

#	Источник	Ссылка на источник	Коллекция/модуль поиска	Доля в отчёте	Доля в тексте	Блоков в отчёте	Блоков в тексте
✓	[1] Семенова, Мария Нико...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004977000/rsl01004977...	Диссертации и авторефераты РГБ	9,19%	9,44%	178	182
✓	[2] Суворов, Иван Флегон...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004120000/rsl01004120...	Диссертации и авторефераты РГБ	4,36%	6,59%	93	133
✓	[3] Серезин, Константин ...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004657000/rsl01004657...	Диссертации и авторефераты РГБ	3,52%	5,7%	90	136
✓	[4] Разработка способа и...	http://www.dslib.net/oxr-truda/razrabotka-sposoba-i-adaptivn...	Интернет (Антиплагиат)	1,35%	3,26%	40	75
✓	[5] 03_text_diss_0.pdf (...)	http://www.susu.ac.ru/sites/default/files/dissertation/03_te...	Интернет (Антиплагиат)	0,84%	2,4%	23	43
✓	[6] 03_text_diss_2.pdf (...)	http://www.susu.ac.ru/sites/default/files/dissertation/03_te...	Интернет (Антиплагиат)	0,3%	1,83%	12	32
✓	[7] ПУЭ - Правила устро...	http://snipov.net/c_4652_snip_99748.html	Интернет (Антиплагиат)	0%	1,57%	0	23
✓	[8] 38572	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38572	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	1,57%	0	23
✓	[9] Макаров, Дмитрий Анд...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002747000/rsl01002747...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,18%	1,42%	10	31
✓	[10] Номоконова, Ольга Ва...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002330000/rsl01002333...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,1%	1,4%	4	24
✓	[11] Правила устройства э...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=10319	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	1,37%	0	33
✓	[12] 03_text_diss_0.pdf (...)	http://www.susu.ac.ru/sites/default/files/dissertation/03_te...	Интернет (Антиплагиат)	0,67%	1,36%	21	32
✓	[13] 72224	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72224	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,06%	1,34%	4	23
✓	[14] 04_autoref_diss_6.pd...	http://www.susu.ac.ru/sites/default/files/dissertation/04_au...	Интернет (Антиплагиат)	0,5%	1,28%	8	18
✓	[15] Обоснование перехоха...	http://tekhnosfera.com/obosnovanie-perehoda-ot-ghlobozazemen...	Интернет (Антиплагиат)	0,01%	1,25%	1	22
✓	[16] Разработка способа и...	http://dis.podelise.ru/text/index-1650.html	Интернет (Антиплагиат)	0,21%	1,24%	10	21
✓	[17] ОБ УТВЕРЖДЕНИИ ГЛАВ...	http://online.lexpro.ru/document/108533	Коллекция юридических документов	1,2%	1,22%	19	20
✓	[18] Источник 18	http://window.edu.ru/resource/891/36891/files/stup117.pdf	Интернет (Антиплагиат)	1,13%	1,21%	30	32
✓	[19] 03_text_diss_0.pdf (...)	http://www.susu.ac.ru/sites/default/files/dissertation/03_te...	Интернет (Антиплагиат)	0,24%	1,16%	7	21
✓	[20] 38539	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=38539	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	1,15%	0	24
✓	[21] 72201	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72201	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,01%	1,15%	1	26
✓	[22] 72253	http://e.lanbook.com/books/element.php?pl1_id=72253	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0,23%	1,12%	11	32
✓	[23] Морозов, Андрей Серг...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002744000/rsl01002744...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,11%	1,07%	5	27
✓	[24] Источник 24	http://bib.convdocs.org/v15463/?download=8#5	Интернет (Антиплагиат)	0%	1,04%	0	21
✓	[25] Шаврина, Наталья Анд...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003320000/rsl01003320...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,09%	1,04%	4	21
✓	[26] Красных, Александр А...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002901000/rsl01002901...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,92%	0	20
✓	[27] Кацей, Виктория Влад...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003328000/rsl01003328...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,21%	0,81%	7	20
✓	[28] Дейс, Данил Алексан...	http://dlib.rsl.ru/rsl01002000000/rsl01002933000/rsl01002933...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,72%	0	18
✓	[29] Скуртова, Ирина Вяче...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004150000/rsl01004150...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,03%	0,71%	1	20
✓	[30] Развитие теории, раз...	http://tekhnosfera.com/razvitie-teorii-razrabotka-metodov-i-...	Интернет (Антиплагиат)	0,14%	0,65%	5	12
✓	[31] Полная версия (русск...	http://www.isu.ru/journal/downloadArticle?article= f6f7850f9...	Интернет (Антиплагиат)	0,6%	0,6%	10	10
✓	[32] Обеспечение электроб...	http://www.dslib.net/oxr-truda/obespechenie-elektrobezopasn...	Интернет (Антиплагиат)	0,26%	0,6%	7	17
✓	[33] Методы и средства за...	http://pstu.ru/files/file/kafedra_BZH_GNF/metod.pdf	Интернет (Антиплагиат)	0,04%	0,58%	2	15
✓	[34] Испытания электрообо...	http://www.kgau.ru/distance/elf_02/isyptania-eo/lek06.htm	Интернет (Антиплагиат)	0,47%	0,54%	12	14
✓	[35] Выбор уставок аппара...	http://electricalschool.info/main/sovetu/734-vybor-ustavok-a...	Интернет (Антиплагиат)	0,53%	0,53%	6	6
✓	[36] Еремина, Тамара Влад...	http://dlib.rsl.ru/rsl01004000000/rsl01004939000/rsl01004939...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,11%	0,5%	4	10
✓	[37] ДОКУМЕНТ БЕЗ НАЗВАНИ...	http://online.lexpro.ru/document/10083125	Коллекция юридических документов	0,48%	0,48%	9	9
✓	[38] Саженкова, Наталья В...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003010000/rsl01003010...	Диссертации и авторефераты РГБ	0,05%	0,45%	2	11
✓	[39] Приложение 6 инструк...	http://rudocs.exdat.com/docs/index-40611.html	Интернет (Антиплагиат)	0,41%	0,41%	14	14
✓							

☒	[80] Современные Технолог...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=19664	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,09%	0	1
☒	[81] Диссертация Швидченк...		Южно-Уральский государственный университет	0%	0,09%	0	2
☒	[82] Электротехника и эле...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=4217	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,05%	0,09%	2	4
☒	[83] 65617	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=65617	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,09%	0	3
☒	[84] 2013575ShmarinYA DIP...		Южно-Уральский государственный университет	0%	0,09%	0	2
☒	[85] ДОКУМЕНТ БЕЗ НАЗВАНИ...	http://online.lexpro.ru/document/6970996	Коллекция юридических документов	0%	0,08%	0	1
☒	[86] 15553_5003_7ce10d00....		Кольцо вузов	0,01%	0,08%	1	2
☒	[87] 43164	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=43164	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,08%	0	2
☒	[88] Современные наукоемк...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=18345	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,08%	0,08%	1	1
☒	[89] Жак А СОВЕРШЕНСТВОВА...		Кольцо вузов	0,01%	0,06%	1	1
☒	[90] ОБ УТВЕРЖДЕНИИ ИНСТР...	http://online.lexpro.ru/document/233241	Коллекция юридических документов	0,01%	0,06%	1	1
☒	[91] О ПОРЯДКЕ ПРОВЕДЕНИЯ...	http://online.lexpro.ru/document/24121425	Коллекция юридических документов	0,06%	0,06%	2	2
☒	[92] ОБ УТВЕРЖДЕНИИ ИНСТР...	http://online.lexpro.ru/document/106237	Коллекция юридических документов	0,06%	0,06%	1	1
☒	[93] 2015-РОАТ-ЭЛ-Вакулен...		Кольцо вузов	0%	0,05%	0	2
☒	[94] МЕЖОТРАСЛЕВЫЕ ПРАВИЛ...	http://online.lexpro.ru/document/109193	Коллекция юридических документов	0%	0,05%	0	2
☒	[95] О РЕАЛИЗАЦИИ ПОСТАНО...	http://online.lexpro.ru/document/2000041	Коллекция юридических документов	0,05%	0,05%	1	1
☒	[96] ОБ УТВЕРЖДЕНИИ МЕТОД...	http://online.lexpro.ru/document/109052	Коллекция юридических документов	0,05%	0,05%	1	1
☒	[97] 70508	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=70508	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,05%	0	2
☒	[98] ПРАВИЛА УСТРОЙСТВА Э...	http://online.lexpro.ru/document/108488	Коллекция юридических документов	0,02%	0,04%	1	2
☒	[99] Авербух, Михаил Алек...	http://dlib.rsl.ru/rsl01003000000/rsl01003414000/rsl01003414...	Диссертации и авторефераты РГБ	0%	0,04%	0	2
☒	[100] Молодые ученые в реш...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=15742	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,04%	0	1
☒	[101] Электрификации горно...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=4285	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0,03%	0,03%	1	1
☒	[102] 59097	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=59097	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,03%	0	1
☒	[103] Электротехника. Спра...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=10494	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,03%	0	2
☒	[104] ОБ УТВЕРЖДЕНИИ ПРАВИ...	http://online.lexpro.ru/document/106224	Коллекция юридических документов	0,02%	0,02%	2	2
☒	[105] Охрана труда. Учебни...	http://www.bibliorossica.com/book.html?&currBookId=12932	Модуль поиска ЭБС БиблиоРоссика	0%	0,02%	0	1
☒	[106] 72337	http://e.janbook.com/books/element.php?pl1_id=72337	Модуль поиска ЭБС "Лань"	0%	0,02%	0	1

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. Верхогладов, 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 (R0), повторных заземлений (Rn) и замыкания фазы на землю (Rз).

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:

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

При помощи компьютерной модели провести оценку условий электробезопасности системы зануления.

На основе полученных на компьютерной модели результатов определить рациональные значения соотношений величин R0, Rn и Rз с точки зрения обеспечения приемлемых условий электробезопасности.

Провести оценку изменения уровня электробезопасности в сетях напряжением до 1000 В с учетом предлагаемых значений соотношений R0, Rn и Rз.

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:

Доказано, что для обеспечения в системе зануления величины напряжения PEN-проводника относительно земли (UPEN), при котором выполняются требования ПДУ напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека в длительном режиме воздействия (td > 1 с) при возникновении однофазного короткого замыкания, необходимо и достаточно выполнить следующее условие: R0/Rn ≥ K, где K определяется напряжением сети, например, для сети 380/220 В K ≥ 10.

Установлено, что при возникновении однофазного замыкания на землю для достижения величины напряжения PEN-проводника относительно земли (UPEN), обеспечивающей ПДУ напряжений прикосновения и токов, протекающих через тело человека в длительном режиме воздействия (td > 1 с) необходимо выполнить условие: Rзm/R0 ≥ N, где N определяется напряжением сети, например, для сети 660/380 В N ≥ 18.

Выполнена оценка изменения значения напряжения PEN- проводника относительно земли (UPEN) в электрических сетях напряжением до 1000 В с ГЗН при установлении предлагаемых соотношений сопротивлений заземления нейтрали источника питания (R0), повторных заземлителей (Rn) и с учетом сопротивления замыкания фазы на землю (Rз).

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:

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 (R0), повторных заземлителей (Rn) и замыкания фазы на землю (Rз).

Разработана методика расчета величин сопротивления R0 и Rn по условиям обеспечения на PEN-проводнике величины напряжения относительно земли, отвечающей требованиям ПДУ напряжений прикосновения в длительном режиме воздействия (td > 1 с) для различных напряжений сетей до 1000 В с ГЗН. 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.

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 ЛIII–LV международных научно-технических конференциях «Достижения науки –агропромышлен-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 научной 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, 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.

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. Верхогладов, 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.

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:

R0 – 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 (Rn), 3 – аппараты защиты

В качестве аппаратов защиты зануление предусматривает применение автоматических выключателей максимального тока и плавких предохранителей 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 (Inom) электропотребителя и значений пусковых токов (Iпуск).

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 пред(авт)< tсзв · KКзап,

(1.1)

где tпред(авт) – время срабатывания предохранителя (автоматического выключателя) по время–токовой характеристике, K – коэффициент, равный 1,15 и учитывающий отклонение от собственного времени пускателя; tсзв – собственное время срабатывания магнитного пускателя (или контактора); Kзап – 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 (Iокз), который проходит по цепи обмотка силового трансформатора Zт/3, фазный и нулевой провода Zф+Zн. При этом сопротивления трансформатора (Zт) и цепи «фаза–нуль» (Zф+Zн) выражаются комплексными числами, поскольку в случае протекания больших токов необходимо учитывать индуктивную составляющую сопротивления проводников [84, 99, 121].

Значение Zт 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 Zт и Zф [75, 130]. Согласно [75], такое допущение дает погрешности (≈ 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, получен следующее выражение [84]:

Iокз=UфZф+Zн ·

(1.2)

При надлежащем выполнении зануления Iокз должен превышать ток срабатывания аппаратов защиты Iср. и отключать поврежденный участок электроустановки, тем самым обеспечить безопасность лиц, имеющих контакт с зануленным электрооборудованием. Быстродействие защиты определяется кратностью отношения Iокз / Iср..

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, условиями 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 – R0(U0) и сопротивлениях повторных заземлений PEN-проводника – Rn(UPEN), обусловленных токами замыкания на землю Iz [84]:

– напряжение на аварийном корпусе относительно земли:

UPEN=Uh=Uф1+ZфZн RnR0+Rн ,

(1.3)

– напряжение на сопротивлениях заземления нейтрали относительно земли:

U0=Uф1+ZфZн R0R0+Rn.

(1.4)

Из выражений (1.3) и (1.4) следует, что UPEN и U0 всегда меньше фазного напряжения источника питания сети и их значения определяются в значительной степени соотношениями Zф и Zн , Rn и R0.

На рисунке 1.2 [67] приведены зависимости, характеризующие изменение напряжений 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 (Uпр) при отсутствии повторного заземлителя; 6 – то же самое при наличии повторного заземлителя; Zчел – полное сопротивление тела человека; U0 – падение напряжения на PEN-проводнике; Uпр–падение напряжения на корпусе относительно земли при отсутствии повторного заземлителя; Uпр– 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 (Rn=∞), уравнения (1.3) и (1.4) принимают вид [84]:

UPEN=Uф1+ Zф Zн;
U0=0.

(1.5)

Как видно из (1.5) при отсутствии в системе зануления повторного заземления ($R_n = \infty$), напряжение прикосновения увеличивается в сторону электроприемника и достигает максимального значения у корпуса поврежденного электроприемника. Если принять, что $Z_f = Z_n$, то в момент короткого замыкания на корпус электроприемника его потенциал $UPEN=U_f/2$ при $U_f = 220$ В, $UPEN = 110$ 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 $Z_f = Z_0$ и $R_0 = R_0$, то согласно выражениям (1.3) и (1.4) потенциалы будут равны:

UPEN=U0=Uф4 .

(1.6)

Из (1.6) видно, что в период существования однофазного замыкания на корпус и наличии повторного заземления, при $U_f = 220$ В, $UPEN = U_0 = 55$ 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.

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.

Таблица 1.1 – Наибольшее допустимое время срабатывания защитного аппарата отключения для сетей TN, напряжением до 1000 В [95]

Номинальное фазное напряжение сети, Uф, 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 мм², наименьшие площади поперечного сечения PEN-проводников выбираются равными 50 % от сечения фазных проводов, при площади поперечного сечения фазного проводника 16 < S ≤ 35 мм² – 16 мм², а при поперечных сечениях токоведущих фаз S ≤ 16 мм², 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]:

$Z_n \cdot \Phi - 0 = (R_f + R_n + R_d + R_{T.T} + R_A)2 + X'' + X'' + X_c + X_{T.T} + X_{A2}$,

(1.7)

где Rф, Rн – активные сопротивления фазного и нулевого проводов, Ом;
Rд – активное сопротивление места однофазного замыкания (сопротивление электрической дуги). По приближенным расчетам эта величина принимается равной 0,03 Ом;

Rт.т, Xт.т. – активное и индуктивное сопротивления трансформатора тока. По приближенным расчетам эти величины принимаются равным 0,00015 Ом и 0,00021 Ом соответственно;

RA, XA – активное и индуктивное сопротивления коммутационного автоматического выключателя, если он применяется в расчетной схеме. Величины этих сопротивлений принимаются приблизительно равными 0,00048 Ом и 0,00099 Ом соответственно;

Xс – индуктивная составляющая вносимого сопротивления питающей системы, приблизительно 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 приблизительно 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:

$X''=0,29 \lg d$

(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]);

l – 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:

$Z_n \cdot \Phi - 0 = (R_f + R_n)2 + (X'')^2$.

(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.

Таблица 1.2 – Значения сопротивлений заземляющего устройства,

к которому присоединены нейтрали генератора или трансформатора

Uл / Uф, 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 соорудить 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 грозовых перенапряжений.

При этом, запрещается использовать трубопроводы горячих жидкостей, горячих 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

Uл / Uф, 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 >100 Ом м допускается [95] увеличивать указанные нормы в 0,01 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 грозовых 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 грозовых часов в году до 40; 100 м – для районов с числом грозовых часов в году более 40.

Помимо этого, дополнительно заземляющие устройства, предназначенные для защиты от грозовых 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 грозовых часов в году до 40 и 50 м - для районов с числом грозовых 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 Rф и Rн, при этом допустить, что Rф = Rн и по PEN-проводнику протекает такой же ток Iокз, как и по фазному проводу, то (1.2) примет вид [33]:

$UPEN=I_{окз}R_n=U_f R_n + R_0 R_n$,

или

$UPEN=U_f 1 + R_0 R_n$.

(1.10)

Результаты расчета по (1.10) представлены на рисунке 1.3.

Рисунок 1.3 – Зависимость UPEN (в долях от величины Uф) от соотношения R0 и Rл 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 R0 не улучшает условия электробезопасности, а наоборот, увеличивает UPEN относительно земли, которое при R0 = 0 становится равным по величине фазному напряжению сети.

Такое положение ставит под сомнение оптимальность значений R0, регламентированных в ПУЭ.

Тем не менее, при нормируемых в [95] значениях R0 и Rл, величина UPEN относительно земли остается неизменной при всех напряжениях сети – 660/380, 380/220 и 220/127 В и составляет 0,714Uф (рисунок 1.3). Следовательно, за местом замыкания фазы на корпус и отказе аппарата защиты UPEN 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 R0 и Rл не обеспечивают приемлемый уровень электробезопасности.

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

$UPEN=I_{зм}R_0=U_f R_{зм} + R_0 R_0$,

или

$UPEN=U_f 1 + R_{зм} R_0$

(1.11)

где Rзм – 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 UPEN и подключенных к нему открытых проводящих частей в значительной степени зависит от сопротивления замыкания на землю Rзм, которое является, прежде всего, функцией удельного сопротивления грунта в месте замыкания.

Рисунок 1.4 – Зависимость UPEN при ОЗЗ от соотношения Rзм и R0 (в относительных единицах от Uф)

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, лежащего 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).

а) падение провода на землю

б) падение провода

на неизолированный

от земли корпус

в) падение провода на дерево

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

В этом случае значения напряжения PEN-проводника (UPEN) 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
Rсз, Ом
1,47
2,94
7,36
22,06
51,48
Гараж из ж/б блоков с металлической крышей
Rсз, Ом
2,4
4,7
11,8
35,4
82,5
При этом, если посмотреть оценку зануления по обеспечению условий электробезопасности при Q33, например, для Uф = 220 В и расчетного значения удельного сопротивления грунта ρ = 100 Ом, согласно выражению (1.11) и рисунку 1.4 получим: при замыкании фазы на крышу цельнометаллического гаража значение UPEN составляет 0,35Uф и равняется UPEN = 77 В, а при замыкании фазы на крышу гаража из железобетонных блоков с металлической крышей – 0,25Uф и UPEN = 55 В. Следовательно, такие значения UPEN не соответствуют требованиям [27]. При этом, согласно [23] при Uпр. = 77 В, сопротивление тела человека составляет Rh = 1200 Ом и при Uпр. = 55 В – 1500 Ом, а токи через тело человека будут равны Ih = 64 мА и Ih = 37 мА соответственно, что существенно превышает значения порогового неотпускающего тока [23, 67, 121].
Проводимости растений: деревья и кустарников рассматриваются в [3, 146, 154], согласно которым при положительных температурах сопротивление веток деревьев составляет около 1 – 35 МОм на 1 м длины веток. При отрицательных температурах сопротивление веток увеличивается до 100 – 500 МОм/м. Сопротивление корневой системы деревьев и кустарников составляю 30 – 40 кОм.
В [154] приводится следующее распределение полных сопротивлений деревьев (рисунок 1.6), с сопротивлениями 6 кОм/м вблизи основания дерева и растет 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: травяная 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, определелется 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 (UPEN) 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]:

$I_{\Sigma} = U_{\phi} R_0 + R_{\Pi}$.
(1.12)
С учетом того, что нормативное значение Rп превышает R0 в 2,5 раза, из выражения (1.12) получим [101]:
 $I_{\Sigma} = U_{\phi} 3,5 R_0 \approx 0,28 U_{\phi} R_0$.
(1.13)
Подставляя нормируемые в [95] величины R0 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 UPEN при обрыве PEN-проводника и нормируемых значениях R0 и Rп
Uф, В
380
220
127
Iоэз, А
53,2
15,4
4,4
UPEN, 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 применимость этой меры защиты, необходимо знать способы и средства контроля параметров схемы зануления.

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 (Iокз) необходимо измерять полное сопротивление цепи однофазного замыкания на корпус или петли «фаза–нуль». Измерения можно осуществить несколькими способами [55].

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]:

$Z_{\Pi} = U / I$.
(1.14)
Ток однофазного короткого замыкания Iокз определяется по формуле:
 $I_{окз} = U_{\phi} / Z_{\Pi}$,
(1.15)
где Uф – 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 испытуемой цепи измеряется с включенным и отключенным сопротивлением нагрузки, а сопротивление петли «фаза–нуль» рассчитывается по формуле [30]:
 $Z = U_1 - U_2 / I_{\Pi}$,
(1.16)
где Z – полное сопротивление петли «фаза–нуль», Ом;
U1 – напряжение, измеренное при отключенном сопротивлении нагрузки, В;
U2 – напряжение, измеренное при включенном сопротивлении нагрузки, В;
IΠ – 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 испытуемой 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).

а)
б)
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, пропорциональные 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 испытуемому 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: Iкз, 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 SONEЛ 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 (Rогр.=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:

$I_k=U_{фZs}$,

(1.17)

где Uф = 220 В – напряжение исследуемой сети;

ZS – 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.

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 вывateль обрыва нулевого провода – 1 и связанный с вывateлем 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], вывateль 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 предлагает 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 I01 в нулевом проводе в начале линии и тока Iз в заземлении нейтрали питающего трансформатора. В нормальном режиме работы, любое распределении нагрузки между линиями сети создаст следующее соотношение токов I01 > Iз. Следовательно, при нарушении непрерывности нулевого провода соотношение I01 > Iз 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 послыки более 200 мс. Становится возможным использование кодовых комбинаций 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 послышки 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 из проводников цепи заземления и сопротивлением самозаземления электроустановки – гсз.

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 (гсз) 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 Rз = 4 Ом; 5 – повторные заземлители воздушных или кабельных линий – Rл = 30 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 K564 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 пропускания 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 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 I01 и током в нулевом проводе за первым повторным заземлителем I02. В свою очередь, цифровые сигналы с аналого-цифровых преобразователей 3, 4 непрерывно поступают на микроконтроллер 5. Микроконтроллер по значениям токов I01, I02 определяет значение разности токов ΔI0 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 ΔI0; зона, в которой поврежден нулевой провод), которое отображается на жидкокристаллическом буквенно-цифровом индикаторе 6.

Однако, при обрыве нулевого провода разность токов ΔI0 = I01 – I02 увеличивается и служит признаком возникновения аварийного режима электрической сети, что является недостатком данного устройства.

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.

Рисунок 1.21 – Функциональная схема системы защиты от обрывов фазных и нулевого проводов [71]:

1 – трансформаторная подстанция; 2 – автоматический выключатель;

3 – воздушная линия; 4 – микропроцессорный счетчик 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; UAN, UBN, UCN – 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.

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, электротехнического персонала, предлагается для повышения уровня электробезопасности решить следующие задачи:

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

При помощи компьютерной модели провести оценку условий электробезопасности системы зануления.

На основе полученных на компьютерной модели результатов определить рациональные значения соотношений величин R0, Rn и Rзм с точки зрения обеспечения приемлемых условий электробезопасности.

Провести оценку изменения уровня электробезопасности в сетях напряжением до 1000 В с учетом предлагаемых значений соотношений R0, Rn и Rзм.

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].

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 шта.

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
 $RA \neq RB \neq RC$
 $CA \neq CB \neq CA$
 $Ih = U\phi ghYB1 - a2 + YC1 - aYA + YB + YC + Yh$
 $RA = RB = RC = R$
 $CA = CB = CA = C$
 $Ih = U\phi gh3Y3Y + gh$
 $Ih = U\phi 1Rh11 + R(R + 6Rh)9Rh2(1 + R2\omega 2C2)$
 $RA = RB = RC = R$
 $CA = CB = CA = 0$
 $Ih = 3U\phi 3Rh + R$
 $RA = RB = RC = \infty$
 $CA = CB = CA = C$
 $Ih = 3U\phi(3Rh)2 + 1\omega C2$

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 А при замыкании фазы В на землю
 $RA = RC = R; RB = R\text{зм}$
 $CA = CA = C; CB = \infty$
 $Ih = 3U\phi Rh + R\text{зм}$
2.
Сети с глухозаземленной нейтралью
Прикосновение к фазе А при исправной изоляции двух других фаз
 $RA = RB = RC = \infty$
 $CA = CB = CA = 0$
 $Ih = U\phi ghg0g0 + gh$
 $Ih = U\phi Rh + R0$
Прикосновение к фазе А при замыкании фазы В на землю через проводимость g0
 $RA = RC = \infty; RB = R\text{зм}$
 $CA = CA = 0; CB = \infty$
 $Ih = U\phi ghg\text{зм}1 - a2 + g0gh + g\text{зм} + g0$

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, этим 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]:

$Pi=1nSi=i=1nP(Si)$
(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]:

$Pi=1nSi=iPSi+ij,kPSiSjSk+...+1n1PS1S2...Sn$.

(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 -С [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.

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; F1, F2 – плавкие предохранители;
R0 – сопротивление заземляющего устройства нейтрали трансформатора; Rп – сопротивления повторных заземлителей PEN-проводника;
Rзм – сопротивление в месте замыкания фазы на землю; IPEN – ток, протекающий по PEN-проводу; Iокз – ток однофазного короткого замыкания; I3 – токи, протекающие через землю; Ih – ток, проходящий через тело человека; Iозз – 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 замыкания 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 комплексов 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:

Какими блоками моделировать те или иные элементы?

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 (R0);

6 – сопротивления повторных заземлений PEN-проводника (Rп); 7 – сопротивления замыкания фазы на землю (Rзм);

8 – сопротивления тела человека (Rh); 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 С с землей через сопротивление Rзм (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, использующаяся 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.

Исследование влияния на условия электробезопасности параметров заземления нейтрали и повторных заземлений

Проведен 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 зависит величина тока и, как следствие, степень реакции человека на воздействие этого тока является величина сопротивления тела человека.

Общее сопротивление тела человека Zh 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 Rн, и еще одного – остальной частью тела Rв.

Выполненные в этой области исследования достаточно полно освещены в работах Л.В. Гладылина [23], П.А. Долина [33], В.Е. Манойлова [67], А.И. Сидорова [121], В.И. Шуцкого [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 ZН – полное сопротивление кожного покрова; Zн – общее сопротивление тела человека; Сн – емкость конденсатора, образовавшегося в месте контакта с токоведущей частью; Rн – сопротивление кожного покрова; Rвн – внутреннее сопротивление; R0б; Rп – переходное сопротивление от ног в землю.

Рисунок 2.6 – Сопротивление тела человека по пути протекания тока

Повышение напряжения, приложенного к телу человека, UZh вызывает уменьшение в десятки раз его полного сопротивления Zh. Для определения зависимости Zh от UZh при переменном токе частотой 50 Гц проф. П.А. Долиным предложена следующая формула (при UZh ≥ 5 В), кОм [33]:

$$Zh=77UZh+10+0,3, \\ (2.3)$$

По (2.3) при напряжениях до 50 В переменного тока частотой 50 Гц, величина Zh 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 Rн и Rвн принимаются равными 3,0 и 0,65 кОм, соответственно.

Снижение общего сопротивления тела человека Zh 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 UZH 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 – Rвн. Исходя из этого, для дальнейших расчетов, при значениях напряжений, приложенных к телу человека, выше (UZh ≥ 40 В) значение общего сопротивления тела человека нами принимается – Rн = 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-С длиной 500 м, и проводами марки AC, 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 (Iокз), ожидаемого напряжения на PEN-проводнике относительно земли (UPEN) и тока, проходящего через тело человека (Ih), в зависимости от соотношения R0/Rп при возникновении однофазного короткого замыкания (ОКЗ) для трансформаторов мощностью 25–100 кВА.

Таблица 2.2 – Значения Iокз, UPEN и Ih, в зависимости от соотношения R0/Rп

при ОКЗ для трансформаторов мощностью 25–100 кВА

R0/Rп

Str.= 25 кВА

Str.= 40 кВА

Str.= 63 кВА

Str.= 100 кВА

Iокз,

А

UPEN, В

Ih , мА

Iокз,

А

UPEN, В

Ih , мА

Iокз,

А

UPEN, В

Ih , мА

Iокз,

А

UPEN, В

Ih , 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