандидата технических наук

Научный руководитель –
доктор технических наук,
профессор **А.И. Сидоров**

Челябинск – 2016

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ	
ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ	10
1.1 Характеристика зануления как средства обеспечения электробезопасности.....	10
1.2 Параметры элементов схемы зануления.....	17
1.3 Контроль параметров схемы зануления	32
1.3.1 Измерение полного сопротивления петли фаза-нулевой защитный проводник	32
1.3.2 Устройства автоматического контроля исправности цепи зануления	43
1.4 Задачи исследования.....	52
2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ	
ЗАНУЛЕНИЯ НА УСЛОВИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ	53
2.1 Методы исследования условий электробезопасности	53
2.2 Разработка компьютерной модели электрической сети	63
напряжением до 1000 В	63
2.3 Исследование влияния на условия электробезопасности параметров заземления нейтрали и повторных заземлений	69
2.4 Выводы	86
3 РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ В НОРМАТИВНЫЕ	
ДОКУМЕНТЫ ПО ПАРАМЕТРАМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ	
И ПОВТОРНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ	87
3.1 Влияние «отсоса» на условия электробезопасности в сетях до 1000 В с глухозаземленной нейтралью.....	88

3.2 Рациональное значение сопротивления заземления нейтрали по условиям электробезопасности	91
3.3 Рациональное значение суммарного сопротивления повторных заземлений по условиям электробезопасности	100
3.4 Методика выбора сопротивлений заземления нейтрали и повторных заземлений системы зануления.....	105
3.5 Выводы	107
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	109
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	111
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	128
ПРИЛОЖЕНИЕ Б	129
ПРИЛОЖЕНИЕ В	130
ПРИЛОЖЕНИЕ Г	131
ПРИЛОЖЕНИЕ Д.....	132

ВВЕДЕНИЕ

Актуальность темы. Основным защитным мероприятием от поражения человека электрическим током в сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью (ГЗН) при однофазных замыканиях на корпус является зануление корпусов и других открытых проводящих частей электрооборудования, нормально не находящихся под напряжением.

Как показывают многочисленные исследования, зануление не обеспечивает необходимые условия электробезопасности. Это связано с различными факторами, основными из которых являются: неспособность обеспечения нормируемого времени срабатывания защитных аппаратов; отказ защитных аппаратов по тем или иным причинам и обрывы *PEN*-проводников.

Существование одного из подобного рода повреждений при однофазном коротком замыкании приводит к ухудшению условий электробезопасности. А при возникновении однофазного замыкания за местом обрыва нулевой провод обеспечит вынос потенциала на все зануленные электроприемники и открытые проводящие части за местом повреждения. Такая ситуация создает предпосылки для группового электропоражения, в том числе и со смертельным исходом, поскольку эксплуатация электроприемников напряжением до 1000 В в большинстве случаев осуществляется неэлектротехническим персоналом, не представляющим условия возникновения и опасность поражения электрическим током, а также не владеющего навыками реанимации пострадавшего.

Согласно Правилам устройства электроустановок (ПУЭ) для снижения напряжения прикосновения на время до отключения поврежденного участка сети или на случаи обрыва нулевого провода (*PEN*-провода) рекомендуется устраивать повторные заземлители *PEN*-провода. Однако, при значениях сопротивлений заземления нейтрали и повторного заземления, соответствующих требованиям ПУЭ, напряжение на корпусах и открытых проводящих частях электроустановок существенно превышает предельно допустимый уровень напряжений

прикосновения. Следовательно, величины сопротивления этих заземлителей нельзя считать рациональными с точки зрения обеспечения электробезопасности.

Степень разработанности вопроса. Большой вклад в изучение условий электробезопасности системы зануления внесли известные ученые, такие как В.В. Бургсдорф, М.И. Верхоглядов, П.А. Долин, Т.В. Ерёмина, Р.Н. Карякин, Б.И. Князевский, В.П. Кораблев, А.И. Кузнецов, В.Е. Манойлов, Ф.Я. Мотуско, М.Р. Найфельд, О.К. Никольский, А.Б. Ослон, С.А. Пресс, А.И. Ревякин, А.И. Сидоров, А.И. Якобс и другие. Для устранения недостатков системы зануления профессора Ф.Я. Мотуско, А.И. Якобс предлагали принять в качестве критерия электробезопасности ток, протекающий через тело человека при прикосновении его к корпусу электроустановки и замыкании фазы на корпус. Однако, ввиду отсутствия практического использования расчетных методик (в электроустановках с многочисленными повторными заземлениями, сезонно меняющимися удельными сопротивлениями грунтов в местах расположения заземлителей, различными условиями прикосновения), эти предложения не нашли применения. Таким образом, учитывая распространенность сетей до 1000 В, квалификацию эксплуатирующего персонала, можно утверждать, что обоснование рациональных с точки зрения обеспечения условий электробезопасности параметров заземления нейтрали и повторного заземления является актуальной научно-технической задачей.

Объект исследования – электрические сети с глухозаземленной нейтралью напряжением до 1000 В, образованные воздушными линиями, в которых нулевые защитный и рабочий проводники представляют собой единое целое.

Предмет исследования – установление закономерностей в изменении напряжений на совмещенном нулевом защитном и нулевом рабочем проводнике при возникновении однофазных замыканий от соотношения величин сопротивлений заземления нейтрали (R_0), повторных заземлений ($R_{\text{п}}$) и замыкания фазы на землю ($R_{\text{зм}}$).

Цель исследования – повышение уровня электробезопасности при эксплуатации электроустановок напряжением до 1000 В путем определения

предельных соотношений значений сопротивлений заземления нейтрали и повторных заземлений.

Для достижения заявленной цели были поставлены следующие **задачи исследования**:

1. Разработать компьютерную модель электрической сети напряжением до 1000 В, позволяющую проводить анализ влияния параметров заземления нейтрали и повторных заземлений на условия электробезопасности.

2. При помощи компьютерной модели провести оценку условий электробезопасности системы зануления.

3. На основе полученных на компьютерной модели результатов определить рациональные значения соотношений величин R_0 , R_n и $R_{зм}$ с точки зрения обеспечения приемлемых условий электробезопасности.

4. Провести оценку изменения уровня электробезопасности в сетях напряжением до 1000 В с учетом предлагаемых значений соотношений R_0 , R_n и $R_{зм}$.

Методы исследования. При проведении исследований использованы основные положения теоретических основ электротехники, теории электробезопасности, методы компьютерного моделирования, программный комплекс MATLAB/Simulink.

Научная новизна основных положений и результатов, выносимых на защиту:

1. Доказано, что для обеспечения в системе зануления величины напряжения PEN-проводника относительно земли (U_{PEN}), при котором выполняются требования ПДУ напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека в длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с) при возникновении однофазного короткого замыкания, необходимо и достаточно выполнить следующее условие: $R_0/R_n \geq K$, где K определяется напряжением сети, например, для сети 380/220 В $K \geq 10$.

2. Установлено, что при возникновении однофазного замыкания на землю для достижения величины напряжения PEN-проводника относительно земли

(U_{PEN}), обеспечивающей ПДУ напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека в длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с) необходимо выполнить условие: $R_{зм}/R_0 \geq N$, где N определяется напряжением сети, например, для сети 660/380 В $N \geq 18$.

3. Выполнена оценка изменения значения напряжения PEN -проводника относительно земли (U_{PEN}) в электрических сетях напряжением до 1000 В с ГЗН при установлении предлагаемых соотношений сопротивлений заземления нейтрали источника питания (R_0), повторных заземлителей ($R_{п}$) и с учетом сопротивления замыкания фазы на землю ($R_{зм}$).

Степень достоверности результатов. Результаты, полученные при помощи компьютерной модели, сравнивались с результатами аналитических и экспериментальных исследований, проведенных в опытной электрической сети напряжением 380 В. Сходимость результатов находилась в допустимых пределах, что дает нам основание говорить о достоверности результатов компьютерного моделирования и о корректном применении вычислительных программных комплексов при разработке компьютерной модели.

Практическая значимость работы и реализация ее результатов:

1. Определено условие обеспечения на PEN -проводнике величины напряжения относительно земли, отвечающей требованиям ПДУ напряжений прикосновения при длительном режиме воздействия от соотношений сопротивлений заземления нейтрали источника питания (R_0), повторных заземлителей ($R_{п}$) и замыкания фазы на землю ($R_{зм}$).

2. Разработана методика расчета величин сопротивления R_0 и $R_{п}$ по условиям обеспечения на PEN -проводнике величины напряжения относительно земли, отвечающей требованиям ПДУ напряжений прикосновения в длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с) для различных напряжений сетей до 1000 В с ГЗН.

3. Научные положения, выводы и рекомендации работы по содержанию главы 1.7 Правил устройства электроустановок 7-го издания переданы в департамент административной и законопроектной работы Министерства энергетики Российской Федерации.

4. Результаты исследований используются в учебном процессе Южно-Уральского государственного университета, Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и Института энергетики Таджикистана при изучении курса «Безопасность жизнедеятельности» студентами электроэнергетических специальностей, а также при подготовке специалистов по направлению «Техносферная безопасность».

Апробация работы. Диссертационная работа и ее основные положения докладывались и обсуждались на LIII–LV международных научно-технических конференциях «Достижения науки – агропромыш-ленному производству», г. Челябинск, ЧГАА(ЮУрГАУ), 2013–2016 гг.; 6–8 научных конференциях аспирантов и докторантов ЮУрГУ, г. Челябинск, 2013–2016 гг.; 65–68 научных конференциях «Наука ЮУрГУ», г. Челябинск, 2013–2016 гг.; III Всероссийской студенческой конференции «Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи» (29–30 апреля 2014 г.), г. Челябинск, ЮУрГУ, 2014 г.; VI Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности в третьем тысячелетии» (7–9 октября 2015 г.), г. Челябинск, ЮУрГУ, 2015 г.; XI Международной научно-практической конференции «Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах» (25–26 ноября 2015 г.), г. Кемерово, КузГТУ, 2015 г.; III Международной научно-практической телеконференции «EurasiaScience» (29 января 2016 г.); XVII отраслевой научно-технической конференции «Молодежные инновации повышения эффективности и надежности транспорта газа» (18–22 апреля 2016 г.), г. Екатеринбург, ООО «Газпром трансгаз Екатеринбург», 2016; II международной научно-технической конференции «Пром-Инжиниринг» (19–20 мая 2016 г.), г. Челябинск, ЮУрГУ; на регулярных семинарах аспирантов и докторантов кафедры «БЖД» ЮУрГУ, г. Челябинск 2013–2016 гг.

Соответствие диссертации паспорту научной специальности. Научные положения, приведенные в диссертации, соответствуют области исследований специальности 05.26.01 – Охрана труда (электроэнергетика), в частности, п.7

«Научное обоснование, конструирование, установление области рационального применения и оптимизация параметров способов, систем и средств коллективной и индивидуальной защиты работников от воздействия вредных и опасных факторов».

Публикации. По теме диссертации опубликовано 14 печатных работ, в том числе 2 статьи в периодических изданиях, входящих в перечень ВАК РФ для защиты кандидатских и докторских диссертаций и 1 статья в журнале, включенном в базу Scopus.

Структура и объем диссертации. Диссертация состоит из введения, трех глав и заключения, изложенных на 110 страницах машинописного текста, содержит 45 рисунков, 12 таблиц, 155 наименований литературы и 5 приложений.

1 АНАЛИЗ СОСТОЯНИЯ ВОПРОСА И ОБОСНОВАНИЕ ЗАДАЧ ИССЛЕДОВАНИЯ

В электрических сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью (ГЗН) широко применяемой защитной мерой является зануление, что регламентируется п. 1.7. ПУЭ [95]. Надежное электрическое соединение открытых проводящих частей электроустановок с глухозаземленной нейтралью источника питания при помощи зануляющих проводников гарантирует превращение однофазного замыкания на эти источники в однофазное короткое замыкание и, тем самым, инициирует отключение аварийной электроустановки или аварийного участка сети.

Большая работа по изучению параметров зануления проведена широко известными авторами, такими как Е.Н. Андриевский, В.В. Бургсдорф, М.И. Верхоглядов, Н.Д. Григорьев, П.А. Долин, Т.В. Ерёмина, А.П. Казимир, Р.Н. Карякин, Б.А. Князевский, А.И. Кузнецов, Ф.Я. Мотуско, М.Р. Найфельд, О.К. Никольский, А.Б. Ослон, С.А. Пресс, А.И. Ревякин, А.И. Сидоров, А.И. Якобс и другие. Однако, несмотря на существенную простоту зануления и его достаточно высокую надежность, при эксплуатации электрических сетей возникают режимы, когда не обеспечиваются необходимые условия электробезопасности.

1.1 Характеристика зануления как средства обеспечения электробезопасности

Характеристика, защитные свойства и область применения зануления в качестве защитной меры подробно рассмотрены и описаны в широко известных работах [5, 32, 33, 47, 52, 60, 63, 73, 75, 77, 84, 96, 99, 148 и др.].

Электробезопасность при этом обеспечивается, прежде всего, отключением поврежденного участка сети аппаратами защиты, что устраняет опасность поражения электрическим током людей и животных.

Принципиальная схема зануления в сети трехфазного тока приведена на рисунке 1.1 [33].

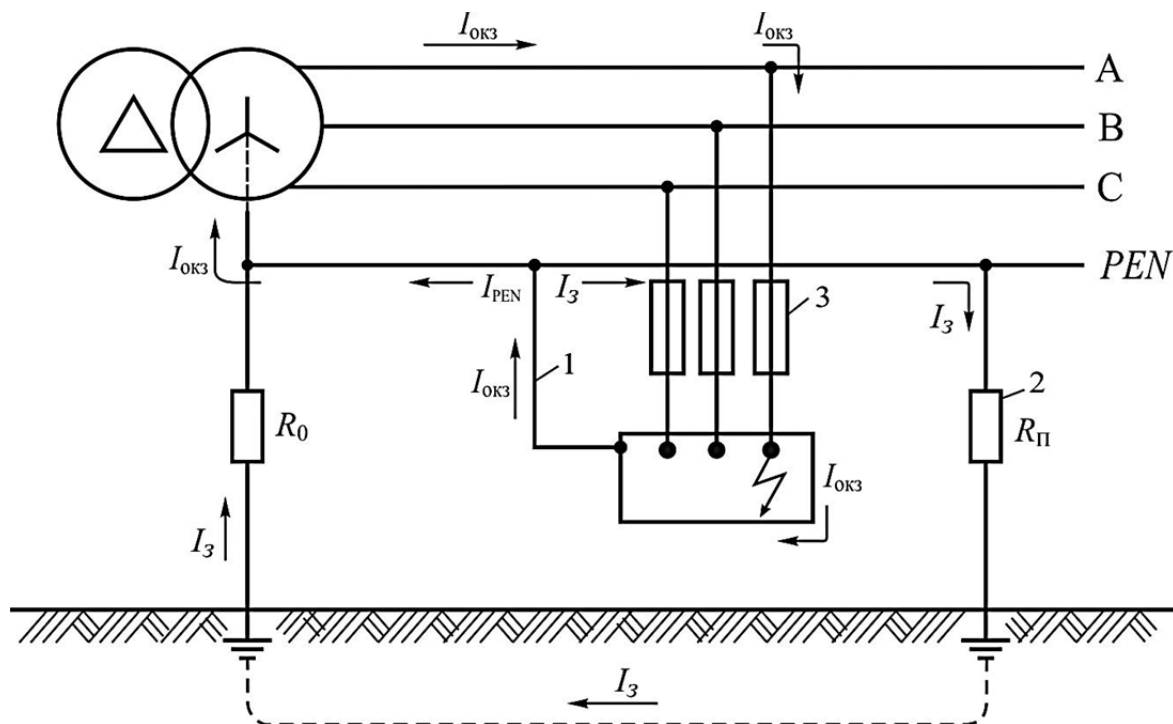


Рисунок 1.1 – Схема защиты занулением:

R_0 – сопротивление нейтрали источника питания, PEN – совмещенный нулевой защитный и нулевой рабочий проводник, присоединенный к нейтрали трансформатора; 1 – ответвление от PEN -проводника к открытой проводящей части оборудования; 2 – повторное заземление PEN -проводника (R_{Π}), 3 – аппараты защиты

В качестве аппаратов защиты зануление предусматривает применение автоматических выключателей максимального тока и плавких предохранителей, устанавливаемых для защиты от токов короткого замыкания; магнитных пускателей со встроенной тепловой защитой; контакторов с тепловыми реле, осуществляющих защиту от перегрузки [33].

Уставки аппаратов защиты, а также номинальные токи плавких вставок предохранителей выбираются в соответствии с требованиями ПУЭ [95], которые зависят от номинального тока ($I_{\text{ном}}$) электропотребителя и значений пусковых токов ($I_{\text{пуск}}$).

Уставка теплового расцепителя автоматических выключателей проверяется по время-токовой характеристике на время срабатывания в зоне перегрузки, а электромагнитного расцепителя – по условиям отстройки от пусковых токов.

При токах, превышающих пусковые, должен отключаться сначала предохранитель или автомат и только после этого магнитный пускатель (или контактор), для чего должно быть соблюдено условие [95]:

$$t_{\text{пред(авт)}} < \frac{t_{\text{свз}} \cdot K}{K_{\text{зап}}}, \quad (1.1)$$

где $t_{\text{пред(авт)}}$ – время срабатывания предохранителя (автоматического выключателя) по время-токовой характеристике, K – коэффициент, равный 1,15 и учитывающий отклонение от собственного времени пускателя; $t_{\text{свз}}$ – собственное время срабатывания магнитного пускателя (или контактора); $K_{\text{зап}}$ – коэффициент запаса, равный 1,5.

При большом удалении приемника от подстанции необходима проверка на срабатывание защитного аппарата при однополюсном замыкании в соответствии с требованиями ПУЭ [95].

Для тепловых реле номинальный ток электроприемника должен находиться в пределах тока срабатывания нагревательного элемента реле.

При однофазном замыкании на зануленный металлический корпус в цепи одного из фазных проводов возникает ток однофазного короткого замыкания ($I_{\text{окз}}$), который проходит по цепи обмотка силового трансформатора $Z_{\text{т}}/3$, фазный и нулевой провода $Z_{\text{ф}}+Z_{\text{н}}$. При этом сопротивления трансформатора ($Z_{\text{т}}$) и цепи «фаза-нуль» ($Z_{\text{ф}}+Z_{\text{н}}$) выражаются комплексными числами, поскольку в случае протекания больших токов необходимо учитывать индуктивную составляющую сопротивления проводников [84, 99, 121].

Значение $Z_{\text{т}}$ определяется по паспортным данным источника питания, или по справочным таблицам [47, 52, 75, 130, 148 и др.]. А сопротивление петли «фаза-нуль» определяется путем измерения специальными приборами.

Для упрощения расчетов разрешается арифметическое суммирование полных сопротивлений $\underline{Z}_T$ и $\underline{Z}_\Phi$ [75, 130]. Согласно [75], такое допущение дает погрешности ($\approx 5\%$) в сторону увеличения общего сопротивления и если уставка защиты будет выбрана по расчетному току однофазного короткого замыкания с учетом принятого допущения, то при реальном токе она сработает еще быстрее.

Таким образом, получаем следующее выражение [84]:

$$I_{\text{окз}} = \frac{U_\Phi}{\underline{Z}_\Phi + \underline{Z}_H}. \quad (1.2)$$

При надлежащем выполнении зануления $I_{\text{окз}}$ должен превышать ток срабатывания аппаратов защиты $I_{\text{ср.}}$ и отключать поврежденный участок электроустановки, тем самым обеспечить безопасность лиц, имеющих контакт с зануленным электрооборудованием. Быстродействие защиты определяется кратностью отношения $I_{\text{окз}} / I_{\text{ср.}}$.

Однако, как отмечается в [143], на сегодня основным недостатком системы зануления является длительное время отключения поврежденного участка сети при однофазном коротком замыкании, которая для предохранителей иногда достигает 100 с.

Необходимо также отметить, что неспособность зануления обеспечить нормируемое время срабатывания защитных аппаратов отмечалась и ранее в таких работах, как [61, 70–71, 73, 83, 86, 90, 148].

Во избежание этого недостатка зануления некоторые авторы [8, 61–62, 83, 89, 129, 138] предлагают проводить расчеты зануления по условиям обеспечения допустимого напряжения прикосновения. В [70] предлагается принять в качестве критерия электробезопасности ток, протекающий через тело человека при прикосновении его к корпусу электроустановки при замыкании фазы на корпус.

Следует заметить, что отсутствие практического использования расчетных методик [148], которые характеризуются громоздкостью расчетов, условностями в реальных электроустановках с многочисленными повторными заземлениями,

сезонно меняющимися удельными сопротивлениями грунтов в местах расположения заземлителей, различными условиями прикосновения (сопротивление тела, обуви, пола и т. д.), это предложение не нашло применение.

При замыкании любой из фаз на зануленную открытую проводящую часть, на *PEN*-проводнике и подключенных к нему всех корпусах электрооборудования появляется напряжение относительно земли. Оно определяется падением напряжения на сопротивлении заземления нейтрали источника питания – $R_0(U_0)$ и сопротивлениях повторных заземлений *PEN*-проводника – $R_{\Pi}(U_{PEN})$, обусловленных токами замыкания на землю I_3 [84]:

– напряжение на аварийном корпусе относительно земли:

$$\underline{U}_{PEN} = \underline{U}_h = \frac{U_{\phi}}{1 + \frac{\underline{Z}_{\phi}}{\underline{Z}_H}} \frac{R_{\Pi}}{R_0 + R_{\Pi}}, \quad (1.3)$$

– напряжение на сопротивлении заземления нейтрали относительно земли:

$$\underline{U}_0 = \frac{U_{\phi}}{1 + \frac{\underline{Z}_{\phi}}{\underline{Z}_H}} \frac{R_0}{R_0 + R_{\Pi}}. \quad (1.4)$$

Из выражений (1.3) и (1.4) следует, что U_{PEN} и U_0 всегда меньше фазного напряжения источника питания сети и их значения определяются в значительной степени соотношениями $\underline{Z}_{\phi}$ и $\underline{Z}_H$, R_{Π} и R_0 .

На рисунке 1.2 [67] приведены зависимости, характеризующие изменение напряжения относительно земли, возникающее при однофазном замыкании на корпус электрооборудования в двух случаях: 1) *PEN*-проводник имеет только один заземлитель у источника питания; 2) *PEN*-проводник помимо заземлителя у источника питания имеет еще повторное заземление.

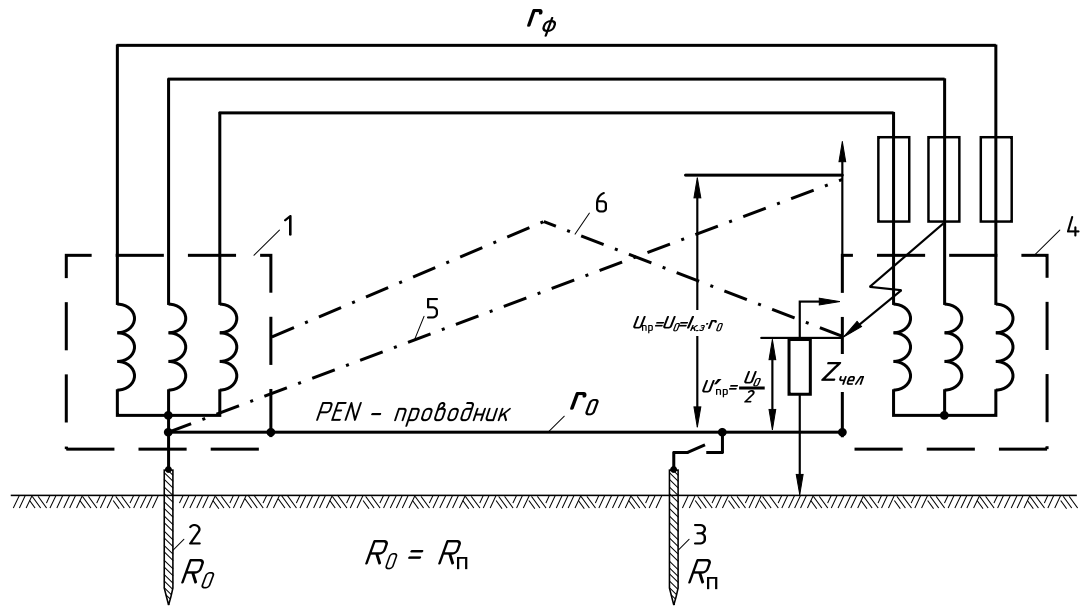


Рисунок 1.2 – Принципиальная схема защиты с помощью зануления:

1 – источник электроэнергии; 2 и 3 – заземлители; 4 – электроприемник; 5 – распределение напряжения прикосновения ($U_{\text{пр.}}$) при отсутствии повторного заземлителя; 6 – то же самое при наличии повторного заземлителя; $Z_{\text{чел}}$ – полное сопротивление тела человека; U_0 – падение напряжения на PEN -проводнике; $U_{\text{пр.}}$ – падение напряжения на корпусе относительно земли при отсутствии повторного заземлителя; $U'_{\text{пр.}}$ – то же самое при наличии повторного заземлителя

Повторное заземление PEN -проводника предназначено для снижения напряжения корпуса относительно земли в момент короткого замыкания. Если повторное заземление отсутствует ($R_{\text{п}} = \infty$), уравнения (1.3) и (1.4) принимают вид [84]:

$$\underline{U}_{PEN} = \frac{U_{\phi}}{1 + \frac{Z_{\phi}}{Z_{\text{н}}}}; \quad (1.5)$$

$$\underline{U}_0 = 0.$$

Как видно из (1.5) при отсутствии в системе зануления повторного заземления ($R_{\text{п}} = \infty$), напряжение прикосновения увеличивается в сторону электроприемника и достигает максимального значения у корпуса поврежденного

электроприемника. Если принять, что $\underline{Z}_\phi = \underline{Z}_n$, то в момент короткого замыкания на корпусе электроприемника его потенциал $U_{PEN} = U_\phi/2$ при $U_\phi = 220$ В, $U_{PEN} = 110$ В, а потенциал нейтрали равен нулю (рисунок 1.2, позиция 5).

При наличии повторного заземления PEN-проводника второй множитель в (1.3) меньше единицы, а в (1.4) – больше нуля (рисунок 1.2, позиция 6). И если принять $\underline{Z}_\phi = \underline{Z}_0$ и $R_\Pi = R_0$, то согласно выражениям (1.3) и (1.4) потенциалы будут равны:

$$\underline{U}_{PEN} = \underline{U}_0 = \frac{U_\phi}{4}. \quad (1.6)$$

Из (1.6) видно, что в период существования однофазного замыкания на корпус и наличии повторного заземления, при $U_\phi = 220$ В, $U_{PEN} = U_0 = 55$ В, что допустимо [27] в течении 1 с. Следовательно, зануление не только ограничивает время прохождения тока через тело человека при возникновении условия поражения, но и снижает значение напряжения прикосновения.

Однако учитывая неспособность зануления быстро отключить поврежденный участок электроустановки, как это отмечалось ранее, можно утверждать, что в ряде случаев аварийный период будет существовать более 1 с, вплоть до 10 с, а иногда и до 100 с. В таком случае $U_h = 55$ В представляет угрозу для человека при прикосновении его к корпусу поврежденной электроустановки, поскольку, согласно ГОСТу 12.1.038-82 [27], для сетей напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов при аварийном режиме более 1 с не должны превышать значений: для производственных электроустановок – $U_{пр.} = 20$ В и $I_h = 6$ мА; для бытовых электроустановок – $U_{пр.} = 12$ В и $I_h = 2$ мА.

В работах [52, 77, 83–84, 121, 128, 148] отмечаются и другие недостатки зануления:

- замыкание фазы на корпус одной зануленной электроустановки приведет к выносу опасного потенциала на все связанные с ней открытые металлические части;

- в четырехпроводных системах ($TN-C$), существует вероятность появления напряжения в нулевом проводе, вызванного несимметрией нагрузок в фазах, соответственно это приведет к появлению напряжения на зануленных корпусах даже при отсутствии замыкания фазы на корпус;
- в случае обрыва нулевого провода защитные аппараты не срабатывают, при этом опасное напряжение на зануленных корпусах существует в течение неопределенного времени;
- несвоевременное отключение аварийной установки приведет к повышению напряжения в неповрежденных фазах, что может вызвать повреждение электрооборудования;
- опасность возникновения пожара, обусловленная длительным существованием аварийного тока.

В то же время в [13, 106–108, 111] указывается, что зануление не утрачивает своего значения до тех пор, пока при эксплуатации электроустановок не найдут широкого применения новые устройства, позволяющие эффективно решать задачу обеспечения электробезопасности в сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью.

1.2 Параметры элементов схемы зануления

Из предыдущего материала видно, что успешное функционирование системы зануления зависит от параметров совмещенного нулевого защитного и нулевого рабочего (PEN) проводников, заземления нейтрали источника питания и повторного заземления PEN -проводника.

Рассмотрим требования ПУЭ [95], ПТЭ электроустановок [94] и ПОТЭ электроустановок [93], касающиеся системы зануления.

Прежде всего, следует отметить, что в настоящее время, согласно ПУЭ седьмого издания [95], главным критерием эффективности работы защиты в электрических сетях напряжением до 1000 В считается время ее срабатывания [16, 42].

Время срабатывания аппаратов защиты в электрических сетях напряжением до 1000 В приведено в таблице 1.1.

Т а б л и ц а 1.1 – Наибольшее допустимое время срабатывания защитного аппарата отключения для сетей TN , напряжением до 1000 В [95]

Номинальное фазное напряжение сети, U_{ϕ} , В	Время отключения, с
127	0,8
220	0,4
380	0,2
Более 380	0,1

При этом в цепях, питающих распределительные, групповые, этажные и др. щиты и щитки, время отключения не должно превышать 5 с [95].

Исходя из этого, во избежание превышения регламентируемых значений времени отключения оборудования, на котором возникло однофазное короткое замыкание (ОКЗ) (таблица 1.1), характеристики защитных аппаратов и параметры PEN -проводников должны быть согласованы так, чтобы это время обеспечивалось.

Как уже ранее было отмечено, быстрое срабатывание защитных аппаратов обеспечивается уменьшением сопротивления цепи тока однофазного короткого замыкания (петли «фаза-нуль»), в которую входят фазные и нулевой проводники, обмотки силового трансформатора.

В целях снижения сопротивления петли «фаза-нуль» к прокладке фазных и нулевых проводников предъявляются следующие требования [56, 73, 81, 84]:

- нулевые защитные проводники должны прокладываться совместно или в непосредственной близости с фазными проводами;
- в качестве нулевого проводника не могут быть использованы свинцовые оболочки кабелей вследствие их низкой проводимости;
- проводимость нулевого проводника должна составлять не менее 50% проводимости фазного проводника.

Согласно [95] нулевой защитный проводник прокладывают, начиная от щита распределительного устройства, на который выведена нулевая точка источника питания, по трассе фазных проводов и возможно ближе к ним. Для нулевых защитных проводников, в первую очередь, должны быть использованы нулевые рабочие проводники.

Согласно ПУЭ [95, п.1.7.126], наименьшие площади поперечного сечения *PEN*-проводников должны соответствовать следующим соотношениям: при сечении фазных проводов более 35 мм^2 , наименьшие площади поперечного сечения *PEN*-проводников выбираются равными 50 % от сечения фазных проводов, при площади поперечного сечения фазного проводника $16 < S \leq 35 \text{ мм}^2$ – 16 мм^2 , а при поперечных сечениях токоведущих фаз $S \leq 16 \text{ мм}^2$, сечения *PEN*-проводника должны быть равны сечениям фазных проводников.

Полное суммарное сопротивление петли фазного и нулевого проводов при точных расчетах должно определяться из соотношения [29, 73]:

$$Z_{\text{п.ф-о}} = \sqrt{(R_{\text{ф}} + R_{\text{н}} + R_{\text{д}} + R_{\text{т.т}} + R_{\text{А}})^2 + (X' + X'' + X_{\text{с}} + X_{\text{т.т}} + X_{\text{А}})^2}, \quad (1.7)$$

где $R_{\text{ф}}$, $R_{\text{н}}$ – активные сопротивления фазного и нулевого проводов, Ом;

$R_{\text{д}}$ – активное сопротивление места однофазного замыкания (сопротивление электрической дуги). По приближенным расчетам эта величина принимается равной 0,03 Ом;

$R_{\text{т.т}}$, $X_{\text{т.т}}$ – активное и индуктивное сопротивления трансформатора тока. По приближенным расчетам эти величины принимаются равным 0,00015 Ом и 0,00021 Ом соответственно;

$R_{\text{А}}$, $X_{\text{А}}$ – активное и индуктивное сопротивления коммутационного автоматического выключателя, если он применяется в расчетной схеме. Величины этих сопротивлений принимаются приближенно равными 0,00048 Ом и 0,00099 Ом соответственно;

$X_{\text{с}}$ – индуктивная составляющая вносимого сопротивления питающей системы, приближенно принимается равной 0,0032 Ом [73];

X' – внутреннее индуктивное сопротивление магистрали зануления (учитывается только для стальных магистралей);

X'' – внешнее индуктивное сопротивление.

Принято считать значение X'' приближенно равным 0,6 Ом/км [52, 75, 148 и др.]. М.Р. Найфельд в своей работе [75] предлагает формулу для более точного определения X'' для 1 км воздушной линии:

$$X'' = 0.29 \lg \frac{d}{r} \quad (1.8)$$

где d – среднее расстояние между осями проводов воздушных линий, м (на линиях напряжением до 1000 В это расстояние находится в пределах от 0,2 до 0,6 м [46]);

r – радиус проводника, м.

В ГОСТ 28249-93 [29] индуктивное сопротивление петли «фаза–нуль» также рекомендуется определять согласно выражению (1.8).

Точный расчет сопротивления петли «фаза–нуль» является сложной задачей. Учет всех составляющих величин по приближенным значениям неизменно приводит к погрешности, поэтому рядом авторов [38, 52, 75, 148] для вычисления сопротивления петли «фаза–нуль» на ВЛ с глухозаземленной нейтралью напряжением до 1000 В рекомендуется использовать упрощенную формулу:

$$Z_{п.ф-о} = \sqrt{(R_{\phi} + R_n)^2 + (X'')^2}. \quad (1.9)$$

Сопротивление петли «фаза–нуль» может быть измерено с помощью специальных приборов.

Существует достаточно много способов и приборов для измерения параметров петли «фаза–нуль», например, Московский институт энергобезопасности и энергосбережения и Научно-исследовательский испытательный центр «Радиофизические Тестовые Технологии» предлагают

цифровой малогабаритный прибор «Вектор», предназначенный для измерения параметров электрической сети при проведении различных видов испытаний установок, находящихся под напряжением [135].

Параметры заземления нейтрали источника питания устанавливаются исходя из ограничения потенциала в нейтрали источника тока при замыкании одной из фаз на землю [60, 63, 87, 150–153].

В [95] указано, что в четырехпроводных сетях напряжением 0,4 кВ напряжение на исправных фазах не должно превышать 250 В по условиям работы аппаратуры, а в [27] – напряжение нейтрали по отношению к земле не должно превышать допустимого значения напряжения прикосновения.

Первое условие выполняется, если напряжение смещения нейтрали не превышает 60 В. Второе условие достигается только при определенном сочетании тока, протекающего через тело человека, и продолжительности его воздействия [27].

С учетом вышеизложенного в ПУЭ [95] установлено, что значения сопротивления заземляющего устройства, к которому присоединены нейтрали генератора или трансформатора или выводы источника однофазного тока, в любое время года не должно превышать значений, приведенных в таблице 1.2.

Т а б л и ц а 1.2 – Значения сопротивлений заземляющего устройства, к которому присоединены нейтрали генератора или трансформатора

$U_{\text{л}} / U_{\text{ф}}, \text{ В}$	Сопротивление заземления нейтрали, Ом
660 / 380	2
380 / 220	4
220 / 127	8

Заземлитель, предназначенный для заземления нейтрали, согласно [95], располагается вблизи генератора или трансформатора, а для внутрицеховых подстанций допускается располагать заземлитель около стены здания. Если фундамент здания, в котором размещается подстанция, используется в качестве

естественных заземлителей, то нейтраль трансформатора следует заземлять путем присоединения не менее чем к двум металлическим колоннам или к закладным деталям, приваренным к арматуре не менее двух железобетонных фундаментов.

При расположении встроенных подстанций на разных этажах многоэтажного здания заземление нейтрали трансформаторов таких подстанций должно быть выполнено при помощи специально проложенного заземляющего проводника. В этом случае заземляющий проводник должен быть дополнительно присоединен к колонне здания, ближайшей к трансформатору, а его сопротивление учтено при определении сопротивления растеканию заземляющего устройства, к которому присоединена нейтраль трансформатора [60, 95].

Значения сопротивлений, указанных в таблице 1.2, должны быть обеспечены с учетом использования естественных заземлителей, а также заземлителей повторных заземлений *PEN*-проводника ВЛ напряжением до 1000 В при количестве отходящих линий не менее двух [95].

Повторные заземления *PEN*-проводника необходимо сооружать на воздушных линиях через каждые 250 м, а также на концах линий и ответвлений длиной более 200 м [57, 73]. Кроме этого, в [48, 95] указано, что повторные заземления *PEN*-проводника выполняются и на вводах ВЛ к электроустановкам, в которых в качестве защитной меры при косвенном прикосновении применено автоматическое отключение питания.

В основе разработки требований к повторному заземлению защитных проводников системы зануления лежит подробный анализ многочисленных несчастных случаев с летальными исходами, взятых из материалов уголовных дел, которые регулярно направлялись на экспертизу работниками прокуратуры из различных регионов страны. Рассматривались аварийные режимы электрических сетей, связанные с обрывами и падениями на землю фазных проводов сети, замыканиями на землю и на зануленный корпус, нарушениями целостности нулевых проводов [75, 112, 129]. Результаты анализа обрабатывались на ЭВМ, строились математические модели поражения электрическим током, сравнивались различные варианты защиты [120].

Для сооружения повторных заземлений, в первую очередь, рекомендуется [48, 95] использовать естественные заземлители, например, проложенные в земле металлические трубопроводы различных назначений, другие находящиеся в земле металлические конструкции и сооружения, подземные части опор ВЛ, а также заземляющие устройства, выполненные для защиты от грозových перенапряжений.

При этом, запрещается использовать трубопроводы горючих жидкостей, горючих или взрывоопасных газов и смесей и трубопроводы канализации и центрального отопления в качестве повторных заземлителей.

Согласно требованию ПУЭ [95] общее сопротивление всех заземляющих устройств (ЗУ), служащих для повторных заземлений *PEN*-проводника (в том числе и ЗУ, выполненных на базе естественных заземлителей) для каждой из ВЛ в любое время года, включая самые неблагоприятные периоды (летние, приводящие к высыханию слоя земли, в котором находится заземлитель, и зимние, вызывающие промерзание указанного слоя), не должно превышать значений, приведенных в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Значения сопротивлений повторных заземлений *PEN*-проводника

$U_{\text{л}} / U_{\text{ф}}, \text{В}$	Общее сопротивление всех ЗУ, Ом	Сопротивление ЗУ каждого из повторных заземлений, Ом
660 / 380	5	15
380 / 220	10	30
220 / 127	20	60

При удельном сопротивлении земли $\rho > 100 \text{ Ом} \cdot \text{м}$ допускается [95] увеличивать указанные нормы в $0,01 \rho$ раз, но не более чем десятикратно.

Указанные повторные заземления нулевого провода электрической сети выполняются, если более частые заземления не требуются по условию защиты ВЛ от грозových перенапряжений [95].

Заземляющие устройства ВЛ, предназначенные для защиты от атмосферных перенапряжений, выполняются [95, п. 2.4.46] на расстоянии друг от друга, не превышающем 200 м для районов с числом грозových часов в году до 40; 100 м – для районов с числом грозových часов в году более 40.

Помимо этого, дополнительно заземляющие устройства, предназначенные для защиты от грозových перенапряжений, должны выполняться [95]:

- на опорах с ответвлениями к вводам в здания, в которых может быть сосредоточено большое количество людей (школы, ясли, больницы), или которые представляют большую материальную ценность (животноводческие, птицеводческие помещения, склады);

- на конечных опорах линий, имеющих ответвления к вводам в здания любого назначения. При этом наибольшее расстояние от соседнего заземления этих же линий должно быть не более 100 м для районов с числом грозových часов в году до 40 и 50 м - для районов с числом грозových часов в году более 40.

Крюки и штыри фазных проводов, установленных на железобетонных опорах, а также арматура этих опор, должны быть присоединены к *PEN*-проводнику. Крюки и штыри фазных проводов, установленные на деревянных опорах, где выполнено повторное заземление *PEN*-проводника, подлежат заземлению [48].

Приведенные нормирования параметров зануления несколько повышают эффективность и надежность его показателей, как защитной меры.

Однако, нормирование параметров схемы зануления не устраняет недостатки, возникающие при эксплуатации системы зануления, например, при нарушении непрерывности *PEN*-проводника, о возможном механическом повреждении которого упоминается даже в ПУЭ [95].

Если для упрощения расчетов в (1.3) пренебречь сопротивлением обмоток источника питания и индуктивными сопротивлениями петли фазного и нулевого проводников, а также считать, что последние обладают только активными сопротивлениями R_ϕ и R_n , при этом допустить, что $R_\phi = R_n$ и по *PEN*-проводнику протекает такой же ток $I_{окз}$, как и по фазному проводу, то (1.2) примет вид [33]:

$$U_{PEN} = I_3 R_{\Pi} = \frac{U_{\Phi}}{R_{\Pi} + R_0} R_{\Pi},$$

или

$$U_{PEN} = \frac{U_{\Phi}}{1 + \frac{R_0}{R_{\Pi}}}. \quad (1.10)$$

Результаты расчета по (1.10) представлены на рисунке 1.3.

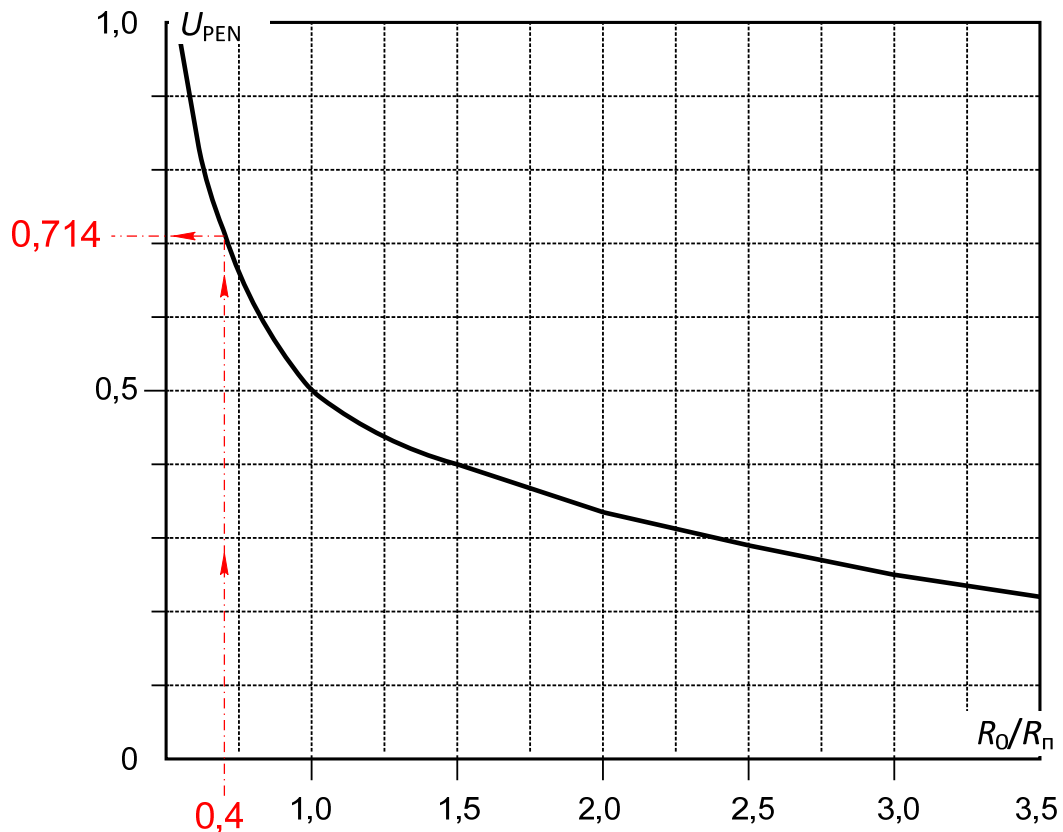


Рисунок 1.3 – Зависимость U_{PEN} (в долях от величины U_{Φ}) от соотношения R_0 и R_{Π} при однофазном замыкании на открытые проводящие части

Из рисунка 1.3 видно, что при однофазном замыкании на открытые проводящие части и отказе аппарата защиты по тем или иным причинам, снижение значения R_0 не улучшает условия электробезопасности, а наоборот, увеличивает U_{PEN} относительно земли, которое при $R_0 = 0$ становится равным по величине фазному напряжению сети.

Такое положение ставит под сомнение оптимальность значений R_0 , регламентированных в ПУЭ.

Тем не менее, при нормируемых в [95] значениях R_0 и R_{Π} , величина U_{PEN} относительно земли остается неизменной при всех напряжениях сети – 660/380, 380/220 и 220/127 В и составляет $0,714U_{\phi}$ (рисунок 1.3). Следовательно, за местом замыкания фазы на корпус и отказе аппарата защиты U_{PEN} относительно земли будет представлять угрозу для персонала, населения, а в сельской местности и для животных [52, 101].

Приведенное дает возможность утверждать, что при отказе аппарата защиты и замыкании фазы на корпус электроприемника, указанные в ПУЭ [95] значений R_0 и R_{Π} не обеспечивают приемлемый уровень электробезопасности.

В соответствии с [33] при однофазном замыкании фазы на землю (ОЗЗ) значение напряжения PEN -проводника относительно земли U_{PEN} определяется по формуле:

$$U_{PEN} = I_{3M} R_0 = \frac{U_{\phi}}{R_{3M} + R_0} R_0 ,$$

или

$$U_{PEN} = \frac{U_{\phi}}{1 + \frac{R_{3M}}{R_0}} \quad (1.11)$$

где R_{3M} – сопротивление замыкания фазы на землю, Ом.

Результаты (1.11) приведены на рисунке 1.4.

Из рисунка 1.4 видно, что при ОЗЗ напряжение на PEN -проводнике U_{PEN} и подключенных к нему открытых проводящих частей в значительной степени зависит от сопротивления замыкания на землю R_{3M} , которое является, прежде всего, функцией удельного сопротивления грунта в месте замыкания.

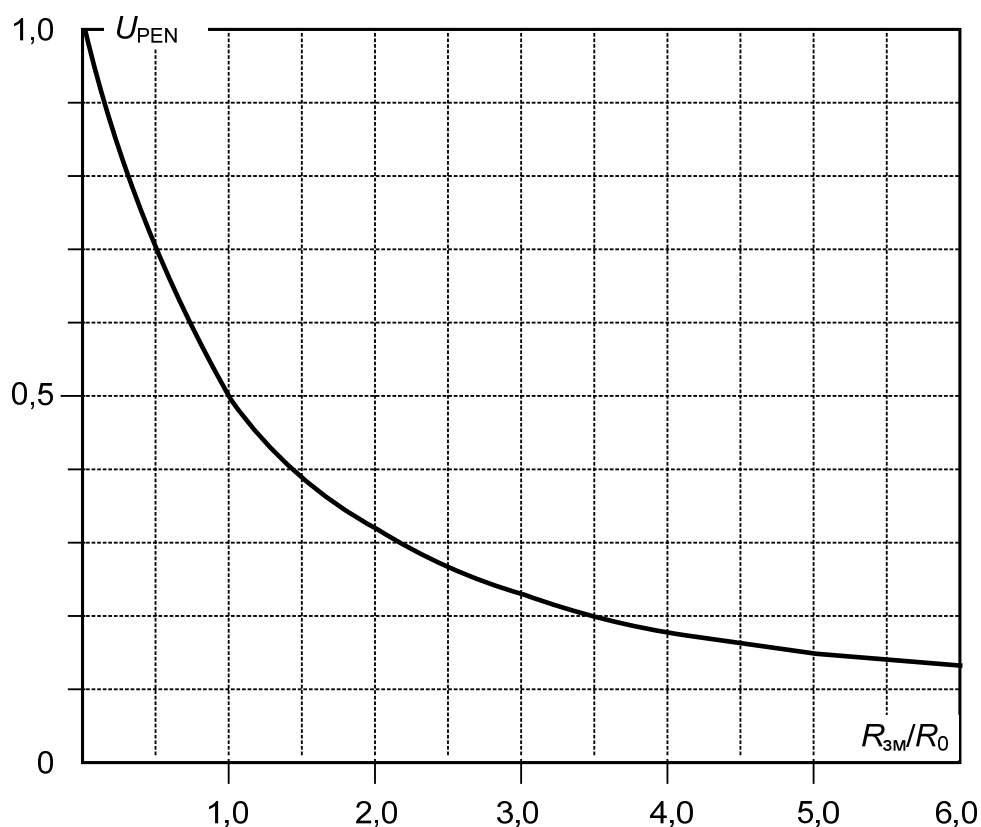


Рисунок 1.4 – Зависимость U_{PEN} при ОЗЗ от соотношения R_{3M} и R_0 (в относительных единицах от U_ϕ)

Экспериментами установлено, что сопротивление замыкания фазного провода при контакте с землей составляет сотни и даже тысячи Ом, даже при сырой земле (провод погружен в грязь) – 15 – 20 Ом [33, 60].

Например, Н.П. Сейма, измеряя сопротивление заземления голого медного провода, лежавшего на мягкой земле, установил, что оно находится в пределах 120 – 200 Ом. Когда этот же провод был вдавлен в землю, сопротивление заземления снизилось до 8 – 14 Ом [67].

Однако при исследованиях, проведенных нами в рамках представленной работы, были получены и другие значения сопротивления замыкания фазы на землю при ОЗЗ или замыкания фазы на другие неизолированные от земли конструкции [113, 123].

Известно, что значительная часть ВЛ - 0,38 кВ проходит по населенной местности и в результате обрыва фазный провод, помимо непосредственного падения на землю, может также упасть на заборы, гаражи, деревья и другие не изолированные от земли объекты (рисунок 1.5).

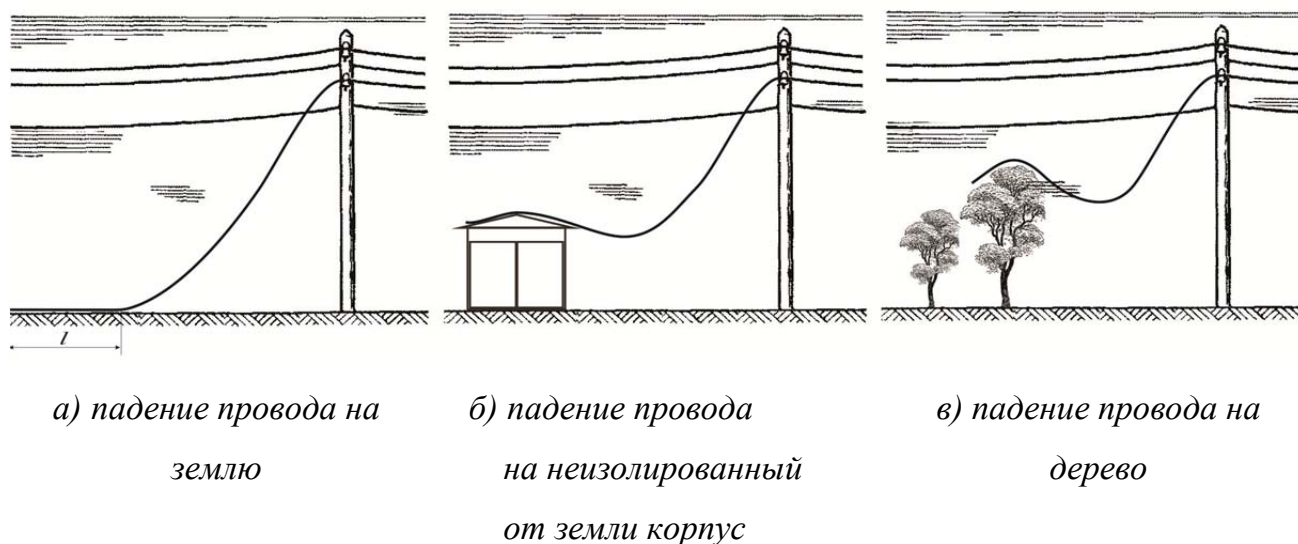


Рисунок 1.5 – Случаи падения оборвавшегося фазного провода ВЛ-0,38 кВ

В этом случае значения напряжения PEN -проводника (U_{PEN}) относительно земли и на всех присоединенных к нему открытых проводящих частях в полной мере зависят от сопротивления самозаземления перечисленных объектов. Результаты исследования приведены в таблице 1.4 [113].

Таблица 1.4 – Результаты расчета сопротивлений самозаземления гаражей

Удельное электрическое сопротивление грунта	ρ , Ом·м	20	40	100	300	700
Цельнометаллический гараж	$R_{сз}$, Ом	1,47	2,94	7,36	22,06	51,48
Гараж из ж/б блоков с металлической крышей	$R_{сз}$, Ом	2,4	4,7	11,8	35,4	82,5

При этом, если посмотреть оценку зануления по обеспечению условий электробезопасности при ОЗЗ, например, для $U_{\phi} = 220$ В и расчетного значения удельного сопротивления грунта $\rho = 100$ Ом·м, согласно выражению (1.11) и рисунку 1.4 получим: при замыкании фазы на крышу цельнометаллического гаража значение U_{PEN} составляет $0,35U_{\phi}$ и равняется $U_{PEN} = 77$ В, а при замыкании фазы на крышу гаража из железобетонных блоков с металлической крышей – $0,25U_{\phi}$ и $U_{PEN} = 55$ В. Следовательно, такие значения U_{PEN} не соответствуют

требованиям [27]. При этом, согласно [23] при $U_{\text{пр.}} = 77 \text{ В}$, сопротивление тела человека составляет $R_h = 1200 \text{ Ом}$ и при $U_{\text{пр.}} = 55 \text{ В}$ – 1500 Ом , а токи через тело человека будут равны $I_h = 64 \text{ мА}$ и $I_h = 37 \text{ мА}$ соответственно, что существенно превышает значения порогового неотпускающего тока [23, 67, 121].

Проводимости растений: деревьев и кустарников рассматриваются в [3, 146, 154], согласно которым при положительных температурах сопротивление веток деревьев составляет около $1 - 35 \text{ МОм}$ на 1 м длины веток. При отрицательных температурах сопротивление веток увеличивается до $100 - 500 \text{ МОм/м}$. Сопротивление корневой системы деревьев и кустарников составляю $30 - 40 \text{ кОм}$.

В [154] приводится следующее распределение полных сопротивлений деревьев (рисунок 1.6), с сопротивлениями 6 кОм/м вблизи основания дерева и растёт до 80 кОм/м вблизи верхней части дерева. Общее сопротивление этого дерева было 320 кОм .

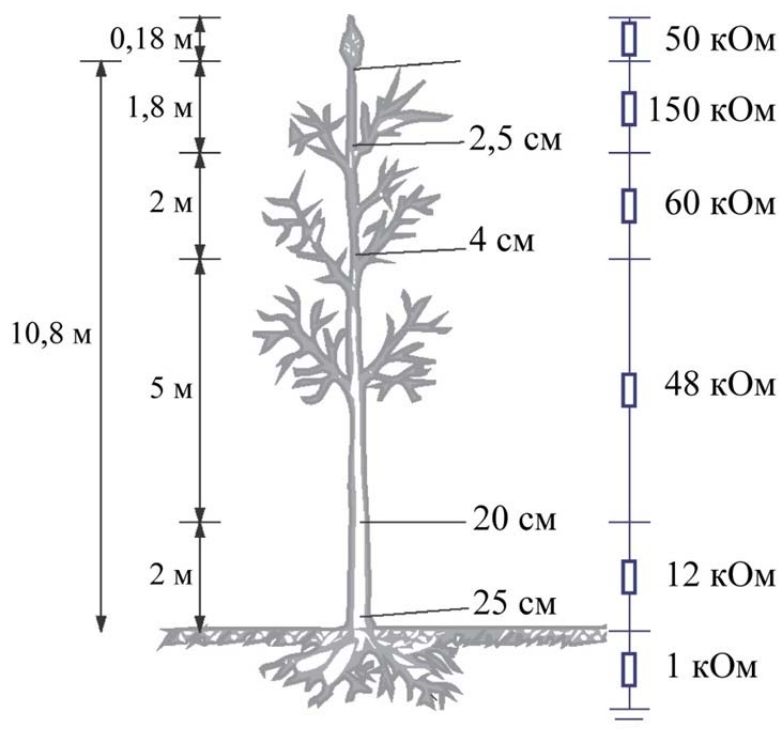


Рисунок 1.6 – Распределение полного сопротивления дерева [154]

Удельное электрическое сопротивление (УЭС) элементов лесного биогеоценоза (основные лесообразующие породы: лиственница, сосна (100–150 лет), кедр (около 200 лет), ель (150 лет), береза (120 лет)) Тункинской котловины

пос. Аршан (Республика Бурятия) приведенные в [43], где: травяной покров, мхи, муравейник, подстилка, основание ствола деревьев – около 0 Ом·м; ствол деревьев (сосна, береза, кедр, ель) – 200–450 Ом·м; почвенные горизонты – 0–180 Ом·м; песчаные и супесчаные аллювиальные горизонты – 300–450 Ом·м. у основания деревьев УЭС равно 0. Причем УЭС стволов сосны, кедра, ели зависит от экспозиции склона: на северной стороне оно всегда ниже, чем на южной. Вероятно, это связано с более высокой влажностью, обусловленной растущими на северной части ствола мхами и лишайниками. Здесь же [43] отмечается, что сухие опорные корни и пни срубленных деревьев имеют УЭС выше 1000 (до 4000) Ом·м. Стволы живых деревьев обладают более низким УЭС (в пределах 300–400 Ом·м), что, безусловно, определяется их влажностью, током растворов внутри дерева, эпифитами, развитыми на поверхности стволов.

При нарушении непрерывности *PEN*-проводника и однофазном замыкании на корпус, отключение цепи питания не происходит. При этом величина напряжения *PEN*-проводника относительно земли (U_{PEN}) и подключенных к нему корпусов электроприемников за местом замыкания определяется значениями сопротивлений повторных и основного заземлителей.

При обрыве *PEN*-проводника и замыкании фазы на корпус, ожидаемый ток однофазного замыкания определяется по [84]:

$$I_3 = \frac{U_\phi}{R_0 + R_n}. \quad (1.12)$$

С учетом того, что нормативное значение R_n превышает R_0 в 2,5 раза, из выражения (1.12) получим [101]:

$$I_3 = \frac{U_\phi}{3,5R_0} \cong 0,28 \frac{U_\phi}{R_0}. \quad (1.13)$$

Подставляя нормируемые в [95] величины R_0 в формулу (1.13), найдем значения ожидаемого тока однофазного замыкания, и напряжения на *PEN*-проводнике относительно земли. Результаты расчета приведены в таблице 1.5.

Таблица 1.5 – Значения U_{PEN} при обрыве PEN -проводника и нормируемых значениях R_0 и R_n

$U_{\phi}, \text{В}$	380	220	127
$I_{\text{озз}}, \text{А}$	53,2	15,4	4,4
$U_{PEN}, \text{В}$	106,4	61,6	35,2

Из таблицы 1.5 видно, что значение ожидаемого тока однофазного замыкания, как правило, не приведет к отключению цепи питания, при этом величина напряжения на PEN -проводнике относительно земли превышает предельно допустимый уровень напряжения прикосновения [27], что позволяет утверждать о неэффективности защиты практически для любой электроустановки.

Необходимо также отметить, что относительно регламентируемых в [95] значений сопротивлений нейтрали источника питания и повторных заземлений у некоторых авторов существуют разные взгляды.

Так, например, в [89] В.Е. Покрепа, учитывая эффективность срабатывания защиты на подстанциях, высокую квалификацию персонала, обслуживающего электроустановки с применением защитных средств, предлагает увеличить нормируемое значение сопротивления заземления нейтрали трансформатора с 4 до 10 Ом. К такому мнению, склоняются и другие авторы [18].

В работах [65, 66] указывается, что значительное снижение напряжения прикосновения при возникновении короткого замыкания достигается повторным заземлением корпусов всех электроприемников с сопротивлением 10 Ом и ниже.

Приведенный выше материал показывает, что зануление уже не соответствует современному уровню электрификации страны и нуждается в принципиальной переработке или замене более современными методами защиты [121].

Однако учитывая применяемость этой меры защиты, необходимо знать способы и средства контроля параметров схемы зануления.

1.3 Контроль параметров схемы зануления

Контроль параметров элементов зануления предусматривает периодические измерения сопротивления цепи «фаза–нуль» (или тока однофазного короткого замыкания) и сопротивлений ответвлений от магистрали нулевого защитного проводника к отдельным зануляемым электроприемникам, а также периодические осмотры этих ответвлений [148].

Кроме того, применяются устройства непрерывного контроля целостности *PEN*-проводников [1, 85, 109, 127, 136].

Согласно [93–94], внешний осмотр и контроль параметров схемы зануления производится перед сдачей в эксплуатацию объектов, а также после капитальных ремонтов проводки или электроприемников.

При внешнем осмотре выборочно проверяют состояние элементов, находящихся в грунте (с предварительной раскопкой). Остальные элементы проверяются в пределах, доступных осмотру. Между зануленными корпусами электроустановок и заземляющими устройствами должна быть надежная связь, не должно быть обрывов и неудовлетворительных контактов [84].

Надежное отключение поврежденного участка и тем самым эффективность зануления как защитной меры зависит от возможности обеспечивать ток замыкания, необходимый для срабатывания защиты, с учетом необходимого запаса [6].

Для определения искомого тока однофазного короткого замыкания ($I_{\text{окз}}$) необходимо измерять полное сопротивление цепи однофазного замыкания на корпус или петли «фаза–нуль». Измерения можно осуществить несколькими способами [55].

1.3.1 Измерение полного сопротивления петли фаза–нулевой защитный проводник

Способ амперметра–вольтметра. Данный способ применяется при отключенном состоянии испытуемого оборудования. Измерение производится на

переменном токе пониженного напряжения от трансформатора достаточной мощности [22, 121]. Для измерения собирается схема (рисунок 1.7), затем делается искусственное замыкание одного из фазных проводов на корпус электрооборудования. После подачи напряжения в измерительную цепь измеряются ток I и напряжение U . Значение тока должно составлять 10... 20 А.

Сопротивление цепи фаза–нулевой защитный проводник определяется по формуле [55]:

$$Z_{\Pi} = U/I . \quad (1.14)$$

Ток однофазного короткого замыкания $I_{\text{окз}}$ определяется по формуле:

$$I_{\text{окз}} = U_{\phi}/Z_{\Pi} , \quad (1.15)$$

где U_{ϕ} – фазное напряжение сети, В.

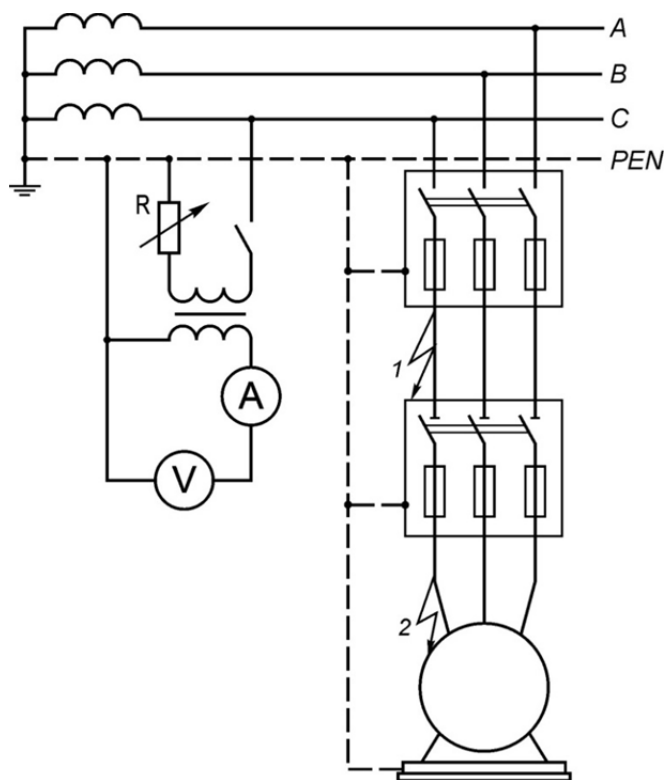


Рисунок 1.7 – Схема измерения сопротивления цепи фаза-нуль методом амперметра-вольтметра: 1; 2 – точки заземления для проверки состояния предохранителей

Определение полного сопротивления петли фаза–нулевой защитный проводник способом измерения падения напряжения. Данный метод рекомендуется в ГОСТ Р 50571.16-99 [30] для измерения сопротивления петли «фаза-нуль» для системы *TN*. Принцип измерения сопротивления петли «фаза-нуль» данного метода показан на рисунке 1.8.

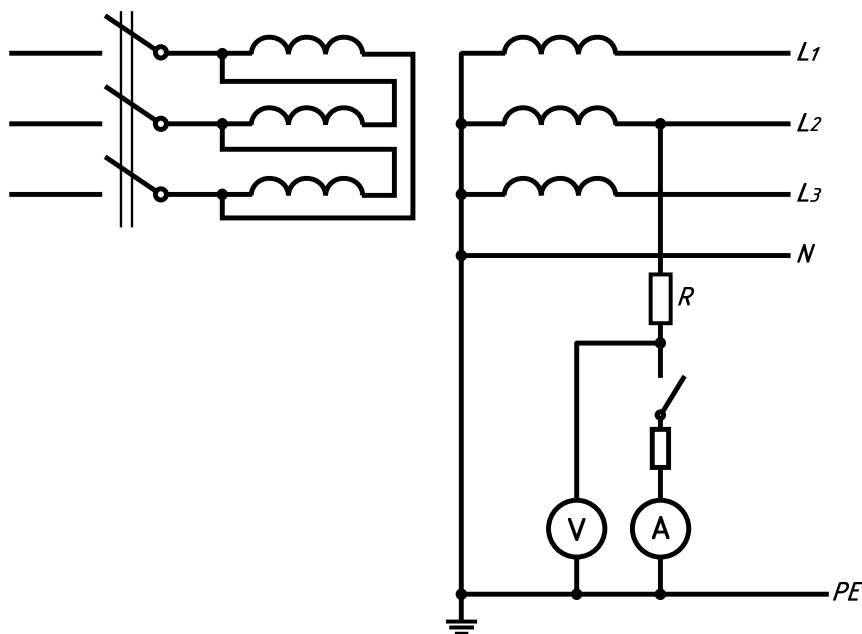


Рисунок 1.8 – Схема определения сопротивления цепи «фаза-нуль» методом измерения падения напряжения

Напряжение в испытываемой цепи измеряется с включенным и отключенным сопротивлением нагрузки, а сопротивление петли «фаза-нуль» рассчитывается по формуле [30]:

$$Z = \frac{U_1 - U_2}{I_R}, \quad (1.16)$$

где Z – полное сопротивление петли «фаза-нуль», Ом;

U_1 – напряжение, измеренное при отключенном сопротивлении нагрузки, В;

U_2 – напряжение, измеренное при включенном сопротивлении нагрузки, В;

I_R – ток, протекающий через сопротивление нагрузки, А.

Измерение сопротивления петли фаза–нулевой защитный проводник прибором ИФН – 200. Прибор ИФН-200, разработанный компанией «Радио-Сервис» Россия, предлагается в качестве замены приборов М417, Щ41160, ЭК0200, ЕР-180 и аналогичных [98]. Внешний вид прибора представлен на рисунке 1.9 [45].

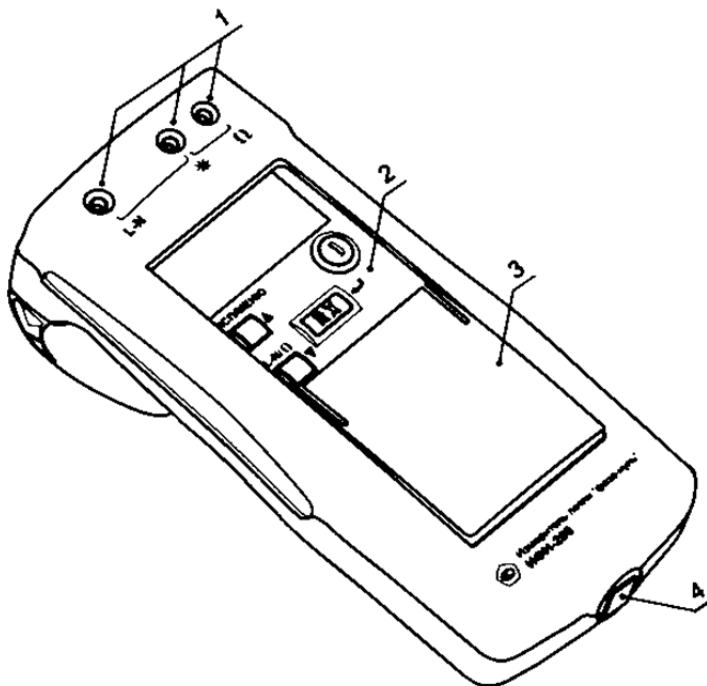


Рисунок 1.9 – Внешний вид прибора ИФН-200:

- 1 – гнезда для подключения измерительных кабелей; 2 – передняя панель;
3 – защитная крышка; 4 – гнездо для подключения блока питания

Прибор ИФН - 200 использует метод измерения падения напряжения на эталонном резисторе [30], позволяющий снизить тестирующие токи, избежать ложных срабатываний устройств защиты от перегрузки и мощных электромагнитных импульсов, которые могут стать причиной сбоя в работе оборудования, подключенного к испытываемой сети, тем самым позволяющий отказаться от теплонагруженных элементов и снизить вес прибора.

Измерение параметров петли «фаза-нуль» осуществляется нажатием кнопки «L-N/ Ω /▼». При этом на индикаторе прибора отображается символ «L-N». Кабели измерительные должны быть соединены с прибором через гнезда «* » и

«L-N» (рисунок 1.9). Свободные концы измерительных кабелей подключаются к исследуемой цепи «фаза – нуль», параметры которой подлежат определению (рисунок 1.10).

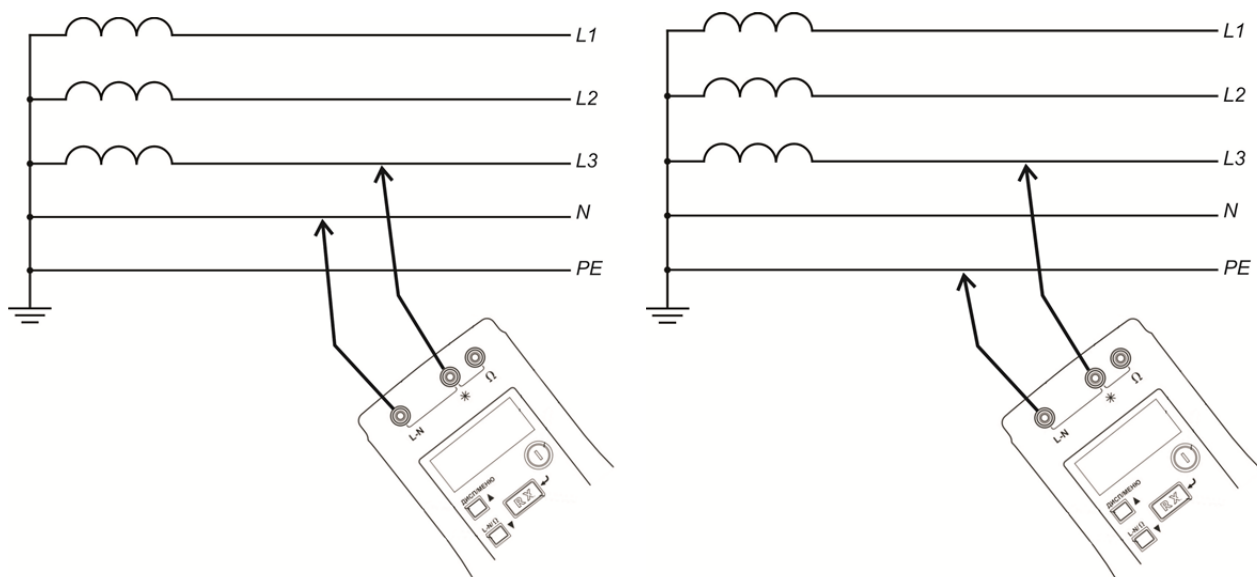


Рисунок 1.10 – Схема подключения. Кнопки управления прибора ИФН-200

Для проведения измерения следует нажать кнопку «Rx/↵». Прибор производит проверку целостности цепи петли «фаза-нуль» малым током, не допуская работу с цепями сопротивлением более 1 кОм (о чем свидетельствует сообщение «Цепь повреждена!» на индикаторе прибора), после чего осуществляет измерение.

Ниже приведены основные технические характеристики ИФН-200:

Измерение полного, активного и реактивного сопротивлений петли «фаза-нуль»	0,01-200 Ом
Погрешность	3%
Вычисление тока короткого замыкания	До 22 кА
Максимальный измерительный ток в цепи	25А
Вычисление угла между напряжением и током при коротком замыкании	0-60 °
Измерение сопротивления постоянному току	0,01-999 Ом

Измерение напряжения	30-280В
Рабочая температура	–15 °С до +55 °С
Питание	Аккумулятор 12В или сеть 220В/50Гц

Измерение сопротивления петли фаза-нулевой защитный проводник устройством «Вектор». Для осуществления измерений полного сопротивления петли «фаза-нуль» Московский институт энергобезопасности и энергосбережения совместно с Научно-исследовательским испытательным центром «Радиофизические Тестовые Технологии» разработали и запустили в производство новый цифровой малогабаритный прибор «Вектор» [135].

Прибор «Вектор» (рисунок 1.11) предназначен для измерения параметров электрической сети при проведении различных видов испытаний установок. Принцип его работы основан на поочередной нагрузке исследуемой сети двумя эталонными сопротивлениями: активным и реактивным (емкостным).

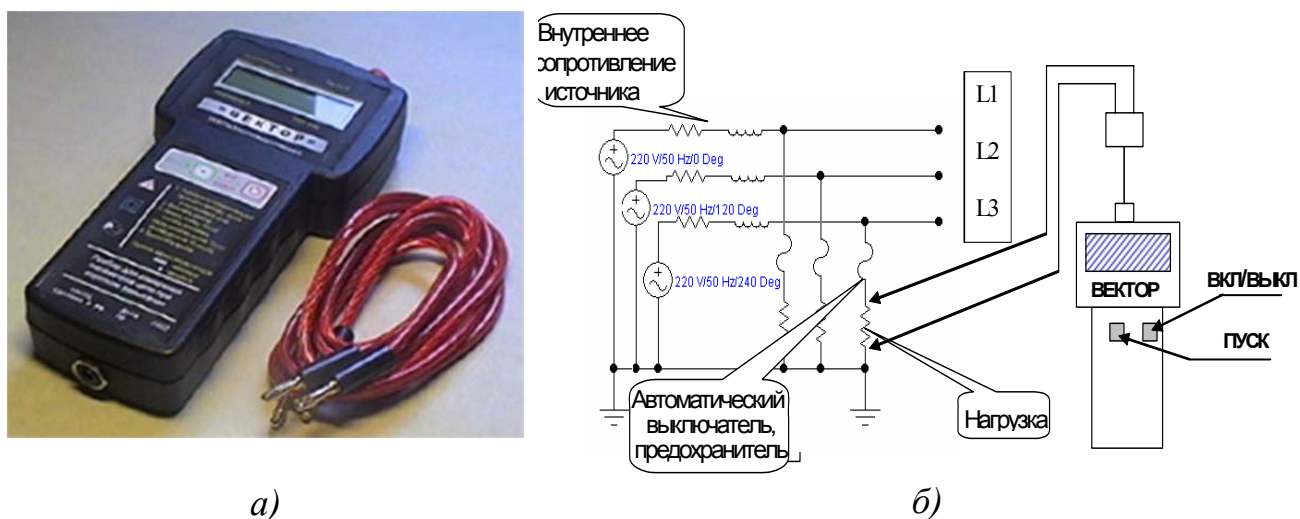


Рисунок 1.11 – Прибор для измерения параметров электрической сети «Вектор»:

а – внешний вид прибора; *б* – схема подключения, кнопки управления прибором

Потери напряжения при этих нагрузках пропорциональны активной и реактивной составляющим полного сопротивления измеряемой цепи. Далее

микропроцессором вычисляется полное сопротивление петли фаза-нуль и другие параметры сети [97, 135].

Технические характеристики прибора «Вектор» приведены ниже:

Пределы измерения напряжения переменного тока, В	120 – 250
Диапазон измерений тока, А	44 – 3100
Диапазон измерений разности фаз между током и напряжением, град.....	0 – 85
Тестирующий ток, А	10 – 20
Пределы измерения модуля комплексного сопротивления, Ом	0,07 – 5
Основная погрешность измерения модуля комплексного сопротивления, %	± 5

Измерение сопротивления петли фаза–нулевой защитный проводник прибором типа ЦК0220. Измеритель параметров цепи фаза-нуль ЦК 0220 предназначен для измерения силы тока короткого замыкания, полного электрического сопротивления, напряжения цепи фаза-нуль в сетях переменного тока 220 В, частотой 50 Гц с глухозаземленной нейтралью. Устройство изготовлено предприятием ПАО «Уманский завод «Мегаомметр», Украина [44].

В основу работы измерителя положен принцип аналого-цифрового преобразования напряжения, падающего на шунте измерителя, и угла сдвига фаз между током к.з. и напряжением сети, в значение силы тока к.з. и полного электрического сопротивления цепи фаза-нуль.

Структурная схема приведена на рисунке 1.12.

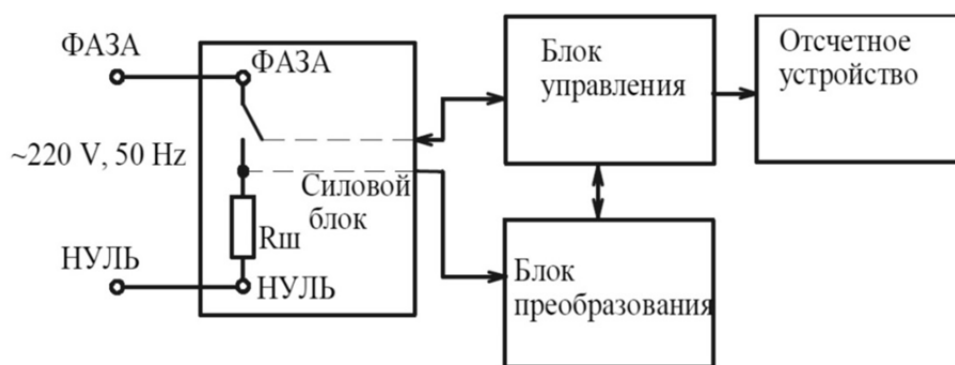


Рисунок 1.12 – Структурная схема измерителя ЦК0220

Измерение проводится в два такта [44]:

- первый такт определяет угол сдвига фаз между током и напряжением во время к.з.;
- второй такт измеряет напряжение, падающее на шунте измерителя, пропорциональное силе тока к.з.

Далее, микроконтроллер, управляя работой измерителя, обрабатывает полученные данные и представляет их в буквенно–цифровом виде на отсчетном устройстве.

Схема подключения измерителя к испытываемому объекту изображена на рисунке 1.13 [44].

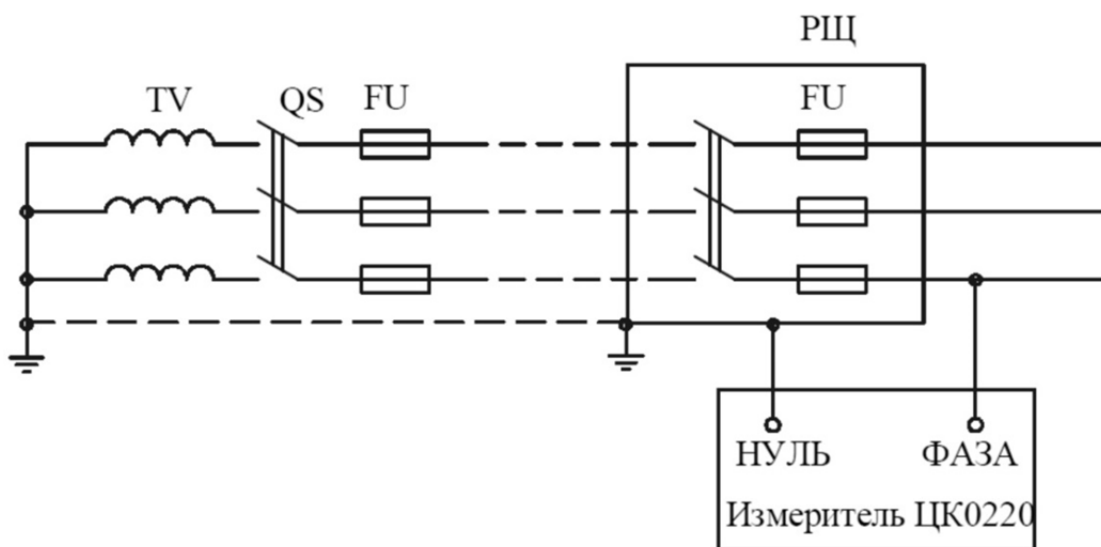


Рисунок 1.13 – Схема подключения измерителя к объекту измерения:

TV – трансформатор напряжения; *QS* –трехполюсный разъединитель;

FU – плавкие предохранители; *РЩ* – силовой распределительный щит

Измерения производится нажатием кнопки ИЗМЕРЕНИЕ на передней панели прибора. На отсчетном устройстве высвечивается информация «ВНИМАНИЕ! ИДЕТ ИЗМЕРЕНИЕ» и подается звуковой сигнал. По истечении 1,5 сек. на отсчетном устройстве высвечивается результат измерений: $I_{кз}$, Z , φ или U , R , X в зависимости от того, по какой высвечиваемой информации было произведено измерение.

Технические характеристики измерителя ЦК0220:

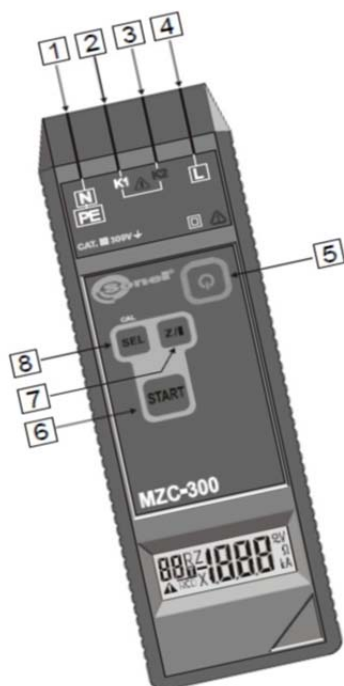
Измерение полного, активного и реактивного сопротивлений петли «фаза-нуль»	0,022 – 22 Ом
Погрешность	± 5%
Вычисление тока короткого замыкания	до 10 кА
Вычисление угла между напряжением и током при коротком замыкании	0-60 °
Измерение напряжения	180 – 245 V
Рабочая температура	– 10 °C до + 40 °C
Питание	Питание измерителя осуществляется от измеряемой сети

Измерение сопротивления петли фаза–нулевой защитный проводник устройством MZC-300 [149]. Компания SONEL S.A. (Польша) предлагает цифровой измеритель параметров цепей электропитания семейства MZC-300, предназначенный для измерения полного сопротивления петли короткого замыкания, сопротивления заземления и напряжения переменного тока в цепях «фаза-нуль».

В приборах семейства MZC-300 применен метод измерения полного сопротивления петли короткого замыкания путём «искусственного короткого замыкания» испытуемой цепи через резистор ($R_{огр.}=10$ Ом), ограничивающий величину измерительного тока. Напряжение на гнездах прибора измеряется непосредственно перед протеканием и в процессе протекания измерительного тока, с учётом векторной структуры напряжения и тока. Время протекания измерительного тока составляет 30 мс.

Далее, процессор вычисляет полное сопротивление петли короткого замыкания, выделяет его активную и реактивную компоненты, а также фазный угол, который возникнет в испытуемой цепи в случае короткого замыкания [149].

На рисунке 1.14 приведен внешний вид измерителя.



- 1 – измерительное гнездо N / PE
- 2 – измерительное гнездо K1
- 3 – измерительное гнездо K2
- 4 – измерительное гнездо L
- 5 – клавиша Вкл. / выкл. прибора
- 6 – клавиша **START**
- 7 – клавиша **Z/I**
- 8 – клавиша **SEL**

Рисунок 1.14 – внешний вид измерителя MZC-300

Результат измерения можно отобразить в виде полного сопротивления петли короткого замыкания или ожидаемого тока короткого замыкания. Нажатие клавиши **Z/I** (1, рисунок 1.14) во время отображения одной из этих величин переводит прибор на отображение другой. Прибор всегда измеряет полное сопротивление, а отображаемый на дисплее ожидаемый ток короткого замыкания вычисляется по формуле:

$$I_k = \frac{U_\phi}{Z_s}, \quad (1.17)$$

где $U_\phi = 220 \text{ В}$ – напряжение исследуемой сети;

Z_s – измеренное полное сопротивление.

Измеритель MZC-300 необходимо подключать к тестируемой цепи в соответствии с рисунками 1.15 и 1.16 [149].

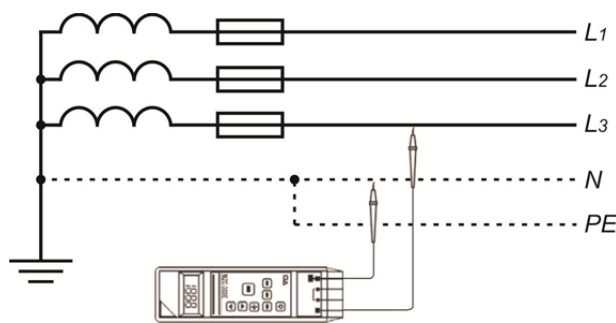
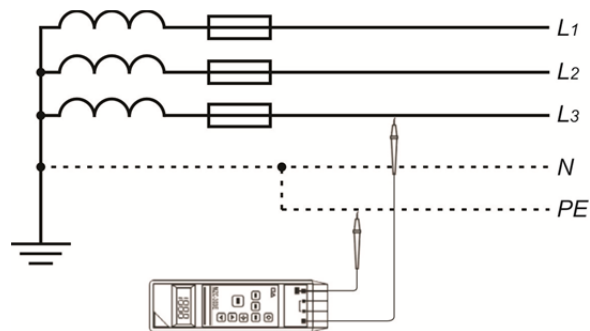
Измерение в рабочей цепи ($L - N$)Измерение в защитной цепи ($L - PE$)

Рисунок 1.15 – Измерение параметров петли «фаза-нуль»

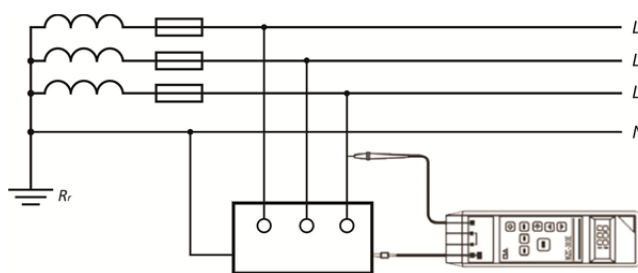
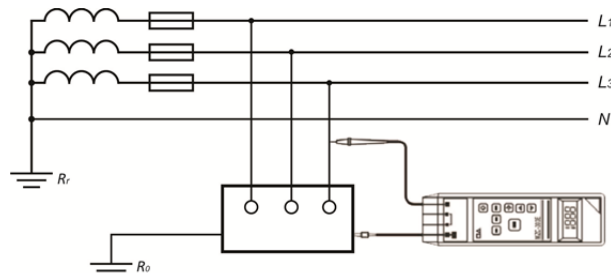
сети TN (с занулением)сети TT (с защитным заземлением)

Рисунок 1.16 – Тестирование эффективности защиты корпуса электроустановки

Следует обратить внимание на правильный подбор измерительных наконечников, так как точность выполняемых измерений во многом зависит от качества выполненных подключений.

Существуют и несколько других способов и схем измерения сопротивления цепи «фаза-нуль» PEN -проводника.

Однако, все эти приборы осуществляют периодический контроль состояния параметров системы зануления, что не позволяет оперативно реагировать на наличие обрыва нулевого проводника и возникновение электроопасной ситуации [3]. Недостатком является и то, что при измерении сопротивления петли «фаза-нуль» невозможно точно определить, чем вызвано увеличение суммарного сопротивления цепи «фаза-нуль»: обрывом PEN -провода или недопустимым увеличением сопротивлений фазных и нулевых проводников.

1.3.2 Устройства автоматического контроля исправности цепи зануления

Метод контроля непрерывности нулевого провода сравнением коэффициента несимметрии фазных напряжений

Данный метод используется в устройстве защиты многофазной воздушной линии от последствий обрыва нулевого провода, предлагаемый в [136].

Согласно [136], устройство присоединяется к проводам в конце защищаемой линии электропередачи и содержит выявитель обрыва нулевого провода – 1 и связанный с выявителем исполнительный орган – 2. В свою очередь, исполнительный орган – 2 состоит из защелкивающего механизма и катушки – 3 и короткозамыкателя с силовым контактом – 4.

Схема устройства изображена на рисунке 1.17.

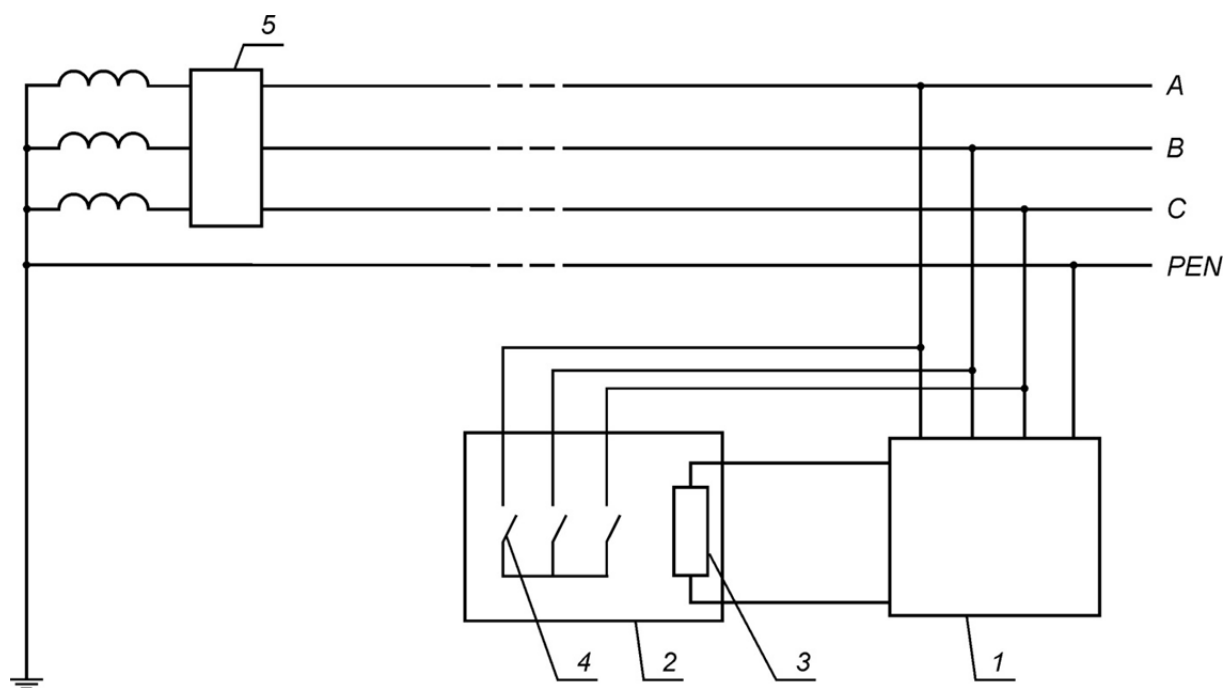


Рисунок 1.17 – Функциональная схема устройства защиты многофазной воздушной линии от последствий обрыва нулевого провода

При превышении коэффициентом несимметрии значения, нормируемого [28], выявитель обрыва нулевого провода 1 замыкает контакт катушки 3 и короткозамыкателя 4, что вызовет срабатывание аппарата защиты 5 и отключает защищаемую линию.

Недостатком данного метода является применение короткозамыкателя, поскольку в случае срабатывания устройства по линиям протекает ток короткого замыкания.

Метод контроля непрерывности нулевого провода сравнением тока в заземлении нейтрали трансформатора и тока в нулевом проводе

Данный метод разрабатывался в Южно-Уральском государственном университете. Обоснование и его исследования в различных режимах приведено в работе [1].

Структурная схема устройства приведена на рисунке 1.18.

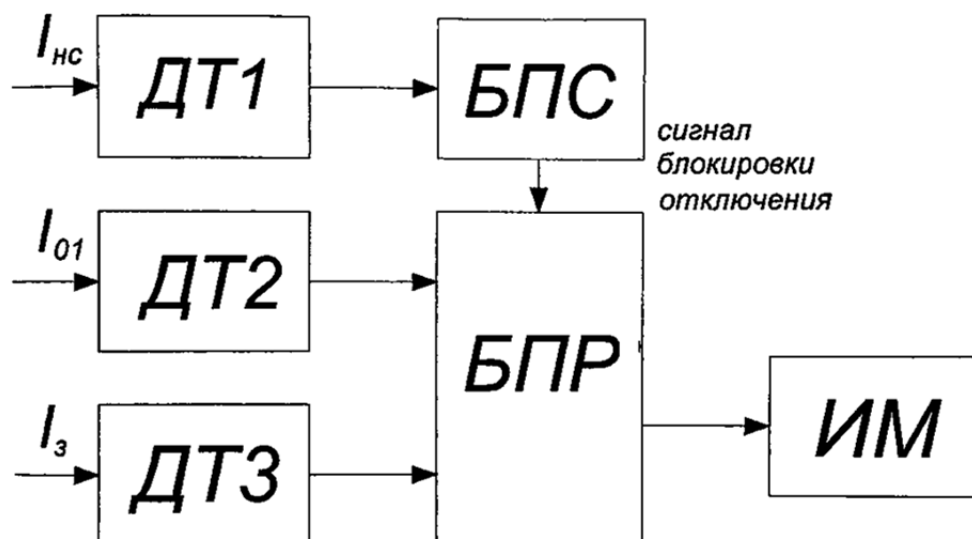


Рисунок 1.18 – Структурная схема устройства контроля непрерывности нулевого проводника в сети 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью:

ДТ1 – датчик тока несимметрии нагрузки линии;

ДТ2 – датчик тока в нулевом проводе в начале линии;

ДТ3 – датчик тока в заземлении нейтрали питающего трансформатора;

БПР – блок принятия решения об отключении;

БПС – блок проверки симметрии;

ИМ – исполнительный механизм, осуществляющий отключение

Устройство предлагается для использования на трансформаторных подстанциях (ТП), оборудованных автоматическими выключателями со стороны 0,4 кВ. Как известно, от одной ТП отходят несколько линий, питающих различные потребители. Поэтому, для обеспечения необходимой селективности действий защиты, устройства должны устанавливаться на каждой отходящей линии и тем самым, при обрыве нулевого проводника на одной отходящей линии отключить именно эту линию, оставив в рабочем состоянии неповрежденные линии.

Работа устройства основана на принципе сравнения тока I_{01} в нулевом проводе в начале линии и тока I_3 в заземлении нейтрали питающего трансформатора. В нормальном режиме работы, любое распределение нагрузки между линиями сети создает следующее соотношение токов $I_{01} > I_3$. Следовательно, при нарушении непрерывности нулевого провода соотношение $I_{01} > I_3$ нарушается, что и используется для обнаружения возникновения аварии и выработки сигнала, который передается на исполнительный механизм (ИМ), отключающий неисправную линию.

Недостатком данного способа является его малая зона контроля, так, как оно надежно работает при длине линии до 500 метров. Однако, как известно, в сельской местности длина линии может достигать порядка 1,5 – 2 км. В этом случае указанный способ, как правило не контролирует непрерывность нулевого провода.

Импульсный метод контроля непрерывности нулевого провода

Описание устройства и принцип его работы приводятся в [127].

Применение дискретного контроля, основанного на импульсном пропускании контрольного тока, позволяет использовать в схеме устройства контроля параметров заземляющей цепи электроустановок емкостные элементы, которые более надежны и одновременно способствуют компенсации реактивной мощности. При этом не допускается превышение периода следования импульсной посылки более 200 мс. Становится возможным использование

кодовых комбинации импульсов и, таким образом, осуществить одновременный контроль целостности каждой заземляющей цепи нескольких электроприемников.

На этой основе могут осуществляться два варианта контроля. В одной – генератор импульсов определенной кодовой комбинации установлен на передвижной электроустановке и через конденсаторы подключен к сети, а вторым концом – к корпусу установки. Приемник импульсов совместно с дешифратором (микропроцессорный) получает сигнал с трансформатора напряжения питающей сети. Здесь выявляются кодовые посылки каждой из контролируемых электроустановок и по их наличию формируется вывод о целостности заземляющей цепи. Средняя величина напряжения импульсов дает возможность судить о сопротивлении заземления, которое в данном случае образуется параллельно соединенными сопротивлениями r_3 проводников цепи заземления и сопротивлением самозаземления электроустановки – r_{c3} .

При втором варианте – один общий генератор импульсов подключается на питающей подстанции, а на каждой электроустановке, подлежащей контролю, с помощью трансформатора напряжения выявляется прохождение по каналу нулевой последовательности заданной кодовой комбинации (относительно земли), которая будет свидетельствовать об исправности цепи заземления. Такая система не дает достоверно контролировать величину сопротивления заземляющей цепи, т. к. величина контрольного тока будет сильно зависеть от сопротивления самозаземления (r_{c3}) остальных электроприемников [127].

К недостаткам данного способа можно отнести [109]:

- прохождения импульсного тока через совокупность фазных проводов ухудшает качества электроэнергии в данной сети;
- контроль параметров нулевого провода по каждой защищаемой линии осуществляется через некоторые промежутки времени, длительность которых зависит от количества защищаемых линий, т. е. контроль осуществляется непостоянно.

**Метод контроля непрерывности нулевого провода, основанный
на пропускании высокочастотных импульсов генераторами
высокочастотных импульсов, установленными в нулевом проводе
в конце линии**

Предлагаемый способ [85, 132] автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных и кабельных линий 0,4 кВ осуществляется пропусканием высокочастотных импульсов через нулевой проводник и совокупность повторных заземлителей защищаемых линий, прием импульсов, их дешифрацию, регистрацию амплитуды импульсов и подачу сигнала на отключение защищаемой линии при значения амплитуды импульсов ниже определенной величины.

На рисунке 1.19 представлена структурная схема устройства постоянного автоматического контроля параметров нулевого провода ВЛ 0,4 кВ на основе пропускания высокочастотных импульсов для двух отходящих от трансформаторной подстанции линий, где 1 – силовой трансформатор; 2 – нагрузки потребителей; 3 – автоматические выключатели линий, отходящих от подстанции; 4 – контур заземления подстанции с $R_z = 4 \text{ Ом}$; 5 – повторные заземлители воздушных или кабельных линий – $R_n = 30 \text{ Ом}$; 6 – сопротивление нулевых проводников отходящих линий; 7 – блоки передачи импульсов соответствующих линий; 8 – блок приема импульсов; 9 – частотные фильтры; 10 – дешифраторы; 11 – исполнительные механизмы автоматических выключателей защищаемых линий.

Согласно предложенному способу, постоянный прием и передача импульсов позволяет осуществлять непрерывный автоматический контроль параметров нулевого проводника и одновременно реализовать селективную защиту линий 0,4 кВ от последствий обрыва нулевого провода или увеличения величины сопротивления системы «нулевой провод – земля».

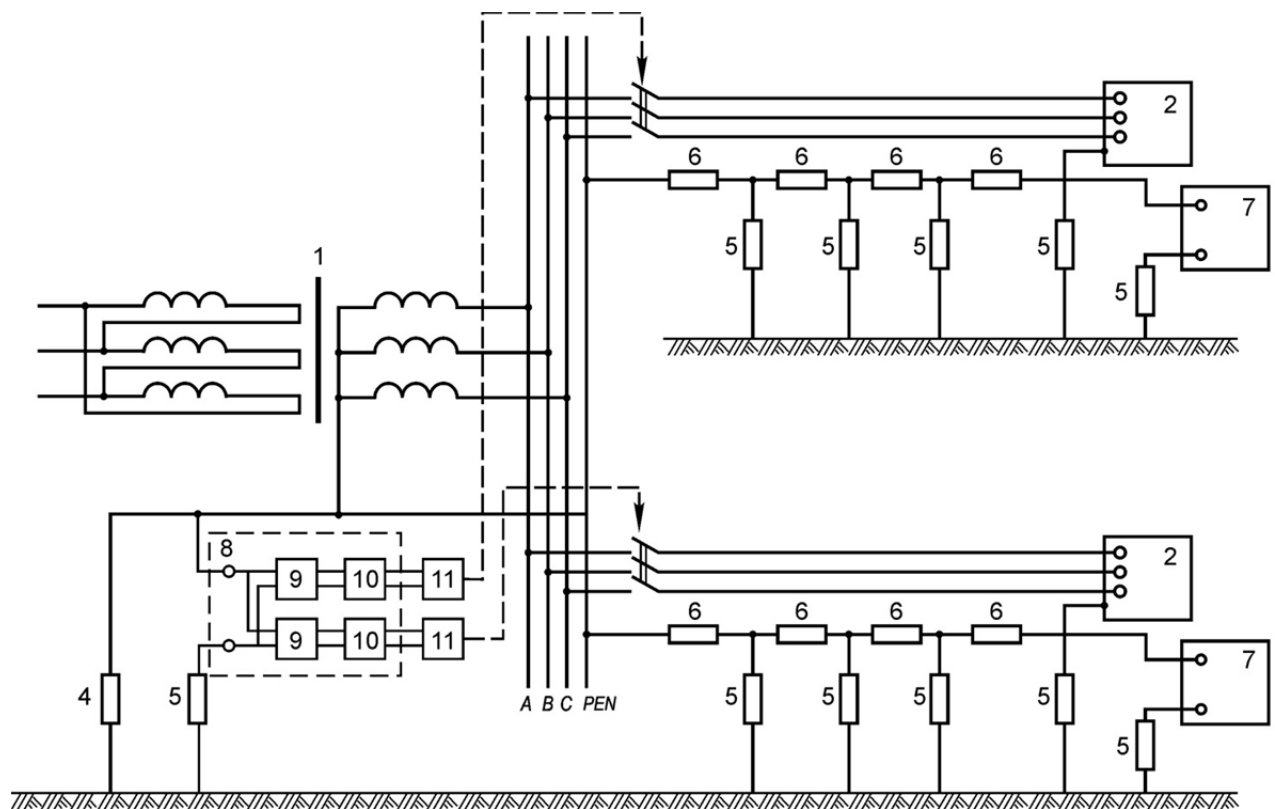


Рисунок 1.19 – Схема замещения контролируемого участка сети с блоками устройства [132]

На основе этого способа в [133] предлагается новое, более совершенное, устройство дискретного контроля непрерывности *PEN*-проводника с использованием цифровой техники. Предлагаемое КУ *PEN*-проводника выполнено на микросхемах КМОП серии К564 и в нем применено широтно-импульсное (ШИ) кодирование номеров. Применение ШИ кодирования номеров снижает уровень емкостных помех, возникающих от импульсов передаваемых по другим проводам, и способствует увеличению «дальности» действия устройства, позволяя применять его на протяженных линиях сети 0,4 кВ.

Однако, и этот метод не лишен недостатков, которые заключаются в следующем:

- за счет пропуска высокочастотных импульсов по нулевому проводу и совокупности повторных заземлений качество электроэнергии в данной сети ухудшается;
- при использовании данного способа необходима установка дополнительного фильтра, препятствующего попаданию высокочастотных импульсов в цепь нагрузки;
- высокая сложность и стоимость устройства.

Устройство автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,4 кВ с адаптивным свойством

Данное устройство предлагается в [109] и полностью работает на основе микропроцессора, что дает возможность реализовать функцию адаптивности устройства в зависимости от изменения величины входных сигналов. В зависимости от изменения сопротивления грунта устройство автоматически подстраивает уставки срабатывания. Такая способность устройства обеспечивает надежность при эксплуатации электрических сетей 0,4 кВ, и, тем самым, значительно повышает уровень электро- и пожаробезопасности за счет постоянного контроля, минимального времени автоматического определения аварийной ситуации, дополнительно оно определяет место обрыва нулевого проводника [109–110].

Функциональная схема данного устройства приведена на рисунке 1.20 [109].

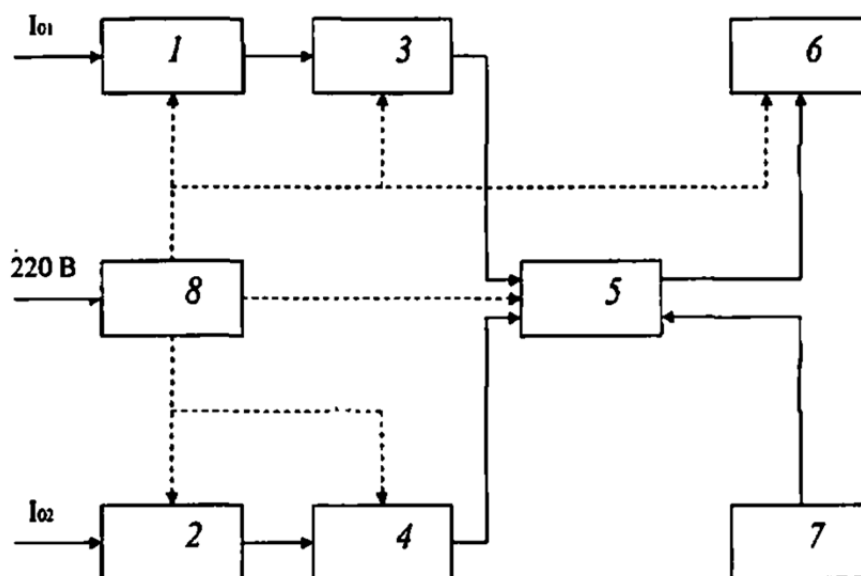


Рисунок 1.20 – Функциональная схема устройства автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,4 кВ:

- 1, 2 – аналоговые модули измерения действующего значения;
- 3, 4 – аналого-цифровые преобразователи;
- 5 – микроконтроллер;
- 6 – жидкокристаллический буквенно-цифровой индикатор;
- 7 – клавиатура; 8 – блок питания устройства

Устройство функционирует следующим образом [109]: аналоговые модули 1, 2 постоянно передают в аналого-цифровые преобразователи 3, 4 данные измерения токов в нулевом проводе в начале линии I_{01} и током в нулевом проводе за первым повторным заземлителем I_{02} . В свою очередь, цифровые сигналы с аналого-цифровых преобразователей 3, 4 непрерывно поступают на микроконтроллер 5. Микроконтроллер по значениям токов I_{01} , I_{02} определяет значение разности токов ΔI_0 и при превышении этой разностью минимально допустимого значения формирует сигнал на отключение линии и информационное сообщение о неисправности (величина уставки срабатывания для режимов «зима», «лето»; значение разности токов ΔI_0 ; зона, в которой поврежден нулевой провод), которое отобразится на жидкокристаллическом буквенно-цифровом индикаторе 6.

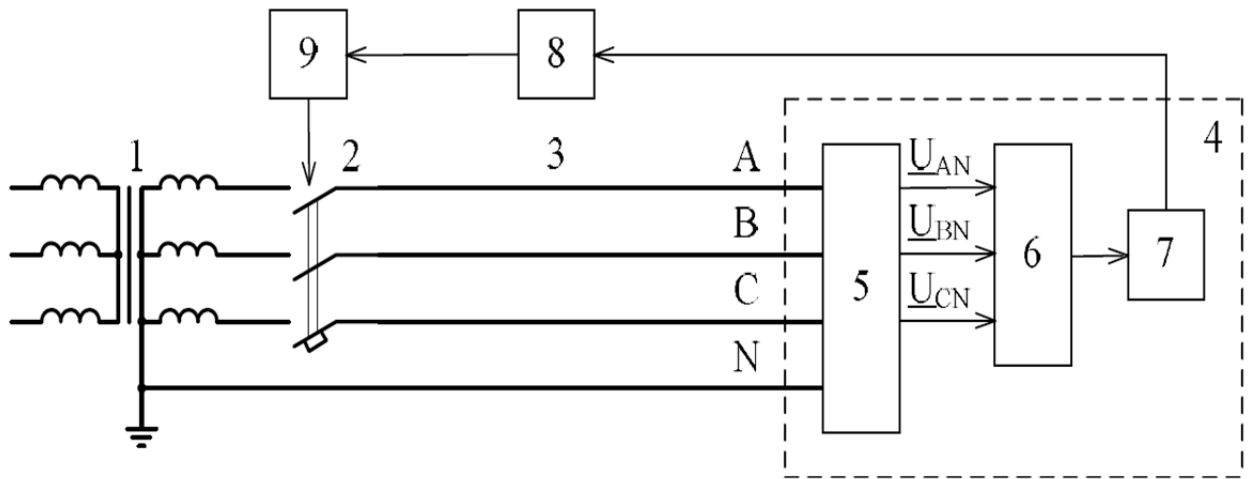
Однако, при обрыве нулевого провода разность токов $\Delta I_0 = I_{01} - I_{02}$ увеличивается и служит признаком возникновения аварийного режима электрической сети, что является недостатком данного устройство.

Система контроля обрыва фазных и нулевого проводов, основанная на применении микропроцессорного счетчика электроэнергии

На кафедре безопасности жизнедеятельности Южно-Уральского государственного университета разработана система для защиты электрических сетей при обрыве фазных и нулевого проводов на основе применения выпускаемого в России микропроцессорного счетчика электроэнергии с дополнением его логической части программой выявления обрывов фазных и нулевого проводов [71].

Существенной особенностью данной системы защиты является то, что в ней для выполнения микропроцессорным счетчиком функций защиты воздушной линии счетчик дополнен рядом функций, которые позволяют выявлять обрывы фазных и нулевого проводов воздушной линии, организовать формирование и передачу команды отключающего сигнала по *GSM*-каналу в трансформаторную подстанцию для отключения автоматического выключателя, установленного в начале воздушной линии.

На рисунке 1.21 представлена функциональная схема системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов воздушной линии электрической сети, основанная на применении микропроцессорного счетчика электроэнергии.



Рисунке 1.21 – функциональная схема системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов [71]:

1 – трансформаторная подстанция; 2 – автоматический выключатель;
3 – воздушная линия; 4 – микропроцессорный счётчик электрической энергии; 5 – блок измерения фазных напряжений относительно нулевого провода; 6 – блок дополнительных функций; 7 – блок формирования команды отключающего сигнала; 8 – канал передачи команды отключающего сигнала (например, по каналу сотового оператора связи GSM); 9 – исполнительный блок; U_{AN} , U_{BN} , U_{CN} – фазное напряжение электрической сети относительно нулевого провода

Проведенный анализ литературных источников по способам и устройствам контроля параметров системы зануления показал, что в настоящее время существуют различные способы и устройства контроля параметров схемы зануления. Все существующие способы, в основном, либо определяют электрические параметры фазных и нулевого проводов, или же осуществляют контроль непрерывности последних.

Не смотря на все особенности и преимущества представленных систем контроля параметров схемы зануления, у них имеются, как это приведено выше, и недостатки.

1.4 Задачи исследования

Выполненный в данной главе анализ показал, что не смотря на длительный период эксплуатации системы зануления как защитной меры в электрических сетях напряжением до 1000 В и накопленный при этом опыт, вопросы, связанные с эффективностью этой системы не решены в полном объеме.

Учитывая широкое применение зануления в электрических сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью и обусловленное этим взаимодействие с зануленным оборудованием, как правило, неэлектротехнического персонала, предлагается для повышения уровня электробезопасности решить следующие задачи:

1. Разработать компьютерную модель электрической сети напряжением до 1000 В, позволяющую проводить анализ влияния параметров заземления нейтрали и повторных заземлений на условия электробезопасности.

2. При помощи компьютерной модели провести оценку условий электробезопасности системы зануления.

3. На основе полученных на компьютерной модели результатов определить рациональные значения соотношений величин R_0 , R_{Π} и $R_{\text{зм}}$ с точки зрения обеспечения приемлемых условий электробезопасности.

4. Провести оценку изменения уровня электробезопасности в сетях напряжением до 1000 В с учетом предлагаемых значений соотношений R_0 , R_{Π} и $R_{\text{зм}}$.

2 ИССЛЕДОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ СХЕМЫ ЗАНУЛЕНИЯ НА УСЛОВИЯ ЭЛЕКТРОБЕЗОПАСНОСТИ

Условия электробезопасности – это совокупность факторов, определяющих безопасную и безвредную для человека эксплуатацию электроустановок [124].

Исследование условий электробезопасности сводится к определению значения тока, протекающего через тело человека в тех или иных условиях, в которых может оказаться человек при эксплуатации электрических установок. При анализе условий электробезопасности ставится задача по оценке влияния различных факторов и параметров сети на опасность поражения человека электрическим током [84].

2.1 Методы исследования условий электробезопасности

Анализ работ [23, 25, 33, 39–41, 47, 67–68, 73, 75–79, 82, 84, 99, 124, 131, 139–140, 148 и др.] позволил разделить существующие методы исследования условий электробезопасности на: статистический, аналитический, экспериментальный и логико – вероятностный (рисунок 2.1).

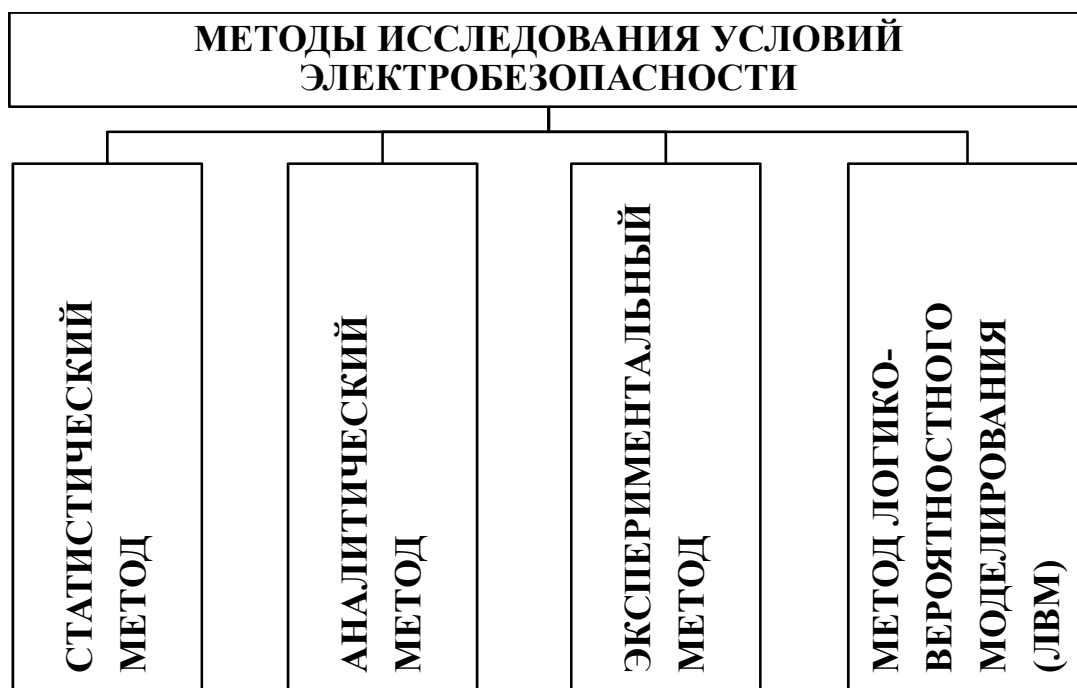


Рисунок 2.1 – Основные методы исследования условий электробезопасности

Статистический метод исследования условий электробезопасности представляет собой сбор и анализ данных о поражениях, вызванных электрическим током, способствующий выявлению очагов травматизма и разработке целенаправленных профилактических мероприятий.

Анализ производственного электротравматизма основывается на сборе материалов расследования несчастных случаев за изучаемый период времени, обработке полученных материалов и их анализе. Достоверность выводов статистического анализа зависит от количества изученных электротравм [23].

По мнению проф. В.Е. Манойлова [67], учет и анализ электротравм представляет собой одно из основных направлений эффективного развития электробезопасности.

При статистической оценке условий электробезопасности можно установить место возникновения электропоражений, вид работы, выполняемой в момент возникновения травмы, влияние времени суток, факторов окружающей среды и т. д. [148]. К работам, содержащим результаты такой оценки, можно отнести, например, [23, 67].

В [26, 145] приводится описание систем учета электротравм с помощью специальных бланков – карточек. Дальнейшая обработка производится либо вручную [145], либо на ЭВМ [26]. Обе эти формы учета позволяют строить таблицы для анализа по одному входному параметру. Построение же таблиц для анализа по нескольким параметрам, например, по месту возникновения электропоражений, по квалификационным группам пострадавших и т. д., как отмечается в [124], вызывает большие временные затраты или значительные трудности, например, трудно установить тип оборудования, на котором имели место несчастные случаи.

Для улучшения качества анализа электротравматизма и сокращения временных затрат рядом авторов предлагается применение информационно-поисковых систем [78, 122, 124].

Однако в [67] отмечается, что, не смотря на огромные материалы учета электротравм, многие важные обстоятельства в них остаются без ответа,

освещение которых могло бы способствовать более глубокому изучению механизма электропоражения, например, приложенное напряжение, вызвавшее электротравму, род и значение тока, продолжительность его прохождения через тело пострадавшего.

Достоинством статистического метода является простота математических расчетов.

Недостаток статистического метода – необходимость большого количества исходных данных, чем больше массив статистических данных, тем достовернее выводы.

Аналитический метод. При аналитическом исследовании условий электробезопасности приводится математическое описание процессов, происходящих в исследуемой системе.

Известно, что опасность электропоражения определяется значением тока, проходящим через тело человека. Однако это сложная задача, поскольку человек может иметь контакт с различными элементами электроустановки, напряжение между которыми зависит от ее параметров, условий и режима работы [99].

Основные виды поражения (схемы включения) человека в электроустановках, согласно [47, 84] следующие:

- двухфазное прикосновение;
- однофазное прикосновение;
- прикосновение к открытым проводящим частям электроустановок, оказавшимся под напряжением в результате повреждения изоляции;
- включение под напряжением шага.

Математические зависимости происходящих процессов во время возникновения вышеприведенных условий электропоражения приводятся во многих широко известных работах, таких как [23, 33, 40, 139, 67, 73, 84, 99, 148 и др.].

Некоторые выражения для определения значений тока, проходящего через тело человека при различных случаях прикосновения его к электроустановкам, приводятся в таблице 2.1 [73].

Таблица 2.1 – Выражения для определения значения тока, проходящего через тело человека при соприкосновении с электроустановкой [73]

№	Режим нейтрали электрической сети	Характер прикосновения	Состояние изоляции фаз электрической сети	Формулы для расчета тока, протекающего через тело человека при прикосновении к одной из фаз
1.	Сети с изолированной нейтралью	Прикосновение к фазе А в исправной электроустановке	$R_A \neq R_B \neq R_C$ $C_A \neq C_B \neq C_A$	$\underline{I}_h = \underline{U}_\phi g_h \frac{Y_B(1 - a^2) + Y_C(1 - a)}{Y_A + Y_B + Y_C + Y_h}$
			$R_A = R_B = R_C = R$ $C_A = C_B = C_A = C$	$\underline{I}_h = \underline{U}_\phi g_h \frac{3Y}{3Y + g_h}$
			$R_A = R_B = R_C = R$ $C_A = C_B = C_A = 0$	$I_h = U_\phi \frac{1}{R_h} \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{R(R + 6R_h)}{9R_h^2(1 + R^2\omega^2C^2)}}}$
			$R_A = R_B = R_C = \infty$ $C_A = C_B = C_A = C$	$I_h = \frac{3U_\phi}{\sqrt{(3R_h)^2 + \left(\frac{1}{\omega C}\right)^2}}$

Продолжение таблицы 2.1

№	Режим нейтрали электрической сети	Характер прикосновения	Состояние изоляции фаз электрической сети	Формулы для расчета тока, протекающего через тело человека при прикосновении к одной из фаз
		Прикосновение к фазе A при замыкании фазы B на землю	$R_A = R_C = R; \quad R_B = R_{зм}$ $C_A = C_A = C; \quad C_B = \infty$	$I_h = \frac{\sqrt{3}U_\phi}{R_h + R_{зм}}$
2.	Сети с глухозаземленной нейтралью	Прикосновение к фазе A при исправной изоляции двух других фаз	$R_A = R_B = R_C = \infty$ $C_A = C_B = C_A = 0$	$I_h = \underline{U}_\phi g_h \frac{g_0}{g_0 + g_h}$ $I_h = \frac{U_\phi}{R_h + R_0}$
		Прикосновение к фазе A при замыкании фазы B на землю через проводимость g_0	$R_A = R_C = \infty; \quad R_B = R_{зм}$ $C_A = C_A = 0; \quad C_B = \infty$	$I_h = \underline{U}_\phi g_h \frac{g_{зм}(1 - a^2) + g_0}{g_h + g_{зм} + g_0}.$

Широко известно, что анализ опасности электропоражения может быть точным лишь в том случае, если будут учтены, по мере возможности, все факторы, влияющие на электротравму: номинальное напряжение электроустановки, режим нейтрали источника питания, сопротивления изоляции фаз сети относительно земли, ток замыкания на землю, сопротивление тела человека, переходное сопротивление в цепи человека, удельное сопротивления грунта в зоне растекания тока и вероятность соприкосновения человека с токоведущими частями [99].

Однако, не отрицая справедливость и достоверность установленных математических зависимостей возникновения электроопасных ситуаций, отметим, что аналитическое исследование условий электробезопасности, не смотря на кажущуюся простоту, вызывает ряд затруднений. Эти затруднения связаны с приближенным определением значений некоторых факторов, входящих в цепь поражения [143]. Здесь же авторы отмечают, что рассчитанные аналитическим методом значения поражающих токов существенно отличаются от действительных значений токов. Кроме того, этими же авторами в работе [144] отмечается недостаточная обоснованность величины сопротивления тела человека, которая при аналитических расчетах принимается равной 1 кОм.

Исследованиями установлено, что влажность, повышенная температура, едкие пары, токопроводящая пыль изменяют сопротивление изоляции токоведущих частей электроустановок, под их действием изменяется и сопротивление тела человека [99]. В таком случае, проведенная аналитическим путем оценка уровня электробезопасности для определенных условий окружающей среды не соответствует реальности.

Достоинства метода:

- позволяет в общем виде установить количественные соотношения между переменными параметрами и определить их влияние на условия электробезопасности;
- не требует значительного времени для наблюдения и обработки результатов;

- дает возможность оценки уровня электробезопасности объекта на стадии проектирования.

Недостатки метода:

- расчеты сложных схем занимают относительно много времени, что обусловлено решением большого количества алгебраических уравнений [99, 148];
- расчеты имеют приближенный характер из-за отсутствия конкретных, обоснованных значений ряда параметров, значительно влияющих на условия электробезопасности [68, 148].

Как видно из вышеприведенного материала, применение статистического или аналитического методов исследований условий электробезопасности не всегда позволяет наиболее полно оценить уровень электробезопасности.

Для выяснения условий и обстоятельств поражения используется **экспериментальный метод.**

При проведении экспериментальных исследований условий электробезопасности выполняются требования, соответствующие обстоятельствам поражения.

В плане проведения экспериментов и анализа их результатов стоит отметить работу проф. В.Е. Манойлова [67]. Приведенные в ней описания примеров применения инструментального расследования реальных случаев электропоражений дают нам четкие представления о качестве экспериментальных исследований условий электробезопасности.

Здесь же [67] отмечается, что моделирование условий электропоражения и измерение величин факторов, входящих в цепь поражения, позволяет более точно определить значения поражающих токов и напряжений, предопределить направленность защитных мероприятий и расширить представление о механизме поражения человека электрическим током.

Однако не во всех случаях возникновения электропоражения удастся применить экспериментальный метод исследования. Например, всякий проводимый эксперимент в реальной электрической сети – это воздействие на сеть коммутационными перенапряжениями. Эти воздействия могут привести к

перераспределению напряжения в сети, ускорить износ изоляции или к выходу из строя бытовых электропотребителей в однофазных сетях. Из-за этого, не каждое электросетевое предприятие дает разрешение на проведение таких экспериментов. Кроме того, по соображениям электро - и пожаробезопасности, некоторые случаи электропоражения и вовсе не разрешается исследовать экспериментальным путем.

Достоинства метода:

- воспроизведение реальных условий электропоражения и тем самым наиболее полного выяснения обстоятельств электропоражения;
- определение точных величин факторов, влияющих на исход электропоражения.

Недостатки метода:

- ограничения области проведения экспериментальных исследований по техническим причинам и мерами безопасности.

Логико - вероятностный метод (ЛВМ). Для описания случайных процесс, факторов или оценки эффективности средств и способов защиты от этих факторов, широкое применение нашел метод логико-вероятностного моделирования (ЛВМ) [82, 124, 131].

Математическая сущность ЛВМ, согласно [79], заключается в использовании функции алгебры логики для аналитической записи условий безопасности системы и в разработке строгих способов перехода от функций алгебры логики к вероятностным функциям, объективно выражающим безопасность системы.

Привлекателен ЛВМ исключительной четкостью, однозначностью и большими возможностями при анализе влияния любого элемента на безопасность всей системы [103].

Основывается ЛВМ на представлении условий возникновения опасных состояний системы в виде логических моделей, в которых каждое из опасных состояний характеризуется вероятностью его возникновения как соответствующего события [79].

При построении математической модели возникновения опасного события с помощью ЛВМ, общая вероятность группы событий, соединенных последовательно (выполнение операции «и»), определяется по теореме умножения вероятностей приводимых событий, т. е. [131]:

$$P\left(\prod_{i=1}^n S_i\right) = \prod_{i=1}^n P(S_i) \quad (2.1)$$

Для определения общей вероятности групп событий, параллельно расположенных в схеме, используется теорема сложения вероятностей совместных событий, поскольку возникновение одного из состояний не исключает появления других состояний при формировании опасной ситуации [54]:

$$P\left(\sum_{i=1}^n S_i\right) = \sum_i P(S_i) - \sum_{i,j} P(S_i S_j) + \sum_{i,j,k} P(S_i S_j S_k) + \dots + (-1)^{n-1} P(S_1 S_2 \dots S_n). \quad (2.2)$$

При этом каждая пара элементов схемы, соединенных параллельно и имеющих вероятности p_i и p_j , заменяется одним элементом с вероятностью $1 - (1 - p_i)(1 - p_j)$ [54].

Последовательное уменьшение числа элементов (правила редукции) позволяет определить вероятности возникновения конечного условия [53].

Анализ возникновения опасной ситуации на основе ЛВМ рассматриваются в [10–11, 21, 41, 50, 53, 58, 74, 82, 91, 124, 126, 131 и др.]. Исследования, проведенные в этих работах, позволяют обоснованно взвешивать многие воздействующие факторы, принимать оптимальные решения в условиях неполной информации об объекте.

Однако, использование логико-вероятностного моделирования, введение вероятностных показателей опасности [102] предполагает наличие большого объема статистической информации.

Авторы [9] отмечают, что применение вероятностных методов в энергетических расчетах требует точного знания законов распределения

случайных величин и их параметров, что не всегда отвечает реальным возможностям получения всего спектра вероятностно-статистического описания.

Кроме того, как отмечается в [53], при построении математической модели логико-вероятностным методом пренебрегают целым рядом факторов, в частности, психофизиологическими показателями и действиями людей, параметрами метеорологических условий и другими.

Достоинство метода:

- анализ возникновения опасной ситуации на основе ЛВМ позволяет обоснованно взвешивать воздействующие факторы, применить оптимальные решения в условиях неполной информации об объекте [131].

Недостатки метода [53, 102]:

- необходимость наличия большого объема статистической информации для введения вероятностных показателей опасности;
- трудности определения конкретных вероятностей событий, особенно связанных с ошибочными действиями человека или сознательными нарушениями требований безопасности.

Перечисленные выше методы исследования условий электробезопасности, несомненно, помогают нам оценить уровень безопасности, принять решения по повышению уровня электробезопасности.

Однако, в силу ряда обстоятельств, далеко не все задачи можно решить аналитическими методами и не все эксперименты осуществимы. Причиной этого являются приближенный характер аналитических расчетов, обусловленных отсутствием конкретных, обоснованных значений ряда параметров; невозможность экспериментальной проверки в производственных условиях из-за сложности выполнения организационных и технических мероприятий и т. д. [86].

В сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью (система *TN-C* [31, 152–153, 155]) защита человека от поражения электрическим током, в основном, осуществляется занулением. В свою очередь, условия электробезопасности в системе зануления, применительно к четырехпроводным воздушным линиям, существенно зависят от особенностей устройства заземления

нейтрали и повторных заземлений совмещенного нулевого защитного и нулевого рабочего проводников (*PEN*-проводник), таких как: величина сопротивлений заземлителей, количество и место расположения повторных заземлителей, степень выравнивания потенциалов в зоне растекания тока и т. п.

В связи с указанными трудностями в настоящее время предпочтение отдается методам компьютерного моделирования с применением вычислительных машин (ЭВМ) и соответствующих программных продуктов.

Вычислительный эксперимент путем замены реального объекта его компьютерной моделью дает большие преимущества исследователю. Компьютерное моделирование обеспечивает возможность изучения и оптимизации сложных многопараметрических процессов, в том числе нелинейных, исследование которых традиционными способами затруднено или, в некоторых случаях, невозможно.

2.2 Разработка компьютерной модели электрической сети напряжением до 1000 В

Среди ряда программ компьютерного моделирования [34–37] особо выделяется универсальный программный комплекс MATLAB [35]. Популярности системы в большей степени способствуют приложенные к ней расширения Simulink.

Прикладная программа Simulink является интерактивным инструментом для моделирования, имитации и анализа динамических систем. Она дает возможность строить графические блок-диаграммы, имитировать динамические системы, исследовать работоспособность систем и совершенствовать проекты [35].

Библиотека блоков SimPowerSystems является одной из множества дополнительных библиотек Simulink, ориентированных на моделирование конкретных (в основном, электротехнических) устройств: источников энергии, электродвигателей, трансформаторов, линий электропередачи, силовых ключей, регуляторов напряжения и тока и тому подобное оборудование [92, 141].

Компьютерная модель разрабатывалась при помощи программного комплекса MATLAB, как общепризнанной системы для моделирования, с использованием его встроенного пакета «Simulink».

Рассмотрим компьютерную модель исследования условий электробезопасности системы зануления, разработанной в среде программного комплекса MATLAB/Simulink.

На рисунке 2.2 представлена иллюстрация возможных случаев возникновения опасных ситуаций при эксплуатации системы зануления.

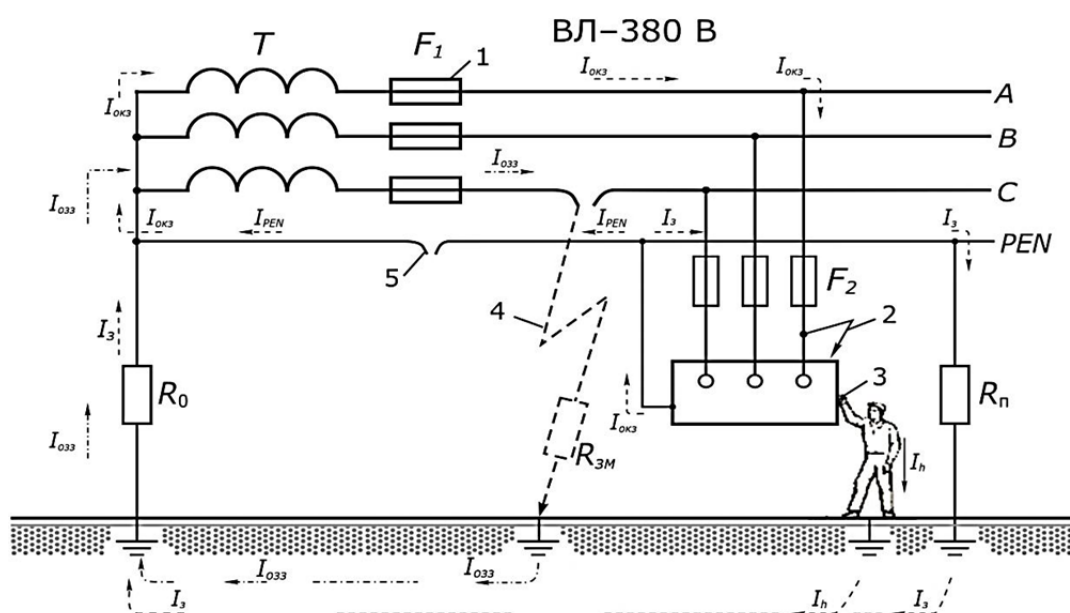


Рисунок 2.2 – Наиболее частые случаи возникновения опасных ситуаций при эксплуатации системы зануления:

T – силовой трансформатор; F_1 , F_2 – плавкие предохранители; R_0 – сопротивление заземляющего устройства нейтрали трансформатора; R_n – сопротивления повторных заземлителей PEN-проводника; $R_{зм}$ – сопротивление в месте замыкания фазы на землю; I_{PEN} – ток, протекающий по PEN-проводнику; $I_{окз}$ – ток однофазного короткого замыкания; I_3 – токи, протекающие через землю; I_h – ток, проходящий через тело человека; $I_{окзз}$ – ток однофазного замыкания на землю; 1 – отказ аппаратов защиты; 2 – замыкание фазы на открытую проводящую часть; 3 – прикосновение человека к открытой проводящей части; 4 – однофазное замыкание на землю; 5 – обрыв PEN-проводника

Следует отметить, что основу данной модели составляет компьютерная модель, разработанная на кафедре Безопасности жизнедеятельности Южно-Уральского государственного университета [13, 15].

Модель [15] дополнена рядом элементов, которые расширили ее возможности. В частности, в модель добавлены: блок, имитирующий сопротивление тела человека, прикоснувшегося к открытой проводящей части (при этом его полное сопротивление меняется в зависимости от величины приложенного напряжения), блок имитации возникновения однофазного замыкания фазы на землю (ОЗЗ) при различных значениях сопротивлений растеканию тока [115].

Модели электрической нагрузки, коммутационных аппаратов и измерительных комплектов изображены в виде блоков. Это одно из преимуществ создания модели в программной среде MATLAB/Simulink, поскольку подобные блоки позволяют:

- разрабатывать компактные и функциональные модели электрической сети;
- создавать собственные модели электротехнических устройств при отсутствии их в стандартной библиотеке блоков SimPowerSystems.

В самом начале создания компьютерной модели возникают следующие вопросы:

1. Какими блоками моделировать те или иные элементы?
2. Как определять параметры этих элементов?

Данные вопросы являются весьма важными, поскольку адекватность компьютерной модели зависит от того насколько правильно мы применим готовые блоки и определим их параметры.

Описание блоков, применяющихся в данной модели, подробно рассматриваются в [13].

Общий вид компьютерной модели, составленной для схемы, приведенной на рисунке 2.2, представлен на рисунке 2.3 [115].

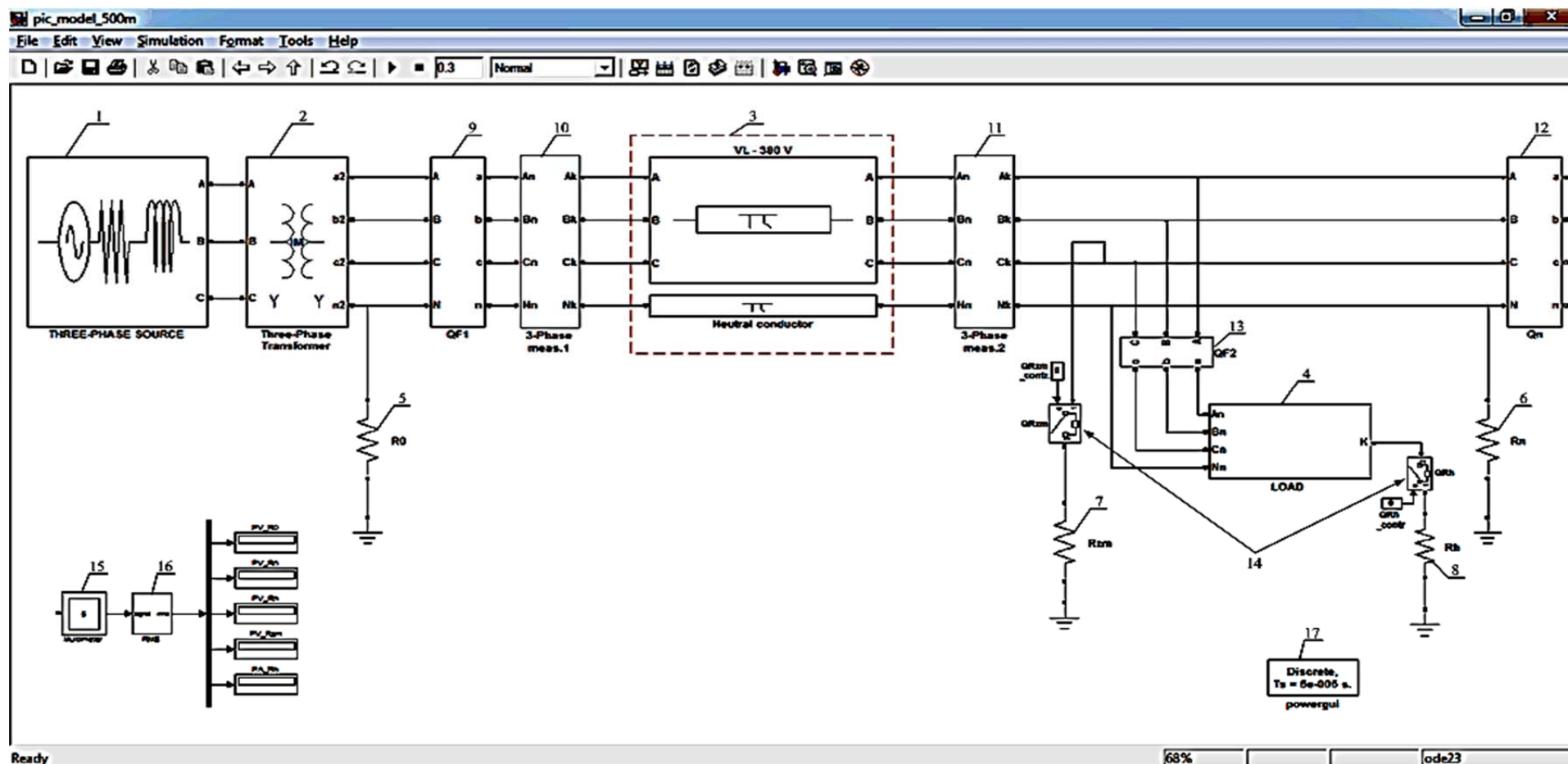


Рисунок 2.3 – Общий вид компьютерной модели: 1 – трехфазный источник электроэнергии напряжением 6–10 кВ; 2 – силовой двухобмоточный трансформатор; 3 – модель четырехпроводной воздушной линии 380 В; 4 – электрическая нагрузка; 5 – сопротивления заземляющего устройства нейтрали трансформатора (R_0); 6 – сопротивления повторных заземлений PEN-проводника (R_n); 7 – сопротивления замыкания фазы на землю ($R_{зм}$); 8 – сопротивления тела человека (R_h); 9, 12, 13 – блоки коммутационных аппаратов воздушной линии; 10, 11 – измерительные комплексы; 14 – выключатели; 15 – блок "Мультиметр"; 16 – блок, рассчитывающий действующее значение синусоидального сигнала; 17 – блок PowerGui

Замыкание фазы на корпус электроприемника в модели производится внутри блока «Электрическая нагрузка» (рисунок 2.3, поз. 4) путем включения выключателя Q3.

Внутренняя схема блока «Электрическая нагрузка» приведена на рисунке 2.4.

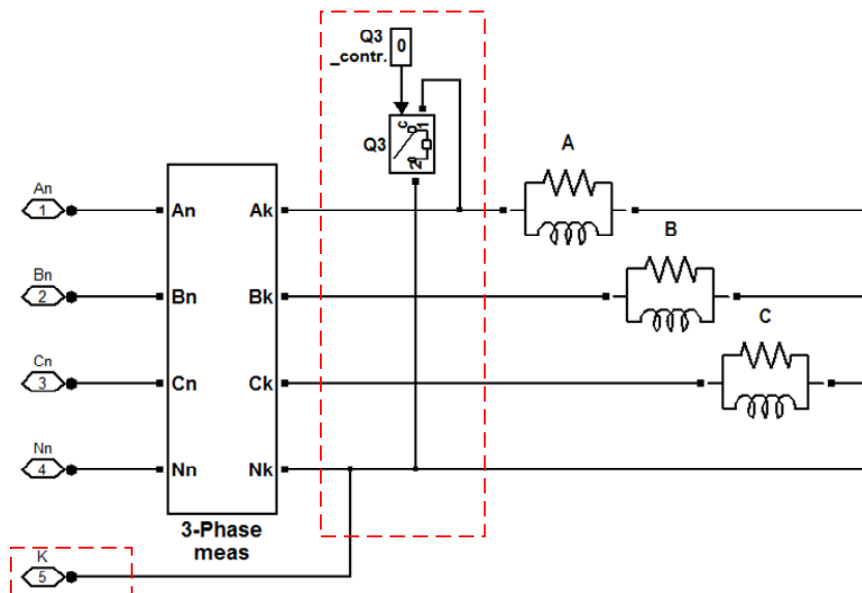


Рисунок 2.4 – Внутренняя схема блока «Электрическая нагрузка»
и моделирование замыкания фазы на корпус

Подключение человека к корпусу электроприемника моделируется в виде сопротивления, подключаемого к корпусу блока «Электрическая нагрузка» через выключатель Q2 (рисунок 2.3, поз. 8). По сути, при включении выключателя Q2 происходит имитация прикосновения человека к корпусу.

Однофазное замыкание фазы на землю моделируется путем включения выключателя Q1, который соединяет фазу C с землей через сопротивление R_{zm} (рисунок 2.3).

Обрыв PEN-провода моделируется путем отключения одного из выключателей QF1 (рисунок 2.3). Блок QF1 состоит из стандартных элементов «Breaker» библиотеки блоков SimPowerSystems программного комплекса MATLAB/Simulink, которые установлены в каждой фазе и нулевом проводе (рисунок 2.5).

Разработанная компьютерная модель позволяет нам описать структуру системы зануления и процессы в ней в естественном виде, не прибегая к использованию формул и строгих математических зависимостей.

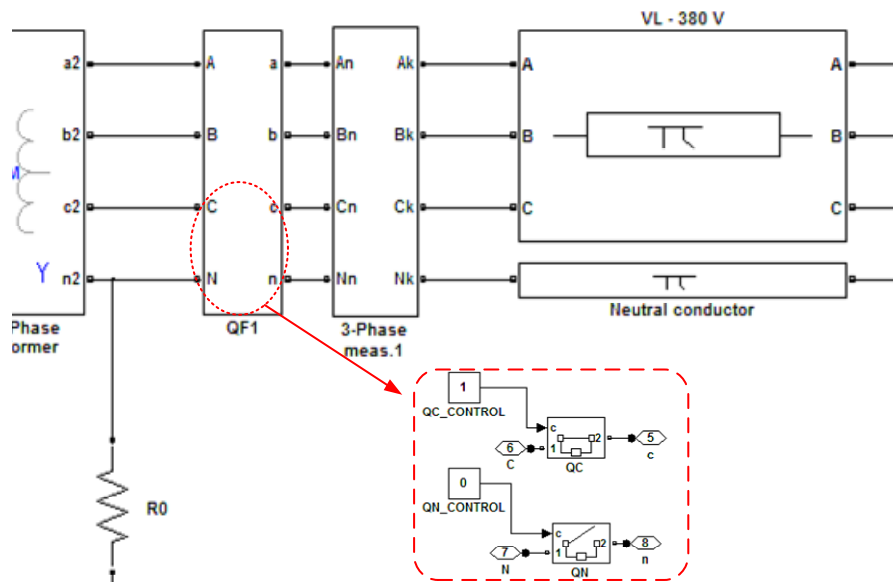


Рисунок 2.5 – Моделирование обрыва *PEN*- проводника в программной среде MATLAB/Simulink

Известно, что результаты, полученные при помощи компьютерной модели, зависят от того, насколько корректно построена модель и заданы параметры элементов. В [14] проведена экспериментальное исследование нормального режима работы, обрыва фазных проводов и однофазного замыкания на землю в двух действующих электрических сетях напряжением 0,4 кВ. Результаты, полученные при компьютерном моделировании и при экспериментальных исследованиях отличались не более чем на 5–10 %. Поскольку базовую основу нашей компьютерной модели составляет модель, используемая при исследованиях [14], это позволяет утверждать, что разработанная нами компьютерная модель адекватна и может быть применена для дальнейших исследований.

Таким образом, компьютерное моделирование системы зануления предоставляет нам возможность проведения исследований различных аварийных режимов электрической сети, которые сложно организовать в реальных сетях.

При этом исследования (эксперименты), выполненные на компьютерной модели, занимают относительно малое время и безопасны для людей.

Кроме того, с помощью компьютерной модели можно провести неограниченное количество экспериментов с разными параметрами, что позволит всесторонне оценить оптимальность регламентируемых в настоящее время составляющих схемы зануления.

2.3 Исследование влияния на условия электробезопасности параметров заземления нейтрали и повторных заземлений

Проведем исследование условий электробезопасности в системе зануления при помощи разработанной компьютерной модели.

Известно [118, 121], что в случае прикосновения к электроустановкам напряжением до 1000 В важным фактором, от которого существенно зависят величина тока и, как следствие, степень реакции человека на воздействие этого тока является величина сопротивления тела человека.

Общее сопротивление тела человека Z_h представляет собой, согласно [147], сумму сопротивлений тканей, расположенных по пути протекания тока, которые колеблются в очень широких пределах (от сотен омов до нескольких мегаомов) и зависит от напряжения, площади контактов, длительности протекания токов и других факторов.

В [121] приводится, что сопротивление тела человека, находящегося между двумя электродами, можно рассматривать как сумму трех последовательно соединенных сопротивлений: двух – создаваемых наружным слоем кожи R_n , и еще одного – остальной частью тела R_b .

Выполненные в этой области исследования достаточно полно освещены в работах Л.В. Гладилина [23], П.А. Долина [33], В.Е. Манойлова [67], А.И. Сидорова [121], В.И. Щуцкого [147] и др.

Наибольший интерес представляет величина сопротивления от ладони через руки, туловище и обе ноги (однополюсные прикосновения) (рисунок 2.6) [116, 117].

На рисунке 2.6 изображена схема замещения сопротивления тела человека по пути протекания тока, где Z_H – полное сопротивление кожного покрова; Z_h – общее сопротивление тела человека; C_H – емкость конденсатора, образовавшегося в месте контакта с токоведущей частью; R_H – сопротивление кожного покрова; $R_{вн}$ – внутреннее сопротивление; $R_{об}$; $R_{п}$ – переходное сопротивление от ног в землю.

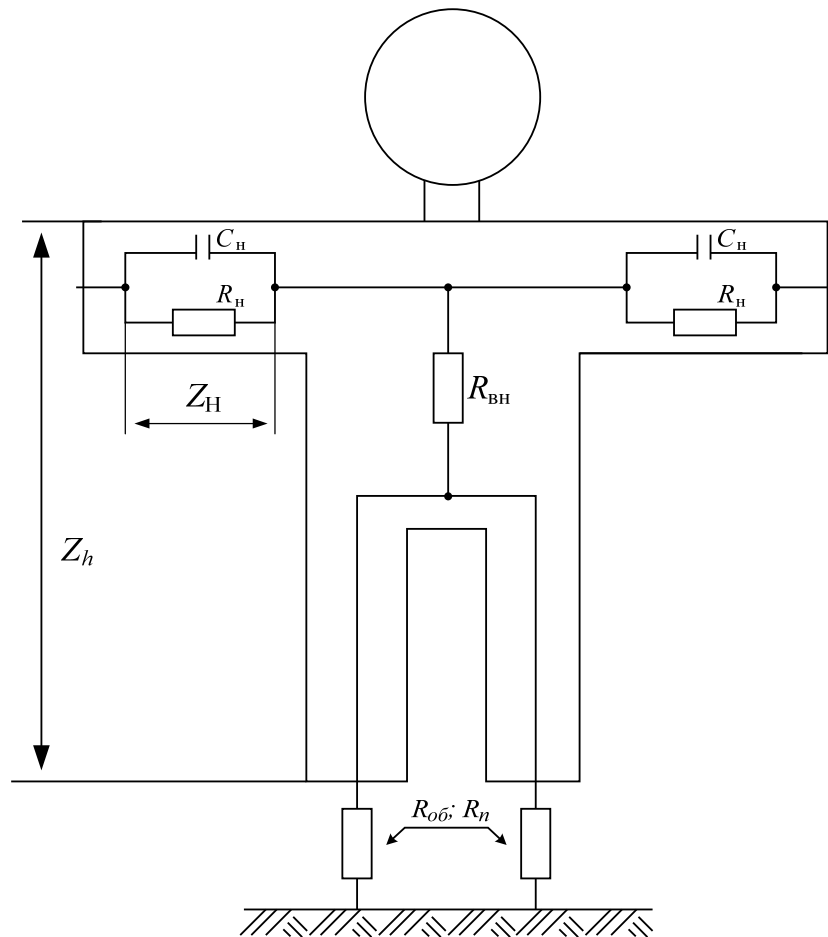


Рисунок 2.6 – Сопротивление тела человека по пути протекания тока

Повышение напряжения, приложенного к телу человека, U_{Zh} вызывает уменьшение в десятки раз его полного сопротивления Z_h . Для определения

зависимости Z_h от U_{Zh} при переменном токе частотой 50 Гц проф. П.А. Долиным предложена следующая формула (при $U_{Zh} \geq 5$ В), кОм [33]:

$$Z_h = \frac{77}{U_{Zh} + 10} + 0,3, \quad (2.3)$$

По (2.3) при напряжениях до 50 В переменного тока частотой 50 Гц, величина Z_h оказывается равной примерно 2,0 – 1,6 кОм. Затем она незначительно снижается и составляет примерно 950 Ом при 100 В, 600 Ом при 220 В, 500 Ом при 380 В, 400 Ом при 1000 В (рисунок 2.7) [33].

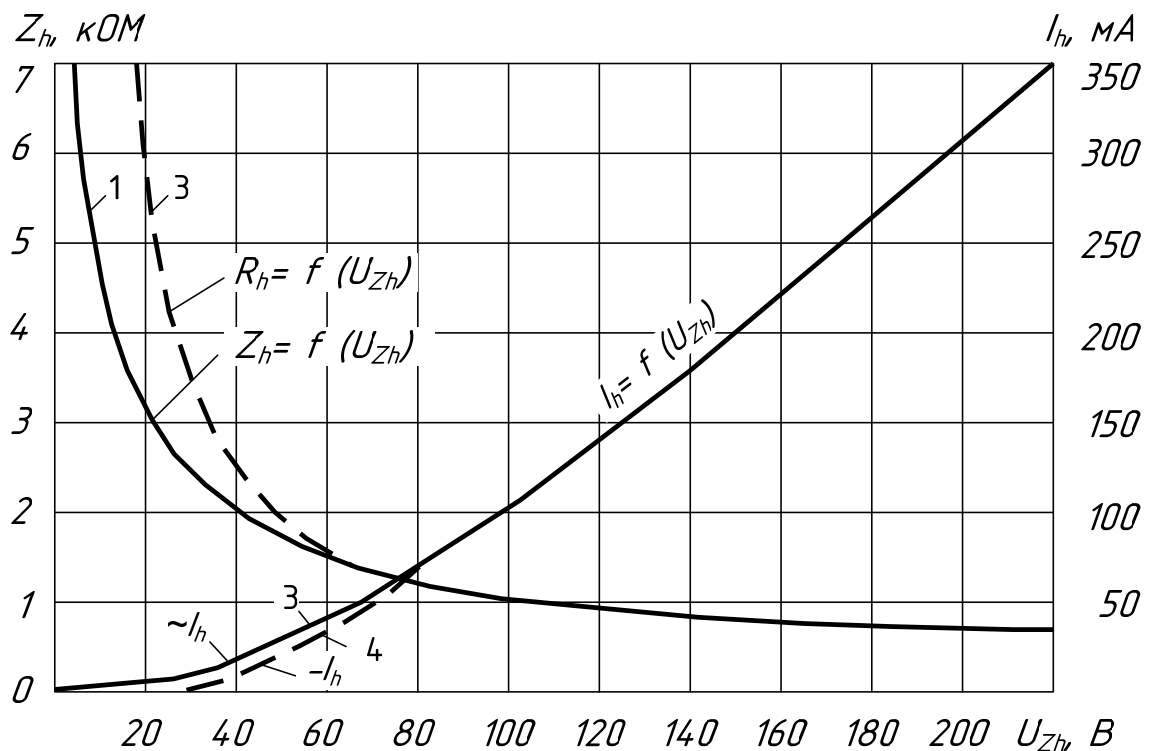


Рисунок 2.7 – Зависимость сопротивления тела человека и тока, протекающего через него, от приложенного напряжения: 1 и 2 – переменный ток частотой 50 Гц, 3 и 4 – постоянный ток

Согласно исследованиям А.П. Киселева [49] значения сопротивлений R_n и $R_{вн}$ принимаются равными 3,0 и 0,65 кОм, соответственно.

Снижение общего сопротивления тела человека Z_h с ростом приложенного напряжения происходит, в основном, за счет уменьшения сопротивления кожи,

что обусловлено рядом факторов, в том числе пробоем рогового слоя кожи под влиянием приложенного напряжения.

По данным [33] пробой рогового слоя наступает при напряжении 50–200 В. В [23] указывается, что явление пробоя кожного покрова следует ожидать при напряжении 42,5 В.

В [118] описывается методика определения величины напряжения пробоя рогового слоя кожи путем исследования аналитических зависимостей сопротивления тела человека от величины приложенного напряжения (рисунок 2.8). Здесь же [118] указывается предпочтительность данной методики, поскольку она основана на данных, полученных непосредственно на человеке.

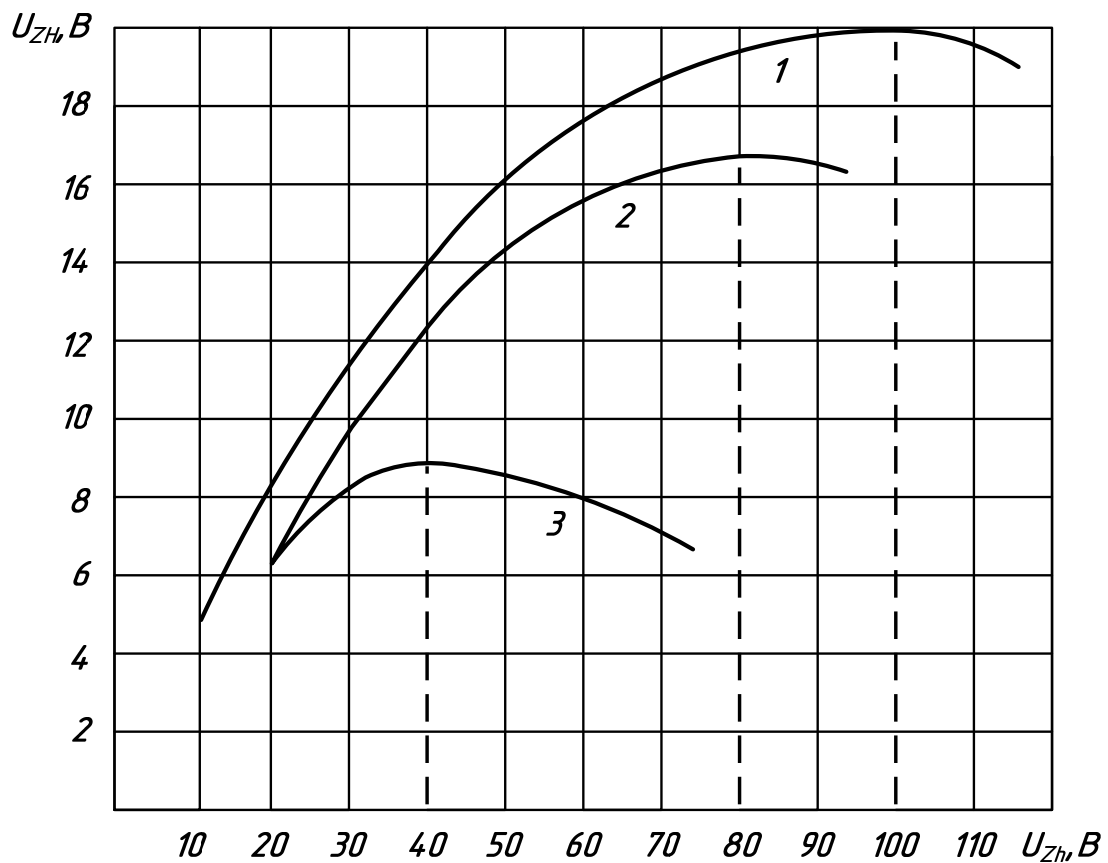


Рисунок 2.8 – Зависимость U_{ZH} от величины приложенного к телу человека напряжения: 1 – без учета изменения сопротивления тела человека от времени действия; 2, 3 – с учетом снижения сопротивления человека, соответственно на 10 и 20 %

Если полагать сопротивление тела человека неизменным при увеличении времени действия, то можно отметить, что пробой рогового слоя начинается при напряжении 100 В (кривая 1, рисунка 2.8). Однако известно [33], что с течением времени при напряжении 20 В и более сопротивление тела человека уменьшается на 10...20 %. Построенные при этих условиях кривые 2, 3 показывают, что пробой рогового слоя может наступить и при напряжении 40 В [118].

Таким образом, согласно [118, 121], при напряжении 40 В и выше (в зависимости от длительности воздействия напряжения) наступает пробой рогового слоя кожи человека. В этом случае общее сопротивление тела человека представляется только величиной внутреннего сопротивления тела человека – $R_{вн}$. Исходя из этого, для дальнейших расчетов, при значениях напряжений, приложенных к телу человека, выше ($U_{zh} \geq 40$ В) значение общего сопротивления тела человека нами принимается – $R_h = 650$ Ом [49].

Исходя из данных, приведенных в литературе, исследование влияния на условия электробезопасности параметров системы зануления проводилось на компьютерной модели четырехпроводной воздушной сети напряжением 380 В системы *TN-C* длиной 500 м, и проводами марки АС, разработанная нами в рамках представленной работы в программном комплексе MATLAB/Simulink.

При моделировании были приняты следующие допущения:

- 1) земля будет считаться как проводник, обладающим бесконечно малым сопротивлением;
- 2) при моделировании не учитываются сопротивления обуви и пола.

Далее приводятся результаты исследований влияния на условия электробезопасности параметров системы зануления, полученные при помощи компьютерной модели.

В таблице 2.2 приведены значения тока однофазного короткого замыкания ($I_{окз}$), ожидаемого напряжения на *PEN*-проводнике относительно земли (U_{PEN}) и тока, проходящего через тело человека (I_h), в зависимости от соотношения $R_0/R_{п}$

при возникновении однофазного короткого замыкания (ОКЗ) для трансформаторов мощностью 25–100 кВА.

Таблица 2.2 – Значения $I_{\text{ОКЗ}}$, U_{PEN} и I_h , в зависимости от соотношения R_0/R_{Π} при ОКЗ для трансформаторов мощностью 25–100 кВА

R_0/R_{Π}	$S_{\text{тр.}} = 25 \text{ кВА}$			$S_{\text{тр.}} = 40 \text{ кВА}$			$S_{\text{тр.}} = 63 \text{ кВА}$			$S_{\text{тр.}} = 100 \text{ кВА}$		
	$I_{\text{ОКЗ}}, \text{ А}$	$U_{\text{PEN}}, \text{ В}$	$I_h, \text{ мА}$	$I_{\text{ОКЗ}}, \text{ А}$	$U_{\text{PEN}}, \text{ В}$	$I_h, \text{ мА}$	$I_{\text{ОКЗ}}, \text{ А}$	$U_{\text{PEN}}, \text{ В}$	$I_h, \text{ мА}$	$I_{\text{ОКЗ}}, \text{ А}$	$U_{\text{PEN}}, \text{ В}$	$I_h, \text{ мА}$
0	113,5	105,6	162,5	132,3	123,1	189,4	145	135	207,7	152,9	142,3	219
0,4	112,1	76,29	117,4	130,4	88,71	136,5	142,7	97,1	149,4	150,3	102,3	157,3
0,5	111,9	71,33	109,7	130,1	82,91	127,6	142,3	90,73	139,6	149,9	95,54	147
1,0	111,1	53,85	82,84	128,9	62,5	96,15	141	68,32	105,1	148,3	71,9	110,6
1,5	110,6	43,25	66,53	128,3	50,15	77,15	140,1	54,79	84,29	147,4	57,64	88,67
2,0	110,3	36,38	18,48	127,8	41,87	64,42	139,6	45,73	70,35	146,8	48,09	73,99
2,5	110,1	31,27	14,44	127,5	36,21	18,32	139,2	39,52	21,2	146,3	41,26	63,48
3,0	109,9	27,41	11,62	127,2	31,73	14,79	138,9	34,63	17,1	146	36,41	18,49
3,5	109,7	24,41	9,609	127	28,25	12,21	138,6	30,82	14,09	145,8	32,4	15,31
4,0	109,6	22	8,125	126,9	25,45	10,29	138,5	27,77	11,87	145,5	29,19	12,89
4,5	109,5	20,02	6,984	126,8	23,16	8,829	138,3	25,26	10,17	145,4	26,56	11,03
5,0	109,5	18,37	6,091	126,6	21,24	7,683	138,2	23,18	8,845	145,2	24,36	9,582
5,5	109,4	16,97	5,377	126,6	19,62	6,767	138,1	21,41	7,778	145,1	22,5	8,426
6,0	109,3	15,76	4,793	126,5	18,23	6,021	138	19,89	6,912	145	20,9	7,491
6,5	109,3	14,72	4,311	126,4	17,03	5,405	137,9	18,57	6,2	144,9	19,52	6,706
7,0	109,3	13,81	3,907	126,4	15,97	4,89	137,8	17,42	5,618	144,8	18,3	6,06

Кривые зависимости значений ожидаемого напряжения на PEN-проводнике относительно земли (U_{PEN}) и тока, проходящего через тело человека (I_h), в зависимости от соотношения R_0/R_{Π} при возникновении однофазного короткого замыкания для этих же трансформаторов представлены на рисунках 2.9 и 2.10.

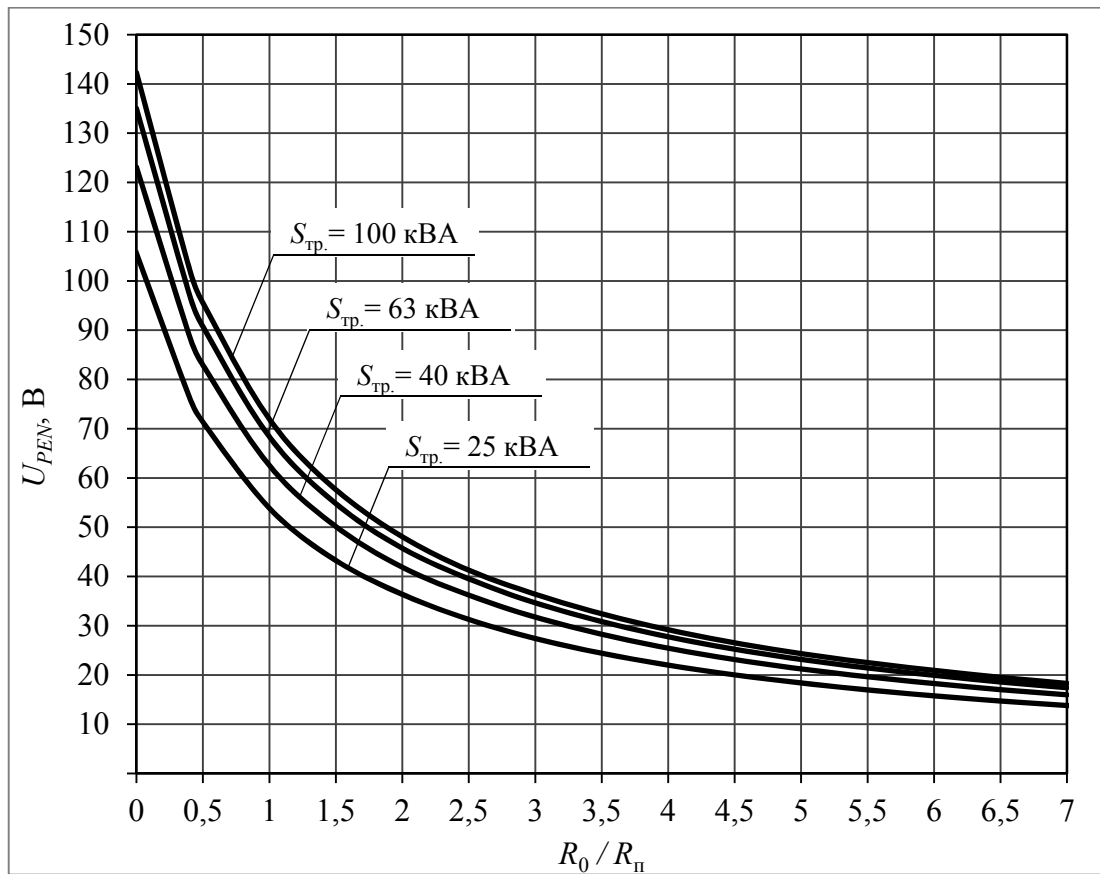


Рисунок 2.9 – Зависимость U_{PEN} от соотношения R_0/R_{Π} при ОКЗ

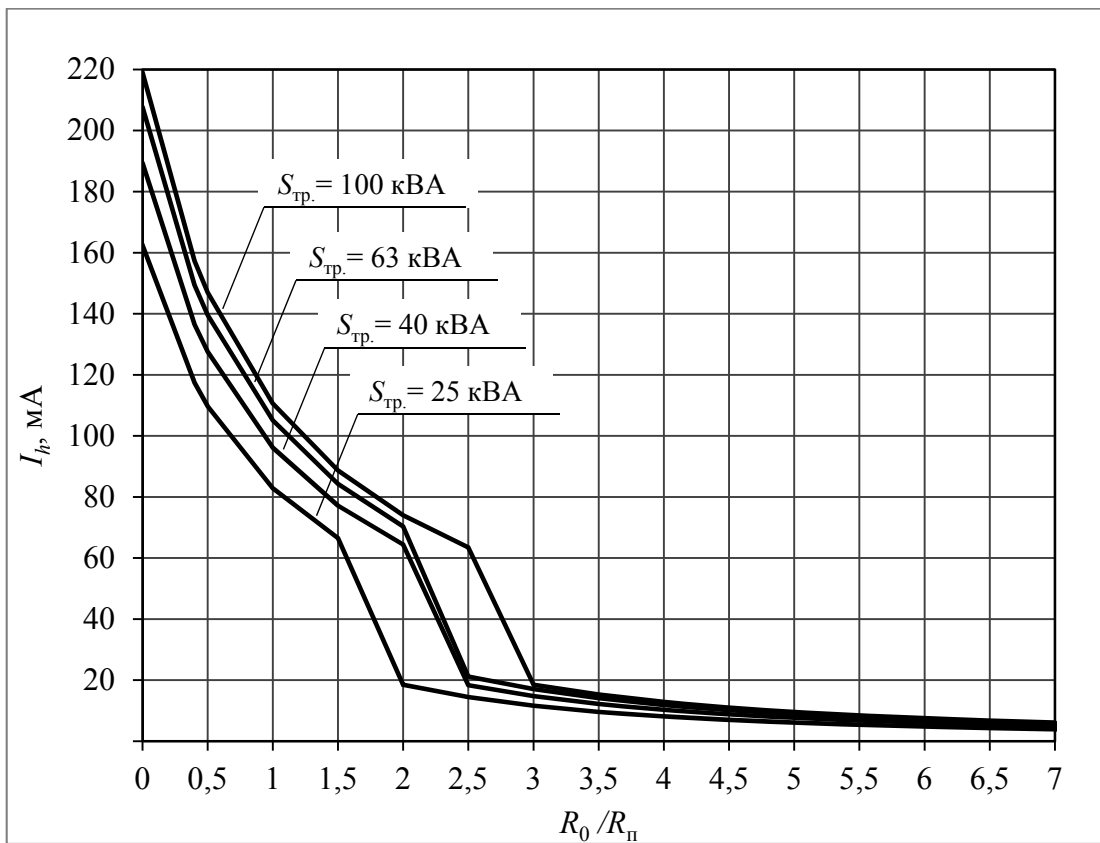


Рисунок 2.10 – Зависимость I_h от соотношения R_0/R_{Π} при ОКЗ

Искажение кривых тока, проходящего через тела человека – I_h (рисунок 2.10) объясняется тем, что в указанных пределах соотношений R_0/R_{Π} ожидаемое напряжение на PEN-проводнике относительно земли (U_{PEN}) превысит значение 40 В, что приведет к пробоем рогового слоя кожи, и полное сопротивление тела (Z_h) человека ограничивается лишь внутренним сопротивлением – $R_{вн.} = 650 \text{ Ом}$ [49] .

Изменение значений тока однофазного короткого замыкания ($I_{окз}$), ожидаемого напряжения на PEN-проводнике относительно земли (U_{PEN}) и тока, проходящего через тело человека (I_h), от соотношении R_0/R_{Π} при возникновении однофазного короткого замыкания (ОКЗ) для трансформаторов мощностью 160–630 кВА со схемой соединения обмоток –Y/Y_н и Δ/Y_н приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3 – Значения $I_{окз}$, U_{PEN} и I_h , в зависимости от соотношения R_0/R_{Π} при ОКЗ для трансформаторов мощностью 160–630 кВА (Y/Y_н, Δ/Y_н)

R_0/R_{Π}	$S_T = 160 \text{ кВА}$			$S_T = 250 \text{ кВА}$			$S_T = 400 \text{ кВА}$			$S_T = 630 \text{ кВА}$		
	$I_{окз}, \text{ А}$	$U_{PEN}, \text{ В}$	$I_h, \text{ мА}$	$I_{окз}, \text{ А}$	$U_{PEN}, \text{ В}$	$I_h, \text{ мА}$	$I_{окз}, \text{ А}$	$U_{PEN}, \text{ В}$	$I_h, \text{ мА}$	$I_{окз}, \text{ А}$	$U_{PEN}, \text{ В}$	$I_h, \text{ мА}$
Y/Y _н												
0	157,7	146,8	225,8	160,2	149,2	229,5	161,3	150,6	231,7	162,7	151,4	233
0,4	154,9	105,4	162,1	157,4	107,1	164,7	158,9	108,1	166,3	159,7	108,7	167,2
0,5	154,4	98,45	151,5	156,9	100	153,9	158,4	101	155,4	159,2	101,5	156,2
1,0	152,8	74,06	113,9	155,2	75,23	115,7	156,7	75,95	116,9	157,5	76,35	117,5
1,5	151,8	59,36	91,32	154,2	60,29	92,75	155,7	60,87	93,64	156,5	61,18	94,12
2,0	151,2	49,53	76,2	153,5	50,3	77,38	155	50,78	78,12	155,8	51,04	78,52
2,5	150,7	42,49	65,37	153	43,15	66,38	154,5	43,56	67,02	155,3	43,78	67,36
3,0	150,3	37,48	19,73	152,7	38,07	20,03	154,1	38,43	20,22	154,9	38,62	20,33
3,5	150,1	33,36	16,27	152,4	33,87	16,52	153,8	34,18	16,68	154,6	34,37	16,93
4,0	149,8	30,05	13,66	152,2	30,51	13,87	153,6	30,8	14	154,4	30,96	14,2
4,5	149,7	27,34	11,39	152	27,76	12,07	153,4	28,02	12,18	154,2	28,16	12,24
5,0	149,5	25,09	10,03	151,8	25,46	10,31	153,2	25,7	10,49	154	25,83	10,54
5,5	149,4	23,17	8,73	151,7	23,51	9,044	153,1	23,74	9,2	153,9	23,86	9,283
6,0	149,3	21,51	7,82	151,6	21,84	8,091	153	22,05	8,167	153,8	22,16	8,239
6,5	149,2	20,09	7,024	151,5	20,4	7,284	152,9	20,59	7,353	153,7	20,69	7,39
7,0	149,1	18,84	6,28	151,4	19,13	6,596	152,8	19,31	6,658	153,6	19,41	6,69
7,5	149	17,74	5,766	151,3	18,01	6,003	152,7	18,18	6,059	153,5	18,27	6,09
8,0	149	16,76	5,269	151,3	17,01	5,401	152,7	17,17	5,478	153,4	17,28	5,523

Продолжение таблицы 2.3

R_0/R_{Π}	$I_{\text{ОКЗ}},$ А	$U_{\text{PEN}},$ В	$I_h,$ мА	$I_{\text{ОКЗ}},$ А	$U_{\text{PEN}},$ В	$I_h,$ мА	$I_{\text{ОКЗ}},$ А	$U_{\text{PEN}},$ В	$I_h,$ мА	$I_{\text{ОКЗ}},$ А	$U_{\text{PEN}},$ В	$I_h,$ мА
Δ/Y_H												
0	160,9	149,8	230,5	162,2	151	232,3	163	151,8	233,5	163,4	152,1	234
0,4	158	107,5	165,4	159,3	108,4	166,8	160,1	108,9	167,6	160,4	109,1	167,9
0,5	157,6	100,4	154,5	158,8	101,2	155,8	159,6	101,7	156,6	159,9	102	156,9
1,0	155,9	75,55	116,2	157,1	76,15	117,2	157,9	76,52	117,7	158,2	76,67	118
1,5	154,9	60,55	93,15	156,1	61,02	93,88	156,8	61,31	94,33	157,1	61,44	94,52
2,0	154,2	50,51	77,71	155,4	50,91	78,32	156,1	51,15	78,7	156,4	51,26	78,86
2,5	153,7	43,33	66,67	154,9	43,67	67,19	155,6	43,88	67,51	155,9	43,97	67,65
3,0	153,3	37,94	20,12	154,5	38,53	20,28	155,2	38,71	20,31	155,6	38,79	20,41
3,5	153	34,02	16,59	154,2	34,28	16,72	154,9	34,44	16,8	155,3	34,51	17
4,0	152,8	30,64	13,93	154	30,88	14,04	154,7	31,03	14,1	155	31,09	14,26
4,5	152,6	27,88	11,62	153,8	28,09	12,21	154,5	28,22	12,27	154,8	28,28	12,3
5,0	152,5	25,57	10,23	153,6	25,77	10,43	154,4	25,89	10,57	154,7	25,94	10,59
5,5	152,3	23,61	9,083	153,5	23,8	9,153	154,2	23,91	9,267	154,5	23,96	9,32
6,0	152,2	21,94	8,125	153,4	22,11	8,188	154,1	22,21	8,227	154,5	22,26	8,274
6,5	152,1	20,48	7,315	153,3	20,64	7,37	154	20,74	7,407	154,3	20,78	7,422
7,0	152	19,21	6,624	153,2	19,36	6,675	153,9	19,45	6,707	154,2	19,49	6,72
7,5	152	18,09	5,949	153,1	18,23	6,075	153,9	18,31	6,104	154,2	18,35	6,116
8,0	151,9	17,09	5,436	153,1	17,22	5,501	153,8	17,3	5,544	154,1	17,33	5,561

На рисунках 2.11–2.14 представлены кривые зависимости значений ожидаемого напряжения на PEN -проводнике относительно земли (U_{PEN}) и тока, проходящего через тело человека (I_h), от соотношения R_0/R_{Π} при возникновении однофазного короткого замыкания (ОКЗ) для этих же трансформаторов.

Результаты измерений значений тока однофазного короткого замыкания ($I_{\text{ОКЗ}}$), ожидаемого напряжения на PEN -проводнике относительно земли (U_{PEN}) от соотношения R_0/R_{Π} при возникновении ОКЗ проводилось для выбранных сечений PEN -проводника, равных 16, 25, 35, 50, 70, и 95 мм² и трансформатора мощностью 160 кВА (трансформаторы указанной мощности наиболее часто встречаются в сельской местности и в посёлках городского типа) приведены в таблице 2.4 и на рисунке 2.15.

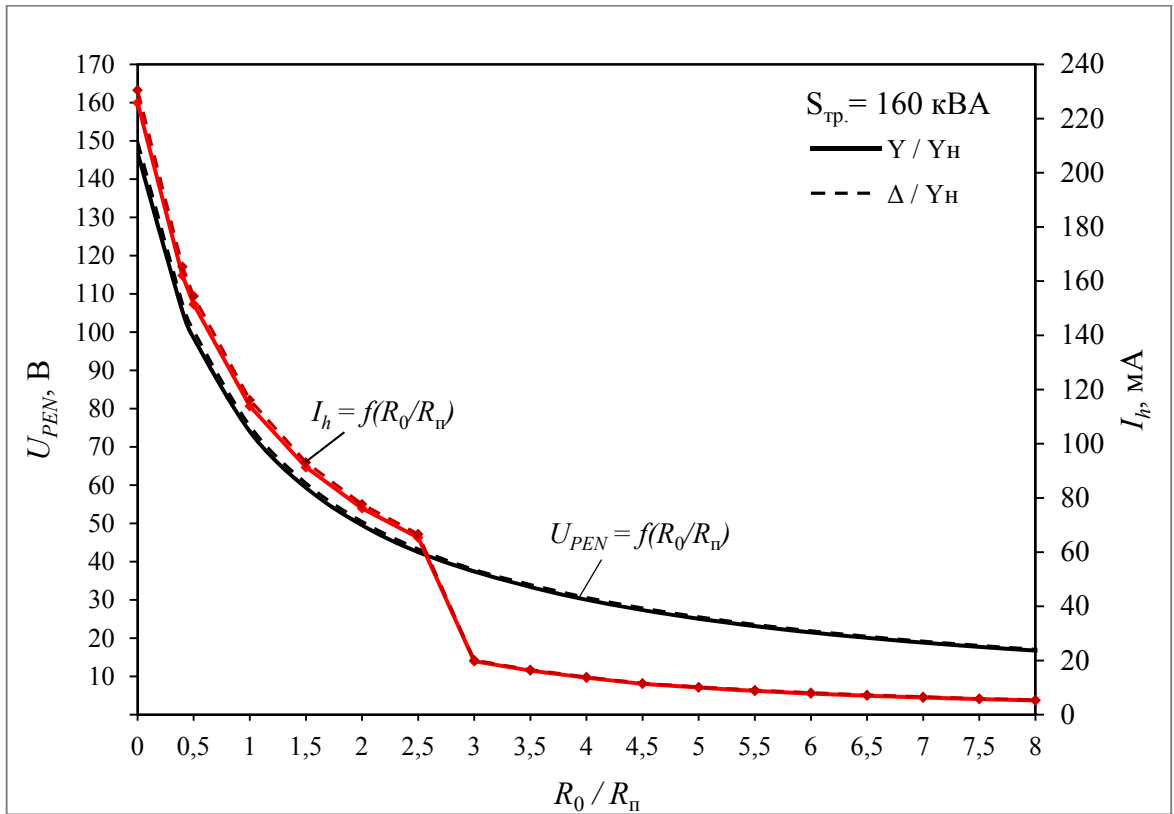


Рисунок 2.11 – Кривые зависимости значений U_{PEN} и I_h от R_0/R_n при ОКЗ для сетей с питающим трансформатором 160 кВА

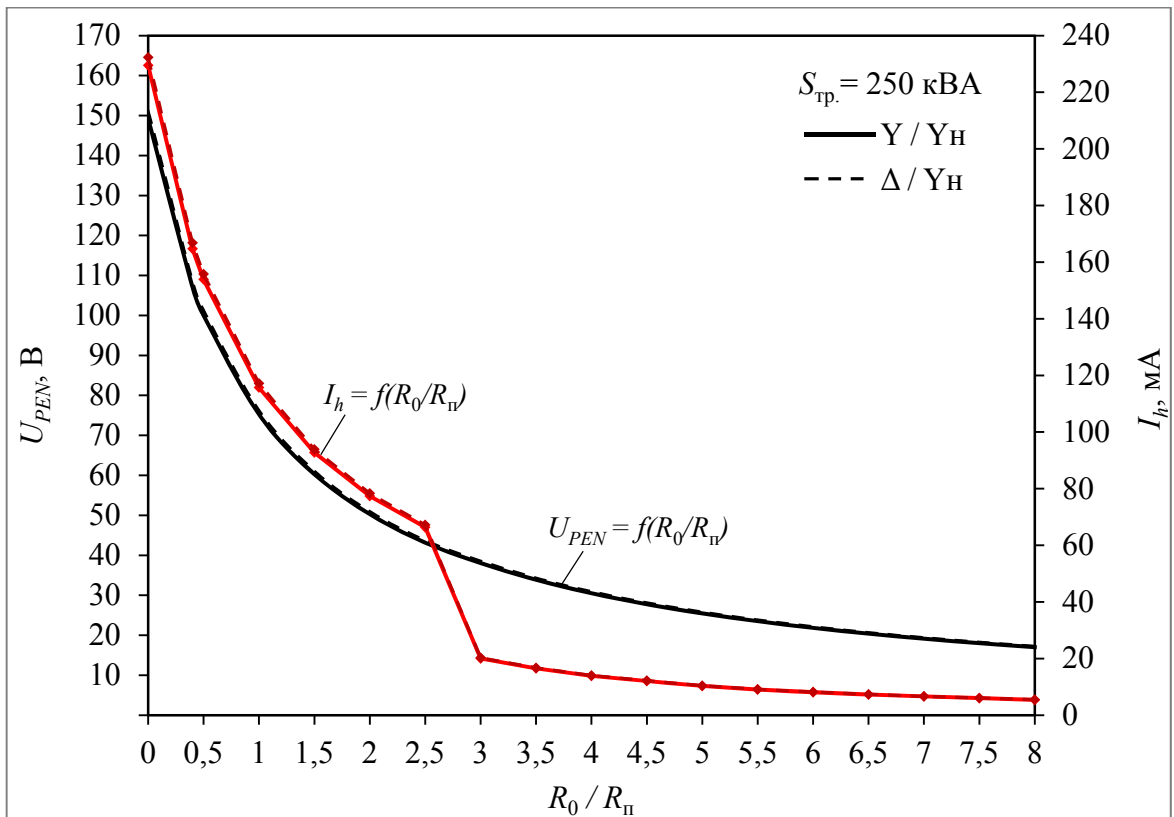


Рисунок 2.12 – Кривые зависимости значений U_{PEN} и I_h от R_0/R_n при ОКЗ для сетей с питающим трансформатором 250 кВА

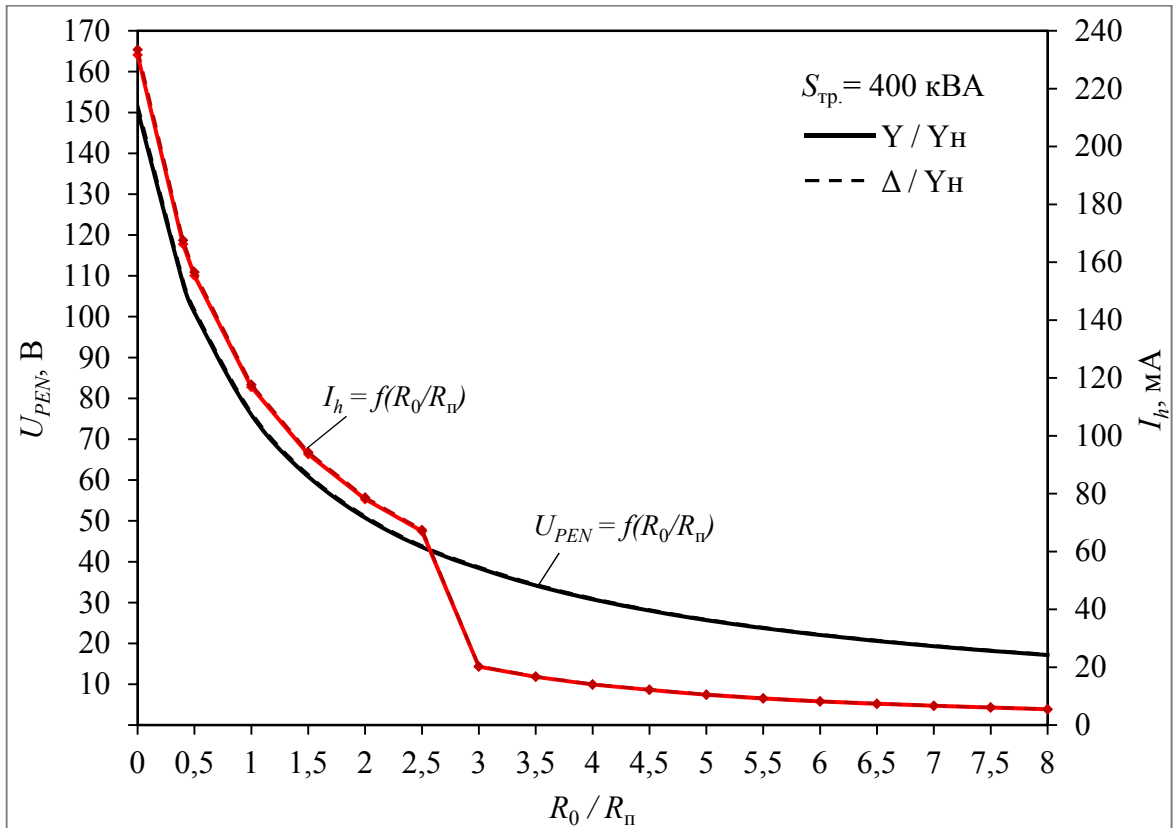


Рисунок 2.13 – Кривые зависимости значений U_{PEN} и I_h от R_0/R_n при ОКЗ для сетей с питающим трансформатором 400 кВА

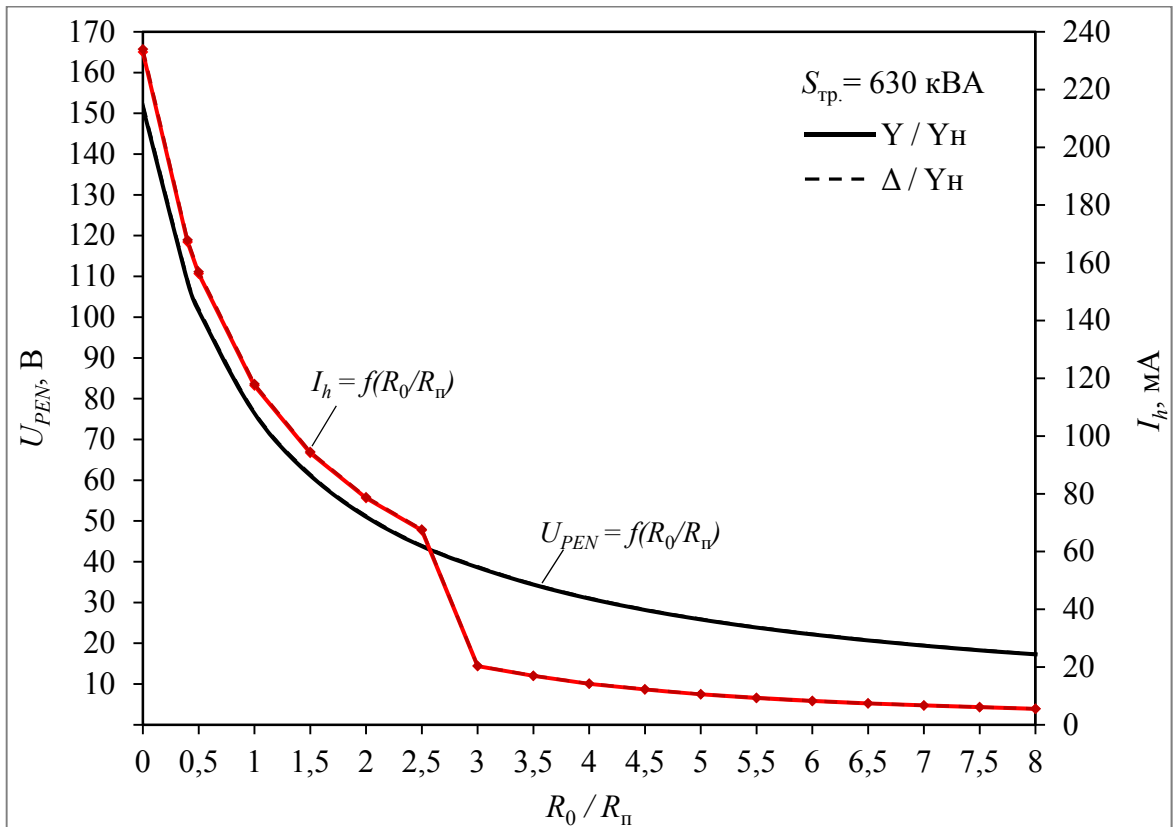


Рисунок 2.14 – Кривые зависимости значений U_{PEN} и I_h от R_0/R_n при ОКЗ для сетей с питающим трансформатором 630 кВА

Таблица 2.4 – Значения U_{PEN} и I_h , в зависимости от соотношения R_0/R_{Π} при ОКЗ для приведенных сечений PEN -проводника ВЛ 380 В

R_0/R_{Π}	Сечение проводов четырехпроводной воздушной линии, мм ²											
	16		25		35		50		70		95	
	$I_{OKЗ},$ А	$U_{PEN},$ В	$I_{OKЗ},$ А	$U_{PEN},$ В	$I_{OKЗ},$ А	$U_{PEN},$ В	$I_{OKЗ},$ А	$U_{PEN},$ В	$I_{OKЗ},$ А	$U_{PEN},$ В	$I_{OKЗ},$ А	$U_{PEN},$ В
0	117,9	109,9	169,3	110,5	218	109,7	274,2	107,4	328,2	104	373,3	100,5
0,4	116,4	79,6	168,3	79,69	216,5	78,98	272,8	77,11	326,9	74,6	372,1	71,99
0,5	116,1	74,47	168	74,5	216,3	73,7	272,6	72,03	326,6	69,67	371,9	67,23
1,0	115,2	56,3	167,1	56,18	215,4	55,5	271,8	54,19	325,9	52,38	371,2	50,52
1,5	114,7	45,26	166,6	45,99	214,8	44,51	271,3	43,43	325,4	41,96	370,8	40,46
2,0	114,3	37,84	166,2	37,66	214,5	37,15	270,9	36,24	325,1	35	370,5	33,75
2,5	114	32,51	165,9	32,33	214,2	31,88	270,7	31,09	324,9	30,02	370,3	28,94
3,0	113,8	28,5	165,7	28,32	214	27,92	270,5	27,22	324,7	26,28	370,2	25,33
3,5	113,7	25,37	165,6	25,2	213,9	24,84	270,4	24,21	324,6	23,37	370,1	22,53
4,0	113,6	22,86	165,5	22,69	213,8	22,37	270,3	21,8	324,5	21,04	370	20,28
4,5	113,5	20,8	165,4	20,64	213,7	20,34	270,2	19,82	324,4	19,13	369,9	18,44
5,0	113,4	19,08	165,3	18,93	213,6	18,65	270,1	18,17	324,3	17,54	369,8	16,9
5,5	113,3	17,62	165,2	17,48	213,5	17,22	270	16,78	324,3	16,2	369,8	15,61
6,0	113,2	16,37	165,1	16,24	213,5	16	270	15,58	324,2	15,04	369,7	14,49

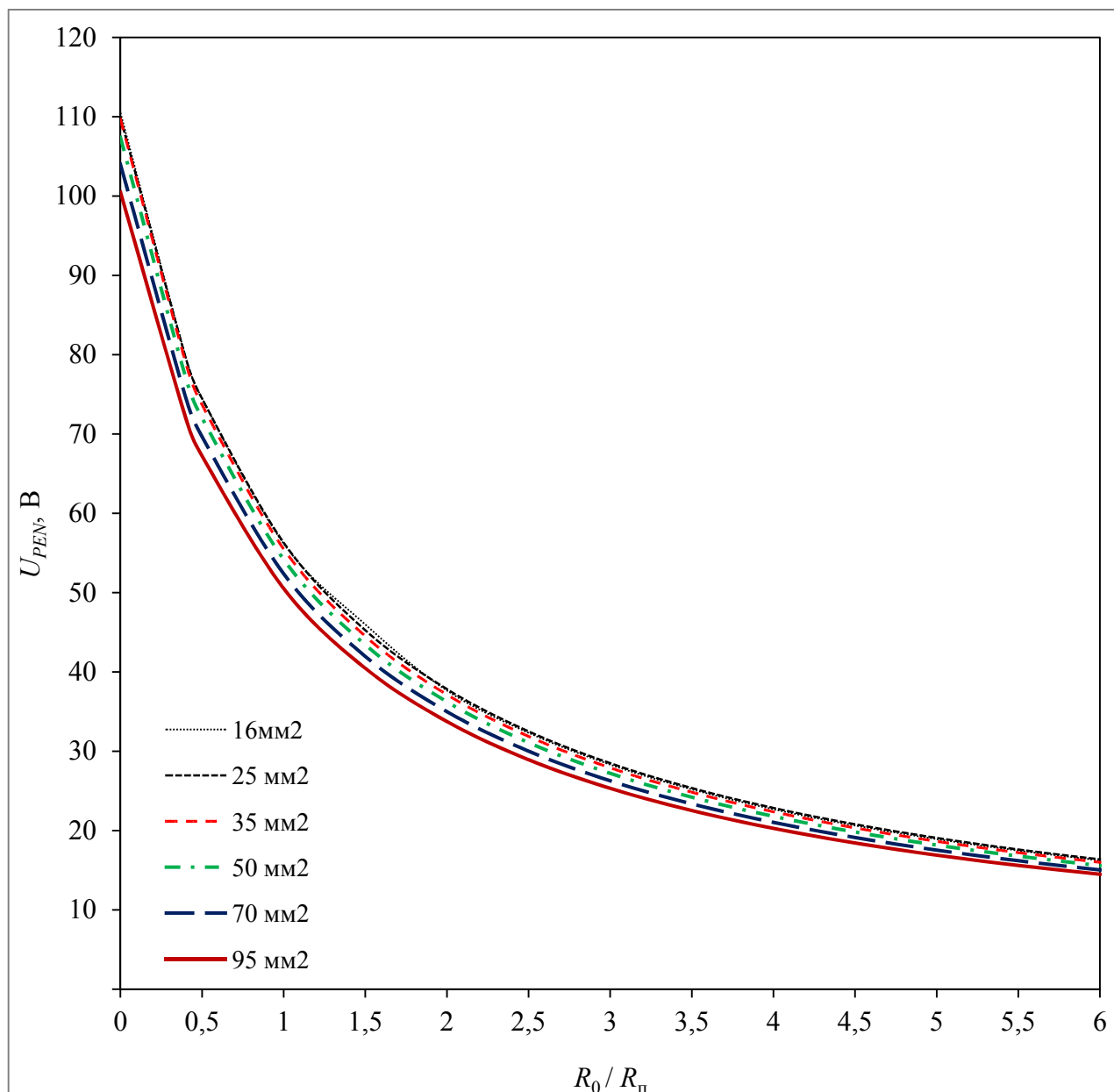


Рисунок 2.15 – Кривые зависимости U_{PEN} от R_0/R_{Π} при ОКЗ для приведенных значений сечений PEN-проводника ВЛ 380 В

Из рисунков 2.11–2.15 следует, что схема соединения обмоток трансформаторов и сечение проводов ВЛ, практически, не влияют на изменение величины U_{PEN} . Исходя из этого, дальнейшие исследования проводились для силовых трансформаторов мощностью 160 кВА и проводами марки АС-35 мм², как наиболее часто встречающиеся в сельской местности и в посёлках городского типа.

Известно [2, 17, 32, 105, 107], что воздушные линии напряжением до 1000 В являются самым ненадежным звеном в системе электроснабжения потребителей. В таких сетях, наряду с междуфазными короткими замыканиями, часто возникают однофазные замыкания на землю (ОЗЗ), а также обрывы фазных и *PEN*-проводников [32]. Перечисленные повреждения приводят к перерывам в электроснабжении потребителей, выходу из строя бытовых электроприемников и создают электроопасные ситуации для людей и животных.

При обрыве и замыкании фазы на землю поражение электрическим током происходит вследствие случайного прикосновения к оборванным, лежащими на земле и находящимися под напряжением проводам линий электропередачи.

Однофазное замыкание на землю может существовать неопределенно долго, поскольку при его возникновении в воздушных сетях 380 В из-за незначительной величины тока однофазного замыкания на землю $I_{\text{ОЗЗ}}$, изменяющегося в пределах от долей до единиц и реже десятков ампер, аппараты защиты не реагируют на такой вид замыкания [32]. Очевидно, при этом вероятность случайного прикосновения к проводам оказывается значимой.

В параграфе 1.2 настоящей работы приведены значения сопротивления замыкания фазы на землю $R_{\text{зм}}$, которое в зависимости от падения оборвавшегося фазного провода на различные поверхности принимает величину десятки, сотни и даже тысячи Ом.

В таблице 2.5 приведены результаты исследования влияние на условия электробезопасности параметров системы зануления в зависимости от соотношения $R_{\text{зм}}/R_0$ при однофазном замыкании на землю (ОЗЗ).

Таблица 2.5 – Исследования влияния на условия электробезопасности параметров системы зануления в зависимости от соотношения R_{3M}/R_0

	R_{3M}/R_0	I_{O33}, A	Фазное напряжение сети в начале линии, В			Фазное напряжение сети в месте ОЗ, В			$UR_0,$ В	$U_{PEN},$ В	$Z_h,$ Ом	$I_h,$ мА
			U_A	U_B	U_C	U_A	U_B	U_C				
$R_{3M} = 20 \text{ Ом}$	∞	7,6	230,7	231,6	230	230,6	231,6	230	78,67	78,64	650	115
	10	10,64	230,7	231,9	229,7	230,6	231,9	229,7	17,86	17,85	3065	5,67
	5	10,07	230,7	231,9	229,8	230,6	231,9	229,8	29,15	29,13	2268	12,24
	2	9,184	230,7	231,8	229,8	230,6	231,8	229,9	46,76	46,74	650	68,44
	0,8	8,442	230,7	231,7	229,9	230,6	231,7	230	61,81	61,77	650	90,46
	0,4	8,071	230,7	231,6	230	230,6	231,7	230	69,23	69,19	650	101,3
	0,3	7,927	230,7	231,6	230	230,6	231,7	230	72,11	72,08	650	105,5
	0,2	7,851	230,7	231,6	230	230,6	231,7	230	73,65	73,61	650	107,8
$R_{3M} = 50 \text{ Ом}$	∞	3,823	230,8	231,2	230,4	230,7	231,2	230,4	39,89	39,87	1844	20,48
	25	4,465	230,8	231,3	230,4	230,7	231,3	230,4	7,497	7,494	4702	2,379
	12,5	4,362	230,8	231,3	230,4	230,7	231,3	230,4	12,63	12,62	3704	4,006
	5	4,186	230,8	231,2	230,4	230,7	231,3	230,4	21,41	21,4	2752	7,411
	2	4,022	230,8	231,2	230,4	230,7	231,2	230,4	29,66	29,64	2242	12,6
	1	3,934	230,8	231,2	230,4	230,7	231,2	230,4	34,02	34,01	2050	15,8
	0,7	3,899	230,8	231,2	230,4	230,7	231,2	230,4	35,78	35,76	1983	17,17
	0,5	3,88	230,8	231,2	230,4	230,7	231,2	230,4	36,72	36,71	1948	17,85
$R_{3M} = 100 \text{ Ом}$	∞	2,089	230,8	231	230,6	230,8	231	230,6	21,87	21,86	2717	7,65
	50	2,27	230,8	231	230,6	230,8	231,1	230,6	3,81	3,809	5876	1,2
	25	2,243	230,8	231,1	230,6	230,8	231,1	230,6	6,489	6,486	4971	1,3
	10	2,195	230,8	231,1	230,6	230,8	231,1	230,6	11,23	11,22	3929	3,56
	4	2,149	230,8	231,1	230,6	230,8	231,1	230,6	15,86	15,85	3279	5,03
	2	2,124	230,8	231,1	230,6	230,8	231,1	230,6	18,39	18,38	3013	5,835
	1,3	2,114	230,8	231,1	230,6	230,8	231,1	230,6	19,42	19,41	2918	6,374
	1	2,108	230,8	231,1	230,6	230,8	231,1	230,6	19,98	19,97	2869	6,626
$R_{3M} = 500 \text{ Ом}$	∞	0,45	230,8	230,9	230,8	230,8	230,9	230,8	4,73	7,41	4723	1,57
	250	0,46	230,8	230,9	230,8	230,8	230,9	230,8	0,77	0,77	7449	0,10
	125	0,459	230,8	230,9	230,8	230,8	230,9	230,8	1,328	1,328	7097	0,19
	50	0,4569	230,8	230,9	230,8	230,8	230,9	230,8	2,337	2,336	6542	0,36
	20	0,4549	230,8	230,9	230,8	230,8	230,9	230,8	3,357	3,356	6065	0,55
	10	0,4538	230,8	230,9	230,8	230,8	230,9	230,8	3,929	3,927	5829	0,67
	6,7	0,4533	230,8	230,9	230,8	230,8	230,9	230,8	4,165	4,163	5737	0,73
	5	0,453	230,8	230,9	230,8	230,8	230,9	230,8	4,294	4,292	5688	0,75

Кривые зависимости значения ожидаемого напряжения на PEN -проводнике относительно земли (U_{PEN}) в зависимости от соотношения R_{3M}/R_0 при возникновении однофазного замыкания на землю (ОЗЗ) приведены на рисунке 2.16

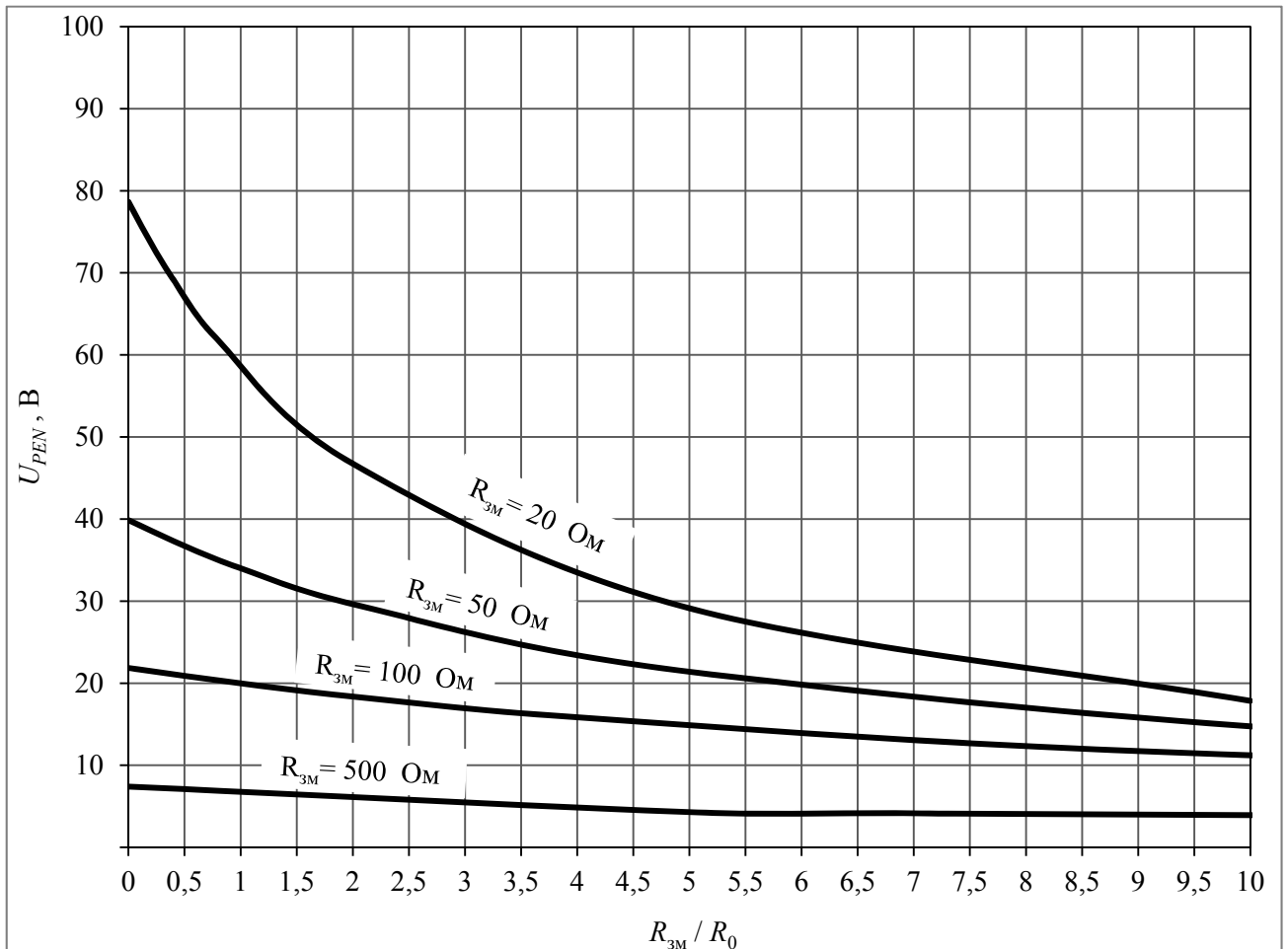


Рисунок 2.16 – Кривые зависимости U_{PEN} от R_{3M}/R_0 при ОЗЗ

Среди существующих недостатков системы зануления весьма опасным является обрыв PEN -проводника. Поскольку при обрыве PEN -проводника и возникновении однофазного замыкания за местом обрыва на всех зануленных электроприемниках и открытых проводящих частях возникает опасный потенциал. С другой стороны, такой режим, как правило, приводит к перенапряжениям и, как следствие, к возможному выходу из строя электроприемников.

Кривая распределение ожидаемого напряжения на PEN -проводнике относительно земли (U_{PEN}) в зависимости от соотношения R_0/R_{Π} при обрыве PEN -проводника и возникновении однофазного замыкания представлена на рисунке 2.17.

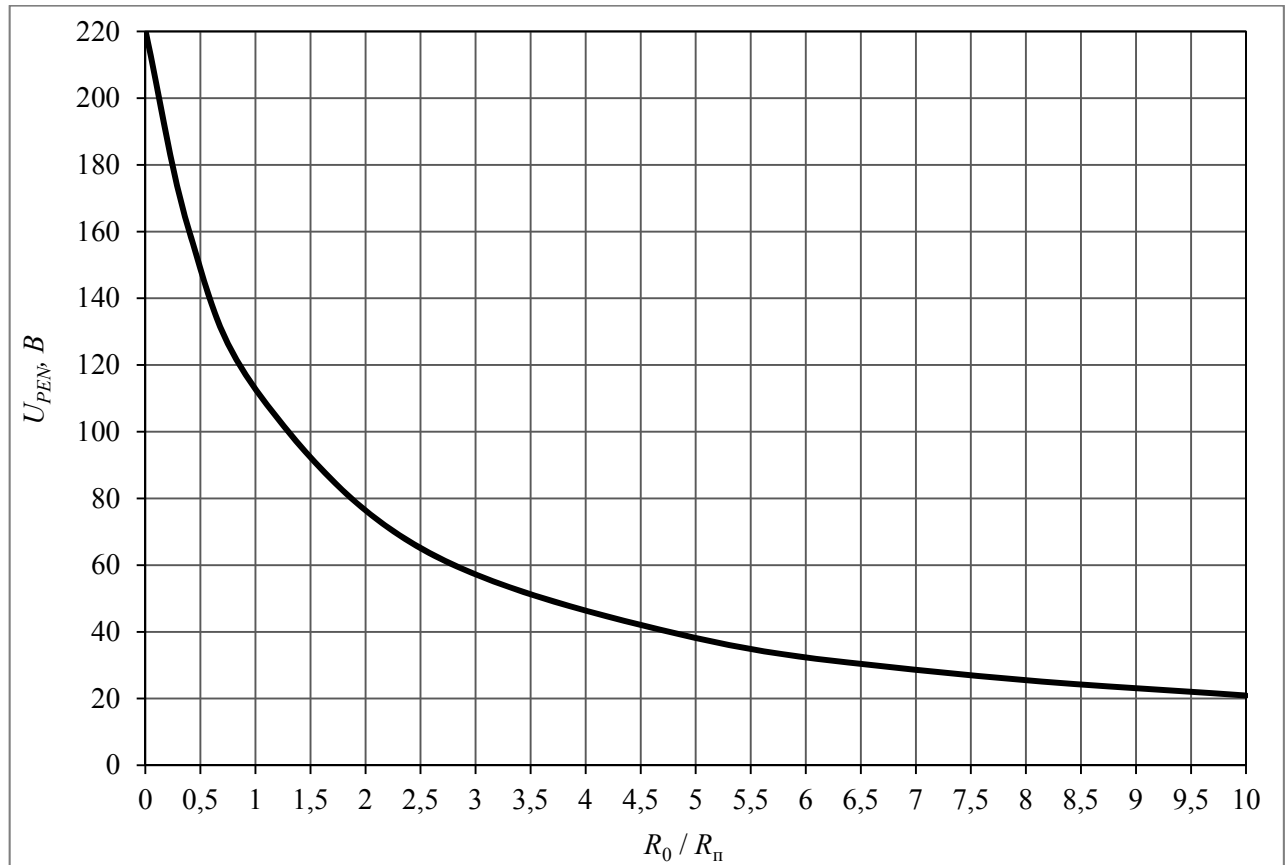


Рисунок 2.17 – Кривая зависимости U_{PEN} от R_0/R_{Π} при обрыве PEN -проводника и возникновении ОКЗ

Таким образом, проведенные на компьютерной модели исследования условий электробезопасности системы зануления подтвердили, что установленные в ПУЭ [95] соотношения R_0/R_{Π} не обеспечивают необходимый уровень электробезопасности, поскольку во всех трех случаях возникновения аварийных ситуаций в системе зануления, при соотношении $R_0/R_{\Pi} = 0,4$ [95] величина U_{PEN} значительно превышает предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов, проходящих через тело человека [27].

2.4 Выводы

1. Для исследования влияния параметров системы зануления на условия электробезопасности компьютерная модель, разработанная ранее на кафедре безопасности жизнедеятельности Южно-Уральского государственного университета в программе MATLAB/Simulink, была дополнена блоком, имитирующим сопротивление тела человека прикоснувшегося к открытой проводящей части (при этом его полное сопротивление меняется в зависимости от величины приложенного напряжения) и блоком имитации однофазного замыкания фазы на землю (ОЗЗ) при различных значениях сопротивления замыкания.

2. Выполненные на компьютерной модели исследования изменений значений напряжений PEN -проводника относительно земли (U_{PEN}) и тока, проходящего через тело человека (I_h), показали, что установленные в ПУЭ значения R_0 и R_{Π} (соотношения $R_0/R_{\Pi} = 0,4$) не обеспечивают необходимый уровень электробезопасности, поскольку при однофазном коротком замыкании на PEN -проводник величины U_{PEN} относительно земли и тока через тело человека I_h существенно превышают нормативные значения, установленные ГОСТом 12.1.038–82.

3. Доказано, что ПДУ напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека при длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с), достигается, например, для сети 380/220 В при соотношении $R_0/R_{\Pi} \geq 10$.

3 РАЗРАБОТКА ПРЕДЛОЖЕНИЙ В НОРМАТИВНЫЕ ДОКУМЕНТЫ ПО ПАРАМЕТРАМ ЗАЗЕМЛЕНИЯ НЕЙТРАЛИ И ПОВТОРНЫХ ЗАЗЕМЛЕНИЙ

Исследование влияния на условия электробезопасности параметров заземления нейтрали и повторных заземлений системы зануления, проведенное в предыдущей главе, показало несовершенство этой защитной меры как при однофазном замыкании фазы на корпус и отказе аппарата защиты, так и при однофазном замыкании на землю.

Это означает, что при нормируемых в ПУЭ [95] значениях сопротивлений R_0 и R_n (соотношения $R_0/R_n = 0,4$), система зануления не соответствует требованиям электробезопасности. При этом, на N , PE или PEN -проводниках при всех напряжениях сети – 660/380, 380/220 и 220/127 В может длительное время существовать напряжение относительно земли равное $0,714U_{\phi}$, что ухудшает условия электробезопасности и будет представлять угрозу для персонала и населения.

В сетях напряжением 0,38 кВ (значительную часть, которых образуют воздушные линии) отличительной особенностью является несимметрия напряжений и токов. Возникает несимметрия в результате изменения потребляемой мощности для отдельных потребителей по величине и времени, также имеет место неслучайная несимметрия, обусловленная неравномерным присоединением однофазных электропотребителей к трехфазной сети. В связи с чем и при нормальном режиме работы линии (отсутствие в сети коротких замыканий, обрывов проводов и т. п.) на зануленных корпусах электропотребителей существует потенциал, который определяется, главным образом, величиной тока несимметрии и сопротивлением заземляющих устройств PEN -проводника [100–101, 106]. На ток несимметрии, протекающий по PEN -проводнику оказывают влияние токи, возникающие в повторных заземлителях PEN -проводников соседних воздушных линий и в металлоконструкциях, находящихся вблизи линий (так называемый «отсос»

тока). Эти токи, как и ток несимметрии, определяются, главным образом, параметрами сети и потребителей: длиной линий, маркой и сечением нулевого провода, количеством повторных заземлителей *PEN*-проводника и величиной их сопротивлений, взаимным расположением потребителей и т. п.

3.1 Влияние «отсоса» на условия электробезопасности в сетях до 1000 В с глухозаземленной нейтралью

Точный расчет тока «отсоса» ВЛ-0,38 кВ с учетом конфигурации всех линий подстанции и расстановки заземлителей *PEN*-проводников весьма трудоемок. По этому вопросу в литературе приводятся противоречивые сведения. В [64] говорится, что уменьшение тока в *PEN*-проводе за счет «отсоса» тока через повторные заземлители составляет около 30 %. При этом отмечено, что на ток «отсоса» влияет количество линий и количество заземлений *PEN*-провода. Такое мнение высказывается и в [134], где указано, что при числе повторных заземлителей на линии больше трех лишь половина из них участвует в «отсосе» тока.

Количественная оценка «отсоса» тока схемы замещения ВЛ-0,38 кВ в режиме однофазного короткого замыкания приводится в [20], где авторы сравнивают расчетную величину тока однофазного короткого замыкания, полученную по известной формуле (3.1), и измеренное значение тока.

$$I_{\text{окз}} = \frac{U_{\phi}}{Z_{\text{T}}/3 + Z_{\text{п.ф-о}}}. \quad (3.1)$$

Серия расчетов, выполненных с помощью ЭВМ, позволила авторам [20] определить влияние различных факторов на ток «отсоса»: число заземлений *PEN*-проводника, значения сезонных колебаний удельного сопротивления грунта, сечения нулевого провода, длины поврежденной воздушной линий. В результате расчетов был сделан вывод, что в режиме максимального влияния (IV климатическая зона по удельному сопротивлению грунта, расстояние между

заземлениями 100 м, *PEN*-проводник марки А–16) ток в *PEN*-проводнике оказался на 30–35 % меньше чем ток, рассчитанный по формуле (3.1). При этом в режиме минимального влияния (I климатическая зона по удельному сопротивлению грунта, расстоянии между заземлителями 200 м, *PEN*-проводник марки А-95) расхождение между расчетным и измеренным значениями составило 1–2 %.

В [106] авторами исследуется токораспределения в схеме зануления при наличии параллельной воздушной линии (рисунок 3.1) и влияние тока, возникающего в повторных заземлителях *PEN*-проводника, для двух четырехпроводных воздушных линий 0,38 кВ, имеющих общий источник питания (трансформатор). Длина линий – 2000 м, *PEN*-проводник имеет 8 повторных заземлителей.

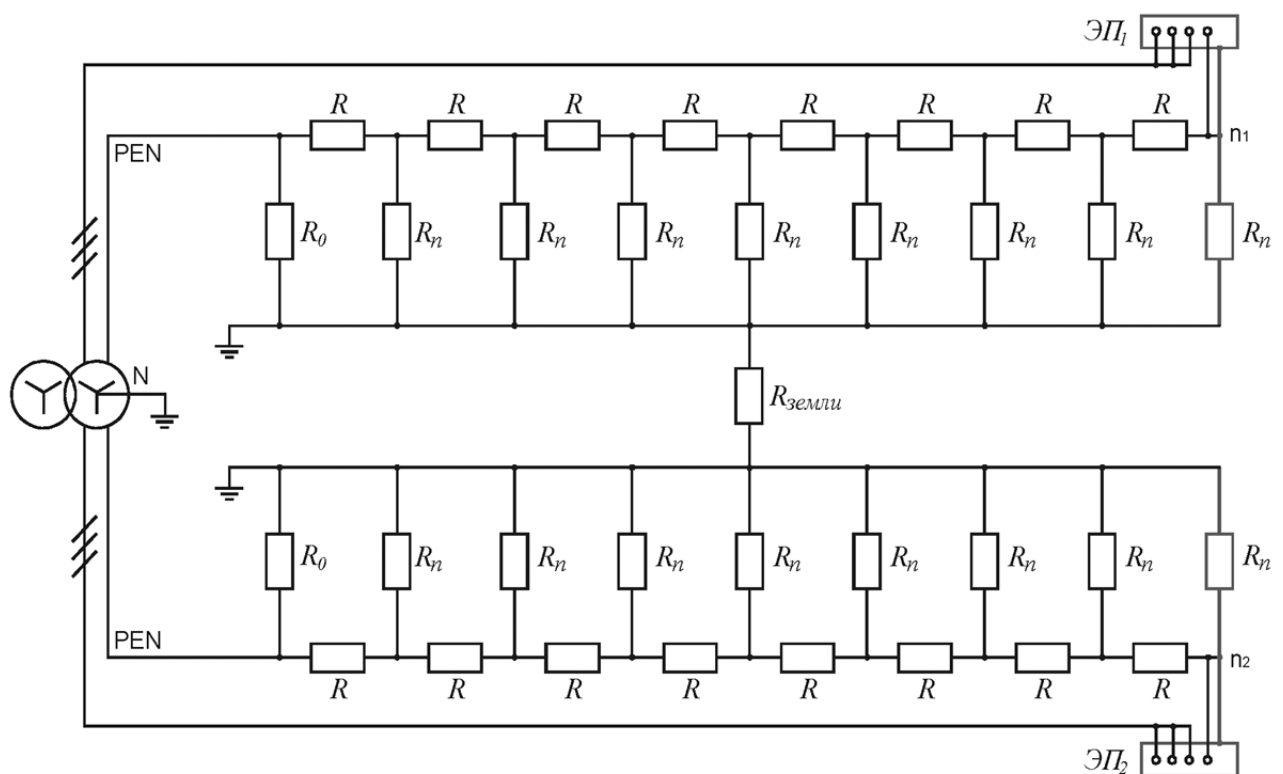


Рисунок 3.1 – Воздушные линии напряжением 0,38 кВ, имеющие общий источник питания: ЭП₁ – ЭП₂ – электроприемники; $R_{земли}$ – сопротивление земли; R_0 – сопротивление заземления нейтрали; R_n – повторные заземлители *PEN*-проводника; R – сопротивления *PEN*-проводника на равных участках провода (250 м – интервал между установкой повторных заземлителей)

В результате аналитического и экспериментального исследования распределения токов, возникающих в системе «PEN-проводник – повторные заземлители – земля» параллельных ВЛ 0,38 кВ, имеющих общий источник питания, авторы [106] получили значения от 0,024 до 0,33 А.

На основе одной из совместных работ Одесского ОКП Украинского отделения института «Сельэнергопроект» и Московского института инженеров сельскохозяйственного производства, в [137] был сделан вывод, что «отсос» тока через повторные заземления в нормальном режиме составляет 1–2 %, а в режиме однофазного короткого замыкания на нулевой проводник достигает 13 %. Это соответствует линии, имеющей пять повторных заземлений при длине секции нулевого провода между ними 1 км. Однако, по утверждению авторов [4], здесь прослеживается ряд неточностей.

В [4] предлагается принципиально иная точка зрения в вопросе значения тока «отсоса» через повторные заземления. В частности, авторы [1] приводят, что согласно [95] расстояние между заземляющими устройствами, предназначенные для повторного заземления должно быть не более 200 м для районов с числом грозových часов в году до 40 и не более 100 м для районов с числом грозových часов в году более 40. Маловероятной является и длина линии, равная 5 км. Уместно отметить [137], где автор указывает, что длина магистрали до наиболее удаленного участка составляет 0,3–0,8 км. Это подтверждается и исследованиями кафедры БЖД ЮУрГУ [106] электрических сетей 0,38 кВ ОАО «МРСК Урала» – «Челябэнерго», в результате которого определена наибольшая длина магистрали, равная 2 км. Кроме того, в расчетах [64, 134, 137] не учитывались индуктивные сопротивления проводов и сопротивления взаимоиндукции между ними.

Таким образом, расчеты авторов [4] показали, что максимальный «отсос» тока через заземляющие устройства составляет 3,7 %. Однако, по причине несоответствия длины реальных сетей с требованиями норм технической эксплуатации (т. е. в реальных электрических сетях длины линий значительно превышают расчетные значения), на практике расчетные случаи, предлагаемые в

[4, 20] не встречаются. Поскольку с увеличением длины линии увеличивается сечение провода и соответственно уменьшается его удельное сопротивление, т. е. условия «отсоса» тока будут менее благоприятным по сравнению с расчетными. Очевидно, влияние заземляющих устройств других линий будет еще меньше. Это говорит о том, что вопреки данным [20, 64, 134, 137] при расчете режимов обрыва фазного провода или короткого замыкания между фазными и *PEN*-проводником, а также нормального режима работы линии влиянием заземляющих устройств *PEN*-проводника можно пренебречь.

Обобщая приведенный материал, можно утверждать, что при исследованиях условий электробезопасности сетей до 1000 В влиянием «отсоса» на эти условия можно пренебречь.

3.2 Рациональное значение сопротивления заземления нейтрали по условиям электробезопасности

Сопротивление заземления нейтрали источника питания R_0 должно быть таким, чтобы в случае замыкания какой-либо фазы на землю через сопротивление $R_{зм}$, напряжение, под которым окажется человек, прикоснувшийся к зануленному корпусу или к *PEN*-проводнику непосредственно, не превышало некоторого допустимого напряжения прикосновения U_{Zh} , т. е. [33]

$$U_{PEN}\alpha_1\alpha_2 \leq U_{Zh}, \quad (3.2)$$

где $U_{PEN} = I_3 R_0$ — напряжение зануленного корпуса (*PEN*-проводника) относительно земли; I_3 — ток замыкания на землю; α_1 и α_2 — коэффициенты напряжения прикосновения.

Этот случай необходимо рассматривать при следующих наиболее тяжелых, но вполне реальных условиях: человек, касаясь зануленного корпуса, находится за пределами зоны растекания тока замыкания на землю, т. е. $\alpha_1 = 1$;

сопротивление растеканию ног человека незначительно по сравнению с сопротивлением тела человека R_h , и им можно пренебречь, т. е. $\alpha_2 = 1$.

Следовательно, преобразуем (3.2):

$$U_{zh} \geq I_3 R_0 = U_\phi \frac{R_0}{R_0 + R_{3M}}, \quad (3.3)$$

или

$$U_{zh} \geq \frac{U_\phi}{1 + \frac{R_{3M}}{R_0}}. \quad (3.4)$$

Для определения величины сопротивления заземления нейтрали R_0 необходимо знать сопротивление замыкания на землю R_{3M} .

Рассматривая оборвавшийся провод как протяженный заземлитель круглого сечения, находящийся на поверхности земли, R_{3M} можно определить по выражению [33]:

$$R_{3M} = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \ln \frac{2l}{D}, \quad (3.5)$$

где ρ – удельное сопротивление грунта, Ом·м; l – длина участка провода, лежащего на земле, м; D – диаметр провода, м

Предположим, что обрыв провода произошел в месте крепления изолятора (непосредственно у опоры). Согласно материалам типовых проектов опор воздушных линий напряжением до 1000 В расчетная длина промежуточного пролета для ВЛ–0,38 кВ принимается не более 50 м. Следовательно, при обрыве фазного провода (с учетом высоты подвески верхнего провода на опоре и свободного провисания его на соседних пролетах) наибольшая его часть, находящаяся на земле, оказывается равной $l = 30$ м (рисунок 3.2).

С учетом этих данных в таблице 3.1 приведены результаты расчета по (3.5) сопротивлений $R_{зм}$ алюминиевых проводов различных сечений и длин для однородного грунта с удельным сопротивлением $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$.

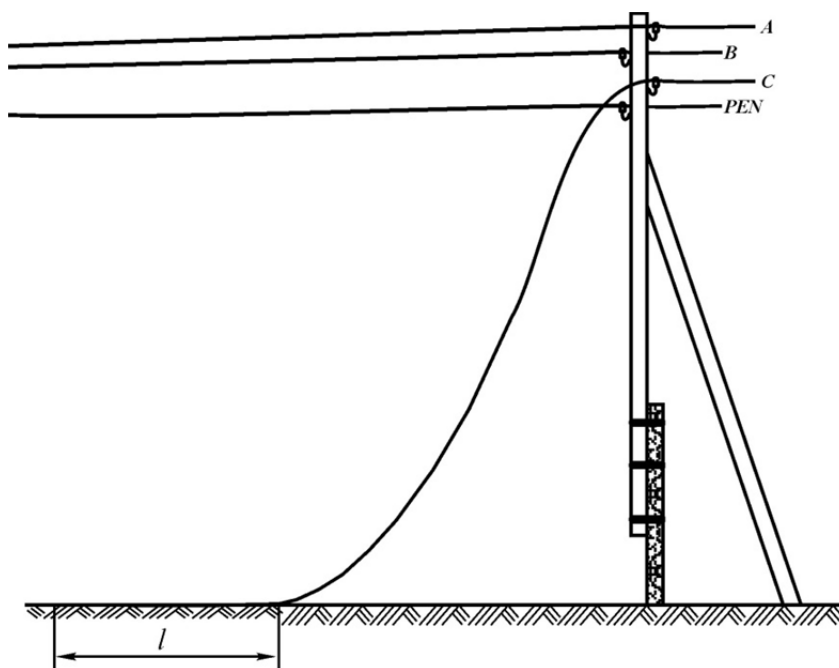


Рисунок 3.2 – Иллюстрация аварийной ситуации обрыва и замыкание фазного провода непосредственно на землю

Таблица 3.1 – Расчетное сопротивление растеканию токов проводов различных сечений, лежащих прямолинейно на однородном грунте с $\rho = 100 \text{ Ом}\cdot\text{м}$ [19]

Длина провода, м	A-16	A-25	A-35	A-50	A-70	A-95
5	48,2	47,6	46,5	45,3	44,2	43,4
10	26,3	25,6	25,1	24,5	24,2	23,9
15	18,4	17,9	17,6	17,2	16,9	16,8
20	14,3	14,1	13,8	13,6	13,3	13,0
25	11,6	11,4	11,2	10,9	10,8	10,7
30	10,0	9,7	9,6	9,4	9,3	9,1

Из таблицы 3.1 видно, что $R_{зм}$ в основном зависит от длины провода, а его сечение влияет на величину $R_{зм}$ незначительно. Статистические исследования показывают, что наибольшую вероятность обрыва имеют провода марки А-16, а обрыв проводов сечением более 50 мм^2 происходит очень редко. Поэтому можно утверждать, что диаметр упавшего провода не превышает 8 мм.

Однако ввиду того, что оборвавшийся провод не лежит строго прямолинейно, а также вследствие неровностей почвы, непосредственный контакт провода с землей составит менее 50 % его длины [19]. Поэтому максимально возможную длину оборвавшегося провода, касающегося земли, можно принять равном 15 м (l).

В соответствии с данными [69] сопротивление растеканию лежащего на земле провода приведенной длины с вероятностью 0,999 составляет 28,8 Ом, а с вероятностью 0,9 - 61,5 Ом. Следует отметить, что данные приведены для «сырого» состояние земли. Сухое состояние земли не представляет для нас особого интереса, ибо в этом случае даже минимальное сопротивление растеканию провода, лежащего на земле, как это приведено в параграфе 1.2, превышает несколько сот Ом.

Сравнивая эти данные с приведенными в таблице 3.1 видим, что даже сопротивление, соответствующее вероятности 0,999, превышает максимальное его значение при длине 10 м, а при длине 15 м оно в 1,7 раза больше. Поэтому с высокой вероятностью можно принять, что сопротивление лежащего на земле после обрыва фазного провода определяется выражением [19]:

$$R_{зм} = 0,3\rho. \quad (3.6)$$

Общеизвестно, что прикосновение оборвавшегося фазного провода с землей сопровождается переходным процессом, например, дуговым разрядом через корешки растений и т. д. В [59] приводится наблюдение этого эффекта, где

авторы указывают, что с течением времени, из - за спекания грунта (рисунок 3.3) в месте падения, значение сопротивления растеканию электрического тока, лежащего на земле провода ($R_{зм}$), увеличивается.

Согласно данным, приведенным в [33], сопротивление растеканию тока неизолированного провода, лежащего на земле, даже при сырой земле (провод погружен в грязь) составляет 15–20 Ом и лишь в редких случаях, когда провод падает в реку или иной водный бассейн оно снижается.



Рисунок 3.3 – Фрагмент поверхностного слоя земли из зоны контакта с проводом [59]

Как правило, при замыкании фазы на землю автоматическое отключение сети от источника питания не происходит, и зануленные корпуса будут длительное время находиться под напряжением U_{PEN} (до устранения повреждения или отключения вручную сети либо поврежденной фазы от источника питания). Поэтому, длительно допустимое напряжение прикосновения принимаем: для производственных электроустановок $U_{Zh}=20$ В, для бытовых электроустановок – $U_{Zh}=12$ В [27].

Обозначив в (3.4) $\frac{R_{3M}}{R_0} = x$, получим:

$$U_{Zh} \geq \frac{U_\phi}{1+x}. \quad (3.7)$$

Подставив в (3.7) соответствующие значения U_ϕ и U_{Zh} [27] находим величину x ,

– для $U_{Zh} = 20$ В:

$$20 \geq \frac{220}{1+x}, \quad (3.8)$$

$$20 + 20x \geq 220, \quad (3.9)$$

$$x \geq 10, \quad (3.10)$$

при $R_{3M} = 20$ Ом:

$$x \geq \frac{R_{3M}}{R_0} = \frac{20}{R_0} = 10, \quad (3.11)$$

$$R_0 = 2 \text{ Ом}. \quad (3.12)$$

– для $U_{Zh} = 12$ В:

$$12 \geq \frac{220}{1+x}, \quad (3.13)$$

$$12 + 12x = 220, \quad (3.14)$$

$$x \geq 17, \quad (3.15)$$

$$x \geq \frac{R_{3M}}{R_0} = \frac{20}{R_0} = 17, \quad (3.16)$$

$$R_0 = 1,2 \text{ Ом}. \quad (3.17)$$

Результаты расчета по (3.8) и (3.13) для других классов напряжений сети представлены в таблице 3.2.

Таблица 3.2 – Значений x (R_{3M}/R_0), при котором достигается ПДУ напряжений прикосновение на PEN-проводнике относительно земли при длительном режиме воздействия ($t_d \geq 1$ с)

U_{ϕ} , В	550*	380	220	127
при $U_{Zh} = 20$ В				
R_{3M}/R_0	26,5	18	10	5,35
при $U_{Zh} = 12$ В				
R_{3M}/R_0	45	31	17	10

*Электрические сети напряжением 0,95/0,4 кВ и 0,55/0,23 кВ с применением индивидуальных трансформаторов предлагается ОАО «НИИЦ МРСК» [10]

Сети напряжением 0,95 кВ с применением индивидуальных трансформаторов 0,55/0,23 кВ и 0,95/0,4 кВ (1 дом – 1 трансформатор) предлагаются специалистами ОАО «НИИЦ МРСК» [80]. Они строятся аналогично стандартным ВЛ, имеют те же габариты и изоляцию, к ним предъявляются такие же типовые требования, что и линиям, например, 380/220 В. Более того, сети данного класса напряжения могут быть организованы на базе уже существующих сетей 0,4 кВ. Для этого требуется заменить часть оборудования на питающей подстанции и установить на ближайшей к потребителю опоре ВЛ индивидуальную ТП [72]. В настоящее время пилотный проект по переводу электрических сетей реализован в г. Богородск Нижегородской области (ОАО «МРСК Центр и Приволжья») на напряжение 0,95 кВ [80].

Графики изменения значений R_0 для классов напряжений сети при длительно допустимом напряжении прикосновения для производственных электроустановок $U_{Zh} = 20$ В [27] приведены на рисунке 3.4.

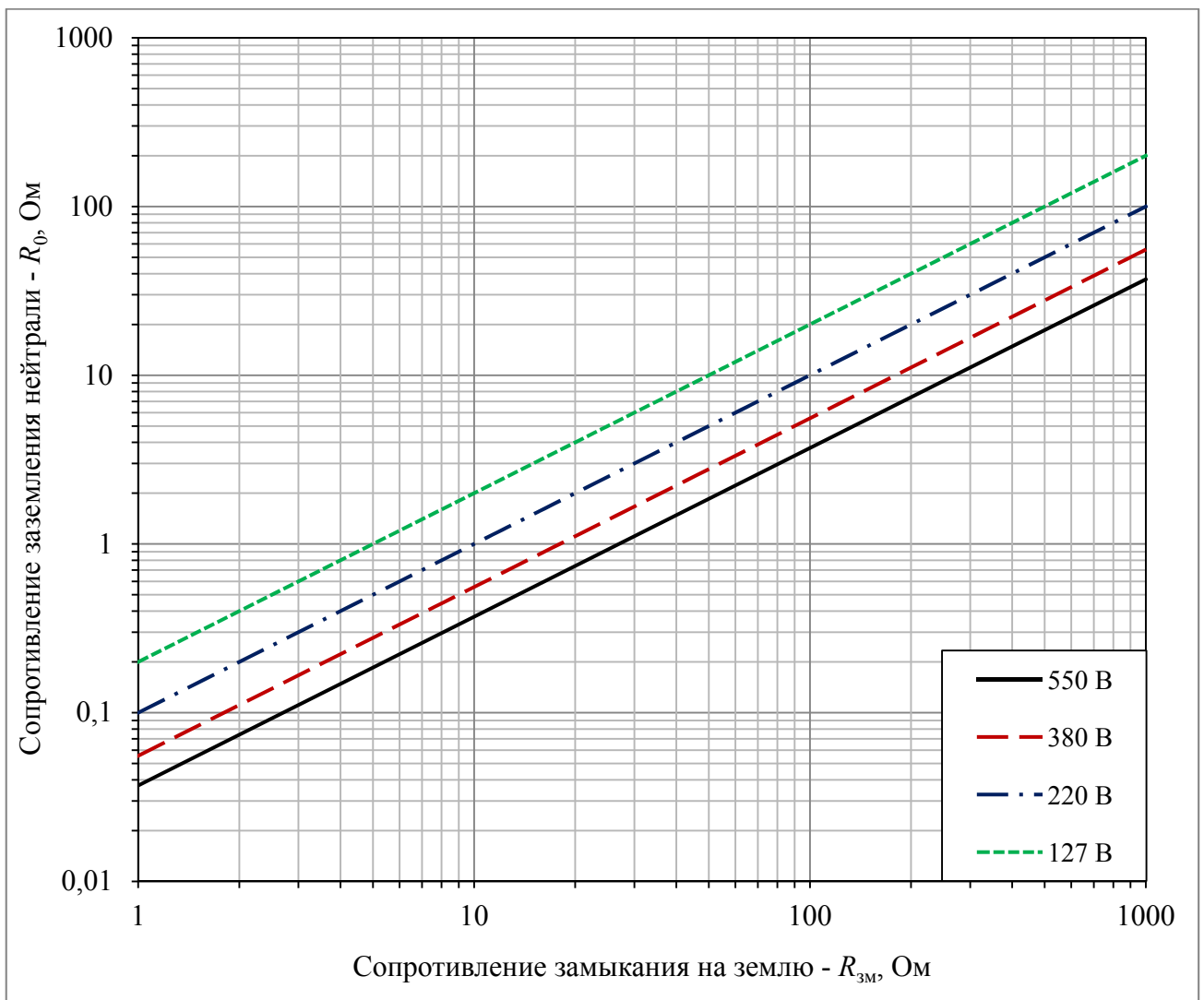


Рисунок 3.4 – Изменение сопротивления заземления нейтрали источника питания, при котором $U_{Zh} \leq 20$ В

На рисунке 3.5 приведены графики изменения значений R_0 для классов напряжений сети при длительно допустимом напряжений прикосновения бытовых электроустановок – $U_{Zh} = 12$ В [27].

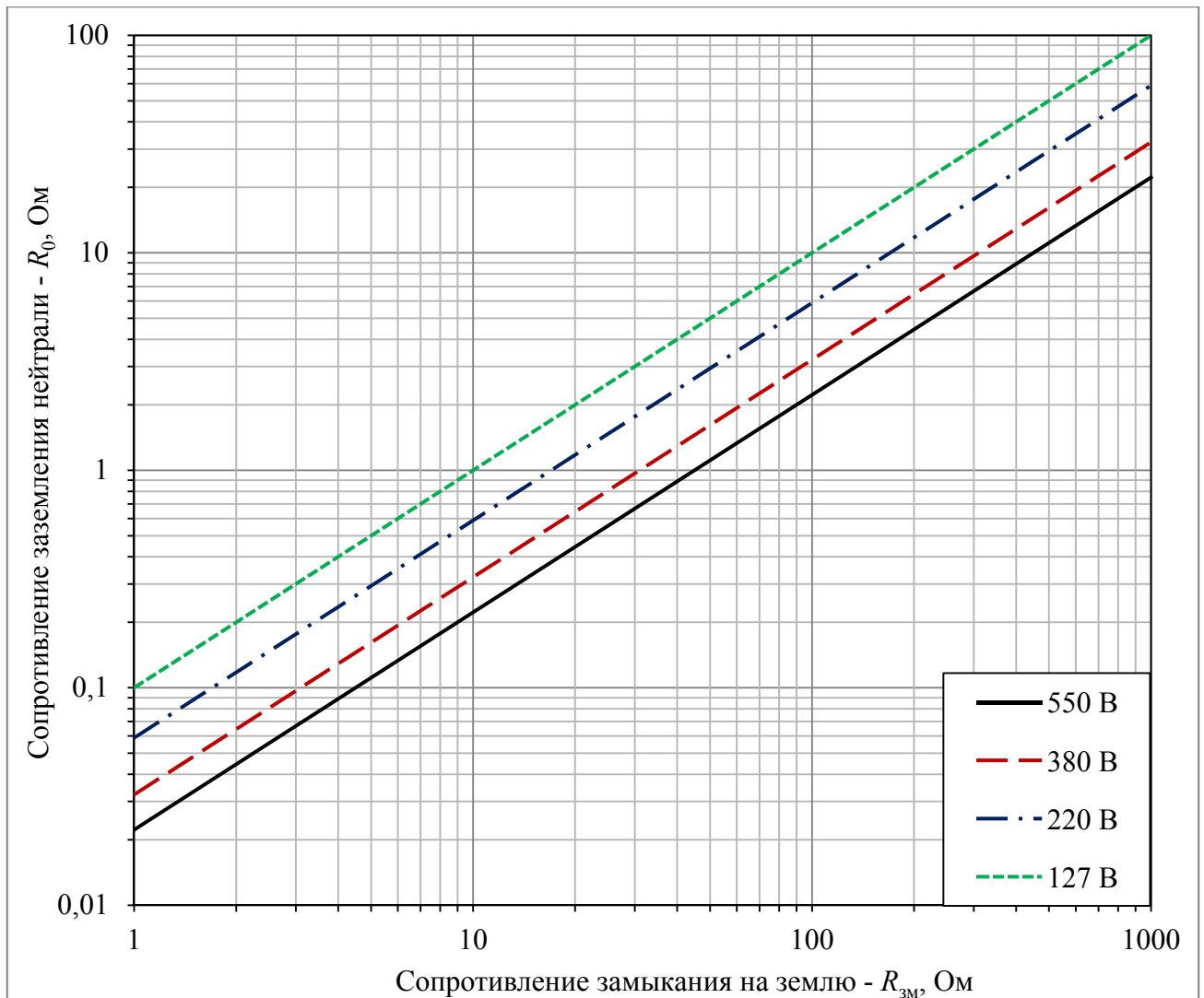


Рисунок 3.5 – Изменение сопротивления заземления нейтрали источника питания, при котором $U_{Zh} \leq 12$ В

Таким образом, приведенные выше результаты исследования позволяют утверждать, что при возникновении однофазных замыканий фазы на землю (ОЗЗ) фиксированное значение сопротивления заземления нейтрали R_0 для приведенных напряжений электрической сети, которое предлагается в ПУЭ, не обеспечивает предельно допустимый уровень напряжений на PEN -проводнике относительно земли.

Величина сопротивления R_0 изменяется линейно от сопротивления растеканию тока неизолированного провода, лежащего на земле $R_{зм}$. ПДУ напряжений на PEN -проводнике относительно земли обеспечивается при определенном соотношении сопротивлений $R_{зм}/R_0$ (рисунки 3.4 и 3.5).

3.3 Рациональное значение суммарного сопротивления повторных заземлений по условиям электробезопасности

Сопротивления повторных заземлений PEN -проводника воздушной линии должны быть такими, чтобы падение напряжения на PEN -проводнике и подключенных к ним открытых проводящих частях электрооборудования, по отношению к земле при любой аварийной ситуации не превышало предельно допустимого значения [27]. Это напряжение существует до момента отключения защитой поврежденной установки. Однако, как отмечалось ранее в параграфе 1.2, на сегодня основным недостатком системы зануления является неспособность быстрого отключения поврежденного участка сети или электроустановки.

Нами поставлена задача обосновать значение сопротивления повторных заземлений PEN -проводника, при котором обеспечивается приемлемый уровень электробезопасности для аварийной ситуации – отказа аппарата защиты по тем или иным причинам.

При оценке уровня электробезопасности внутренним сопротивлением источника питания, сопротивлениями фазного и нулевого проводов пренебрегаем. Это создает определенный запас в обеспечении надежности защиты людей и животных от поражения электрическим током.

При отказе аппарата защиты в схеме зануления и наличии замыкания фазы на корпус напряжение нулевого защитного проводника относительно земли за местом замыкания определяется по выражению (1.10):

$$U_{PEN} = \frac{U_{\phi}}{1 + \frac{R_0}{R_{\Pi}}} . \quad (3.18)$$

Согласно требованиям электробезопасности:

$$U_{PEN} \leq U_{Zh} . \quad (3.19)$$

Следовательно (3.18) принимает вид:

$$U_{Zh} \geq U_{PEN} = \frac{U_{\phi}}{1 + \frac{R_0}{R_{\Pi}}} . \quad (3.20)$$

Отсюда:

$$\frac{R_0}{R_{\Pi}} = y , \quad (3.21)$$

где R_0 определяются по кривым рисунков 3.4 и 3.5. А значение y берутся такими же, что и x , т. е. можно полагать $y = x$ (таблица 3.2).

Результаты расчетов (3.21) для предельно допустимых уровней напряжений при длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с) приведены на рисунках 3.6 и 3.7.

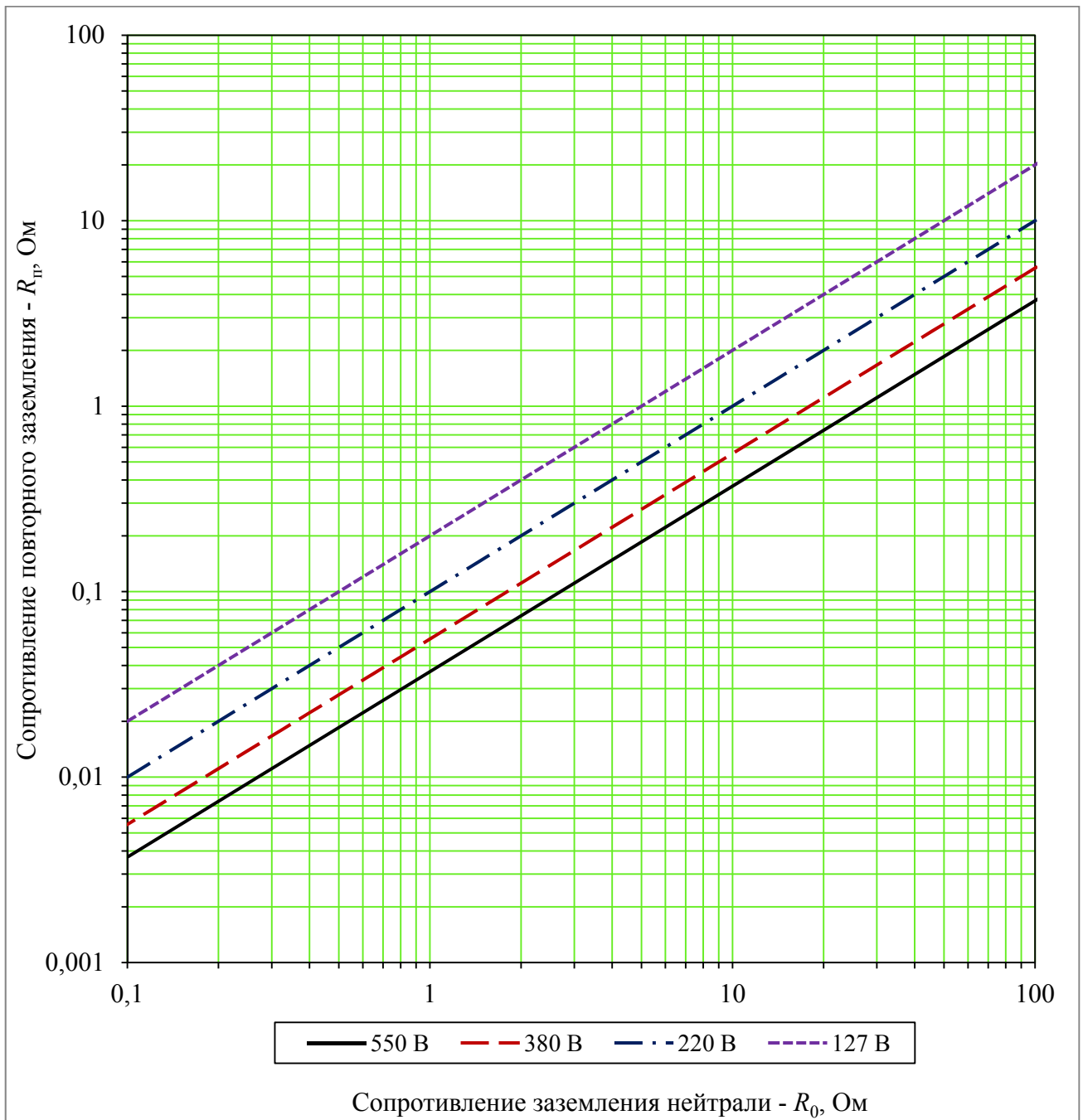


Рисунок 3.6 – Изменение значений сопротивления повторных заземлений при которых $U_{Zh} \leq 20$ В

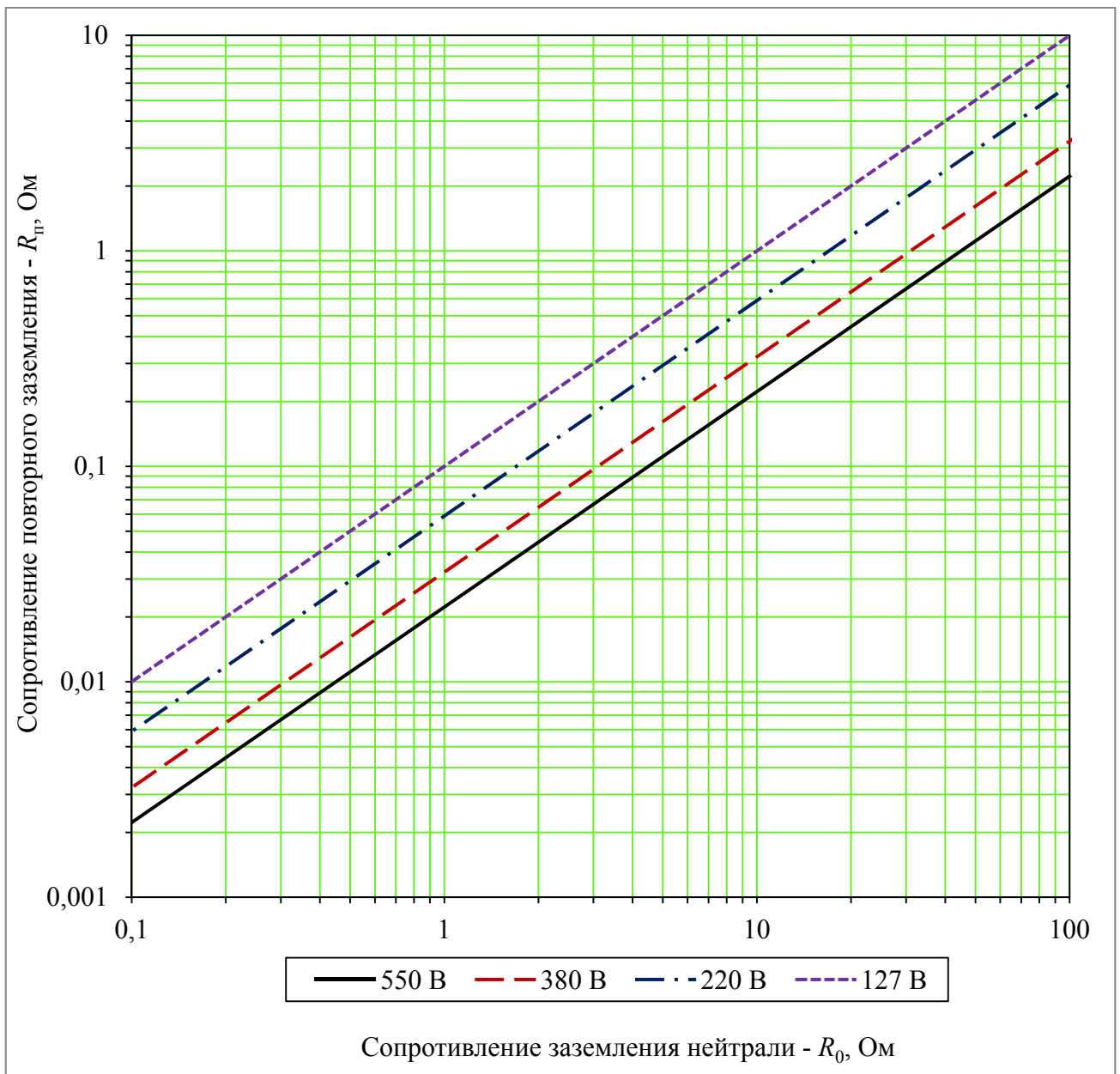


Рисунок 3.7 – Изменение значений сопротивления повторных заземлений при которых $U_{Zh} \leq 12$ В

Полученное, по рисункам 3.6 и 3.7, значение сопротивление $R_{\text{п}}$ является величиной общего сопротивления всех повторных заземлителей *PEN*-проводника воздушной линии.

Найдем значение R_{Π} для каждого из повторных заземлений PEN -проводника ВЛ, согласно выражению [33]:

$$R_{\Pi} \leq nR_0 \frac{U_{Zh}}{I_{PEN}Z_{PEN} - U_{Zh}}, \quad (3.22)$$

где I_{PEN} – часть тока ОКЗ, проходящего по PEN -проводнику от места замыкания фазы на корпус до нейтрали источника питания, А; Z_{PEN} – полное сопротивление участка PEN -проводника, по которому проходит ток I_{PEN} , Ом, которое находится по формуле [33]:

$$Z_{PEN} = \sqrt{R_{PEN}^2 + (X_{PEN} + 0,5X'')^2}, \quad (3.23)$$

где R_{PEN} и X_{PEN} – активное и внутреннее индуктивное сопротивление PEN -проводника, Ом; нулевого защитного проводника, X'' – внешнее индуктивное сопротивление петли фаза – нуль, Ом.

Допуская некоторую ошибку, которая в итоге повышает безопасность, можно принять $I_{PEN} = I_{ОКЗ}$. Тогда искомое сопротивление каждого повторного заземления PEN -проводника определяется по:

$$R_{\Pi} \leq nR_0 \frac{U_{Zh}}{I_{ОКЗ}Z_{PEN} - U_{Zh}}, \quad (3.24)$$

откуда $I_{ОКЗ}$ определяется по (1.2) – (1.9).

Таким образом, в результате проведенных исследований установлено, что величина сопротивления заземления нейтрали источника питания R_0 , обеспечивающая ПДУ напряжений на PEN -проводнике относительно земли, должна выбираться исходя из значения сопротивления растеканию тока неизолированного провода, лежащего на земле (или сопротивления замыкания на землю) $R_{зм}$. Сопротивление же повторного заземления R_{Π} , обеспечивающее ПДУ

напряжений прикосновения, следует выбирать исходя из величины сопротивления R_0 .

3.4 Методика выбора сопротивлений заземления нейтрали и повторных заземлений системы зануления

В результате исследования, проведенных в предыдущих параграфах представленной работы, установлено, что величина сопротивления заземления нейтрали источника питания R_0 , обеспечивающий ПДУ напряжений на *PEN*-проводнике относительно земли должна выбираться исходя из значения сопротивления растеканию тока неизолированного провода, лежащего на земле (или сопротивление замыкания на землю) $R_{зм}$. Сопротивление же повторного заземления $R_{п}$, обеспечивающее ПДУ напряжений прикосновения следует выбрать исходя из величины сопротивления R_0 .

Для упрощения процедуры выбора значений сопротивлений R_0 и $R_{п}$ по условиям электробезопасности предлагается методика, позволяющая определять их величину для любого класса напряжения сетей до 1000 В с ГЗН, которая состоит из следующих этапов:

1. Выполняются предпроектные изыскания и приведение параметров электрической структуры земли к расчетным условиям.

Перед началом расчета и проектирования заземляющих устройств необходимы данные о параметрах электрической структуры земли в месте, где будет сооружаться заземление, причем в соответствии с требованиями ПУЭ [95] для того сезона, в течение которого нормированная электрическая характеристика заземляющего устройства (сопротивление) принимает наибольшее значение. Экспериментальное определение этих параметров и приведение их к расчетным условиям и составляют основное содержание изысканий при проектировании заземляющих устройств. Пользоваться для этой цели данными таблиц нельзя, так как в них приводятся ориентировочные значения ρ , которые могут значительно отличаться от истинных.

К изысканиям и их результатам предъявляют два основных требования. Во-первых, информация о параметрах электрической структуры земли должна быть достаточной для проектирования и последующего сооружения рациональных заземляющих устройств. Во-вторых, сами методы изысканий должны быть как можно проще.

В настоящее время известен ряд методов изысканий, однако практически применяются два из них: с помощью пробного электрода и вертикальное электрическое зондирование [12].

2. Рассчитывается ожидаемое сопротивление растеканию тока фазного провода (сопротивление замыкания фазы на землю), которая определяется по формуле (3.5):

$$R_{зм} = \frac{\rho}{\pi \cdot l} \ln \frac{2l}{D}.$$

Ранее, в параграфе 3.2 данной работы было указано, что сопротивление растеканию тока фазного провода с высокой вероятностью можно принять, равной: $R_{зм} = 0,3\rho$.

3. Исходя из величины сопротивления замыкания фазы на землю $R_{зм}$, по графикам, приведенным на рисунках 3.4 и 3.5 определяется значение R_0 для различных напряжений сети при длительно допустимом напряжений прикосновения электроустановок $U_{Zh}=20$ В и $U_{Zh}=12$ В соответственно.

4. Далее, по графикам рисунков 3.6 и 3.7, в зависимости от выбранного значения R_0 , определяется величина общего сопротивления всех повторных заземлений PEN-проводника воздушной линии для классов напряжений сети, при котором обеспечивается ПДУ напряжений прикосновения электроустановок.

5. По (3.24) определяется значение $R_{п}$ для каждого из повторных заземлений PEN-проводника ВЛ:

$$R_{п} \leq nR_0 \frac{U_{Zh}}{I_{ОКЗ}Z_{PEN} - U_{Zh}},$$

Пример выбора значений R_0 и R_n с помощью разработанной методики приведен в приложении Д.

В заключении оценим изменение уровня электробезопасности при внедрении в практику проектирования разработанной нами методики выбора значений сопротивлений заземления нейтрали и повторных заземлений.

Для оценки уровня электробезопасности используются различные методы. Это и определение коэффициентов частоты и тяжести электропоражений, приходящихся на определенный объем выработанной или потребленной электроэнергии, это и оценка вероятности возникновения электропоражений, это и расчет токов, протекающих через тело человека до и после реализации какого-либо мероприятия и другие.

В нашей работе мы будем оценивать изменение уровня электробезопасности по величине напряжения относительно земли на *PEN*-проводнике.

В 1 и 2 главах показано, что указанное напряжение при значениях R_0 и R_n , установленных ПУЭ, например, для сети напряжением 380/220 В составит не менее 105 вольт.

Учитывая, что выбор R_0 и R_n по разработанной нами методики обеспечит напряжение на *PEN*-проводнике относительно земли 20 или 12 В (в зависимости от потребителя), можно утверждать, что условия электробезопасности улучшаются по этому показателю не менее чем в 5 раз.

3.5 Выводы

1. Для обеспечения в системе зануления величины напряжения *PEN*-проводника относительно земли (U_{PEN}), при котором выполняются требования ПДУ напряжений прикосновения в длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с) при возникновении однофазного замыкания на землю, необходимо и

достаточно выполнить следующее условие: $R_{зм}/R_0 \geq N$, где N определяется напряжением сети. Например, для сети 660/380 В $N \geq 18$.

2. Разработана методика определения величин сопротивления R_0 и $R_{п}$ по условиям обеспечения на PEN-проводнике величины напряжения относительно земли, соответствующей требованиям ПДУ напряжений прикосновения в длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с).

3. При внедрении в практику работы проектных организаций представленной в диссертации методики определения значений сопротивлений R_0 и $R_{п}$ условия электробезопасности, определенные по изменению возможных напряжений прикосновения, улучшатся не менее чем в 5 раз.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В диссертационной работе решена актуальная научно-техническая задача, а именно, обоснованы рациональные с точки зрения обеспечения условий электробезопасности величины сопротивлений заземления нейтрали и повторных заземлений в системе зануления.

Выполненные исследования позволяют сформулировать следующие основные результаты работы:

1. Существующее нормирование параметров заземляющих устройств системы зануления не устраняет недостатки, возникающие при ее эксплуатации. Установлено, что при нормируемых в ПУЭ значениях R_0 и R_n ($R_0/R_n = 0,4$) величины напряжений PEN -проводника относительно земли (U_{PEN}) в случае возникновения однофазных коротких или замыканий на землю существенно превышают ПДУ напряжений прикосновения в длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с), установленные ГОСТом 12.1.038–82.

2. При возникновении однофазного короткого замыкания в системе зануления величина напряжения PEN -проводника относительно земли (U_{PEN}), соответствующая требованиям ПДУ напряжений прикосновения в длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с) достигается при выполнении условия: $R_0/R_n \geq K$, где K определяется напряжением сети. Например, для сети 380/220 В $K \geq 10$.

3. Для обеспечения в системе зануления величины напряжения PEN -проводника относительно земли (U_{PEN}), при котором выполняются требования ПДУ напряжений прикосновения в длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с) при возникновении однофазного замыкания на землю, необходимо и достаточно выполнить следующее условие: $R_{зм}/R_0 \geq N$, где N определяется напряжением сети. Например, для сети 660/380 В $N \geq 18$.

4. Разработана методика определения величин сопротивления R_0 и R_n по условиям обеспечения на PEN -проводнике величины напряжения относительно земли, соответствующей требованиям ПДУ напряжений прикосновения в длительном режиме воздействия ($t_d > 1$ с).

5. При внедрении в практику работы проектных организаций представленной в диссертации методики определения значений сопротивлений R_0 и R_{Π} условия электробезопасности, определенные по изменению возможных напряжений прикосновения, улучшатся не менее чем в 5 раз.

6. Результаты исследования, научные положения, выводы и рекомендации по содержанию главы 1.7 Правил устройства электроустановок 7-го издания представлены в Министерство энергетики Российской Федерации, а также используются в учебном процессе Южно-Уральского государственного университета, Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими и Института энергетики Таджикистана.

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. А.с. РФ 2230415 МПК7 Н 02 Н 5/10, G 01 R. Устройство контроля непрерывности нулевого проводника в воздушных линиях 0,4 кВ / Д.А. Апаров, А.И. Сидоров, В.А. Петров. №2002127852/28, опубл. 10.06.2004. – 4 с.
2. Айзенфельд, А.И. Определение мест короткого замыкания на линиях соответствиями. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / А.И. Айзенфельд, Г.М. Шалыт. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 160 с.;
3. Александров, Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды [Текст] / Г.Н. Александров. – Л.: Энергоатомиздат, 1989.
4. Андреев, В.А. Влияние заземляющих устройств нулевого провода на токи нулевой последовательности в воздушных сетях напряжением 0,38 кВ [Текст] / В.А. Андреев, А.Л. Дубов, В.Ф. Шишкин // Электричество. – 1989. – № 12. – С. 54–56.
5. Андриевский, Е.Н. Эксплуатация электроустановок в сельском хозяйстве [Текст] / Е.Н. Андриевский. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 143 с.
6. Апаров, Д.А. Анализ методов и средств контроля состояния нулевого проводника в сетях 0,4 кВ с глухозаземленной нейтралью [Текст] / Д.А. Апаров // Электробезопасность. – 2001. – №1. – С. 13–17.
7. Баранов, Е.А. Техника безопасности при эксплуатации контактной сети электрифицированных железных дорог и устройств электроснабжения автоблокировки [Текст] / Е.А. Баранов, Я.А. Зельвянский. – М.: Транспорт, 1975. – 120 с.
8. Белоусов, Ю.Ф. О выполнении зануления по допустимому напряжению прикосновения [Текст] / Ю.Ф. Белоусов // Промышленная энергетика. – 1990. – № 7. – С. 48–50.
9. Беляев, Л.С. Применимость вероятностных методов в энергетических расчетах [Текст] / Л.С. Беляев, Л.А. Крумм // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1983. – № 2. – С. 3–11.

10. Бондаренко, В.М. Моделирование и аналитическая оценка условий безопасности труда [Текст] / В.М. Бондаренко // Безопасность труда в промышленности. – 1978. – № 3. – С. 42–44.
11. Буралков, А.А. О вероятностной оценке уровня электробезопасности [Текст] / А.А. Буралков, В.И. Щуцкий // Электричество. – 1982. – № 2. – С. 16–20.
12. Бургсдорф, В.В. Заземляющие устройства электроустановок [Текст] / В.В. Бургсдорф, А.И. Якобс. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 400 с.
13. Валеев, Р. Г. Повышение уровня электробезопасности в электрических сетях напряжением до 1000 В при однофазных коротких замыканиях: дис. ...канд. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / Валеев Рустам Галимьянович. – Челябинск: ЮУрГУ, 2014. – 220 с.
14. Валеев, Р.Г. Методика проведения экспериментальных исследований параметров воздушных линий электропередачи напряжением 380 В [Текст] / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров, А.М. Ершов, Е.Л. Шахин // Электробезопасность. – 2012. – № 2–3. – С. 4–11.
15. Валеев, Р.Г. Моделирование электрической сети напряжением 380 В с воздушными линиями в программной среде MATLAB–SIMULINK [Текст] / Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.М. Ершов, А.И. Сидоров // Известия ВУЗов. Проблемы энергетики. – 2013. – № 9–10. – С. 116–128.
16. Валеев, Р.Г. Об исследовании токовых защит воздушной линии напряжением 380 В в опытной электрической сети [Текст] / Р.Г. Валеев // Материалы LIII международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству»; под ред. д.т.н., проф. Н.С. Сергеева. – Челябинск: Изд-во ЧГАА, 2014. – Ч. IV. – С. 106–111.
17. Васильева, Т.Н. Оценка влияния климатических факторов на отказы воздушных линий 0,4 кВ [Текст] / Т.Н. Васильева, Д.Н. Микрюков // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 2007. – № 6. – С. 16.;
18. Веденеева, Л.М. Оценка влияния повторных заземлений на уровень безопасности в электрических системах TN [Текст] / Л.М. Веденеева,

А.Г. Болотова, В.А. Власов // Энергетика. Инновационные направления в энергетике. CALS-технологии в энергетике. – 2012. – № 1. – С. 26–37.

19. Верхоглядов, М.И. Обоснование сопротивлений повторных заземлений нулевого провода / М.И. Верхоглядов // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1976, – № 6. – С. 28–30.

20. Воронов, О.Н. Влияние повторных заземлений в линиях 0,38 кВ на работу защиты от однофазных к. з. [Текст] / О.Н. Воронов, А.П. Сердешнов, Г.П. Чучман, Н.Е. Шевчик // Энергетик. – 1988. – № 7. – С. 24.

21. Вышинская, Н.Я. Формирование многофакторной модели электротравматизма [Текст] / Н.Я. Вышинская. Безопасность жизнедеятельности: сборник научных трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1992. – С. 29–32.

22. Гарков, А.И. Измерение цепи фаза-нуль в электрических сетях [Текст] / А.И. Гарков, Л.Г. Левин // Промышленная энергетика. – 1970. – № 11. – С. 16.

23. Гладилин, Л.В. Электробезопасность в горнодобывающей промышленности [Текст] / Л.В. Гладилин, В.И. Щуцкий, Ю.Г. Бацежев, Н.И. Чеботаев. – М.: Недра, 1977. – 327 с.

24. Говорухин, В.Н. Введение в Maple V. Математический пакет для всех [Текст] / В.Н. Говорухин, В.Г. Цибулин. – М.: Мир. – 1997.

25. Гордон, Г.Ю. Электротравматизм и его предупреждение [Текст] / Г.Ю. Гордон, Л.И. Вайнштейн. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 256 с.

26. Гордон, Г.Ю. Электротравматизм на производстве [Текст] / Г.Ю. Гордон, В.И. Филипов, В.А. Ярченко. – Л.: Лениздат, 1973. – 213 с.

27. ГОСТ 12.1.038-82 ССБТ. Электробезопасность. Предельно допустимые значения напряжений прикосновения и токов (с Изм. № 1). - М.: ИПК Изд-во стандартов, 2001.

28. ГОСТ 13109-97 Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения. М.: Стандартинформ, 2006. – 35 с.

29. ГОСТ 28249-93. Короткие замыкания в электроустановках. Методы расчета в электроустановках переменного тока напряжением до 1 кВ – М.: Изд-во стандартов, 2001.

30. ГОСТ Р 50571.16-99 (МЭК 60364-6-61-86) Электроустановки зданий. Часть 6. Испытания. Глава 6.1. Приемо-сдаточные испытания [Электронный ресурс]: утв. Постановлением Госстандарта РФ от 28.04.1999 № 149. – Режим доступа: http://ohranatruda.ru/ot_biblio/normativ/data_normativ/9/9473/

31. ГОСТ Р 50571.4.43-2012 (МЭК 60364-4-43:2008) Электроустановки низковольтные. Часть 4-43. Требования по обеспечению безопасности. защита от сверхтока [Электронный ресурс]: утв. Приказом Федерального агентства по техническому регулированию и метрологии от 15 ноября 2012 г. № 865-ст. Офиц. изд. М.: Стандартинформ, 2014. Электронный текст документа подготовлен ЗАО "Кодекс". – Режим доступа: <http://docs.cntd.ru/document/1200103419>

32. Григорьев, А.В. Защита сельских электросетей [Текст] / А.В. Григорьев, А.И. Селивахин, В.И. Сукманов. – Алма-Аты: Кайнар, 1984. – 128 с.

33. Долин, П.А. Основы техники безопасности в электроустановках: Учебное пособие для вузов. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / П.А. Долин. – М.: Энергоатомиздат, 1984. – 448 с.

34. Дьяконов, В.П. Mathematica 4 [Текст] / В.П. Дьяконов. Учебный курс. – СПб.: ПИТЕР. – 2001.

35. Дьяконов, В.П. MATLAB R2006/2007/2008+Simulink 5/6/7. Основы применения. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В.П. Дьяконов. – М.: СОЛОН-Пресс, 2008. – 800 с.

36. Дьяконов, В.П. Справочник по применению системы Eurika [Текст] / В.П. Дьяконов. М.: Наука. Физматлит. – 1993.

37. Дьяконов, В.П. Энциклопедия MathCAD 2001i/11 [Текст] / В.П. Дьяконов. – М.: СК-ПРЕСС. – 2004.

38. Егорушкин, И.О. Учет теплового спада тока однофазного короткого замыкания в воздушных линиях передачи сельских электрических сетей [Текст] / И.О. Егорушкин, Л.П. Костюченко, Я.А. Кунгс, Н.В. Цугленок // Энергетика и

энергосбережение: прил. к «Вестнику КрасГАУ»: Вып. 2. – Красноярск, 2004. – С. 74–82.

39. Ерёмина, Т.В. Метод математического моделирования травмоопасных ситуаций при эксплуатации ручных электрических машин [Текст] / Т.В. Ерёмина, А.Ф. Калинин // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. – 2013. – № 11. – С. 292–296.

40. Ерёмина, Т.В. Анализ риска электротравматизма при эксплуатации электроустановок [Текст] / Т.В. Ерёмина, А.В. Калинин, Д.С. Шурыгин // Вестник ВИЭСХ. – 2014. – № 1 (14). – С. 73–76.

41. Ерёмина, Т.В. Применение теории нечетких множеств к построению моделей риска электроустановок [Текст] / Т.В. Ерёмина, А.Ф. Калинин, А.Ф. Костюков, Г.А. Гончаренко // Вестник ВСГУТУ. – 2015. – Т. 55. – № 4. – С. 9–13.

42. Ершов, А.М. Исследование аварийных режимов в сельских электрических сетях напряжением 380 В [Текст] / А.М. Ершов, Р.Г. Валеев, А.В. Млоток, А.И. Сидоров // Техника в сельском хозяйстве. – 2013. – № 6. – С. 18–21.

43. Зубкова, Т. А. Электрическое сопротивление структурных элементов биогеоценозов [Текст] / Т.А. Зубкова, Н.А. Мартынова, В.М. Белоусов // Известия Иркутского государственного университета. Серия «Науки о Земле». – 2011. – Т. 4, – № 2. – С. 82–89. Онлайн-доступ к журналу: <http://isu.ru/izvestia>

44. Измеритель параметров цепи фаза-нуль ЦК 0220. Руководство по эксплуатации. Ба 2.728.001 [Электронный ресурс] / ПАО "Умасский завод "МЕГОММЕТР". – Умань, 2011.

– Режим доступа: <http://www.megommetr.com/tsk0220.htm>

45. Измеритель сопротивления петли фаза-нуль ИФН-200. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / ЗАО НПФ «РАДИО – СЕРВИС». – Ижевск, 2006. – Режим доступа: http://www.printsip.ru/cgi/download/instr/radio-service/ifn200_instr/IFN-200_manual.pdf

46. Имшенецкий, В. Н. Сельские электрические сети: [Текст] / В.Н. Имшенецкий, С.М. Рожавский. – М.: Колос, 1970. – 392 с.

47. Казимир, А.П. Эксплуатация электроустановок и электробезопасность в сельском хозяйстве [Текст] / А.П. Казимир, И.Е. Кerpелева, Н.И. Прудников. – Л.: Колос. Ленингр. отд-е, 1980. – 191 с.
48. Карякин, Р. Н. Нормы устройства сетей заземления [Текст] / Р.Н. Карякин. 3-е изд. – М.: Энергосервис, 2002. – 240 с.
49. Киселев, А.П. Тело человека как элемент электрической цепи [Текст] / А.П. Киселев // Тр. МИИТ. 1966. Вып. 226. – С. 51–62.
50. Китушин, В.Г. Надежность энергосистем [Текст] / В.Г. Китушин. – М.: Высшая школа, 1984. – 256 с.
51. Князевский Б. А. К расчету напряжений, прикосновения в сетях с глухозаземленной нейтралью с учетом влияния повторных заземлений нулевого провода [Текст] / Б.А. Князевский, Ф.Я. Мотуско, В.Б. Полунин // Известия высших учебных заведений. Серия «Энергетика». – 1971. – № 9.
52. Князевский, Б.А. Охрана труда в электроустановках [Текст] / Б.А. Князевский, Т.П. Марусова, Н.В. Шипунов, Н.А. Чекалин. – М.: Энергия, 1970. – 320 с.
53. Коваленко, И.Н. Вероятностный расчет и оптимизация [Текст] / И.Н. Коваленко. – Киев: Наукова думка, 1989. – 192 с.
54. Колосюк, В.П. Защитное отключение рудничных электроустановок [Текст] / В.П. Колосюк. М.: Недра, 1980. – 334 с.
55. Кораблев, В.П. Устройства электробезопасности. – 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В.П. Кораблев. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 88 с.
56. Кораблев, В.П. Электробезопасность на химических предприятиях [Текст] / В.П. Кораблев. – М.: Химия, 1977. – 231 с.
57. Коструба, С. И. Повторные заземления нулевых проводников [Текст] / С.И. Коструба // Электро. – 2003. – С. 25–29.
58. Коструба, С.И. Математическое моделирование систем обеспечения электробезопасности [Текст] / С.И. Коструба // Электричество. – 1970. – № 9. – С. 87–89.

59. Красных, А.А. Схемы для анализа работы воздушных линий электропередачи с изолированной нейтралью в режиме однофазного замыкания на землю [Текст] / А.А. Красных, И.Л. Кривошеин, А.Л. Козлов, Е.А. Суслов // Электробезопасность. – 2015. – № 4. С. 32–38.
60. Кузнецов, А.И. Техника безопасности в электрических установках [Текст] / А.И. Кузнецов. М.–Л.: Госэнергоиздат, 1950. –342 с.
61. Кузнецов, В.С. К вопросу расчета тока однофазного короткого замыкания в сетях до 1000 В [Текст] / В.С. Кузнецов // Промышленная энергетика. – 1978. – № 1. – С. 38–39.
62. Кузнецов, В.С. Некоторые вопросы повышения электробезопасности при однофазных коротких замыканиях в сетях до 1000 В [Текст] / В.С. Кузнецов // Промышленная энергетика. – 1981. – № 11. – С. 49–52.
63. Лёбль, О. Заземление, зануление, защита выключателями [Текст] / Оскар Лёбль. – Л.–М.: ОНТИ Ленгорлит, 1937. – 151 с.
64. Левин, А.Ш. О выборе способов повышения чувствительности защиты от однофазных к. з. в сельскохозяйственных распределительных сетях [Текст] / А.Ш. Левин, И.М. Фексон // Энергетика и электрификация. – 1988.
65. Макаров, Д.А. Повышение эффективности систем зануления на основе обеспечения первичных критериев электробезопасности: автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / Д.И. Макаров. – Чита: РИК ЧитГУ, 2005. – 22 с.
66. Макаров, Д.А. Требования к устройству и нормированию повторных заземлителей электроустановок в системах электроснабжения 0,38 кВ [Текст] / Д.А. Макаров, И.Ф. Суворов, А.И. Сидоров: Вторая Российская конференция по заземляющим устройствам: [сб. докл.] / под ред. Ю.В. Целебровского. – Новосибирск: Сибирская энергетическая академия, 2005. – С. 11–14.
67. Манойлов, В.Е. Основы электробезопасности. – 5-е изд., перераб. и доп. [Текст] / В.Е. Манойлов. – Л.: Энергоатомиздат, 1991. – 480 с.
68. Манойлов, В.Е. Проблемы электробезопасности [Текст] / В.Е. Манойлов. – М.-Л.: Госэнергоиздат, 1961. – 294 с.

69. Манойлов, В.Е. Сопротивление заземления мест повреждения в сетях 380– 220 В [Текст] / В.Е. Манойлов // Электрификация сельского хозяйства. – 1936. – № 3. – С. 78–80.
70. Михайлов, Д.И. Критерий безопасности при расчете зануления корпусов электроприемников [Текст] / Д.И. Михайлов // Промышленная энергетика. – 1990. – № 8. – С. 38–40.
71. Млоток, А.В. Обеспечение электробезопасности при обрывах фазных и нулевого проводов воздушных линий напряжением 380 В: дис. ...канд. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / Млоток Алексей Владимирович. – Челябинск: ЮУрГУ, 2014. – 191 с.
72. Могиленко, А.В. Снижение потерь электроэнергии Российские реалии. Борьба с хищениями [Электронный ресурс] // Новости ЭлектроТехники. 2015. № 2(92). – Режим доступа: <http://www.news.elteh.ru/arh/2015/92/07.php> (27.04.2016).
73. Мотуско, Ф.Я. Защитные устройства в электроустановках [Текст] / Ф.Я. Мотуско. – М.: Энергия, 1973. – 200 с.
74. Мукминов, Р.А. Вероятностная модель состояний производственного коллектива в потоке событий охраны труда [Текст] / Р.А. Мукминов. // Технология бурения нефтяных и газовых скважин. Уфа. – 1980. – С.227–232.
75. Найфельд, М. Р. Заземление, защитные меры электробезопасности: изд. 4-е перераб. и доп. [Текст] / М. Р. Найфельд. – М.: Энергия, 1971. – 312 с.
76. Найфельд, М.Р. Заземление и защитные меры безопасности [Текст] / М.Р. Найфельд. – М. – Л.: Энергия, 1965. – 288 с.
77. Никольский, О.К. Системы обеспечения электробезопасности в сельском хозяйстве [Текст] / О.К. Никольский. – Барнаул: Алт. кн. изд-во, 1977. – 192 с.
78. Никольский, О.К. Рациональная система учета и анализа электротравматизма [Текст] / О.К. Никольский, А.Р. Упит и др. // Механизация и электрификация социалистического сельского хозяйства. – 1975. – № 1. – С. 23–25.
79. Номоконова, О.В. Применение нечётких множеств в оценке и прогнозировании опасных ситуаций: дис. ...канд. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / О.В. Номоконова. – Челябинск: ЮУрГУ, 2003. – 100 с.

80. ОАО "Россети": инновации и развитие // ЭЛЕКТРОЭНЕРГИЯ. Передача и распределение. Спецвыпуск. – 2014. – 93 с.
81. Оверин, Б.А. Электробезопасность на предприятиях цветной металлургии [Текст] / Б.А. Оверин. – М.: Металлургия, 1992. – 239 с.
82. Окраинская, И.С. Организационно-системные методы повышения уровня электробезопасности на открытых горных работах: дис. ...канд. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / И.С. Окраинская. – Челябинск: ЧГТУ, 1997. – 152 с.
83. Ослон, А. Б. Зануление как способ обеспечения безопасности [Текст] / А.Б. Ослон // Промышленная энергетика. – 1978. – №1. – С. 38–39.
84. Охрана труда в электроустановках: Учебник для вузов [Текст] / Под ред. Б.А. Князевского. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 336 с.
85. Патент № 2295186 Российская Федерация, МПК Н02Н 5/00. Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных и кабельных линий 0,4 кВ и устройство для его осуществления / К.С. Серёжин, И.Ф. Суворов, В.В. Гальцев, А.И. Сидоров; заявитель и патентообладатель ЧитГУ. № 2005140871/09; заявл. 26.12.05; опубл. 10.03.2007, Бюл. №7.
86. Петуров, В.И. Математическое моделирование устройств контроля параметров сопротивления изоляции высоковольтных рудничных электрических сетей [Текст] / В.И. Петуров, И.А. Непомнящих, С.Т. Кисембинов // Перспективи освоєння підземного простору: матеріали 5-ї міжнародної наук. -практ. конф. молодих учених, аспірантів і студентів, 7-8 квітня 2011р./ редкол.: О.М. Шашенко. – Д.: Національний гірничий університет, 2011. – 174 с.
87. Повреждаемость комплектных трансформаторных подстанций сельских распределительных электрических сетей (из материалов ВНИИЭ) // Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства, № 4. – М.: ВГПИИИ «Сельэнергопроект», 1996. – 148 с.
88. Подольский, Л.П. Влияние заземления нейтрали сетей низкого напряжения на условия безопасности [Текст] / Л.П. Подольский. – М.–Л.: Госэнергоиздат, 1946. – 127 с.

89. Покрепа, В.Е. О повышении электробезопасности при эксплуатации электроустановок до 1000 В с глухозаземленной нейтралью [Текст] / В.Е. Покрепа // Промышленная энергетика. – 2000. – № 3. – С. 53–55.

90. Полунин, В.Б. Исследование способов повышения эффективности защиты занулением: автореф. дис. ... канд. техн. наук [Текст] / В.Б. Полунин. – М.: Ротапринт МЭИ, 1976. – 28 с.

91. Попков, В.В. Об элементах и структуре модели несчастного случая [Текст] / В.В. Попков, Ю.М. Френкель // Труды ВостНИИ по безопасности работ в горной промышленности. – 1975. – Вып. 25. – С. 24–30.

92. Потемкина, В.Г. MATLAB 6: Среда проектирования инженерных приложений [Текст] / В. Г. Потемкина. М.: Диалог-МИФИ, 2003. – 448 с.

93. Правила по охране труда при эксплуатации электроустановок: утв. Министерством труда и социальной защиты Российской Федерации от 24.07.2013 № 328н. – М.: ЭНАС, 2014. – 166 с.

94. Правила технической эксплуатации электроустановок потребителей: утв. Приказом Минэнерго России от 13 января 2003 г. № 6 [Текст] / М-во энергетики Российской Федерации. – М.: Энергосервис, 2003. – 392 с.

95. Правила устройства электроустановок: утв. Приказом Минэнерго России от 20 июня 2003 г. № 242 / М-во энергетики Российской Федерации. – 7-е изд. – М.: Изд-во НЦ ЭНАС, 2003.

96. Пресс, С.А. Электрические установки [Текст] / С.А. Пресс, А.А. Пресс // Безопасность труда. Монографии по технике безопасности. – М.: Гострудиздат, 1930. – 484 с.

97. Прибор для измерения параметров однофазной цепи в режиме короткого замыкания «ВЕКТОР». Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / ООО НПФ-МИЭЭ «Приборы Мосгосэнергонадзора». – М., 2009. – Режим доступа: <http://prbe.ru/index.php/pribory/vektor>

98. Приборы для энергетики - ИФН-200, Е6-24, ИС-10 [Электронный ресурс] / «Принцип» – Приборы для научных центров и производства. – Электрон. дан. – М., 2000-2013. – Режим доступа: <http://www.printsip.ru> – Загл. с экрана.

99. Ревякин, А.И. Электробезопасность и противопожарная защита в электроустановках [Текст] / А.И. Ревякин, Б.И. Кашолкин. М.: Энергия, 1980. – 160 с.
100. Рожавский, С.М. Проблема несимметрии в сельских электрических сетях (Обзорная информ.) [Текст] / сост. С.М. Рожавский // Сер. Линии электропередачи и подстанции, сельская электрификация. – М.: Информэнерго, 1981. – 55 с.
101. Рожавский, С.М. Статистические характеристики несимметрии токов и напряжений в сельских сетях 0,4/0,23 кВ [Текст] / С.М. Рожавский, Ю.Ф. Свергун // Руководящие материалы по проектированию электроснабжения сельского хозяйства. – М.: Изд-во ОНТИ «Сельэнергопроект». – 1971. – № 9. – С. 53–62.
102. Руденко, Ю.Н. О безопасности как одном из свойств надежности систем энергетики [Текст] / Ю.Н. Руденко, И.А. Ушаков // Изв. АН СССР. Энергетика и транспорт. – 1985. – № 2. – С.18–24.
103. Рябинин, А.И. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно сложных систем [Текст] / А.И. Рябинин, Г.Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 264 с.
104. Савицкий, Л.В. Обоснование функций системы контроля состояния зануления [Текст] / Л.В. Савицкий, К.С. Фетько, Ш.С. Сайдалиев, А.И. Сидоров // Электробезопасность. – 2012. – № 4. – С. 18–21.
105. Селивахин, А.И. Защита воздушной линии электропередачи 0,38 кВ от обрыва фазного провода [Текст] / А.И. Селивахин, В.П. Кобазев, Х.М. Желиховский // Механизация и электрификация сельского хозяйства. – 1985. – № 7. – С. 55–57.
106. Семенова, М.Н. Обоснование перехода от глухозаземленной нейтрали к изолированной в сетях электроустановок сельскохозяйственного назначения напряжением до 1000 В: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / М.Н. Семенова. – Челябинск: ЧГАА, 2011. – 153 с.
107. Семенова, М.Н. Общая характеристика воздушных линий напряжением до 1000 В [Текст] / М.Н. Семенова // Наука, образование, производство в решении экологических проблем (ЭКОЛОГИЯ – 2008): материалы V Международной научно-технической конференции. – Уфа: Изд-во УГАТУ. – 2008. – Т. 1. – С. 323–328

108. Семенова, М.Н. Разработка методики выбора аппаратов защиты в схеме зануления в воздушных сетях 0,4 кВ [Текст] / М.Н. Семенова // Конкурс грантов студентов, аспирантов и молодых ученых ВУЗов Челябинской области (2008 г.): сборник рефератов научно-исследовательских работ аспирантов. – Челябинск: Изд. центр ЮУрГУ. – 2009. – С. 66–67.

109. Сережин, К.С. Разработка способа и адаптивного устройства контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,38 кВ: дис. ... канд. техн. наук [Текст] / К.С. Сережин. – Челябинск: ЮУрГУ, 2010, – 143 с.

110. Сережин, К.С. Устройство автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных линий 0,38 кВ с функцией адаптивности [Текст] / К.С. Серёжин, И.Ф. Суворов, А.И. Сидоров // Электробезопасность. – 2009. – № 1 – С. 10–15.

111. Сидоров, А. И. Алгоритм расчета зануления в сетях электроустановок до 1000 В с глухозаземленной нейтралью [Текст] / А.И. Сидоров, М.Н. Семенова // Наука ЮУрГУ: материалы 60-й юбилейной научной конференции. Секция технических наук. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ. – 2008. – Т. 1. – С. 131–133.

112. Сидоров, А.И. Влияние повторного заземлителя на условия электропоражения в сетях напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью [Текст] / А.И. Сидоров, Д.А. Макаров, Д.А. Дейс, И.Ф. Суворов // Электробезопасность. – 2000. – № 2-3. – С. 15–23.

113. Сидоров, А.И. Замыкание фазного провода четырехпроводной сети 0,4 кВ на металлические корпуса или крыши гаражей [Текст] / А.И. Сидоров, Ш.С. Сайдалиев // Электробезопасность. – 2014. – № 2. – С. 10–16.

114. Сидоров, А.И. Исследование параметров системы зануления по условиям электробезопасности [Текст] / А.И. Сидоров, Ш.С. Саидалиев // Материалы LV международной научно-технической конференции «Достижения науки – агропромышленному производству» / под ред. докт. техн. наук П.Г. Свечникова. – Челябинск: ЮУрГАУ, 2016. – Ч. 4. – С. 112–117.

115. Сидоров, А.И. Компьютерная модель для исследования условий электробезопасности системы зануления в программной среде MATLAB/Simulink [Текст] / А.И. Сидоров, Ш.С. Сайдалиев, Р.Г. Валеев // Вестник Таджикского

технического университета им. акад. М.С. Осими. Серия «Энергетика». – 2015. – № 1(29). – С. 59–63.

116. Сидоров, А.И. Моделирование сопротивления тела человека при исследовании условий электробезопасности сетей до 1000 В в компьютерной программе Matlab [Электронный ресурс] / А.И. Сидоров, Ш.С. Саидалиев // Безопасность жизнедеятельности предприятий в промышленно развитых регионах: Материалы XI Междунар. науч.-практ. конф. / Под ред.: О.В. Тайлакова. – Кемерово: КузГТУ, 2015. Источник: <http://science.kuzstu.ru/wp-content/Events/Conference/BGD/2015/bgd2015/index.htm>

117. Сидоров, А.И. О величине электрического сопротивления тела человека при компьютерном моделировании исследования условий электробезопасности системы зануления [Текст] / А.И. Сидоров, Ш.С. Саидалиев // Actualscience. – 2016. – Т. 2, № 1 (6). – С. 49–50.

118. Сидоров, А.И. О напряжении пробоя рогового слоя [Текст] / А.И. Сидоров, Н.А. Бендык, Л.И. Торопчина // Автоматизация энергосистем и энергоустановок промышленных предприятий: Сборник научных трудов. – Челябинск: ЧГТУ, 1992. – С. 28–32.

119. Сидоров, А.И. О соотношении величин сопротивлений заземления нейтрали и повторных заземлений [Электронный ресурс] / А.И. Сидоров, Ш.С. Сайдалиев // Наука ЮУрГУ: Материалы 67-й науч. конф. проф.-препод. состава, аспирантов и сотрудников / отв. за вып. С.Д. Ваулин; ЮУрГУ – Челябинск: Изд. Центр ЮУрГУ, 2015. – Секции технических наук. – С. 473–478. – Режим доступа: <http://lib.susu.ru> (обращение 27.04.2016).

120. Сидоров, А.И. Обеспечение электробезопасности в системах электроснабжения: монография [Текст] / А.И. Сидоров, В.И. Петуров, А.В. Пичуев, И.Ф. Суворов. – Чита, ЧитГУ, 2009. – 268 с.

121. Сидоров, А.И. Основы электробезопасности: Учебное пособие [Текст] / А.И. Сидоров. – Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. – 344 с.

122. Сидоров, А.И. Применение перфокарт для анализа электротравматизма на предприятиях черной металлургии [Текст] / А.И. Сидоров //

Электробезопасность на горнорудных предприятиях черной металлургии: Тез. докл. конф. Днепропетровск. – 1975. – С. 40–41.

123. Сидоров, А.И. Распределение потенциалов вблизи места падение фазного провода [Текст] / А.И. Сидоров, Ш.С. Сайдалиев // Безопасность жизнедеятельности глазами молодежи: сборник материалов III-й Всероссийской студенческой конференции (с международным участием). – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ. – 2014. – С. 79–82

124. Сидоров, А.И. Теория и практика системного подхода к обеспечению электробезопасности на открытых горных работах : дис. ... д-ра техн. наук : 05.26.01 [Текст] / Сидоров Александр Иванович. – Челябинск: ЧГТУ, 1994. – 444 с.

125. Система учета и анализа электротравматизма [Текст] / В.И. Щуцкий, А.М. Маврицын, Ю.В. Ситчихин, А.И. Сидоров, С.Т. Щергин. – М.:ЦНИЭИуголь, 1977. – 17 с.

126. Ситчихин, Ю.В. Повышение безопасности при эксплуатации электроустановок 6, 10 кВ открытых горных разработок: дис. ... канд. техн. наук: 05.26.01 [Текст] / Ситчихин Юрий Вениаминович. – Челябинск, 1986. – 235 с.

127. Ситчихин, Ю.В. Совершенствование устройств контроля параметров заземляющей цепи электроустановок [Текст] / Ю.В. Ситчихин, А.И. Сидоров, М.П. Кудреватых // Охрана труда в цветной металлургии. Тезисы докладов научно-практической конференции. – Челябинск. – 1990. – С. 20–22.

128. Слободкин, А.Х. Обзор российского рынка устройств защитного отключения и анализ эффективности осуществляемой ими защиты в сетях напряжением 380/220 В [Текст] / А.Х. Слободкин, В.М. Пупин // Промышленная энергетика. – 2000. – № 11. – С. 43–49.

129. Солуянов, Ю.И. О необходимости повторного заземления электрооборудования в электроустановках до 1000 В с заземленной нейтралью [Текст] / Ю.И. Солуянов // Промышленная энергетика. – 1990. – № 6. – С. 43–45.

130. Спеваков, П.И. Проверка на автоматическое отключение линий в сетях до 1000 В [Текст] / П.И. Спеваков. – М.: Энергия, 1971. – 88 с.

131. Суворов, И.Ф. Развитие теории, разработка методов и средств обеспечения электробезопасности в системах электроснабжения напряжением до 1000 В: дис. ... д-ра техн. наук: 05.26.01 [Текст] / Суворов Иван Флегонтович. – Чита: ЧитГУ, 2006. – 457 с.

132. Суворов, И.Ф. Способ автоматического контроля параметров нулевого провода воздушных и кабельных линий 0,4 кВ [Текст] / И.Ф. Суворов, А.И. Сидоров, К.С. Сережин, В.В. Гальцев // Электробезопасность. – 2005. – № 2. – С. 17–22.

133. Суворов, И.Ф. Устройство дискретного контроля непрерывности PEN-проводника [Текст] / И.Ф. Суворов // Электробезопасность. – 2005. – № 3. – С. 25–28.

134. Сукманов, В.И. Исследование распределения токов нулевой последовательности в нормальном и аварийном режиме работы сельских сетей 0,38 кВ [Текст] / В.И. Сукманов. – Труды МИИСП, 1974. – Выпуск 3.

135. Толмачев, В.Д. Новые приборы контроля электробезопасности электроустановок [Текст] / В.Д. Толмачев, А.В. Сакара, Г.И. Терехов // Промышленная энергетика. – 2004. – № 4. – С. 50–53.

136. Феськов, Е.М. Устройство защиты многофазной воздушной линии от последствий обрыва нулевого провода [Текст] / Е.М. Феськов, Т.Ю. Дмитриева // Изобретения. Полезные модели. Официальный бюллетень Российского агентства по патентам и товарным знакам. М: ФИПС. – 2002. – №11.

137. Херсонский, А.С. Обнаружение замыканий на землю сельских воздушных линий 0,38 кВ [Текст] / А.С. Херсонский. – В кн.: Рациональная электрификация сельского хозяйства. – М.: МИИСП, 1984.

138. Цапенко, Е.Ф. Защитные свойства зануления при напряжении 660 В [Текст] / Е.Ф. Цапенко, В.П. Кораблев // Промышленная энергетика. – 1972. – № 10. – С. 11–13.

139. Черкасова, Н.И. Моделирование, анализ и оптимизация потерь в распределительных электрических сетях 10-0,4 кВ: монография

[Текст] / Н.И. Черкасова. — Рубцовск, Рубцовский индустриальный ин-т, ГОУ ВПО «Алтайский. гос. технический ун-т им. И. И. Ползунова», 2008. — 95 с.

140. Черкасова, Н.И. Математическая модель травмоопасных ситуаций в электрических сетях 0,4 кВ [Текст] / Н.И. Черкасова, Г.А. Гончаренко, О.К. Никольский // Вестник Красноярского государственного аграрного университета. — 2013. — № 8. — С. 198–202.

141. Черных, И.В. Моделирование электротехнических устройств в Matlab, SimPowerSystems и Simulink [Текст] / И.В. Черных. — М.: ДМК Пресс; СПб.: Питер, 2008. — 288 с.

142. Шипунов, Н.В. Анализ электротравматизма на предприятиях стройиндустрии [Текст] / Н.В. Шипунов, Л.О. Петри, В.А. Шаймергенов // Труды МЭИ. — М.: МЭИ, 1972, — вып. 106. — С. 42–50.

143. Щуцкий, В.И. Безопасность при эксплуатации электротехнических систем: учеб. Пособие [Текст] / В.И. Щуцкий, А.И. Сидоров. — Челябинск: Изд-во ЮУрГУ, 2001. — 282 с.

144. Щуцкий, В.И. Методика определения поражающего тока при расследовании электропоражений [Текст] / В.И. Щуцкий, А.И. Сидоров // Изв. Вузов СССР. Серия Энергетика. — 1991. — №12. — С. 50–53.

145. Щуцкий, В.И. О расследовании электропоражений [Текст] / В.И. Щуцкий, А.И. Сидоров, Ю.В. Ситчихин // Промышленная энергетика. — 1977. — №12. — С. 31–32.

146. Электрические сети сверх- и ультравысокого напряжения ЕЭС России. Теоретические и практические основы: в 3 т. [Текст] / под общей редакцией чл. - корр. РАН А.Ф. Дькова. М.: НТФ «Энергопрогресс» Корпорации «ЕЭЭК», 2012.

147. Электробезопасность на открытых горных работах: справ. пособие [Текст] / В.И. Щуцкий, А.И. Сидоров, Ю.В. Ситчихин, Н.А. Бендяк. — М.: Недра, 1996. — 266 с.

148. Якобс, А.И. Электробезопасность в сельском хозяйстве [Текст] / А.И. Якобс, А.В. Луковников. — М.: Колос, 1981. — 239 с.

149. MZC-300 Измеритель параметров цепей электропитания зданий. Руководство по эксплуатации [Электронный ресурс] / Компания «СОНЭЛ» – М., 2011. – Режим доступа: <http://www.sonel.ru/common/files/manual/MZC300.pdf>
150. Calvas, R., Lacroix, B. System earthing in LV. Cahier technique no. 172. Editor: Schneider Electric, 2004.
151. Grounding and bonding electrical systems. Produced and Distributed by Engineer Educators, Inc., 2008. [Online].
URL: <https://www.engineereducators.com/docs/groundingandbonding2-2.pdf>
152. Massimo A.G. Mitolo. Electrical Safety of Low-Voltage Systems [Online] / M. A. G. Massimo. – USA: The McGraw-Hill Companies, Inc., 2009. – p. 292. ISBN: 978-0-07-150818-6.
153. Power Engineering Guide. Edit. 7.1. Answers for energy. Publishing House: Publicis Pro, Erlangen, Germany, 2014. [Online]. URL: siemens.com/energy/peg
154. Short, T.A. Electric Power Distribution Handbook. 2nd ed. [Online] / T.A. Short. – Boca Ration, FL.: CRC Press, 2014. – p. 900. ISBN-13: 978-1-4665-9866-9 (eBook–PDF).
155. Vijayaraghavan, G. Practical grounding, bonding, shielding and surge protection. – (Practical professional). 1. Electric apparatus and appliances – Protection 2. Electric currents – Grounding I. Title 621. 3'17.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе
ФГАОУ ВО «Южно-Уральский
государственный университет
(национальный исследовательский университет)»,
доктор технических наук, профессор
_____ Радионов А. А.
_____ 2016 г.



СПРАВКА

**о внедрении результатов
диссертационной работы Ш.С. Саидалиева
«Обоснование параметров заземления нейтрали
и повторных заземлений в системе зануления»**

Результаты диссертационной работы Саидалиева Шахриёра Саъдуловича «Обоснование параметров заземления нейтрали и повторных заземлений в системе зануления» внедрены в учебный процесс Южно-Уральского государственного университета, в частности:

– при изучении студентами направления «Электроэнергетика и электротехника» дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» – значения сопротивлений R_0 и R_n , обеспечивающий ПДУ напряжений на PEN-проводнике относительно земли;

– при изучении студентами направления «Техносферная безопасность» дисциплины «Основы электробезопасности» – обзор существующих методов и средств обеспечения электробезопасности в сетях напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью.

Заведующий кафедрой
«Безопасность жизнедеятельности»
ФГАОУ ВО «ЮУрГУ (НИУ)»,
доктор технических наук, профессор

Сидоров А.И.

ПРИЛОЖЕНИЕ Б



УТВЕРЖДАЮ

Проректор по учебной работе

Таджикского технического университета

имени академика М.С. Осими,

кандидат технических наук, доцент

Гадоев С.А.

2016 г.

СПРАВКА

о внедрении результатов

диссертационной работы Ш.С. Саидалиева

«Обоснование параметров заземления нейтрали

и повторных заземлений в системе зануления»

Результаты диссертационной работы Саидалиева Шахриёра Саъдудоевича «Обоснование параметров заземления нейтрали и повторных заземлений в системе зануления» внедрены в учебный процесс Таджикского технического университета имени академика М.С. Осими, в частности:

– при изучении студентами направления «Электроэнергетика и электротехника» дисциплины «Безопасность жизнедеятельности» – анализ существующих методов и средств обеспечения электробезопасности в сетях напряжением до 1000 В с глухозаземленной нейтралью.

Заведующий кафедрой

«Безопасность жизнедеятельности

и экологии» ТТУ им. акад. М.С. Осими,

кандидат технических наук, доцент

Идиев М. Т.

ПРИЛОЖЕНИЕ В



МИНИСТЕРСТВО ЭНЕРГЕТИКИ И ВОДНЫХ РЕСУРСОВ РЕСПУБЛИКИ
ТАДЖИКИСТАН
ИНСТИТУТ ЭНЕРГЕТИКИ ТАДЖИКИСТАНА

735140, г.Курган-Тюбе, ул. Б.Гафурова- 27, Тел.: 8322222634, Факс: 8322222364, E-mail: nazarov-h2013@mail.ru.

УТВЕРЖДАЮ

Ректор

Института энергетики Таджикистана,
кандидат технических наук, доцент

Назаров Х. Х.

2016 г.



СПРАВКА

об использовании материалов диссертационной работы

**Саидалиева Шахриёра Саъдулоевича «Обоснование параметров
заземления нейтрали и повторных заземлений в системе зануления»**

Результаты диссертационной работы Саидалиева Шахриёра Саъдулоевича «Обоснование параметров заземления нейтрали и повторных заземлений в системе зануления» используются в учебный процесс Института энергетики Таджикистана, в частности:

– при изучении студентами электроэнергетического факультета специальности 430103 «Электроснабжение» и 530104-03 «Автоматики и релейная защита электроустановок» дисциплины «Электробезопасность» – обзор существующих методов и средств обеспечения электробезопасности в сетях напряжением до 1 кВ с глухозаземленной нейтралью.

Заведующий кафедрой
«Электроснабжение и релейная защита»

Ятимов Х. А.

ПРИЛОЖЕНИЕ Г



МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ АВТОНОМНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ

«ЮЖНО-УРАЛЬСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ
(НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ)»
(ФГАОУ ВО «ЮУрГУ(НИУ)»)

Проспект Ленина, 76, Челябинск, Россия 454080,
Тел./факс (351)267-99-00, <http://www.susu.ru/>, e-mail: info@susu.ru
ОКПО 02066724, ОГРН 1027403857568, ИНН/КПП 7453019764/745301001

19 СЕН 2016

№ В-309-04/02-1064

На № _____ от _____

Министерство энергетики
Российской Федерации

Департамент административной
и законопроектной работы

107996, Москва,
ул. Щепкина, д.42

Направляем Вам материалы диссертационной работы Саидалиева Ш. С. на тему «Обоснование параметров заземления нейтрали и повторных заземлений в системе зануления». Диссертация выполнена на кафедре «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета.

Научный руководитель: Сидоров А. И., доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой «Безопасность жизнедеятельности» Южно-Уральского государственного университета.

Просим рассмотреть возможность учета представленных материалов при корректировке содержания требований глав Правил устройства электроустановок 7-го издания.

Проректор по научной работе,
доктор технических наук, профессор

С. Д. Ваулин

Сидоров А. И.
(351) 267-94-49

66311

ПРИЛОЖЕНИЕ Д

Пример выбора значений R_0 и R_n с помощью разработанной методики.

Применение методики, изложенной в параграфе 3.4., рассмотрим на следующем примере.

От отдельно стоящей трансформаторной подстанции должен быть запитан по воздушной линии животноводческий комплекс крупного рогатого скота.

Известно: $S_{тр} = 160 \text{ кВ} \cdot \text{А}$; $L_{линии} = 1,2 \text{ км}$; Провод марки АС – 35; удельное сопротивление грунта, измеренное при проведении предпроектных изысканий, составило $\rho = 130 \text{ Ом} \cdot \text{м}$.

По формуле (3.6) определяем ожидаемое сопротивление растеканию тока фазного провода:

$$R_{зм} = 0,3 \cdot \rho = 39 \text{ Ом}.$$

Исходя из величины сопротивления замыкания фазы на землю $R_{зм}$, по графику, приведенному на рисунке 3.4 определяется значение R_0 для сети напряжением 380/220 В при длительно допустимом напряжений прикосновения электроустановок $U_{zh} = 20 \text{ В}$.

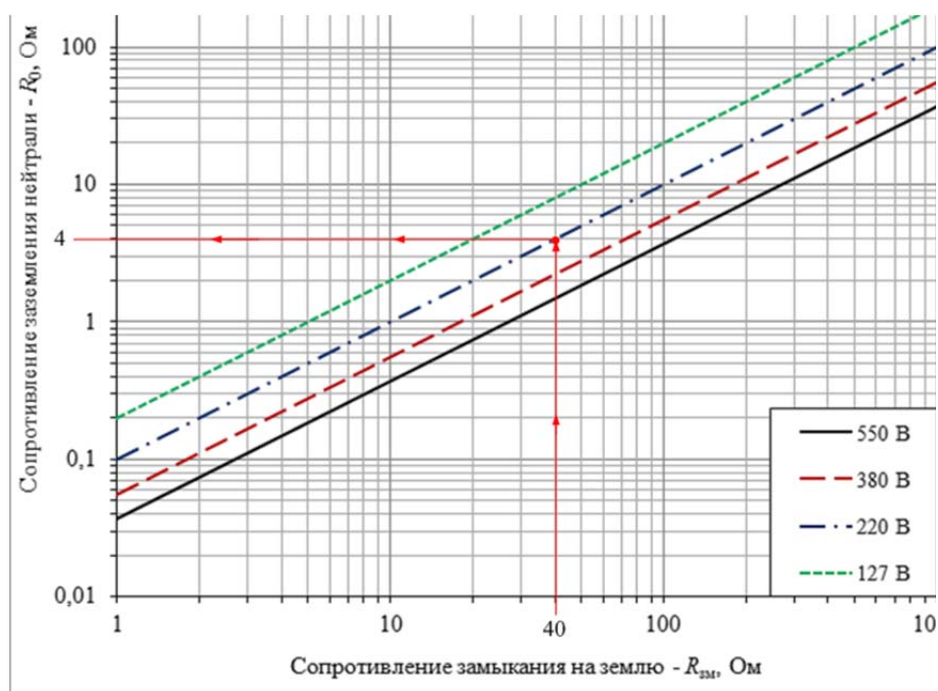


Рисунок Д.1 – Выбор значения R_0 при $R_{зм} = 40 \text{ Ом}$ сети 380/220 В

Далее, по графику рисунка 3.6, в зависимости от выбранного значения R_0 , определяется величина общего сопротивления всех повторных заземлений R_{Π} PEN-проводника воздушной линии для классов напряжений сети, при котором обеспечивается ПДУ напряжений прикосновения электроустановок $U_{Zh} = 20$ В.

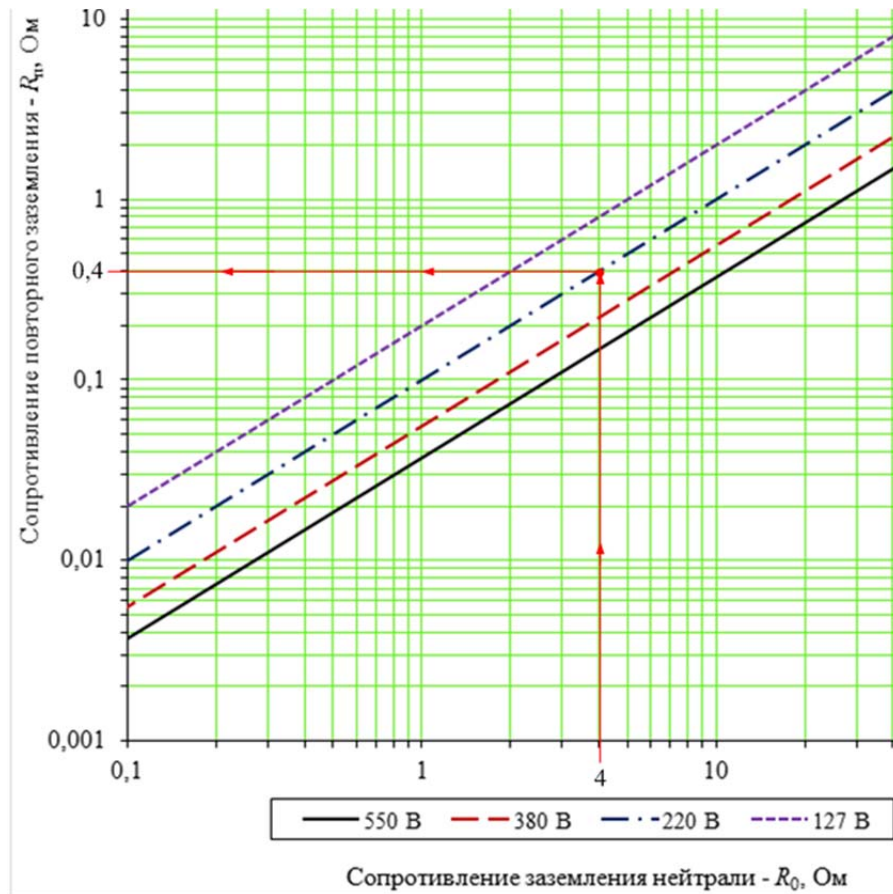


Рисунок Д.2 – Выбор значения R_{Π} при $R_0 = 4$ Ом сети 380/220 В

Определяем значение R_{Π} для каждого из повторных заземлений PEN-проводника ВЛ (3.24):

$$R_{\Pi} \leq n R_0 \frac{U_{Zh}}{I_{OK3} Z_{PEN} - U_{Zh}} = 5 \cdot 4 \frac{20}{167 \cdot 1,32 - 20} = 2 \text{ Ом.}$$

Находим ток однофазного короткого замыкания по (1.2):

$$I_{OK3} = \frac{U_{\phi}}{\underline{Z}_{\phi} + \underline{Z}_{H}} = \frac{220}{1,32} = 166 \text{ А,}$$

где значение $(\underline{Z}_{\phi} + \underline{Z}_{H})$ определяется по (1.9):

$$Z_{\phi-H} = \sqrt{(R_{\phi} + R_H)^2 + (X'')^2} = \sqrt{\left(2\rho \frac{L}{S}\right)^2 + \left(0,29lg \frac{d}{r}\right)^2} =$$

$$= \sqrt{0,98^2 + 0,603^2} = 1,32 \text{ Ом.}$$

Активные сопротивления проводов определяются по известному соотношению:

$$R = \rho \frac{L}{S} = 0,0286 \frac{1200}{35} = 0,98 \text{ Ом.}$$

где L – длина проводника, м;

ρ – удельное сопротивление материала проводника, Ом·мм²/м;

S – площадь сечения проводника, мм².

Величина удельного сопротивления алюминия была выбрана при помощи справочных таблиц и составила 0,0286 Ом·мм²/м.

Внешнее индуктивное сопротивление (X'') определяем по (1.8):

$$X'' = 0,29lg \frac{d}{r} = 0,29lg \frac{0,4}{3,34} = 0,603 \text{ Ом.}$$