

Федеральное агентство по образованию
Сибирский федеральный университет
Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования
Норильский индустриальный институт

М.А. Авербух, В.В. Забусов, В.И. Пантелеев

**СИСТЕМНЫЙ ПОДХОД
К ОЦЕНКЕ ПАРАМЕТРОВ ЗАЗЕМЛЯЮЩИХ СЕТЕЙ
ЭЛЕКТРОУСТАНОВОК
СЕВЕРНЫХ ПРОМЫШЛЕННЫХ КОМПЛЕКСОВ**

Красноярск
СФУ 2009

УДК 621.316.99
А 19

Рецензенты:

Б. В. Лукутин, д-р тех. наук, проф., заведующий кафедрой электроснабжения промышленных предприятий Томского политехнического университета;
Б.П. Бадтиев, канд.тех.наук, директор рудоуправления «Талнахское» ЗФ ОАО «ГМК «Норильский никель»

Авербух М.А.

А 19 Системный подход к оценке параметров заземляющих сетей электроустановок северных промышленных комплексов: монография / М.А. Авербух, В.В. Забусов, В.И. Пантелеев. – Красноярск: Сибирский федеральный университет, Норильский индустриальный институт, 2009. – 271 с.

ISBN 978-5-7638-1834-5

Рассмотрена системная оценка параметров разветвленных заземляющих сетей электроустановок северных промышленных комплексов. Исследуются теоретические и практические проблемы обеспечения защитных свойств заземляющих устройств, включенных в общепромышленную заземляющую сеть различными связями. При этом учитываются особенности выполнения фундаментов зданий, кабельных эстакад, трубопроводов в условиях Крайнего Севера с точки зрения электробезопасности и сложные геоэлектрические разрезы многолетнемерзлых грунтов.

Предназначена для работников проектных и эксплуатационных организаций, занимающихся вопросами разработки и использования электроустановок в северных районах. Полезна аспирантам и студентам старших курсов электротехнических специальностей.

ISBN 978-5-7638-1834-5

© М.А. Авербух,
В.В. Забусов,
В.И. Пантелеев, 2009
© Сибирский федеральный
университет, 2009

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 газоздушных смесей при искровом способе зажигания	142
6.4. Определение пороговых значений токов, не приводящих к воспламенению газоздушных 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 разрезов 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 натурных 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.