

СОДЕРЖАНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. Аспекты проблемы оценки защитных свойств заземляющих сетей.....	8
1.1. Общая характеристика заземления электроустановок северных промышленных комплексов	8
1.2. Сущность проблемы оценки защитных свойств заземляющих сетей.....	11
2. Анализ факторов, обуславливающих системный подход к оценке защитных свойств заземляющих сетей электроустановок северных промышленных комплексов	17
2.1. Исходные положения	17
2.2. Классификация разветвленных заземляющих сетей электроустановок северных промышленных комплексов.....	20
2.3. Оценка достоверности информации по грунтовым структурам для определения параметров заземления.....	23
2.4. Анализ сезонных циклов аварийности в электрических сетях напряжением 110 кВ	28
2.5. Анализ аварийности в электрических сетях с изолированной нейтралью напряжением 6-35 кВ.....	34
2.6. Прогноз аварийности в сетях напряжением 6, 35 и 110 кВ	39
Выводы	44
3. Приведение реальных геоэлектрических разрезов к расчетным моделям для определения параметров заземлителей	46
3.1. Исходные положения	46
3.2. Приведение реальных геоэлектрических разрезов к расчетным моделям на базе физической сущности метода вертикального электрического зондирования	47
3.3. Определение связи между разносом токовых электродов установки вертикального электрического зондирования и характерным размером заземлителя.....	55
3.4. Методика расчета статистической модели грунта для определения параметров заземлителей.....	62
Выводы	67
4. Разработка методики расчета параметров естественных заземлителей на основании уравнений электродинамики	68
4.1. Исходные положения	68
4.2. Расчет электрических характеристик наземных протяженных трубопроводов	69
4.3. Расчет электрических параметров технологических скважин.....	84
4.4. Расчет сопротивлений заземления свайных фундаментов промышленных зданий и сооружений	86
Выводы	90
5. Разработка методики расчета параметров заземлителей на базе системы нечеткого вывода	91

5.1. Исходные положения	91
5.2. Расчет электрических параметров фундаментов промышленных зданий и опор передвижных механизмов	92
5.3. Определение сопротивления заземления технологических эстакад	116
5.4. Расчет электрических параметров трубопроводов	120
5.5. Определение параметров искусственных заземлителей	124
Выводы	128
6. Определение условий использования технологических коммуникаций в качестве естественных заземлителей	130
6.1. Исходные положения	130
6.2. Количественная оценка вероятности одновременного появления отказов в электрических сетях и технологических коммуникациях	132
6.3. Расчет минимальной энергии взрыва газовоздушных смесей при искровом способе зажигания	142
6.4. Определение пороговых значений токов, не приводящих к воспламенению газовоздушных смесей.....	146
6.5. Оценка коррозионной стойкости технологических коммуникаций при стекании токов замыканий на землю	149
Выводы	152
7. Расчет распределения токов замыкания и выноса потенциалов в разветвленной заземляющей сети	154
7.1. Исходные положения	154
7.2. Методика расчета емкостных токов однофазного замыкания в сетях напряжением 6-35 кВ	155
7.3. Методика расчета токов однофазного короткого замыкания в сетях напряжением 110-220 кВ	162
7.4. Построение схем замещения заземляющей сети и расчет токо- распределения при однофазных замыканиях в сетях напряжением 6-35 кВ	163
7.5. Построение схем замещения разветвленных заземляющих сетей и расчет токораспределения при ОКЗ в сетях напряжением 110-220 кВ.....	171
Выводы	175
8. Экспериментальная оценка защитных свойств заземляющих сетей электроустановок северных промышленных комплексов	177
8.1. Исходные положения	177
8.2. Экспериментальная оценка параметров заземляющих сетей в электрических сетях с изолированной нейтралью	178
8.3. Экспериментальная оценка параметров заземляющих сетей в электрических сетях с эффективно заземленной нейтралью	189
8.4. Экономическая эффективность внедрения результатов оценки защитных свойств заземляющих сетей	201
Выводы	204
Заключение и рекомендации	205
Список литературы	209
Приложения	225

ВВЕДЕНИЕ

Проектирование и комплексная оценка защитных свойств заземляющих устройств северных промышленных комплексов представляют собой серьёзную научно-техническую проблему. Это вызвано, прежде всего, наличием высокоомных многолетнемерзлых грунтов, разветвленностью электрических сетей, расположением электроустановок в непосредственной близости от промышленных зданий и сооружений, наличием большого числа металлических коммуникаций, связывающих между собой предприятия, как правило, проложенных на поверхности.

В условиях северных промышленных комплексов заземляющие устройства (ЗУ) подстанций связаны между собой и с железобетонными фундаментами промышленных и бытовых зданий естественными заземлителями, образуя тем самым разветвленную заземляющую сеть (ЗС). При этом в качестве связей, кроме искусственных заземляющих линий (как воздушных для потребителей карьеров, так и проложенных в земле), используются трубопроводы, кабельные эстакады, оболочки бронированных кабелей и рельсовые пути. С одной стороны, разветвленная ЗС способствует снижению полного потенциала на подстанционном заземлителе и напряжений шага и прикосновения на территориях подстанций, с другой стороны, возможен вынос потенциала за пределы подстанций, нарушение электромагнитной совместимости между первичными и вторичными соединениями электроустановок.

Из-за наличия разветвленной ЗС часть токов замыкания на землю отвечает в технологические коммуникации и значения токов, протекающих через подстанционные заземлители, уменьшаются. Неучет этого явления приводит к неоправданным затратам на сооружение искусственных заземлителей, а с другой стороны, к возможности протекания токов недопустимых значений по технологическим коммуникациям, предназначенным для транспортировки горючих газов и жидкостей. Отсюда следует, что при проектировании и оценке защитных свойств разветвленных ЗС необходимо четко представлять картину распределения токов замыкания и потенциалов по элементам ЗС, т.е. располагать методиками расчетов и экспериментов по определению защитных свойств ЗС, по оценке выноса потенциалов и электромагнитной совместимостью первичных и вторичных цепей электроустановок.

Для того чтобы рассчитать разветвленную ЗС, необходимо представить ее в виде эквивалентной схемы замещения, где отдельные элементы изображаются собственными схемами замещения, в общем случае – комплексными сопротивлениями. В условиях северных промышленных комплексов определение параметров схемы замещения ЗС усложняется неопределенностью геоэлектрических разрезов, конструктивными особенностями фундаментов зданий и способами прокладки технологических коммуникаций. В подавляющем большинстве случаев, даже на небольшой площадке, наблюдаются сложные геоэлектрические разрезы. Характерной особенностью грунтов в районах Крайнего Севера является значительное непостоянство удельного сопротивления по простиранию и по глубине при сложных границах разделов между отдельными слоями с постоянными электрическими параметрами. Другая существенная особенность строения геоэлектрического разреза в условиях развития многолетних пород - наличие негоризонтальных границ раздела мерзлых и талых пород.

Многообразие факторов, определяющих защитные свойства разветвленных ЗС в условиях Крайнего Севера, обуславливает необходимость системного подхода к проблеме проектирования, сооружения и эксплуатации заземляющих устройств (ЗУ) электроустановок северных промышленных комплексов. Актуальность решения этой проблемы связана с разработкой научно обоснованных методик проектирования и экспериментального контроля ЗУ, позволяющих установить реальную картину растекания токов замыкания и распределения потенциалов по элементам ЗС.

Поэтому вполне естественно, что научный подход к изучению оценки защитных свойств разветвленных ЗС возможен лишь при решении комплекса вопросов и понимании теоретических проблем растекания токов замыкания на землю в многолетнемерзлых грунтах. К ним в первую очередь следует отнести оценку точности исходной информации о структурах грунтов, статистическую оценку повреждаемости электрических и технологических сетей, теоретические основы расчета ЗУ в многолетнемерзлых грунтах и экспериментальный контроль. Об актуальности данной проблемы свидетельствуют работы ведущих ученых в этой области [8; 62; 63; 87; 217].

Теоретические и экспериментальные исследования, выполненные отечественными и зарубежными учеными, охватывают широкий круг задач по оценке защитных свойств ЗС. На научно-технических совещаниях и конференциях, состоявшихся в городах Красноярске, Москве, Норильске, Новосибирске, Томске, Якутске и других, одним из вопросов, отмеченных в решениях, является оценка возможности использования естественных заземлителей в районах Крайнего Севера как основных элементов заземляющей сети электроустановок. Большой вклад в решение узловых вопросов проблемы оценки защитных свойств ЗУ внесли специалисты Норильского горнометаллургического комбината и Норильского индустриального

института. Особенно следует отметить основоположников решения данной проблемы, которые внесли значительный вклад: д-р тех. наук, профессор Н.Н. Максименко, канд. тех. наук, доцент Г.Г. Асеев. Вместе с тем предлагаемые методы не в полной мере обеспечивают решение задач проектирования и оценки защитных свойств ЗС. В частности, возникают проблемы с выбором расчетных моделей многолетнемерзлых грунтов, построением схем замещения разветвленных ЗС, расчетом распределения токов замыкания и потенциалов по элементам ЗС, экспериментальным контролем. Появление нового поколения вычислительной техники и средств измерений, математического аппарата позволило расширить круг вопросов при анализе защитных свойств разветвленных ЗС северных промышленных комплексов. Все сказанное показывает, что, несмотря на предшествующий опыт научных исследований, построение современных методик проектирования и комплексной оценки защитных свойств ЗС электроустановок северных промышленных комплексов является актуальной задачей.

Сложность поставленных задач, необходимость учета большого числа факторов, характеризующих разветвленную ЗС как большую систему, трудности экспериментального контроля определили выбор основных методов исследований. Для решения поставленных задач в работе использованы: теории заземлений, оценки взрывобезопасности электрической аппаратуры, электромагнитного поля, нечетких множеств и нечеткой логики; ключевые задачи по определению электрического поля точечного источника на поверхности многослойного геоэлектрического разреза; высокопроизводительные методы численного интегрирования; основы корреляционного и регрессионного анализа случайных величин, методы коррозионной стойкости металлоконструкций.

В экспериментальных исследованиях применялись методы измерений параметров ЗС, в основе которых лежат имитационные и натурные измерения, использование автономных приборов, статистические методы обработки результатов эксперимента, методы Тагга. При этом учитывалась реальная картина распределения токов замыкания и потенциалов по элементам разветвленных ЗС. Для проведения натуральных экспериментов в сетях с изолированной нейтралью проводились искусственные однофазные замыкания на землю с одновременным измерением потенциальных кривых и входных сопротивлений ЗС относительно точек замыкания. В сетях с эффективно заземленной нейтралью напряжением 110 кВ в нейтраль трансформатора вводился имитационный ток в виде полуволн синусоид величиной до одного ампера.

1. Аспекты проблемы оценки защитных свойств заземляющих сетей

1.1. Общая характеристика заземления электроустановок северных промышленных комплексов

Заземление промышленных установок в условиях Крайнего Севера представляется разветвленной заземляющей сетью (ЗС), выполняющей значительное число функций, основной из которых является снижение уровня потенциалов на корпусах электрооборудования до безопасных значений. Для снижения уровня помех во вторичных цепях предусматривается усиление требований ПУЭ [1] к защитным свойствам ЗС в местах установки оборудования, аппаратов и устройств, а также к прокладке кабельных линий и заземлению их экранов [2]. Работоспособность ЗС может быть обеспечена, если имеется возможность точного определения ее параметров и картины распределения токов замыканий по элементам ЗС.

Расчет заземляющих устройств (ЗУ) стал классической областью исследования благодаря работам как отечественных, так и зарубежных ученых. Однако проблема обеспечения защитных свойств ЗС электроустановок северных промышленных комплексов далеко выходит за рамки анализа параметров самих ЗУ.

Наличие разветвленной ЗС имеет положительную и отрицательную стороны. Разветвленная ЗС способствует снижению полного потенциала на заземлителе и напряжений шага и прикосновения на территории подстанции вследствие снижения величины расчетного тока, поскольку в данных условиях часть тока однофазного короткого замыкания растекается по металлическим коммуникациям, не проникая в землю. Причиной такого положения служит тот факт, что связь между искусственными заземлителями и технологическими коммуникациями (ТК) существует постоянно, за счет непосредственного контактирования или нахождения ТК в зоне растекания тока замыкания на землю. Более того, Правилами безопасности в нефтедо-

бывающей промышленности [3] предусматривается всю технологическую аппаратуру и трубопроводы, содержащие горючие пары и газы, заземлять в целях защиты от статического электричества, при этом допускается использование заземляющих устройств электроустановок. Таким образом, ТК северных газопромыслов участвуют в формировании токовых путей при однофазных замыканиях на корпус или землю в электрических сетях. Ответвления токов замыкания в подземные выработки горнодобывающих предприятий создают вероятность поражения электрическим током, воспламенения метана, преждевременного взрыва детонаторов при производстве взрывных работ. Так, «Инструкция по безопасной эксплуатации электроустановок открытых горных работ» [4] предлагает произвести развязку ЗС, выделяя при этом сети с различным исполнением нейтралей трансформаторов. Однако произвести такую развязку во многих практических случаях нереально.

С другой стороны, наличие разветвленной ЗС создает вероятность выноса высокого потенциала за пределы подстанций при аварийных режимах в электросетях 110-220 кВ. Вынос потенциала на технологическое оборудование и надземные коммуникации может привести к групповому поражению обслуживающего персонала электрическим током и возникновению пожаров и взрывов.

Величины ожидаемых напряжений прикосновения и шага на территориях подстанций не являются постоянными. Они могут составлять 3-10 % от полного потенциала, где имеется выравнивающая сетка и в значительной степени проявляется влияние потенциала, наведенного на поверхности земли железобетонными фундаментами зданий на удаленных установках. Распределение напряжений до прикосновения зависит от конфигурации ЗС и закона распределения потенциала по металлическим коммуникациям.

Возникающее противоречие действительности с правилами может быть устранено путем комплексной оценки совокупности факторов, влияющих на возможность полного или ограниченного использования ТК в качестве естественных заземлителей. К этим факторам прежде всего относятся климатические особенности, повреждаемость в элементах электрической сети и ТК, токораспределение по элементам ЗС, способность к воспламенению газозводушных смесей при искровом способе зажигания. Важнейшими факторами, влияющими на воспламеняющие действия искры при нарушении целостности цепи, являются: состав и концентрация газовой смеси, искробразующие устройства, параметры электрической цепи [5] .

Климат Норильского промышленного района суровый и характеризуется отрицательной среднегодовой температурой воздуха (-9,8 °С), значительным колебанием температуры в течение года (амплитуда колебания составляет 90 °С), повышенной циклонической деятельностью [6]. Все это обуславливает мерзлое состояние грунта и сезонное изменение его па-

раметров. По данным инженерно-геологических изысканий, проведенных в Норильском промышленном районе Государственным институтом по проектированию оснований и фундаментов «Фундаментпроект» и Норильской комплексной геологоразведочной экспедицией [7; 8], геоэлектрические разрезы можно отнести к следующим основным типам:

трехслойные – $K(\rho_1 < \rho_2 > \rho_3)$; четырехслойные – $AK(\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 > \rho_4)$;
пятислойные – $AAK(\rho_1 < \rho_2 < \rho_3 < \rho_4 > \rho_5)$ и $НАК(\rho_1 > \rho_2 < \rho_3 < \rho_4 > \rho_5)$.

Присутствие в грунтах мерзлых образований искажает кривую вертикального электрического зондирования (ВЭЗ), снимаемую для оценки параметров геоэлектрического разреза, и поэтому часть кривых ВЭЗ интерпретируются лишь качественно, что не всегда позволяет судить об истинной электрической структуре грунта.

В Норильском промышленном районе, начиная с глубины 1,0-1,5 м, достаточно широко представлены суглинки различной степени льдистости, удельное сопротивление которых колеблется в пределах 500-1000 Ом·м. Встречаются области повышенных значений удельных сопротивлений ρ до 4600 Ом·м. Области максимальных значений ρ порядка 8000-12 000 Ом·м связаны с появлением линзообразных тел льда. Мощность монолитного слоя мерзлоты составляет в среднем 100-140 м. Все сказанное указывает на сложность геоэлектрического разреза исследуемых площадок и изменение ρ как по глубине, так и по простиранию [9; 10].

Широкое распространение многолетнемерзлых грунтов создает серьезные трудности при проектировании и сооружении ЗУ, обеспечивающих нормируемые параметры [11-17].

Для достижения нормируемых значений сопротивления заземления предлагаются различные способы обработки земли (увлажнение водой, внесение солей и т.д.) [18-29]. Однако данные методы снижения удельного сопротивления грунта трудоемки и кратковременны. Кроме того, использование солей способствует коррозионному разрушению ЗУ [30; 31]. Некоторые исследователи предлагали использовать особые методы сооружения ЗУ в районах Крайнего Севера: нагнетать под давлением в скважину жидкий проводящий материал [32]; использовать энергию взрыва [33]. Снижение сопротивления заземления в электроопасный период (весна – лето) предлагалось осуществлять с помощью метода «ограждающих конструкций» [34] и электротеплового воздействия на грунт [35-37]. Перечисленные методы решают частные задачи для конкретных электроустановок. В связи с трудностями достижения нормируемых значений сопротивлений заземления в ряде работ обосновывалась необходимость перехода к нормированию допустимого напряжения прикосновения в зависимости от времени воздействия тока на человека [38-52].

В целях обеспечения нормируемых параметров ЗУ рекомендуется максимально использовать естественное заземление. Известно, что картина

токораспределения в элементах ЗС, получаемая расчетным путем, наиболее точно соответствует реальной при максимальном учете всех возможных путей растекания тока в момент однофазных замыканий. С этой целью составляемая схема замещения ЗС строится на базе ситуационных планов промышленных комплексов. Расчетные соотношения, позволяющие определять электрические характеристики отдельных элементов ЗС, включают параметры геоэлектрического разреза. Однако многообразие геометрических и конструктивных форм искусственных и естественных заземлителей, имеющих место на северных промышленных комплексах, делает задачу расчета их электрических характеристик в неоднородных грунтах многофакторной.

Выполнение надежных и экономичных искусственных заземляющих устройств электроустановок, сооружаемых и эксплуатируемых в районах многолетней мерзлоты, диктует необходимость учета особенностей грунтовых структур и построения более точных расчетных методов. Что же касается естественных заземлителей, то определение их геоэлектрических характеристик также производится на базе реальных геоэлектрических разрезов. Однако в большинстве случаев при определении параметров протяженных заземлителей дополнительно учитываются их собственные электрические характеристики (распределенная индуктивность, проводимость и емкость относительно земли).

1.2. Сущность проблемы оценки защитных свойств заземляющих сетей

В.В. Бургсдорф ввел в теорию заземления новую расчетную модель грунта в виде двухслойного проводящего пространства с границей раздела, параллельной поверхности, и удельными сопротивлениями, однородными в пределах каждого слоя. Опираясь на фундаментальные работы Ф. Оллендорфа [53], Г.В. Двайта [54] и ряда других авторов [55-58], разработавших теорию расчета полей заземлителей в однородных структурах грунта, В.В. Бургсдорф впервые получил выражение, позволяющее вычислять сопротивление растекания и потенциал простейших заземлителей в неоднородном геоэлектрическом двухслойном разрезе. Новая модель соответствовала некоторым электрическим структурам грунтов в умеренных климатических зонах, и ее использование привело к новому этапу в развитии теории заземления. Вместе с тем возросшая сложность математического аппарата не позволила в то время найти решение по расчету электрических полей простых заземлителей в многослойных геоэлектрических структурах [59].

Тем не менее потребность теории и практики заземлений в более точном учете структуры грунта привела к появлению ряда работ, учитывающих более сложный характер изменения ρ по глубине [60; 61], что особенно характерно для районов Крайнего Севера [62; 63]. В настоящее время получены соотношения, позволяющие оценивать электрические параметры одиночных и сложных искусственных заземлителей в условиях представления многолетнемерзлых грунтов в виде кусочно-градиентного пространства [64-68].

Расчеты электрических характеристик естественных заземлителей с учетом неоднородной структуры грунтов получаются весьма сложными и часто представляются лишь в общем виде. К тому же наличие большого количества неоднородных геоэлектрических структур, охватываемых естественными заземлителями [62; 63], не позволяет однозначно их использовать в расчетных соотношениях. Таким образом, получение «точных» алгоритмов счета, учитывающих всю сложность геоэлектрического разреза при расчете параметров естественных заземлителей, видимо, не приведет к оправданным результатам.

Одним из путей, исключающих перечисленные трудности, является разработка другого направления в теории заземления, в основу которого положена идея об эквивалентном сопротивлении грунта, получаемом путем приведения многослойного геоэлектрического разреза к однородной структуре грунта [69]. В работах [70-72] разработаны методы приведения применительно к сосредоточенным искусственным заземлителям, построенные на принципе соответствия полей предельной и исследуемой моделей заземлителей. При этом условие эквивалентности принимается по сопротивлению растеканию или по потенциалу на заземлителе. В последнем случае параметры деятельного слоя (ρ_1 , h_1) сохраняются, а к ρ , приводятся все подстилающие слои, т.к. при прочих равных условиях на величину максимального напряжения прикосновения основное внимание оказывает соотношение между параметрами двух верхних слоев. Метод приведения, предложенный в [73], основан на безынтерпретационном способе расчета параметров сеточных заземлителей [74], базирующемся на общеизвестной формуле Лорана.

Следует отметить, что указанные методы используются применительно к определенным конструкциям искусственных заземлителей, что делает их приемлемыми для расчета таковых на отдельных подстанциях. При расчете электрических характеристик естественных заземлителей практически не удается непосредственно использовать условия эквивалентности, на которых базируются перечисленные методики, потому что аналитические выражения, получаемые в данном случае, не решаются в явной форме относительно ρ , [75; 76].

При определении электрических параметров скважинных заземлителей, с глубиной погружения в грунт более 1000 м, многослойный геоэлек-

трический разрез также представляется расчетной моделью [77]. Однако значительная длина заземлителя позволяет не учитывать деятельный слой и тем самым в расчетах принимать двухслойную модель геоэлектрического разреза, причем неизменного как в летний, так и в зимний период времени. Расчетное выражение, полученное в [77], учитывает собственные параметры скважинных заземлителей. Тем не менее конструктивное выполнение газовых технологических скважин, включающих цементные прослойки, отличается от рассмотренных в [77]. Этот факт требует дополнительной оценки возможности использования ранее полученных соотношений для расчета их электрических характеристик.

Ряд авторов, занимающихся теорией заземления и оценкой защитных действий заземляющих устройств, в своих исследованиях учитывали специфику отрасли. Так, в работах [78-80] приведены обобщающие характеристики удельных электрических сопротивлений горных пород и сопротивления растеканию от опорных поверхностей оборудования карьеров в условиях многолетней мерзлоты. Наиболее полно решена проблема оценки защитного действия заземляющих устройств на горных предприятиях с открытой разработкой месторождений полезных ископаемых в работе Б.Г. Меньшова [78]. Работы Н.Н. Максименко и Г.Г. Асеева [62; 63; 77] имели целью оценить защитные действия сложных ЗС крупных промышленных комплексов Крайнего Севера. Объектом исследования явился Норильский горнометаллургический комбинат. Авторами установлено, что отдельные заземляющие устройства электроустановок коммуникациями различного рода, а иногда и специально проложенными связями объединены в единую разветвленную ЗС. Это обстоятельство привело к необходимости построения и анализа эквивалентных схем замещения, расчету токораспределения в их элементах, учету возможности появления высокого потенциала на технологическом оборудовании. В то же время авторами получено подтверждение выдвигаемого положения о том, что с увеличением количества элементов в разветвленной ЗС и степени ее разветвления величины выносимых потенциалов снижаются. В заключение делается вывод о возможности отказа от сооружения искусственных заземлителей на промышленных комплексах с использованием схем электроснабжения «глубокого ввода». Проанализированные работы [62; 63; 77-80] выполнялись для горнодобывающих предприятий крупных промышленных комплексов. Следует отметить, что при решении аналогичных задач на предприятиях других отраслей возникают проблемы, не позволяющие полностью использовать полученные результаты и практические рекомендации. Поэтому учет специфики конкретных предприятий послужил основанием появления новых работ [81; 82]. Целью работ [81; 82] явилась разработка эффективных методов предпроектных изысканий и методов интерпретации результатов изысканий многолетнемерзлых грунтов для задач проектирования заземлителей и выравнивания

электрических потенциалов на подстанциях газопромыслов Крайнего Севера. Авторами решены важные вопросы теории заземления применительно к северным газопромыслам, но касающиеся только сооружений и эксплуатации искусственных заземлителей.

В зарубежной литературе также ряд работ посвящен теории и практике выполнения заземляющих устройств в условиях высоких широт [83; 84].

Опыт успешного использования естественных заземлителей в тяговых электрических цепях и системах, описанных в работе [85], показывает возможность гарантированного выполнения всех нормативов электробезопасности и защиты от аварийных режимов.

Из приведенного анализа следует, что существующие методы расчета и исследования заземляющих устройств с учетом специфики различных отраслей производства могут служить лишь в какой-то мере основой комплексного подхода к оценке защитного действия сложной ЗС.

Так, в [63; 86; 87] приводится методика расчета токораспределения по элементам ЗС при коротких однофазных замыканиях в сетях с заземленной нейтралью, в которой учитывается возврат тока через нейтрали трансформатора. При этом авторам не удалось решить полностью все вопросы, связанные с построением схем замещения сложных ЗС, с определением величин токов возврата в зависимости от мест замыкания и величин входных сопротивлений ЗС относительно мест замыканий.

Обоснование необходимости комплексного подхода к проблеме оценки защитного действия сложных ЗС на северных газопромыслах впервые было сформулировано в работе [88], выполненной под руководством Б.Г. Меньшова и Э.Б. Альтшулера при непосредственном участии авторов. На конкретном примере показано, что при однофазных замыканиях в высоковольтных сетях на ЗС вопросы использования технологических коммуникаций в качестве заземлителей должны решаться на основе анализа возможности появления взрывоопасной ситуации. В основу расчета может быть положена методика, принятая для оценки взрывобезопасности электрооборудования.

В сетях с изолированной нейтралью возврат тока замыкания на землю происходит через распределенные емкости, поэтому нет конкретной точки возврата к источнику. В [89] частично решен вопрос учета возврата тока однофазного замыкания в сетях с изолированной нейтралью, с этой целью вводится фиктивный провод, проложенный в земле под линиями электропередач. Такое допущение позволяет проводить аналогию с обратным земляным проводом, но является лишь приближенной моделью реальной картины токораспределения по элементам ЗС при замыканиях в сетях с изолированной нейтралью.

При комплексном решении проблемы оценки защитных свойств разветвленных ЗС существенное значение имеют вопросы методики эксплуатационного контроля параметров ЗС. В настоящее время для

практических измерений используется аппаратура, достаточно широко освещенная в технической литературе целым рядом авторов [90-96]. Измерительный ток вводится в ЗС через вспомогательный токовый электрод, что не соответствует реальной картине распределения токов однофазных замыканий на землю. Ограниченная мощность автономных измерительных приборов не позволяет в полной мере отстроиться от помех и сопоставить результаты измерений с реальными значениями сопротивлений растеканию ЗС и ожидаемых напряжений прикосновения и напряжений шага.

Проведенный анализ позволяет сформулировать сущность проблемы проектирования, сооружения и эксплуатации заземляющих устройств северных промышленных комплексов. Настоящая работа посвящена разработке методологии комплексного подхода к проблеме оценки защитных свойств разветвленных ЗС при аварийных режимах в сетях с изолированной и эффективно заземленной нейтралью.

Для реализации намеченных целей в монографии решены перечисленные далее задачи.

1. Разработана методика вероятностного анализа повреждаемости высоковольтных электрических сетей 10 кВ и оборудования главных понизительных подстанций (ГПП) для выявления условий использования технологических коммуникаций в качестве естественных заземлителей и прогнозирования возможных электроопасных ситуации.

2. Предложена методика выбора расчетной эквивалентной модели грунта для оценки электрических характеристик искусственных и естественных заземлителей с учетом многообразия реальных геоэлектрических разрезов в районах Крайнего Севера.

3. Определены алгоритмы вычисления электрических параметров протяженных заземлителей, фундаментов зданий на основании решения уравнений электродинамики электромагнитного поля и доведенные до уровня, принятого к использованию в практических инженерных расчетах.

4. Разработана методика расчета параметров искусственных и естественных заземлителей на основании теории нечетких множеств и нечеткой логики, при упрощенном способе получения информации о реальных геоэлектрических разрезах.

5. Предложена методика построения схем замещения разветвленных ЗС для построения картины распределения токов и потенциалов по элементам ЗС при аварийных режимах в сетях с изолированной и эффективно заземленной нейтралью.

6. Разработана методика по оценке возможности использования технологических коммуникаций, предназначенных для транспортировки горючих газов и жидкостей, в качестве естественных заземлителей с учетом реальной картины токораспределения.

7. Разработана методика аналитического и экспериментального определения значений выносимых потенциалов на удаленные конструкции при аварийных режимах в высоковольтных сетях северных промышленных комплексов.

8. Построена методика комплексного подхода к оценке защитных свойств разветвленных ЗС северных промышленных комплексов, включающей все этапы проектирования и экспериментального контроля параметров ЗУ с учетом естественных заземлителей.

2. Анализ факторов, обуславливающих системный подход к оценке защитных свойств заземляющих сетей электроустановок северных промышленных комплексов

2.1. Исходные положения

Процесс проектирования, расчета и экспериментальной оценки защитных свойств ЗС можно представить функциональной схемой (рис. 2.1), позволяющей рассмотреть логическую взаимосвязь трех факторов.

Первым определяющим фактором являются конструктивное исполнение разветвленной ЗС, способы сооружения и размеры естественных и искусственных заземлителей, взаимосвязь между ее отдельными элементами.

Второй фактор, влияющий на методы оценки защитных свойств разветвленных ЗС, – особенность геоэлектрического разреза многолетнемерзлых грунтов в районах северных промышленных комплексов. Это обусловлено значительным непостоянством удельного сопротивления грунта по простиранию и по глубине при сложных границах разделов между отдельными слоями с постоянными электрическими параметрами. Так, например, в [97; 98] отмечается, что для Норильского промышленного района мерзлые рыхлые четвертичные отложения, представленные, как правило, песками, глинами, галечниками и их разностями, отличаются сильной фракционной изменчивостью в горизонтальном направлении, невыдержанностью по мощности. Все эти факторы приводят к анизотропии во всем исследуемом пространстве. Физические свойства многолетнемерзлых грунтов, даже в пределах одного литологического комплекса непостоянны, и каждое отдельное определение геоэлектрического разреза характеризует только случайное значение.

Для иллюстрации сказанного приведем пример инженерно-геологического заключения по геоэлектрическому разрезу на территории

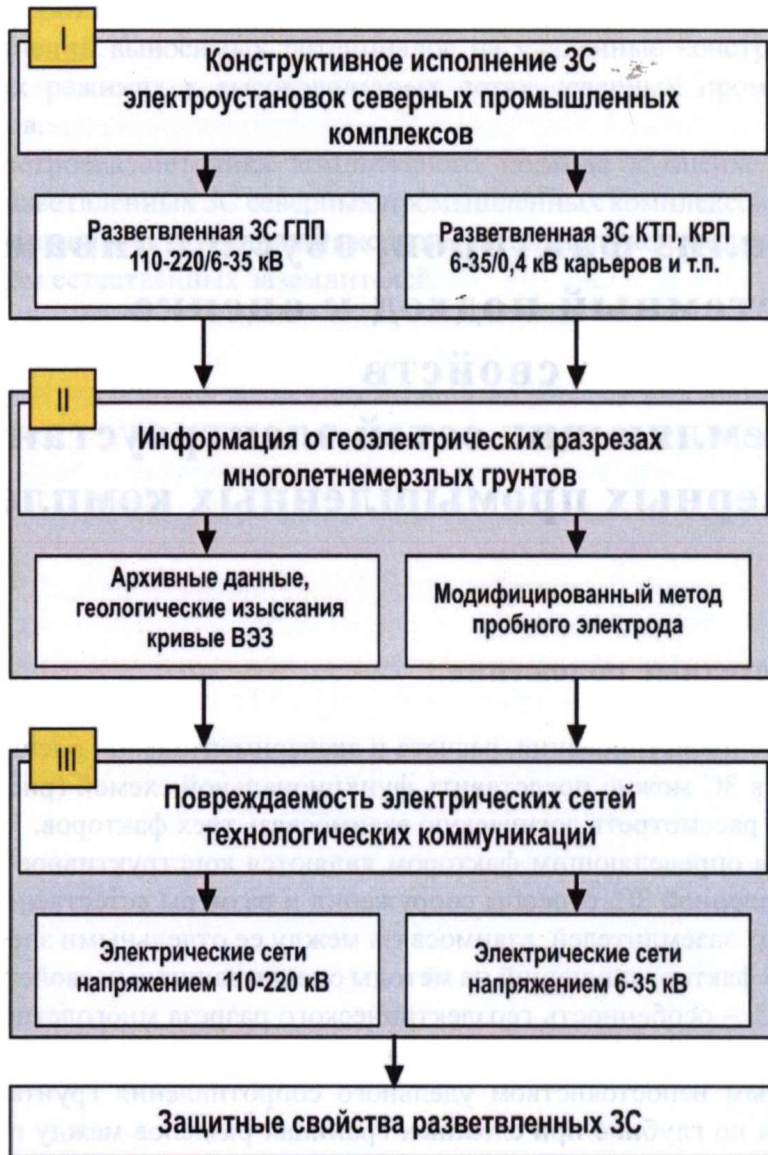


Рис. 2.1. Функциональная схема взаимодействия факторов, обуславливающих защитное действие разветвленной ЗС электроустановок северных промышленных комплексов

главной понизительной подстанции (ГПП), составленному комплексной экспедицией инженерных изысканий института «Норильскпроект» (табл.2.1).

По этим данным на площадке сооружения заземляющего устройства (ЗУ) наблюдается значительная дифференциация удельных сопротивлений ρ и мощности слоев h , и их величины лежат в диапазоне:

$$\rho_1 = 100 \div 2700 \text{ Ом}\cdot\text{м}; \rho_2 = 513 \div 10800 \text{ Ом}\cdot\text{м}; \rho_3 = 0 \div 7980 \text{ Ом}\cdot\text{м};$$

$$h_1 = 0,17 \div 0,9 \text{ м}; h_2 = 0,51 \div 21,6 \text{ м}; h_3 = 18,9 \div 74 \text{ м и более};$$

Таблица 2.1

Номер ВЭЗ	Номер геоэлектрических слоев							
	1		2		3		4	
	$\rho_1, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$h_1, \text{м}$	$\rho_2, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$h_2, \text{м}$	$\rho_3, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$h_3, \text{м}$	$\rho_4, \text{Ом}\cdot\text{м}$	$h_4, \text{м}$
1	220	0.35	513	1.75	7980	18.9	0	>1000
2	560	0.40	2240	3.60	0	30	0	>1000
3	900	0.20	810	1.80	5040	22,5	-	-
4	300	0.32	5700	7.63	0	>30	-	-
5	1000	0.90	9000	21.60	0	>30	-	-
6	100	0.20	233	0.60	1710	>74	0	>1000
7	140	0.17	1260	0.51	5400	24.0	0	>1000
8	1000	0.90	9000	21.60	0	>30	-	-
9	2700	0.42	10 800	10.1	0	>30	-	-
10	1100	0.46	9900	4.14	0	>30	-	-

Примечания: 1. Вертикальное электрическое зондирование произведено с разномом питающей линии 1104 м и шагом 25 м. 2. Средняя относительная погрешность измерения кажущегося сопротивления определялась по погрешностям приборов и метода измерений и составила 4.8 %. 3. На участке выполнены две контрольные скважины. 4. Площадь исследуемой территории 120 × 130 м.

$$\rho_4 > 0;$$

т.е. происходит изменение ρ по простиранию, и это не единичный случай, а общая закономерность для районов Крайнего Севера [99; 100]. Так, в [98] указывается, что одна из существенных особенностей строения геоэлектрического разреза в условиях развития многолетних пород - наличие негоризонтальных границ раздела мерзлых и талых пород.

В связи с этим возникает вопрос о достоверности исходной информации о геоэлектрическом разрезе в условиях Крайнего Севера, оценке ее погрешности и, соответственно, адекватности расчетной модели грунта реальной структуре при проектировании заземляющих устройств.

В настоящее время рекомендуется использовать для предпроектных изысканий комплексную методику, базирующуюся на сочетании методов электропрофилирования (ЭП) и вертикального электрического зондирования (ВЭЗ) [95], которую и примем за основу оценки результатов изысканий. Следует учесть, что для повышения достоверности геоэлектрических разрезов исследуемых площадок методом ВЭЗ бурятся контрольные скважины для проведения электрокаротажа.

Третий определяющий фактор - вероятность появления электроопасной ситуации, в результате которой может наступить электропоражение человека и появление недопустимых перенапряжений на оборудовании. Электрическую систему, подключенные к ней электропотребители и разветвленную ЗС можно представить как сложную систему, в процессе функционирова-

ния которой возникают аварийные ситуации. Эти аварийные ситуации являются случайными событиями [101-104]. Электрическая система относится к восстанавливаемой, поскольку после ликвидации аварии процесс функционирования системы продолжается. К аварийным ситуациям относятся однофазные замыкания на землю в электрических сетях и оборудовании подстанций и потребителей, что служит причиной появления потенциалов на элементах разветвленной ЗС. Аварийную ситуацию можно считать отказом системы. Это положение позволяет использовать для описания процесса нахождения системы в аварийном состоянии вероятностные и статистические методы [105]. Основными показателями уровня электробезопасности являются: среднее время нахождения системы в опасном состоянии; вероятность нахождения системы в опасном состоянии за время эксплуатации; параметр потока опасных состояний. С этой целью произведен анализ повреждаемости высоковольтных сетей Норильского промышленного района и северных газопромыслов Таймыра.

2.2. Классификация разветвленных заземляющих сетей электроустановок северных промышленных комплексов

Разветвленные ЗС электроустановок северных промышленных комплексов можно разделить на два класса. Первый класс – ЗС главных понизительных подстанций (ГПП), присоединенных к одной системе шин источника питания напряжением 110/6 кВ, охватывающих значительные территории. Пример такой ЗС представлен на рис. 2.2, из которого следует, что ЗУ отдельной ГПП представляется фундаментом, заземляющей сеткой, дополнительными искусственными заземлителями, а связь между отдельными ЗУ ГПП осуществляется ТК, грозозащитными тросами. В основу расчета распределения токов замыкания и потенциалов по элементам ЗС положено эквивалентирование фундаментов зданий, заземляющих сеток поверхностной протяженной пластиной, сложных геоэлектрических разрезов однородной структурой.

Второй класс – ЗС электроустановок предприятий открытых горных работ, питание которых осуществляется от сетей с изолированной нейтралью напряжением 6-35 кВ. В этом случае ЗС включает искусственные и естественные заземлители в виде фундаментов комплектных понизительных подстанций (КТП) и комплектных распределительных пунктов (КРП), опор передвижных механизмов небольших площадей (рис. 2.3). Связь между отдельными ЗУ осуществляется специально проложенным воздушным четвертым проводом и естественными заземлителями. Необходимый уровень

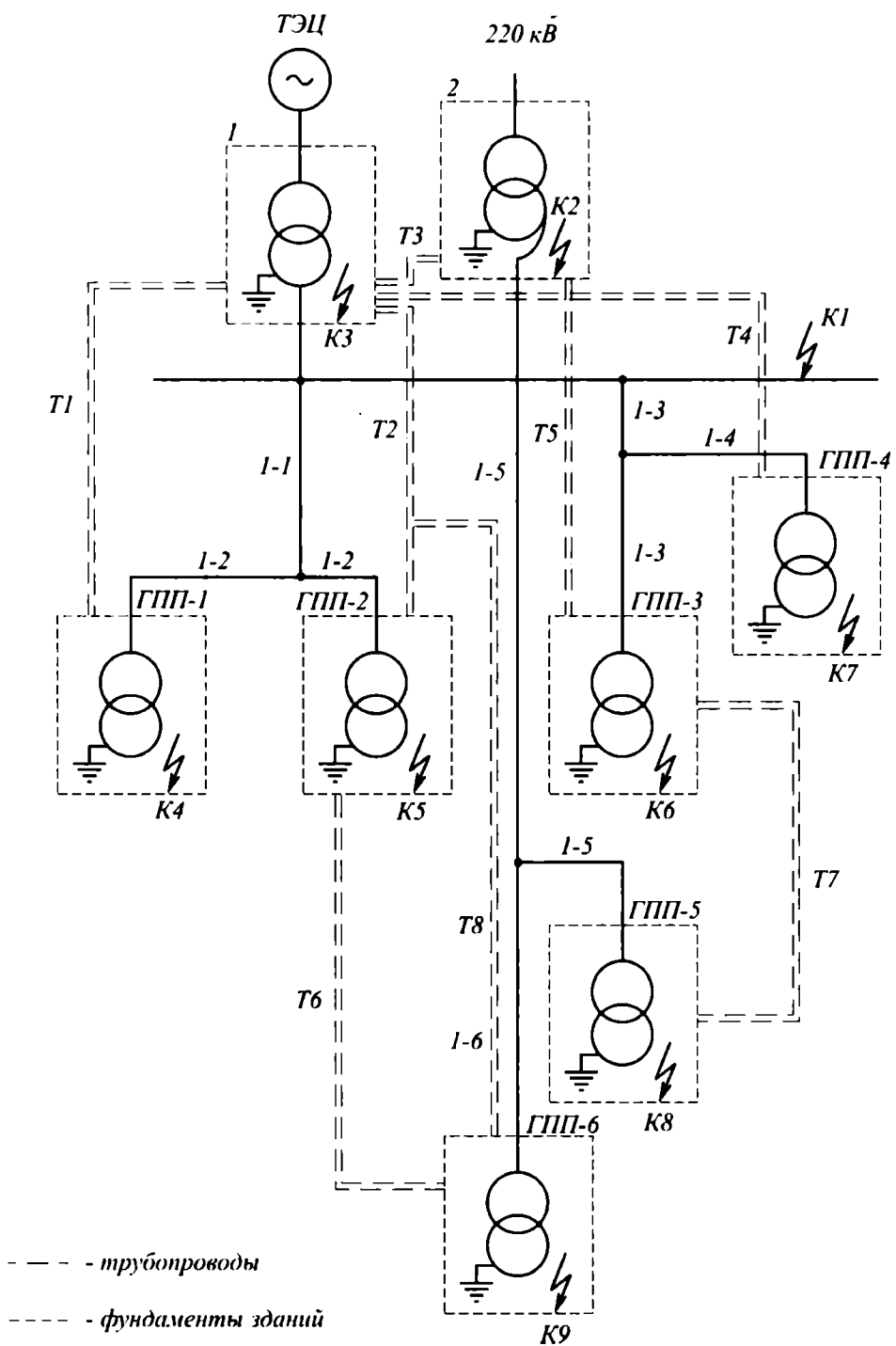


Рис. 2.2. Укрупненная схема электроснабжения промрайона с нанесенными связями между ЗУ подстанций

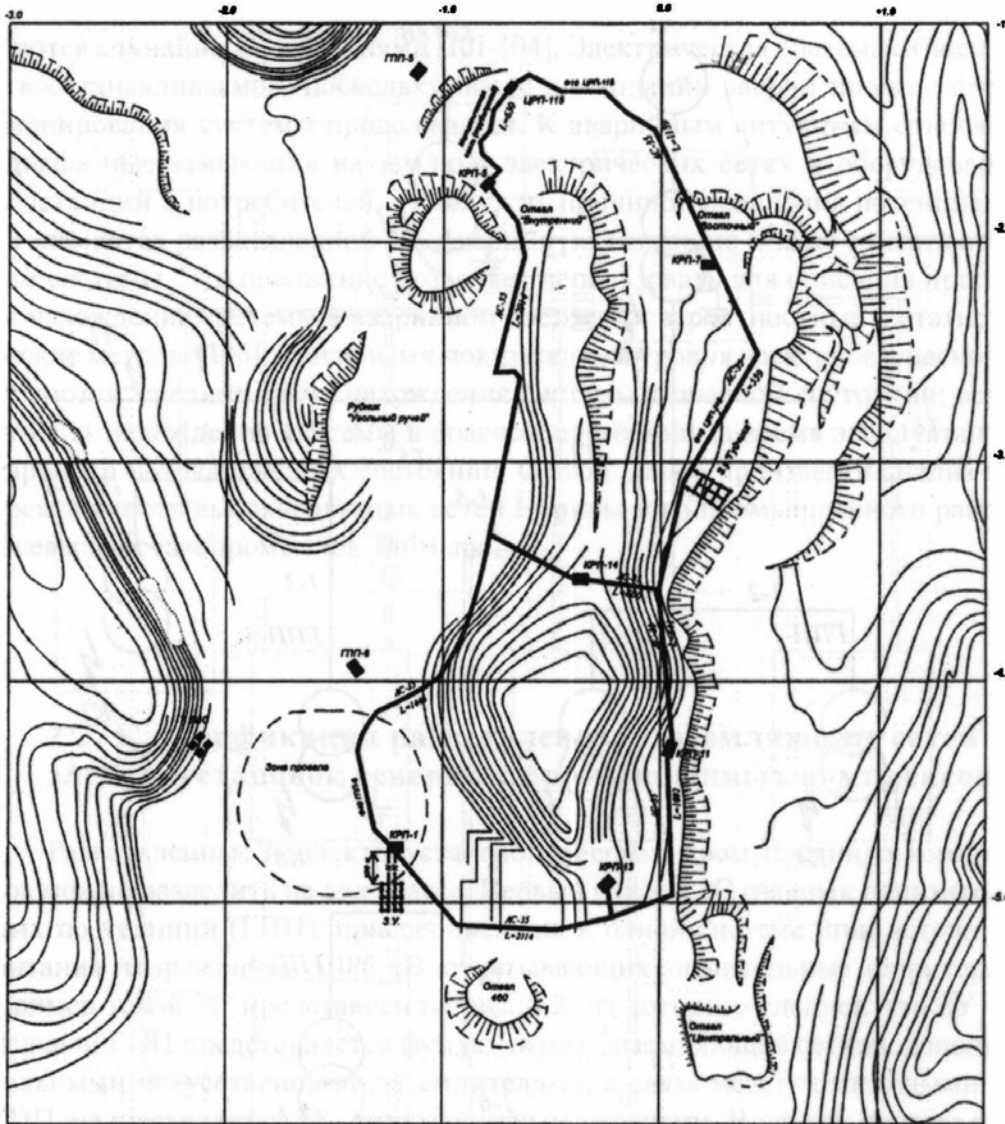


Рис. 2.3. Внешняя сеть заземления рудника открытых горных работ «Медвежий ручей» Норильского промышленного района

электрических параметров ЗС зачастую достигается дополнительным сооружением искусственных заземлителей. Следует учесть, что в соответствии с [4] необходимо разделить ЗС электроустановок напряжениями 110-220 кВ и 6-35 кВ. В основу расчета таких ЗС должны быть положены более строгие методы.

Таким образом, классификация разветвленных ЗС электроустановок северных промышленных комплексов и их конструктивное исполнение определяют выбор расчетных методов для анализа защитных свойств.

2.3. Оценка достоверности информации по грунтовым структурам для определения параметров заземления

При постановке ВЭЗ в условиях распространения многолетнемерзлых грунтов имеется ряд серьезных затруднений. Многолетний опыт работы геофизической партии комплексной экспедиции инженерных изысканий института «Норильскпроект» показывает, что кривые ВЭЗ, интерпретированные с помощью палеток, рассчитанных для кусочно-однородных сред, дают погрешности в десятки, а то и сотни процентов. Геофизики, сталкиваясь с трудностями интерпретации кривых ВЭЗ на многолетнемерзлых грунтах, в основном предполагают, что большие погрешности интерпретации обусловлены наличием наклонных и вертикальных границ раздела, а также боковым влиянием высокоомных (низкоомных) пород и другими искажающими факторами. На это обстоятельство указывается в [99]: «В процессе обработки данных ВЭЗ большую роль играет методика установления типа кривой, так как за счет горизонтальных неоднородностей и рельефа в условиях многолетней мерзлоты кривые оказываются настолько искаженными, что их количественная интерпретация становится затруднительной». Наличие мерзлых пород в геологическом разрезе и большая изменчивость их свойств создают целый ряд затруднений при выполнении геофизических работ и в особенности при интерпретации данных таких геофизических методов, как сейсморазведка, электроразведка, эманиционная радиометрическая съемка, гравиразведка [106; 107].

В [108] говорится, что физические свойства многолетней мерзлоты даже в пределах одного литологического комплекса непостоянны, и каждое отдельное определение характеризует только случайное значение случайного параметра геоэлектрического разреза, зависящего от участка и времени проведения работ.

Для уменьшения погрешностей интерпретации кривых ВЭЗ авторами целого ряда работ предлагается учесть градиентное изменение удельных сопротивлений по глубине, обосновывая последнее физическими предпосылками. Основной причиной градиентности геоэлектрического разреза, как утверждается в докладе Ю.В. Марковича на научно-техническом совещании, проходившем в Норильске в 1979 г., является изменчивость температуры по глубине в зависимости от сезона. Рассмотрим, соответствует ли это утверждение действительности. С этой целью выделим расчетный сезон – наиболее электроопасный с точки зрения возможного поражения людей напряжениями прикосновения и шага. Как следует из [108], для Крайнего Севера характерны три периода эксплуатации электроустановок: безопасный сезон (октябрь - апрель); стереотипный сезон (июль - сентябрь); электроопасный сезон (май - июнь).

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru