

Ф.Х. Халилов

**Электромагнитная совместимость  
электроэнергетики,  
техносферы и биосферы**

Санкт-Петербург  
2014

**Халилов Ф.Х. Электромагнитная совместимость электроэнергетики, техносферы и биосферы. Учебное пособие. СПб.: Издание НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2014 - 190 с.**

В настоящем учебном пособии раскрывается суть проблемы электромагнитной совместимости объектов электроэнергетики, техно- и биосферы, рассмотрены источники электромагнитных помех в электроэнергетике, даны различные методы защиты электрооборудования от внешних электромагнитных полей, рассмотрена помехоустойчивость устройств релейной защиты, автоматики и измерений, подробно даны вопросы расчета и эксплуатации заземляющих устройств, рассмотрена электрохимическая коррозия элементов электроэнергетики, подробно анализируются вопросы электромагнитной совместимости электроэнергетики с биосферой.

Учебное пособие предназначено для слушателей групп повышения квалификации по курсу “Электромагнитная совместимость электроэнергетики, техносферы и биосферы”, а также студентов электроэнергетических специальностей ВУЗов.

Учебное пособие рассмотрено и одобрено на заседании кафедры “Оперативно-диспетчерское управление энергосистемами”.

Научный редактор д.т.н., профессор Меркурьев Г.В.

## Оглавление

	стр
<b>Введение</b> .....	6
<b>1. Суть проблемы электромагнитной совместимости электроэнергетики, техносферы и биосферы.</b> .....	9
1.1 Общее. ....	9
1.2 Классификация проблем ЭМС электроэнергетики, техносферы и биосферы. ....	10
1.3 ЭМС электроэнергетики с окружающей средой (ЭКО-ЭМС). ....	11
1.4 ЭМС электроэнергетики с биосферой (БИО-ЭМС) .....	15
1.5 ЭМС электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями техносферы (ТЕХНО-ЭМС) .....	20
1.6 ЭМС электроэнергетики с информационной и радиотехнической электроносферой (ЭЛЕКТРОНО-ЭМС) .....	25
1.7 Внутренняя авто – ЭМС между подсистемами электроэнергетики (ИНТЕР-ЭМС) .....	27
<b>2. Характерные источники электромагнитных помех в электроэнергетике.</b> .....	29
2.1 Общее. ....	29
2.2 Характерные источники электромагнитных помех на станциях и подстанциях. ....	29
2.3 Классы и степени жесткости испытаний устройств на помехоустойчивость. ....	30
2.4 Напряжения и токи при коротких замыканиях на шинах распределительных устройств. ....	40
2.5 Импульсные помехи при коммутациях силового оборудования и к.з. на шинах распределительных устройств. ....	46
2.6 Импульсные помехи при ударах молнии. ....	55
2.7 Электромагнитные поля разночастотного диапазона. ....	57
2.8 Разряды статического электричества. ....	58
2.9 Магнитные поля промышленной частоты. ....	61
2.10 Импульсные магнитные поля. ....	62
2.11 Помехи при возмущениях в цепях питания автоматических и автоматизированных систем технологического управления постоянного и переменного тока. ....	62
2.12 Помехи от вспомогательного электрооборудования. ....	64
<b>3. Защита электрооборудования от внешних электромагнитных полей.</b> .....	65
3.1 Требования к защитным устройствам и способы защиты. ...	65
3.2 Оценка величины тока и напряжения, наведенных внешним электромагнитным полем при медленных его изменениях. ...	68
3.3 Применение экранов для повышения ЭМС электронной аппаратуры. ....	70

3.4	Рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости блоков автоматики, управления и связи. . . . .	76
3.5	Схемы подключения аппаратуры, не имеющей информационных связей с другими устройствами. . . . .	79
3.6	Схемы подключения аппаратуры, состоящей из комплекса блоков. . . . .	81
3.7	Практические рекомендации по выполнению экранирования аппаратуры. . . . .	81
3.8	Защита от проникновения мешающих и опасных воздействий по цепи питания. . . . .	83
3.9	Защита кабелей связи от токов короткого замыкания в линиях электропередач. . . . .	87
<b>4.</b>	<b>Помехоустойчивость устройств релейной защиты, автоматики и измерений. . . . .</b>	<b>89</b>
4.1	Виды испытаний на помехоустойчивость и условия их проведения. . . . .	89
4.2	Методика проведения испытаний на устойчивость к магнитным помехам. . . . .	91
4.3	Экспериментальная установка для проведения испытаний. . .	95
4.4	Результаты испытаний измерительных и пусковых устройств. . . . .	96
4.5	Результаты испытаний логических устройств. . . . .	99
4.6	Результаты испытаний исполнительных устройств. . . . .	99
4.7	Результаты испытаний статических устройств. . . . .	101
<b>5.</b>	<b>Заземление, как основное средство обеспечения ЭМС электроэнергетики с техно- и биосферой. . . . .</b>	<b>104</b>
5.1	Классификация заземлений. . . . .	104
5.2	Основные функции ЗУ. . . . .	107
5.3	Задачи защитного заземления. . . . .	109
5.4	Правила эксплуатации ЗУ. . . . .	115
5.5	Методы измерения удельного сопротивления грунта. . . . .	117
5.6	Расчет сопротивления растеканию ЗУ. . . . .	121
5.7	Поведение ЗУ при импульсных токах. . . . .	124
5.8	Вынос потенциала с контуров заземления электроустановок.	127
<b>6.</b>	<b>Электрохимическая коррозия. . . . .</b>	<b>129</b>
6.1	Возникновения и последствия коррозии. . . . .	129
6.2	Характеристики коррозии. . . . .	134
6.3	Виды коррозии. . . . .	136
6.4	Коррозионные среды. . . . .	142
6.5	Основные меры защиты от коррозии в электроэнергетике. . .	145
6.6	Расчет катодных станций. . . . .	153

<b>7.</b>	<b>Проблемы ЭМС электроэнергетики с биосферой. . . . .</b>	<b>158</b>
7.1	Нормы интенсивности электромагнитных полей для людей и фауны. . . . .	158
7.2	Расчет электрических полей под ВЛ. . . . .	165
7.3	Расчет магнитных полей под ВЛ. . . . .	168
7.4	Электромагнитные поля под воздушными линиями высокого напряжения. . . . .	169
7.5	Электромагнитная совместимость подземных и подводных линий электропередачи с окружающей средой и ихтиофауной. . . . .	175
7.6	Меры защиты от гальванических влияний ВЛ на человека. . .	182
7.7	Меры защиты от электрического поля на человека, прикоснувшегося к транспорту под ВЛ СВН и УВН. . . . .	184
7.8	Защита от мешающего влияния ВЛ на людей. . . . .	185
7.9	Защита от акустического влияния ВЛ на людей. . . . .	185
7.10	Меры защиты от влияния подводных КЛ на окружающую среду. . . . .	186
	Литература. . . . .	189

## ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время человечество стоит перед угрозой экологического кризиса. Свою существенную "лепту" в надвигающийся кризис вносит электроэнергетика, нарушающая естественные природные ситуации в окружающей атмосфере, в ноосфере, литосфере и даже в "эфире". Все возрастающие электромагнитные поля в пространстве, окружавшем мощные электроустановки, увеличение мощности, токов и напряжений электропередач сверх- и ультравысокого напряжения (СВН и УВН) нарушают их взаимную электромагнитную совместимость (ЭМС) с различными системами ноосферы (экосферы, биосферы или техносферы).

Под "ЭМС" в настоящее время принято понимать в узком смысле слова собственно электромагнитную устойчивость технического средства (ТС), т.е. способность ТС сохранять требуемое качество функционирования при воздействии на него электромагнитных помех с регламентированными значениями параметров и не создавать при этом электромагнитных помех другим ТС.

В учебном пособии в порядке обсуждения сделана попытка реализовать назревшую необходимость сформулировать в широком смысле слова понятие "Электромагнитной совместимости" (ЭМС) двух систем как "Обеспеченность нормального функционирования каждой из этих систем практически независимо от процессов в соседней системе с учетом примененных мер и средств, обеспечивающих их нормальное взаимное сосуществование или ЭМС". Учитывая статистический в большинстве случаев характер помех, создаваемых "субъектом", т.е. влияющей системой и реакцией на эти помехи "объекта" (системы, подверженной влиянию), предполагается обеспечение ЭМС в течение длительного времени (времени "эксплуатации" систем»» входящей в техносферу, или "жизни" системы, входящей в биосферу).

Всякое нарушение ЭМС нежелательно. Однако в зависимости от тяжести последствий такого нарушения (ущербов хозяйству, опасности для жизни и здоровья человека или других объектов биосферы, времени восстановления ЭМС и т.д.) все возможные нарушения ЭМС можно подразделить на "опасные" и "мешающие".

Под опасными нарушениями ЭМС будем понимать такие, при которых возникает опасность для жизни и здоровья окружающих людей, ремонтного или обслуживающего персонала, повреждения оборудования или длительного нарушения нормальной работы системы - объекта. Под мешающими влияниями будем понимать такие нарушения ЭМС, при которых имеет место снижение качества функционирования системы, повышается утомляемость или ухудшается самочувствие людей, ускоряется расходование ресурса, уменьшаются срок нормальной эксплуатации и межремонтный период ТС. Такое разделение на опасные и мешающие влияния носит не-

сколько условный характер и четкую границу между ними в ряде случаев провести невозможно.

Поясним это на примерах. Поражение монтера, попавшего под опасное "напряжение прикосновения" на подстанции высокого напряжения (ВН) следует рассматривать как опасное, а аллергическую несовместимость человека (особенно - ребенка) с синтетической одеждой как мешающее нарушение ЭМС между субъектом техносферы (или ее продуктом) и объектом биосферы. Наоборот, выход из строя платы с интегральной схемой ЭВМ на подстанции вследствие электростатического разряда при прикосновении оператора к ЭВМ следует рассматривать как нарушение ЭМС между субъектом биосферы и объектом техносферы. Электростатический разряд между двумя людьми, находящимися в сухом помещении с пластиковым покрытием является, как правило, мешающим нарушением ЭМС между субъектом и объектом биосферы, а повреждение телефонного коммутатора на станции вследствие опасной э.д.с. взаимоиндукции высоковольтной линии (ВЛ) и линии связи (ЛС) - опасным нарушением ЭМС между субъектом и объектом техносферы. Пробой изоляции и аварийное отключение ВЛ при ударе в нее молнии является опасным, а плохое самочувствие или инфаркт у человека вследствие электромагнитной бури являются мешающим или опасным нарушением ЭМС между субъектом экосферы и объектами техно- или биосферы соответственно.

Настоящее учебное пособие состоит из семи глав. В первой главе отмечается важность ЭМС для биосферы и техносферы, дается общая характеристика и классификация экологических проблем ЭМС электроэнергетики в ноосфере, а именно ЭМС электроэнергетики с окружающей средой, с биосферой, с элементами техносферы, с информационными, компьютерными и радиотехническими устройствами, а также внутренняя ЭМС между подсистемами электроэнергетики.

Глава вторая посвящена характерным источникам электромагнитных помех в электроэнергетике. Здесь же даются классы и степени жесткости испытаний устройств на помехоустойчивость.

В главе третьей даются различные способы защиты электронной аппаратуры и защиты кабелей связи от токов короткого замыкания в линиях электропередач.

Для надежного управления системами электроэнергетики важное значение имеет помехоустойчивость устройств релейной защиты, автоматики и измерений. Этому вопросу посвящена глава четвертая.

В пятой главе приведены основные проблемы и их решение одного из важнейших средств обеспечения ЭМС электроэнергетики, техно- и биосферы – заземляющих устройств.

Практически во всех сферах электроэнергетики негативное влияние оказывает электрохимическая коррозия. Ее видам и мерам защиты от коррозии посвящена шестая глава.

В электроэнергетике основной движущей силой является обслуживающий персонал. Поэтому седьмая глава учебного пособия посвящена проблемам электромагнитной совместимости электроэнергетики с биосферой (главным образом с людьми).



# 1. СУТЬ ПРОБЛЕМЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ, ТЕХНОСФЕРЫ И БИОСФЕРЫ

## 1.1. Общее

Первый президент академии наук СССР академик В.И.Вернадский всю “сферу разума” – “ноосферу” рассматривал как совокупность гидросферы, литосферы, атмосферы и эфира.

Ноосфера включает в себя также все области деятельности человечества - быт, производство, науку, философию, искусство, религию и т.д. Ноосфера стремится к постоянному расширению, имеется в виду как пространственное, так и интеллектуальное расширение. Это было написано В.И.Вернадским еще в 1938 году и подтвердилось во II половине столетия, а также в XXI веке.

Электроника в широком смысле этого слова за послевоенные годы получила колоссальное развитие. В настоящее время следует говорить об особой важной подсистеме техносферы - об "электронно-сфере". Без информатики, вычислительной техники, коммуникаций, радиосвязи, телевидения и других областей, материальной основой которых является электроника, в настоящее время немыслимо ни одно производство и развитие человеческого общества. Дальнейшие успехи электроники сопровождаются увеличением быстродействия, миниатюризацией и усложнением схем и устройств, что чрезвычайно усложняет проблемы ЭМС систем электроэнергетики и электроники. Это объясняется все возрастающей плотностью заполнения земной поверхности установками электроники и электроэнергетики, ужесточением требований к допустимым воздействиям внешних сторонних электромагнитных полей, токов и напряжений на электронное оборудование и одновременным увеличением мощности, напряжений и токов электропередач сверхвысокого и ультравысокого напряжения.

Говоря о самоуничтожении, В.И.Вернадский имел в виду войны и неблагоприятные экологические последствия деятельности человека для окружающей среды и биосферы, могущие достигнуть глобальных масштабов.

В последней своей работе "Несколько слов о ноосфере", опубликованной в 1944 году, В.И.Вернадский пишет: "В истории человечества и биосфере вообще война такой мощности, длительности и силы небывалое явление" (имеется в виду вторая мировая война); и далее: "Лик планеты - биосфера химически резко меняется человеком сознательно и главным образом бессознательно... человеком создаются новые виды и расы животных и растений... в будущем нам рисуются как возможные сказочные мечтания: человек стремится выйти за пределы своей планеты в космическое пространство, и, вероятно, выйдет. Сейчас мы переживаем новое геологическое эволюционное изменение биосферы. Мы входим в ноосферу. Мы вступаем в нее в новый стихийный геологический процесс - в грозное время, в эпоху разрушительной мировой войны. Но важен для нас факт, что идеалы нашей демократии идут в

унисон со стихийным геологическим процессом, с законами природы, отвечают ноосфере. Можно поэтому смотреть на наше будущее уверенно. Оно в наших руках. Мы его не выпустим".

Интервал между первой и второй мировыми войнами составил 21 год. После второй мировой войны прошло уже свыше 60 лет. Поэтому можно считать, что "военная" часть прогноза В.И.Вернадского в основном выполняется. Третья мировая война не возникла главным образом вследствие опасения непредсказуемых последствий гибели всего живого в термоядерном пекле. Однако имеет место разгул антигуманизма в виде многочисленных локальных войн, терроризма, преступности и т.п.

Сложнее с проблемой экологии. В.И.Вернадский в этой же работе пишет, что в результате деятельности человеческого общества воздушная оболочка суши и все ее природные воды деформируются физически и химически, но необходимо сохранить богатства Земного шара для будущих поколений. В то время отрицательные экологические последствия деятельности человека носили еще локальный (местный) характер. Однако за прошедшие годы они приобретают глобальный характер. Вследствие нерационального, а порой хищнического использования богатств земного шара, которые биосфера накапливала многие миллионы лет, исчезают отдельные виды животных и растений, истощаются месторождения полезных ископаемых, окружающая атмосфера загрязняется углекислым газом и другими вредными выбросами, атмосфера, гидросфера и литосфера загрязняются радиоактивными отбросами атомной энергетики и военной промышленности, нарушается озоновый защитный слой атмосферы. Одним словом, на человечество и на всю биосферу земли надвигается глобальный экологический и антигуманистический кризис ноосферы.

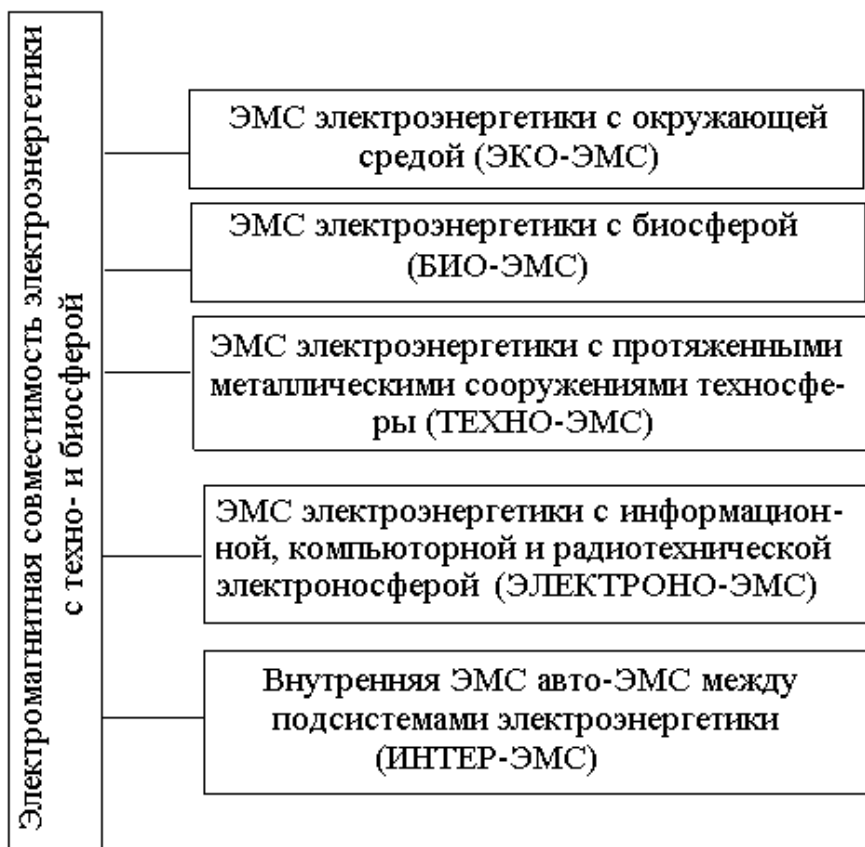
Ниже в учебном пособии делается попытка внести какую-то лепту, направленную на восстановление "справедливости" ЭМС между электроэнергетикой, техносферой и биосферой.

## **1.2. Классификация проблем ЭМС электроэнергетики, техносферы и биосферы**

В зависимости от характера взаимодействия систем все экологические проблемы ЭМС электроэнергетики с ноосферой можно условно подразделить на 5 групп, учитывая, конечно, что в условиях реальной жизни и эксплуатации фактически они в значительной степени переплетаются между собой и частично дублируют друг друга (рис. 1.1).

При этом необходимо учитывать что, в соответствии с основной характеристикой ноосферы как непрерывно развивающейся и расширяющейся сферы жизнедеятельности человеческого общества создаются все более delicate, миниатюрные и быстродействующие системы. Они постоянно требуют ужесточения нормативов допустимых внешних воздействий, новых

мер защиты и защитных устройств, обеспечивающих ЭМС систем электроэнергетики с другими системами ноосферы.



*Рис.1.1. Основные экологические проблемы электромагнитной совместимости электроэнергетики и ноосферы*

### **1.3. ЭМС электроэнергетики с окружающей средой (ЭКО-ЭМС)**

Схематически основные экологические проблемы ЭМС электроэнергетики с окружающей средой представлены на рис 1.2. Рассмотрим их краткую характеристику.

Атмосферное электричество. Основными экологическими источниками наиболее тяжелых и частых нарушений нормальной работы энергетических систем являются грозовые разряды. Опыт эксплуатации показывает, что в каждые 100 км линии электропередачи (ВЛ) в среднем в течение "грозового сезона" (с мая по октябрь) ударяет несколько десятков и несколько повторных разрядов молний, по большей части - отрицательной полярности. Эквивалентное сопротивление молнии в первый момент достигает многих десятков килоом, но с увеличением тока молнии и разогревом ее канала сопротивление уменьшается до сотен Ом. Кратковременное напряжение в месте удара молнии может достигать миллионов вольт, что вполне достаточно для пробоя изоляции практически любой линии электропередачи, вплоть до УВН. От места удара по проводам линии распространяются волны перенапряжения. Они, дойдя до электростанции или подстанции, могут повредить изоляцию генератора, трансформатора и другого оборудования. Для защиты от прямых ударов молнии над проводами линий устанавливают тросы, а на

подстанции - вертикальные молниеотводы. Для защиты от обратных перекрытий с пораженной опоры на провода необходимо каждую опору заземлить с малым (до 10 Ом или несколько больше в районах с высоким удельным сопротивлением земли) сопротивлением заземления. Для защиты оборудования подстанции применяют специальные разрядники или ограничители перенапряжений (ОПН).



Рис. 1.2. ЭМС электроэнергетики с окружающей средой (ЭКО-ЭМС)

При ударе молнии возникают также индуктированные напряжения вследствие емкостных (электрическая составляющая) и индуктивных (магнитная составляющая) связей между каналом молнии и опорами и проводами

ЛЭП. Они представляют опасность для изоляции сетей среднего (6-35 кВ) и низкого напряжения, особенно для сетей промышленной энергетики.

Удары молнии могут вызвать также пожары (пожароопасных сооружений) и даже взрывы (для взрывоопасных емкостей, таких как, например, нефте- и газохранилища электростанций).

Электрохимическая коррозия. Огромное хозяйственное значение имеет электрохимическая коррозия подземных сооружений электроэнергетики. Электрическое поле блуждающих токов в земле инициирует протекание уравнивающих токов в подземных металлических устройствах (заземляющих устройствах электростанций, подстанций и опор линий электропередачи, оболочках подземных кабелей, трубопроводах, железнодорожных рельсах и т.д.). Электрохимическое разрушение металла происходит в местах выхода ионов из металла в окружающую среду (местном - язвенная коррозия, или общем - сравнительно равномерный переход частиц металла в окружающую почву).

При нормальном симметричном режиме работы трехфазной линии электропередачи в земле протекает лишь незначительный уравнивающий ток промышленной частоты нулевой последовательности. В несимметричном режиме работы трехфазной линии в земле протекает переменный ток промышленной частоты. Вследствие влияния поверхностного эффекта этот ток концентрируется вблизи поверхности земли и в основном - под проводами линии в пределах полосы с шириной, приблизительно равной

$$b = 700 \cdot \sqrt{\rho_3 / f} , \quad (1.1)$$

где  $\rho_3$  - удельное сопротивление земли (Ом·м);  $f$  - частота (Гц). Так, например, при  $\rho_3 = 100$  Ом·м и  $f = 50$  Гц,  $b = 1000$  м. Кроме того, переменный ток вызывает значительно меньшую электрохимическую коррозию, чем постоянный. Поэтому основным источником электрохимической коррозии является блуждающий постоянный ток, область протекания которого практически не ограничена. Блуждающий ток вызывается несимметричными линиями, работающими на постоянном токе (трамвай, электрифицированная железная дорога, линия электропередачи постоянного тока, если она работает в несимметричном режиме).

Наиболее интенсивной электрохимической коррозии подвергаются рабочие заземляющие устройства электропередач постоянного тока высокого напряжения. Особенно интенсивно корродируют устройства, работающие в анодном режиме, когда ионы металла переходят из электрода в грунтовые воды и окружающую почву. Эти заземления устраивают на значительной глубине и вдали от других подземных сооружений, чтобы уменьшить коррозию последних. В качестве заземлителей используются массивные электроды.

Механизм электрохимической коррозии протяженных подземных оболочек кабелей, трубопроводов и т.п. вследствие воздействия блуждающих постоянных токов (и в значительно меньшей степени - переменных) заклю-

чается в следующем: блуждающий ток втекает в проводник на катодных участках, где их напряжение оказывается отрицательным по отношению к окружающему грунту. При этом избыточные электроны переходят из металла в электролит грунта. На анодном же участке проводник заряжен положительно, ток вытекает из проводника, ионы металла переходят в грунт и проводник (оболочка кабеля, трубопровод или заземлитель) разрушается. Особую опасность представляет локальная "язвенная" коррозия. При этом происходит местное разрушение всей толщи оболочки кабеля или трубопровода, образуется сквозное отверстие, изоляция кабеля увлажняется, и значительная длина кабеля выходит из строя. В случае трубопровода возможен взрыв выходящего из него через образовавшееся отверстие под давлением газа. Для этого достаточно возникающих от трения газа искр или повышенного блуждающего тока от проходящего в месте пересечения с трубопроводов электропоезда.

Чтобы уменьшить интенсивность коррозии, необходимо удалить подземный проводник от зоны блуждающих токов, устроить "дренаж" - отвод блуждающих токов на специальные электроды, применять "анодную" защиту (т.е. принудительно сообщить защищаемому проводнику отрицательное напряжение, включив дополнительный источник постоянного напряжения между этим проводником и специально проложенным дополнительным заземлителем).

Под действием агрессивных включений в атмосфере (например, вблизи химических или цементных заводов и т.п.) возникает ускоренная коррозия висящих в воздухе многожильных стальных тросов и в значительно меньшей степени стале-алюминиевых проводов линий электропередач. Для их защиты рекомендуется соответствующая смазка, которая должна покрывать каждую жилу многожильного провода или троса, а в особо угрожаемых случаях даже перейти на стале-алюминиевые тросы.

Электромагнитные бури. Солнце, наряду с инфракрасным (тепловым), световым и ультрафиолетовым излучением, особенно в годы "активного" солнца приблизительно одиннадцатилетнего периода, выбрасывает огромное количество электронов, протонов, нейтронов и альфа-частиц. Пролетая мимо Земного шара и взаимодействуя с магнитным полем вращающейся земли, они индуцируют в земной поверхности электродвижущие силы, медленно меняющиеся во времени (порядка секунд и более). Величина э.д.с. даже в периоды наиболее интенсивных электромагнитных бурь колеблется от долей до единиц вольт на километр и в северном полушарии ориентирована на меридиональное направление.

В протяженных линиях электропередач возникают медленно меняющиеся уравнивающие токи, которые могут достигать десятков и даже сотен ампер. Протекая через обмотки трансформаторов, они вызывают насыщение магнитопроводов и многократное увеличение тока намагничивания. Кроме того, выход на нелинейный участок кривой намагничивания трансформатора сопровождается протеканием по линии, кроме вышеуказанного уравни-

ного тока нулевой последовательности, также и токов четных и нечетных гармонических. Это может вызвать ложные отключения дальних линий электропередачи вследствие неверной работы релейной защиты, рост перетока мощности по параллельным линиям и их перегрузку с последующим отключением, т.е. к системной аварии, сопровождающейся нарушением электроснабжения потребителей на большой территории и большим ущербом. Эти обстоятельства необходимо учитывать при разработке релейной защиты дальних электропередач.

Экологические последствия. Линии электропередачи СВН и УВН создают неблагоприятные экологические последствия для окружающей местности вследствие сооружения массивных (высота до 60 м, а в отдельных случаях при пересечении водных преград и до сотен метров) опор и подвески на них трех проводов с расщеплением на 3-4 и до 12 составляющих каждый, расположенных по окружности радиуса до 1-2 м, а также двух грозозащитных тросов.

Эти обстоятельства могут иметь существенное значение при прохождении линии через заказники или вблизи заказников, заповедников, вблизи крупных городов, а также в курортных местностях.

Линии всех классов напряжения, кроме того, требуют соответствующих отчуждений земляных участков и усложняют выполнение сельскохозяйственных работ в местах установки опор.

#### **1.4. ЭМС электроэнергетики с биосферой (БИО-ЭМС)**

Схематически основные проблемы ЭМС электроэнергетики с биосферой представлены на рис.1.3. Рассмотрим их краткую характеристику.

Опасные напряжения прикосновения и шага. Главным источником опасности для человека является ток, который протекает через тело человека при прикосновении к частям электроустановки, находящимся под различными потенциалами. Первое ощущение (легкий зуд в ладони, охватывающей электрод - источник тока) возникает уже при токах  $I_{\text{ощ}} = 0,6-1,5$  мА, при увеличении тока до  $I_{\text{нот}} = 4-6$  мА у отдельных людей уже происходит затруднение разжатия руки ("эффект неотпускания"), а при токах 20-25 мА этот эффект наступает практически у всех людей. Дальнейшее увеличение тока приводит к обмороку и затем к параличу дыхания и гибели человека, попавшего под напряжение. Особую опасность представляет протекание тока в области сердца - могут возникнуть неуправляемые сокращения отдельных групп мышечных волокон с частотой приблизительно на порядок выше нормальной (фибрилляция), прекращается пульсация сердца и останавливается кровообращение. Это состояние может продолжаться и после того, как ток прекратился.

Пороговые значения токов ощущения  $I_{\text{ощ}}$ , неотпускания  $I_{\text{нот}}$  и фибрилляции  $I_{\text{ф}}$  имеют большой статистический разброс для различных людей. Статистическое распределение пороговых значений ощутимого тока  $I_{\text{ощ}}$  и неот-

пускающего тока  $I_{\text{нот}}$  для различных людей в первом приближении подчиняется нормальному закону с плотностью распределения:



Рис. 1.3. ЭМС электроэнергетики с биосферой (БИО-ЭМС)

$$f(I_{\text{н}}) = \frac{1}{(\sigma_{\text{н}} \sqrt{2} \cdot \pi)} \cdot \exp \left[ \frac{(I_{\text{н}} - m)^2}{2\sigma_{\text{н}}^2} \right], \quad (1.2)$$

с математическими ожиданиями соответственно  $I_{\text{ощ}} = m = 1,1$  мА и  $I_{\text{нот}} = m = 14,9$  мА и среднеквадратическими отклонениями  $\sigma_{\text{н}} = \sigma_{\text{ощ}} = 0,15$  мА и  $\sigma_{\text{н}} = \sigma_{\text{нот}} = 3,2$  мА соответственно для пороговых значений осязательного и неотпускающего тока.

Пороговые значения фибрилляционных токов  $I_{\text{ф}}$  подчиняются в первом приближении логнормальному закону с плотностью вероятности

$$f(I'_{\text{н}}) = \frac{1}{(\sigma_{\text{н}} \sqrt{2\pi})} \cdot \exp \left[ \frac{(I'_{\text{н}} - m)^2}{2\sigma_{\text{н}}^2} \right], \quad I'_{\text{н}} = \lg(I_{\text{н}}), \quad (1.3)$$

причем  $m \cong \lg(\bar{I}_{\text{ф}})$  и  $\sigma_{\text{н}}$  существенно зависят от длительности протекания тока в диапазоне  $0,1 < t < 1$  с. В первом приближении остается постоянным произведение  $q_{\text{ф}} = I_{\text{фmin}} \cdot t_i = 0,07$  К, соответствующее практически достаточно малой вероятности фибрилляции (при  $\lg I'_{\text{фmin}} = m - 3 \cdot \sigma_{\text{н}}$ ),  $P = 0,0014$ .



В реальных условиях величина тока зависит от разности напряжений между точками контактирования рука-нога (напряжение прикосновения) или нога-нога (напряжение шага), а также от сопротивления тела человека (1000-10000 Ом) и переходных сопротивлений в местах контактов, которые могут варьировать в весьма широких пределах 100–10000 Ом.

Поэтому нормы напряжений прикосновения или шага, исходя из наиболее неблагоприятных значений сопротивлений, принимаются согласно таблицы 1.1

Таблица 1.1

Допустимые напряжения прикосновения и шага для электроустановок высокого напряжения

Время воздействия $t_i$ , с	0,01-0,08	0,1	0,3	0,5	1	1
Допустимые напряжения прикосновения или шага $U_{пр}$ или $U_{ш}$ , В	650	500	165	100	50	36
$U_{пр} \cdot t_i$ , В·с	50	50	50	50	50	-

Наиболее опасные напряжения прикосновения и шага возникают на подстанциях 110 кВ и выше в сетях с глухим заземлением нейтралей трансформаторов. В большинстве случаев для обеспечения безопасности обслуживающего персонала на таких подстанциях устраивают контур защитного заземления с сопротивлением растекания не более  $R = 0,5$  Ом. Контур охватывает всю подстанцию, а внутри его для обеспечения безопасного напряжения шага прокладывают в земле полосы, а для безопасного напряжения прикосновения вокруг оборудования (выключатели, трансформаторы и т.п.) прокладывают дополнительные контуры, выравнивающие распределение напряжения на поверхности земли. В местностях с высоким удельным сопротивлением земли допускается некоторое увеличение  $R_z$ , но напряжения  $U_{пр}$  и  $U_{ш}$  должны быть ограничены путем прокладки дополнительных полос внутри контура.

На мощных подстанциях ток однополюсного короткого замыкания, протекающий через контур заземления, может достигать и даже превосходить  $I_z = 20$  кА. При этом напряжение на заземлении не должно превосходить  $U_z = 10$  кВ, но большую опасность может представить вынос опасного напряжения за пределы заземляющего контура протяженными металлическими устройствами (железнодорожные рельсы, трубопроводы, оболочки кабелей и т. п.). В местах выхода их за пределы заземляющего контура подстанции на них необходимо предусмотреть соответствующие изоляционные устройства.

Специфическую опасность может представить прикосновение человека к крупногабаритному транспорту на резиновом ходу под проводами ВЛ СВН и особенно УВН. Через человека будет протекать ток

$$I_{ч} = j\omega \cdot (C_A \dot{U}_{\dot{A}} + C_B \dot{U}_{\dot{A}} + C_C \dot{U}_{\dot{N}}), \quad (1.4)$$

где  $U_i$  и  $C_i$  ( $i = A, B, C$ ) соответственно напряжения на фазах А, В, С и емкости между транспортной платформой и фазными проводами.

В случае расположения проводов ЛЭП в одной горизонтальной плоскости наведенное на транспорт напряжение равно в первом приближении

$$U_{\text{тр}} = \frac{U_{\text{в}} \cdot S^2 \cdot h_{\text{вд}}}{2h \cdot (h + S)} \lg \frac{2h \cdot S}{r_y \sqrt{h^2 + S^2}}; \quad r_y = r_{\text{в}} \sqrt{\frac{nr_i}{r_{\text{в}}}}, \quad (1.5)$$

где  $U_{\text{л}}$  - линейное напряжение электропередачи;  $r_{\text{э}}$  - эквивалентный радиус расщепленной фазы;  $r_{\text{п}}$ ,  $r_{\text{р}}$ , - соответственно радиусы провода, окружности, по которой расположены провода расщепленной фазы;  $n$  - число составляющих проводов;  $S$  - расстояние между соседними фазными проводами;  $h$ ,  $h_{\text{тр}}$  - высота проводов ВЛ и платформы транспорта над землей.

Длительное воздействие электромагнитного поля на человека по данным ряда биоэлектромагнитных исследований и статистического анализа заболеваемости различных групп людей может способствовать онкологическим заболеваниям, особенно у детей, а также неблагоприятным мутациям с отдаленными генетическими последствиями.

Мешающие влияния электроэнергетики на биосферу. Исследования научно-исследовательского института гигиены труда и персональной защиты (НИИГТ и ПЗ) и анализ опыта работы показывают, что в нормальном режиме работы ВЛ оказывает неблагоприятное воздействие на окружающее население и особенно на обслуживающий персонал вследствие воздействия магнитного и электрического полей, а также акустических помех.

Под действием магнитного поля затрудняется движение крови в кровеносных сосудах, что вызывает синюшность рук у монтеров, работающих на линиях сильного тока под нагрузкой.

На основе многочисленных жалоб обслуживающего персонала, а также по данным исследований всероссийского научно-исследовательского института охраны труда (ВНИИОТ) установлено, что длительное систематическое нахождение человека в электрическом поле с высокой напряженностью ( $E = 5$  кВ/м и выше при отсутствии человека), отрицательно сказывается на его самочувствии. Нормы и правила по охране труда рекомендуют временно (до дальнейшего уточнения) допустимую продолжительность систематического пребывания обслуживающего персонала в электрическом поле (табл. 1.2). Приведенные в таблице 1.2 значения  $E$  определяются в наиболее неблагоприятном месте возможного пребывания человека (при его отсутствии), при условии, что остальное время он находится в местах, где напряженность электрического поля не превышает 5 кВ/м. Кроме того, должны быть приняты меры, исключающие возможность воздействия кратковременных электростатических разрядов на организм человека в рабочих условиях. Значительно сложнее вопрос о нормировании допустимой напряженности электрического поля вблизи линий электропередачи. Длительное систематическое нахождение людей или животных в пределах полосы отчуждения не предусмотрено. Поэтому в настоящее время в качестве допустимой напряженности под про-

водами для населенной местности обычно принимается  $E < 15$  кВ/м и  $E < 20$  кВ/м для ненаселенной. За пределами полосы отчуждения, где возможно длительное нахождение детей, напряженность должна быть значительно ниже ( $E < 2$  кВ/м).

Таблица 1.2

Гигиенические нормативы напряженности электрического поля для персонала, обслуживающего установки СВН

Напряженность электрического поля $E$ , кВ/м	Допустимая длительность пребывания человека в течение суток $T_{\text{доп}}$ , мин
До 5	Без ограничения
5-10	180
10-15	90
15-20	10
20-25	5
Свыше 25	Не допустима

Акустические помехи высокой интенсивности также неблагоприятно сказываются на самочувствии людей. Под влиянием переменных электромагнитных полей возникают электродинамические силы в отдельных элементах. Они пульсируют с двойной частотой (100 Гц) и создают механическую вибрацию. В зависимости от интенсивности эта вибрация воспринимается человеческим ухом как шорох, гудение или рев. Так, например, у поверхности проводов линий высокого напряжения может возникнуть коронный разряд, создающий значительные добавочные потери энергии, акустические и радиопомехи. Характер и интенсивность короны существенно зависят от амплитуды напряженности  $E$  электрического поля у поверхности провода и погоды (иней, изморозь, гололед, дождь).

Известна так называемая критическая напряженность короны, кВ/см

$$E_c = 16,5 \cdot \sqrt{2} \cdot m \cdot \delta \cdot \left[ 1 + 0,62 / (\delta^{0,3} \cdot r_0^{0,38}) \right], \quad (1.6)$$

где  $m = 0,82 \dots 0,85$  - коэффициент негладкости провода.

Если  $E > E_c$ , то коронирует весь провод и возникает "общая корона", создающая большие потери энергии. Чтобы избежать этого, применяют расщепленные провода, изобретенные одним из ведущих профессоров Ленинградского политехнического института академиком В.Ф. Миткевичем еще в 1910 году. На линии 330 кВ используют фазы, расщепленные на два составляющих провода, на линии 500 кВ - на три, на линии 750 кВ - на четыре - пять проводов. Такое решение обеспечивает  $E = (0,8 \dots 0,85) E_c$  и отсутствие общей короны. Однако в точках неоднородности (заусеницы, загрязнения и особенно капли дождя) напряженность оказывается повышенной, и в результате возникает местная корона. Наиболее сильные помехи наблюдаются при морозящем дожде, когда вибрирующими элементами оказываются капли дождя у поверхности провода, поэтому ЛЭП 110-220 кВ при дожде "шуршат" и "шипят", ВЛ 330-500 кВ "гудят", а ВЛ 750 кВ "режут".

Большие акустические помехи могут возникать также вблизи мощных трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов СВН. При этом вибрируют стальные листы магнитопроводов и медные провода обмоток, особенно, если частота собственных, колебаний их элементов близка к 100 Гц.

### **1.5. ЭМС электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями техносферы**

Схематически основные проблемы ЭМС электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями представлены на рис.1.4. Рассмотрим их краткую характеристику.

Опасные влияния на промышленной частоте. Под "опасным" влиянием на протяженные металлические сооружения техносферы будем понимать такое влияние, при котором индуцированные напряжения в цепях линий связи (ЛС), транспортных устройствах или других элементах могут создавать опасность для здоровья и жизни обслуживающего персонала, населения и абонентов ЛС, вызывать повреждения аппаратуры и приборов или ложные срабатывания железнодорожной сигнализации. Со всем этим приходится считаться, прежде всего, при наиболее неблагоприятных - аварийных или ненормальных режимах работы сети высокого напряжения.

При несимметричных коротких замыканиях в сети с эффективным заземлением нейтрали возникают большие токи в земле и сильные магнитные поля. Они могут вызвать опасные магнитные влияния. Возникает э.д.с. взаимной индукции в находящихся вблизи воздушных и кабельных линиях связи, в цепях железнодорожной сигнализации и блокировки. В таких случаях необходимо применять специальные меры для их защиты.

Правила защиты устанавливают нормативные величины допускаемых значений напряжения на проводах ЛС и продольной э.д.с. взаимной индукции. Эти требования учитывают возможные в эксплуатации ЛС различные конкретные ситуации. Так, например, в особо неблагоприятных условиях оказываются монтеры, выполняющие ремонтные работы на подземном кабеле связи в стесненных условиях в кабельном колодце и во влажной земле. При этом допустимо наименьшее напряжение на проводах ЛС, так как сопротивление тела человека может быть минимальным (1000-2000 Ом).

В значительно более благоприятных условиях оказываются рабочие, ремонтирующие воздушную ЛС на деревянных опорах. При правильной организации труда рабочие должны быть закреплены монтажным поясом. Тогда инстинктивное отдергивание руки при ударе током не приведет к падению и механической травме. Кроме того, ток, который проходит через монтера, существенно ограничен включенным последовательно сопротивлением деревянного столба, составляющим не менее 10 кОм на каждый метр его длины.

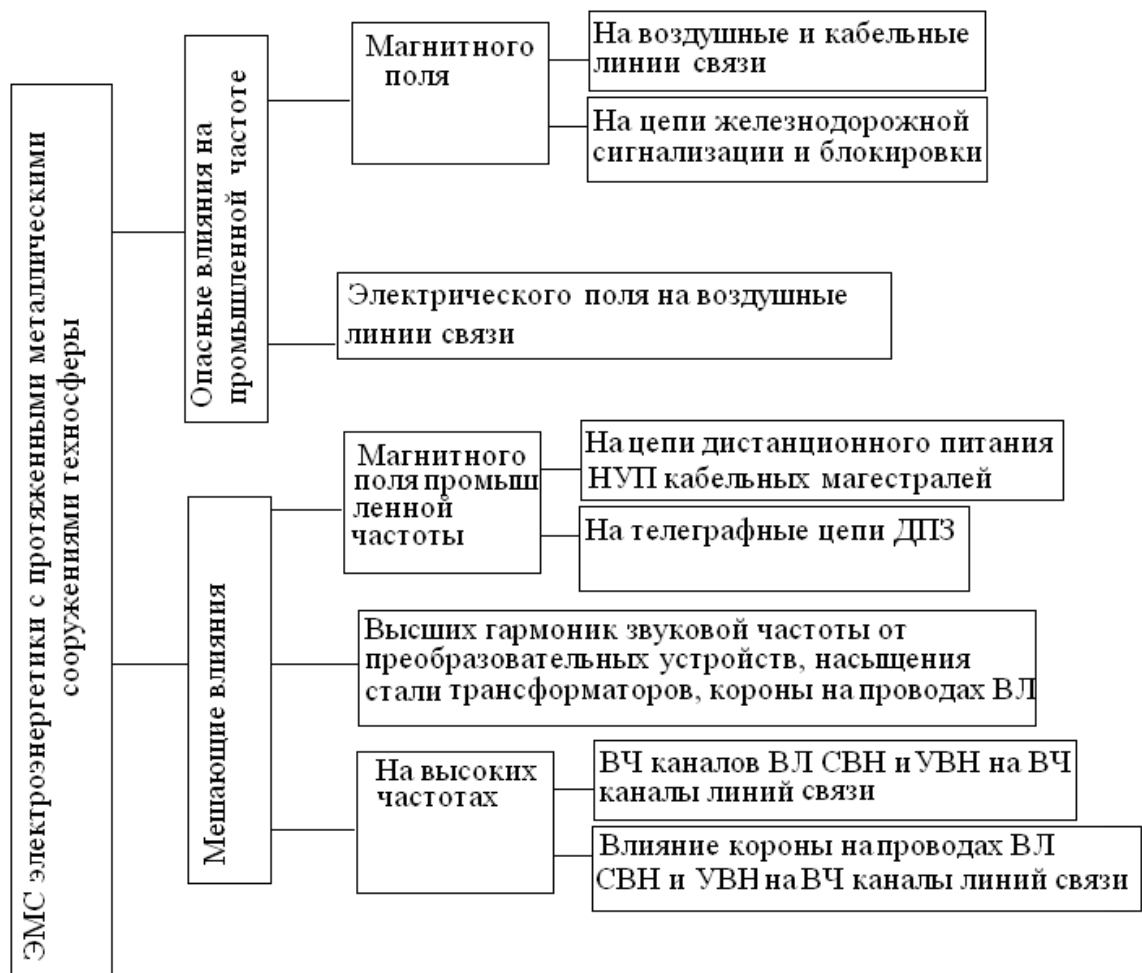


Рис.1.4. ЭМС электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями (ТЕХНО-ЭМС)

Повреждение аппаратуры и приборов в цепи ЛС может возникнуть в случае, когда суммарное приложенное напряжение окажется выше пробивного напряжения изоляции жил кабеля или аппаратов по отношению к заземленным экранам или к оболочке кабеля.

Электрическая прочность кабелей связи, вводных устройств и аппаратуры при кратковременном воздействии в течение 1...2 с несколько выше, чем испытательное одномоментное напряжение. Однако в условиях эксплуатации вследствие старения изоляции ее электрическая прочность снижается. В первом приближении можно считать, что эти два обстоятельства взаимно компенсируют друг друга. Кроме того, на кабельных ЛС часто предусматривают дистанционное питание неуправляемых усилительных пунктов (НУП). Поэтому правила защиты требуют, чтобы величина кратковременной э.д.с. взаимной индукции с учетом возможного неблагоприятного наложения напряжения дистанционного питания не превышала испытательного напряжения аппаратуры и кабелей связи.

В длительном режиме работы э.д.с. взаимной индукции также с учетом напряжения дистанционного питания НУП при применении соответствующих мер защиты не должна превосходить допустимого рабочего напряжения между жилами кабеля.

При расчетах опасного влияния ВЛ на людей и аппаратуру ЛС необходимо учитывать как нормальный режим работы ВЛ, так и наиболее неблагоприятный аварийный режим к.з. в одной точке. Одновременное наложение к.з. в двух различных удаленных друг от друга точках - маловероятное событие. Оно учитывается в исключительных случаях. Так, например, особо ответственным является влияние ВЛ на цепи железнодорожной полуавтоматической блокировки с блокмеханизмами. При неблагоприятном стечении обстоятельств это влияние может привести к авариям на железной дороге. В этих условиях Правила защиты требуют учитывать даже такую маловероятную возможность, как наложение к.з. на одной ВЛ в двух точках, удаленных друг от друга. Линии 6-35 кВ, работающие в сетях с изолированной нейтралью, при одновременном к.з. двух фаз в разных точках могут создавать повышенные индуктированные напряжения в цепях железнодорожной блокировки.

Опасность представляет продольная э.д.с. взаимоиндукции  $E$  на длине гальванически неразделенного участка сближения

$$E = \sum_{i=1}^n I_i k_i z_i \ell_i, \quad (1.7)$$

где  $I_i$ ,  $k_i$ ,  $\ell_i$  - соответственно влияющий ток нулевой последовательности ВЛ, коэффициент защитного действия оболочки кабеля, рельсов, тросов и других экранирующих элементов и длина  $i$ -го участка эквивалентного параллельного сближения ВЛ и ЛС;  $z_i$  - взаимное сопротивление между ВЛ и ЛС с учетом поверхностного эффекта в земле, вычисленное по формулам или кривым Карсона или по приближенной формуле:

$$Z_i = \frac{j\omega\mu_0}{4\pi} \ln \left[ \frac{a^2 + (h_1 + h_2 + 2h_0)^2}{a^2 + (h_1 - h_2)^2} \right]; \quad h_0 = \sqrt{\frac{\rho_3}{j\omega\mu_0}}, \quad (1.8)$$

где  $h_0$  - эквивалентная комплексная глубина уровня зеркального отражения магнитного поля в земле;  $a$ ,  $h_1$ ,  $h_2$ ,  $\rho_3$  соответственно ширина сближения, высоты ВЛ и ЛС над поверхностью земли и ее удельное сопротивление.

Для уменьшения влияния ВЛ на ЛС устанавливают разделительные линейные и редуцирующие трансформаторы. Аппаратура узла связи отделяется от линии, а участок сближения ограничен двумя соседними разделительными и редуцирующими трансформаторами.

Правила защиты устанавливают допустимые значения (табл.1.3) продольных э.д.с. взаимоиндукции для линий связи и цепей железнодорожной блокировки. В тех случаях, когда допустимая, продольная э.д.с. превышает установленную норму, дополнительно к указанным выше разделительным и редуцирующим трансформаторам приходится устанавливать разрядники. При этом напряжение на проводе ЛС по отношению к земле, а также падение напряжения на сопротивлениях заземления разрядников при наиболее неблагоприятном к.з. на ВЛ не должно превышать значений, приведенных в табл.1.3 и 1.4.

Таблица 1.3

Допустимые э.д.с.  $E_{\text{доп}}$  и напряжения  $U_{\text{доп}}$  для кабельных ЛС и цепей полуавтоматической блокировки

Характеристика цепи	Допустимо, если спасательные меры защиты			
	отсутствуют		имеются	
	кратковременно	длительно		длительно
		t, ч	$E_{\text{доп}}, \text{В}$	
Кабельные ЛС без дистанционного питания	$E_{\text{доп}} <$	< 2	70	$E_{\text{доп}} <$
	$< U_{\text{исп}}$	> 2	36	$< U_{\text{раб}}$
То же, с ДП изолированным от земли	$E_{\text{доп}} <$	< 2	70	$E_{\text{доп}} <$
	$< U_{\text{исп}}$	> 2	36	$> U_{\text{раб}}$
То же, с ДП и заземленным полюсом источника постоянного тока	$E_{\text{доп}} < U_{\text{исп}} - U_{\text{дп}}(1/\sqrt{2})$	< 2	70	$E_{\text{доп}} <$
		> 2	36	$> U_{\text{раб}} - U_{\text{дп}}/\sqrt{2}$
То же, с ДП и заземленной средней точкой источника переменного тока	$E_{\text{доп}} < U_{\text{исп}} - U_{\text{дп}}(1/\sqrt{2})$	< 2	70	$E_{\text{доп}} <$
		> 2	36	$> U_{\text{раб}} - U_{\text{дп}}/\sqrt{2}$
Цепи полуавтоматической блокировки с блокмеханизмами				
однопроводные	$E_{\text{доп}} < 60 \text{ В}$	> 1		-
двухпроводные	$E_{\text{доп}} < 30 \text{ В}$	> 1		-

Примечания:  $U_{\text{исп}}$ -испытательное одноминутное напряжение, В;  $U_{\text{раб}}$ - рабочее напряжение между жилами цепей кабеля, В;  $U_{\text{дп}}$  - напряжение источника дистанционного питания, В.

Таблица 1.4

Допустимые э.д.с. и напряжения относительно земли для воздушных ЛС

Характеристика цепи	Допустимо, если разрядники					
	отсутствуют			установлены		
	кратковременно		длительно		кратковременно	
	t, ч	$E_{\text{доп}}, \text{В}$	t, ч	$E_{\text{доп}}, \text{В}$	t, с	$E_{\text{доп}}, \text{В}$
Воздушные ЛС на железобетонных или металлических опорах	< 0,15	320	< 2	70	-	-
	0,15-0,3	240	> 2	36	-	-
	0,3-0,6	160			-	-
	> 0,6	120			-	-
Воздушные ЛС на деревянных опорах, в т.ч. с железобетонными приставками	< 0,15	2000	< 2	120	< 0,15	1300
	0,15-0,3	1500	> 2	60	0,15-0,3	1000
	0,3-0,6	1000			0,3-0,6	750
	> 0,6	750			> 0,6	500

Для снижения опасного влияния на ЛС устанавливают дренажные катушки. Можно также вместо железобетонных и стальных опор на ЛС использовать деревянные, для которых допустимые э.д.с. и напряжение значительно выше. На участках тесного сближения иногда приходится заменять воздушную ЛС кабельной. В отдельных случаях необходимо перенести ЛС дальше от ВЛ и тем самым существенно уменьшить влияние ВЛ.

Ряд мер, способствующих снижению опасных влияний, можно осуществить и на ВЛ. К их числу относятся:

- установка на ВЛ хорошо проводящих (сталеалюминевых) заземленных тросов;

- частичное разземление нейтралей трансформаторов для уменьшения токов однофазного к.з.;
- автоматический контроль состояния изоляции ВЛ с изолированной нейтралью и быстрое отключение поврежденного участка, чтобы исключить к.з. в 2-х точках;
- перевод воздушной линии в кабельную в городских условиях, а также в пересечениях с ВЛ.

В отдельных случаях, когда ЛС находится в непосредственной близости от ВЛ 6-35 кВ в сети с изолированной или резонансно-заземленной нейтралью, приходится учитывать также возможность опасного электрического влияния ВЛ на ЛС. Такая опасность может возникнуть при замыкании на землю одной фазы ВЛ 6-35 кВ, так как при этом на остальных двух фазах напряжения повышаются до линейных, а сдвиг фаз между ними может быть порядка  $60^\circ$ , а в случае дугового замыкания на землю имеют место, кроме того, многократные зажигания и погасания электрической дуги, сопровождающиеся бросками тока и напряжения на здоровых и аварийных фазах линии.

Мешающие влияния электроэнергетики на протяженные металлические сооружения техносферы. Такие влияния возникают вследствие помех, которые создаются сетями высокого напряжения в условиях длительного нормального режима их работы. Они не представляют непосредственной опасности для сооружений техносферы, однако ухудшают качество ее работы, снижают надежность или создают затруднения для нормального функционирования связи, телевидения, радио и т.д..

Сети высокого напряжения индуктируют в элементах техносферы токи и напряжения промышленной частоты 50 Гц, а также звуковых частот (высших гармоник (150-5000 Гц) и высокой частоты (20 кГц и более)).

В кабельных линиях связи функционируют многочисленные высокочастотные каналы связи. Вследствие сильного затухания высокочастотных каналов через каждые 5-15 км приходится устраивать неуправляемые усилительные пункты. На линиях связи одновременно с телефонной связью по схеме провод-провод широко применяется для телеграфа схема два провода земля (ДПЗ). При этом удается значительно уменьшить мешающее влияние телеграфа на телефонные каналы. Магнитное поле, образованное рабочими токами 50 Гц ВЛ, обуславливает мешающее влияние на электрические цепи, в которых земля используется в качестве обратного провода. К их числу относятся цепи дистанционного питания НУП, телеуправления и телесигнализации, а также низкочастотный телеграф, работающий по схеме ДПЗ.

Токи и напряжения высших гармоник ВЛ оказывают мешающие влияния на каналы звуковой частоты линий связи. Высшие гармоники в сетях высокого напряжения возникают главным образом вследствие работы полупроводниковых преобразовательных устройств, электроплавильных печей, электросварочных агрегатов и из-за насыщения стали трансформаторов. Токи и напряжения высших гармоник не участвуют в передаче полезной электроэнергии, они создают добавочные потери и понижают к.п.д. электропередачи.



Поэтому их стараются по возможности уменьшить. Как правило, они не превышают нескольких процентов от основного рабочего тока или напряжения. Основная работа линий связи осуществляется по высокочастотным каналам, а каналы тональной (звуковой) частоты используются главным образом для служебной связи. Однако тональные каналы могут оказаться основными в чрезвычайных условиях, особенно при сильном гололеде на проводах линий связи, когда сигналы в высокочастотных каналах сильно затухают. В этих случаях мешающее влияние ВЛ на высших гармониках может иметь существенное отрицательное значение и Правила предусматривают соответствующие меры по их ограничению.

Импульсы токов короны на проводах ВЛ СВН и УВН и изоляторах ВЛ 35-220 кВ, накладываясь друг на друга, со смещением в пространстве (вдоль длины линии) и во времени, создают общий уровень высокочастотных помех в широком диапазоне частот 20...2000 кГц. Одновременно в линиях всех напряжений от 6 кВ и выше работают каналы высокочастотной связи в диапазоне 30...300 кГц. Надежная работа этих каналов может быть обеспечена, если уровень сигналов по ним значительно превышает уровень помех от короны. В воздушных линиях связи также работают многочисленные ВЧ каналы. Правила рекомендуют мероприятия, обеспечивающие достаточно малое влияние ВЧ каналов ВЛ и ВЧ помех от короны на ВЧ каналы ЛС, по которым идет основная работа связи.

За пределами полосы отчуждения должен быть обеспечен достаточно низкий для приемников уровень радиопомех от короны на проводах и от преобразовательных устройств на подстанциях постоянного тока. При этом необходимо учитывать, что частичные разряды и корона на изоляторах создают также телевизионные помехи в области УВЧ.

## **1.6. ЭМС электроэнергетики с электроносферой**

Схематически основные проблемы ЭМС электроэнергетики с информационной, компьютерной и радиотехнической электроносферой представлены на рис.1.5.

Опасные влияния. Перенапряжения в питающей сети, а также даже самые кратковременные скачки напряжения в питающей сети могут привести к пробое изоляции или выходу из строя элементов электронной, особенно полупроводниковой техники, и тем самым вывести из строя ЭВМ, подчас в наиболее ответственный момент, когда требуется особенно четкая и бесперебойная работа. Специфическое опасное влияние может возникнуть вследствие гальванического влияния со стороны заземления при внезапном к.з. в питающей сети на землю.

Мешающие влияния. Неустойчивое напряжение, "скачки" напряжения, а также высшие гармоники источников питания промышленной частоты, как правило, не опасны для компьютерной электронной техники, но вызывают сбои и нечеткую работу ЭВМ и требуют включения источников питания че-

рез соответствующие фильтры. Весьма важно, чтобы совместно работающие блоки электронной техники были заземлены в одной точке, так как уравнивающие токи, возникающие между отдельными землями, часто оказываются источником нежелательных помех вследствие емкостных или индуктивных электромагнитных наводок или гальванических влияний на интегральные схемы. Близко расположенные и недостаточно экранированные мощные электрические цепи могут создавать такие электромагнитные наводки в цепях питания и внутренних цепях ЭВМ, которые существенно затрудняют их работу.



Рис.1.5. ЭМС электроэнергетики с информационной, компьютерной и радиотехнической электросферой (ЭЛЕКТРОНО-ЭМС)

Частоты функционирования практически всех устройств электросферы значительно выше промышленной частоты 50 Гц. Однако всевозможные высокочастотные электромагнитные колебания в цепях электроэнергетики создают нежелательные помехи в указанных устройствах, расположенных вблизи мощных электроэнергетических установок. Повторные зажигания и погасания электрической дуги возникают между контактами высоковольтных аппаратов, особенно - разъединителей. Зажигания и погасания дуги

возбуждают в коммутируемых контурах электромагнитные колебания, создающие помехи в расположенных вблизи от них электронных схемах.

Отмеченные в § 1.6 токи высокой частоты, возникающие в проводах ВЛ вследствие короны, а также токи каналов ВЧ связи по этим проводам генерируют в окружающем пространстве электромагнитные поля, создающие радиопомехи в расположенных вблизи радиоприемных устройствах.

Отмеченные в § 1.1 экологические последствия от крупногабаритных сооружений нарушают условия распространения радиоволн и искажают показания радиомаяков и других направленных радиопередач.

### 1.7. Внутренняя ЭМС между подсистемами электроэнергетики (ИНТЕР-ЭМС)

Нарушения электромагнитной совместимости между различными подсистемами самой электроэнергетики приводят (рис.1.6) к крайне нежелательным последствиям для нее: коммутационные, дуговые и квазистационарные перенапряжения в сетях высокого напряжения вызывают повреждения изоляции, короткие замыкания, отключения и погашения потребителей и большой народнохозяйственный ущерб. Необходимо поддерживать достаточно высокий уровень изоляции и предусмотреть установку разрядников или ОПН на линиях СВН и УВН.

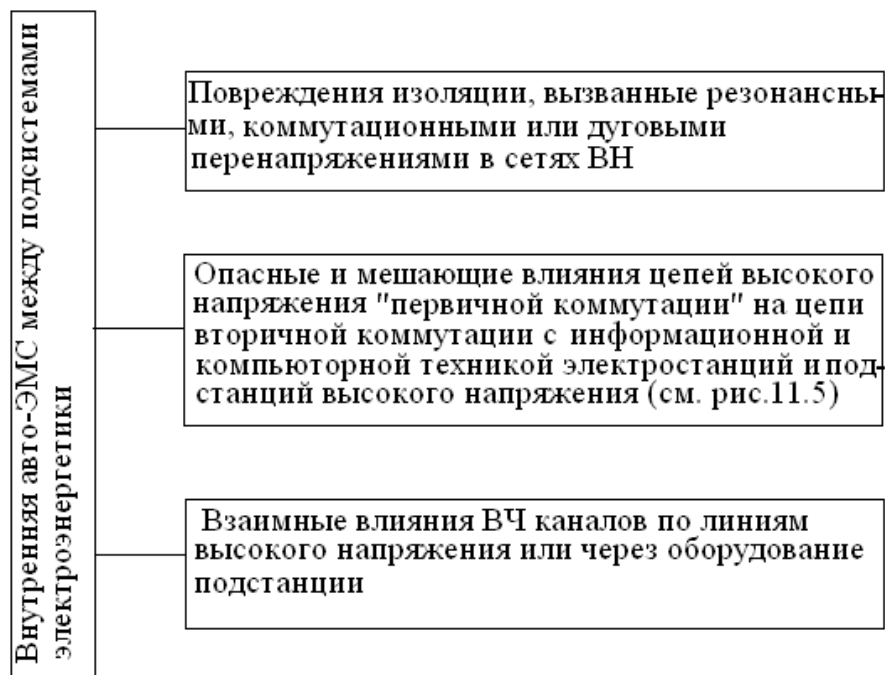


Рис.1.6. Внутренняя ЭМС между подсистемами электроэнергетики (ИНТЕР-ЭМС)

Аварии и оперативные коммутации вызывают опасные и мешающие влияния цепей высокого напряжения "первичной коммутации" на цепи "вторичной коммутации" с электронными устройствами информационной и ком-

пьютерной техники электростанций и подстанций высокого напряжения. Они аналогичны рассмотренным влияниям на устройства электроносферы и могут привести к выходу из строя или неселективной работе устройств вторичной коммутации в наиболее ответственные моменты аварий или коммутаций цепей первичной коммутации, когда от цепей вторичной коммутации требуется особенно четкая, селективная и бесперебойная работа (см. § 1.6).

В электроэнергетике очень широко используется ВЧ связь, и возникают проблемы, аналогичные рассмотренным в § 1.5. Кроме того, на подстанциях с мощными трансформаторами возможно возникновение помех между ВЧ каналами на линиях разного класса напряжения вследствие емкостных связей между обмотками этих трансформаторов.

## **2. ХАРАКТЕРНЫЕ ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ**

### **2.1. Общее**

Незнание электромагнитной обстановки на электрических станциях и подстанциях и нарушение правил электромагнитной совместимости между цепями первичной и вторичной коммутаций могут привести к сбою автоматических систем технологического управления.

В главе рассмотрены различные виды электромагнитных воздействий, их выявление и меры защиты автоматических и автоматизированных систем технологического управления (АСТУ) от сбоев.

Важное значение имеет своевременное выявление источников электромагнитных помех, нарушающих электромагнитную совместимость. Такими источниками обычно являются импульсные электрические и магнитные поля на частоте 50 Гц, электромагнитные возмущения в цепях питания автоматических и автоматизированных систем технологического управления постоянного и переменного токов, статическое электричество. Опасность тех или иных помех определяется классом помехоустойчивости элементов автоматических и автоматизированных систем технологического управления и степенью жесткости их испытаний.

В главе выделяются четыре класса жесткости, соответственно характеризующихся легкой, средней, жесткой и крайне жесткой электромагнитной обстановкой.

Для обеспечения бесперебойного функционирования автоматических и автоматизированных систем технологического управления на электрических станциях и подстанциях предлагаются соответствующие рекомендации по проверке при моделировании процессов в энергосистемах и проведении полномасштабных экспериментов. Глава содержит упомянутые методы применения моделей и проведения полномасштабных экспериментов.

### **2.2. Характерные источники электромагнитных помех на станциях и подстанциях**

Для цепей АСТУ, автоматизированных систем диспетчерского управления (АСДУ), систем автоматического регулирования напряжения (АРН), систем автоматического регулирования частоты и мощности (АРЧМ), релейной защиты и автоматики (РЗА), автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУТП), систем сбора и передачи информации (ССПИ) и автоматизированных систем коммерческого учета электроэнергии (АСКУЭ) станций и подстанций важное значение имеет своевременное выявление источников электромагнитных воздействий и обеспечение электромагнитной совместимости этих цепей с электрооборудованием и кабелями низкого, среднего и высокого напряжения.

Характерными источниками таких воздействий в реальной обстановке могут являться:

- напряжения и токи промышленной частоты при коротких замыканиях к.з. на землю в распределительных устройствах выше 1 кВ;
- импульсные помехи при коммутациях и коротких замыканиях в распределительных устройствах;
- импульсные помехи при ударах молнии;
- электромагнитные поля радиочастотного диапазона;
- разряды статического электричества;
- магнитные поля промышленной частоты;
- импульсные магнитные поля;
- помехи, связанные с возмущениями в цепях питания АСТУ постоянного и переменного тока.

Кроме того, сбои в работе АСТУ могут быть вызваны такими видами электрооборудования как мощные преобразователи, сварочные аппараты, осветительные приборы, мощные тяговые механизмы, электроинструменты, бытовые электроприборы.

### **2.3. Классы и степени жесткости испытаний устройств на помехоустойчивость**

В зависимости от электромагнитной обстановки в окружающей среде выбирают соответствующие устройства АСТУ. При этом уровни испытательных величин элементов АСТУ должны быть равны или превышать возможные уровни помех.

Электромагнитную обстановку принято характеризовать как легкую (класс 1), средней жесткости (класс 2), жесткую (класс 3) и крайне жесткую (класс 4). В соответствии с электромагнитной обстановкой устанавливают степени жесткости испытаний технических средств (устройств) на помехоустойчивость.

*Класс 1. Легкая электромагнитная обстановка:*

- осуществлены оптимизированные и скоординированные мероприятия по подавлению помех, защите от перенапряжений во всех цепях;
- электропитание отдельных элементов устройства резервировано, силовые и сигнальные цепи выполнены отдельно;
- заземление, прокладка кабелей, экранирование произведено в соответствии с требованиями электромагнитной совместимости;
- климатические условия контролируются и приняты специальные меры по предотвращению разрядов статического электричества.

*Класс 2. Электромагнитная обстановка средней тяжести:*

- цепи питания и управления частично оборудованы помехозащитными устройствами и устройствами для защиты от перенапряжений;

- отсутствуют силовые выключатели, устройства для отключения конденсаторов, катушек индуктивностей;
  - электропитание устройств АСТУ осуществляется от сетевых стабилизаторов;
  - имеется тщательно выполненное заземляющее устройство;
  - токовые контуры разделены гальванически;
  - предусмотрено регулирование влажности воздуха, материалы, способные электризоваться трением, отсутствуют;
  - применение радиопереговорных устройств, передатчиков запрещено.
- Эта обстановка типична для диспетчерских помещений электростанций и подстанций.

*Класс 3. Жесткая обстановка:*

- защита от перенапряжений в силовых цепях и цепях управления не предусмотрена;
- повторного зажигания дуги в коммутационных аппаратах не происходит;
- имеется заземляющее устройство;
- провода электропитания, управления и коммутационных цепей недостаточно разделены;
- кабели линий передачи данных, сигнализации, управления разделены;
- относительная влажность воздуха поддерживается в определенных пределах, нет материалов, электризуемых трением;
- использование переносных радиопереговорных устройств ограничено (установлены ограничения приближения к приборам на определенное расстояние).

Эта обстановка характерна для электростанций, релейных помещений подстанций.

*Класс 4. Крайне жесткая обстановка:*

- защита в цепях управления, сигнализации и электропитания от перенапряжений отсутствует;
- имеются коммутационные устройства, в аппаратах которых возможно повторное зажигание дуги;
- существует неопределенность в выполнении заземляющего устройства;
- нет пространственного разделения кабелей электропитания, управления;
- управление и сигнализация осуществляются по общим кабелям;
- допустимы любая влажность воздуха и наличие электризуемых трением материалов;
- возможно неограниченное использование переносных переговорных устройств;

- в непосредственной близости могут находиться мощные радиопередатчики;

- вблизи могут находиться дуговые технологические устройства (электродпечи, сварочные машины и т.п.).

Типичными для этого класса являются территории вблизи электростанций, открытых распределительных устройств среднего и высокого напряжений, где не предусматриваются специальные меры по обеспечению электромагнитной совместимости.

Устройства АСТУ проходят испытания на устойчивость к воздействиям электромагнитных помех в соответствии с базовым нормативно-техническим документом в области электромагнитной совместимости: ГОСТ 29280-92 (МЭК 61000-4) «Испытания на помехоустойчивость. Общие положения». В этом документе рассматриваются практически все виды испытаний. По отдельным видам испытаний (в более подробном изложении) выпущены серии ГОСТ-Р 51317.4 (МЭК 61000-4), а также МЭК 255.

Рассмотрим теперь уровни испытаний элементов АСТУ (релейной защиты и автоматики) при различных воздействиях.

#### *1. Воздействие напряжения промышленной частоты*

Испытания электрической прочности изоляции (напряжение в установившемся режиме) для устройств РЗА проводят подачей напряжения (таблица 2.1) в соответствии с МЭК 255-5.

Таблица 2.1

#### Испытательные напряжения электрической прочности изоляции\*

Номинальное напряжение установки, В	Испытательное напряжение, кВ			
	Н	Ряд А	Ряд В	Ряд С
30	0,6	0,5	0,5	1,0
60	0,5	0,5	1,0	1,0
127	2,0	0,5	1,0	1,5
250	2,0	1,0	1,5	2,0
380	2,0	1,0	1,5	2,5
500	2,0	1,5	2,0	2,5
660	—	1,5	2,5	3,0
750	—	1,5	3,0	3,0
1000	—	2,0	3,0	3,0

\*См. приложение А МЭК 255-5.



## 2. Импульсные помехи при коммутациях силового оборудования и коротких замыканиях на шинах распределительного устройства

На устойчивость к затухающим колебаниям (частотой 0,1 и 1 МГц) устройства испытывают в соответствии с ГОСТ 29280-92, ГОСТ Р 51317.4.12-99.

Степени жесткости испытаний приведены в таблице 2.2.

В ГОСТ Р 51317.4.12-99 дополнительно предусмотрены испытания при воздействии одиночными колебательными (частота колебаний 0,1 МГц) затухающими импульсами. В этом случае вводят степень жесткости испытаний 4: синфазное напряжение 4,0 кВ и противофазное 2 кВ.

## 3. Импульсные помехи при ударах молнии

Испытания на устойчивость к воздействию импульсных помех оттоков молнии проводят в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.5-99.

Таблица 2.2

Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии напряжением затухающих колебаний

Степень жесткости	Синфазное напряжение, кВ	Противофазное напряжение, кВ
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2,5	1
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

Степени жесткости испытаний приведены в таблице 2.3.

Таблица 2.3

Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии импульсом напряжения 1/50 мкс (1,2/50 мкс)

Степень жесткости	Амплитуда импульса напряжения, кВ, ±10 %
1	0,5
2	1,0
3	2,0
4	4,0
Специальная	По согласованию между производителем и потребителем

Испытания изоляции устройств РЗА импульсным напряжением проводят приложением импульсного напряжения, максимальное значение которого должно быть следующим: 0; 1; 5 кВ (допуск: +0...-10 %), как указано в МЭК 255.

## 4. Электромагнитные поля радиочастотного диапазона

Испытания на устойчивость к излучаемым радиочастотным электромагнитным полям проводят в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.2-99.

Требования помехоустойчивости устанавливают отдельно: при воздействии излучений от стационарных радио- и телевизионных передатчиков,

радиопередатчиков подвижных объектов, от различных промышленных источников излучений; при воздействии помехоэмиссии от цифровых радиотелефонов.

Степени жесткости испытаний приведены в таблицах 2.4 и 2.5.

Таблица 2.4

Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии радиочастотным электромагнитным полем в диапазоне частот от 80 до 1000 МГц.

Степень жесткости	Напряженность электромагнитного поля, В/м (дБ)
1	1 (120)
2	3(130)
3	10(140)
4	По согласованию между производителем и потребителем

В таблице 2.6 приведены примеры степеней жесткости испытаний и соответствующих защитных расстояний. Защитное расстояние представляет собой минимально допустимое расстояние между устройством и цифровым радиотелефоном, соответствующее установленной степени жесткости испытаний.

Таблица 2.5

Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии радиочастотным электромагнитным полем в диапазоне частот от 800 до 960 МГц и от 1,4 до 2 ГГц

Степень жесткости	Напряженность электромагнитного поля, В/м (дБ)
1	1 (120)
2	3(130)
3	10(140)
4	30(150)
Специальная	По согласованию между производителем и потребителем

### 5. Разряды статического электричества

Испытания на помехоустойчивость к разрядам статического электричества (ГОСТ Р 51317.4 2-99, международная электротехническая комиссия (МЭК) 61000-4-2) проводят как при контактном, так и при искровом воздушном разряде непосредственно на испытуемый объект.

Применяют степени жесткости испытаний, приведенные в таблице 2.7.

Сведения о влиянии относительной влажности и материалов напольных покрытий на уровень напряжения, до которого может быть заряжено тело человека, приведены в таблице 2.8.

### 6. Магнитные поля промышленной частоты

Испытания на помехоустойчивость к воздействию магнитного поля промышленной частоты проводят в соответствии ГОСТ Р 50648-94.

Таблица 2.6

Примеры степеней жесткости испытаний и соответствующих защитных расстояний

Степень жесткости испытаний	Напряженность поля в отсутствие модуляции, В/м	Максимальное среднеквадратичное значение напряженности поля, В/м	Защитное расстояние, м, при излучении, Вт		
			2 (С5М)	8 (О8М)	4 (ДЕСТ)
1	1	1,8	5,5	11	1,9
2	3	5,4	1,8	3,7	0,6
3	10	18	0,6	1,1	—
4	30	54	0,4	0,4	—

Таблица 2.7

Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний разрядами статического электричества

Степень жесткости	Испытательное напряжение, кВ	
	Контактный разряд	Воздушный разряд
1	2	2
2	4	4
3	6	8
4	8	15
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

Степени жесткости испытаний на помехоустойчивость к магнитному полю промышленной частоты приведены в таблице 2.9.

#### 7. Импульсные магнитные поля

Испытания на помехоустойчивость к импульсному магнитному полю проводят в соответствии с ГОСТ Р 50649-94.

Степени жесткости испытаний на помехоустойчивость к импульсному магнитному полю приведены в таблице 2.10.

#### 8. Помехи, связанные с возмущениями в цепях электропитания АСТУ постоянного и переменного тока

Испытания на помехоустойчивость к помехам в цепях электропитания проводят в соответствии с ГОСТ 29280-92, Р51317.4.14-2000, Р 51317.4.11-99, Р 51317.4.28-2000 и др. Испытания проводят на помехоустойчивость к гармоникам, интергармоникам, сигналам систем телеуправления и сигнализации, колебаниям напряжения, провалам напряжения и кратковременным перерывам питания, несимметрии напряжений, изменениям частоты питания, составляющим постоянного тока в электрических сетях переменного тока.

Таблица 2.8

Уровни потенциала человека, обусловленные статическим электричеством при различных материалах и влажности

Степень жесткости	Относительная влажность, не выше	Антистатический материал	Синтетический материал	Максимальное напряжение, кВ
1	35	X	—	2
2	10	X	—	4
3	50	—	X	8
4	10	—	X	15

Таблица 2.9

Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии магнитным полем промышленной частоты

Степень жесткости	Напряженность магнитного поля, А/м	
	Магнитное поле постоянной интенсивности	Кратковременное магнитное поле (длительность 1-3 с)
1	1	—
2	3	—
3	10	—
4	30	300
5	100	1000
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

Таблица 2.10

Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии импульсным магнитным полем

Степень жесткости	Максимальная напряженность магнитного поля, А/м
1	—
2	—
3	100
4	300
5	1000
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем

Испытания на помехоустойчивость к импульсам напряжения 100/1300 мкс, возникающим при перегорании плавких предохранителей, проводят в соответствии с ГОСТ 29280-92.

Амплитуду испытательного импульса принимают в 1,3 раза большей, чем номинальное напряжение сети электропитания.

Испытания на помехоустойчивость к наносекундным импульсным помехам, возникающим в результате процессов коммутации, проводят в соответствии с ГОСТ 29280-92, ГОСТ Р51317.4.4-99.

Степени жесткости испытаний приведены в таблице 2.11.

Таблица 2.11

Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний пачками импульсов

Степень жесткости	Амплитуда импульсов выходного напряжения ненагруженного испытательного генератора, кВ	
	Цепи силового электропитания	Сигнальные цепи ввода-вывода
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2	1
4	4	2
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

Испытания на помехоустойчивость к колебательным затухающим помехам частотой 100 кГц проводят в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.12.

Применяют степени жесткости испытаний, приведенные в таблице 2.12.

Испытания на помехоустойчивость к затухающему колебательному магнитному полю, которое возникает при коммутациях на шинах высокого напряжения выключателями и разъединителями, проводят в соответствии с ГОСТ Р 50652-04.

Степени жесткости испытаний на помехоустойчивость к затухающему колебательному магнитному полю даны в таблице 2.13.

Испытания на устойчивость к пульсациям напряжения постоянного тока, воздействующим на порты электропитания постоянного тока, и формы испытательных напряжений установлены в ГОСТ Р 51317.4.17-2000. Жесткость испытаний определяется размахом пульсаций напряжения, выраженным в процентах от номинального напряжения электропитания постоянного тока.

Таблица 2.12

Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии колебательными затухающими импульсами

Степень жесткости	Синфазное напряжение, кВ	Противофазное напряжение, кВ
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2	1
4	4	2
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

Таблица 2.13

Степени жесткости и нормируемые уровни испытаний при воздействии затухающим колебательным магнитным полем

Степень жесткости	Максимальная напряженность магнитного поля, А/м
1	—
2	—
3	10
4	30
5	100
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем

Степени жесткости испытаний при воздействии помех на порт электропитания постоянного тока приведены в таблице 2.14.

Таблица 2.14

Степени жесткости испытаний при воздействии пульсаций напряжения

Степень жесткости испытаний	Размах пульсаций напряжения (по отношению к номинальному напряжению электропитания), %
1	2
2	5
3	10
4	15
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем

Испытания на устойчивость к кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц, воздействующим на порты электропитания и ввода вывода сигналов, проводят в соответствии с ГОСТ Р 51317 4.6-99.

Степени жесткости испытаний приведены в таблице 2.15.

Таблица 2.15

Степени жесткости испытаний в полосе частот от 150 кГц до 80 МГц

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение	
	дБ	В
1	120	1
2	130	3
3	140	10
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем	

Испытания на помехоустойчивость к кондуктивным помехам в полосе частот от 0 до 150 кГц проводят в соответствии с ГОСТ Р 51317.4.16-2000. Помехи, представляющие собой общие несимметричные напряжения в полосе частот от 0 до 150 кГц, наводятся в цепях релейной защиты, противоаварийной автоматики и технологического управления от близко расположенных силовых кабелей или заземляющих проводников. В зависимости от ис-

точника возникновения кондуктивные помехи, представляющие собой общие несимметричные напряжения в полосе частот от 0 до 150 кГц, подразделяют на два вида: постоянное напряжение и напряжение частотой 50 Гц; напряжение в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц (включая гармоники основной частоты сети).

Степени жесткости испытаний на помехоустойчивость при воздействии кондуктивных помех постоянного тока на порты устройств, на частоте 50 Гц и в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц представлены в таблицах 2.16–2.18. При испытаниях на помехоустойчивость к кратковременным помехам время воздействия помехи составляет 1 с.

Таблица 2.16

Степени жесткости испытаний при воздействии длительных помех постоянного тока и на частоте 50 Гц

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение, В
1	1
2	3
3	10
4	30
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем

Требования помехоустойчивости на частотах ниже 15 Гц не устанавливают (исключая помехи постоянного тока), так как на указанных частотах помехи не считаются существенными.

Таблица 2.17

Степени жесткости испытаний на устойчивость при воздействии кратковременных помех постоянного тока и на частоте 50 Гц

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение, В
1	3
2	10
3	30
4	100
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем

Таблица 2.18

Степени жесткости испытаний при воздействии длительных помех в полосе частот от 15 Гц до 150 кГц

Степень жесткости испытаний	Испытательное напряжение, В в полосе частот			
	15—150 Гц	150 Гц—1,5 кГц	1,5—15 кГц	15—150 кГц
1	1—0,1	0,1	0,1—1	1
2	3—0,3	0,3	0,3—3	3
3	10—1	1	1—10	10
4	30—3	3	3—30	30
Специальная	По согласованию между потребителем и производителем			

## 2.4. Напряжения и токи 50 Гц при коротких замыканиях на шинах распределительного устройства

Перед тем, как перейти к основной теме настоящего раздела, рассмотрим общую методику проведения измерений и расчетов по определению электромагнитной обстановки. Она для конкретного энергообъекта включает в себя следующие основные этапы (смотри, например):

- получение исходных данных об энергообъекте для проведения работ;
- экспериментально-расчетное определение электромагнитной обстановки (ЭМО) на объекте;
- определение соответствия между уровнями помехоустойчивости устройств АСТУ, установленных на объекте, и ЭМО в местах размещения этих устройств или степени жесткости испытаний на помехоустойчивость устройств, которые будут установлены на объекте.

Для проведения экспериментальных работ создают рабочую программу. По результатам работ составляют технический отчет и оформляют протоколы результатов измерений и расчетов по всем указанным видам электромагнитных воздействий. В протоколах дается сопоставление возможных уровней воздействий на АСТУ с их помехоустойчивостью и заключение об уровне электромагнитной совместимости, а также дополнительные рекомендации по ее обеспечению в случае необходимости.

Теперь перейдем к напряжениям и токам промышленной частоты при коротких замыканиях на шинах распределительных устройств (РУ).

При коротких замыканиях на землю на шинах распределительного устройства в сетях с эффективно заземленной нейтралью наибольший ток промышленной частоты протекает по заземляющему устройству (ЗУ) при однофазном (двухфазном) коротком замыкании на землю. Потенциал на ЗУ при этом распределяется неравномерно. Если значение разности потенциалов на ЗУ превысит испытательное напряжение для контрольных кабелей, подходящих к оборудованию или устройствам АСТУ, возможен пробой изоляции кабелей или устройств. Кроме того, ток короткого замыкания, распределяясь по заземленным оболочкам, броне и экранам кабелей, вызовет повреждение кабелей, если будут превышены допустимые по термической стойкости нагрузки.

Ток короткого замыкания на землю на шинах РУ в общем случае складывается из тока короткого замыкания от трансформаторов/ автотрансформаторов (Т/АТ) и тока короткого замыкания от энергосистемы (ЭС). От места короткого замыкания ток возвращается в нейтраль Т/АТ и ЭС через заземляющее устройство и непосредственно через землю.

Если в соответствии с методом суперпозиции рассмотреть распределение потенциалов на ЗУ при протекании тока короткого замыкания от Т/АТ и распределение потенциалов при протекании тока от ЭС, то получим суммарное распределение потенциалов (рис. 2.1).



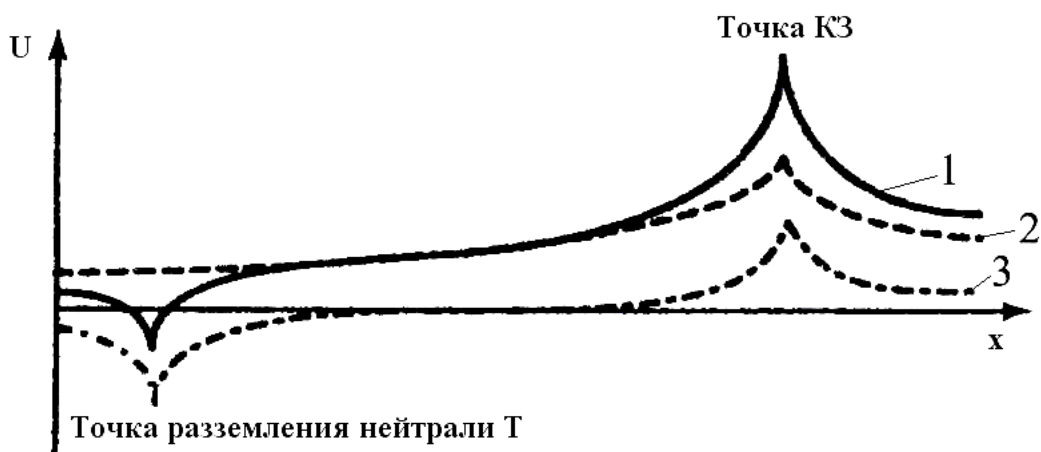


Рис. 2.1. Распределение потенциалов на заземляющем устройстве:  
1 - суммарное; 2 - от тока  $T/AT$ ; 3 - от тока ЭС

В сетях с изолированной нейтралью протекание большого тока по заземляющему устройству возможно при двойном замыкании на землю. В этом случае ток протекает от точки замыкания на землю одной фазы до точки замыкания на землю другой фазы. Распределение потенциалов на ЗУ будет аналогично тому, как при протекании тока от  $T/AT$  (рис. 2.1).

Для того чтобы определить возможные уровни воздействующих на кабели АСТУ напряжений и токов при различных замыканиях на землю, проводят измерения распределения потенциалов и токов на заземляющем устройстве при имитации этих режимов.

Что нужно для определения электромагнитной обстановки (ЭМО) при частоте 50 Гц?

1. Прежде всего, исходные данные.

Исходными данными для проведения измерений и расчетов напряжений и токов, воздействующих на контрольные кабели при коротком замыкании на землю, являются:

- схема расположения оборудования с трассами прокладки кабелей цепей вторичной коммутации;
- расчетные значения токов однофазного и двухфазного короткого замыкания на каждом из распределительных устройств 110 кВ и выше и токов двойного замыкания на распределительных устройствах 6-35 кВ;
- удельное сопротивление грунта (геоэлектрический разрез).

2. Далее имитация КЗ на землю.

Для этого:

2.1. Составляют исполнительную схему заземляющего устройства в соответствии с «Методическими указаниями по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. РД 153-34.0-20.525-00» с помощью технических средств.

Технические средства, используемые для определения токов и напряжений промышленной частоты, воздействующих на АСТУ при коротком за-

мыкании на землю, должны обеспечить возможность составления реальной схемы ЗУ, имитации короткого замыкания на землю и измерения токов и напряжений в условиях действующего энергообъекта.

Для проведения измерений при имитации короткого замыкания на землю рекомендуется применять приборы, указанные в «Методических указаниях по контролю состояния заземляющих устройств электроустановок. РД 153-34.0-20.525-00», или приборы с аналогичными техническими характеристиками.

При составлении исполнительной схемы заземляющего устройства особое внимание уделяют заземлению трансформаторов и автотрансформаторов, связям ЗУ зданий релейного щита (РЩ) и главного щита управления (ГЩУ) с основным заземлителем и связям между заземлителями РУ разного напряжения. Определяют все возможные связи: по проводникам заземлителя, броне, оболочкам и экранам силовых и контрольных кабелей, трубам подачи сжатого воздуха и пожаротушения и т.п. Определяют поперечное сечение проводников заземлителя при выборочном вскрытии грунта не менее, чем в трех различных местах.

2.2. На основании полученной схемы прокладки проводников заземлителя выбирают оборудование, на котором при коротком замыкании на землю ожидается наибольший потенциал. Такими местами являются оборудование, присоединенное к сетке заземлителя наиболее длинными связями; оборудование, у которого выявлено отсутствие металлосвязи с основным заземлителем; оборудование, наиболее удаленное от места установки аппаратуры АСТУ (например, от релейного щита).

Измерение распределения напряжения по заземлителю при имитации растекания токов короткого замыкания через нейтраль трансформаторов проводят в соответствии со схемой рис. 2.2,а (первый этап), а при имитации растекания токов в энергосистему - в соответствии со схемой рис. 2.2,б (второй этап). Проведение имитации в 2 этапа связано с тем, что при одновременной имитации ток, уходящий через заземлитель в энергосистему, будет на порядок меньше, чем ток в нейтрали трансформаторов.

Например, при коротком замыкании имеется следующее распределение токов: в месте к.з. – 10 кА; нейтраль АТ1 — 3 кА; нейтраль АТ2 — 3 кА, нейтраль АТ3 — 2 кА; энергосистема — 2 кА. Тогда при токе генератора  $I_{ген} = 4 \text{ А}$  (имитирует ток в месте к.з.) при помощи реостатов R1, R2 и R3 устанавливают ток в нейтрали АТ1  $I_{АТ1} = 1,5 \text{ А}$ , в нейтрали АТ2  $I_{АТ2} = 1,5 \text{ А}$ , в нейтрали АТ3  $I_{АТ3} = 1 \text{ А}$ .

2.3. Для наиболее опасных выбранных мест имитируют короткое замыкание на корпус оборудования и измеряют распределение потенциалов по заземляющему устройству: в точке короткого замыкания, в местах установки устройств АСТУ и в местах возможного воздействия опасного напряжения на кабели (например, на заземляющих проводниках в кабельных каналах) (рис. 2.3).

2.4. Имитацию короткого замыкания проводят при помощи генератора синусоидального тока (ГСТ) и комплекта реостатов. Сопротивление

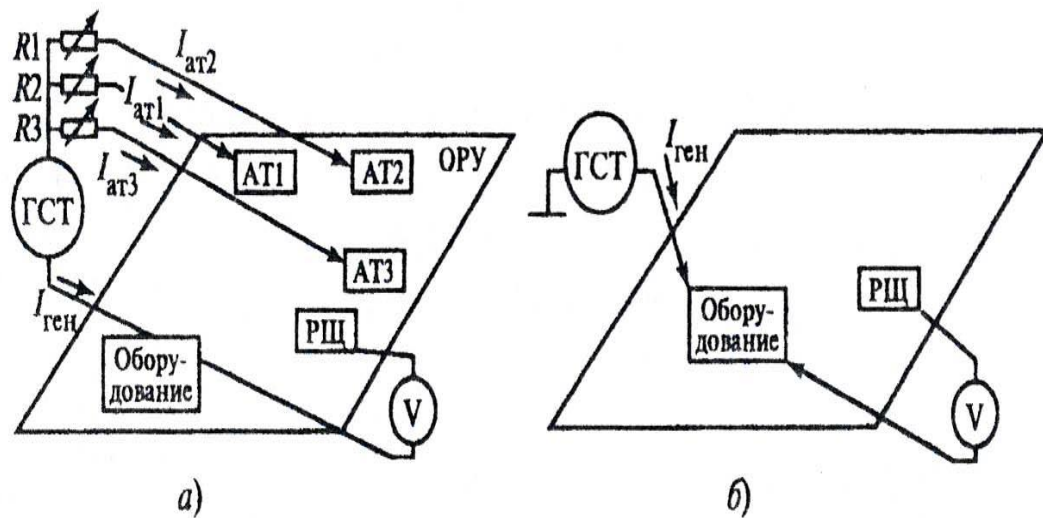


Рис. 2.2. Схема для имитации короткого замыкания на высоковольтном оборудовании

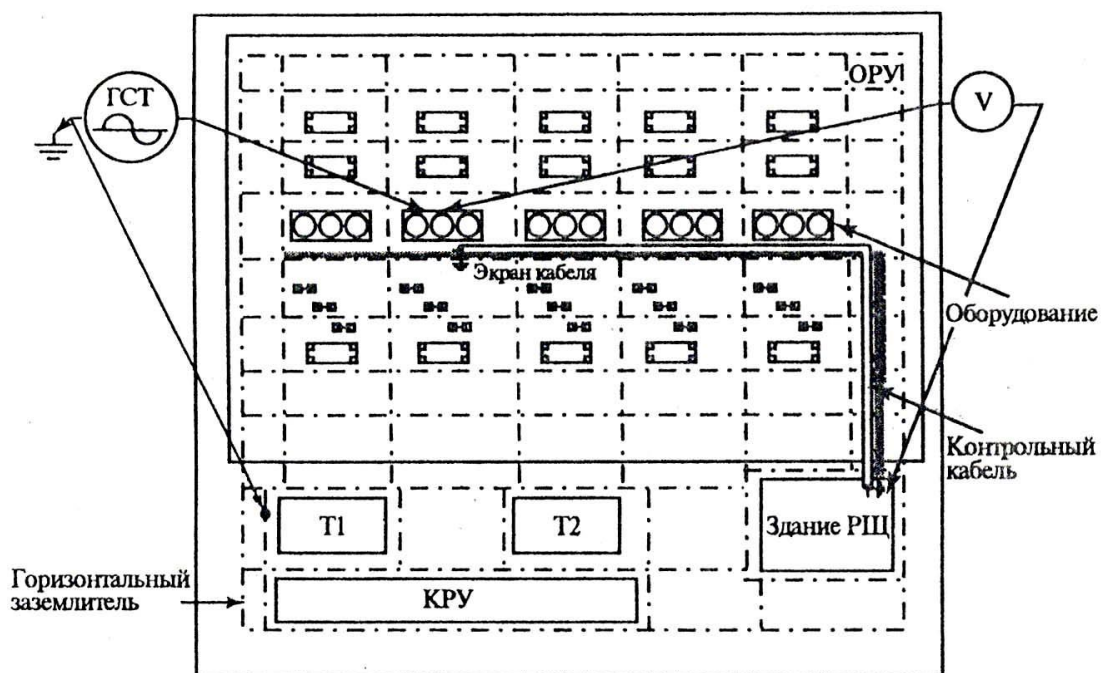


Рис. 2.3. Пример схемы проведения измерений на подстанции высокого напряжения (ВН) при имитации короткого замыкания на землю

реостатов подбирают таким, чтобы распределение токов (в процентном соотношении), протекающих по элементам заземляющего устройства (оборудования, нейтралям трансформаторов, автотрансформаторов), было идентичным с распределением токов при реальных коротких замыканиях.

Имитация короткого замыкания может быть проведена без применения реостатов. В этом случае имитируют отдельно каждую составляющую

тока короткого замыкания: от каждого трансформатора (автотрансформатора) и от энергосистемы.

2.5. Если напряжение, воздействующее на изоляцию кабелей и устройств, превышает допустимое значение, имитацию короткого замыкания проводят на каждом оборудовании, к которому подходят кабели цепей вторичной коммутации.

2.6. При имитации короткого замыкания также измеряют токи, проходящие от оборудования в заземлитель по заземляющему проводнику, трубопроводам, металлоконструкциям и кабелям (оболочка, броня, экран).

Измерения проводят с помощью селективных к частоте генератора синусоидального тока токовых клещей. Измеряют ток от ГСТ и в процентах к нему токи, проходящие по естественным и искусственным частям заземляющего устройства.

*3. Затем проводят обработку результатов измерений и проведение расчетов, а именно:*

3.1. Значения токов и напряжений, полученные в результате имитационных измерений, пересчитывают к реальным значениям тока короткого замыкания.

Если имитация проводилась с помощью аппаратуры, которая генерирует переменный ток с частотой отличающейся от 50 Гц более чем на 20 %, результаты измерений пересчитывают к частоте 50 Гц. Для пересчета используют зависимости коэффициента пересчета  $K_f$  от сечения заземлителей  $S$ . Напряжение на частоте 50 Гц  $U_{50} = U_f / K_f$ , где  $U_f$  измеренное напряжение на частоте  $f$ .

Затем пересчитывают результаты измерений к реальному току короткого замыкания. Пусть при имитации растекания части тока короткого замыкания по нейтралю трансформаторов было получено (здесь и далее - с учетом пересчета к частоте 50 Гц) напряжение 0,3 В между релейным щитом (РЩ) и оборудованием. При имитации части тока короткого замыкания, уходящего в энергосистему, ток генератора составил 0,15 А, напряжение 0,02 В.

При этом составляющая разности потенциалов между оборудованием и РЩ, обусловленная растеканием тока по нейтралю, при коротком замыкании равна 600 В. Составляющая разности потенциалов от тока в энергосистему, равна 266 В.

Суммарное напряжение между оборудованием и релейным щитом при коротком замыкании составляет 866 В.

Это напряжение будет воздействовать на изоляцию контрольных кабелей, проложенных от рассматриваемого элемента оборудования до релейного щита. Это же напряжение будет определять ток по заземленному с обеих сторон экрану кабеля от данного оборудования до релейного щита.

По плану прокладки кабельных каналов или кабельному журналу определяют длину кабеля  $L_{\text{каб}}$  и производят расчет сопротивления экрана кабеля  $R_s$  (индуктивным сопротивлением можно пренебречь).

Ток в экране кабеля при коротком замыкании определяют как отношение напряжения между оборудованием и релейным щитом к сопротивлению экрана кабеля.

Полученный ток в экране сравнивают с допустимым значением. Допустимый ток рассчитывают по выражению:

$$I_{don, t} = K \frac{100}{\sqrt{0,09 + t}},$$

где  $t$  – время протекания тока;  $K = 1$  для  $t < 1$  с,  $K = 0,8$  для  $t > 1$  с.

3.2. Результаты измерений зависят от удельного сопротивления грунта и поэтому их пересчитывают для наиболее неблагоприятных климатических условий. Измерения дополняют расчетами по расчетной программе. Результаты измерений используют для тестирования расчетов.

3.3. Полученную схему заземляющего устройства вводят в расчетную программу. В программе воспроизводят имитационные воздействия, выполненные на объекте, и производят сравнение расчетов с измерениями. При расхождении расчетных и экспериментальных значений более, чем на 15%, проводят дополнительные измерения по уточнению параметров схемы ЗУ.

3.4. После достижения совпадения результатов в пределах 10-15 % считают, что расчетная схема заземляющего устройства соответствует реальной. Далее проводят расчеты распределения напряжений по заземляющему устройству и токов в экранах, оболочке или броне кабелей для каждого из оборудования при удельном сопротивлении грунта, соответствующем наиболее неблагоприятным климатическим условиям.

3.5. Результаты измерений и расчетов оформляют в соответствующем протоколе.

В случае необходимости снижения уровней воздействующих токов и напряжений промышленной частоты выбирают общепринятые мероприятия, указанные ниже и повторно выполняют предыдущие пункты.

Если напряжения и токи промышленной частоты превышают допустимые значения, разрабатывают мероприятия по реконструкции заземляющего устройства.

- определяют те участки заземлителя, на которых происходит наибольшее падение напряжения, и в таких местах прокладывают дополнительные горизонтальные заземлители;

- для снижения потенциала на оборудовании прокладывают дополнительные проводники от оборудования к магистральным заземлителям, снизив сопротивление связи оборудования с сеткой заземляющего устройства. Наиболее эффективно сопротивление связи оборудования с заземлителем снижается при четырех параллельных связях оборудования с заземляющим устройством;

- если прокладка дополнительных горизонтальных заземлителей сетки заземляющего устройства не дает требуемого эффекта, снижают сопротивление растеканию тока всего объекта. Для этого устанавливают дополнительные вертикальные заземлители или выполняют выносной заземлитель. Уста-

новка вертикальных заземлителей эффективна только при наличии слоев грунта с низким удельным сопротивлением и при небольших размерах заземляющего устройства;

- для снижения токов в экранах, оболочках и броне кабелей прокладывают параллельно кабельной трассе дополнительные заземлители на расстоянии (0,5—1,0) м от кабельного канала или лотка;
- эффективность указанных мероприятий проверяют с помощью расчетов.

## **2.5. Импульсные помехи при коммутациях силового оборудования и коротких замыканиях на шинах распределительного устройства**

Возникновение импульсных помех в цепях вторичной коммутации связано со следующими воздействиями в первичных цепях: коротких замыканий на землю на шинах распределительного устройства; коммутации разъединителями, короткозамыкателями и выключателями; срабатывания разрядников, ОПН.

### *1. Исходные данные.*

Исходными данными для проведения измерений и расчетов импульсных помех являются:

- электрическая оперативная схема;
- план расположения оборудования с трассами прокладки кабелей;
- состав и расположение аппаратуры АСТУ;
- электрические связи аппаратуры с силовым оборудованием (по кабельному журналу);
- удельное сопротивление грунта (геоэлектрический разрез);
- места заземления цепей напряжения и тока АСТУ;
- сечение и высоты подвеса шин высокого напряжения на открытом распределительном устройстве, конструкция фазы.

### *2. Импульсные помехи, обусловленные увеличением потенциала заземлителя.*

При коммутациях (через паразитные емкости оборудования на землю) и коротких замыканиях на землю в заземляющем устройстве проходит импульсный ток высокой частоты. На оборудовании возникает скачок потенциала. Возросший потенциал с определенным коэффициентом ослабления передается по кабелям на вход устройств АСТУ.

#### *2.1. Имитация импульсных помех.*

Высокочастотную (ВЧ) составляющую тока короткого замыкания имитируют при помощи генератора высокочастотных импульсов – ГВЧИ.

Технические средства, используемые для определения импульсных помех, воздействующих на АСТУ при коммутациях и коротком замыкании на землю, должны обеспечить имитацию воздействия высокочастотных импульсных токов и электромагнитных полей, а также измерение импульсных токов и напряжений. Для имитаций импульсных помех может применяться

генератор, обеспечивающий колебательный затухающий импульс тока с амплитудой в интервале от 2 до 20 А, декрементом колебания 3-5, с частотой колебаний в диапазоне от 0,1 до 10 МГц, с напряжением на выходе генератора не менее 500 В.

Для проведения измерений при коммутациях силового оборудования рекомендуется применять осциллографы с полосой пропускания не менее 10 МГц для объектов с ОРУ и не менее 50 МГц для объектов с КРУЭ, например осциллограф FLUKE-199. Для проведения имитаций высокочастотных воздействий может применяться измерительный комплекс ИКП-1 (НПФ ЭЛ-НАП, МЭИ, Москва).

Схема экспериментов приведена на рис. 2.4. Для измерений выбирают цепи, где ожидается наибольший уровень помех. Такими являются цепи, для которых входное сопротивление на устройствах в нормальном режиме больше 1 кОм (например, разомкнутый контакт).

Генератор высокочастотных импульсов (ГВЧИ) подключают одним выходом к заземляющему проводнику оборудования на РУ, к которому подходят кабели от устройств АСТУ, а второй выход генератора заземляют на расстоянии не менее 50 м от данного оборудования.

Высокая частота обуславливает резко неравномерное распределение потенциала на заземляющем устройстве. Чем меньше удельное сопротивление грунта, тем быстрее спадает потенциал на ЗУ. При частоте 1 МГц на расстоянии 50 м от точки ввода импульсного тока потенциал падает более чем в 10 раз даже при удельном сопротивлении грунта 1 Ом·м.

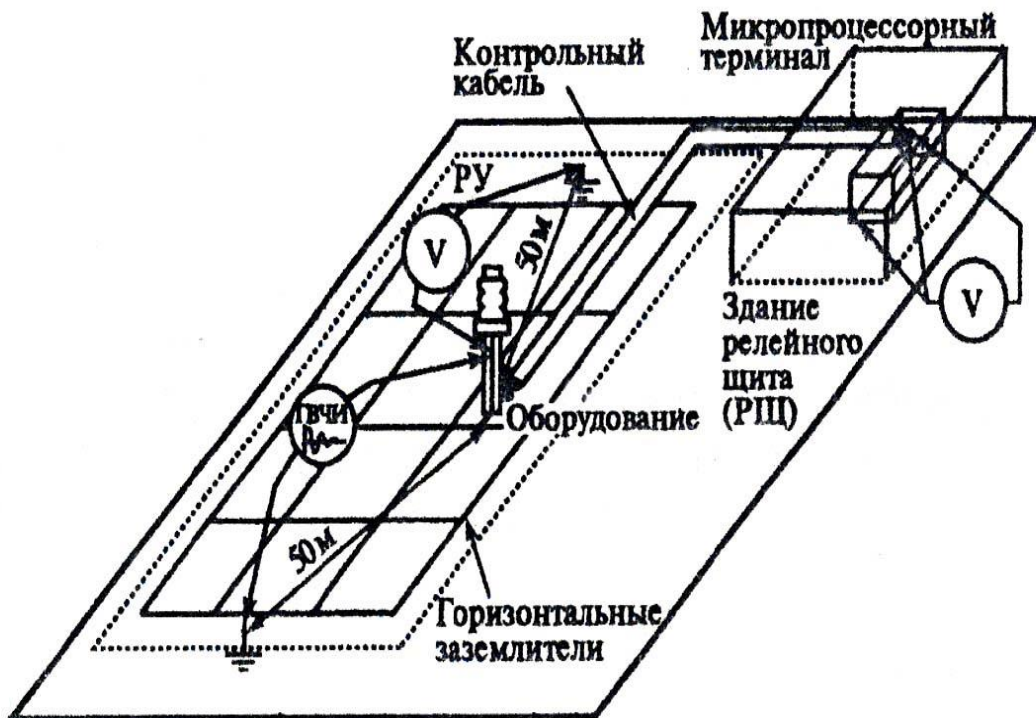


Рис. 2.4. Схема эксперимента по определению импульсных помех при протекании высокочастотной составляющей тока короткого замыкания

Необходимое расстояние между оборудованием и местом заземления второго выхода генератора определяют по таблице 2.19.

Таблица 2.19

Удельное сопротивление грунта $\rho$ , Ом·м	Необходимое расстояние до места заземления второго выхода генератора, м
$\leq 1000$	50
1000 - 2000	60
2000 - 5000	70
5000 - 10 000	80
10 000 - 15 000	90

В заземляющий проводник оборудования подают от ГВЧИ колебательный затухающий импульс с амплитудой от 2 до 20 А и более, декрементом колебания 3 - 5 и различной частотой колебаний (не менее трех значений частоты колебаний). На реальных объектах частота колебаний импульсных помех может изменяться от десятков килогерц до десятков мегагерц. Измерения при трех различных частотах позволяют установить зависимость импульсного сопротивления заземляющего устройства оборудования и уровня импульсных помех от частоты. При пересчете к реальному значению тока используют полученную зависимость для определения импульсного сопротивления на частоте, которая наиболее близка к основной частоте высокочастотной (ВЧ) составляющей тока короткого замыкания.

На входах устройств АСТУ импульсным вольтметром V или осциллографом измеряют фоновые значения помех при выключенном генераторе.

Включают генератор и при фиксированных амплитуде и частоте колебаний импульса тока проводят измерения импульсным вольтметром или осциллографом синфазных и противофазных помех на зажимах в месте подключения кабелей к устройствам АСТУ.

Одновременно с измерением помех в цепях вторичной коммутации проводят измерение потенциала на заземляющем проводнике оборудования и определяют импульсное сопротивление  $Z_{\text{имп.обор.}}$  растеканию тока как отношение максимальных значений напряжения и выходного тока генератора. Потенциал на заземляющем оборудовании измеряют с помощью импульсного вольтметра относительно земли на расстоянии не менее 50 м в противоположном направлении от места заземления генератора.

Изменяют частоту колебаний импульса тока и повторяют предыдущие измерения.

Допускается выбрать не менее двух образцов однотипного оборудования, например выключателей, и провести измерение импульсных помех в цепях вторичной коммутации только этого оборудования.

Затем рассчитывают коэффициент передачи

$$K_{\text{перед}} = U_{\text{заз.обор.}} / U_{\text{пом.имит}} = I_{\text{имит}} Z_{\text{имп.обор.}} / U_{\text{пом.имит}},$$



показывающий, как уменьшается амплитуда при прохождении импульса напряжения по кабелю от оборудования до устройств АСТУ. Здесь  $U_{\text{з.з.обор}} = I_{\text{имит}} Z_{\text{имп.обор}}$  – потенциал на заземляющем проводнике оборудования;  $I_{\text{имит}}$  – ток от генератора при имитационных измерениях;  $U_{\text{пом.имит}}$  – напряжение помехи во вторичных цепях.

Если расстояния от наиболее удаленного и наиболее близкого образцов выбранной группы оборудования до места установки аппаратуры АСТУ различаются более чем в 1,5 раза,  $K_{\text{перед}}$  рассчитывают для наиболее близкого и наиболее удаленного образцов оборудования. В промежуточных случаях  $K_{\text{перед}}$  определяют линейной интерполяцией. Для РУ, где число ячеек превышает 10, выполняют измерения и на одном-двух промежуточных образцах оборудования.

Измерения, описанные выше, проводят также для других групп оборудования и определяют  $K_{\text{перед}}$  для каждой группы оборудования. Для трансформаторов напряжения, вторичные цепи которых заземляют на РУ, измерения проводят для всех образцов оборудования.

Для каждого образца оборудования, к которому подходят кабели от устройств АСТУ, измеряют  $Z_{\text{имп.обор}}$ .

Результаты измерений помех во вторичных цепях пересчитывают к наибольшему возможному значению ВЧ-составляющей тока к.з. –  $I_{\text{ВЧ}}$ . Реальный ток к.з. определяют расчетом или для приближенной оценки используют данные из таблице 2.20.

Напряжение помехи при к.з. определяют как

$$U_{\text{пом.к}} = I_{\text{ВЧ}} \cdot Z_{\text{имп.обор}} / K_{\text{перед}}$$

Полученное значение сравнивают с допустимым для устройств значением. Если не определен тип устройств, устанавливаемых на объекте, указывают степень жесткости испытаний на помехоустойчивость.

Таблица 2.20

Наибольшие значения высокочастотной составляющей тока короткого замыкания

$I_{\text{ВЧ}}$	Номинальное напряжение подстанции $U_{\text{ном}}$ , кВ									
	110		220		330		500		750	
	Число частей шин, подходящих к месту КЗ									
	1	4	1	4	1	4	1	4	1	4
$I_{\text{ВЧ}}^*$	0,48	1,9	0,95	3,8	1,15	6,2	2,75	11,0	4,75	19,0
$I_{\text{ВЧ}}^{**}$	0,55	2,2	1,1	4,25	1,8	7,0	3,2	12,8	4,4	17,6
$I_{\text{ВЧ}}^{***}$	0,88	3,5	1,8	7,1	2,2	8,7	3,3	15,3	5,4	21,5

Примечание. Здесь  $I_{\text{ВЧ}}^*$  – амплитуда импульса тока в заземлителе при к.з. на РУ с подключенным ОПН (ограничитель перенапряжения нелинейный),  $I_{\text{ВЧ}}^{**}$  и  $I_{\text{ВЧ}}^{***}$  – тоже при к.з. на РУ с РВ при минимальном и максимальном значениях пробивного напряжения разрядника (разрядник вентильный).

Результаты измерения импульсного сопротивления используют для определения возможности обратного перекрытия с заземления оборудования на вторичные цепи.

Перекрытие наиболее вероятно на контактах клеммника, к которому присоединены вторичные цепи оборудования. Пробивное напряжение межконтактной изоляции типовых клеммников при импульсном воздействии на частотах выше 100 кГц составляет не менее 10 кВ.

Таким образом, необходимое условие отсутствия обратного перекрытия  $U_{\text{заз.обор}} < 10 \text{ кВ}$ .

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде соответствующего протокола.

## *2.2. Импульсные изучаемые помехи.*

При коммутациях первичного оборудования и при коротких замыканиях на шинах распределительных устройств протекают импульсные токи. Электромагнитные поля от этих токов создают импульсные помехи в цепях вторичной коммутации. Наибольший уровень излучаемых помех отмечают при коротких замыканиях на шинах распределительных устройств.

Для каждого распределительного устройства с использованием исходных данных определяют трассы прокладки кабелей от оборудования высокого напряжения до помещений, где установлены устройства АСТУ.

Для всех кабельных трасс выбирают главные участки, по которым проходит основная часть кабелей. Конфигурация главного участка может быть прямолинейной или сложной, состоящей из двух отрезков (например, пересекающихся под прямым углом). Эти участки используют для имитации воздействия электромагнитного поля.

Если на распределительном устройстве имеется несколько кабельных трасс (например, одна трасса в виде кабельного тоннеля и одна трасса в виде кабельного лотка), для измерений выбирают главные участки на каждой трассе.

Для проведения измерений из всех видов кабелей, проходящих по рассматриваемому участку трассы, выбирают по 1-2 образца каждой группы наиболее длинных кабелей: с экраном, без экрана, в оболочке. Кабели подбирают таким образом, чтобы в них имелись либо свободные жилы (с неповрежденной изоляцией), либо рабочие жилы, у которых нагрузка со стороны устройств имеет сопротивление более 1 кОм.

Вдоль кабельных трасс, по которым проложены выбранные для измерений кабели, прокладывают контрольные провода. Контрольные провода прокладывают по поверхности грунта рядом с каналом или лотком таким образом, чтобы длина провода была примерно равна длине кабеля.

Параллельно выбранному участку кабельной трассы (на расстоянии не менее 5 м от контрольного провода) на высоте 1-1,5 м подвешивают провод, моделирующий шины ВН. К этому проводу подключают генератор высокочастотных импульсов - ГВЧИ (рис. 2.5).

На контрольном проводе и на выбранных кабелях при выключенном генераторе в месте установки устройств АСТУ измеряют фоновые значения напряжения помех импульсным вольтметром  $V$ .

Включают генератор и при фиксированных амплитуде и частоте колебаний импульса тока проводят измерения наведенных помех на контрольном проводе ( $U_{\text{пров}}$ ) и на выбранных кабелях ( $U_{\text{цепи}}$ ) импульсным вольтметром или осциллографом.

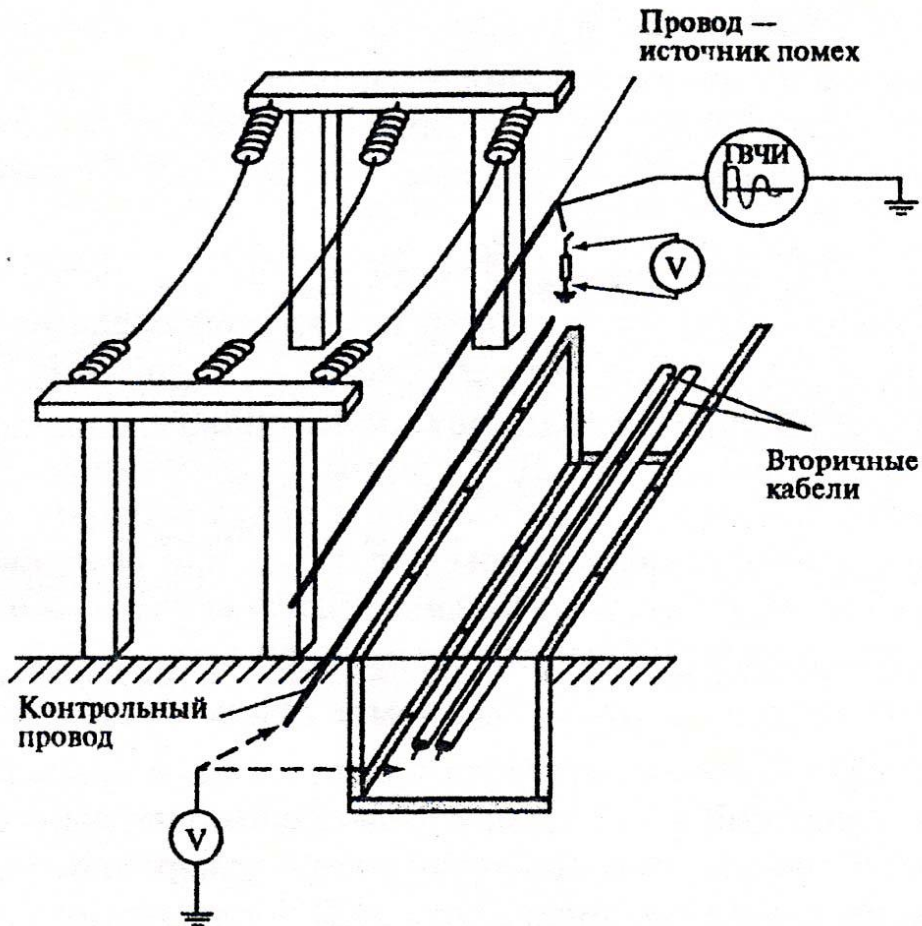


Рис. 2.5. Схема имитации излучаемых помех

Имитационные испытания проводят на тех же частотах, что и при распространении импульсных помех по заземляющему устройству.

Отношение напряжения  $U_{\text{пров}}$  к  $U_{\text{цепи}}$  является общим коэффициентом экранирования  $K_{\text{экр}} = U_{\text{пров}} / U_{\text{цепи}}$ , который показывает, во сколько раз по сравнению с одиночным проводом излучаемая помеха ослабляется соседними жилами в кабеле, соседними кабелями в кабельном канале, металлоконструкциями кабельного канала, экранами и оболочками кабеля. Коэффициент экранирования, являющийся характеристикой данного объекта, затем используют в расчетах.

Измерения проводят на всех кабелях, проходящих по данному главному участку, после чего провод — источник помех размещают параллельно другому главному участку кабельной трассы и проводят измерения на кабелях, проходящих по этому главному участку.

На строящемся объекте в качестве источника излучаемой помехи могут быть использованы непосредственно шины высокого напряжения. Для этого собирают рабочую схему распределительного устройства, подают питание от постороннего источника переменного или постоянного напряжения (от 200 В до 1000 В) на шины, осуществляют замыкание на заземляющем устройстве и измеряют импульсные помехи в цепях вторичной коммутации. Значения амплитуды импульсных помех при реальных коротких замыканиях пропорциональны отношениям реальных напряжений к напряжениям на шинах при имитационных экспериментах.

Наибольшие помехи возникают при следующих коммутациях: включение/отключение шинных и линейных разъединителей на отключенный выключатель; включение/отключение силовым выключателем или обходным разъединителем обходной системы шин; включение/отключение выключателями участка ненагруженной линии, силовых автотрансформаторов, трансформаторов, шунтирующих реакторов; коммутации протяженных отрезков шин разъединителями и силовыми выключателями.

Регистрацию помех проводят в цепях измерения, управления, сигнализации и питания устройств АСТУ. Наибольший уровень помех следует ожидать в измерительных цепях, заземление которых выполнено на распределительном устройстве, и в цепях, которые проложены по территории распределительного устройства в кабельных лотках или каналах.

Измерительную аппаратуру подключают по схеме общего вида (схема провод-земля, в качестве «земли» служит корпус устройств АСТУ) и схеме дифференциального типа (схема провод-провод) на панелях и в шкафах, где установлены устройства АСТУ, и проводят следующие виды измерений: осциллографирование помех; регистрацию максимальной амплитуды и числа импульсов.

При измерениях используют осциллографы с полосой пропускания не менее 10 МГц для объектов с открытым РУ и не менее 50 МГц для подстанций с элегазовой изоляцией. Максимальное значение импульсных помех в отдельных случаях может достигать 10-15 кВ. Чтобы исключить повреждение измерительной аппаратуры, применяют специальные делители напряжения. Питание осциллографов осуществляют либо от независимого источника (например, встроенной аккумуляторной батареи), либо от общей сети через разделительный трансформатор при наличии устройств ограничения перенапряжений.

Последовательность действий при измерениях следующая:

- 1) измерительную аппаратуру подключают к измеряемым цепям;
- 2) после сигнала о готовности измерительной аппаратуры производят коммутацию;
- 3) результаты измерений сохраняют в компьютере или памяти осциллографа;
- 4) выполняют повторную коммутацию;
- 5) пункты 2-4 повторяют до выполнения всех коммутаций;

б) измерительную аппаратуру отключают от цепей; проверяют правильность соединения цепей.

В расчетной программе собирают схему замещения для одного РУ, состоящую из следующих элементов: LC-цепи (шины) и емкости первичного оборудования, а также LC-цепи (контрольные провода, моделирующие кабели цепей вторичной коммутации).

Схему замещения собирают для одной фазы, расположенной на наименьшем расстоянии от кабельной трассы. Если конфигурация такова, что выявить ближайшую фазу к кабельной трассе на всем протяжении затруднительно, составляют схемы для каждой из наиболее близких фаз и расчеты проводят для каждой схемы.

Собирают исходную схему замещения для нормального режима, а затем перед расчетом каждой коммутации или короткого замыкания ее изменяют.

Емкостями замещают следующее оборудование: силовые трансформаторы, трансформаторы напряжения, выключатели, трансформаторы тока и др. В схеме замещения для данного распределительного устройства моделируют только те кабельные трассы, которые проходят по территории данного распределительного устройства. Предусматривают размещение контрольных проводов по основным кабельным трассам, по которым они прокладывались при имитационных измерениях.

Для расчета помех при коротком замыкании на исходной схеме замещения задают точку короткого замыкания и запускают программу на счет. При расчете помех при коммутациях исходную нормальную схему модифицируют так, чтобы она являлась начальной схемой до коммутации, и запускают программу на счет.

В результате расчета определяют амлитудно-частотные характеристики напряжения на контрольных проводах в месте установки устройств АСТУ. Результаты расчета сравнивают с результатами измерений. При расхождении результатов расчетов и измерений более чем на 15 % уточняют расчетную схему и исходные данные для расчета (например, удельное сопротивление грунта).

Достаточно провести расчеты для 4-5 точек короткого замыкания на сборных шинах и в 1-2 точках в каждой ячейке распределительного устройства. Если электрическая схема не содержит сборных шин, то расчеты проводят для  $(1-2) \cdot n$  ( $n$  - число силовых выключателей) точек равномерно по всему РУ. Так, если на распределительном устройстве три выключателя (схема мостик), то расчеты достаточно провести для 3-6 точек (в зависимости от площади РУ) с учетом рекомендаций, приведенных выше.

Для нормальной оперативной схемы распределительного устройства проводят расчеты для следующих видов коммутаций: включение шинного или линейного разъединителей на отключенный силовой выключатель, подача напряжения на обходную систему шин выключателем, включение силово-

го трансформатора (автотрансформатора) или включение ненагруженной линии выключателем, вывод в ремонт рабочей системы шин.

После проведения расчетов для нормальной оперативной схемы распределительного устройства проводят расчеты излучаемых помех для других возможных конфигураций первичной схемы, связанных с выводом оборудования в ремонт. Моделируют ситуации (для каждого присоединения), при которых значительно меняется конфигурация исходной схемы, например, учитывают:

- выведенный в ремонт выключатель (особенно для схем с обходной системы шин);
- выведенное в ремонт присоединение (линия, трансформатор, автотрансформатор);
- выведенную в ремонт рабочую систему шин.

Для каждой схемы, отличной от нормальной оперативной, проводят расчеты помех при коротком замыкании. Для каждой основной кабельной трассы из полученных результатов расчетов выбирают наибольшие значения (для коммутаций и коротких замыканий).

Результаты расчетов для контрольных проводов приводят к реальным вторичным цепям. Для этого выбирают одну из цепей. Определяют трассу, по которой проложен кабель с выбранной цепью, например, трассу № 1. Наибольшие значения излучаемых помех при коротком замыкании или коммутациях определяют как:

$$U_{\text{пом.цепи}} = U_{\text{контр. каб. трасса № 1}} / K_{\text{экр цепи каб. трасса № 1}},$$

где  $U_{\text{пом.цепи}}$  - максимально излучаемое напряжение помехи в выбранной цепи управления выключателя при коротких замыканиях или коммутациях;  $U_{\text{контр. каб. трасса № 1}}$  - максимальное излучаемое напряжение помех на контрольном проводе, проложенном по трассе № 1;

$K_{\text{экр цепи каб. трасса № 1}}$  - коэффициент экранирования для выбранной цепи, проложенной по трассе № 1.

Если для какого-либо вида цепей установлено, что уровень импульсных помех при коммутациях, коротких замыканиях превышает допустимые значения, для снижения помех в этих цепях проводят следующие мероприятия:

- прокладывают дополнительные проводники от оборудования к магистральным заземлителям;
- применяют экранированные кабели с заземлением экранов с обеих сторон.

Заземляют цепи напряжения на релейном щите (если это позволяют технические условия) или смещают места заземления на некоторое расстояние от оборудования высокого напряжения и порталов.

Для ограничения уровня помех на входе устройств устанавливают специальные средства ограничения перенапряжений.

Если указанные мероприятия окажутся неэффективными для снижения уровней импульсных помех от молнии, проводят реконструкцию системы молниезащиты энергообъекта.

## 2.6. Импульсные помехи при ударах молнии

При ударе молнии в объект в результате воздействия электромагнитного поля в контрольных кабелях наводятся импульсные помехи. Ток молнии, протекающий по ЗУ, создает высокий потенциал на земле и может вызвать обратные перекрытия изоляции контрольных кабелей.

Программа для расчета импульсных помех должна:

- моделировать электромагнитные переходные процессы в кабельной линии, возникающие при ударе молнии в непосредственной близости от кабельной линии, при протекании импульсных токов по близлежащим тоководам, моделировать распределение потенциалов в заземляющих устройствах при протекании импульсных токов;

- учитывать при моделировании волновые процессы в кабельных линиях, свойства грунта, наличие в грунте сетки заземления, коммутационные переходные процессы в близлежащих тоководах, расположение кабельной линии, как в воздухе, так и в грунте, взаимное экранирование проводов в кабельных линиях, особенности включения линии на ее концах.

Параметры тока молнии для расчета выбирают в соответствии с рекомендациями МЭК 61312-1. При расчетах распределения потенциала на ЗУ принимают максимальное значение импульса тока  $I_m = 100$  кА, длительность фронта импульса и  $t_{фр} = 10$  мкс, длительность импульса  $t_i = 300$  мкс; при расчетах наведенных напряжений в кабелях принимают  $I_m = 25$  кА,  $t_{фр} = 0,25$  мкс,  $t_i = 100$  мкс.

Для открытых РУ определяют напряжения, наводимые в кабелях вторичной коммутации при ударах молнии в молниеотводы, расположенные вблизи трасс прокладки кабелей.

Для зданий и сооружений определяют напряжения, наводимые в кабелях при протекании тока молнии по токоотводам молниеприемника здания. При расчетах учитывают коэффициент экранирования электромагнитного поля молнии экранированными кабелями, проложенными в кабельных каналах или коробах.

Для определения возможного обратного перекрытия изоляции кабелей вторичных цепей проводят измерения распределения потенциалов по земле при имитации удара молнии в молниеприемник с помощью генератора импульсных токов.

На РУ генератор импульсов тока подключают между заземлением молниеприемника и заземленным электродом на расстоянии не менее 50 м от молниеприемника.

Измеряют потенциалы на земле вблизи кабельных каналов и лотков относительно точки, удаленной на расстояние не менее 50 м в направлении, противоположном от точки заземления генератора.

При имитации удара молнии в здания и сооружения генератор импульсов тока подключают к молниеприемнику (стержень или сетка) наверху здания и к электроду в земле на расстоянии не менее 20 м от здания.

Осуществляют имитацию удара молнии в молниеприемник и измеряют потенциалы в здании относительно точки, удаленной от здания на расстояние не менее 20 м в направлении, противоположном от точки заземления генератора.

Измерения проводят при двух и более различных импульсах тока с временем фронта импульсов тока, отличающихся более чем в 3 раза в диапазоне от 0,25 до 10 мкс.

Полученные результаты измерений пересчитывают к току молнии по МЭК 61312-1. Коэффициент пересчета принимают пропорциональным отношению тока молнии к току от генератора при условии, что время фронта и длительность импульса при имитации отличались от нормируемых параметров импульса тока молнии не более, чем на 10 %.

Если время фронта и длительность импульса при имитации отличались от нормируемых параметров импульса тока молнии более, чем на 10 %, производят экстраполяцию результатов измерений при различных импульсах тока к нормируемым значениям времени фронта импульса.

Окончательный вывод об уровне импульсных помех делают на основании расчетов. Расчеты проводят при помощи различных расчетных программ ряда организаций, которые должны:

- моделировать электромагнитные переходные процессы в кабельной линии, возникающие при ударе молнии в непосредственной близости от кабельной линии, при протекании импульсных токов по близлежащим тоководам;

- моделировать распределение потенциалов в заземляющих устройствах при протекании импульсных токов;

- учитывать при моделировании волновые процессы в кабельных линиях, свойства грунта, наличие в грунте сетки заземления, коммутационные переходные процессы в близлежащих тоководах, расположение кабельной линии, как в воздухе, так и в грунте, взаимное экранирование проводов в кабельных линиях, особенности включения линии на ее концах.

Погрешность результатов расчета по программе не должна превышать 15 %.

Результаты расчета, проведенного для имитационных условий, сравнивают с результатами измерений. При расхождении результатов расчетов и измерений более, чем на 20 % уточняют расчетную схему и исходные данные для расчета (например, удельное сопротивление грунта).

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде соответствующих протоколов.



В случае необходимости снижения уровней импульсных помех от тока молнии реализуют рекомендуемые мероприятия, после чего повторно выполняют предыдущие пункты.

## 2.7. Электромагнитные поля радиочастотного диапазона

Проводят измерения напряженности полей радиочастотного диапазона от 1 до 1000 МГц в местах установки устройств АСТУ.

Для измерения помех в радиочастотном диапазоне от 1 до 1000 МГц обычно используют перестраиваемые селективные высокочастотные вольтметры с соответствующим набором антенн.

Для сигналов вертикальной поляризации в диапазоне 26-300 МГц возможно использование биконических антенн с круговой диаграммой направленности и входным сопротивлением 50 Ом. Для сигналов с горизонтальной поляризацией используют дипольные антенны с входным сопротивлением 50 Ом. Существенным для правильных измерений является хорошее согласование антенно-фидерного тракта с вольтметром во всем диапазоне измеряемых частот. Значение коэффициента стоячей волны напряжения не должно превышать 3. Для измерения сигналов в диапазоне частот 300-1000 МГц возможно использование калиброванной измерительной антенны, рупорной измерительной антенны П-6-33 с входным сопротивлением 50 Ом.

Для сигналов с горизонтальной поляризацией используют также калиброванную широкополосную антенну в виде конического диполя ДП-3, входящую в измерительный комплекс FSM-8,5. Указанные антенны предназначены для измерения напряженности электрического компонента электромагнитного поля. Магнитный компонент поля определяют пересчетом по формуле  $H, \text{ дБ (мкА/м)} = E, \text{ дБ (мкВ/м)} - 52$ .

Возможность быстрого графического представления частотного спектра помех дает применение спектроанализаторов для измерений радиочастотных сигналов. Простейшим прибором этого класса является переносной спектроанализатор Protek-3200.

Измеряют в режиме мониторинга напряженность электромагнитного поля от внешних источников.

Измеряют напряженности электромагнитного поля от работающих переносных и стационарных радиопередающих станций, которые используются персоналом энергообъекта.

Измеряют зависимость напряженности поля от расстояния до источника электромагнитного излучения и ослабление напряженности поля искусственными преградами (стены, экраны, корпуса шкафов и т. д.).

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде соответствующего протокола.

В случае необходимости ослабления электромагнитных радиочастотных полей выбирают рекомендуемые мероприятия, после чего повторно выполняют предыдущие пункты.

Снижение уровней электромагнитных полей радиочастотного диапазона от внешних источников и стационарных станций достигается за счет экранирования зданий или применения экранов в местах установки аппаратуры.

Если уровни электромагнитных полей от переносных радиопередающих станций превышают допустимые значения, предусматривают организационные мероприятия, исключающие использование таких станций в местах установки устройств АСТУ.

Для снижения уровня воздействия магнитного поля промышленной частоты изменяют место размещения устройств или перемещают источник магнитного поля на большее расстояние от устройств.

Если мероприятия по экранированию устройств от воздействий импульсных магнитных полей при ударах молнии окажутся неэффективными, проводят реконструкцию системы молниезащиты энергообъекта.

## 2.8. Разряды статического электричества

Наиболее часто встречающаяся форма возникновения электростатических зарядов - электризация трением. Электризация трением проявляется, как правило, вследствие контакта тела человека с его одеждой, стулом, полом, рабочими средствами и предметами, а также при соприкосновении деталей, панелей, приборов с другими устройствами. На действующих объектах энергетики для устройств АСТУ наиболее вероятными источниками статического электричества является персонал, обслуживающий эти устройства.

Оценку наибольшего электростатического потенциала тела человека проводят путем непосредственных измерений на энергообъекте или расчетом с использованием результатов измерений на образце напольного покрытия. При этом измеряют характеристики диэлектрического покрытия пола в помещении, где установлены устройства АСТУ и оценивают диапазон изменения влажности воздуха в помещении.

Измерения потенциала тела человека (оператора) проводят электростатическим вольтметром. Для расширения диапазона измерений используют емкостный делитель. Потенциал,  $U_{т.о.}$ , кВ, тела оператора определяют из выражения

$$U_{т.о.} = [(C_1 + C_2) / C_1] U_V,$$

где  $C_1$  – суммарная емкость вольтметра, соединительного кабеля и оператора (верхнего плеча делителя), мкФ;  $C_2$  – емкость нижнего плеча делителя, мкФ;  $U_V$  – показания вольтметра, кВ.

Для измерения потенциала тела человека может применяться статический вольтметр, например С 502. Для измерений удельного поверхностного и объемного сопротивлений изоляционных материалов может применяться тераомметр, например Е6-13.

Измеренные значения потенциала пересчитывают для наиболее неблагоприятного режима, соответствующего нижнему значению влажности воздуха (рис. 2.6).

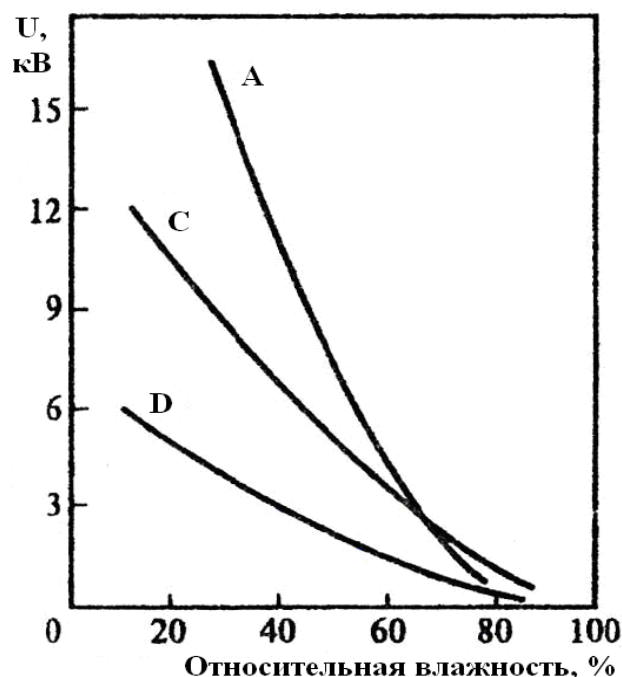


Рис. 2.6. Зависимости потенциала зарядов статического электричества человека от относительной влажности воздуха: А - при движении по резиновому коврику на расстояние 6 м; С - при движении по виниловому полу на расстояние 6 м; D - при вставании со стула

Расчетную оценку электростатического потенциала производят на основании результатов измерений поверхностного и объемного сопротивления  $R_s$  и  $R_v$  образца напольного покрытия. Для измерений используют тераомметр и стандартные электроды, схема подключения которых представлена на рис. 2.7.

Расчет удельного поверхностного и объемного сопротивления ( $\rho_s$ , Ом) и ( $\rho_v$  Ом·м) проводят по следующим выражениям:

$$\rho_s = \frac{\pi(D+g)R_s}{g}, \quad \rho_v = \frac{\pi(D+g)^2 R_v}{4t},$$

где  $R_s$  - измеренное поверхностное сопротивление, Ом;  $R_v$  - измеренное объемное сопротивление, Ом;  $D$  - диаметр потенциального электрода, м;  $g$  - зазор между потенциальным и измерительным электродами, м;  $t$  - толщина напольного покрытия, м (рис. 2.7).

По результатам измерений поверхностного сопротивления напольного покрытия делают приближенную оценку возможного потенциала тела человека, перемещающегося по полу, при относительной влажности не менее 60 %:

Удельное поверхностное сопротивление, Ом	$10^{10}$	$2 \cdot 10^{10}$	$3 \cdot 10^{10}$	$4 \cdot 10^{10}$
Потенциал тела человека, кВ	2	4	6	8

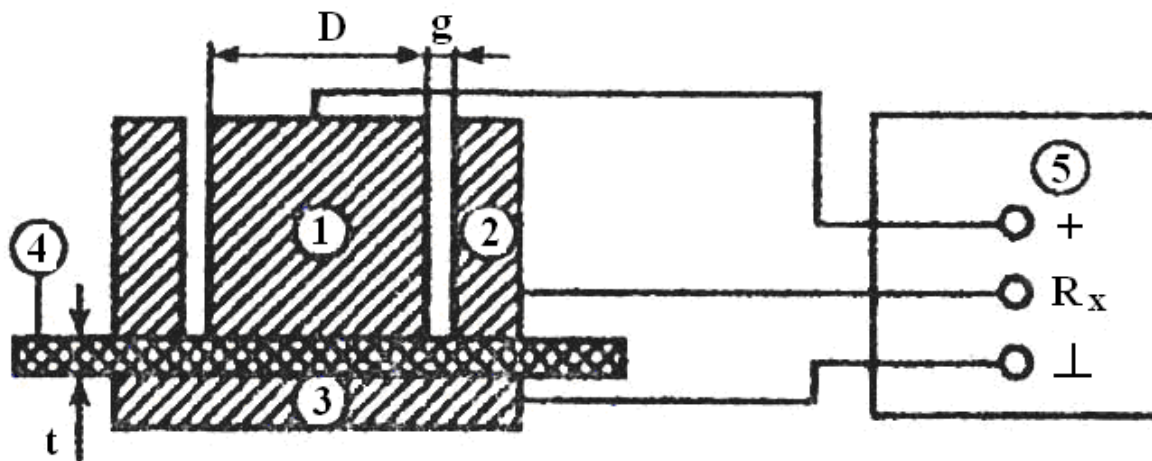


Рис. 2.7. Схема измерений поверхностного и объемного сопротивления полимерного диэлектрика: 1 – потенциальный электрод, 2 – измерительный электрод, 3 – охранный электрод, 4 – образец полимерного диэлектрика; 5 – тераомметр Е6-13

По результатам измерений объемного сопротивления напольного покрытия делают приближенную оценку возможного потенциала тела человека, перемещающегося по полу, при относительной влажности не более 60 %:

Удельное объемное сопротивление, Ом	$2,5 \cdot 10^8$	$5 \cdot 10^8$	$7 \cdot 10^8$	$10^9$
Потенциал тела человека, кВ	2	4	6	8

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде соответствующего протокола.

В случае необходимости дополнительной защиты от статического электричества выбирают рекомендуемые мероприятия, после чего повторно выполняют предыдущие пункты.

Если уровень потенциала тела человека превышает допустимое значение, применяют антистатическое напольное покрытие или устанавливают систему, поддерживающую соответствующую влажность воздуха в помещениях, где установлены устройства АСТУ.

## 2.9. Магнитные поля промышленной частоты

Непосредственные измерения напряженности магнитных полей частотой 50 Гц проводят в нормальных режимах при помощи измерителя магнитного поля в местах установки устройств АСТУ на РУ вдоль трассы прокладки кабелей.

Для измерения магнитного поля промышленной частоты целесообразно применять приборы, позволяющие измерять магнитные поля напряженностью от 0,01 до 1000 А/м. Могут применяться, например, приборы: ТП2-2У, МПМ-2 (ГП ВНИИФТРИ, Россия); ПЗ-50 (СКБ РИАП, Россия); ЕТМ-1 (Wandel & Goltermann, Германия).

Для режимов к.з. на шинах РУ уровень напряженности магнитных полей определяют расчетным путем. Рассматривают режим к.з. на шинах РУ вблизи места установки устройств АСТУ.

Приближенные оценки проводят по формуле  $H = I_k / 2\pi r$ , где  $r$  – расстояние до шин, по которым проходит ток короткого замыкания  $I_k$ .

В тех случаях, когда вблизи места установки устройств АСТУ размещены реакторы или трансформаторы, измеряют напряженность магнитного поля в нормальном режиме и пересчитывают для условий протекания токов короткого замыкания.

Приближенный расчет напряженности,  $H$ , А/м, поля, создаваемого вдоль оси реактора, выполняют по выражению:

$$H = \frac{In}{2} \cdot \frac{r^2}{(r^2 + x^2)^{1.5}},$$

где  $r$  – радиус реактора, м;  $x$  – расстояние по оси реактора от его центра до точки измерения, м;  $I$  – ток в реакторе, А;  $n$  – число витков.

Приближенный расчет напряженности,  $H$ , А/м, поля, создаваемого реактором в горизонтальной плоскости на расстояниях более двух диаметров реактора, выполняют по выражению:

$$H = \frac{In}{4\pi} \cdot \left[ \int_0^{2\pi} \frac{r \cdot \delta \cdot \cos \beta}{(r^2 + x^2 - 2r \cdot x \cdot \cos \beta)^{1.5}} d\beta - \int_0^{2\pi} \frac{r^2}{(r^2 + x^2 - 2r \cdot x \cdot \cos \beta)^{1.5}} d\beta \right],$$

где  $\beta$  – угол между вектором, направленным из центра реактора в точку измерений, и осью абсцисс.

Для нескольких реакторов искомую напряженность магнитного поля определяют методом суперпозиции напряженности полей от каждого реактора с учетом фазового сдвига токов.

Напряженность магнитного поля, создаваемого трансформатором, много меньше, чем напряженности поля, создаваемого реактором. Магнитное поле трансформатора, в основном, сосредоточено в магнитопроводе. Воздействие магнитного поля трансформатора на АСТУ может представлять опасность лишь в непосредственной близости от трансформатора. Расчет напряженности магнитного поля вблизи трансформатора представляет сложную

задачу. В этом случае определяют напряженность магнитного поля экспериментально.

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде соответствующего протокола.

В случае необходимости снижения уровней воздействующих магнитных полей промышленной частоты выбирают мероприятия, после чего повторно выполняют предыдущие пункты.

## **2.10. Импульсные магнитные поля**

Напряженность импульсных магнитных полей измеряют при имитации удара молнии в молниеприемник, расположенный вблизи от устройств АСТУ и при коммутациях силового оборудования.

Расчетные оценки импульсных магнитных полей проводят для случаев протекания тока молнии по молниеотводам или токоотводам молниеприемников зданий и сооружений, расположенным вблизи места размещения устройств АСТУ. Приближенные оценки проводят по формуле  $H = I_m / 2\pi r$ , где  $r$  – расстояние, м, до молниеприемника или токоотвода, по которому проходит весь ток молнии  $I_m$ , А, или его часть.

Результаты измерений и расчетов оформляют в виде соответствующего протокола.

В случае необходимости снижения уровней воздействующих импульсных магнитных полей выбирают мероприятия, после чего повторно выполняют предыдущие пункты.

## **2.11. Помехи, связанные с возмущениями в цепях питания АСТУ постоянного и переменного тока**

К основным периодическим помехам в цепях постоянного тока относятся переменные составляющие напряжения (пульсации) и кондуктивные помехи радиочастотного диапазона, а в цепях питания переменного тока – гармонические составляющие напряжения. Импульсные помехи в цепях постоянного и переменного тока возникают при коммутации реле, электромагнитов, приводов силовых выключателей, автоматических выключателей.

Для измерений пульсаций и кондуктивных помех может применяться осциллограф с полосой пропускания не менее 10 МГц.

Для длительных измерений могут применяться осциллограф с полосой пропускания не менее 50 МГц и специальные регистраторы, позволяющие измерять импульсные помехи и сохранять в памяти зарегистрированные значения (например, регистратор событий FLUKE-VR-101S).

Измерительную аппаратуру подключают к цепям питания по противофазной схеме (провод – провод) и, при необходимости, по синфазной схеме (провод – земля).

После подключения измерительной аппаратуры проводят следующие виды измерений: кратковременные измерения (осциллографирование формы сигнала помехи); длительную регистрацию (в том числе, при коммутациях силового оборудования).

Кратковременные измерения проводят в нормальных режимах (стационарные режимы работы силового оборудования): режим срабатывания реле; режим срабатывания автоматических выключателей в цепях питания; режим срабатывания электромагнитных приводов силовых выключателей.

Определяют при измерениях в стационарных режимах характеристики пульсаций или коэффициент синусоидальности переменного напряжения.

Проводят измерения помех, возникающих при срабатывании реле, в том числе, принудительном, например, при опробовании силовых выключателей, проверке защит. При этом помехи измеряют в тех панелях (шкафах), где срабатывают реле.

Проводят измерения помех при срабатывании автоматических выключателей в цепях питания при коммутациях в силовых сборках, на щите собственных нужд, щите постоянного тока. Помехи фиксируют в местах установки устройств АСТУ.

Проводят измерения помех в цепях оперативного тока при срабатывании электромагнитных приводов силовых выключателей в местах установки устройств АСТУ.

Длительную регистрацию проводят с целью определения диапазона характеристик помех в длительно существующих режимах. При данном типе измерений определяют амплитуду переменных и импульсных помех в цепях постоянного тока; гармонические составляющие и импульсные помехи в цепях переменного тока. Измерения проводят в тех же цепях, что и при кратковременной регистрации, при этом продолжительность непрерывных измерений составляет не менее одной недели.

Проводят анализ аварийных режимов в сети питания и определяют возможные уровни пульсаций в сети постоянного тока и наибольшее время провалов напряжения.

Оформляют результаты измерений и расчетов в виде соответствующих протоколов.

В случае необходимости снижения уровней электромагнитных помех в цепях питания АСТУ выбирают мероприятия, приведенные ниже, и повторяют предыдущие пункты.

Для снижения уровня электромагнитных помех в цепях питания низкого напряжения до допустимых значений применяют следующие мероприятия:

- устанавливают средства ограничения перенапряжений на источниках помех (соленоидах, катушках реле);
- устанавливают средства ограничения перенапряжений на шинах постоянного тока и на шинах собственных нужд;
- применяют специальные фильтры;

- применяют отдельное питание устройств АСТУ.

Подробнее мероприятия по улучшению электромагнитной обстановки рассмотрены в рекомендованной литературе.

## **2.12. Помехи от вспомогательного электрооборудования**

Источниками электромагнитных воздействий на электрических станциях и подстанциях, которые могут вызвать сбои в работе АСТУ, является такое вспомогательное электрооборудование, как мощные преобразователи, сварочные аппараты, осветительные приборы, мощные тяговые механизмы, бытовые электроприборы, электроинструмент и др. При работе этого оборудования на АСТУ воздействуют полевые и кондуктивные помехи (импульсные и периодические помехи).

Проводят непосредственные измерения напряженности магнитных полей при работе вспомогательного электрооборудования в местах установки устройств АСТУ, вдоль трассы прокладки кабелей при помощи измерителя напряженности магнитного поля.

Измерительную аппаратуру для регистрации импульсных и периодических помех подключают к цепям АСТУ по противофазной схеме (провод - провод) и, при необходимости, по синфазной схеме (провод - земля).

После подключения измерительной аппаратуры проводят следующие виды измерений: кратковременные измерения (осциллографирование формы сигнала помехи); длительную регистрацию (в том числе при коммутациях вспомогательного электрооборудования).

Длительную регистрацию проводят с целью определения диапазона характеристик помех в длительно существующих режимах. При данном типе измерений определяют амплитуду переменных и импульсных помех в цепях АСТУ. Измерения проводят в тех же цепях, что и при кратковременной регистрации, при этом продолжительность непрерывных измерений составляет не менее одной недели.

Результаты измерений и расчетов заносят в соответствующие протоколы, указав источник электромагнитного воздействия.

По результатам измерений и расчетов составляют технический отчет по определению электромагнитной обстановки на энергообъекте, который утверждает руководитель предприятия.

Технический отчет включает:

- характеристику объекта и исходные данные для проведения работ по определению электромагнитной обстановки;
- результаты измерений и расчетов в виде протоколов;
- анализ результатов измерений и расчетов;
- заключение об электромагнитной обстановке и электромагнитной совместимости АСТУ;
- рекомендации по степени жесткости испытаний устройств АСТУ и мероприятиям для улучшения ЭМО в случае необходимости.



### **3. ЗАЩИТА ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ ОТ ВНЕШНИХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВЛИЯНИЙ**

#### **3.1. Требования к защитным устройствам и способы защиты**

Развитие новых технологий в микроэлектронике привело к повсеместному использованию в схемах контроля, управления, сбора и обработки различной информации высокопроизводительных, экономичных и малогабаритных интегральных микросхем. Однако по мере усложнения этих схем и миниатюризации их элементов постоянно наблюдалось снижение их стойкости к внешним электромагнитным воздействиям, что требовало повышения надежности защиты. Применявшиеся ранее методы защиты от электромагнитных помех, вполне оправдавшие себя в работе со старой элементной базой, оказывались непригодными при переходе на современную элементную базу, и приходилось не только совершенствовать устройства защиты (разрядники, фильтры и т.п.), но и искать новые принципы построения защиты от внешних электромагнитных влияний. Например, схемы на электронных лампах имели уровень допустимых импульсных воздействий порядка нескольких сотен вольт, причем пробой межэлектродного промежутка внутри лампы чаще всего не приводил к ее повреждению, а лишь создавал сбои в работе. Схемы на полупроводниковых транзисторах имеют уровень допустимых напряжений уже порядка нескольких десятков вольт, причем после воздействия импульса, превышающего допустимый уровень, происходит, как правило, повреждение транзистора, требующее поиска поврежденного элемента и его замены. Для элементов интегральной микроэлектроники уровень допустимых напряжений может снижаться до единиц вольт, причем после повреждения хотя бы одного из многочисленных элементов вся интегральная схема чаще всего оказывается полностью непригодной для дальнейшей работы.

Одновременно со снижением уровня допустимых перенапряжений уменьшаются и значения допустимых значений зарядов, проходящих при импульсных воздействиях через элементы схемы, а также и выделяемой при импульсах энергии, что требует ограничения не только амплитуды, но и длительности воздействующих импульсов. Для некоторых микросхем параметры разрушающего воздействия столь малы, что даже прикосновение руки человека, сопровождавшееся разрядом электростатического заряда паразитной емкости тела человека относительно земли через электроды схемы, является для нее губительным (ГОСТ 29191-91).

Подробная классификация источников опасных и мешающих влияний на электронную аппаратуру, а также характерные значения интенсивности их полей приведены в главе 2. Однако при оценке реальных воздействий на различную аппаратуру приходится учитывать не только исходные параметры полей, создаваемых внешними их источниками, но и параметры каналов прохождения помех к чувствительным элементам аппаратуры. Чаще всего поме-

хи влияния проникают через присоединенные к аппаратуре линии передачи информации и линии электропитания и характеристики этих линий во многом определяют степень опасности помех. В других случаях поля проникают непосредственно к месту размещения чувствительных элементов, проходя сквозь несовершенные экраны, и наводят напряжения и токи в монтажных проводниках. Наличие специальных средств защиты (экранирования, фильтров, ограничителей амплитуд импульсов напряжения и т.п.) также существенно изменяет условия работы аппаратуры при наличии помех.

Типичные значения предельных воздействий, допустимых для различных видов электронной аппаратуры, приведены в табл.3.1.

Таблица 3.1

Разрушающие импульсные воздействия на электронную аппаратуру (при длительности импульса 50 мкс)

Тип оборудования	Электрическая прочность, кВ
Сети электропитания	1-3
Схемы с дискретными элементами (резисторами, конденсаторами и т.д.)	0,5-5
Биполярная техника	0,05-0,2
Интегральные схемы	0,01-0,2

Таким образом, основным фактором, определяющим требования к способам защиты и защитным устройствам, является элементная база защищаемого оборудования. Второй фактор - интенсивность потока опасных электромагнитных воздействий, которая оценивается обобщенно по характерным местам установки защищаемого оборудования.

В зависимости от наличия нижеперечисленных признаков условия эксплуатации ТС подразделяются на следующие классы:

#### КЛАСС 0

- ТС установлены в специальном помещении;
- все введенные извне кабели снабжены защитой от перенапряжений;
- ТС подсоединены к эффективной системе заземления, на которую не оказывают существенного влияния энергетические установки и молниевые разряды, или снабжены автономными средствами электропитания.

#### КЛАСС I

- все введенные извне кабели снабжены защитой от перенапряжений;
- ТС подсоединены к заземляющей магистрали, на которую не оказывают существенного влияния энергетические установки и молниевые разряды. Электропитание электронного оборудования отделено от электропитания другого оборудования;
- операции переключения могут создавать напряжения помех внутри помещения.

## КЛАСС 2

- кабели, содержащие цепи электронного и электротехнического оборудования, разделены;
- ТС подсоединены с помощью разделенных заземляющих шин к системе заземления энергетического оборудования, которая может подвергаться влиянию напряжений помех, образованных как самим оборудованием, так и молниевыми разрядами;
- электропитание ТС развязано от других питающих цепей, как правило, специальными питающими трансформаторами.

## КЛАСС 3

- кабели, содержащие цепи электронного и электротехнического оборудования, проложены параллельно;
- ТС подсоединены к общей с энергетическим оборудованием системе заземления, которая может подвергаться существенному влиянию помех, образованных как самим оборудованием, так и молниевыми разрядами;
- токи от коротких замыканий, операций переключения и молниевых разрядов могут образовывать в системе заземления напряжения помех с относительно большой амплитудой;
- защищенное, электронное оборудование и менее чувствительное электрическое оборудование подсоединены к одной и той же сети электропитания;
- кабели межсоединений могут частично прокладываться за пределами здания рядом с заземляющими шинами;
- оборудование содержит коммутируемые индуктивные нагрузки, не снабженные помехоподавляющими средствами.

## КЛАСС 4

- многопроводные кабели содержат цепи электронного и электротехнического оборудования;
- ТС подсоединены к системе заземления энергетического оборудования, которая может подвергаться влиянию помех, образованных как самим оборудованием, так и молниевыми разрядами;
- токи от коротких замыканий, операций переключения в сетях электропитания и молниевых разрядов могут образовывать в системе заземления напряжения импульсных помех с относительно большими амплитудами;
- сеть электропитания может быть общей для электронного и электротехнического оборудования;
- кабели выходят за пределы здания, в том числе к высоковольтному оборудованию;
- отсутствует специально спроектированная заземляющая система для электронного оборудования.

## КЛАСС 5

- ТС подключены к наземным энергетическим линиям малонаселенных районов;
- все кабели и линии снабжены первичной защитой от перенапряжений;

- электронное оборудование не имеет распределенной заземляющей системы;

- напряжение импульсов помех, вызванных короткими замыканиями и молниевыми разрядами, может быть экстремально высоким, если не применены средства защиты.

Требования к уровню испытательных воздействий изменяются в зависимости от места работы аппаратуры согласно таблицы 3.2.

Предполагается, что в условиях эксплуатации наибольшие амплитуды воздействующих на ТС импульсов перенапряжений, при выполнении сформулированных для данного класса условий, не будут превосходить указанных в последнем столбце таблицы значений испытательного напряжения. Для класса 0 ожидаемые в условиях эксплуатации амплитуды не превышают 25 В.

Таблица 3.2

Амплитуда импульса напряжения 1/50 мкс на ненагруженном выходе испытательного генератора при испытаниях электротехнических, радиоэлектронных и электронных изделий, оборудования и аппаратуры (технических средств - ТС) при испытаниях на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии (ГОСТ Р 50007-92)

Класс условий эксплуатации	Величина амплитуды импульса напряжения испытательного генератора в режиме холостого хода
0	Испытания не обязательны
1	0,5 кВ
2	1 кВ
3	2 кВ
4	4 кВ
5	По согласованию между потребителем и производителем

Из таблицы 3.2 видно, что наибольшее влияние на ожидаемую величину импульсных перенапряжений оказывают способ подводки питания к электронным схемам установки, способ их заземления, расположение контрольных и силовых кабелей, а также присутствие поблизости от этих кабелей высоковольтного оборудования.

### **3.2. Оценка величины тока или напряжения, наведенных внешним электромагнитным полем при медленных его изменениях**

Часто размеры устройства, на котором создается наводка внешним электромагнитным полем, можно считать малыми по сравнению с длиной электромагнитной волны влияющего поля. Более точно это условие формулируется следующим образом: наибольший габаритный размер металлической конструкции, улавливающий наводку, не превышает одной шестой наименьшей длины волны возможного излучения. В этих случаях можно найти вели-

чину, наведенного тока или напряжения, рассматривая электрическую и магнитную составляющие поля отдельно, причем часто удается ограничиться рассмотрением только одного электрического или только магнитного поля. Кроме того, допустимо считать эти поля квазистатическими, т.е. не учитывать их волновую природу.

Рассмотрим влияние квазистатического магнитного поля на электрический контур (рис. 3.1). Обозначим:  $L$  - индуктивность замкнутой петли, образованной проводниками контура;  $R$  - активное сопротивление контура;  $d_n$  - диаметр проводников, образующих контур;  $r$  - эквивалентный радиус контура;  $S$  - площадь контура. Магнитное поле направлено перпендикулярно плоскости контура.

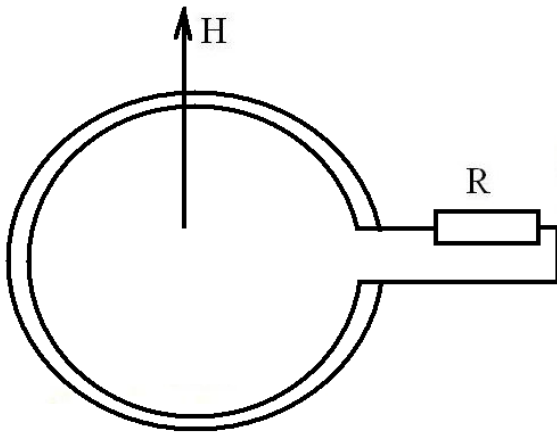


Рис.3.1. К расчету напряжения помехи, наведенной медленно изменяющимся электрическим полем в протяженном проводнике

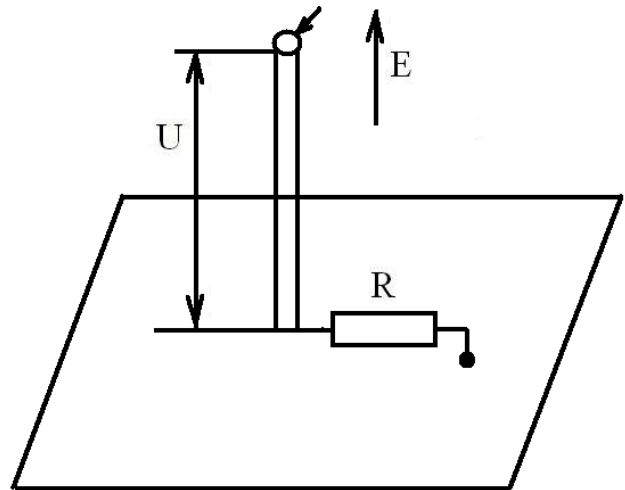


Рис.3.2. К расчету напряжения помехи, наведенной медленно изменяющимся магнитным полем в одиночном витке

Электродвижущая сила, наводимая в контуре внешним магнитным полем с напряженностью  $H$ , определится в соответствии с законом электромагнитной индукции,

$$e(t) = S \cdot \mu_0 \cdot dH / dt. \quad (3.1)$$

В том случае, когда падение напряжения на индуктивности контура от вызванного действием этой э.д.с. тока  $I$  больше падения напряжения на сопротивлении  $R$ , т.е.  $L \cdot di / dt > iR$ , изменение тока во времени, а следовательно, и наведенное напряжение на  $R$  повторяют изменения влияющего магнитного поля, нормального к плоскости витка. Если, наоборот, основная доля напряжения, приходится на сопротивление  $R$ , то наведенный ток  $i(t) = S \cdot \mu_0 \cdot dH/dt \cdot (1/R)$  и соответственно напряжение на  $R$  будут изменяться пропорционально производной от напряженности влияющего поля.

Теперь обратимся к рассмотрению влияния квазистатического электрического поля на проводник, расположенный вдоль силовой линии поля (рис.3.2). Будем считать, что вблизи одного из концов проводника расположена перпендикулярно этому проводнику проводящая плоскость, имеющая нулевой потенциал, и нагрузка в виде активного сопротивления  $R$  подключе-

на между этим концом и плоскостью. Обозначим:  $h$  - длина проводника;  $C_0$  - емкость проводника относительно поверхности нулевого потенциала;  $d_n$  - диаметр проводника;  $c=3 \cdot 10^8$  м/с - скорость распространения электромагнитных волн. Процесс образования наводки в этой схеме можно представить следующим образом. При увеличении или уменьшении влияющего поля происходит заряд или разряд емкости проводника. Если отсоединить нагрузку от проводника и оставить его изолированным от плоскости нулевого потенциала, то его емкость зарядится до напряжения, равного среднему значению потенциала поля вдоль длины проводника, т.е. до значения  $U_{xx} = E \cdot h/2$ .

При подключенной нагрузке через нее потечет ток разряда емкости  $C_0$ . При больших значениях сопротивления нагрузки, когда падение напряжения на сопротивлении  $R$  больше, чем на емкости проводника  $C_0$ , можно считать, что вся наведенная полем э.д.с.

$$e(t) = E \cdot h / 2, \quad (3.2)$$

выделяется на нагрузке. В этом случае форма импульса наведенного напряжения повторяет форму импульса влияющего поля.

Если сопротивление нагрузки  $R$  мало по сравнению с сопротивлением емкости  $C_0$ , то через нагрузку  $R$  будет протекать ток

$$i(t) = C_0 \cdot h / 2 \cdot dE / dt, \quad (3.3)$$

где  $C_0 = h/(c \cdot Z_0)$ ,  $Z_0 = 60 [\ln(2h/d_n) - 2]$ .

В этом случае форма импульса напряжения на сопротивлении  $R$  будет пропорциональна производной импульса напряженности влияющего поля.

Из приведенных формул следует, что при малых значениях сопротивления нагрузки скорость изменения магнитного поля мало влияет на величину наведенного тока и на напряжение на  $R$ . При большом сопротивлении нагрузки (в режимах, близких к холостому ходу) напряжение на нагрузке будет тем больше, чем выше скорость изменения или частота магнитного поля.

При воздействии электрического поля, наоборот, увеличение наведенного напряжения на нагрузке с ростом скорости изменения поля имеет место при малых сопротивлениях нагрузки, а в режимах, близких к холостому ходу, эта зависимость слаба.

### **3.3. Применение экранов для повышения электромагнитной совместимости электронной аппаратуры**

Задача экранирования - ослабление электрических, магнитных и электромагнитных полей в тех областях пространства, где их появление может иметь нежелательные последствия. Для аппаратуры автоматики, обработки информации и связи актуальной задачей является экранирование ее электрических схем от внешних электромагнитных полей, возникающих при работе электроэнергетических установок, радиопередающих устройств или при грозовых разрядах.

Экран в простейшем виде представляет собой металлический лист, устанавливаемый между источником поля и защищаемым устройством. Электрическая компонента поля наводит на поверхности экрана заряды, поле которых компенсирует за экраном внешнее поле, а магнитная составляющая индуцирует в теле экрана токи, магнитное поле которых также направлено навстречу внешнему полю. На эффективность экранирования влияют: конфигурация и размеры экрана, его электропроводность и магнитная проницаемость, а также частота или скорость изменения поля. Количественно эффективность экрана оценивается коэффициентом экранирования  $S$  - отношением амплитуды напряженности поля в определенной точке защищаемого пространства при наличии экрана к амплитуде этого поля в той же точке при отсутствии экрана. Для электростатического экрана, в частности  $S_c = E_3 / E_1$ , а для магнитного  $S_H = H_3 / H_1$ , где  $E_1$  и  $H_1$  - напряженности электрического и магнитного поля при отсутствии экрана, а  $E_3$  и  $H_3$  - при его наличии.

Часто коэффициент экранирования выражают в децибелах. В этом случае

$$S_E = 20 \lg (E_3/E_1), \quad S_H = 20 \lg (H_3/H_1).$$

Расчет коэффициентов экранирования даже для простейшей конфигурации экрана - плоской поверхности в общем случае требует рассмотрения процессов отражения электромагнитных волн от внешней поверхности экрана, преломления волны в экран, затухания волны при прохождении сквозь экран и преломления волны на внутренней поверхности экрана.

Основной характеристикой среды, в которой распространяется электромагнитная волна, является волновое сопротивление среды

$$Z_B = E / H.$$

Величина, обратная коэффициенту экранирования, называется затуханием поля

$$A = 20 \lg (1 / S).$$

Для плоской электромагнитной волны, движущейся вдали от источника излучения, эту величину можно рассчитать по формуле

$$Z = \sqrt{j\omega\mu / (\sigma + j\omega\varepsilon)}, \quad (3.4)$$

где  $\omega$  - угловая частота поля;  $\mu$  и  $\varepsilon$  - магнитная и диэлектрическая проницаемость среды;  $\sigma$  - удельная проводимость среды.

Для воздуха можно пренебречь зависимостью  $\sigma$ , тогда  $Z = \sqrt{\mu / \varepsilon} = 120 \cdot \pi$ . Для металла экрана, наоборот, допустимо пренебречь членом  $j\omega\varepsilon$ , тогда  $Z = \sqrt{j\omega\mu / \sigma}$ .

Отражение от первой поверхности плоского экрана, размеры которого велики по сравнению с длиной волны, дает затухание

$$A_{\text{зат}} = 20 \lg (Z_B / (4Z_0)), \quad (3.5)$$

где  $Z_{\text{э}}$  - сопротивление экрана.

Подставив в выражение (3.5) формулы для  $Z$  воздуха и  $Z$  металла, видим, что затухание поля при первом отражении наиболее сильное при высокой проводимости металла экрана и при низкой магнитной проницаемости.

Потери на поглощение в металле проводника при толщине экрана  $d$  дают затухание

$$A_{\text{погл}} = 8,69 d/\delta = 6,16 d \sqrt{\omega\mu_3\sigma},$$

где  $\mu_3$  - магнитная проницаемость вещества экрана;  $\delta = \sqrt{2/\omega\mu_3\sigma}$  - глубина скин-слоя, определяемая, как расстояние, которое должна пройти электромагнитная волна в металле, чтобы ослабнуть в  $e$  раз. Как видно из этой формулы, потери на поглощение растут с увеличением толщины экрана, магнитной проницаемости и удельной проводимости материала экрана, а также частоты помехонесущего поля. Потери на отражения внутри экрана (от его внутренних поверхностей) можно оценить по формуле

$$A_{\text{внутр}} = 20 \lg (1 - \exp(-2d/\delta)).$$

Суммарное затухание поля после прохождения сквозь экран определится суммированием затуханий от всех видов потерь

$$A = A_{\text{отр}} + A_{\text{погл}} + A_{\text{внутр}}.$$

Хотя электрические и магнитные поля отражаются от внешней и от внутренней поверхности экрана по-разному, суммарный эффект после прохождения сквозь экран одинаков для обоих полей. При этом наибольшее отражение имеет место для электрического поля на внешней, а для магнитного - на внутренней поверхности экрана.

Приведенные формулы имеют общий характер, однако, в частных случаях можно воспользоваться допущениями, аналогичными сформулированным при рассмотрении величин наводок на проводниках, расположенных во внешнем электромагнитном поле, а именно - считать поля квазистационарными. Это допустимо при выполнении двух условий:

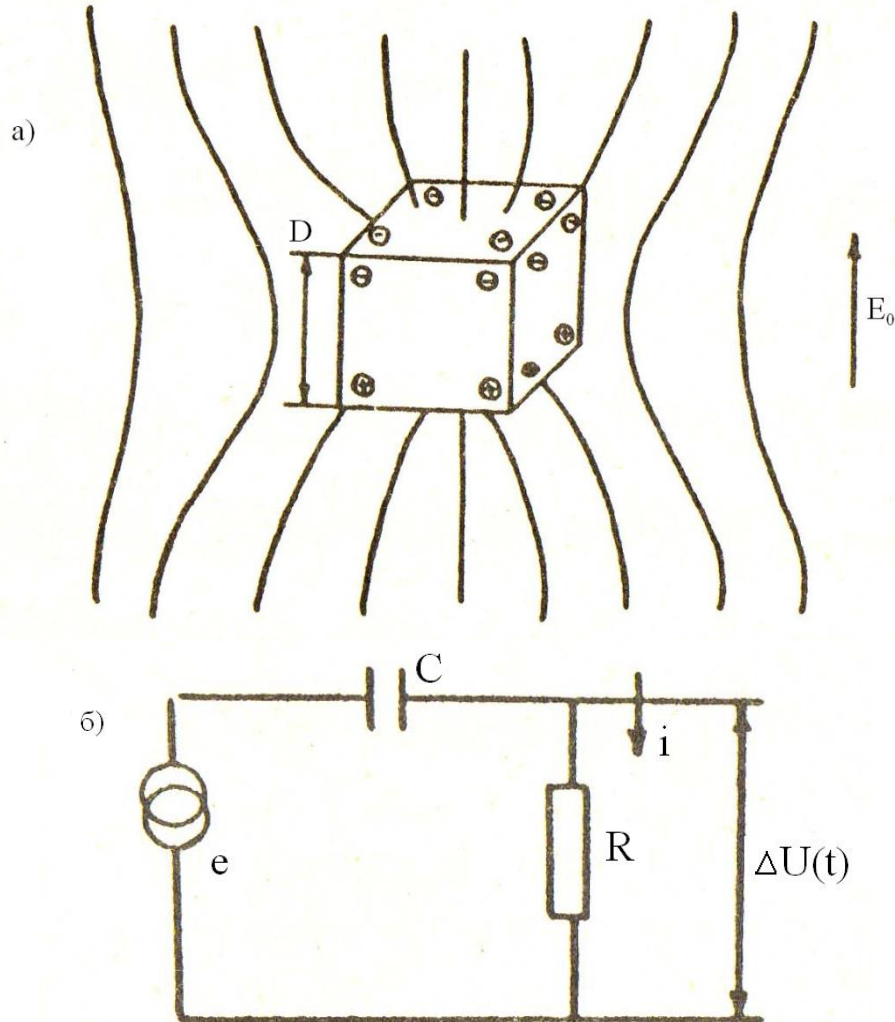
а) габаритные размеры экрана должны быть существенно меньше длины волны поля; б) глубина проникновения поля в материал экрана при той же частоте, с которой изменяется поле, должна быть намного больше толщины экрана.

При этих условиях оказывается возможным при расчетах влияния поля использовать эквивалентные схемы, составленные из элементов с сосредоточенными параметрами.

Рассмотрим в качестве примера важный для практических приложений случай – расчет поля, наводимого во внутренней полости замкнутого экрана внешним квазистационарным электрическим полем. Возьмем экран прямоугольной формы, расположенный на поверхности, имеющей нулевой потенциал (рис. 3.3,а). Над этой поверхностью имеется однородное электрическое поле, источником которого будем условно считать слой зарядов, располо-



женных равномерно на некоторой плоскости, параллельной плоскости нулевого потенциала. Пока напряженность влияющего поля не изменяется, экран обеспечивает полное отсутствие поля как в толще самого экрана, так и во внутреннем его объеме, поскольку заряды, наведенные внешним полем, располагаются на его поверхности таким образом, чтобы потенциал всех точек экрана был одинаков.



*Рис.3.3. Электростатический экран в медленно меняющемся электрическом поле: а) наведенные внешним полем заряды; б) эквивалентная схема для оценки поля, проникающего внутрь экрана*

Однако при изменении внешнего поля будет происходить перемещение зарядов по поверхности экрана, т.е. по стенкам экрана потечет ток, создающий падение напряжения на сопротивлении стенок (при медленных изменениях поля оно будет иметь активный характер). За счет этого появится разность потенциалов между верхней и нижней стенками внутренней полости экрана, следовательно, внутри экрана появится электрическое поле. Эквивалентная схема для расчета наведенного на верхнюю часть экрана потенциала приведена на рис. 3.3,б. При расчетах величин емкости верхней части экрана относительно нижней его части, а также сопротивления стенок с учетом рас-

пределения тока по поверхности экрана рекомендуются формулы, полученные для экрана сферической формы:

$$C = 3 \cdot \pi \cdot \varepsilon \cdot D, \quad R = 1 / (2 \cdot \pi \cdot \sigma \cdot D \cdot d),$$

где  $D$  - высота экрана;  $d$  - толщина его стенок;  $\sigma$  - удельная проводимость материала экрана.

С увеличением скорости изменения внешнего электрического поля растет скорость перемещения наведенных на экран зарядов, а следовательно, возрастает и ток в экране, что увеличивает проникновение поля внутрь экрана. Однако с ростом частоты изменения внешнего поля  $\omega$  начинает проявляться скин-эффект, заключающийся в том, что ток в стенках экрана вытесняется на его наружную поверхность, а поле внутри экрана ослабляется. Толщина скин-слоя в стенках экрана определяется выражением  $\delta = \sqrt{2 / \omega \mu_a \sigma_a}$ . Пока толщина стенки экрана меньше толщины скин-слоя, зависимость отношения внутреннего поля к внешнему от частоты имеет вид

$$E(\omega) / E_0(\omega) = (3/2) \cdot (D \cdot \omega \cdot \varepsilon_0 / \sigma_a d).$$

При  $d > \delta$  эта зависимость имеет вид

$$E(\omega) / E_0(\omega) = 3 \sqrt{2} \omega \cdot \varepsilon_0 \cdot D \cdot \exp(-d/\delta) / \sigma_a \delta.$$

Эти формулы показывают, что эффективность экранирования от внешнего электрического поля уменьшается по мере роста частоты до тех пор, пока толщина скин-слоя не станет во много раз меньше толщины стенки экрана. В реальных конструкциях экранов дополнительное снижение качества экранирования с ростом частоты наблюдается из-за наличия различных отверстий и щелей на его поверхности.

Если экран сделан из магнитного материала, то скин-эффект усиливается, и это улучшает эффективность экранирования. Однако электропроводность этих материалов обычно ниже электропроводности алюминия и меди, что делает последние более подходящими для изготовления электростатических экранов. В ответственных конструкциях поверхность экрана, из этих же соображений, покрывают тонким слоем золота.

Рассмотрим теперь влияние низкочастотного магнитного поля на прямоугольную, тонкостенную камеру из хорошо проводящего материала (рис.3.4). При постоянном поле его напряженность внутри камеры будет такой же, как и снаружи, однако это не вызовет индукции токов или напряжений в проводниках, расположенных внутри экрана, если они неподвижны. При изменении внешнего поля в стенках камеры индуцируются токи, как показано на рисунке. Они частично компенсируют внешнее поле внутри экрана.

На стенке, перпендикулярной линиям поля, соседние петли вихревых токов стремятся скомпенсироваться, поэтому наибольшие токи сосредоточены около краев экрана на стенках, расположенных продольно линиям поля. Они образуют виток с током, магнитное поле которого направлено навстречу внешнему полю. Если бы экран был изготовлен из сверхпроводящего мате-

риала, поле этого витка с током полностью скомпенсировало бы внешнее поле внутри экрана. Наличие активного сопротивления у стенок экрана приводит к затуханию наведенного в стенках тока с постоянной времени  $T = L/R$ , где  $L$  - индуктивность петли тока;  $R$  - ее активное сопротивление, из-за чего компенсация внешнего поля внутри экрана оказывается неполной. С помощью эквивалентной схемы, изображенной на рис.3.4,б, можно оценить величину поля, проникающего внутрь экрана. Из рассмотрения этой схемы можно сделать заключение, что с ростом частоты изменения внешнего поля эффективность экранирования магнитного поля возрастает. На низких частотах, когда  $\delta \gg d$ , эффективность экранирования определяется выражением

$$H_i(\omega) / H_0(\omega) = R / (R + j\omega L). \quad (3.6)$$

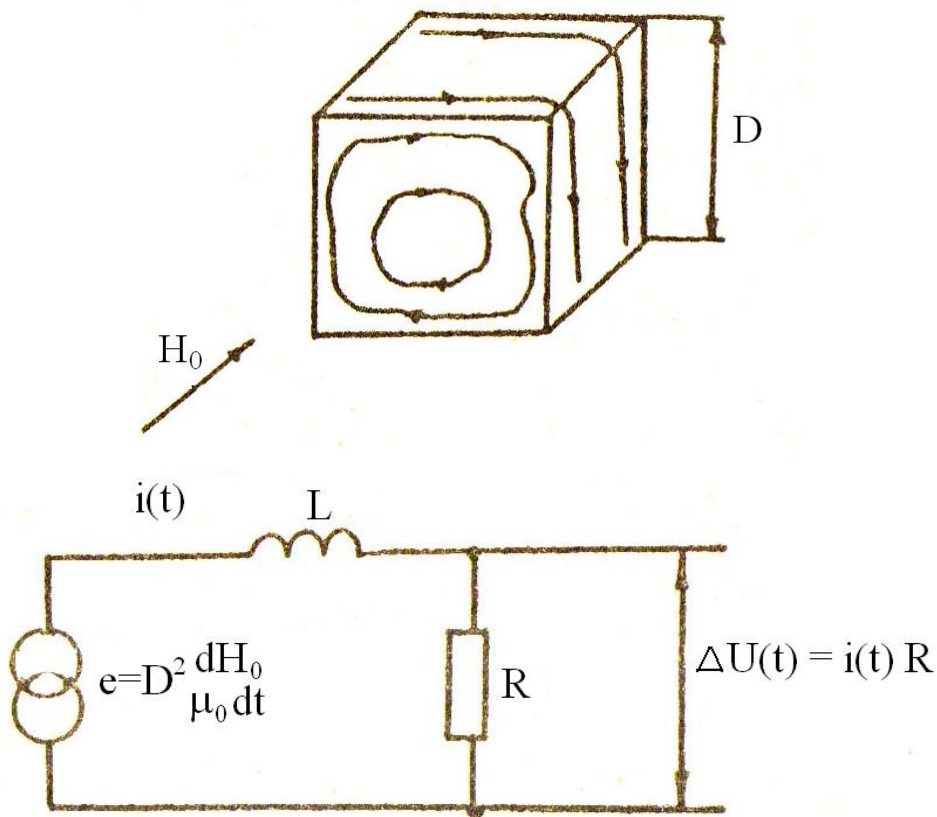


Рис.3.4. Экран в медленно изменяющемся магнитном поле: а) наведенные внешним полем токи в стенках экрана; б) эквивалентная схема для оценки поля, проникающего внутрь экрана

Для одновитковой катушки сопротивление определяют по формуле

$$R = 2 \cdot \pi / 3d\sigma,$$

а последовательная индуктивность

$$L = 2 \cdot \pi \cdot \mu_0 \cdot D / 9.$$

На больших частотах, когда глубина скин-слоя меньше толщины стенок:  $\delta \ll d$ , эффективность экранирования дополнительно возрастает

$$H_1(\omega) / H_0(\omega) = \sqrt{2} \cdot \delta \cdot \mu_r \exp(-d/\delta) / D, \quad (3.7)$$

где  $\delta = \sqrt{2} / \omega \cdot \mu \cdot \sigma$ ;  $\mu_r$  - относительная магнитная проницаемость ферромагнитного материала стенки.

Как показывают расчеты, этими формулами можно пользоваться и для других конфигураций экранов: прямоугольных, эллиптических, цилиндрических и т.д.

Таким образом, в отличие от экранирования электрического поля, эффективность экранирования магнитного поля при низких частотах очень мала и возрастает с увеличением частоты. Однако, наличие разного рода отверстий в реальных магнитных экранах приводит к тому, что рост эффективности происходит лишь до некоторого значения частоты, за которым эффект проникновения поля сквозь отверстия начинает доминировать, и внутреннее поле снова усиливается. Поэтому свойства реальных экранов зависят от способа соединения стенок друг с другом, способа выполнения дверок и отверстий в стенках экрана. Во всех случаях желательно обеспечить минимальное омическое сопротивление в местах стыковки отдельных частей экрана, минимальные зазоры между накладными деталями и минимальные размеры отверстий в стенках экрана.

### **3.4. Рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости блоков автоматики, управления и связи**

Способы борьбы с внешними помехами в цифровой и аналоговой технике включают: правильное, с точки зрения ЭМС, выполнение внешних связей, электромагнитное экранирование, заземление, фильтрацию, резервирование питания.

Термином "земля" обозначают различные по назначению и техническому исполнению устройства, фиксирующие нулевой потенциал на "базовых" элементах электрической схемы, на экранах и на металлических корпусах аппаратуры. Функционально их подразделяют на следующие группы:

в) проводники, по отношению к которым производится отсчет - напряжения питания, а также входных и выходных сигналов;

б) проводники, предназначенные для образования путей обратных сигнальных и питающих токов (с учетом аварийных токов короткого замыкания);

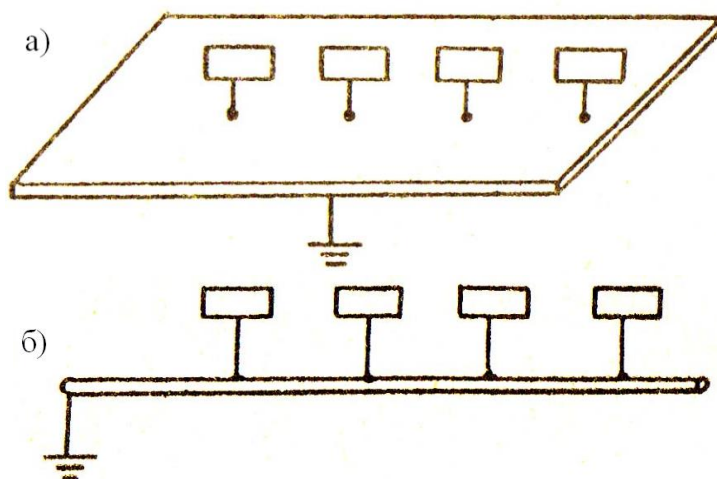
в) поверхности и соединения, предназначенные для электромагнитного экранирования всей аппаратуры или ее частей, восприимчивых к помехам или излучающим помехи;

г) система соединений частей электрической схемы или элементов конструкции аппаратуры, предназначенная для защиты персонала от поражения электрическим током.

Практически выполняемые заземления чаще всего одновременно выполняют несколько из перечисленных функций. Например, нулевой провод четырехпроводной сети питания трехфазным током служит и проводником, относительно которого измеряются фазные напряжения сети, и проводником для протекания токов нулевой последовательности в нормальных и аварийных режимах, а часто используется так же и как средство заземления корпусов аппаратуры для защиты персонала. Ввиду противоречивости требований к различным группам заземлений такое совмещение функций часто приводит к ухудшению эффективности их действия. В частности, основное требование к "базовой" системе проводников, относительно которых измеряются сигналы, - это их эквипотенциальность. Но в случае, когда она одновременно предназначается и для пропускания возвратных токов, на активных и индуктивных сопротивлениях этих проводников возникает падение напряжения от протекания постоянных и переменных токов. Эквипотенциальность заземляющей системы нарушается, во входных и выходных цепях возникают помехи. При протекании аварийных токов эти паразитные сигналы могут достигать значений, представляющих опасность для элементов схемы и даже для обслуживающего персонала.

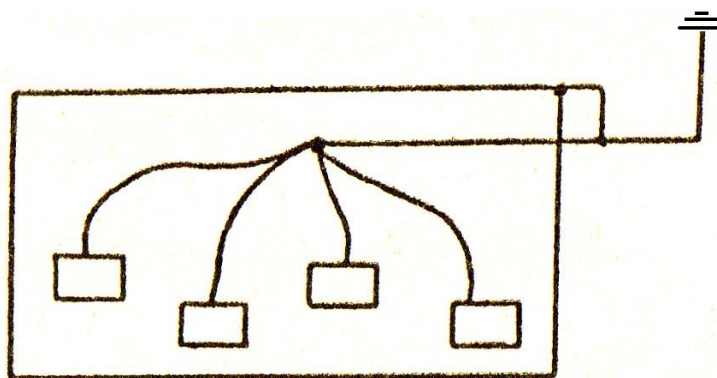
Топология заземляющих проводников может представлять собой сплошную поверхность, магистральную, радиальную или смешанную систему соединенных проводников. Сплошная поверхность обеспечивает наилучшую эквипотенциальность ввиду низких значений активного и индуктивного сопротивлений. Она же наиболее эффективна и как электромагнитный экран. Поэтому заземляющие проводники в виде сплошной поверхности находят широкое применение в многослойных платах печатного монтажа и в экранированных конструкциях (см. рис. 3.4). На подстанциях высокого напряжения принцип поверхностного заземляющего электрода реализуется путем укладки под землей сетки из металлических стержней, соединенных между собой и с вертикальными электродами - заземлителями, число и длина которых определяются, исходя из нормированных значений сопротивления заземления.

Магистральная система заземляющих проводников (рис. 3.5) наиболее экономична, но создает наибольшие помехи в каналах связи при протекании возвратных токов, в особенности - токе источников питания и токов короткого замыкания питающей сети. Ослабить помехи можно путем размещения наиболее энергоемких потребителей вблизи от источника питания. В каналах связи большой протяженности (междугородные, кабельные линии связи) приходится для ослабления помех, создаваемых протеканием по экранирующим оболочкам кабеля токов, наведенных внешними источниками, применять частотно-избирательные цепи, пропускающие сигналы звуковой частоты и запирающие сигналы промышленной частоты, а также использовать различные способы кодирования полезного сигнала.



*Рис.3.5. Способы подключения элементов аппаратуры к общей земле:  
а) земля в виде сплошной поверхности; б) земля в виде магистрального проводника*

Радиальная система соединения заземляющих проводников (рис. 3.6) имеет меньше общих участков для протекания обратных сигнальных токов и токов питающей сети, но требует большей длины заземляющих проводников. На практике приходится применять смешанную систему соединений, при построении которой требуется творчески использовать достоинства каждой из выше перечисленных. При этом следует избегать возникновения замкнутых контуров (петель) в соединении заземляющих проводников, поскольку в каждой петле внешние импульсные поля наводят токи помех. Другое важное требование заключается в том, чтобы отдельные подлежащие заземлению системы проводников (земля логической части изделия, корпус, т.е. защитно-экранирующая система, в также нейтраль питающей сети) соединялись между собой только в одной точке. Эта точка именуется опорным узлом заземления.



*Рис. 3.6. Радиальная система заземления*

Если аппаратура состоит из нескольких блоков, каждый из которых имеет свой опорный узел, то соединение опорных узлов следует выполнять топологически в виде разветвленного дерева (без петель). Также полезно знать, в каких случаях допускается не производить защитное заземление, не

нарушая при этом правил техники безопасности. Защитное заземление можно не производить в следующих случаях:

а) если устройство питается от сети напряжением не выше 500 В и находится при этом в помещении, в котором нет условий повышенной или особой опасности. В таких помещениях относительная влажность не должна превышать 60%, а температура - не более 30° С, не должно быть токопроводящих полов, исключена возможность одновременного прикосновения человека к имеющим соединение с землей устройствам или конструкциям, с одной стороны, и к металлическим корпусам незаземленных устройств - с другой;

б) если устройство питается от разделяющего или понижающего трансформатора, выполняющего роль разделяющего, трансформаторы должны удовлетворять специальным техническим требованиям в отношении повышенной надежности конструкции и повышенных испытательных напряжений. Вторичное напряжение трансформаторов не должно превышать 380 В. Корпус трансформаторов должен быть заземлен;

в) если устройство питается от сети переменного тока напряжением 36 В и ниже или постоянного тока 110 В и ниже;

г) если система питания устройств содержит систему защитного отключения, которая обеспечивает автоматическое отключение всех фаз питания устройства с полным временем отключения с момента возникновения однофазного замыкания не более 0,2 с;

д) если устройство обслуживается с изолированных площадок, которые выполнены таким образом, что прикосновение к представляющим опасность незаземленным частям устройства может быть только с площадки;

е) если электроприемники в устройстве, питающиеся от сети переменного тока напряжением более 36 В или постоянного тока напряжением более 110 В, снабжены двойной изоляцией. При этом в электроприемниках должны быть две независимые и рассчитанные на номинальное напряжение ступени изоляции, выполненные таким образом, что повреждение одной из них не приводит к появлению потенциала на доступных прикосновению металлических частях.

### **3.5. Схема подключения аппаратуры, не имеющей информационных связей с другими устройствами**

Рекомендуемая схема подключения к сети питания и к заземлителю аппаратуры, не имеющей проводных линий связи с другими устройствами, показана рис. 3.7.

Питание подается от распределительного щита РЩ по фидеру питания Ф. Контактёр К позволяет отключать три фазы питающей сети (нулевой провод не прерывается). На распределительном щите имеется узел заземления ОУ, соединенный с заземлителем здания, в котором он установлен. Заземлителем может служить сварной каркас здания или подземная водопро-

водная система, однако, предпочтительнее иметь автономный электрод заземления в виде прута диаметром не менее 15 мм, забитого в землю на глубину 3-4 м, или в виде закопанного металлического листа площадью 1,5-2 м. Длина соединительного проводника от заземлителя до узла заземления не должна превышать 15 м, а его сопротивление - 3 Ом. К узлу ОУ РЩ рекомендуется также подсоединить проводом 2 нуль сети (нейтраль). Фидер Ф должен представлять собой экранированный кабель со сплошной или гибкой (плетеной) оболочкой или, что более предпочтительно – быть заключен в жесткую стальную трубу. Этот экран, с одной стороны, присоединяется проводом металлизации 3 к узлу ОУ РЩ, а с другой - проводом металлизации 4 к опорному узлу ОУ на проводящем корпусе аппаратуры. Если кабель имеет только гибкий экран - оплетку, то рекомендуется узлы ОУ дополнительно соединить проводом металлизации. К узлу ОУ проводами металлизации 5, 6 и 7 радиальным или магистральным способом подсоединяются проводящие корпуса сетевого фильтра СФ, вторичного источника питания ВИП и логического блока. Если сетевой фильтр расположен вне корпуса аппарата, то кабель между ним и вторичным источником питания также должен быть заэкранирован. К опорному узлу ВИП проводами металлизации 8 и 9 подсоединяются выходной зажим ВИП "общая шина" и междуобмоточный электростатический экран силового трансформатора Т.

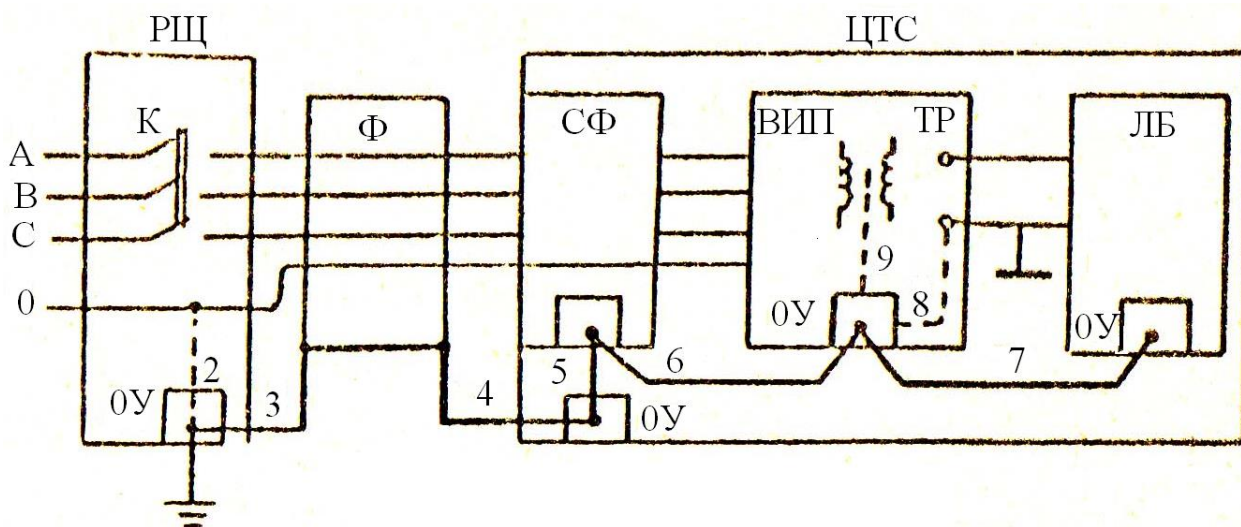


Рис. 3.7. Схема внешних соединений аппаратуры

Все проводники металлизации должны иметь, возможно, меньшее активное и индуктивное сопротивления. При тяжелой электромагнитной обстановке питания распределительного щита РЩ рекомендуется подводить от отдельного, не имеющего другой нагрузки разделительного трансформатора, установленного не далее 30 м от РЩ.



### **3.6. Схема подключения аппаратуры, состоящей из комплекса блоков**

В этом параграфе рассматривается схема подключения аппаратуры, представляющей собой набор отдельных блоков, размещенных в пределах одной стойки или в нескольких механических скрепленных между собой стойках таким образом, что линии связи между блоками не выходят за пределы общего корпуса стоек.

Питание аппаратуры подводится так же, как и в предыдущей схеме. Соединения между сетевыми фильтрами, вторичными источниками питания и логическими блоками в каждом устройстве внутри стойки выполняются так же, как и для устройства в одиночном корпусе, за одним исключением: общая шина вторичного питания всей логической системы присоединяется к системе земель только в одном месте. В общем случае это соединение осуществляется в блоке, который имеет наибольшее число проводных каналов связи с другими блоками, например, в блоке процессора. Разводка первичного питания осуществляется шинами, проложенными в специальных экранированных отсеках стойки. В этих же отсеках располагается шина "корпус", присоединяемая к опорному узлу стойки. При наличии нескольких стоек наиболее эффективный способ ослабления взаимных помех между силовыми и сигнальными цепями - укладка каждой из них в специальном, экранированный от соседнего отсека, металлического распределительного короба, корпус которого служит одновременно экраном для кабелей и шиной "корпус" для всех блоков аппаратуры.

### **3.7. Практические рекомендации по выполнению экранирования аппаратуры**

Экранирование и защита фильтрами - наиболее эффективные схемотехнические способы борьбы с внешними и внутренними помехами. Эти мероприятия должны применяться одновременно и взаимно координироваться, поскольку каждое из них в отдельности не в состоянии обеспечить достаточную эффективность защиты.

Как устройства аналоговой обработки информации, так и цифровые машины нуждаются в тщательном экранировании своих схем с помощью металлических корпусов-экранов. Следует не выпускать из виду не только основные функциональные узлы устройства, но и другие его части: соединительные кабели, разъемные соединения, фильтры, пульта, органы управления, устройства отображения информации и т.д. Для эффективного экранирования в широком диапазоне частот элементы каркаса и обшивки корпуса должны быть очищены от декоративной или антикоррозионной окраски в местах их стыковки, а съемные элементы корпуса должны подсоединяться металлизующими проводниками или конструкциями. На поверхностях стыковки желательно иметь специальное электропроводящее покрытие, об-

ладающее износостойкостью и стойкостью к коррозии, например, слой никеля, покрытый оловом. Крепление стенок к каркасу должно осуществляться винтами с межцентровыми интервалами не более 20 см с применением высокочастотных прокладок. Дверцы должны иметь фиксаторы и контактные ножи из бериллиевой бронзы. Отверстия в пультах и панелях должны быть минимального размера. Следует отдавать предпочтение органам управления и индикаторам, вставляемым в пульт, в металлических, а не пластмассовых корпусах.

Неэкранированные силовые и информационные кабели необходимо разносить на расстояние не менее 30 см. При отсутствии экранирующего распределительного короба приходится экранировать отдельные линии связи. Экранирующая оплетка или фольга заземляется только в одном месте, чтобы предотвратить протекание по экрану токов, вызванных неэквипотенциальностью точек заземления. Если заземлен только передатчик или только приемник, то экран линии связи заземляется на опорном узле этого заземленного устройства. Если заземлены и передатчик, и приемник, предпочтительнее заземлить экран на опорном узле передатчика. Впрочем, если длина экранированного кабеля превышает 5-10 м, то паразитные емкости экрана на земле становятся достаточно малым сопротивлением для этих токов, и заземление в нескольких точках становится допустимым. Электрический экран не следует использовать в качестве обратного провода для сигнальных токов.

Для ослабления влияния внешних полей на линию связи необходимо минимизировать площадь контура, образованного прямым и обратным проводами линии. Если линия представляет собой одиночный провод, а возвратный ток течет по некоторой заземляющей поверхности, то необходимо максимально приблизить провод к этой поверхности. Если линия образована двумя проводами, то их необходимо скрутить, образовав бифиляр (витую пару). Линии, выполненные из коаксиального кабеля, также отвечают требованию минимизации площади контура линии, однако, при наличии цепи, шунтирующей протекание тока по возвратному проводу линии, восприимчивость к наводкам возрастает, особенно на низких частотах. Поэтому, если обратным проводом является оголенная оплетка коаксиального кабеля, ее следует изолировать.

Наилучшую защиту линий связи от электрического и магнитного полей обеспечивают специальные кабели типа экранированного бифиляра, трифиляра (три окруженные вместе провода, один из которых используется в качестве экрана), триаксиального кабеля (изолированного коаксиального кабеля, помещенного в электрический экран), плоского многопроводного кабеля, покрытого с обеих сторон медной фольгой. Для полной реализации защитных свойств таких линий необходимо обращать особое внимание на качество экранирования и коаксиальность концевых разделок и разъемов в местах стыковки линии с аппаратурой.

### 3.8. Защита от проникновения мешающих и опасных воздействий по цепи питания

В предыдущих параграфах описаны механизмы возникновения и количественные оценки импульсов помех и перенапряжений, наблюдаемых в распределительной сети 380/220 В переменного тока. Для надежной работы большей части электронной аппаратуры (осциллографов, измерительных приборов, схем управления и переработки информации, в том числе и ЭВМ, и т.д.) необходимо обеспечить защиту от этих воздействий с помощью специальных устройств защиты, включаемых между распределительным щитом электропитания и сетевыми вводами аппаратуры. В ряде случаев аналогичные устройства защиты подключаются и на вводах кабелей связи. Принцип действия этих устройств защиты заключается либо в ограничении по амплитуде напряжения в защищаемой сети, либо в ограничении спектра частот тока, протекающего в защищаемой сети, либо в совместном использовании этих эффектов.

Подавление высокочастотных импульсов помех производится с помощью фильтров низких частот, включаемых последовательно с защищаемой схемой. Фильтры обычно представляют собой Г-, Т- или П-образные LC -звенья, включаемые в разрыв фазных и нулевого проводов питания. При этом на величину индуктивности накладывается ограничение: падение напряжения на ней от нормального тока нагрузки не должно превышать допустимых значений. В то же время нежелательно и наличие в фильтре больших емкостей, поскольку при их включениях и отключениях могут возникать большие броски тока и скачки напряжения. Эти ограничения совместно с требованиями минимизации габаритов и стоимости фильтра затрудняют обеспечение необходимого снижения нижней границы пропускаемых фильтром частот. Для преодоления этих противоречивых требований в фильтрах применяют так называемые режекторные дроссели. В этих дросселях обмотки индуктивности, включаемые в разные фазы сети питания, располагаются на общем магнитном сердечнике таким образом, что прямой и обратный токи нагрузки создают в нем встречные магнитные потоки. Благодаря этому индуктивное сопротивление рабочему току снижается на один-два порядка. В то же время для токов помех, распространяющихся по каналу нулевой последовательности (фазные провода, как один эквивалентный прямой провод и земляной - как обратный), направление магнитных потоков оказывается согласным и для них дроссель представляется большим индуктивным сопротивлением. При этом важно минимизировать проходную паразитную емкость обмоток дросселя и емкость между входными и выходными цепями фильтра.

На рис. 3.8 и 3.9 представлены варианты схем трехфазного и однофазного сетевого фильтров, а на рис. 3.10 их частотные характеристики. Из рис. 3.10 видно, что в диапазоне частот от 100 кГц до 100 МГц фильтры с указан-

ными параметрами обеспечивают затухание сигнала помех не менее, чем на 40 дБ.

Трехфазный фильтр размещен в металлическом кожухе, разбитом на два экранированных отсека. В сетевом отсеке расположены конденсаторы С1 по 1 мкФ, обеспечивающие ослабление симметричных помех. В нагрузочном отсеке расположены такие же конденсаторы С4, конденсатор малой емкости С3 (0,06 мкФ) с нулевого провода на корпус, режекторный дроссель, выполненный на ферритовом кольце без зазора, и разрядные резисторы R. Переход из отсека в отсек выполнен через проходные конденсаторы С2 (0,035 мкФ). Конденсатор С3 служит для ослабления скачков тока в фазах питающей цепи при включении аппаратуры. Сопротивления R снимают заряд с емкостей при отключении фильтра от сети.

Помехи могут возникать не только во внешней по отношению к защищаемой аппаратуре сети, но и при коммутациях элементов самой аппаратуры, особенно - электродвигателей и реле. Помимо рассмотренных ранее мер защиты - экранирования, фильтрации, применения искрогасящих цепочек, эти помехи можно ослабить специальными способами коммутации. Первый из них заключается в обеспечении включения нагрузки в момент перехода напряжения через нуль, а отключения - в момент, когда ток нагрузки равен нулю. Такая схема коммутации приведена на рис.3.11. Она состоит из последовательно соединенных с нагрузкой  $Z_n$  диода D1 и контакта P1, зашунтированных контактом P2. Схема управления контактами обеспечивает замыкание и размыкание контактов P1 и P2 в следующей последовательности. Включение нагрузки начинается с замыкания контакта P1 при положительной полуволне напряжения сети, когда диод D1 находится в запертом состоянии. Ток в нагрузке начинает течь только с момента перехода напряжения с положительной на отрицательную полуволну, когда отпирается диод D1. Подъем напряжения на нагрузке при включении происходит вследствие этого плавно, без возбуждения колебаний и скачков тока. В течение последующей отрицательной полуволны напряжения производится замыкание контакта P2, шунтирующего D1. Отключение производится в обратном порядке: в отрицательный полупериод размыкается контакт P2. Ток в нагрузку продолжает поступать через отпертый диод D1 и контакт P1 до тех пор, пока ток, меняя полярность, не достигнет нулевого значения. В этот момент диод D1 запирается, и ток в нагрузке прекращается. В последующий положительный полупериод напряжения производится размыкание контакта P1. Схема управления действием контактов может быть реализована на аналоговых или логических элементах различными способами. Вместо механических контактов можно использовать бесконтактные переключающие элементы: семисторы, тиристоры и т.п.

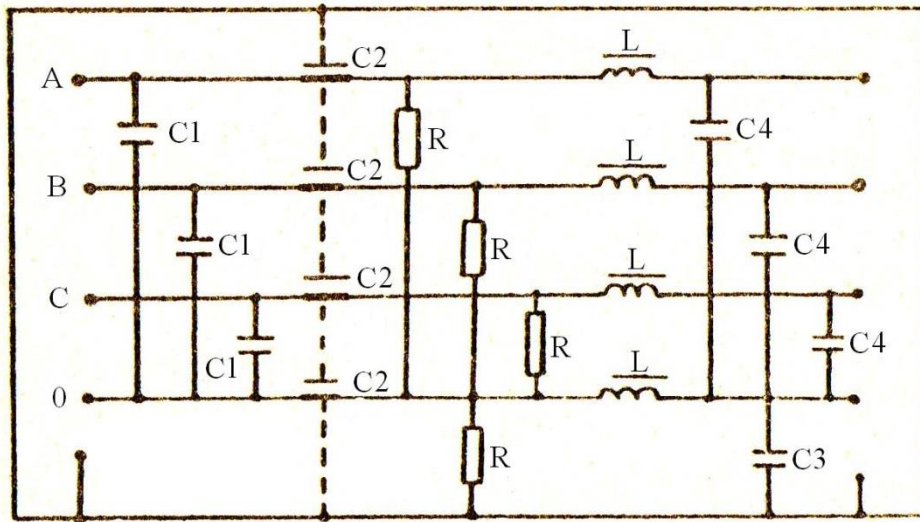


Рис. 3.8. Схема трехфазного сетевого фильтра с режсекторным дросселем:  
 $C1-C4=1 \text{ мкФ}$ ,  $C2=0,035 \text{ мкФ}$ ,  $C3=0,06 \text{ мкФ}$ ,  $L=1,1 \text{ мГ}$ ,  $R=1 \text{ МОм}$ .

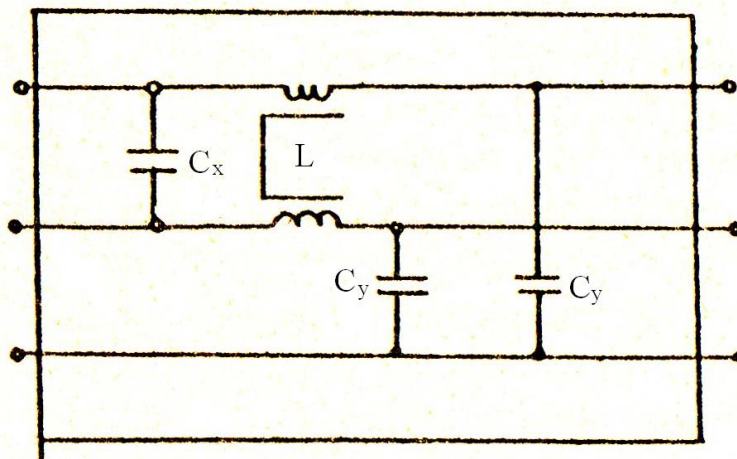


Рис. 3.9. Схема однофазного сетевого фильтра с режсекторным дросселем:  
 $C1=0,6 \text{ мкФ}$ ,  $C2=0,0025 \text{ мкФ}$ ,  $L=1 \text{ мГ}$ ,  $R=1 \text{ Мом}$

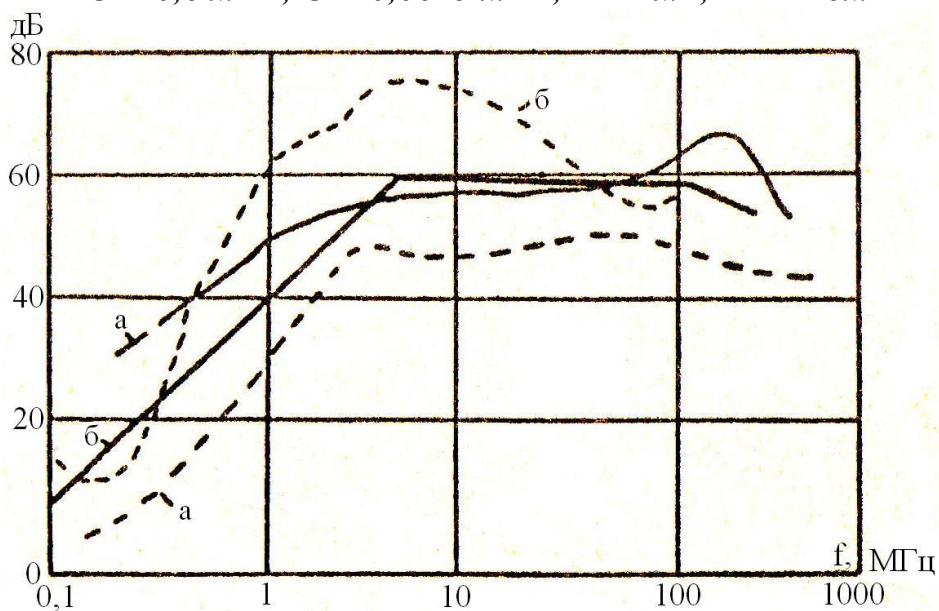


Рис. 3.10. Частотные характеристики сетевых фильтров: а) для схемы рис. 3.8, б) для схемы рис. 3.9

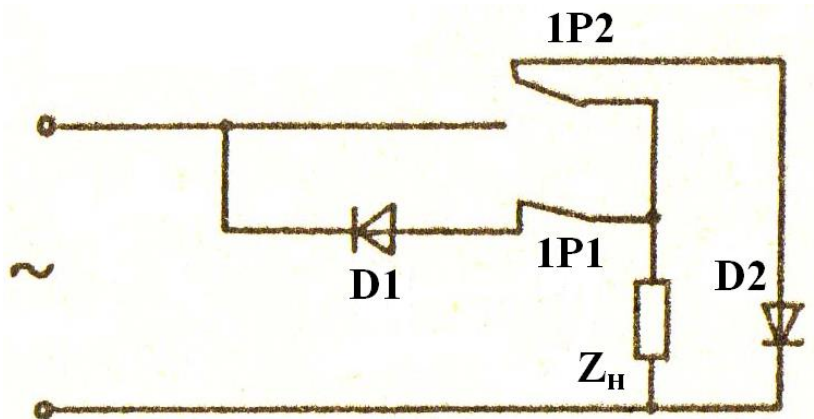


Рис. 3.11. Схема коммутирующего устройства, подавляющего помехи при коммутациях включения и отключения элементов аппаратуры

Второй способ снижения помех при коммутации - это расположение коммутирующих элементов схемы не перед нагрузкой, а позади нагрузки, как показано на рис. 3.12. В этом случае паразитные емкости самих элементов нагрузки и подводящей сети, расположенные в основном со стороны ввода питания, не включаются толчком, создавая колебательный переходный процесс в подводящей линии, а перенапряжения при обрыве индуктивных токов нагрузки проникают во внешнюю сеть ослабленными за счет фильтрующего действия самой отключаемой индуктивности.

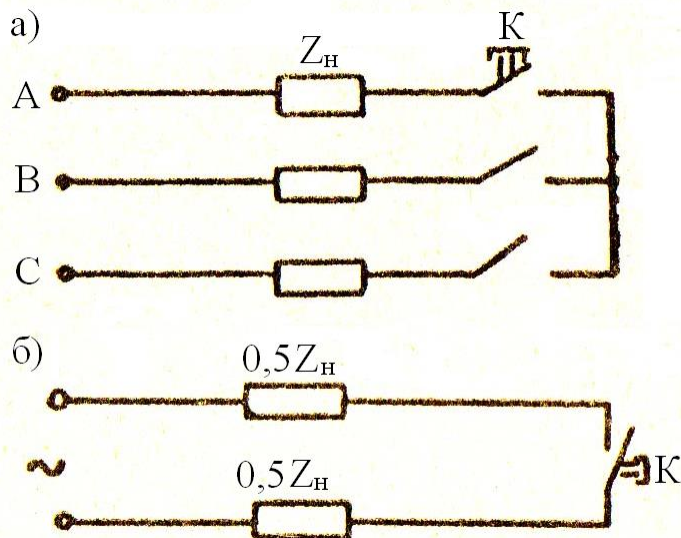


Рис. 3.12. Варианты схем коммутации "за нагрузкой", снижающие помехи при коммутациях: а) трехфазная схема; б) однофазная схема

### 3.9. Защита кабелей связи от токов короткого замыкания в линиях электропередач

Короткие замыкания в линиях электропередач сопровождаются протеканием больших несимметричных токов, индуцирующих перенапряжения в соседних линиях связи и линиях электропередачи низких классов напряжения. Перенапряжения могут достигать нескольких киловольт и иметь длительность от сотых долей до нескольких секунд - в зависимости от уставок релейной защиты поврежденной линии.

Кроме электромагнитной индукции, перенапряжения могут возникать также и за счет подъема потенциала заземлителей и примыкающих к ним участков земли в местах втекания тока короткого замыкания. Оба механизма способны создать в сети, подверженной влиянию, напряжения, опасные для обслуживающего персонала и для подключенной к ней аппаратуры, а в тяжелых случаях - достаточные для пробоя изоляции, подверженной влиянию сети.

Некоторые меры защиты, описанные в предшествующих параграфах, например, защитные разрядники, способны снизить перенапряжения и опасные токи и, таким образом, уменьшить риск повреждения элементов защищаемой сети. Однако длительный характер этих перенапряжений создает риск повреждения самих устройств защиты от перегрева при длительном протекании тока. Поэтому для создания условий стойкости защищаемой сети от влияния токов к.з., помимо перечисленных выше мер, требуются дополнительные меры защиты. Их можно разделить на две группы:

- устройства защиты, которые предотвращают попадание избыточной энергии в уязвимые части системы либо путем ее отвода (разрядники), либо путем разрыва цепи (предохранители, токовые реле);

- использование в защищаемой сети оборудования с подходящей электрической прочностью изоляции и достаточной пропускной способностью по току.

К первой группе устройств защиты, как отмечено выше, относятся разрядники, включаемые между проводом линии и землей или между парой проводов защищаемой линии. В двухпроводных линиях связи ограничение перенапряжений между проводами особенно важно, поскольку в этом канале происходит передача информации с наибольшей плотностью и с минимальными уровнями напряжения сигнала, что обусловлено большей стойкостью этого канала к внешним помехам. Установка в таких линиях разрядников между проводами двухпроводной линии и землей связана с опасностью возникновения больших перенапряжений в канале провод - провод при неодновременном срабатывании разрядников. Можно показать, что для расчета синфазной помехи в канале провод - провод справедлива эквивалентная схема, показанная на рис. 3.13. При симметрии схемы ( $R_1=R_2$  и  $R_{31}=R_{32}$ ) напряжение помехи между проводами  $U_{12}$  остается равным нулю при любом напряжении, наведенном между проводами и землей. Однако, если под дей-

ствием напряжения провод - земля сработает один из разрядников FS1 или FS2, то симметрия канала провод - провод нарушается, и напряжение между проводами резко возрастает. Срабатывание второго разрядника затрудняется подъемом напряжения на заземляющем проводнике вследствие срабатывания первого разрядника и протекания тока по сопротивлению  $R_{12}$ .

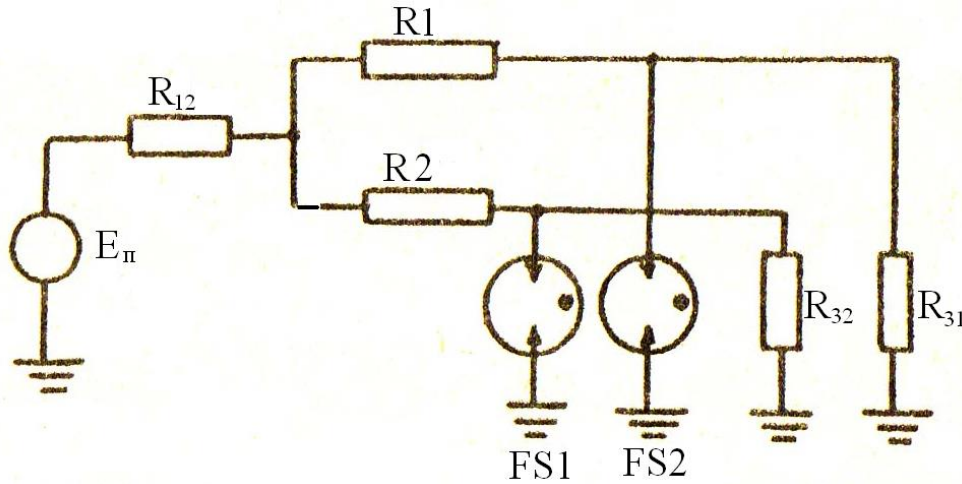


Рис. 3.13. Эквивалентная схема для расчета синфазной помехи в кабеле,  $R_1$  и  $R_2$  - собственные сопротивления проводов линии связи;  $R_{12}$  - взаимное сопротивление;  $R_{31}$  и  $R_{32}$  сопротивления нагрузки

Для восстановления равновесия необходимо, чтобы существовал механизм, обеспечивающий одновременность срабатывания обоих разрядников. Это достигается в специальных трехэлектродных разрядниках с взаимным поджигом. Схема подключения такого разрядника приведена на рис.3.14. При срабатывании любого из промежутков провод-земля обеспечиваются подсветка и диффузия ионизированных молекул газа в соседний промежуток, что и вызывает его пробой при напряжении, приблизительно в два раза меньшем по сравнению с пробивным напряжением без подсветки.

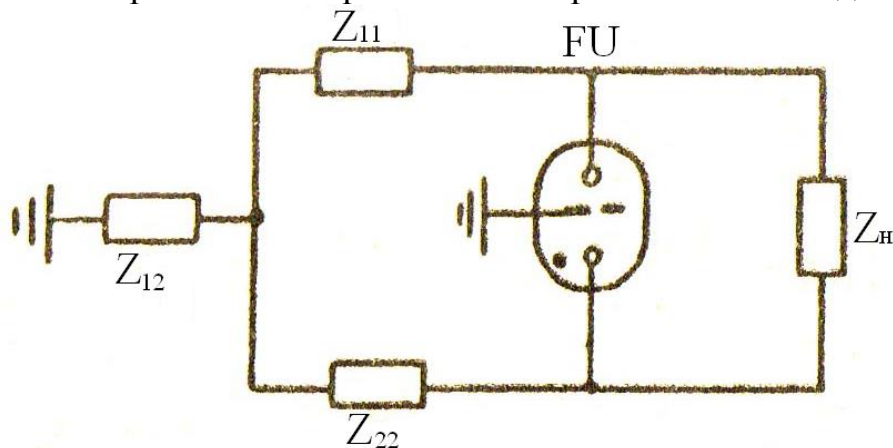


Рис. 3.14. Схема подключения трехэлектродного разрядника



## **4. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ УСТРОЙСТВ РЕЛЕЙНОЙ ЗАЩИТЫ, АВТОМАТИКИ И ИЗМЕРЕНИЙ**

Согласно ГОСТ Р 50397-92 под помехоустойчивостью понимается способность технических средств сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него внешних помех. Испытания на помехоустойчивость проводятся для проверки функционирования технических средств при воздействии помех.

В настоящее время в электроэнергетике происходит замена электромеханических устройств релейной защиты, автоматики и измерений на устройства, содержащие микроэлектронные компоненты. Такие устройства являются более чувствительными к электромагнитным помехам, особенно к "высокочастотным" и "переходным" воздействиям. Широкое применение микроэлектронных компонентов повысило опасность и значение нарушения функционирования и повреждения устройств РЗАИ, которые могут возникнуть в результате воздействия помех. Для того, чтобы исключить или уменьшить опасность воздействия указанных факторов необходимо установить уровни устойчивости устройств РЗАИ к воздействию электромагнитных помех различного вида и разработать соответствующие методы испытаний.

Методы испытаний, правила и рекомендации по выбору и проведению испытаний, а также испытательное оборудование, применяемое при проведении испытаний устройств РЗАИ различных типов должны соответствовать ГОСТ 29280-92.

### **4.1. Виды испытаний на помехоустойчивость и условия их проведения**

Устройства РЗАИ электрических станций и подстанций могут быть подвергнуты различного вида испытаниям на помехоустойчивость. Выбор видов и степени жесткости испытаний для конкретных устройств зависит от следующих факторов:

- условий эксплуатации;
- требуемой надежности и режима работы;
- экономических ограничений;
- электромагнитной обстановки на месте эксплуатации.

Принимая во внимание высокие требования к надежности и длительности функционирования без обслуживания, а также сложную электромагнитную обстановку в местах размещения устройств РЗАИ, целесообразно проведение следующих видов испытаний.

*Испытания на устойчивость к кондуктивным низкочастотным помехам* (частотой от 0 до 20кГц), которые могут распространяться по цепям питания устройств. Эти испытания включают в себя следующие разновидности:

- испытания на устойчивость к гармоникам;
- испытания на устойчивость к интергармоникам;
- испытания на устойчивость к сигналам систем телеуправления и сигнализации;

- испытания на устойчивость к колебаниям напряжения;
- испытания на устойчивость к провалам напряжения;
- испытания на устойчивость к несимметрии напряжений;
- испытания на устойчивость к изменениям частоты испытания.

*Испытания на устойчивость к кондуктивным переходным и высокочастотным помехам* (частотой до нескольких сотен мегагерц), которые могут распространяться по цепям питания, управления и заземления устройств. Эти испытания включают в себя следующие разновидности:

- испытания на устойчивость к импульсам напряжения длительностью 100/1300мкс;
- испытания на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии (импульсы напряжения или тока длительностью 1/50 и 6,4/16мкс соответственно);
- испытания на устойчивость к наносекундным импульсным помехам (импульсам напряжения длительностью  $p-50$ нс, где  $p$ - число импульсов);
- испытания на устойчивость к "звонящим волнам" (длительностью фронта 0,5мс и частотой 100 кГц);
- испытания на устойчивость к затухающим колебаниям (частотой 0,1 и 1МГц);
- испытания на устойчивость к незатухающим или прерывистым индуцированным высокочастотным колебаниям (частотой 0,01-11 МГц);
- испытания на устойчивость к инжектированному току;
- испытания на устойчивость к импульсам напряжения длительностью 10/700МКС.

*Испытания на устойчивость к электростатическим помехам*, уровень которых зависит, в основном, от типа покрытия пола и влажности воздуха в помещении, в котором установлены устройства. Эти испытания включают в себя испытания на устойчивость к электростатическим разрядам.

*Испытания на устойчивость к магнитным помехам*, уровень которых зависит от величины токов, протекающих в проводниках, расположенных вблизи устройств, расстояния между ними и наличия в непосредственной близости магнитных материалов.

*Испытания на устойчивость к радиочастотным магнитным помехам*, уровень которых зависит от мощности радиопередатчиков и расстояний их от устройств.

При проведении испытаний на помехоустойчивость должны соблюдаться следующие условия:

1. Испытания должны проводиться в нормальных климатических условиях.
2. При испытаниях на устойчивость к помехам каждого конкретного вида другие помехи, которые могут действовать в месте испытаний, не должны оказывать влияния на качество функционирования устройства.
3. При проведении испытаний устройство должно функционировать непрерывно в режиме, установленном технической документацией, и обеспечивающем наибольшую восприимчивость к воздействию помех.

4. При испытаниях устройств на устойчивость к одновременному воздействию помех нескольких видов должно быть выбрано сочетание уровней воздействующих помех, приводящее к наибольшей восприимчивости помех.

5. Воздействие помех на устройство в ходе испытаний не должно оказывать влияния на функционирование устройств, не подвергаемых испытаниям.

6. При проведении испытаний должна быть обеспечена безопасность персонала, проводящего испытания.

#### 4.2. Методика проведения испытаний на устойчивость к магнитным помехам

Из всех видов испытаний на помехоустойчивость устройств РЗАИ, перечисленных в § 4.1, рассмотрим более подробно методику проведения испытаний на устойчивость к магнитным помехам.

Их первая разновидность - это испытания на устойчивость к магнитному полю промышленной частоты 50Гц. Такие испытания проводятся для оценки соответствия устройств РЗАИ требованиям по устойчивости к магнитному полю, вызванному протеканием токов в близко расположенных проводниках. Этому виду испытаний должны подвергаться устройства РЗАИ, устанавливаемые на электрических станциях и подстанциях высокого напряжения. Испытания должны производиться в условиях испытательной лаборатории.

Испытательное магнитное поле должно иметь необходимую величину напряженности, быть свободным от гармоник и однородным (при отсутствии устройства). Испытательное оборудование должно состоять из индукционной катушки, источника тока и вспомогательных измерительных приборов. Можно использовать три типа индукционных катушек. Для испытаний устройств малых размеров можно использовать одиночную индукционную катушку квадратной формы со стороны стандартной длины, равной 1 м (рис.4.1), которую можно располагать в трех взаимно перпендикулярных плоскостях.

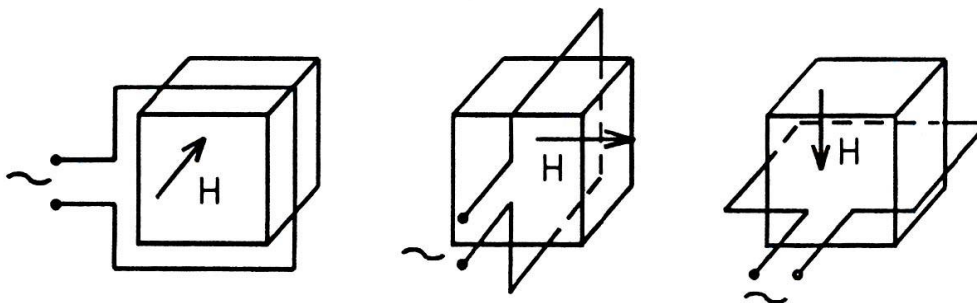
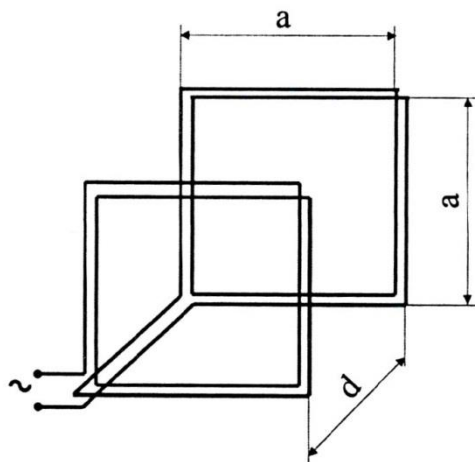


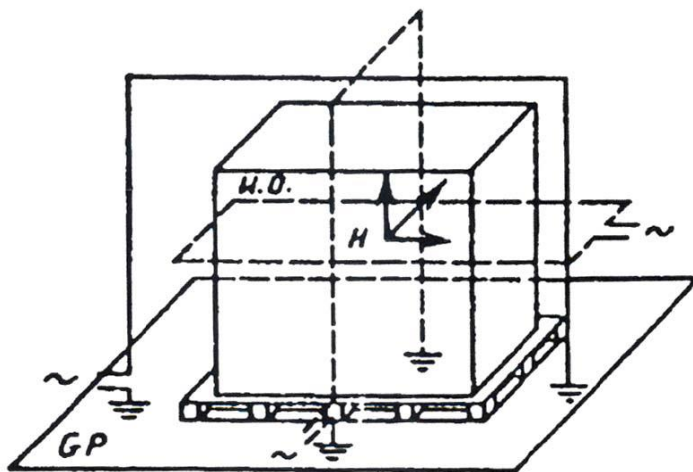
Рис.4.1. Индукционная катушка для испытаний устройств малого размера

Для испытаний устройств средних размеров можно использовать катушку (рамку) Гельмгольца квадратной формы со стандартными размерами сторон, равными 1м, и расстоянием между катушками, равным 0,6м (рис.4.2).



*Рис.4.2. Катушка Гельмгольца для испытаний устройств среднего размера*

Для испытания устройств больших размеров можно использовать усложненную одиночную индукционную катушку (рис.4.3).



*Рис.4.3. Индукционная катушка для испытания устройств большого размера*

В случае необходимости индукционная катушка может быть сконструирована в соответствии с размерами испытуемого устройства. Напряженность испытательного магнитного поля в рабочем объеме катушки не должна отличаться от номинального значения более чем на 3дБ.

Источник тока должен быть таким, чтобы обеспечивать создание испытательного магнитного поля большой интенсивности. Источник тока подключается к той же сети электропитания, что и испытуемое устройство.

Значения напряженности магнитного поля промышленной частоты, установленные для испытаний на помехоустойчивость, степень жесткости испытаний определяются условиями электромагнитной обстановки и уровнем помех, действующих на устройство. Рекомендуемые значения напряженности для различных видов испытаний приведены в таблице 4.1.

Таблица 4 1

Степень жесткости испытаний	Напряженность магнитного поля, А/м	
	Магнитное поле постоянной интенсивности	Кратковременное магнитное поле (длительность 1-КЗс)
1	1	—
2	3	—
3	10	—
4	30	300
5	100	100
*	По согласованию между потребителем и производителем	

Вторая разновидность испытаний - это испытания на устойчивость к импульсному магнитному полю. Такие испытания проводятся для оценки соответствия устройств РЗАИ требованиям по устойчивости к магнитным полям, возникающим в результате разрядов молнии и коротких замыканий в сетях электропитания. Этому виду испытаний должны подвергаться устройства РЗАИ, устанавливаемые на электрических станциях и подстанциях высокого напряжения. Испытания должны проводиться в условиях испытательной лаборатории. Устройство испытывают воздействием пяти импульсов каждой полярности в каждом ортогональном направлении.

При испытаниях применяют магнитное поле, создаваемое в индукционной катушке при протекании импульса тока стандартной формы длительностью 8/20мкс. Форма импульса тока приведена на рисунке 4.4.

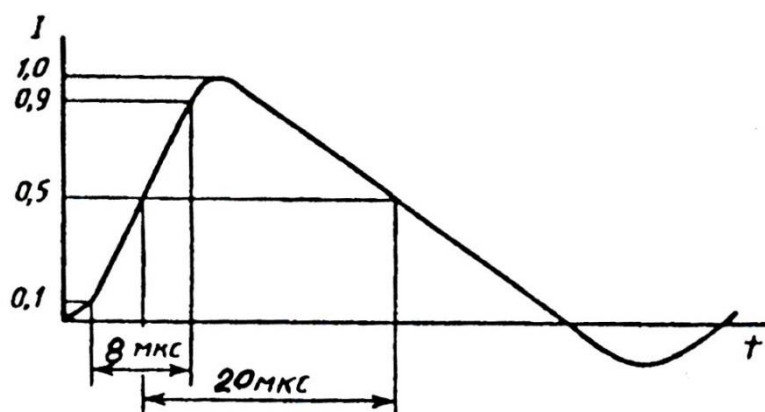


Рис.4.4. Форма импульса тока длительностью 8/20мкс

Испытательное оборудование должно состоять из индукционной катушки и генератора микросекундных импульсных помех. Можно применять индукционные катушки, описанные ранее.

Рекомендуемые значения напряженности магнитного поля для различных видов испытаний приведены в таблице 4.2.

Таблица 4.2

Степень жесткости испытаний	Максимальная напряженность магнитного поля, А/м
1	Не испытывают
2	Не испытывают
3	100
4	300
5	1000
6	По согласованию между потребителем и производителем

Третья разновидность - это испытания на устойчивость к затухающему колебательному магнитному полю. Такие испытания проводятся для оценки соответствия устройств РЗАИ требованиям по устойчивости к затухающим колебательным магнитным полям, возникающим в результате процессов коммутации в электрических сетях высокого напряжения. Этому виду испытаний должны подвергаться устройства, устанавливаемые на электрических станциях и подстанциях высокого напряжения. Испытания должны проводиться в условиях испытательной лаборатории. Длительность испытания должна составлять одну секунду.

При испытаниях применяют магнитное поле, создаваемое в индукционной катушке при протекании тока частотой 0,1 или 1МГц с декрементом затухания таким, при котором амплитуда колебаний после 3-6 периодов соответствует 60% пиковой величины и частотой повторения 40 или 400 Гц. Испытательное оборудование должно состоять из индукционной катушки и генератора высокочастотных колебаний.

Рекомендуемые значения напряженности магнитного поля для различных видов испытаний приведены в таблице 4.3.

Таблица 4.3

Степень жесткости испытаний	Максимальная напряженность магнитного поля, А/м
1	—
2	—
3	10
4	30
5	100
6	По согласованию между потребителем и производителем

### 4.3. Экспериментальная установка для проведения испытаний на помехоустойчивость

В соответствии с рекомендациями ГОСТ 29280-92 для проведения испытаний на устойчивость к воздействию магнитного поля промышленной частоты была разработана экспериментальная установка. Основу этой установки составляет квадратная рамка Гельмгольца, состоящая из двух квадратных катушек. Использование квадратной формы катушек, более простых в изготовлении при размерах около 1 метра, позволяет получить нужный объем пространства с однородным помехонесущим полем. Принципиальная схема установки приведена на рисунке 4.5.

Для создания в рамке однородного поля размеры рамки должны отвечать соотношению

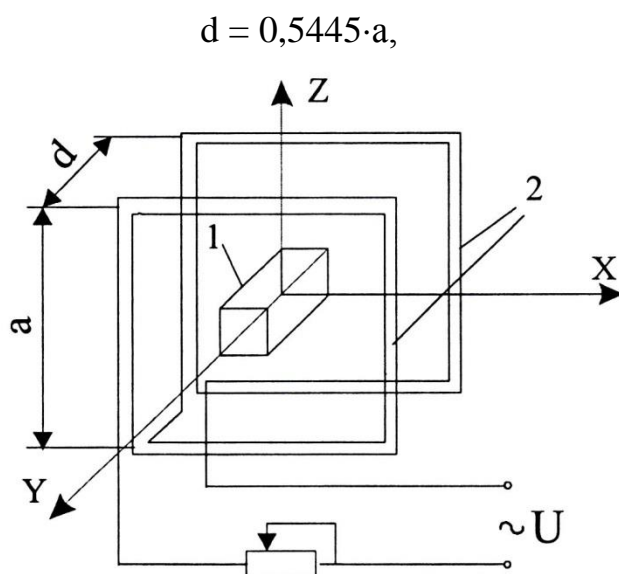


Рис. 4.5. Схема установки для моделирования электромагнитного поля  
1 - испытуемое устройство РЗА; 2 - рамка Гельмгольца

где  $d$  - расстояние между квадратными катушками;  $a$  - сторона квадратной катушки.

Напряженность электромагнитного поля в геометрическом центре рамки определяется выражением

$$H = \frac{1,3 \cdot I \cdot \omega}{a},$$

где  $\omega$  - число витков одной катушки;  $I$  - ток в катушке, А.

Специальное поворотное устройство позволило получить помехонесущее электромагнитное поле любого направления, напряженность до 6000 А/м.

Степень воздействия помехонесущего поля на устройства РЗАИ оценивалась по дополнительным погрешностям срабатывания и возврата этих устройств, которые определялись следующим образом. Вначале определялся параметр срабатывания при отсутствии помехонесущего поля. Затем включалась рамка, в ней создавалось электромагнитное поле, аналогичное помехо-

несущему полю. После чего вновь измерялся параметр срабатывания. Измерения повторялись несколько раз, затем, рассчитывалось среднее значение, по которому вычислялась дополнительная погрешность:

$$\delta_{\text{доп.ср.}} = \frac{A_0 - A_n}{A_0} \cdot 100\% ,$$

где  $A_0$  — параметр срабатывания при отсутствии помехонесущего поля;  $A_n$  - параметр срабатывания при наличии помехонесущего поля.

Аналогично определялась дополнительная погрешность возврата

$$\delta_{\text{доп.вз.}} = \frac{B_0 - B_n}{B_0} ,$$

где  $B$  - параметр возврата устройства.

#### 4.4. Результаты испытаний измерительных и пусковых устройств

Все устройства релейной защиты, автоматики и измерений по функциональному назначению можно разделить на три части: измерительную; логическую; исполнительную (выходную).

Вначале рассмотрим воздействие помехонесущего электромагнитного поля на измерительные и пусковые электромеханические устройства (реле), поскольку они, в настоящее время, широко применяются на электростанциях и подстанциях в системах релейной защиты и автоматики. К таким устройствам относятся реле тока, напряжения, направления мощности. В качестве измерительного устройства рассмотрим индукционный счетчик активной энергии.

Исследования показали, что дополнительная погрешность от влияния непрерывной электромагнитной помехи частотой 50 Гц зависит от нескольких факторов.

Первый фактор - это геометрическое направление вектора напряженности помехонесущего поля. Выяснилось, что наибольшее воздействие оказывает помеха, направление которой совпадает с направлением собственного поля устройства в его воздушном зазоре (рис. 4.6). Например, для реле РТ-40 дополнительная погрешность изменялась от 53%, при указанном направлении, до 2% при другом направлении. Для индукционного счетчика наибольшая погрешность наблюдалась при направлении напряженности поля перпендикулярно плоскости диска.

Второй фактор (для устройств, работающих на переменном токе) - это сдвиг по фазе между векторами напряженности помехонесущего поля и собственного поля устройства. Как правило, наибольшая погрешность наблюдается при совпадении фаз векторов.

В качестве примера на рисунке 4.7 приведена зависимость  $\delta_{\text{доп}} = f(\varphi)$  для реле РТ-40 при  $H_{\text{пом}}=1020\text{А/м}$  и  $I_{\text{уст}}=5\text{А}$ .

Для индукционного счетчика активной энергии аналогичная зависимость носит почти синусоидальный характер (рис.4.8).



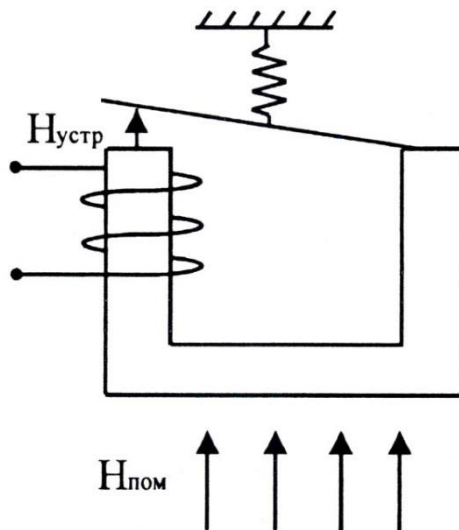


Рис.4.6. Принципиальная схема электромеханического реле

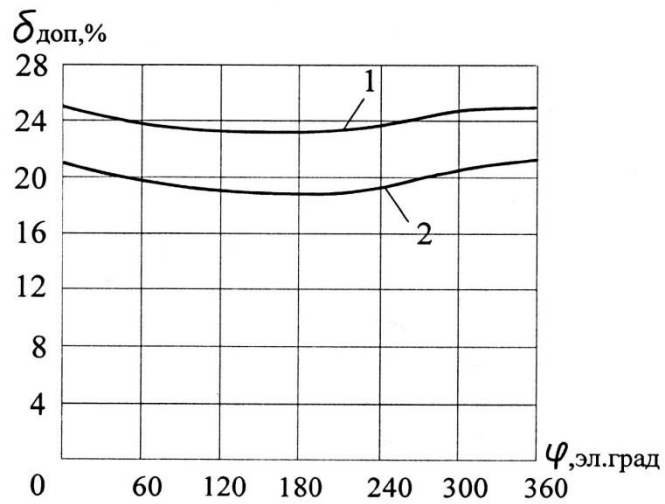


Рис.4.7. Зависимость  $\delta_{доп} = f(\varphi)$  для реле РТ-40  
1-при срабатывании реле; 2-при возврате реле

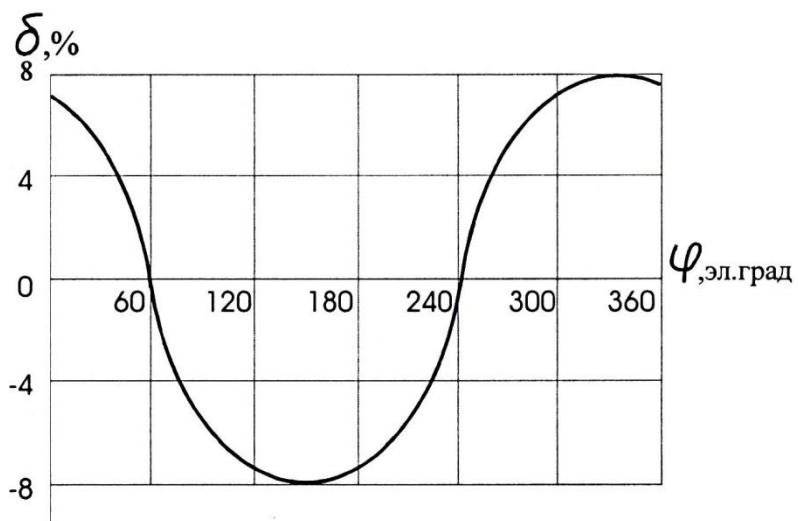


Рис.4.8. Зависимость  $\delta_{доп} = f(\varphi)$  для индукционного счетчика

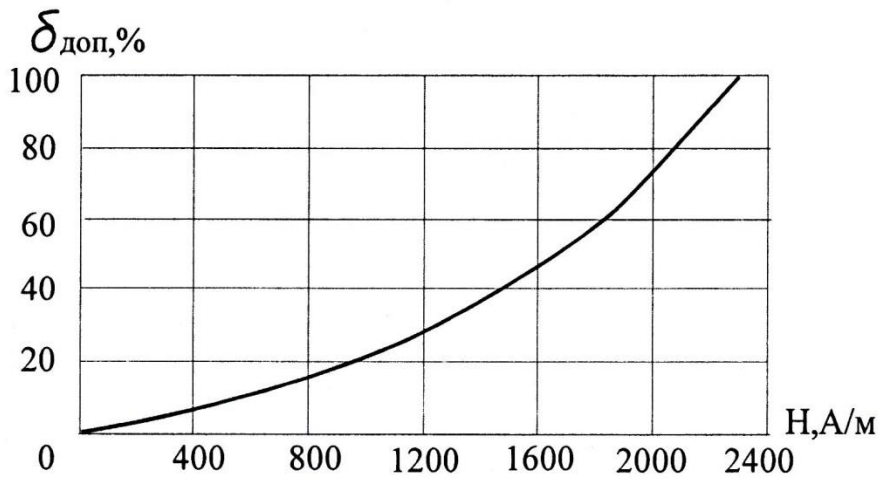
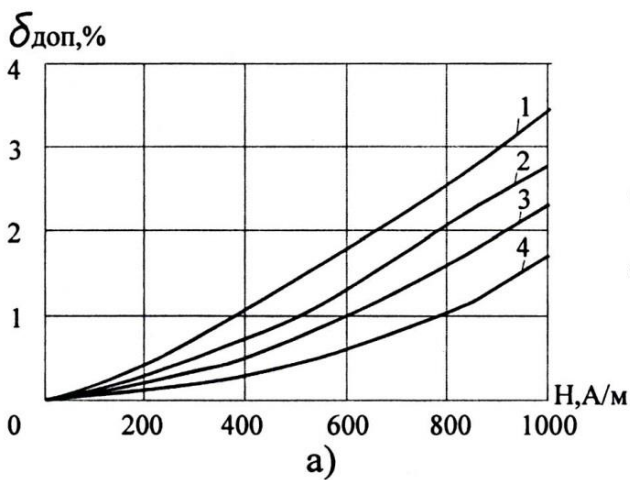
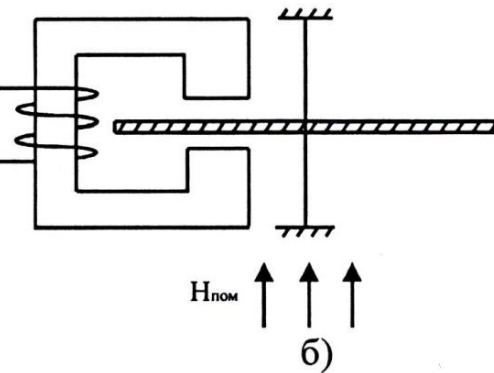


Рис.4.9. Зависимость  $\delta_{доп} = f(H)$  для реле РТ-40



1-при  $I_{наг}=2,5A$ ;  
3- при  $I_{наг}=4,4A$ ;



2- при  $I_{наг}=3,5A$ ;  
4- при  $I_{наг}=5,0A$ .

Рис. 4.10

Эта зависимость получена при  $H_{пом}=2038$  А/м и нагрузке счетчика 2,5 А. Как видно, максимальная дополнительная погрешность составляет  $\pm 8\%$ . Из рисунка также видно, что дополнительная погрешность изменяется не только по величине, но и по знаку. В тех случаях, когда она положительна, счетчик недоучитывает электроэнергию, когда погрешность отрицательна показания счетчика больше действительных значений.

Третий фактор - величина напряженности помехонесущего поля. Чем больше напряженность поля, тем больше дополнительная погрешность при прочих неизменных условиях. На рисунке 4.9 представлена зависимость  $\delta_{доп} = f(\varphi)$  для реле РТ-40.

Эта зависимость получена при токе уставки реле  $I_{уст}=6,5A$  и при наиболее неблагоприятном направлении помехонесущего поля. При увеличении напряженности помехонесущего поля выше некоторого значения наблюдается вибрация контактов реле, а затем происходит их самопроизвольное замыкание (без тока в обмотке реле). На рисунке 4.10а представлены зависимости

$\delta_{don} = f(H)$  для индукционного счетчика, полученные при наиболее неблагоприятном направлении помехонесущего поля и при различных нагрузках счетчика. А на рисунке 4.10 приведена схема, показывающая направление помехонесущего поля.

Четвертый фактор - это величина уставки устройства. Величина уставки или нагрузки определяет интенсивность собственного электромагнитного поля устройства. Поэтому, чем выше уставка (для реле) или нагрузка (для счетчика), тем больше напряженность собственного поля устройства. Следовательно, тем меньшее влияние оказывает на него помехонесущее поле, и тем меньше дополнительная погрешность. В качестве примера можно рассмотреть зависимости, представленные на последнем рисунке 4.10а. Из них видно, что чем больше нагрузка счетчика, тем меньше величина дополнительной погрешности. Аналогичные зависимости наблюдаются и для рассмотренных ранее реле.

#### **4.5. Результаты испытаний логических устройств**

Логическая часть состоит из переключающих устройств и устройств, создающих выдержку времени, которые при определенных действиях измерительных и пусковых органов в соответствии с заложенной в логической части программой запускают исполнительные устройства. Основным требованием, предъявляемым к элементам данной группы, является надежность работы по заданной программе при определенном сигнале, полученном от измерительных устройств.

В настоящее время из логических устройств, выполненных на электро-механической элементной базе, широко используются электромагнитные реле времени и указательные реле. По сравнению с измерительными реле они более устойчивы к магнитным помехам. Объясняется это тем, что указанные реле имеют большее число ампер-витков срабатывания и, соответственно, большее собственное поле. Поэтому внешние помехи оказывают на них меньшее влияние. Особой устойчивостью к магнитным помехам отличается реле времени ЭВ-112. Погрешность его при напряженности помехонесущего поля 4000А/м не превышает 1,6%. Несколько ниже помехоустойчивость электромагнитных указательных реле. Например, для реле РУ-21 при  $H_{пом}=4000$  А/м погрешность достигает 35%.

#### **4.6. Результаты испытаний исполнительных устройств**

Исполнительные устройства связывают системы релейной защиты и автоматики с цепями управления коммутационных аппаратов (выключателей) и устройствами передачи команд по каналам связи и телемеханики. На выходе устанавливаются переключающие элементы достаточной мощности, обеспечивающие работу цепей управления. Основным требованием, предъявляемым к исполнительным устройствам, является надежность их работы.

В системах РЗА, выполненных на электромеханической элементной базе, в качестве выходных элементов широко используются электромагнитные промежуточные реле серии РП-25, РП-222, РП-251. Дополнительная погрешность этих реле при  $H_{\text{пом}}=4500\text{А/м}$  не превышает 19%. Самопроизвольное срабатывание указательных реле возможно только при напряженности помехонесущего поля порядка 8000-10000А/м.

В электронных системах защиты и автоматики в качестве исполнительных органов используют слаботочные электромагнитные промежуточные реле типа РП-13 и реле с магнитоуправляемыми контактами (герконовые реле). Эти реле более восприимчивы к магнитным помехам. Так, например, реле РП-13 начинает самопроизвольно срабатывать при  $H_{\text{пом}}=1800\text{А/м}$ .

Герконовые реле (и сами герконы) получили в последние годы очень широкое распространение в различных областях техники. Поэтому на них остановимся подробнее. Геркон представляет собой в простейшем случае две проволочки, которые одновременно являются контактами и пружинами, запаянными в стеклянном, герметичном сосуде (рис.4.11).

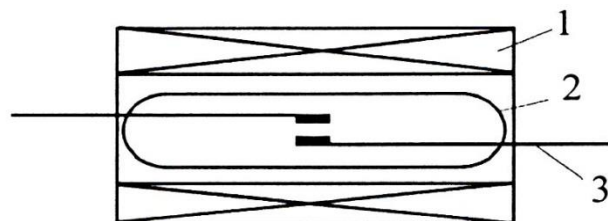


Рис. 4.11. Схема реле с магнитоуправляемыми контактами

- 1 - катушка реле;
- 2 - герметичный стеклянный баллончик;
- 3 - контакты-пружины.

Если на геркон действует магнитное поле, направленное вдоль контактов, то электромагнитная сила при определенной величине преодолевает силу подпружинивания контактов и замыкает их. Используются герконы как самостоятельно (отдельно), так и в составе реле. При использовании в реле стеклянный баллончик помещается внутрь катушки, по которой протекает управляющий ток, создающий управляющее магнитное поле.

Герконы применяются в реле тока и напряжения, в коммутационных панелях, как датчики положения, конечные переключатели, координатные соединители и т.п. Важным преимуществом герконов являются: простота конструкции, надежность в работе и отсутствие необходимости в регулировке. Есть у них и недостатки:

- 1-они не могут применяться для управления большими токами;
- 2-ограничено число срабатывания и оно зависит от величины тока;
- 3-более низкая чувствительность, чем у обычных реле;
- 4-подверженность воздействию электромагнитных помех.

Последнее вызвано тем, что в отличие от электромеханических реле, в которых происходит перемещение сравнительно тяжелого якоря, для чего

требуются значительные механические усилия, в безъякорных герконовых реле механическое движение доведено до минимума. Причем максимальное влияние помехонесущее поле оказывает на реле в том случае, когда вектор его напряженности перпендикулярен плоскости витков катушки. На рисунке 4.12 представлена зависимость дополнительной погрешности реле УОС-50 от напряженности помехонесущего магнитного поля.

Из рисунка видно, что с увеличением напряженности контакты реле начинают дребезжать. Для полного замыкания контактов необходимо увеличивать ток в обмотке реле, а для устранения дребезга при возврате необходимо снижать ток возврата. Вибрации контактов начинаются: для реле УВ-08 и УОС-220 при напряженности помехонесущего поля более 400А/м, а для реле УОС-50 - при напряженности более 800А/м. Замыкание контактов при отсутствии тока в управляющей обмотке происходит при напряженности: для реле УВ-08- 2100А/м; для реле УОС-80- при 4100А/м; для реле УОС-220- при 2800А/м.

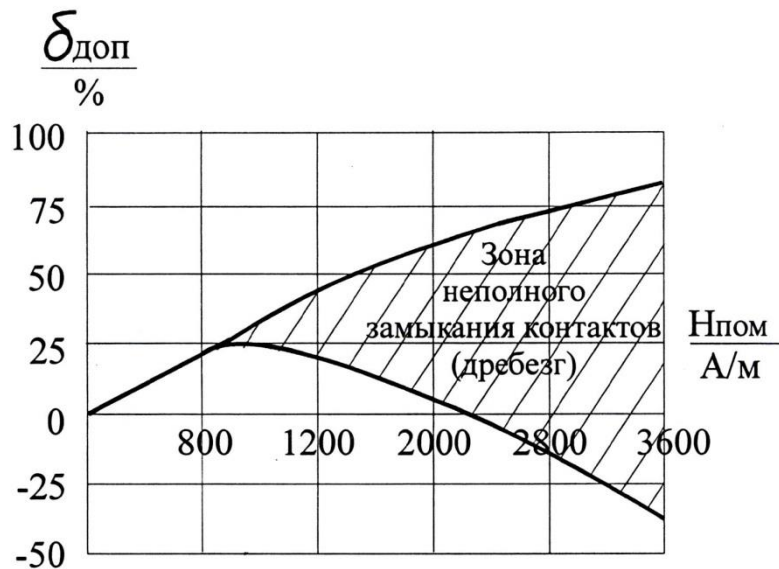


Рис. 4.12

#### 4.7. Результаты испытаний статических устройств

В настоящее время происходит замена электромеханических устройств (реле) противоаварийных защит, автоматики и измерений более современными устройствами на интегральных микросхемах. У них отсутствуют подвижные части, поэтому их называют "статическими". Применение таких устройств позволяет значительно улучшить характеристики защит. Но вместе с тем реле с использованием интегральных микросхем имеют гораздо более низкие уровни полезных сигналов, чем электромеханические. Поэтому они в большей степени могут быть подвержены воздействию электромагнитных помех, что может приводить к ложной работе противоаварийных защит. Но в таких случаях далеко не всегда удастся установить истинную причину ложного срабатывания (или отказа в работе).

Результаты испытаний на помехоустойчивость статических устройств серий РСТ, РСН, РТЗ и РМ, выпускаемых Чебоксарским заводом ЧЭАЗ, показали, что степень воздействия непрерывных магнитных помех промышленной частоты зависит от тех же факторов, что и для электромеханических реле.

Первый из этих факторов - это направление в пространстве вектора напряженности помехонесущего поля. У статических реле имеется наиболее опасное направление, при котором дополнительная погрешность имеет наибольшее значение. Например, для реле РСТ-11, РСН-15 и РСН-17 наиболее опасным является вертикальное направление. При прочих равных условиях дополнительная погрешность в этом случае в 4-5 раз больше, чем при других направлениях. Причиной этого является расположение внутри реле магниточувствительных элементов: входных трансформаторов (тока или напряжения) и выходного электромагнитного реле или герконового реле. Наибольшая дополнительная погрешность имеет место в том случае, когда вектор напряженности помехонесущего поля направлен перпендикулярно плоскости витков обмотки трансформатора или реле. Указанные магниточувствительные элементы являются основными рецепторами электромагнитных помех промышленной частоты.

Вторым фактором, от которого зависит дополнительная погрешность статических реле, является значение напряженности помехонесущего поля. При изменении напряженности поля от 0 до 4000 А/м наблюдается прямо пропорциональное увеличение дополнительной погрешности реле. Для примера на рисунке 4.13 представлены зависимости  $\delta_{доп} = f(H)$  для реле РСТ-11-19.

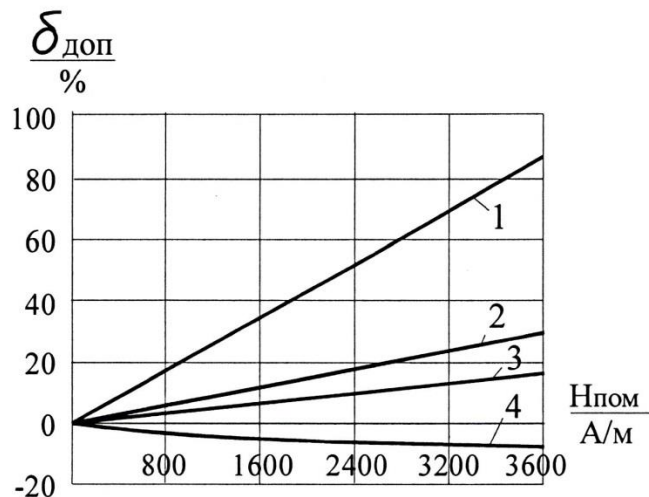


Рис. 4.13

Зависимости 1,2,3 получены при наиболее неблагоприятном направлении помехонесущего поля при уставках реле 1,5А; 3,75А; 6,15А соответственно; 4- при горизонтальном направлении помехонесущего поля и уставке 1,5А. Прямолинейный характер зависимости указывает на отсутствие насыщения ферромагнитных элементов, входящих в состав реле на всем исследуемом диапазоне значений напряженности.

Сравнение статических и электромеханических реле показывает, что некоторые статические реле подвержены воздействию помех промышленной частоты в меньшей степени, чем аналогичные электромеханические реле. Например, электромеханическое реле РТ-40 при уставке 1,5А при  $H_{\text{пом}}=2000\text{А/м}$  имеет дополнительную погрешность 100%. При тех же условиях дополнительная погрешность статического реле РСТ-11 составляет 44%.

Третьим фактором, влияющим на значение дополнительной погрешности, является сдвиг по фазе между векторами напряженности помехонесущего ЭМП и собственного поля реле. Собственное поле статических реле создается токами, протекающими в обмотках входного трансформатора. При изменении угла между векторами меняется знак дополнительной погрешности. Реле может срабатывать при меньшем (это положительная погрешность) или при большем (отрицательная погрешность) значении контролируемого параметра. Для примера на рисунке 4.14 представлена зависимость  $\delta_{\text{доп}} = f(\varphi)$  для реле РСН-17-33.

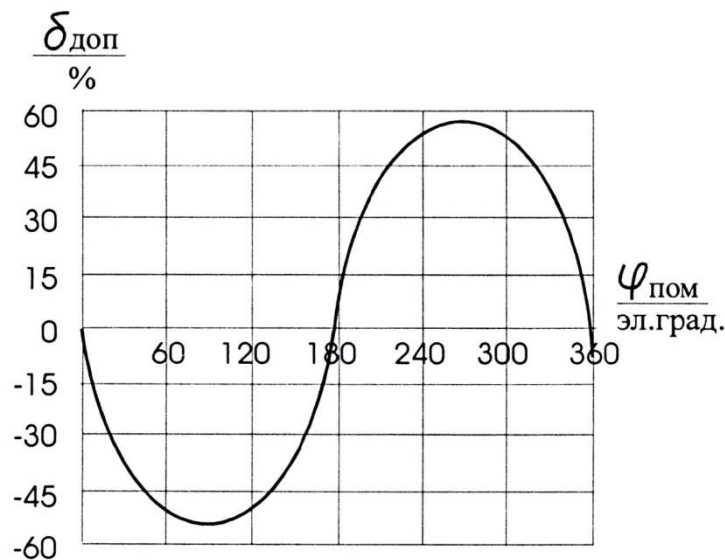


Рис. 4.14

Четвертым фактором, оказывающим влияние на дополнительную погрешность, является величина уставки реле (по току или напряжению). Чем больше уставка, тем меньшее влияние оказывает на работу реле помехонесущее поле. Причина в том, что при большой уставке в обмотках входного трансформатора протекают большие токи, следовательно, напряженность собственного поля реле будет больше, а степень влияния на него помехонесущего поля - ниже. Примером являются зависимости  $\delta_{\text{доп}} = f(H)$ , приведенные на рисунке 4.13.

Особо следует сказать о реле направления мощности РМ-12. Реле РМ-12 применяется в качестве органа определяющего направление потока мощности при к.з. в направленных защитах. При воздействии помехонесущего поля на эти реле происходит смещение угловых характеристик и изменение угла наибольшей чувствительности. Указанное смещение может составлять от 50 до 165 градусов, что существенно сдвигает зону срабатывания реле и может привести к ложной работе направленных противоаварийных защит.

## 5. ЗАЗЕМЛЕНИЕ, КАК ОСНОВНОЕ СРЕДСТВО ОБЕСПЕЧЕНИЯ ЭМС ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ С ТЕХНО- И БИОСФЕРОЙ

### 5.1. Классификация заземлений

Надёжность работы электроустановок и обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) элементов электроэнергетики, техносферы и биосферы в значительной степени зависят от заземляющих устройств (ЗУ). ЗУ современной электроустановки — это в общем случае совокупность нескольких сложных систем с подземными и наземными металлическими и железобетонными сооружениями и коммуникациями, составляющими электрически единое целое. ЗУ крупных электроустановок, зданий, сооружений и промышленных коммуникаций содержит огромное количество силовых и контрольных кабелей с металлическими экранами, оболочкой и бронёй, различного рода и назначения трубы, разнообразные по размерам и функциям металлические и железобетонные конструкции. Естественная заземляющая сеть во многих случаях дополняется рельсовыми путями, скважинами, магистральными трубопроводами. Кроме того, ЗУ во многих случаях включают в себя искусственные заземлители.

Заземление, как отмечалось, является одним из основных средств, обеспечивающих электромагнитную совместимость электроэнергетики с техносферой и биосферой. Оно должно удовлетворять требованиям обеспечения безопасности людей и животных, защиты силовых и слаботочных электроустановок, а также обеспечения эксплуатационных режимов работы и грозозащиты.

По своему назначению заземления условно можно подразделить на три основных типа (рис. 5.1).

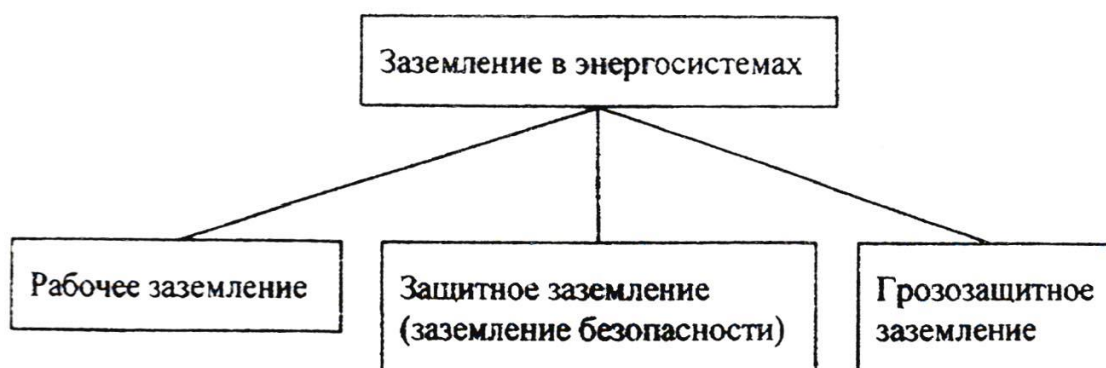


Рис. 5.1. Классификация заземлений в энергосистемах

*Рабочее заземление* обеспечивает необходимое для работы электроустановки распределение напряжений и токов в нормальных и аварийных режимах сети. К такому заземлению сети относятся заземления нейтралей силовых трансформаторов, автотрансформаторов и генераторов, заземления



шунтирующих и дугогасящих реакторов, измерительных трансформаторов напряжения.

*Защитное заземление.* Металлические и другие проводящие части электроустановок, нормально не находящиеся под напряжением, могут оказаться кратковременно или длительно под напряжением вследствие нарушения изоляции. Прикосновение человека к таким частям может привести к поражению его электрическим током. Опасность поражения человека электрическим током может быть обусловлена также стеканием электрического тока с какой-либо части электроустановки в землю и протеканием электрического тока в земле при повреждении изоляции. Одной из мер защиты от поражения человека электрическим током является защитное заземление (заземление безопасности), т.е. преднамеренное соединение частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с заземляющим устройством.

В установках связи, телевидения и телеуправления защитное заземление снижает опасные и мешающие влияния электромагнитных полей линий электропередачи на слаботочные цепи.

Грозозащитные заземления предназначены для защиты от внешних перенапряжений и влияний. Заземление разрядников, нелинейных ограничителей перенапряжений, молниеотводов, грозозащитных тросов на опорах линии электропередач уменьшает грозовые перенапряжения и опасные влияния и способствует уменьшению вероятности перекрытия изоляции при грозовых разрядах.

При строительстве линий электропередач и электроустановок различного назначения функции рабочего заземления, заземления безопасности и грозозащитного заземления зачастую возлагают на общее заземляющее устройство.

Заземляющее устройство — это совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

Заземлитель — это проводник (электрод) или совокупность соединённых между собой проводников (электродов), находящихся в непосредственном соприкосновении с землёй. Заземлителями могут служить не только специальные проводники, но и находящиеся в соприкосновении с землёй части сооружений и коммуникаций производственного и иного назначения, используемые для целей заземления. В ПУЭ рекомендуются к использованию водопроводные трубы, металлические и железобетонные конструкции зданий и сооружений, имеющие соприкосновение с землёй.

Заземляющий проводник — это проводник, соединяющий заземляемые части с заземлителем.

Заземлители подразделяются на искусственные и естественные. Искусственным заземлителем называется заземлитель, специально выполняемый для целей заземления. Естественный заземлитель — находящиеся в соприкосновении с землёй электропроводящие части коммуникаций, зданий и сооружений производственного или иного назначения, используемые для целей заземления.

Занулением в электроустановках напряжением до 1 кВ называется преднамеренное соединение частей электроустановки, нормально не находящихся под напряжением, с глухозаземлённой нейтралью генератора или трансформатора в сетях трёхфазного тока, с глухозаземлённым выводом источника однофазного тока, с глухозаземлённой средней точкой источника в сетях постоянного тока.

С части электроустановки, оказавшейся под напряжением вследствие нарушения изоляции, протекает в землю электрический ток. Напряжения в этой части электроустановки относительно точек зоны растекания электрического тока и относительно точек земли вне зоны растекания будут зависеть от величины тока замыкания на землю и сопротивления растеканию тока. Распределение напряжений в зоне растекания будет зависеть, кроме того, от удельного сопротивления грунта, а также от количества и расположения элементов заземлителя.

При замыкании на землю опасность может представлять напряжение прикосновения (рис. 5.2)  $U_{пр}$ , то есть напряжение между двумя точками при одновременном прикосновении к ним человека. Например, работник энергообъекта прикоснулся рукой к корпусу электрического аппарата, а ногами стоит на некотором расстоянии от этого корпуса.

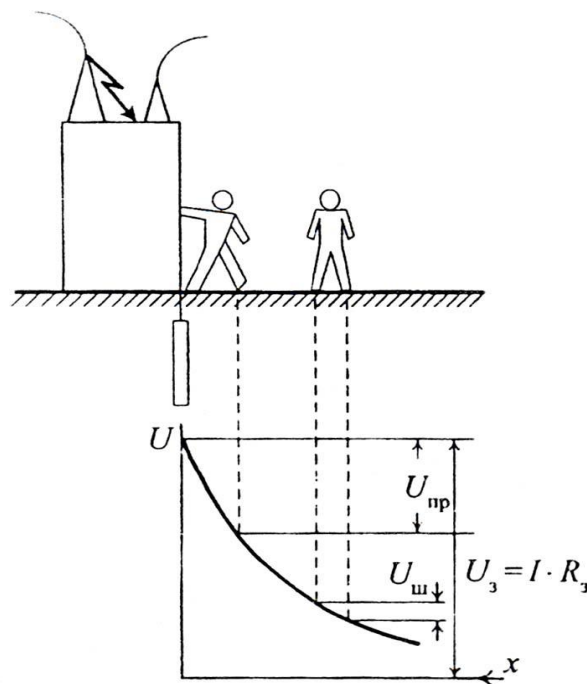


Рис. 5.2. Распределение напряжения при замыкании на землю

Опасность может представлять и напряжение шага  $U_{ш}$ , которое является напряжением между двумя точками земли при одновременном касании их ногами человека.

Уменьшение сопротивления заземления, а также градиента напряжения на поверхности земли путём прокладки и рационального размещения элементов заземляющего устройства приводит к снижению напряжений прикос-

новения и шага. Наибольшие допустимые значения  $U_{пр}$  и  $U_{ш}$  зависят от ряда условий: длительности воздействия электрического тока, рода тока, его частоты, сопротивления пути тока через тело человека, сопротивления в месте касания и др.

С учётом указанных условий и зависимостей установлены такие нормы сопротивлений заземления электроустановок различных классов напряжения, при которых напряжения прикосновения и шага будут находиться в допустимых пределах.

## 5.2. Основные функции ЗУ

С развитием электроэнергетики и информационной техники усложнились ЗУ. При этом практика требовала углубления и развития теории заземления, создания методов расчёта, проектирования, сооружения и эксплуатационного контроля качественно новых объектов — многофункциональных ЗУ.

ЗУ современных электроустановок, как отмечалось, выполняет много функций: обеспечение безопасности, рабочего режима и надёжной молниезащиты. Подробный анализ влияющих факторов позволил определить 10 наиболее существенных функций ЗУ, приведённых в табл. 5.1.

Таблица 5.1

Функции ЗУ электроустановок

№№ п/п	Наименование функции
1	Защита от напряжений прикосновения ( $U_{пр}$ ) и шага ( $U_{ш}$ ) при повреждении изоляции
2	Обеспечение действия релейной защиты от замыканий на землю
3	Защита изоляции низковольтных цепей и оборудования
4	Защита надземного оборудования и коммуникаций от токовых перегрузок
5	Обеспечение действия защит от перенапряжений
6	Снижение электромагнитных влияний на вторичные цепи
7	Отвод в землю токов молнии
8	Отвод в землю рабочих токов (токов несимметрии, токов КЗ)
9	Обеспечение взрыво- и пожаробезопасности
10	Стабилизация потенциалов проводов относительно земли и защита от статического электричества

По п.1 разъяснения обычно даются в курсах, по технике безопасности и промышленной санитарии.

Функция по п.2 — одна из рабочих функций ЗУ; она выполняется чаще всех в электроустановках (ЭУ) с  $U_{ном} > 1000$  В с заземлённой нейтралью. В сетях низкого напряжения (НН) эту функцию обычно выполняет зануление.

Функция 3 становится всё более значимой с ростом токов замыкания на землю и размеров ЗУ. Опасное для изоляции сетей НН  $U_m$  может возникнуть, кроме того, при стекании тока молнии, работе защитных аппаратов (РВ и ОПН) или при набегании волн перенапряжений на оборудование с большой ёмкостью относительно ЗУ.

Важнейшей и во многом определяющей показателя работоспособности ЗУ (п.4) функцией является защита подземного оборудования и коммуникаций от разрушения токами к.з. в сети. Работоспособным можно считать только ЗУ, в котором, при протекании токов не происходит повреждения естественных элементов. Это можно обеспечить таким конструктивным выполнением системы, при котором заданные нагружающие токи, протекающие по коммуникациям и конструкциям и стекающие с них в землю, не превышали бы с большой вероятностью предельные токи для элементов.

Общеизвестна функция обеспечения действия защитных аппаратов (п.5) при грозовых и внутренних перенапряжениях. Однако требуется уточнение как нормативного значения возникающего на ЗУ напряжения, так и метода расчёта этой величины.

Большие уровни продольных токов, протекающих по естественным и искусственным заземлителям, требуют обеспечения новой функции — снижения уровня электромагнитных влияний на вторичное оборудование (п.6). Это связано также с повышением чувствительности этого оборудования к электромагнитным полям. Снижение уровня электромагнитных влияний может быть достигнуто изменением конструкции ЗУ и перераспределением токов в ней. Появление функции по п.6 знаменует собой качественный скачок в расширении назначения заземления. Стало возможным говорить не только о рабочем и защитном заземлении, но и о заземлении помехозащитном.

Важное значение имеет также защита оболочек кабелей от перегрева наведёнными и гальваническими токами (п. 7).

Функция по п. 8 — отвод в грунт рабочих токов — выдвигается на первый план, когда земля используется для передачи электроэнергии, например в схеме, для переменного тока по системе ДПЗ (два провода-земля), а также по схеме для постоянного тока с обратным земляным проводом. В первом случае на стабильность характеристик ЗУ оказывают влияние только параметры теплового поля токов в грунте. Второй случай более сложен, поскольку, кроме тепловых явлений, здесь следует учитывать также и такие физико-химические явления, как реакции на электроде и электро-осмос.

В ЗУ крупных электроустановок естественным образом входят различного рода трубопроводы, в том числе с горючими и взрывоопасными газами. Действительную надёжность ЗУ в этом случае должно обеспечивать не запрещение использовать указанные элементы ЗУ, а нормирование сопротивления контактов на коммуникациях, при котором выделяющаяся мощность от протекающих токов не вызывала бы взрыва и пожара (п. 9).

Функция по п. 10 — это назначение ЗУ, не играющее пока существенной роли в собственно электроустановках, поскольку их выполнение практически всегда обеспечивается без дополнительных затрат на сооружение и контроль ЗУ.

Таким образом, ЗУ в настоящее время выполняют защитные, молниезащитные, рабочие и помехозащитные функции. Одной из задач ЗУ яв-

ляется отвод электрического тока в землю в нормальных и аварийных режимах без превышения установленных пределов по токам, напряжениям, температурам и т. п. для оборудования и электрических сетей и безопасных воздействий на непрерывность работы электроустановок.

ЗУ подразделяются на ЗУ электроустановок до 1000 В и ЗУ электроустановок выше 1000 В. Распространённость электроустановок НН, возможность опасного воздействия их на большое число людей, в том числе и в первую очередь на не имеющих отношения к электротехнике, выдвигают на первый план защитные функции ЗУ ЭУ НН.

Полифункциональность ЗУ электроустановок ВН и большие токи к.з. на землю приводят к нормированию нескольких их параметров. К ним относятся напряжение на ЗУ,  $U_{пр}$ ,  $U_{ш}$ , температура ЗУ, сечение проводников ЗУ, величина тока в естественных заземлителях. Кроме того, здесь нормируются значения сопротивления заземления.

### 5.3. Задачи защитного заземления

Для человека, находящегося вблизи действующей электроустановки, главную опасность представляют величина и длительность тока, протекающего через его тело при соприкосновении с частями электроустановки. Этот ток также зависит от разности потенциалов, приложенных к телу человека, мощности источника, рода тока и сопротивления тела человека (табл. 5.2).

Для защиты человека от появления опасных потенциалов на металлических конструкциях электрооборудования при повреждении изоляции (опоры, корпуса трансформаторов, аппаратов, электрических машин и т. п.) применяют защитное заземление. Однако такое заземление само по себе не исключает возможности поражения человека. При однополюсных замыканиях на землю через заземляющие устройства течёт аварийный ток, и возникают напряжение прикосновения и шаговое напряжение, которые могут быть опасными для человека.

В первом приближении, если пренебречь влиянием прикосновения человека на ток через заземляющее устройство, то напряжения прикосновения  $U_{пр}$  и шага  $U_{ш}$  можно определить по эквивалентным схемам на рис. 5.3. В этих схемах роль эквивалентных э.д.с.  $E_{пр}$  и  $E_{ш}$  играют разности потенциалов между точками прикосновения человека, когда отсутствует шунтирующее влияние сопротивления его тела, равное  $R_T \approx 1000$  Ом. Если пренебречь также взаимным экранированием ступней, что даёт некоторое завышение опасности воздействия, то  $U_{пр}$  и  $U_{ш}$  можно определить по формулам:

Таблица 5.2  
Допустимые токи через тело человека  $I_t$  и напряжение прикосновения в зависимости от длительности воздействия

Вид электрооборудования	Вид воздействия	Единица измерения	Продолжительность воздействия														
			0,01÷0,08	0,1	0,2	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,8	0,9	1,0	>1,0			
Производственные установок с $U_{\text{раб}} < 1000$ В, а также с $U_{\text{раб}} \geq 1000$ В в сети с изолированной нейтралью	Синусоидальное напряжение 50 Гц	$U_{\text{пр}}, \text{В}$	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	36			
	Синусоидальное напряжение 400 Гц	$I_{\text{ч}}, \text{мА}$	650	500	250	165	125	100	85	70	65	55	50	6			
		$U_{\text{пр}}, \text{В}$	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	36			
		$I_{\text{ч}}, \text{мА}$	650	500	500	330	250	200	170	140	130	110	100	8			
Производственные установок с $U_{\text{раб}} > 1000$ В в сети с заземленной нейтралью	Постоянное напряжение	$U_{\text{пр}}, \text{В}$	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	40			
		$I_{\text{ч}}, \text{мА}$	650	500	400	350	300	250	240	230	220	210	200	15			
Бытовые электроустановки	Синусоидальное напряжение 50 Гц	$U_{\text{пр}}, \text{В}$	-	500	400	-	-	200	-	130	-	-	100	-			
		$I_{\text{ч}}, \text{мА}$	220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25	12			
	-//-		220	200	100	70	55	50	40	35	30	27	25	2			

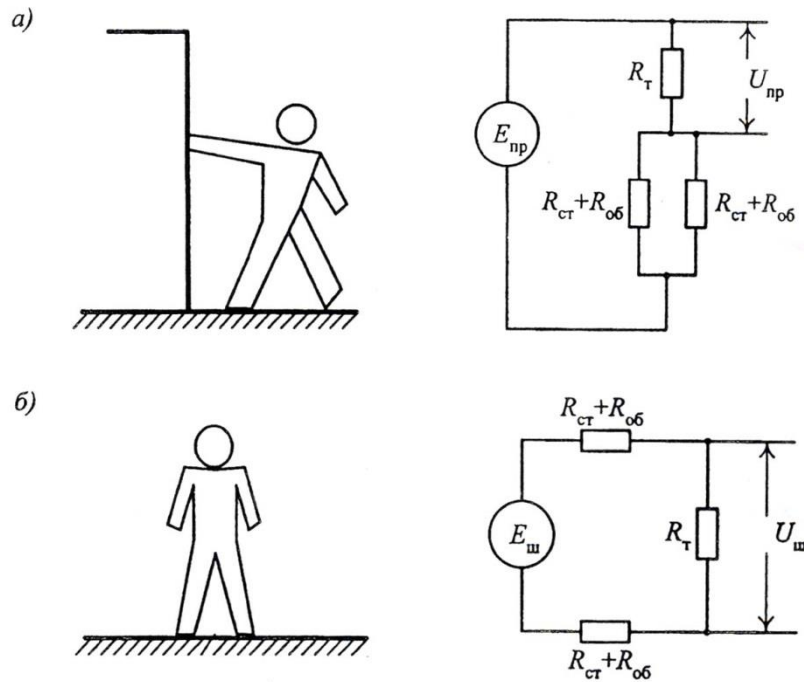


Рис. 5.3. Эквивалентные схемы для определения  $U_{нр}$  (а) и  $U_{ш}$  (б)

$$U_{нр} = \frac{E_{нр} R_{т}}{R_{ст}/2 + R_{т} + R_{об}/2}; \quad (5.1)$$

$$U_{ш} = \frac{E_{ш} R_{т}}{2R_{ст} + R_{т} + 2R_{об}}.$$

В этих формулах  $R_{ст}$  и  $R_{об}$  - сопротивления ступни и обуви соответственно.

По данным литературы, при оценке  $R_{ст}$  ступни могут быть заменены круглыми металлическими пластинами радиусом  $r_{ст} = 8$  см, находящимися на грунте с удельным сопротивлением верхних слоев земли  $\rho_{зп}$ :

$$R_{ст} = \frac{\rho_{зп}}{4r_{ст}} = \frac{\rho_{зп}}{4 \cdot 8 \cdot 10^{-2}} \approx 3\rho_{зп}.$$

Поэтому формулы (5.1) приобретают вид:

$$U_{нр} = \frac{E_{нр} R_{т}}{1,5\rho_{зп} + R_{т} + R_{об}/2}; \quad (5.2)$$

$$U_{ш} = \frac{E_{ш} R_{т}}{6\rho_{зп} + R_{т} + 2R_{об}}.$$

Как видно из формул (5.1) и (5.2), снижение  $U_{нр}$  и  $U_{ш}$  до безопасной величины может быть обеспечено путём снижения  $E_{нр}$  и  $E_{ш}$ , либо увеличением  $R_{ст}$ . Применение специальных изолирующих ботов значительно повышает безопасность. При сырой погоде с некоторым запасом принимаем  $R_{об} \approx 0$  и поэтому соотношения (5.1) и (5.2) приобретают вид:

$$U_{\text{пр}} = \frac{E_{\text{пр}} R_{\text{T}}}{1,5\rho_{\text{зп}} + R_{\text{T}}}; \quad U_{\text{ш}} = \frac{E_{\text{ш}} R_{\text{T}}}{6\rho_{\text{зп}} + R_{\text{T}}}. \quad (5.3)$$

Таким образом, для снижения  $U_{\text{пр}}$  и  $U_{\text{ш}}$  до безопасных величин необходимо снизить  $E_{\text{пр}}$  и  $E_{\text{ш}}$ , а также  $\rho_{\text{зп}}$ . Искусственное уменьшение  $E_{\text{пр}}$  и  $E_{\text{ш}}$  достигается путём обеспечения небольших величин сопротивления заземления электроустановки, которое, как будет показано ниже, зависит от эквивалентного удельного сопротивления грунта и конструкции заземлителя.

Уменьшение сопротивления заземления достигается увеличением количества горизонтальных и вертикальных металлических элементов, закладываемых в грунт, причём целесообразно располагать эти элементы в виде сетки со стороны ячейки порядка нескольких метров, что улучшает распределение потенциала точек на поверхности земли и снижает  $E_{\text{пр}}$  и  $E_{\text{ш}}$ . Снижение вероятности поражения персонала электрическим током обеспечивает также укладка в местах установки оборудования выравнивающих проводников в виде частой сетки, присоединённой к основному контуру заземления электроустановки. Кроме того, в местах установки электрооборудования следует посыпать площадку плохопроводящим покрытием (слой щебня, щебня с асфальтом и т. п.), что способствует увеличению эквивалентного сопротивления верхних слоев земли  $\rho_{\text{зп}}$  и уменьшению тока через тело человека.

Заземляющие устройства электроустановок выше 1 кВ сети с эффективно заземлённой нейтралью следует выполнять с соблюдением требований либо к их сопротивлению, либо к напряжению прикосновения, а также с соблюдением требований к конструктивному выполнению и ограничению напряжения на заземляющем устройстве.

Напряжение на заземляющем устройстве при стекании с него тока заземления на землю не должно превышать 10 кВ. Напряжение выше 10 кВ допускается на заземляющих устройствах, с которых исключён вынос потенциалов за пределы зданий и внешних ограждений электроустановки. При напряжениях на заземляющем устройстве 5-10 кВ должны быть предусмотрены меры по защите изоляции отходящих кабелей связи и телемеханики и по предотвращению выноса опасных потенциалов за пределы электроустановки.

Заземляющее устройство, которое выполняется с соблюдением требований к его сопротивлению, должно иметь в любое время года сопротивление не более 0,5 Ом с учётом сопротивления естественных заземлителей.

В целях выравнивания электрического потенциала и присоединения электрооборудования к заземлителю на территории, занятой оборудованием, следует прокладывать продольные и поперечные горизонтальные заземлители и соединять их между собой в заземляющую сетку.

Продольные заземлители должны быть проложены вдоль осей электрооборудования со стороны обслуживания на глубине 0,5-0,7 м от поверхности земли на расстоянии 0,8-1,0 м от фундаментов или оснований оборудования. Допускается увеличение расстояний от фундаментов или оснований оборудования до 1,5 м с прокладкой одного заземлителя для двух рядов обо-



рудования, если стороны обслуживания обращены одна к другой, а расстояние между фундаментами или основаниями двух рядов не превышает 3,0 м.

Поперечные заземлители следует прокладывать в удобных местах между оборудованием на глубине 0,5-0,7 м от поверхности земли. Расстояние между ними рекомендуется принимать увеличивающейся от периферии к центру заземляющей сетки. При этом первое и последующие расстояния, начиная от периферии, не должны превышать соответственно 4,0; 5,0; 6,0; 7,5; 9,0; 11,0; 13,5; 16,0 и 20,0 м. Размеры ячеек заземляющей сетки, примыкающих к местам присоединения нейтралей силовых трансформаторов короткозамыкателей к заземляющему устройству, не должны превышать 6х6 м<sup>2</sup>.

Горизонтальные заземлители следует прокладывать по краю территории, занимаемой заземляющим устройством так, чтобы они в совокупности образовывали замкнутый контур.

Если контур заземляющего устройства располагается в пределах внешнего ограждения электроустановки, то у входов и въездов на её территорию следует выравнивать потенциал путём установки двух вертикальных заземлителей у внешнего горизонтального заземлителя напротив входов и въездов. Вертикальные заземлители должны быть длиной 3-5 м, а расстояние между ними равно ширине входа или въезда.

Заземляющее устройство, которое выполняется с соблюдением требований, предъявляемых к напряжению прикосновения, должно обеспечивать в любое время года при стекании с него тока замыкания на землю значения напряжений прикосновения, не превышающие нормированных. Сопротивление заземляющего устройства определяется по допустимому напряжению на заземляющем устройстве и току замыкания на землю.

При определении допустимого напряжения прикосновения за время воздействия следует принимать сумму времени действия защиты и времени отключения выключателя. Если определяется время воздействия на персонал, производящий оперативные переключения на своих рабочих местах, то следует принимать время действия резервной защиты, в остальных случаях — основной защиты.

Размещение продольных и поперечных горизонтальных заземлителей должно определяться требованиями ограничения напряжений прикосновения до нормированных значений и удобством присоединения заземляемого оборудования. Расстояния между продольными и поперечными горизонтальными искусственными заземлителями не должно превышать 30м, а глубина их заложения в грунт должна быть не менее 0,3 м. У рабочих мест допускается прокладка заземлителей на меньшей глубине, если необходимость этого подтверждается расчётом, а само выполнение не снижает удобства обслуживания электроустановки и срока службы заземлителей. Для снижения напряжения прикосновения у рабочих мест в обоснованных случаях может быть выполнена подсыпка щебня слоем толщиной 0,1-0,2 м.

При выполнении заземляющего устройства с соблюдением требований, предъявляемых к его сопротивлению или к напряжению прикосновения, дополнительно следует: заземляющие проводники, присоединяющие оборудование или конструкции к заземлителю, в земле прокладывать на глубине не менее 0,3 м; вблизи мест расположения заземляемых нейтралей силовых трансформаторов, короткозамыкателей прокладывать продольные и поперечные горизонтальные заземлители (в четырёх направлениях).

При выходе заземляющего устройства за пределы ограждения электроустановки горизонтальные заземлители, находящиеся вне территории электроустановки, следует прокладывать на глубине не менее 1 м. Внешний контур заземляющего устройства в этом случае рекомендуется выполнять в виде многоугольника с тупыми или скруглёнными углами.

Внешнюю ограду электроустановок не рекомендуется присоединять к заземляющему устройству. Если от электроустановки отходят ВЛ 110 кВ и выше, то ограду заземлить с помощью вертикальных заземлителей длиной 2-3 м, установленных у стоек ограды. Установка таких заземлителей не требуется для ограды с металлическими стойками и с теми стойками из железобетона, арматура которых электрически соединена с металлическими звеньями ограды.

Для исключения электрической связи внешней ограды с заземляющим устройством расстояние от ограды до элементов заземляющего устройства, расположенных вдоль неё с внутренней, с внешней или с обеих сторон, должно быть не менее 2 м. Выходящие за пределы ограды горизонтальные заземлители, трубы и кабели с металлической оболочкой и другие металлические коммуникации должны быть продолжены посередине между стойками ограды на глубине не менее 0,5 м. В местах примыкания внешней ограды к зданиям и сооружениям, а также в местах примыкания к внешней ограде внутренних металлических ограждений должны быть выполнены кирпичные или деревянные вставки длиной не менее 1 м.

Не следует устанавливать на внешней ограде электроприёмники до 1кВ, которые питаются непосредственно от понизительных трансформаторов, расположенных на территории электроустановки. При размещении электроприёмников на внешней ограде их питание должно осуществляться через разделительные трансформаторы. Линия, соединяющая вторичную обмотку разделительного трансформатора с электроприёмником, расположенным на ограде, должна быть изолирована от земли на расчётное значение напряжения на заземляющем устройстве.

Если выполнение хотя бы одного из указанных мероприятий невозможно, металлические части ограды следует присоединить к заземляющему устройству и выровнять потенциалы так, чтобы напряжение прикосновения с внешней и внутренней сторон ограды не превышало допустимых значений. При выполнении заземляющего устройства по допустимому сопротивлению должен быть проложен горизонтальный заземлитель с внешней стороны

ограды на расстоянии 1 м от неё и на глубине 1 м. Этот заземлитель следует присоединять к заземляющему устройству не менее чем в четырёх точках.

По требованию ГОСТа и ПУЭ сопротивление заземляющего устройства независимо от сезона года не должно превышать значений, приведённых в таблице 5.3.

В заключение отметим, что при обеспечении допустимого напряжения прикосновения и тока через тело человека в качестве расчётного времени воздействия принимается сумма времени действия релейной защиты и полного времени отключения выключателя, автомата или других коммутационных аппаратов.

Таблица 5.3

Допустимое сопротивление  $R_3$  (Ом) при протекании тока промышленной частоты

Объект	Величина $\rho_3$ (Ом·м)				
	До до 100	100-500	500-1000	1000-5000	более 1000
Подстанции 110 кВ и выше	0,5	0,5-0,75	0,75-1,1	1,1-3,7	$0,5(0,87 + \frac{\rho_3}{770})$
Подстанции 3-35 кВ	$250/I_3$ , но не более 10 Ом	$\frac{250}{I_3} \div \frac{375}{I_3}$	$\frac{375}{I_3} \div \frac{550}{I_3}$	$\frac{550}{I_3} \div \frac{1850}{I_3}$	$\frac{250}{I_3} (0,87 + \frac{\rho_3}{770})$
Опоры линии	$\leq 10$	$\leq 15$	$\leq 20$	$\leq 30$	$\leq 6 \cdot 10^{-3} \cdot \rho_3$
Отдельно стоящие молниеотводы	10-15				
Стержневые молниеотводы, установленные на порталах	4-5				

Примечания. 1.  $I_3$  — наибольший ток, протекающий через заземляющее устройство.

2. Если имеется связь с ЗУ установки напряжением до 1000 В, то  $R_3$ , уменьшается в два раза.

#### 5.4. Правила эксплуатации заземляющих устройств

При эксплуатации заземляющих устройств коррозия, обрывы заземляющих проводников и другие причины могут привести к резкому увеличению сопротивления заземления. Оно может сопровождаться человеческими жертвами и ухудшением технических характеристик и надёжности работы электротехнического оборудования. Рассмотрим некоторые эксплуатационные требования ПУЭ к заземляющим устройствам.

При сдаче в эксплуатацию заземляющих устройств электроустановок после монтажа должны быть представлены протоколы приёмо-сдаточных испытаний этих устройств. Испытания должны производиться в соответствии с требованиями действующих «Норм испытания электрооборудования», утверждённых Главтехуправлением Минтопэнерго.

Каждый элемент установки, подлежащий заземлению, должен быть присоединён к заземлителю или к заземляющей магистрали посредством отдельного заземляющего проводника. Последовательное включение в заземляющий проводник нескольких частей установки запрещается. Это вызвано тем, что при изъятии какого-либо элемента установки для его ремонта или замены произойдёт разрыв цепи заземления, вследствие чего один или несколько элементов установки окажутся незаземлёнными.

Заземление или зануление оборудования, подвергающегося частично-му демонтажу или установленному на движущихся частях, подверженных сотрясениям, вибрациям, должно выполняться гибкими проводами.

Способы присоединения заземляющих проводников к заземляемым конструкциям, корпусам аппаратов, машин, к заземлителям, а также способы соединения заземляющих проводников между собой должны обеспечивать надёжный контакт. Неудовлетворительное соединение может привести к нарушению функций, выполняемых устройством. Наибольшую надёжность соединения обеспечивает сварка. Болтовое соединение применяется только в тех местах, где необходимо отсоединение от заземляющего устройства, например за период ремонта или испытания.

Заземляющие проводники должны быть предохранены от коррозии, причём такая защита должна применяться не только для открыто проложенных заземляющих проводников, но и для заземляющих проводников, проложенных скрыто. В местах с особо агрессивной средой для проводников, проложенных скрыто, в качестве защиты от коррозии могут быть применены защитные оболочки. Для открыто проложенных проводников в качестве защиты от коррозии применяется окраска, одновременно используемая как отличительная.

Присоединение сварочных агрегатов и других передвижных электроустановок к заземляющим проводникам допускается при их достаточном сечении. При использовании заземляющих проводников недостаточного сечения, например для питания сварочных агрегатов, с большими токами, могут иметь место перегорание заземляющих проводников, значительное падение напряжения в цепи заземляющего устройства и появление напряжения по отношению к земле на заземлённых частях электрооборудования. Это напряжение, как правило, не опасно, но может служить причиной неприятных ощущений у работающего. Кроме того, использование заземляющих проводников распределительного устройства (РУ) в качестве обратного рабочего провода для сварочных агрегатов и других передвижных установок может привести к ответвлению тока на металлические оболочки близлежащих контрольных кабелей, их повреждению и ложной работе релейной защиты. Ложная работа релейной защиты может быть обусловлена и появлением разности потенциалов между заземлёнными точками цепей защит при работе сварочных агрегатов и других передвижных установок.

Для контроля заземляющего устройства должны проводиться измерения его сопротивления и не реже одного раза в десять лет выборочная про-

верка со вскрытием грунта для осмотра элементов заземления, проверка наличия и состояния цепей между заземлителями и заземляемыми элементами, соединений естественных заземлителей с заземляющим устройством.

Измерение сопротивления заземляющих устройств (с этой целью применяются различные приборы, например прибор МС-8) должно проводиться:

- после монтажа, переустройства и капитального ремонта этих устройств электростанций, подстанций и линий электропередачи;
- при обнаружении на тросовых опорах ВЛ 110 кВ и выше следов перекрытий или разрушений изоляторов электрической дугой;
- на подстанциях 35 кВ и ниже открытого типа — не реже одного раза в десять лет; в сетях 35 кВ и ниже у опор с разрядниками, искровыми промежутками и разъединителями — не реже одного раза в пять лет; выборочно у 2% железобетонных и металлических опор в населённой местности, на участках ВЛ с наиболее агрессивными, оползневыми, выдуваемыми или плохо проводящими грунтами — не реже одного раза в десять лет. Все перечисленные измерения должны проводиться в периоды наибольшего просыхания грунта.

### **5.5. Методы измерения удельного сопротивления грунта**

Основным параметром заземляющего устройства (ЗУ) является его сопротивление растеканию, равное отношению напряжения на заземлителе к току, стекающему с заземлителя на землю. Полное сопротивление ЗУ складывается из сопротивления растеканию  $R_{\Sigma}$  и сопротивления заземляющих проводников. При протекании тока промышленной частоты практически можно пренебречь индуктивным и активным падением напряжения вдоль металлических соединительных проводников небольшой протяжённости. Величина  $R_{\Sigma}$  зависит от конструкции, геометрических размеров и удельного сопротивления грунта, в котором находится заземлитель.

Реальный грунт представляет собой сложное в электрическом отношении пространство. По данным грунтоведения и геофизики, его электропроводность зависит от влажности, температуры, химического и минералогического составов, пористости, формы частиц и т. д. Все эти свойства, обусловленные морфологией и геологией грунта, изменяются по горизонтали и вертикали, качественно показывая неизбежность такого же изменения электрического сопротивления грунта.

В соответствии с современными представлениями электропроводность грунтов связана с зарядом и подвижностью ионов электролита, находящегося в порах грунта. Электропроводность твёрдых частиц грунта чрезвычайно мала, и ею можно пренебречь. Твёрдая фаза грунта поглощает на поверхности частиц отрицательные ионы из грунтового раствора, оставляя в растворах избыток положительных ионов и образуя двойной электрический слой. Положительная, диффузионная часть двойного слоя может двигаться под действи-

ем электрического поля. Эта подвижность избыточного объёмного заряда обуславливает составляющую электропроводности грунта, называемую поверхностной или электроосмотической. Она тем больше, чем больше дисперсность частиц фунта. Суммарный заряд ионов диффузной части оценивается порядка 1 Кл на 1 м<sup>2</sup> поверхности. Соответственно, если у песков электроосмотическая составляющая практически отсутствует, то для глин удельная проводимость определяется, главным образом, движением заряда диффузной части двойного слоя.

Таким образом, в общем случае удельная проводимость грунта  $\gamma_r$  определяется как

$$\gamma_r = \gamma_{эл} + \gamma_{ос},$$

где  $\gamma_{эл}$  и  $\gamma_{ос}$  — электролитическая и осмотическая составляющие соответственно

$$\gamma_{эл} = \gamma_{вл} \frac{2v_{вл}}{3 - v_{вл}}; \quad \gamma_{ос} = \frac{mK_{э}\sigma_{уд}S_{уд}d_{п}}{v_{вл}},$$

где  $\gamma_{вл}$  — удельная проводимость влаги в порах грунта;

$v_{вл}$  — количество влаги в грунте в относительных единицах;

$m$  и  $K_{э}$  — коэффициенты пропорциональности;

$\sigma_{уд}$  — заряд диффузной части двойного слоя на единице поверхности;

$S_{уд}$  — поверхность частиц грунта, составляющих единицу его массы;

$d_{п}$  — объёмная плотность грунта при заданной влажности.

Удельное сопротивление грунта зависит также от концентрации солей и от напряжённости поля  $E$ . При возрастании  $E$  начинает повышаться в первую очередь электроосмотическая составляющая электропроводности.

Рассмотренные физические явления показывают, что разнообразие геологического состояния грунта по глубине и различные его параметры неизменно должны обуславливать и различие в электрохимических характеристиках разных слоев грунта на площадке под заземлитель. Отсюда вытекает важность предпроектных геоэлектрических изысканий.

В высоковольтной технике чаще применяется не термин «удельная проводимость грунта», а термин «удельное сопротивление», равное  $\rho_3 = 1/\gamma_3$ .

Удельное сопротивление грунта  $\rho_3$  зависит от состава, влажности и температуры почвы, поэтому оно подвержено сезонным колебаниям. Наиболее стабильное значение  $R_{г}$  имеют заземлители, находящиеся ниже уровня грунтовых вод и глубины промерзания.

При ориентировочных оценках сопротивления растеканию можно воспользоваться средними значениями удельных сопротивлений различных грунтов, приведённых в табл. 5.4.

При более точных расчётах сопротивления растеканию заземлителей удельное сопротивление грунтов определяют специальными методами непосредственных измерений, например методом вертикального электрического зондирования (ВЭЗ). Анализ электрических параметров земли проводят путём интерпретации (истолкования) кривых ВЭЗ. Для этого экспериментально по-

лученные кривые сравнивают с набором стандартных кривых, приведённых в специальной литературе, и делают заключение об электрической структуре земли и находят эквивалентное удельное сопротивление грунта.

Таблица 5.4

Характеристики грунтов

Тип грунта	Пределы изменения , Ом·м
Морская вода	1-10
Речная вода	10-50
Торф, чернозём, глина	20-60
Лесс, супеси, суглинок	100-300
Песок, песок с галькой	300-500
Сухие пески	500-1000
Сухой песок с глубиной пласта более 10 м, скальный грунт	10000
Мёрзлый или многолетнемёрзлый грунт	10000-100000

Сущность ВЭЗ сводится к следующему. В землю с помощью двух электродов А и В от источника питания подаётся электрический ток (рис. 5.4). Тогда электроды могут рассматриваться как точечные, начиная с расстояний, приблизительно в пять раз, превышающих протяжённость их заглублённой части.

Ток протекает от одного точечного электрода (А) к другому (В) и пронизывает различные слои земли. При этом ближе к электродам и к поверхности земли плотность тока возрастает, а с глубиной она уменьшается и стремится к нулю. Линии тока и эквипотенциальные поверхности показаны на рис. 5.4. Если поместить в пределах поля два электрода М и N, то разность потенциалов между ними  $\Delta U$  будет связана с током I и удельным сопротивлением  $\rho_3$  формулой:

$$\rho_3 = K \frac{\Delta U}{I} ,$$

где K — коэффициент, зависящий в случае однородности грунта только от взаимного расположения электродов и имеющий размерность длины. Величины K и  $\rho_3$  не зависят от контактных или переходных сопротивлений электродов, но результаты измерений могут быть искажены из-за наличия сторонних полей, что необходимо учитывать при полевых измерениях. Если грунт неоднороден, то путём измерений I и  $\Delta U$  также можно определить  $\rho_3$ . Однако в этом случае коэффициент K будет зависеть от характера залегания пород, удельных сопротивлений этих пород, разноса электродов А,В,М и N. Найденное таким образом  $\rho_3$  принято называть кажущимся удельным сопротивлением  $\rho_k$ .

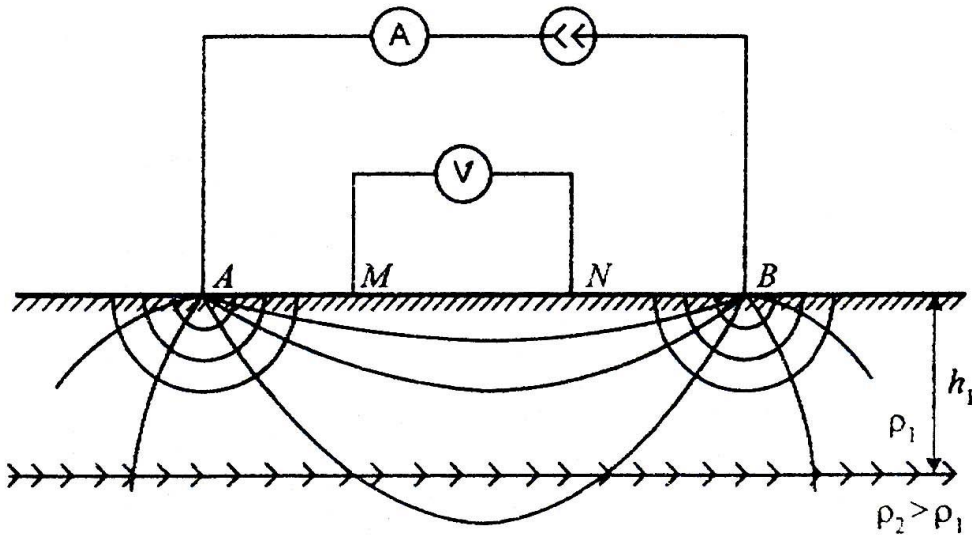


Рис. 5.4. Расположение электродов при ВЭЗ.

В однородной среде сопротивление  $\rho_k$  остаётся одним и тем же при любых расстояниях между электродами. В неоднородной среде  $\rho_k$  существенно зависит от их расположения. Зависимость  $\rho_k$  от расстояния между электродами называется кривой ВЭЗ и позволяет судить о строении исследуемого грунта.

Для измерения  $\rho_3$ , в энергосистемах широкое распространение получили различные приборы. С их помощью измерения производятся по симметричной (рис. 5.5, а) или несимметричной (рис. 5.5, б) схемам.

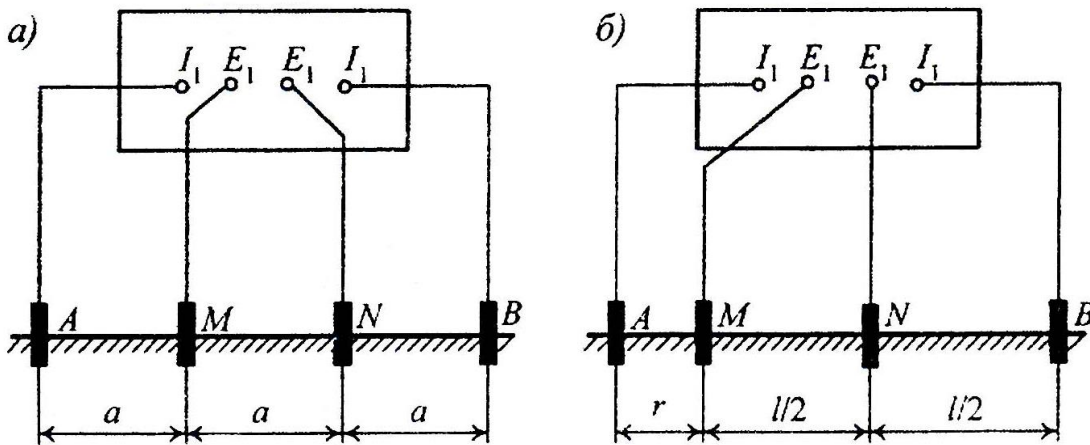


Рис. 5.5. Симметричная (а) и несимметричная (б) схемы измерения удельного сопротивления грунта методом ВЭЗ.

Для симметричной схемы:

$$U_N = \frac{I\rho_3}{2\pi a} - \frac{I\rho_3}{4\pi a} = \frac{I\rho_3}{4\pi a}; \quad U_M = \frac{I\rho_3}{4\pi a} - \frac{I\rho_3}{2\pi a} = -\frac{I\rho_3}{4\pi a}, \quad \text{откуда} \quad \rho_3 = \frac{U_N - U_M}{I} K = \frac{\Delta U}{I} 2\pi a.$$

Таким образом, для симметричной схемы  $K = 2\pi a$ . Аналогично для несимметричной схемы:

$$K = 2\pi \cdot r [1 + r / (2\ell - r)].$$



## 5.6. Расчет сопротивления растеканию ЗУ

При известной величине  $\rho_3$  сопротивление растеканию  $R_{\sim}$  рассчитывают различными путями, например методами электростатической аналогии, зеркального изображения и средних потенциалов. Здесь лишь приведены формулы для определения  $R_{\sim}$  для ряда вертикальных, горизонтальных и смешанных заземлителей.

Для одиночного вертикального заземлителя длиной  $\ell$  и радиусом  $r_0$ , верхний конец которого находится на уровне поверхности земли, сопротивление растеканию равно:

$$R_{\sim} = \frac{\rho_3}{2\pi\ell} \ln \frac{\ell}{r_0}. \quad (5.4)$$

Если у одиночного вертикального заземлителя длиной  $\ell$  и радиусом  $r_0$  верхний конец находится на глубине  $h$  от поверхности земли,  $R_{\sim}$  определяют по формуле:

$$R_{\sim} = \frac{\rho_3}{\pi\ell} \ln \frac{\ell}{\sqrt{2hr_0}}. \quad (5.5)$$

При сечении, отличном от цилиндрического, в формулах (5.4) и (5.5) необходимо подставлять эквивалентное значение  $r_0$ : для полосы шириной  $b$  —  $r_0 = 0,5b$ ; для уголка со стороной  $b$  —  $r_0 = 0,95b$ .

Сопротивление нескольких одиночных вертикальных заземлителей:

$$R_{\sim} = \frac{\rho_3}{2\pi n\ell} \left( \ln \frac{2\ell}{r_0} + \frac{1}{2} \ln \frac{2h+\ell}{4h+\ell} + A_B \right),$$

где  $n$  — число заземлителей;  $A_B$  — коэффициент, учитывающий эффект взаимного экранирования вертикальных заземлителей (табл.5.5).

Таблица 5.5

Значения  $A_B$  для вертикальных заземлителей

Расположение заземлителей	$n$	$A_B$
Рис. 5.6,а	2	0,8
Рис. 5.6,б	4	1,6
Рис. 5.6,в	6	2,6
Рис. 5.6,г	4	2,5
Рис. 5.6,д	6	3,3
Рис. 5.6,е	6	3,1

Для расчёта сопротивления растеканию сложных разветвлённых горизонтальных заземлителей можно пользоваться приближённой формулой

$$R_{\sim} = \frac{\rho_3}{2\pi L} \left( \ln \frac{L^2}{2r_0 h} + A_{\Gamma} \right),$$

где  $L$  — суммарная длина проводников горизонтального заземлителя;  $h$  — глубина заложения заземлителей;  $r_0$  — их радиус;  $A_{\Gamma}$  — поправка, учитыва-

ющая взаимное экранирование проводников горизонтального заземлителя (табл. 5.6).

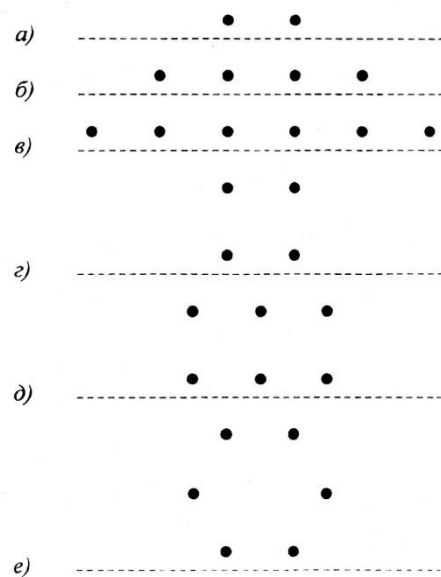


Рис. 5.6. Расположение вертикальных заземлителей.

Таблица 5.6  
Значения  $A_{\Gamma}$  для некоторых видов заземлителей.

Расположение заземлителей	$A_{\Gamma}$	Заземлитель		$A_{\Gamma}$
Рис.5.7 а	0,48	Рис.5.7,ж	$a/b = 1,0$	1,7
			$a/b = 1,5$	1,8
Рис.5.7 б	0,36	Рис.5.7,з	$a/b = 2,0$	1,9
			$a/b = 3,0$	2,1
			$a/b = 4,0$	2,3
			$a/b = 1,0$	3,1
Рис.5.7 в	0,87	Рис.5.7,з	$a/b = 1,5$	3,2
			$a/b = 2,0$	3,3
Рис.5.7, г	2,13	Рис.5.7,з	$a/b = 3,0$	3,3
			$a/b = 4,0$	3,4
Рис.5.7, д	5,27	Рис.5.7,и	$a/b = 1,0$	5,0
			$a/b = 1,5$	5,2
Рис.5.7, е	3,81	Рис.5.7,и	$a/b = 2,0$	5,4
			$a/b = 3,0$	6,0
			$a/b = 4,0$	6,5
			$a/b = 1,0$	5,0

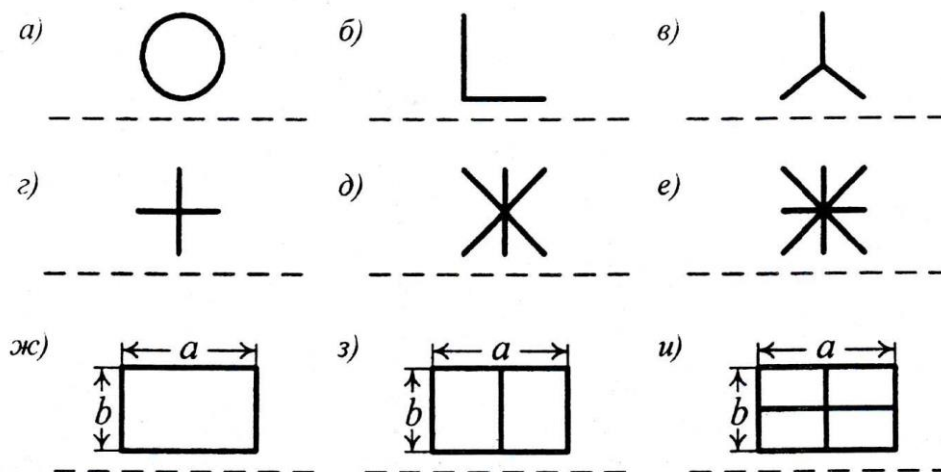


Рис. 5.7. Расположение горизонтальных заземлителей.

Сопротивление растеканию сложного заземлителя, включающего вертикальные и горизонтальные электроды, можно приближённо рассчитать по формуле

$$R_{\sim} = \rho_3 \left( \frac{A_{ГВ}}{\sqrt{S}} + \frac{I}{L + n\ell} \right),$$

где  $L$  — суммарная длина горизонтальных заземляющих электродов полос;  $n, \ell$  — число и длина вертикальных электродов;  $S$  — площадь заземлителя;  $A_{ГВ}$  — коэффициент, значение которого приведено ниже

$\ell/l$	0	0,05	0,1	0,2	0,5
$A_{ГВ}$	0,44	0,4	0,37	0,33	0,26

Более точную величину  $R_{\sim}$  для сложного заземлителя подстанций и станций рассчитывают с помощью ЭВМ.

В ряде случаев в районах с высоким значением удельного сопротивления грунтов целесообразно использовать глубинные заземлители, представляющие собой вертикальные стержни, погруженные до уровня грунтовых вод. Их глубина достигает десятков метров, а по высоте грунт имеет неоднородности (различные слои имеют различные  $\rho_3$ ).

Сопротивление растеканию такого заземлителя может быть определено по формуле

$$R_{\sim} = \frac{\rho_{\text{эк}}}{2\pi} \ln \frac{4\ell}{d},$$

где  $\rho_{\text{эк}}$  — эквивалентное удельное сопротивление грунта,

$$\rho_{\text{эк}} = \frac{l}{\sum_{i=1}^n l_i / \rho_i};$$

$\rho_i$  — удельное сопротивление  $i$ -го слоя;  $l_i$  — мощность (высота)  $i$ -го слоя;

$l = \sum_{i=1}^n l_i$  — длина заземлителя (рис. 5.8).

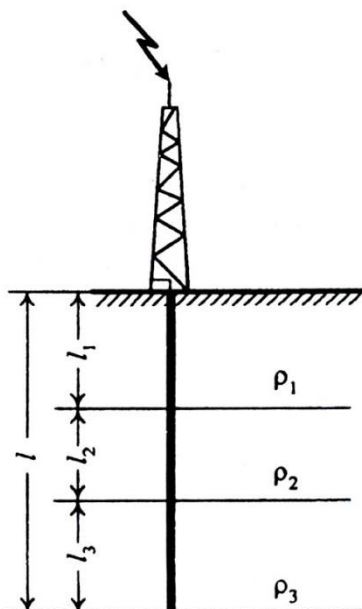


Рис. 5.8. К определению эквивалентного удельного сопротивления многослойного грунта

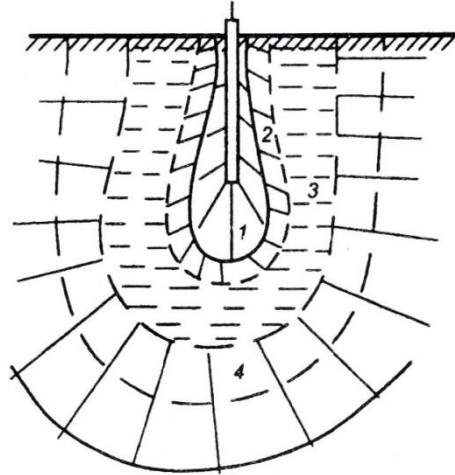
### 5.7. Поведение заземляющих устройств при импульсных токах

Сопротивление заземления при импульсных токах  $R_{\text{и}}$  может быть как больше, так и меньше сопротивления растеканию  $R_{\text{р}}$ . Они связываются соотношением  $R_{\text{и}} = \alpha_{\text{и}} \cdot R_{\text{р}}$ , где  $\alpha_{\text{и}}$  — коэффициент импульса заземлителя.

Величина  $\alpha_{\text{и}}$  зависит от формы кривой протекающего через заземлитель тока, его амплитуды, удельного сопротивления грунта  $\rho_3$  и протяжённости заземлителей. Случай  $\alpha_{\text{и}} < 1$  имеет место при образовании зоны повышенной проводимости грунта вблизи заземлителя при протекании больших токов, случай  $\alpha_{\text{и}} > 1$  — из-за влияния индуктивности протяжённых заземлителей при небольших длинах фронта импульсов. Более подробно объясним эти обстоятельства.

При растекании с заземлителя большого импульсного тока с плотностью  $j$  в грунте с удельным сопротивлением  $\rho_3$  образуется электрическое поле с напряжённостью  $E = j \cdot \rho_3$ . С увеличением  $E$  появляются полупроводниковые свойства грунта, приводящие к снижению  $\rho_3$ , поэтому по мере роста  $j$  в грунте его удельное сопротивление падает. Если плотность тока продолжает нарастать, то  $E$  поля вблизи заземлителя достигает значения пробивной

напряжённости  $E_{пр}$  и возникает искрообразование в грунте. Это существенно снижает падение напряжения вблизи заземлителя. При дальнейшем увеличении искровой разряд переходит в дуговой. Как видно из рис.5.9, вблизи заземлителя, через который протекает большой импульсный ток, возникают четыре зоны: дуговая, искровая, полупроводниковая и «постоянной проводимости». В итоге падает эквивалентное удельное сопротивление грунта, а следовательно, импульсное сопротивление заземлителя.



*Рис. 5.9. Схема процессов в грунте при протекании через заземлитель больших импульсных токов: 1 — дуговая зона; 2 — искровая зона; 3 — полупроводниковая зона; 4 — зона «постоянной проводимости»*

При большой длине заземлителя он может быть замещён схемой, включающей индуктивность  $L$ , активное сопротивление  $R$ , проводимость  $G$  и ёмкость  $C$  на единицу длины. Величина  $R$  значительно меньше сопротивления заземлителя, а ёмкость  $C$  может иметь заметное влияние лишь при высоких значениях удельного сопротивления грунта и весьма кратковременных процессах. При  $\rho_3 < 5000$  Ом·м, даже при импульсах с длиной фронта несколько микросекунд, ёмкость электродов относительно уровня нулевого потенциала  $C$ , и следовательно, ёмкостные токи пренебрежимо малы по сравнению с токами проводимости. В этом случае схема замещения протяжённого заземлителя упрощается (рис. 5.10).

На фронте импульса индуктивность  $L$  заземлителя препятствует проникновению тока к удалённым его участкам, которые практически не влияют на отвод тока в землю. На сравнительно медленном спаде волны распределение напряжения вдоль заземлителя выравнивается, а сопротивление его уменьшается и стремится к значению сопротивления растекания  $R_{\infty}$ . Длительность переходного процесса в заземлителе оценивается постоянной времени  $T = LG\ell^2$ , где  $\ell$  — длина заземлителя.

В заземлителях для отвода тока молнии в землю наибольшее значение имеет величина сопротивления заземления в момент максимума тока молнии  $\tau_{\phi}$ . Если  $\tau_{\phi} \geq T$ , то заземлители можно рассматривать как сосредоточенные.

Если  $\tau_{\phi}$  соизмерима с  $T$ , то в таких заземлителях необходимо учитывать их протяжённость.

При длине заземлителей  $l > 10$  м  $\alpha_{\text{и}}$  можно вычислить с погрешностью не более 10% по формуле:

$$\alpha_{\text{и}} = \sqrt{1500 \cdot l / [(\rho_3 + 320)(I_{\text{max}} + 45)]}.$$

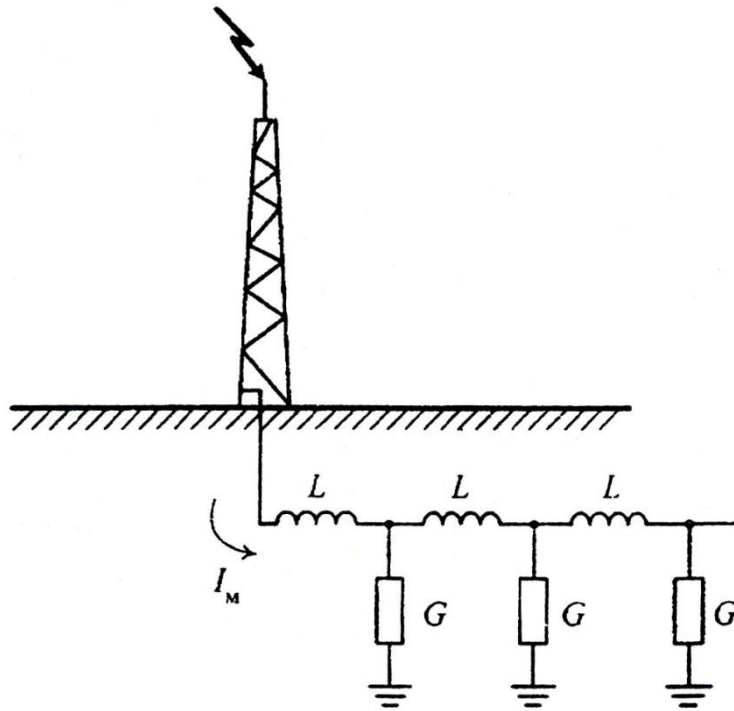


Рис. 5.10. Упрощенная схема замещения протяженного заземлителя.

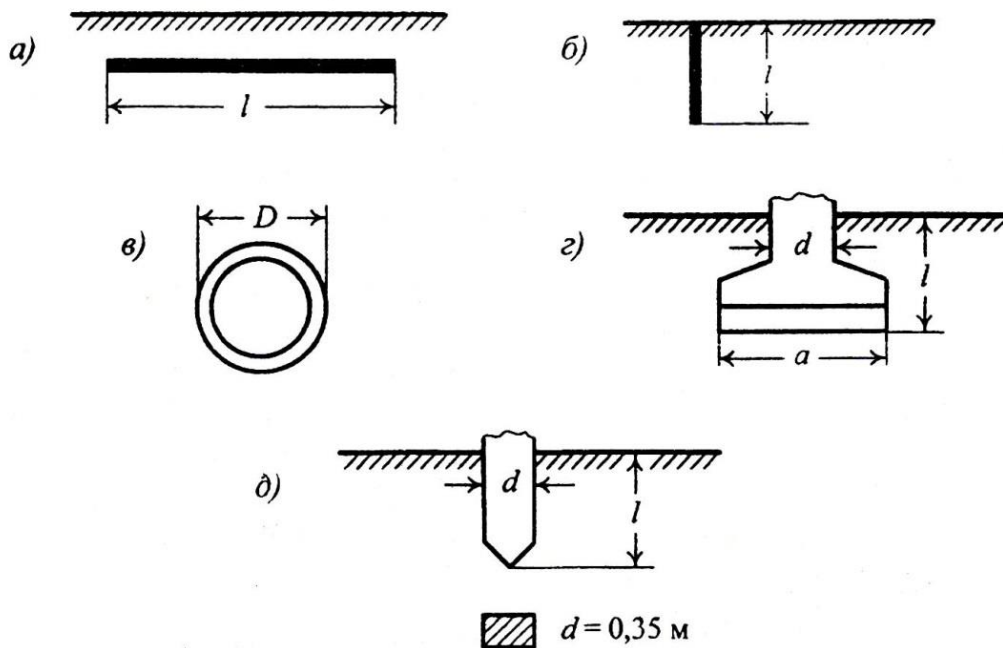


Рис. 5.11. Виды заземлителей

В табл. 5.7 приведены значения  $\alpha_{и}$  для некоторых заземлителей и при амплитудах токов (с длительностью фронта  $\tau_{ф} = 3..6$  мкс).

Таблица 5.7

Значение коэффициента импульса для ЗУ различной конфигурации

Вид заземлителя	Удельное сопротивление грунта, Ом·м	Длина заземлителя (диаметр кольца D), м	$\alpha_{и}$ , при амплитуде тока, кА			
			5	10	20	40
Горизонтальный заземлитель (рис.5.11, а)	100	5	0,8	0,75	0,65	0,50
		10	1,05	1,00	0,90	0,8
		20	1,2	1,15	1,05	0,95
	500	5	0,60	0,55	0,45	0,30
		10	0,80	0,75	0,60	0,45
		20	0,95	0,90	0,75	0,60
	1000	10	0,60	0,55	0,45	0,35
		20	0,80	0,75	0,60	0,50
		40	1,0	0,95	0,85	0,75
60		1,2	1,15	1,10	0,95	
Вертикальный заземлитель (рис.5.11, б)	100	2-3	0,9	0,85	0,75	0,60
	500	2-3	0,7	0,60	0,45	0,30
	1000	2-3	0,55	0,45	0,30	-
Кольцевой заземлитель (рис.5.11, в)	100	4	-	-	0,6	0,45
		8	-	-	0,75	0,65
		12	-	-	0,8	0,7
	500	8	-	-	0,55	0,45
		12	-	-	0,60	0,50
	1000	8	-	-	0,4	0,3
12		-	-	0,45	0,4	
Сборный железобетонный подожник ( $a=1,8$ м; $d=0,4$ м) (рис. 5.11, з)	3000	3,3	0,9	0,6	0,3	-
Свайный фундамент (рис. 5.11, д)	3000	5,5	0,7	0,5	0,3	-

### 5.8. Вынос потенциала с контуров заземления электроустановок

Опасный вынос потенциала может иметь место при контакте токоведущих элементов сети высокого напряжения с проводниками сетей более низкого напряжения. При однофазном коротком замыкании через заземляющее устройство подстанции может протекать ток, достигающий десятков килоампер. Такой ток на сопротивлении заземления подстанции вызывает падение напряжения ( $U_3$ ) до нескольких киловольт по отношению к удалённой земле. Как отмечалось выше, для уменьшения напряжения шага  $U_{ш}$  и прикосновения  $U_{пр}$  заземляющее устройство подстанции выполняют в виде сетки, чтобы обеспечить условия:

$$U_{ш} = (0,02...0,1) U_3; \quad U_{пр} = (0,02...0,1) U_3.$$

Основную опасность может представлять вынос высокого напряжения за пределы контура заземления подстанции по заземлённым оболочкам кабелей связи, силовых кабелей, железнодорожным рельсам, трубопроводам. Рекомендуется иметь изоляционные стыки в местах выхода протяженных проводников за пределы контура заземления распреустройства.

Особую опасность могут создавать провода линий связи, заходящих на подстанцию сетей с глухим заземлением нейтрали. На таких подстанциях по требованиям правил электробезопасности все металлические корпуса аппаратуры заземляются через общий контур распреустройства и поэтому они в момент к.з. имеют потенциал, равный потенциалу заземляющего устройства. В то же время провода линий связи имеют практически нулевое напряжение по отношению к удалённой земле. По перечисленным причинам возникает опасность одновременного прикосновения к корпусу и проводу линии связи. Поэтому между всеми проводами линии связи и контуром заземления подстанции предусматривают разрядники типа РБ. При возникновении к.з. эти разрядники срабатывают и защищают обслуживающий персонал. Однако при этом возникает возможность выноса высокого напряжения с заземляющего контура подстанции через разрядники по проводам линии связи на значительное расстояние за пределы контура. Такое напряжение может оказаться опасным для обслуживающего персонала соседнего узла связи и абонентов.

В целях защиты от опасного гальванического влияния вследствие выноса высокого напряжения рекомендуется:

- устанавливать на выходящих за пределы подстанции фидерах связи изолирующие трансформаторы;
- включать комплекты разрядников и защитных промежутков на подходе воздушной или кабельной линий связи к подстанции;
- на соседнем узле связи дополнительно к п.2 подключать разрядники между проводами линий связи и заземляющим устройством этого узла.



## 6. ЭЛЕКТРОХИМИЧЕСКАЯ КОРРОЗИЯ

### 6.1. Возникновение и последствия коррозии

Слово “коррозия” происходит от латинского слова “corrodere”, что означает “пожирать, изглаживать”. Наибольшее распространение получила коррозия в виде ржавления железа или стали. Аналогичные процессы происходят и с другими металлами, а также неметаллическими материалами, например, пластмассами, бетоном, керамикой.

При коррозии происходит физико-химическая реакция между материалом и средой, приводящая к изменению свойств материала. Этот процесс считается обычно вредным, но иногда и полезным. Примерами вредных коррозионных эффектов являются порча материалов, загрязнение биосферы продуктами коррозии, нарушение функции систем, например, тепловых электростанций. К полезным эффектам коррозии можно отнести разрушение отбросов производства и вышедших из строя металлических и неметаллических предметов.

Коррозия в целом приводит к следующим последствиям:

- снижению надежности отдельных видов оборудования и целого технологического процесса;
- потере природных ресурсов;
- загрязнению окружающей среды.

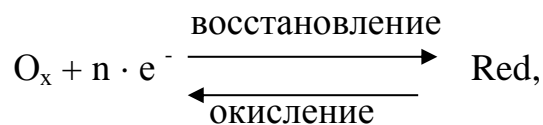
Вследствие коррозии могут выйти из строя подземные и наземные коммуникации, например, водо-, газо- и нефтепроводы, морские нефтяные платформы, работающие в чрезвычайно тяжелых коррозионно – опасных условиях, атомные электростанции, где повреждения могут привести к дорогостоящим и опасным авариям и тяжелым последствиям для техно- и биосферы.

Интегрально коррозия приводит к потерям энергии, главным образом той, которая затрачивается на производство материалов (например, металлов из руд). Кроме того, как правило, металлы не удается заново получить с приемлемым энергетическим выходом из коррозионных продуктов, которые разносятся водой и ветром. Сквозная коррозия подземных нефтепроводов и нефтяных цистерн может привести к угрозам грунтовым водам.

По экспертным оценкам определены годовые затраты общества, связанные с коррозией. Они включают затраты на защиту от коррозии, на замену поврежденного оборудования и на ликвидацию неполадок. По данным этой же работы упомянутые затраты составляют около 4 % валового национального продукта. Часть этих затрат неизбежна, а экономически неоправданными считаются затраты на абсолютное исключение коррозионного разрушения. Хорошо организованная борьба с коррозией может сократить приведенные выше затраты приблизительно на 15÷20%.

Таким образом, коррозия приносит обществу значительные ущербы и борьба с ней является важной технической и социальной проблемой.

Процессы при коррозии имеют электрохимическую природу. Под электрохимической реакцией понимается реакция с отдачей или получением электронов по схеме



где  $O_x$  – окислитель (ацептор электронов);  
 $n$  – число электронов  $e^-$  ;  
 $Red$  – восстановитель (донор электронов).

Известно, что электроны не могут свободно существовать в растворе в какой-либо значительной концентрации. Поэтому электроны, выделявшиеся в реакции окисления, принимают участие и в реакции восстановления. Не исключается возможность протекания реакции при непосредственном контакте между окислителем и восстановителем.

Реакция также может протекать в электрохимической ячейке (рис. 6.1), состоящей из двух электродов, соединенных электролитом (водным раствором, обладающим электропроводностью).

Здесь ток через электролит переносится ионами. Электрод, из которого положительный электрический ток течет в электролит, называется анодом, другой электрод, через который ток течет из электролита, называется катодом. Реакция, протекающая у электродов, именуется электродной соответственно анодной и катодной. При этом анодная реакция является реакцией окисления, катодная – восстановительная.

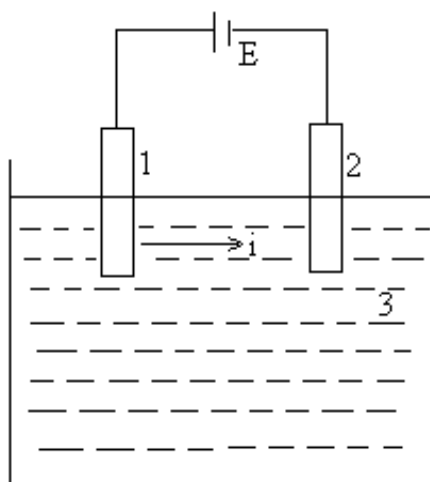


Рис.6.1. Электрохимический элемент (1, 2, 3 – анод, катод и электролит).

Ячейку рис. 6.1, в которой ток вызывается внешним источником  $E$ , называют электролизером. Ячейка, способная сама проводить электрический ток, называется гальваническим элементом.

Важное значение имеет понятие об электродном потенциале. Если кусок металла погружен в водный раствор (рис. 6.2), содержащий ионы металла  $Me^{n+}$ , то электродные реакции будут протекать по поверхности металла до тех пор, пока не установится равновесие.

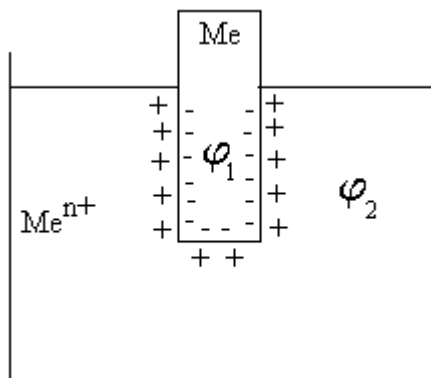
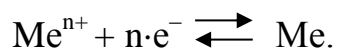


Рис.6.2. К образованию двойного электрического слоя

Это приводит к образованию двойного электрического слоя в пограничной области, которое означает, что кусок металла имеет электрический потенциал (гальвано – потенциал)  $\varphi_1$ , отличающийся от потенциала раствора  $\varphi_2$ . Разность  $E = \varphi_1 - \varphi_2$  называется электродным потенциалом. Она иногда именуется равновесным потенциалом и связана с активностью металла в растворе через уравнение Нернста

$$E = E_0 + [(0,0001983 \text{ T}) \cdot / n] \lg \alpha_{\text{Me}}^{n+},$$

где  $E_0$  - константа, характерная для электродной реакции;

$T$  – абсолютная температура;

$\alpha_{\text{Me}}^{n+}$  - активность ионов металла, то есть эффективная концентрация ионов металла, которую в приближенных расчетах заменяют просто концентрацией.

Как отмечалось выше, электрохимическая ячейка, способная производить ток, называется гальваническим элементом. При соединении между собой электродов внешним металлическим проводником, электрический ток течет по нему от одного электрода (положительного) к другому (отрицательному). В электролите ток течет в противоположном направлении. Следовательно, положительный полюс играет роль катода, а отрицательный – анода. Разность потенциалов между электродами при наличии тока в цепи называется напряжением на клеммах, при отсутствии тока – эдс. Последняя является мерой движущей силы химической реакции, протекающей в элементе, и определяется как разность равновесных электродных потенциалов  $E = E_1 - E_2$ .

Различают три типа гальванических элементов:

- биметаллические элементы, в которых электроды образованы разными материалами;
- концентрационные элементы, где материал электродов одинаков, но концентрации (активности) веществ, участвующих в реакциях у электродов, различны;

- термогальванические элементы, где материал электродов одинаков и состав электролита внутри элемента постоянен, но температура у электродов различная.

Каждый электрод с окружающим его электролитом называется полуэлементом.

В перечисленных выше элементах полуэлементы могут содержать одинаковые электролиты. В последнем случае электролиты могут удерживаться от смещения с помощью мембраны, которая не препятствует ионному обмену, то есть протеканию тока.

Из материалов, приведенных выше, вытекает, что каждому электроду свойственен свой стандартный потенциал. Если расположить электродные реакции в соответствии со значениями стандартных потенциалов, получим электрохимический ряд напряжений (таблица 6.1).

Таблица 6.1

Электрохимический ряд напряжений при температуре 25<sup>0</sup>С

Электродная реакция	Стандартный электродный потенциал, В	Электродная реакция	Стандартный электродный потенциал, В
$Au^{3+} + 3e^{-} \rightleftharpoons Au$	+ 1,42	$Co^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Co$	-0,28
$Cl_2 + 2e^{-} \rightleftharpoons 2Cl^{-}$	+ 1,36	$Cd^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Cd$	-0,40
$O_2 + 4H^{+} + 4e^{-} \rightleftharpoons 2H_2O$	+1,23	$Fe^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Fe$	-0,41
$Ag^{+} + e^{-} \rightleftharpoons Ag$	+ 0,80	$Zn^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Zn$	- 0,76
$Cu^{+} + e^{-} \rightleftharpoons Cu$	+ 0,52	$Mn^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Mn$	- 1,03
$Cu^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Cu$	+0,34	$Ti^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Ti$	-1,63
$H^{+} + e^{-} \rightleftharpoons \frac{1}{2} O_2$	0	$Al^{3+} + 3e^{-} \rightleftharpoons Al$	-1,71
$Pb^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Pb$	-0,13	$Mg^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Mg$	-2,38
$Sn^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Sn$	-0,14	$Na^{+} + e^{-} \rightleftharpoons Na$	-2,71
$Ni^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Ni$	-0,23	$Ca^{2+} + 2e^{-} \rightleftharpoons Ca$	-2,76

Металл, которому соответствует относительно высокий стандартный потенциал, например, серебро, медь, называется благородным, относительно низкий стандартный потенциал, например, натрий, калий – неблагородным металлом.

Если металл погружен в водный раствор, содержащий ионы металла, то, как отмечалось, на его поверхности будет происходить как окисление атомов, так и восстановление ионов. При этом происходит обмен электронами, а скорость этих реакций можно выразить двумя плотностями тока: восстанов-

ления  $j_b$  и окисления  $j_o$ . При равновесии выполняется условие  $j_b = j_o = j$ , а плотность  $j$  называется плотностью тока обмена.

Если через поверхность электродов пропускать ток из внешней цепи, то естественно  $j_b \neq j_o$ . При этом наложенная плотность тока от внешнего источника будет разностью  $j_b$  и  $j_o$ , а электродный потенциал изменится (взамен  $E_o$  становится  $E_j$ ) и происходит поляризация электрода. Поляризация  $\eta$  будет разностью  $E_j$  и  $E_o$ :  $\eta = E_j - E_o$  (рис.6.3). Ее можно подразделить на две основные составляющие – концентрационная поляризация, вызываемая отличием концентраций в слое электролита вблизи поверхности электролита от объемной; - активационная поляризация, вызываемая затруднениями электродной реакции.

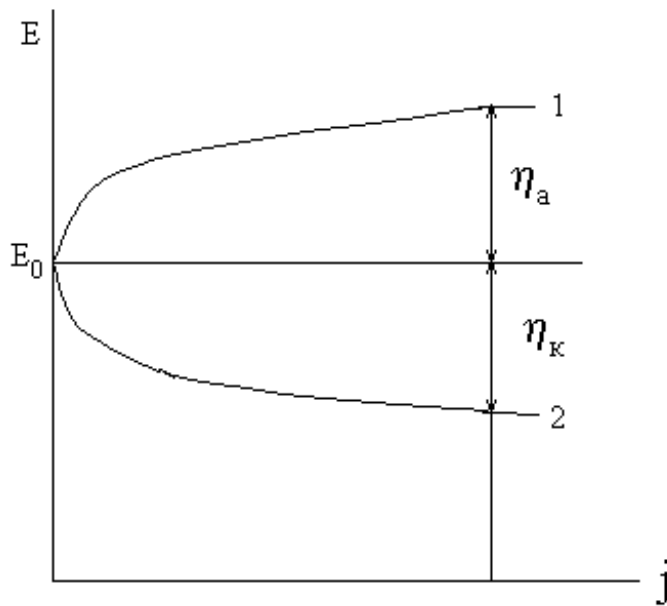


Рис.6.3. Анодная (1) и катодная (2) поляризационные кривые

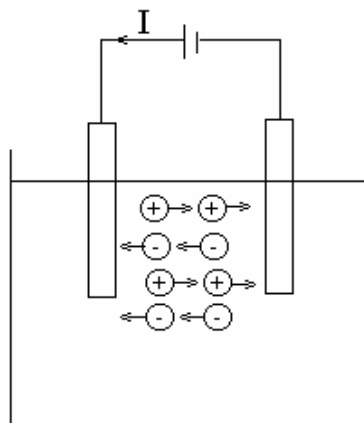


Рис. 6.4. Перенос электрического тока в электролите

В теории коррозии важное значение имеет также электролитическая проводимость. Протекание тока в растворе электролита происходит в результате движения ионов: анионов (отрицательно заряженных) и катионов (положительно заряженных). Катионы движутся в направлении тока, а анионы – в

противоположном (рис. 6.4). Однако в любом случае в различных частях раствора всегда выполняется условие электронейтральности, то есть  $q_- = q_+$ .

При протекании тока соблюдается закон Ома  $U = I \cdot R = I/G$ , где  $I$  – сила тока, А;  $R$  – сопротивление электролита, Ом;  $G$  – его проводимость, 1/Ом;  $U$  – разность потенциалов между электродами, В.

Проводимость электролита  $G$  для объема жидкости, ограниченного прямоугольными поверхностями, определяется как

$$G = \chi \frac{S}{\ell} = \frac{S}{\rho \ell},$$

где  $S$  – площадь поперечного сечения параллелепипеда, см<sup>2</sup>;  $\ell$  – длина параллелепипеда, см;  $\chi$  – удельная электропроводимость, 1/Ом;  $\rho$  – удельное сопротивление, Ом. см.

Анализ показывает, что перенос тока не одинаково распределен между разными ионами. Однако, это не приводит к существенным изменениям концентрации в объеме электролита, так как последняя быстро выравнивается в результате движений жидкости (конвекции). Вместе с тем в тонких слоях электролита ( $\sim 10^{-1} \div 10^{-5}$  см) вблизи поверхности электродов, где конвекция затруднена, протекание тока может привести к значительным изменениям концентрации.

## 6.2. Характеристики коррозии

Согласно международному стандарту ISO 8044 следует различать понятия “коррозия”, “коррозионный эффект” и “коррозионное повреждение”.

Коррозия – физико-химическое взаимодействие между металлом и средой, которое приводит к изменению свойств металла, а часто к ухудшению его свойств, среды или технической системы, частью которой является металл.

Коррозионный эффект – изменение в любой части коррозионной системы, вызванное коррозией.

Коррозионное повреждение (порча) – коррозионный эффект, несовместимый с назначением металла, среды или технической системы, частью которой они являются.

В теории коррозии важное значение имеет движущая сила коррозии. В породах (руде) металл находится в стабильном состоянии. В доменных и плавильных печах его переводят из стабильного состояния в нестабильное. Для большинства металлов, контактирующих с окружающей средой, существует движущая сила, которая пытается металл обратно привести к стабильному состоянию. Так, например, после коррозии сталь превращается в ржавчину, по своему составу близкую к магнетиту ( $Fe_2 O_4$ ) или лимониту ( $Fe_2 O_3 \times H_2O$ ).

Предпосылкой того, что металл самопроизвольно вступит в реакцию и перейдет в другое состояние, является выделение энергии при протекании реакции, то есть наличие термодинамической движущей силы реакции. Если

бы такая реакция превращения требовала подвода энергии, то это означало бы, что превращение не может происходить самопроизвольно, или, другими словами, что у него нет термодинамической движущей силы.

В широком смысле слова многие коррозионные процессы по своей природе являются электрохимическими, поскольку они включают реакцию окисления



Несмотря на это, различают электрохимическую и химическую коррозии.

Электрохимическая коррозия протекает через электродные реакции в большинстве случаев во влажной среде: в водных растворах, в атмосфере под влиянием пленок влаги на поверхности, а также в почве под действием влаги.

Химическая коррозия происходит под влиянием сухих газов или безводных органических жидкостей, например, при высокотемпературном окислении.

Однако в природе большинство коррозионных процессов имеет электрохимический характер. Как отмечалось выше, они протекают с участием электрохимических ячеек, подобных гальваническим элементам и называемых коррозионными элементами. Существуют два типа таких элементов (рис. 6.5):

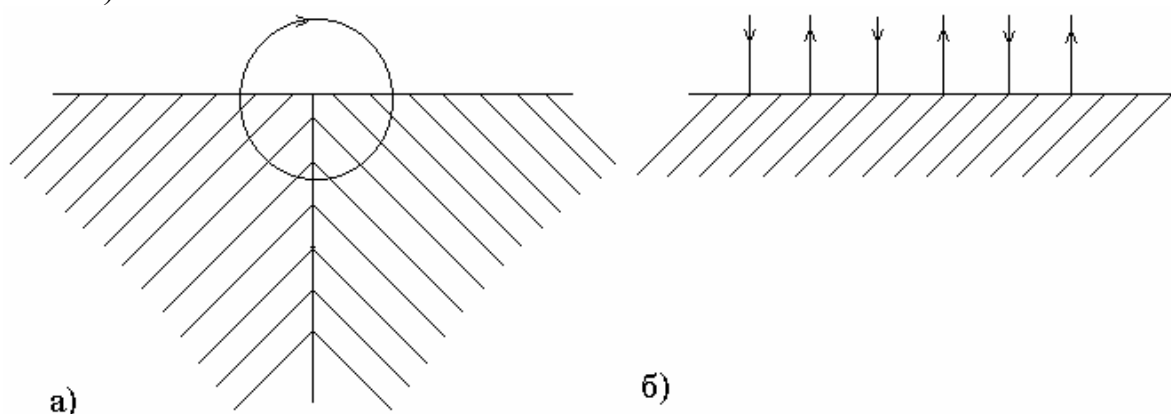


Рис.6.5. Коррозионные элементы: а – анодные и катодные поверхности различимы; б – анодные и катодные поверхности не различимы.

- коррозионные элементы с разделенными анодами и катодами, например, алюминиевый лист (анод) с латунными винтами (катод);

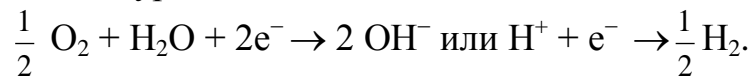
- коррозионные элементы с неразделенными анодными и катодными поверхностями, в которых поверхности анодов и катодов небольшие и многочисленные, причем они способны меняться местами в короткие интервалы времени.

В перечисленных элементах происходят:

- анодная реакция  $\text{Me} \rightarrow \text{Me}^{n+} + n\text{e}^{-}$ ;

- катодная реакция  $\text{Ox} + n\text{e}^{-} \rightarrow \text{Red}$ ;

- полная реакция  $Me + Ox \rightarrow Me^{n+} + Red$ , причем окислитель должен восстанавливаться. В большинстве случаев роль окислителя играет растворенный в воде кислород или в некоторых случаях ионы  $H^+$ . При этом катодная реакция выражается уравнениями



Опасность для материала определяется скоростью коррозии, которая может быть выражена через: изменение массы материала ( $г/м^2$  год,  $мг/м^2$  год,  $мг/м^2$  день), рост глубины коррозии ( $мм/год$ ,  $мкм/год$ ), ток коррозии ( $А/м^2$ ,  $мА/см^2$ ), снижение пределов прочности, текучести, разрушающую деформацию (проценты в год). Но чаще всего пользуются током коррозии в виде кривых Эванса (рис.6.6) или Штерна (рис.6.7). Эти две кривые отличаются только размерностью по оси абсцисс и содержат две кривые: 1 – анодного окисления металла; 2 – катодной реакции. Пересечение этих двух кривых дает информацию о корродирующем электроде:  $I_{корр}$  – коррозионный ток,  $E_{корр}$  – потенциал свободной коррозии, который можно измерить как электродный потенциал корродирующего металла.

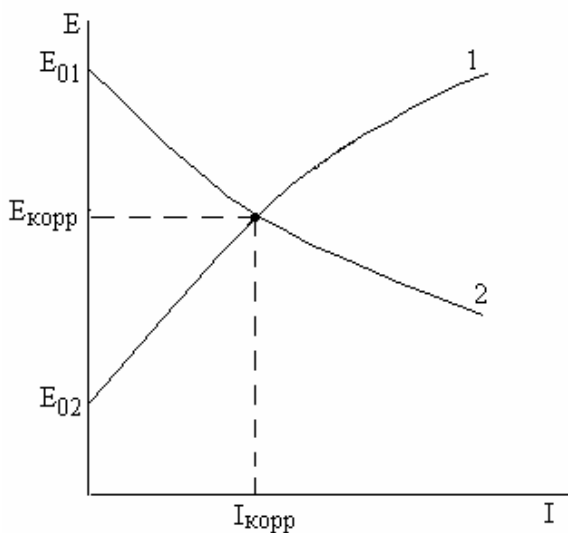


Рис.6.6. Кривые Эванса

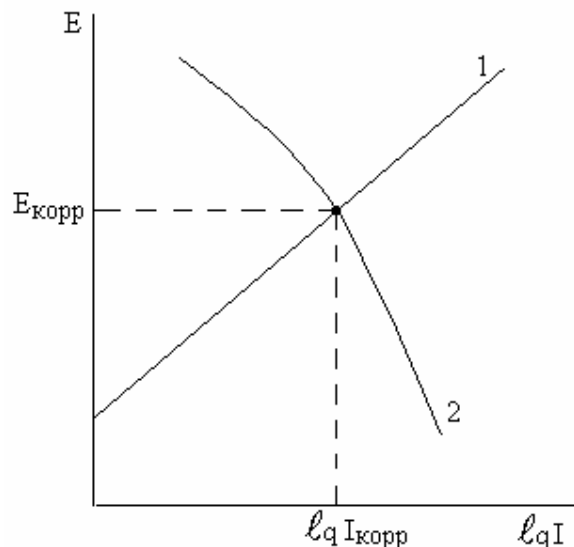


Рис.6.7. Кривые Штерна

### 6.3. Виды коррозии

Различают 13 разновидностей коррозии, которые отличаются друг от друга и механизмами коррозии, а также внешним видом коррозионных поражений (рис. 6.8).

Равномерная коррозия происходит приблизительно равномерно на поверхности всего металла при влиянии среды. Этот вид коррозии, как правило, протекает в результате действия коррозионных элементов с неразделенными анодными и катодными поверхностями.





Рис.6.8. Классификация коррозий

При равномерной коррозии возможность применения материала обычно находится в обратной зависимости от величины среднего проникновения в год. Для некоторых материалов при этом можно пользоваться данными таблицы 6.2.

Таблица 6.2

Применимость материалов при различной скорости коррозии

Применимость	Среднее проникновение, мкм/год		
	Сравнительно дорогие материалы, (Ag, Ti, Cr)	Материалы средней стоимости (Cu, Al, нержавеющая сталь)	Сравнительно дешевые материалы (углеродистая сталь, серый чугун)
Удовлетворительная	75	100	225
Приемлемая при коротких периодах воздействия	75÷250	100÷500	225÷1500
Только при наличии защиты	> 250	> 500	>1500

Питтингообразование – это язвенная или ямообразная коррозия. Оно обычно характеризуется участием коррозионных элементов с разделенными анодными и катодными поверхностями, причем анод располагается в питтинге (яме), а катод на окружающей поверхности. Этот вид коррозии приводит к более тяжелым последствиям, чем равномерная коррозия, так как в очень короткое время оно может привести к образованию сквозных отверстий.

При оценки порчи материала при питтингообразовании следует учитывать число питтингов на единицу площади, их диаметр и глубину. Число

питтингов на единицу определяется путем сравнения их со стандартными изображениями, глубину – путем сравнения двух уровней фокусировки микроскопа: на самое дно питтинга и на поверхность материала. Отношение глубины максимального питтинга ( $h_{max}$ ) к средней глубине проникновения ( $h_{cp}$ ) называется питтинг-фактором ( $F=h_{max}/h_{cp}$ ).

Питтингообразование можно наблюдать на большинстве металлов; только оно возникает при потенциалах выше электродного потенциала.

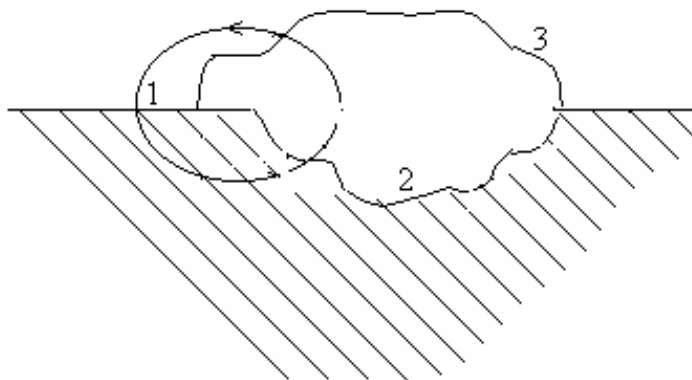
Щелевая коррозия причинно связана с наличием щели и протекает в самой щели или в непосредственной близости от нее. В большинстве случаев щелевая коррозия может быть вызвана просто тем, что в щели задерживается коррозионно – активная жидкость, когда вся поверхность уже высыхает. Однако если окружающая поверхность металла тоже находится в растворе, жидкость в щели отличается своим застойным состоянием.

При установлении стандартных условий анодное поражение металла обычно происходит вблизи горловины щели, а катодное восстановление кислорода из окружающей среды – на наружной поверхности металла.

Щелевой коррозии подвержено большинство металлов, в том числе пассивных, например, нержавеющей сталь. Она наблюдается не только между поверхностями одного металла, но и когда металл соприкасается с неметаллическим предметом. Если щель образует два металла, то может наблюдаться комбинация щелевой и биометаллической (смотри дальше) коррозии. Присутствие хлора, брома или йода обычно ускоряет щелевую коррозию. Эта коррозия, как и питтингообразование, инициируется только выше определенного электродного потенциала.

Подосадковая коррозия сопровождается осаждением продуктов коррозии или других веществ и проходит либо под осадком, либо в непосредственной близости от него. Она вызывается задерживающейся под осадком влагой. По причине плохого перемешивания жидкости под осадком могут создаться коррозионные условия так же, как это было описано для щелевой коррозии. В итоге образуется коррозионный элемент с анодом под осадком и катодом на краю осадка или вблизи него (рис.6.9).

Избирательная или селективная коррозия возникает в сплавах, когда компоненты сплава корродируют с различной скоростью. Одним из примеров такой коррозии является обесцинкование латуни, при котором цинк избирательно растворяется, а пористый медный остаток теряет конструктивную прочность. Аналогично происходит обезалюминивание алюминиевой бронзы и селективное растворение олова в фосфористой бронзе. Еще одним примером селективной коррозии может служить графитизация серого грунта, когда удаляются металлические составляющие, то есть железо, а остающийся графит позволяет предмету сохранить форму, но его прочность и масса существенно уменьшаются.



*Рис.6.9. Принципиальная схема подсадочной коррозии: 1-катод (высокая концентрация кислорода), 2-анод (низкая концентрация кислорода), 3 – осадок.*

Металлы обычно состоят из кристаллитов. При затверждении металла или его термической обработке протекают процессы, в результате которых пограничная область кристаллита приобретает коррозионные характеристики, отличные от характеристик его основной массы. Межкристаллитная коррозия – это коррозия в тонком пограничном слое между кристаллами металла. Практически все металлы при неблагоприятных условиях могут подвергаться межкристаллитной коррозии. Из литературы известна межкристаллитная коррозия нержавеющей стали, являющаяся следствием образования карбида хрома, которое происходит, если концентрация углерода слишком высока, а сталь подвергалась неблагоприятной термической обработке или воздействию, например в зоне сварного шва.

Слоевая коррозия возникает в металлах, подвергнутых обработке давлением. При слоевой коррозии поражаются внутренние слои металла. Как правило, эти слои параллельны направлению обработки (деформации), а также и поверхности. Поражение слоевой коррозией может привести к расслаиванию неповрежденных слоев, которые будут выглядеть, как страницы в книге. Кроме того, эта коррозия приводит к образованию пузырей, вздувающихся на поверхности металла под давлением объемистых продуктов коррозии.

Слоевая коррозия в природе встречается сравнительно редко и в основном наблюдается у некоторых алюминиевых сплавов.

Эрозионная коррозия – есть совокупность эрозии и коррозии, которая вызывается быстротекущей жидкостью. Этот тип коррозии главным образом охватывает медные материалы. Петтинги при эрозионной коррозии, как правило, имеют блестящую поверхность, свободную от продуктов коррозии. Они образуются в направлении потока жидкости. Иногда эта коррозия имеет подковообразную форму с концами, указывающими направление потока.

Эрозионно-коррозионное поражение главным образом сосредоточено в местах нарушения потока, например, в местах изгиба труб, на входе в трубы теплообменника, в частях насоса, подверженных действию быстро движущихся жидкостей, в седлах водопроводных вентиляей.

Кавитационная коррозия включает совместное действие коррозии и кавитации. Пузырьки газа, образованные при понижении давления в технологических агрегатах, схлопываются и являются причиной разрушения материала. Этот вид порчи имеет место, например, в ротационных насосах.

При Фреттинг – коррозии происходит процесс, включающий совместное действие коррозии и вибрационного скольжения двух контактирующих поверхностей. По этому процессу существуют две альтернативные теории.

1. Когда металлические поверхности скользят под давлением друг по другу, в отдельных точках происходит их взаимное приваривание. В результате этого при последующем движении вырываются мелкие частицы, которые быстро окисляются в контакте с кислородом атмосферы и образуют мелкую темную оксидную пыль.

2. При контакте с кислородом воздуха металлическая поверхность образует часто невидимое оксидное покрытие, которое препятствует дальнейшему окислению. В точках контакта, где поверхности металла скользят друг относительно друга, происходит постоянное удаление и повторное образование оксида металла. Удаленный оксид образует темную пыль, которая изменяет окраску в местах контакта.

Фреттинг- коррозия может быть наблюдаена при дальних перевозках металлических листов, сложенных штабелями, свернутых в рулоны, а также упакованных в связки стержней. Она также встречается в плотно сочлененных конструкциях, например, опорах.

Коррозионное растрескивание под действием среды, возникает при сочетании механически растягивающих напряжений и коррозии, причем при статических нагрузках происходит растрескивание металла, при динамических – его усталость. В литературе существует мнение, что напряжение не является причиной коррозии, а причиной деформации с дальнейшим выходом из строя материала.

Биметаллическая коррозия возникает при работе биметаллического коррозионного элемента, то есть гальванического элемента, в котором электроды состоят из разных материалов. В этом случае необязательно, чтобы оба электрода были металлическими. Один из электродов может быть, например, графитом.

Как видно из рис. 6.10, для работы коррозионного элемента необходимо, чтобы область контакта между материалами была покрыта раствором электролита. В коррозионных элементах, имеющих два электрода из различных металлов, более благородный металл будет катодом, а менее благородный – анодом. Атаке подвергается менее благородный металл.

В рассматриваемом виде коррозии решающее значение для определения степени поражения имеет соотношение между площадями анодов  $S_a$  и катодов  $S_k$ . Если  $S_a \gg S_k$  и раствор имеет хорошую электропроводность, то поражение распространяется на широкую площадь и поэтому в большинстве случаев несущественно (рис.6.11а). Если  $S_a > S_k$ , но электролит имеет плохую

электропроводимость, то вблизи катода может иметь место значительное поражение (рис.6.11б). Опасность поражения велика, если  $S_a < S_k$  (рис.6.11в).

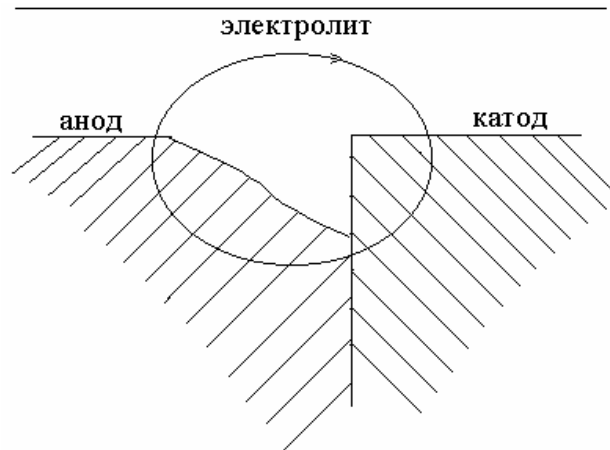


Рис.6.10. Коррозионный элемент при биметаллической коррозии

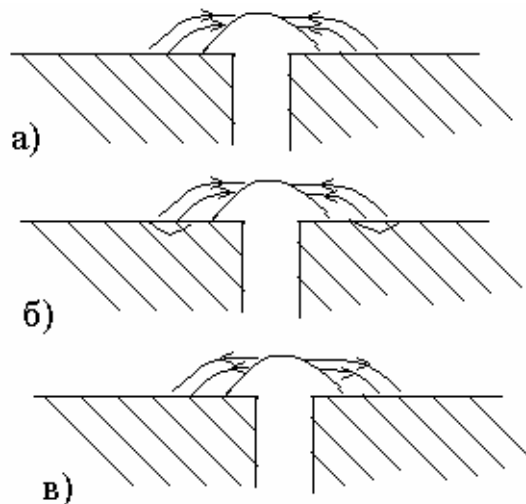
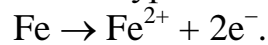


Рис.6.11. Биметаллическая коррозия заклепочного соединения: а) -  $S_a > S_k$ , хорошая электролитическая проводимость, б) -  $S_a > S_k$ , плохая электролитическая проводимость, в) -  $S_a < S_k$ .

Как отмечалось, для протекания биметаллической коррозии необходимо присутствия электролита. Однако если поверхность металлов суха, такой коррозии не будет. Биметаллическая коррозия в этом случае имеет место на наружных конструкциях при присутствии пленки влаги.

Коррозия блуждающим током получила наибольшее распространение, а наблюдается в подземных конструкциях или под водой и вызывается блуждающими токами от электрооборудования, некоторые токопроводящие части которого контактируются с почвой или водой. Анализ показывает, что этот вид коррозии в основном вызывается источниками постоянного высокого напряжения, например, трамваями, электропоездами на постоянной тяге, метро, линиями электропередачи постоянного тока, электросварочными аппаратами постоянного тока и др.

Для примера на рис. 6.12 приведена принципиальная схема возникновения коррозии блуждающим током около железной дороги, работающей на постоянном токе. Часть тока (блуждающий ток) возвращается на выпрямительную подстанцию не по рельсам, а по почве, где проложен трубопровод. Последний является хорошим проводником и поэтому часть тока переходит в трубу, а около тяговой подстанции покидает трубу и возвращается на подстанцию. В месте входа в трубу из влажной почвы, труба выступает в роли катода, а место выхода тока из трубы – в роли анода. При этом происходит анодная реакция и коррозия стали по уравнению



В результате в трубопроводе появятся отверстия, которые могут привести к серьезным авариям.

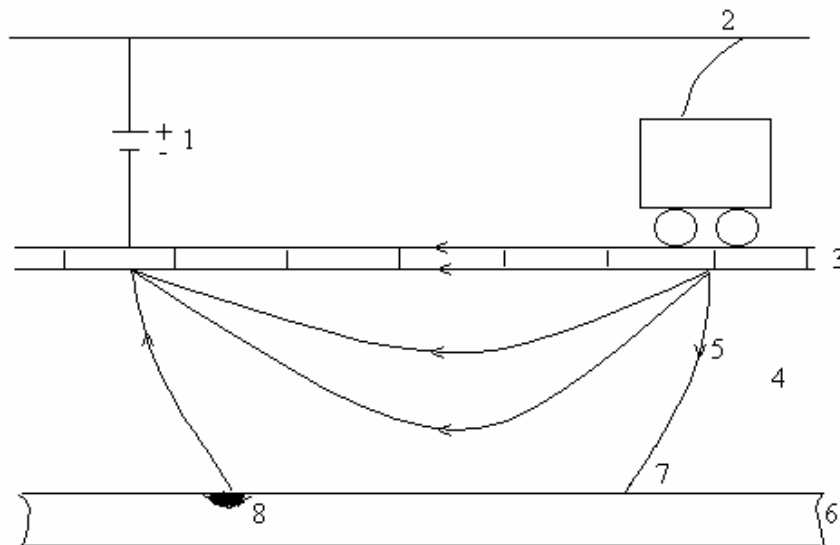


Рис.6.12. Коррозия блуждающим током: 1 – выпрямительная подстанция, 2 – воздушная контактная сеть, 3 – рельсы, 4 – почва, 5 – блуждающий ток, 6 – трубопровод, 7 – катод, 8 – анод.

#### 6.4. Коррозионные среды

К коррозионным средам относятся вода, почва, атмосфера и сухие газы (при высокой температуре).

Основание конструкции энергосистем, промышленности и бытовой коммуникации подвергаются воздействию воды. Так, например, из-за воды происходит коррозия в оборудовании горячего и холодного водоснабжения (трубы, вентили, насосы), в системе водяного охлаждения (трубы, теплообменники, насосы), в системе центрального отопления (трубы, радиаторы, вентили, насосы), в оборудовании тепловых электростанций (котлы, парогенераторы, перегреватели, турбины, конденсаторы, трубы, вентили, насосы) в кораблях (корпуса и винты), в портовых сооружениях со стальными сваями, в шлюзах (гидрозатворы) и др.

С точки зрения коррозии различают пресную и морскую воду и воду паровых установок, где условия коррозии довольно специфичны.

Коррозионная активность пресной воды зависит от концентрации кислорода, щелочей, жесткости, а также концентрации  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ , скорости потока и температуры.

Концентрация кислорода имеет решающее значение для коррозионной активности воды. Однако она зависит от температуры и с повышением последней снижается. Так при  $t=0$  °С в пресной воде имеется 14,6 мг/л кислорода, при  $t = 80$  °С – 2,8 мг/л.

В кислом растворе, углеродистая сталь может корродировать и в отсутствие кислорода со значительной скоростью, т.к. в роли окислителя могут выступать ионы  $\text{H}^+$ .

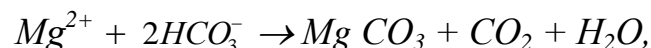
Рост кислотности окружающей среды из-за выпадения кислотных дождей увеличивает коррозионную активность воды.

На коррозию влияет также скорость течения воды. Как отмечалось выше, в стоячей воде существуют предпосылки питтингообразования. Это связано с недостаточным промыванием поверхности металла и недостаточным подводом вещества, необходимого для образования защищенного покрытия. Но, с другой стороны, при слишком больших скоростях течения воды существует опасность эрозионной коррозии.

Объекты, находящиеся в морской воде, могут обрастать морскими организмами или ракушками, которые приведут к подсадковой коррозии. Могут иметь место и другие вредные последствия, например, засорение труб или увеличенные сопротивления движения корабля. Образованию засорения в трубах можно предотвратить с помощью хлорирования, обрастанию корпуса кораблей – с помощью окрашивания так называемой противообрастательной краской, которая выделяет вещества, ядовитые для морских организмов.

Особое внимание уделяется химическому составу воды для паровых электростанций. Химия воды в парогенераторных установках должна обеспечивать отсутствие накипообразования и коррозии. Для этого должен быть контролирован состав воды на содержание кислорода,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Cu}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$  и силикатов. Для обеспечения нормальной работы агрегатов производится умягчение, деаэрирование, контроль кислотности и добавление ингибиторов (см. дальше).

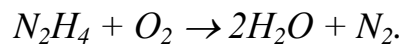
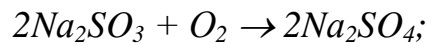
Умягчение имеет целью уменьшение концентрации  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$ , которое образуют накипь. Для этого применяют термическое смягчение, при котором  $\text{CaCO}_3$  и  $\text{MgCO}_3$  осаждаются по реакции



катионный обмен в ионитовом фильтре, где  $\text{Ca}^{2+}$  и  $\text{Mg}^{2+}$  заменяется на  $\text{Na}^+$  и полную деминерализацию, при которой катионы и анионы удаляются с помощью ионообменников.

Деаэрирование применяют, в основном для удаления из воды растворенного кислорода. Различают термическое деаэрирование, при котором воду обрабатывают паром, вследствие чего растворимость кислорода падает, и

химическое деаэрирование, при котором растворенный в воде кислород удаляется посредством реакции с сульфитом натрия ( $Na_2SO_3$ ) или гидразином ( $N_2H_4$ ) по следующим уравнениям



Добавление ингибитора производят, чтобы предотвратить коррозию. Для этого используются пленкообразующие амины и фосфаты. Последние, кроме ингибирующего действия, обладают способностью осаждать остаточную жесткость в виде шлама.

Многие важные для общества сооружения (водопроводы и канализация, стальные трубопроводы, цистерны, телефонные кабели в свинцовой оболочке, стальные фундаменты и ж/б опоры ЛЭП и ЛС, дорожные водопропускные устройства, стальные сваи т.д.) располагаются под землей и, следовательно, подвергаются коррозионному влиянию почвы.

Почвы состоят из трех компонентов: твердых частиц, почвенной (грунтовой) влаги и газовой фазы. В почве на коррозию влияют влага, поступление кислорода, потенциал электродов, кислотность, электрическое сопротивление почвы и активность микроорганизмов.

Влияние воды, поставляемой в почву снизу в виде грунтовых вод и сверху дождями, тающим снегом и т.д., было рассмотрено выше.

Кислород принимает участие в катодной реакции и поэтому его присутствие является предпосылкой для коррозии в почве. Содержание кислорода сравнительно высоко над уровнем грунтовых вод и значительно ниже под ним. Оно также изменяется с типом почвы, например, в песке оно велико, а в глине ниже. При этом содержание кислорода значительно выше в мелкогранулированной почве, которая была взрыхлена, например, в процессе земляных работ, чем в почвах, находящихся в нетронutom, естественном состоянии.

Электрическое сопротивление почвенной влаги определяется концентрацией различных ионов и их подвижностью. Высокие уровни концентрации соли наблюдаются в областях, бывших раньше морским дном или там, где применяли большое количество удобрений или дорожной соли. Удельное сопротивление электролита влияет на величину тока в коррозионном элементе, когда расстояние между анодом и катодом достаточно велико, чтобы омическое падение потенциала внутри элемента стало значительным. Опасность коррозии велика при  $\rho_3 < 1000$  Ом·см и мала при  $\rho_3 > 5000$  Ом·см.

В присутствии определенных микроорганизмов коррозия может протекать в глубине почвы и при низкой концентрации кислорода. Некоторые сульфатвосстанавливающие бактерии обладают способностью катализировать восстановление  $SO_4^{2-}$  ионов, содержащихся в почве, которое в отсутствие бактерий является очень медленным процессом. Это восстановление способствует окислению, например, стали.

Атмосферная коррозия металлов является электрохимическим процессом, который протекает в коррозионных элементах, имеющих аноды и като-



ды. Для работы коррозионных элементов требуется присутствие электролита, т.е. поверхность материала должна быть покрыта пленкой влаги достаточной толщины. Поскольку количество воды на защищенных от осадков металлических поверхностях в большой степени зависит от относительной влажности, то она одновременно зависит от отношения фактического давления водяных паров к давлению насыщения.

Пленки влаги на поверхности металла могут содержать растворенные вещества, оказывающие влияние на коррозию: кислород, оксиды серы ( $SO_2$ ), оксиды азота ( $NO_2$ ), диоксид углерода, хлориды и ионы металла. Некоторые из этих веществ попадают сюда из воздуха, другие из корродирующего металла.

Температура оказывает на атмосферную коррозию двойное влияние. С одной стороны повышение температуры ускоряет коррозию, с другой – с ростом температуры уменьшается время увлажнения.

Значительное влияние на коррозию оказывают пыль и копоть, осаждающиеся на поверхности металла. Их влияние во многом зависит от способности пыли задерживать воду и остатки кислоты. Копоть может также вызывать биметаллическую коррозию.

В связи с коррозией обычно атмосферу в литературе делят на следующие типы:

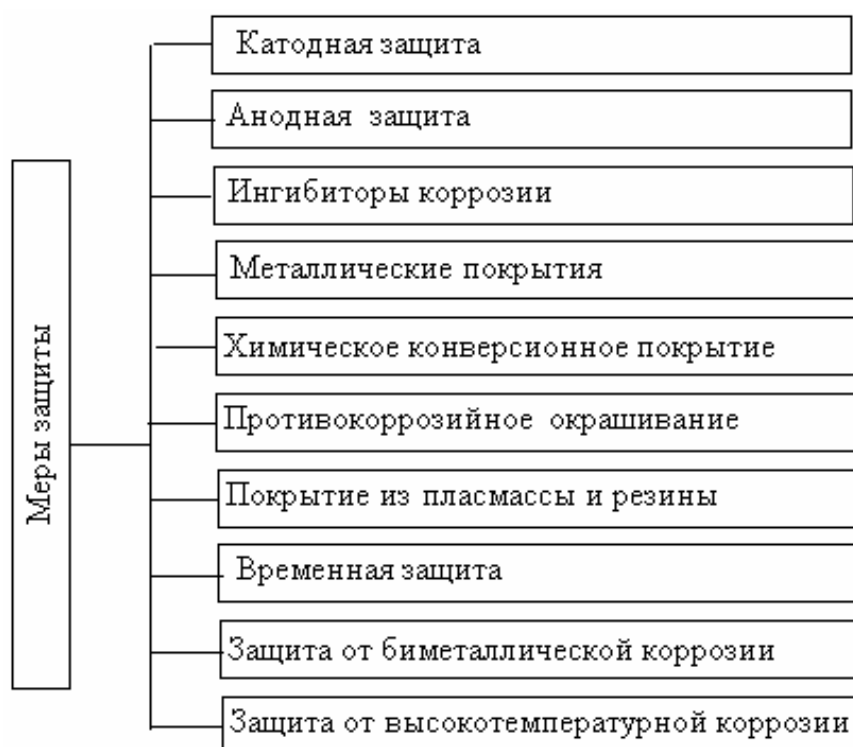
- сельская атмосфера, имеющая сравнительно низкий уровень загрязнений, со скоростью осаждения  $SO_2$  менее 10 мГ на 1 м<sup>2</sup> в день, хлорида – менее 5 мГ на 1 м<sup>2</sup> в день;
- городская атмосфера, содержащая сравнительно высокие уровни диоксида серы и копоти от автомобилей, домов, районных теплоэлектростанций и промышленности; здесь скорость осаждения  $SO_2$  – 10÷80 мГ на 1 м<sup>2</sup> в день;
- промышленная атмосфера, где загрязнения могут меняться в зависимости от типа производства: однако скорость осаждения  $SO_2$  обычно высока и может достигать 200 мГ на 1 м<sup>2</sup> в день.

Кислород, пары серы и газообразной хлор являются примерами газов, которые и при отсутствии влаги способны вызывать коррозионное поражение металла. Под их действием металл окисляется, и в широком смысле слова, процесс этот по своей природе является электрохимическим. Тем не менее, такую коррозию можно рассматривать и как химическую, поскольку она не протекает через электродные реакции в общепринятом смысле этого выражения.

## 6.5. Основные меры защиты от коррозии

Существует множество способов борьбы с коррозией, например, контролирование электродного потенциала с тем, чтобы перевести металл в состояние иммунитета или пассивности, уменьшение скорости коррозии с помощью ингибиторов коррозии, применение органических и неорганических защитных покрытий. Рассмотрим эти меры защиты (рис.6.13).

. Как отмечалось, скорость коррозии сильно зависит от электродного потенциала. В большинстве случаев эту скорость можно значительно снизить, сдвигая электродный потенциал к более низкому значению. Это можно достигнуть заряжая поверхность защищаемого объекта катодным током и тем самым, сообщая ему отрицательную поляризацию. Такая защита называется катодной, причем при необходимости можно достичь полного иммунитета, когда металл становится устойчивым и коррозия не может протекать. В этом случае идет речь о полной катодной защите. Если сдвиг потенциала меньше, то защита называется неполной, но, тем не менее, даже такая защита имеет практическую ценность.



*Рис.6.13. Меры защиты от коррозии*

Различают катодную защиту наложенным током и катодную защиту с жертвенным анодом. Когда катодный ток подается к поверхности защищаемого объекта от внешнего источника постоянного тока и вспомогательного анода (рис. 6.14), защиту называют внешней или электрохимической. В такой защите можно использовать растворимые или инертные аноды. Первые обычно изготавливают из стали (обрезки стальных балок, рельсы и т.д.). В качестве инертных анодов используют магнетит, кремнистый чугун (ферросилид), гранит, свинец, платинированный титан и ниобий.

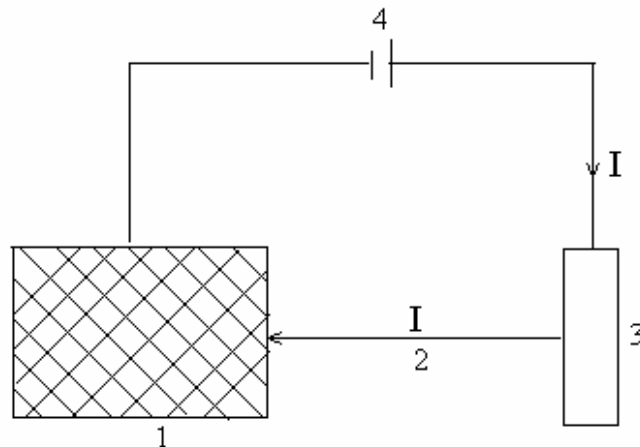


Рис.6.14. Схема катодной защиты наложенным током  $I$ : 1 – объект, 2 – электролит, 3 – вспомогательный анод, 4 – источник.

Катодная защита наложенным током применяется в следующих случаях:

- подземные трубопроводы для воды, нефти и природного газа;
- внешняя поверхность подземных нефтяных или бензиновых цистерн;
- подземные телефонные кабели в свинцовой оболочке;
- стальные сваи в земле;
- стальные шпунтовые сваи в портах;
- стальные конструкции электростанций;
- внутренняя поверхность стальных цистерн для воды и химических реактивов.

Катодный ток может генерироваться также, благодаря электрическому соединению защищаемого объекта благородным металлом в виде так называемого жертвенного анода (рис. 6.15).

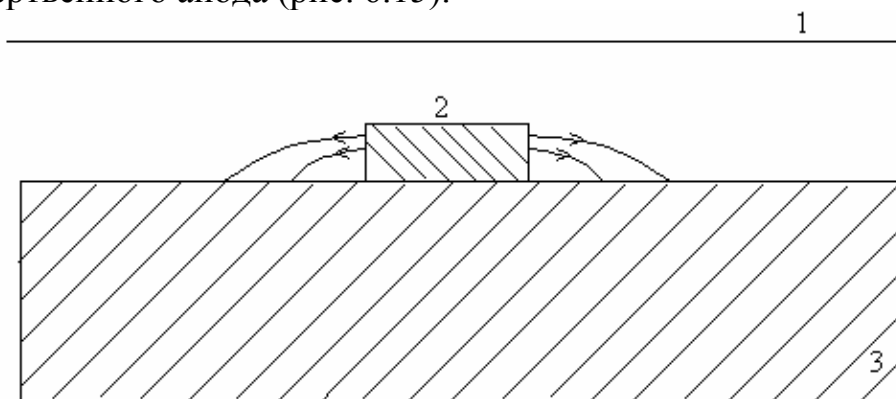


Рис.6.15. Катодная защита с жертвенным анодом: 1 – уровень воды, 2 – жертвенный анод, 3 – объект.

В качестве таких анодов используют магний ( $Mg Al_6 Zn_3$ ), цинк (99, 99% Zn) или алюминий ( $AlZn_5$ ). Железо в свою очередь также используется в качестве жертвенного анода для защиты медных сплавов. Гальванические аноды расходуются в этой системе для защиты:

- внутренней поверхности стальных цистерн;
- водяных кожухов на электростанциях.

Чтобы вызвать необходимое для катодной защиты уменьшение потенциала по защищаемой конструкции необходимо обеспечить определенную плотность тока ( $j$ ). Так, например, для защиты стали без покрытия необходимо пропустить ток в почве с  $j = 10 \div 100$  мА/м<sup>2</sup>, в пресной воде с  $j = 20 \div 50$  мА/м<sup>2</sup>; в стоячей морской воде с  $j = 50 \div 150$  мА/м<sup>2</sup> и в проточной морской воде с  $j = 150 \div 300$  мА/м<sup>2</sup>. Если поверхность защищаемой стальной конструкции имеет органическое покрытие, например битумное стеклоармирование, то достаточно обеспечить  $j = 0,1 \div 1$  мА/м<sup>2</sup>.

Здесь отметим, что катодная защита наложенным током может вызывать коррозионное повреждение близлежащих конструкций (труб или свинцованных кабелей), которые не связаны с системой защиты. Это явление иногда в литературе называется интерференцией и возникает из-за того, что защитный ток, попадая в трубу или кабель, вызывает коррозию блуждающим током (рис.6.16). Можно избежать интерференции, соединив данную конструкцию с защищаемым объектом.

В основе анодной защиты лежит пассивация поверхности металла при наложении анодного тока. Последний вызывает анодную поляризацию, то есть возрастание электродного потенциала, и должен быть таким, чтобы превысить уровень пассивации. Следует учесть, что если электродный потенциал слишком увеличить, то область пассивности может оказаться пройденной и тогда начинается питтингообразование или так называемая транспассивная коррозия (перепассивация).

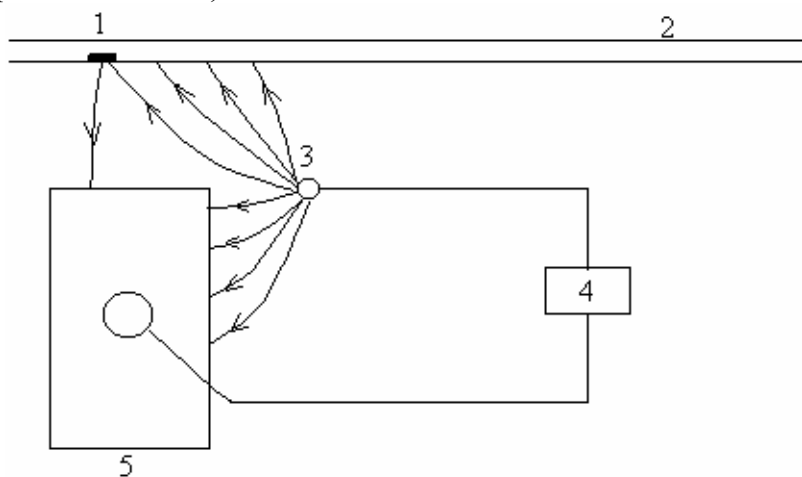


Рис.6.16. Коррозия свинцовой оболочки кабеля, вызванной интерференцией:  
1 – питтинги, 2 – кабель, 3 – анод, 4 – выпрямитель, 5 – цистерна.

В технике анодная защита применяется для защиты нержавеющей стали, то есть сплава железа с хромом, который обладает ярко выраженными пассивационными свойствами. Ее применяют также для титана и в некоторых случаях для углеродистой стали.

Анодный ток, также как и катодный, можно получить с помощью внешнего источника питания и вспомогательного электрода, но направление

тока будет противоположным, чем у катодной защиты. Такую анодную защиту применяют, например, в цистернах, заполненных серной кислотой.

Ингибитором коррозии называется вещество, которое уменьшает скорость коррозии при добавлении в коррозионную среду или в сам материал без существенного изменения концентрации коррозионно – активных веществ. Действие ингибитора обычно состоит в образовании защитной пленки на поверхности металла.

Различают анодные, катодные и смешанные ингибиторы. Анодные ингибиторы в основном влияют на анодную реакцию. Они в виде хромат – ионов ( $CrO_4^{2-}$ ), нитрит – ионов ( $NO_2^-$ ) и в присутствии воздуха фосфатов и молибдатов, действуют, вызывая образование защитного (пассивирующего) оксидного слоя на поверхности стали. Однако если концентрация этих анодных ингибиторов слишком мала, в оксидном слое могут возникать поры и дефекты, где может наблюдаться ускоренная коррозия. По этой причине анодные ингибиторы называют “опасными ингибиторами”.

Катодные ингибиторы влияют главным образом на катодную реакцию и применяются в виде:

- солей цинка, например,  $ZnSO_4$ ;
- полифосфатов, например, полифосфата натрия ( $Na_4P_2O_7$ ), триполифосфата натрия ( $Na_5P_3O_{10}$ ) и гексаметаполифосфата натрия  $[(NaPO_3)_6]$ ;
- фосфатов, которые эффективны как ингибиторы, в присутствии двухвалентных ионов металлов, предпочтительно в сочетании с солями цинка. В отличие от анодных, катодные ингибиторы очень эффективны и поэтому их считают “безопасными”.

Смешанные ингибиторы в большей или меньшей степени влияют и на катодную и на анодную реакции. Чаще всего с этой целью применяют бензотриазол.

Широкое применение нашло также металлическое покрытие объектов защиты. Например, для защиты железа от коррозии, последнее покрывают цинком. Металлопокрытие можно получать различными методами. Выбор металла для покрытия и метода его нанесения зависит от нескольких факторов: от металла, на который должно наноситься покрытие, от размера и формы объекта, от коррозионности среды, а также от требуемых физических характеристик.

Все виды технологии покрытий можно условно подразделить на электроосаждение, химическое осаждение, горячее осаждение, металлизацию распылением, диффузионное насыщение, вакуумное осаждение, механическое нанесение покрытий.

При электроосаждении покрываемый предмет делают катодом электролитической ванны, электролит которой содержит ионы покрываемого металла. Этот метод применяется для осаждения как чистых металлов (цинк, медь, никель, хром, олово, золото, серебро), так и сплавов (медь-цинк, который называется латунью, и цинконицелевые). Для того, чтобы покрытие бы-

ло равномерным деталь (катод) располагают в середине, а аноды – вокруг обрабатываемого предмета (рис.6.17).

При химическом покрытии осаждение происходит в результате его вытеснения или химической реакции. Например, при покрытии стали медью реакция такова  $Fe + Cu^{2+} \rightarrow Cu + Fe^{2+}$ , а при покрытии никелем  $Ni^{2+} + H_2PO_2^- + H_2O \rightarrow Ni + H_2PO_3 + 2H^+$ . Здесь лишь отметим, что химическое осаждение значительно дороже, чем электроосаждение.

При горячем металлическом покрытии покрываемый объект погружают в ванну с расплавленным металлом. Последний с металлом образует основы интерметаллизации, так что на их границе возникает легированный слой. Таким образом, в основном на сталь наносится цинковое покрытие.

Металлизацию распылением производят с помощью пистолета-распылителя, в котором покрывающий металл расплавляется и направляется на покрываемый металл.

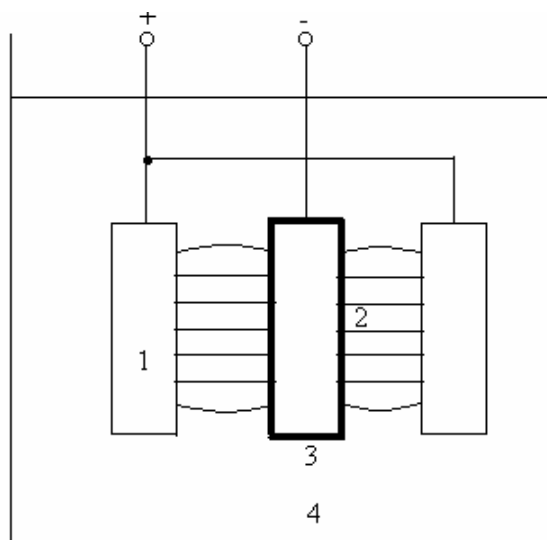


Рис.6.17. Методика равномерного электроосаждения: 1 – анод, 2 – катод (объект), 3 – осажденный металл, 4 – электролит.

Существует три способа металлизации распылением:

- плазменное распыление покрывающего металла, который в виде проволоки или порошка расплавляется в кислородно-ацетиленовом пламени, диспергируется и переносится на объект под действием пламени и потока сжатого воздуха;
- дуговое распыление покрывающего металла, который расплавляется в электрической дуге и направляется на объект под действием мощного потока воздуха;
- плазменное напыление порошка, который плавится в дуге плазмы и с помощью пистолета при температуре около 1500 °С направляется на покрываемый металл.

Диффузионное насыщение изменяет поверхностный слой покрываемого металла путем диффузии в ее поверхности какого-либо химического элемен-

та, например, металла. Таким методом пользуются при покрытии цинком стали (терардизация), алюминием стали (калоризация) и хромом стали (термохромирование).

При вакуумном покрытии сначала покрываемый металл переводится в паровую фазу путем испарения или катодного распыления в вакууме. После этого пары переносятся к покрываемому металлу, и конденсируются на нем, образуя покрытие.

Существует ряд механических методов нанесения металлических покрытий:

1. покрытие наклепом (насыпанные изделия обрабатывают во вращающемся барабане, который содержит также стеклянные шарики и порошок покрываемого металла; в результате “вбивание” стеклянными шариками металлический порошок прочно сцепляется с поверхностью изделий);
2. плакирование (покрываемый металл прикатывают к материалу основы в холодном или горячем состоянии);
3. нанесение покрытий взрывом (лист покрываемого металла сваривают с основой посредством взрыва);
4. экструзионное покрытие (основной материал подвергают экструзии с покрываемым материалом);
5. наварка покрываемого металла.

Широкое применение нашло также химическое конверсионное покрытие, при котором покрываемый металл реагирует с обрабатываемым материалом таким образом, что на его поверхности образуется тонкое труднорастворимое покрытие. Примерами химической конверсионной обработки являются фосфатирование и хроматирование. Фосфатированию подлежит обычно сталь. Различают цинковое, натрийаммонийное и марганцовое фосфатирование. Хроматирование применяют для покрытия цинка, алюминия, магния и латуни.

Противокоррозионное окрашивание состоит в том, что поверхность защищаемого металла покрывают специальными лакокрасочными материалами. С этой целью в первую очередь окрашивают сталь, работающую при различных коррозионных условиях. Защитная покраска против ржавления включает обезжиривание, удаление прокатной окалины, ржавчины и других загрязнений, возможное наложение травящего грунта, возможное нанесение промежуточного слоя и нанесение покровного слоя краски.

Лакокрасочные материалы подразделяются на свинцовые сурики, хроматы цинка, цинкофосфаты, цинконаполненные краски.

Однако перечисленные краски содержат в качестве растворителей органические материалы, которые могут создавать проблемы экологии (образуются пары, вредные для здоровья). Поэтому в последние годы широкое распространение получили неорганические растворители, например, вода, краски без растворителей и порошковые краски.

С помощью покрытий из пластмассы или резины можно защитить металлические поверхности от коррозии объемов, содержащих особо опасные

химические вещества (например, для хранилищ химических продуктов, реакционных сосудов, электрометаллических и травильных ванн, труб, насосов, вентиляторов и т.д.). Пластиковые покрытия также находят применение на листовой оцинкованной стали и алюминия, используемых в строительстве.

Все покрытия из пластмасс и резины можно подразделить на три группы:

- термоактопласты (фенольные, эпоксидные и полиэфирные пластики);
- термопласты (полиэтиленовые, полипропиленовые, полиамидные, поливиниловые, поливинилхлоридные и тетрафторэтиленовые пластики);
- резины (включая натуральные, бутиловые, хлоропреновые, нитриловые и твердые резины).

В ряде случаев металлические предметы приходится защищать от коррозии только на ограниченный период. Такая защита необходима на время хранения и транспортировки металлических готовых изделий и полуфабрикатов и называется временной.

Пленкообразующие средства обычно содержат ингибиторы коррозии, которые задерживают ее. Различают следующие средства временной защиты от коррозии:

- пленкообразующие средства на водной основе, причем после испарения воды остается масляная пленка;
- коррозионнозащитные масла с добавкой ингибитора коррозии;
- коррозионные жидкости из жиров, масел, воска или смолы с добавлением ингибитора коррозии;
- коррозионнозащитные жировые смазки, содержащие ингибиторы коррозии;
- средства для нанесения горячим погружением в расплав вазелина, воска и т.д.
- постоянные и снимаемые пластиковые пленки, осаждаемые из растворителей или наносимые путем горячего погружения.

Для того, чтобы избежать биметаллической коррозии необходимо соблюдать следующие правила:

- если поверхность металлов увлажняется или находится в морской атмосфере, то нельзя объединять металлы, далекие друг от друга в ряду напряжений;
- когда это требуется по конструктивным соображениям (например, болтовое соединение между собой алюминиевой и стальной деталей), необходимо изолировать металлы друг от друга с помощью нестареющей пластмассы или резины;
- необходимо проектировать конструкцию так, чтобы влага не могла собираться и накапливаться в месте контакта;
- необходимо покрывать контакт и поверхность вокруг него защитными красками или битумом (поскольку путь тока будет длиннее и сопротивление выше, такая мера приведет к значительному уменьшению скорости коррозии).

Высокотемпературную коррозию можно предотвратить путем добавления к сплаву элементов, имеющих тенденцию селективно окисляться с обра-



зованием защитного покрытия. Так жаростойкая сталь, содержащая более 12% хрома, выделяет тонкий  $\text{Cr}_2\text{O}_3 \cdot \text{FeO}$  и  $\text{Cr}_2\text{O}_3$ . Этот слой предохраняет сталь от дальнейшего окисления при температурах даже более  $1000^\circ\text{C}$ . Однако при определенных условиях, например, если поверхность металла подвергается топочным газам, загрязненными оксидом ванадия, защитные свойства упомянутого слоя могут теряться.

Защита, основанная на селективном окислении, может быть достигнута также путем тонкого легированного слоя на поверхности, например, диффузионного слоя  $\text{Al}$  и  $\text{Si}$ , которые образуют покрытия  $\text{Al}_2\text{O}_3$  и  $\text{SiO}_2$  соответственно.

Кроме того, можно препятствовать высокотемпературному окислению применяя в качестве покрытия;

- алюминий, который при высокой температуре может образовать тонкую защитную пленку  $\text{Al}_2\text{O}_3$ , защищающую сталь вплоть до  $600^\circ\text{C}$ ;
- керамику ( $\text{ZrO}_2$ ), нанесенную с помощью пламенного или плазменного напыления.

Наконец, чтобы избежать высокотемпературного окисления при термообработке активных металлов, часто используют атмосферу, состоящую из азота с низким содержанием водорода, углекислого газа и оксида углерода.

## 6.6. Расчет катодных станций

Рассмотрим методику расчета катодной защиты. Такой расчет сводится к определению тока в цепи катодной установки, расчету системы анодного заземления и дренажной цепи (сооружение - катодная станция – анодное заземление), определению напряжения и мощности катодной станции, расчету электрической цепи распреедустройства в соответствии с имеющейся нормативно – технической документацией, определению места установки катодной станции.

За основной расчетный параметр принимается плотность защитного тока, представляющая собой отношение тока катодной станции к суммарной поверхности защищаемых сооружений, например, трубопроводов, кабелей и др.

В уточненных расчетах эта плотность  $j$  принимается равной: стерильная нейтральная почва -  $j \approx 4,3-16,1 \text{ mA/m}^2$ ;

хорошо аэрируемая нейтральная почва -  $j \approx 21,5-32,3 \text{ mA/m}^2$ ;

сухая, хорошо аэрируемая почва -  $j \approx 5,4-16,1 \text{ mA/m}^2$ ;

влажная почва -  $j \approx 16,9-64,6 \text{ mA/m}^2$ ;

высоко кислая почва -  $j \approx 53,8-161,4 \text{ mA/m}^2$ ;

почва, подтверждающая активность сульфатсодержащих бактерий -  $j \approx 451,9 \text{ mA/m}^2$ ;

подогрев в почве (например, трубопроводы сброса горячей воды -  $j \approx 53,8-269 \text{ mA/m}^2$ ;

сухой бетон -  $j \approx 5,4-16,1 \text{ mA/m}^2$ ;

влажный бетон -  $j \approx 53,8-269,0 \text{ мА/м}^2$ ;  
 неподвижная снежная вода -  $j \approx 53,8 \text{ мА/м}^2$ ;  
 движущаяся снежная вода -  $j \approx 53,8-64,6 \text{ мА/м}^2$ ;  
 высоко турбулентная вода, содержащая растворенный кислород -  $j \approx 53,8-161,4 \text{ мА/м}^2$ ;  
 горячая вода -  $j \approx 53,8-161,4 \text{ мА/м}^2$ ;  
 загрязненная вода устья -  $j \approx 53,8-4-161,4 \text{ мА/м}^2$ ;  
 морская вода -  $j \approx 53,8-269,0 \text{ мА/м}^2$ ;  
 химикалии, резервуары с кислотными или щелочными растворами -  $j \approx 53,8-269,0 \text{ мА/м}^2$ .

Обычно катодная защита используется совместно с изоляционными покрытиями, нанесенными на наружную поверхность защищаемого сооружения. Поверхностное покрытие уменьшает необходимый ток на несколько порядков. Так, для катодной защиты стали с хорошим покрытием в почве требуется плотность тока всего  $j \approx 0,01-0,2 \text{ мА/м}^2$ . Но по мере разрушения покрытия и оголения металла катодный ток необходимо увеличивать для обеспечения защиты сооружения.

Если защите подлежат трубопроводы определенного района, поверхность каждого из трубопроводов, имеющих между собой технологические соединения, обеспечивающие электрический контакт, либо соединение специальными перемычками, определяется по формуле

$$S = \pi \sum_{i=1}^n d_i \ell_i,$$

где  $d_i$  - диаметр  $i$ -го сооружения,

$\ell_i$  - длина участка  $i$ -го сооружения, имеющего диаметр  $d_i$ .

Суммарная поверхность всех трубопроводов, электрически связанных между собой, равна

$$\sum S = S_g + S_b + S_{\text{тел}},$$

где  $S_g, S_b, S_{\text{тел}}$  - поверхность газопроводов, водопроводов и теплопроводов соответственно.

Удельный вес поверхности каждого сооружения в общей их массе определяется по формулам

$$v = \frac{S_b}{\sum S} 100\%; \quad c = \frac{S_{\text{тел}}}{\sum S} 100\%; \quad g = \frac{S_g}{\sum S} 100\%;$$

Обозначим через  $d, e$  и  $f$  отношение поверхности каждого из трубопроводов на единицу поверхности территории защищаемого района  $S_{\text{тер}}$

$$d = S_g/S_{\text{тер}}; \quad e = S_b/S_{\text{тер}}; \quad f = S_{\text{тел}}/S_{\text{тер}}.$$

Средняя плотность тока, необходимого для защиты трубопроводов, определяется по формуле

$$j = 30 \cdot (99v + 128c + 33,9d + 3,33e + 0,61f + 4,96g) 10^{-3} \text{ мА/м}^2.$$

В случае, когда в защищаемом районе нет теплопроводов, значения коэффициентов  $c$  и  $f$  принимаются равными нулю. Аналогично при отсутствии водопроводов  $v=0$  и  $e=0$ .

Если расчетное значение  $j$  менее  $6 \text{ мА/м}^2$ , рекомендуется принимать  $j=6 \text{ мА/м}^2$ .

Суммарный защитный ток, необходимый для обеспечения катодной поляризации подземных сооружений, расположенных в данном районе

$$I = 1,3j \sum S_{мер}.$$

Мощность на выходе катодной станции

$$P_k = I_k^2 (Z_{вх} + R_{др} + R_3),$$

где  $Z_{вх}$  – входное сопротивление трубопровода;

$R_{др}$  – сопротивление дренажных проводов, соединяющих катодную станцию с трубопроводом и анодным заземлением;

$R_3$  – сопротивление растеканию анодного заземления;

$I_k$  – ток одной катодной станции.

Число катодных станций определяется с учетом того, чтобы сила тока одной катодной станции по возможности не превосходила  $25 \text{ А}$ , то есть  $n = I/25$ .

После размещения катодных установок на совмещенном плане проверяют зону действия каждой из них. Для цепи определяют радиусы действия каждой из катодных установок

$$r = 60 \sqrt{I_k / j \cdot K},$$

где  $I_k$  – ток катодной станции, для которой определяется радиус действия;  $K$  – удельная плотность поверхности сооружений.

При расчете параметров катодной защиты кабелей определяют силу тока катодной станции по формуле

$$I_k = \frac{|\varphi_{3\max}| - |\varphi_0|}{R_{вх} + \rho_3 / 2\pi y},$$

где  $\varphi_{3\max}$  – максимально допустимая величина защитного потенциала;

$R_{вх}$  – входное сопротивление защищаемого кабеля;  $\rho_3$  – удельное сопротивление грунта;  $y$  – расстояние между анодным заземлением и защищаемым подземным сооружением (обычно  $50 \text{ м} \geq y \geq 30 \text{ м}$ ).

Длина защитной зоны катодной станции определяется по формуле

$\ell_3 = I_k / j_3$ , где  $j_3$  – плотность тока на единицу длины кабеля, необходимая для катодной защиты.

Необходимое число катодных станций  $n_k$  рассчитывается по формуле

$N_k = L_k / \ell_3$ , где  $L_k$  – суммарная длина кабелей.

Мощность станции катодной защиты равна  $P = \sum P_k$ .

На основании расчетных значений тока и мощности выбирается соответствующий тип катодных станций. Они представляют собой источники постоянного тока с регулируемым или фиксированным выходным напряжением.

Рассмотрим теперь расчет электродренажной защиты. Такая защита подземных сооружений обеспечивается отводом блуждающих токов с сооружений к источнику этих токов. Как отмечалось, дренаж осуществляется путем электрического соединения подземного сооружения через дренажное

устройство с отрицательной шиной тяговой подстанции или с рельсами электрифицированного транспорта (метро, трамвай, электрички).

Электрические дренажи могут быть прямые, поляризованные и усиленные.

Прямой электрический дренаж обладает двусторонней проводимостью, то есть ток беспрепятственно протекает как с подземного сооружения в рельсовую сеть, так и в обратном направлении.

Поляризованный дренаж отличается от прямого лишь тем, что он обеспечивает протекание тока по дренажному соединению только в одном направлении с трубопровода или с оболочек кабеля в рельсы.

Усиленный дренаж представляет собой катодную станцию (выпрямитель) с той лишь разницей, что он подключается отрицательным полюсом к защищаемому сооружению, а положительным полюсом к рельсам влияющей электрифицированной железной дороги или трамвая.

Наибольшее распространение получил усиленный дренаж.

Радиус действия усиленного дренажа может быть ориентировочно определен по формуле

$$R = 60 \sqrt{I_{\text{др}} / jK},$$

где  $I_{\text{др}}$  – средняя сила тока усиленного дренажа;  $j$  – плотность защитного тока;  $K$  – удельная плотность сооружений:

$$K = \frac{\sum S}{S_{\text{тер}}},$$

$\sum S$  – суммарная поверхность защищаемых сооружений;  $S_{\text{тер}}$  – площадь территории, занимаемой защищаемым сооружением.

Ток дренажа может быть приближенно определен по формуле

$$I_{\text{др}} = U_{\text{др}} / (R_{\text{каб}} + R_{\text{вх}}),$$

где  $U_{\text{др}}$  – номинальное напряжение на выходе дренажного устройства;  $R_{\text{каб}}$  – сопротивление дренажного кабеля;  $R_{\text{вх}} \approx 0,02 \text{ Ом}$  – входное сопротивление защищаемого трубопровода.

Ток в дренажной цепи можно определить из расчета, что ток утечки из рельсов электрифицированной железной дороги в трубопровод  $I_{\text{др}}$  составляет не более 20% от токов нагрузки тяговой цепи  $I_{\text{мн}}$ , т.е.  $I_{\text{др}} = 0,2 I_{\text{мн}}$ , причем в расчетах применяется среднемесячная сила тока  $I_{\text{мн}}$ .

Однако для выбора дренажной установки максимальную силу тока определяют по формуле

$$I_{\text{др}} = 0,2 \cdot K_1 K_2 K_3 K_4 K_5 \cdot I_{\text{мн}},$$

где  $K_1$  – коэффициент, учитывающий расстояние между сооружением и электрифицированной железной дорогой (таблица 6.3);

$K_2$  – коэффициент, учитывающий расстояние от места пересечения трубопровода электрифицированной железной дороги до тяговой подстанции (таблица 6.4);

$K_3$  – коэффициент, учитывающий изоляционное покрытие трубопроводов (таблица 6.5);

$K_4$  - коэффициент, учитывающий время укладки трубопроводов (таблица 6.6);

$K_5$  - коэффициент, учитывающий количество параллельно уложенных трубопроводов (таблица 6.7).

Таблица 6.3

Значение коэффициента  $K_1$

Расстояние между сооружением и электрофицированной ж/д, м	до 100м	до 200м	до 300м	до 500м	до 800м	до 1000м	до 1500м	до 2000м	до 3000 м
Коэффициент $K_1$	1,0	0,95	0,9	0,75	0,65	0,55	0,35	0,25	0,15

Таблица 6.4

Значение коэффициента  $K_2$

Расстояние от трубопровода до тяговой подстанции, м	до 100м	до 500м	до 1000м	до 2000м	до 3000м	до 6000м
Коэффициент $K_2$	1,0	0,75	0,4	0,25	0,15	0,1

Таблица 6.5

Значение коэффициента  $K_3$

Вид изоляционного покрытия	Нормальный	Усиленный	Весьма усиленный
Коэффициент $K_3$	1,0	0,9	0,6

Таблица 6.6

Значение коэффициента  $K_4$

Время после укладки трубопровода	Более 5 лет	3 года	6 месяцев
Коэффициент $K_4$	1,0	0,9	0,75

Таблица 6.7

Значение коэффициента  $K_5$

Число трубопроводов (примерно одинакового диаметра)	1	2	3	4 и более
Коэффициент $K_5$	0,8	0,9	0,95	1,0

## 7. ПРОБЛЕМЫ ЭМС ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКИ С БИОСФЕРОЙ

В последнее время российские и зарубежные электроэнергетики уделяют все большее внимание к вопросам электромагнитной совместимости (ЭМС) электроэнергетики с биосферой. В этой сфере выделяются работы московской и новосибирской школ электроэнергетиков.

Эти проблемы, включающие опасные и мешающие влияния, были рассмотрены в главе первой. Здесь приводятся некоторые дополнительные данные о влиянии электромагнитных полей линий электропередачи на биосферу (людей и фауну).

### 7.1. Нормы интенсивности электромагнитных полей для людей и фауны

До 2003 года при проектировании ВЛ высокого напряжения учитывалась напряженность электрического поля под ЛЭП. Начиная с 2003 года были введены санитарно -эпидемиологические правила и нормы (СанПиН), которые устанавливают требования к производственным условиям по электромагнитным полям при различных частотах. Эти нормативы определяют предельно допустимые уровни (ПДУ) электрического и магнитного полей. В частности на частоте 50 Гц определяются отдельно напряженности электрического  $E$  и магнитного поля ( $H$  или индукции  $B$ ). ПДУ при частоте 50 Гц на рабочих местах персонала различна в зависимости от времени нахождения в полях.

ПДУ напряженности электрического поля (ЭП) на рабочем месте в течение всей смены устанавливается равным 5 кВ/м. При напряженностях в интервале от 5 до 20 кВ/м включительно допустимое время пребывания в часах рассчитывается по выражению

$$T = (50/E) - 2,$$

где  $E$ - напряженность ЭП в контролируемой зоне, кВ/м.

При напряженности от 20 до 25 кВ/м допустимое время пребывания в ЭП составляет 10 мин. Пребывание в ЭП с напряженностью более 25 кВ/м без применения средств защиты не допускается.

Предельно допустимые уровни напряженности магнитных полей (МП) устанавливаются для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия (табл.7.1).

Приведенные ПДУ электромагнитного поля относятся к персоналу, эксплуатирующему электротехнические установки (в том числе и воздушные линии). Однако к сожалению, эти нормативы не относятся к населению, проживающему или работающему вблизи воздушных линий высокого напряжения (ВЛ ВН). Вместе с тем в стандартах некоторых стран для населения рекомендуются пороговые значения напряженностей электромагнитного поля (ЭМП) примерно в 2,5 раза меньше приведенных значений.

Таблица 7.1

Предельно допустимые уровни воздействия магнитного поля частотой 50 Гц

Время пребывания, ч	Допустимые уровни МП, Н [А/м] / В [мкТл] при воздействии	
	общем	локальном
< 1	1600/2000	6 400/8000
2	800/1000	3200/4000
4	400/500	1600/2000
8	80/100	800/1000

Имеет важное значение механизмы влияния электромагнитных полей на человека. Приводятся два механизма такого влияния.

I. Нормальное функционирование клеток организма человека связано с обменом веществ через мембраны. Обмен осуществляется посредством открытия каналов в мембране, через которые проходят ионы натрия, кальция, хлора и других элементов. Открытие каналов происходит за счет электростатических сил, действующих на белковые молекулы мембраны вследствие различия концентраций ионов внутри и снаружи клетки. При этом фоновая напряженность электрического поля составляет 40 В/м, а плотность тока - 4 А/м<sup>2</sup>. Если внутри человека создать искусственное поле таких же параметров, то будут нарушены естественные процессы функционирования органов, например, наступит паралич нервных тканей или изменится ритм сокращения сердечной мышцы. Поле внутри человека может быть создано за счет токов смещения при воздействии переменного электрического поля, либо индуктированными токами за счет переменного магнитного поля. Этим условиям отвечают поля  $E = 1$  мВ/м и  $H = 1$  мА/м, которые никогда не встречаются. Поэтому смерть человека электрическим и магнитным полями при частоте 50 Гц не наступает. Имеют место более слабые эффекты. Восприимчивость электрических полей человеком сугубо индивидуальна: 5 % чувствуют поле 7 кВ/м, 60 % не ощущают поле 20 кВ/м.

Наиболее опасно воздействие электрических и магнитных полей промышленной частоты. Связано это с тем, что при большей частоте сказывается инерционность открытия мембран, а меньшей частоте отвечают меньшие индуктированные токи.

II. Происходит нагрев тканей при протекании через них токов. Безопасным считается нагрев на 1°С, что отвечает мощности 4 Вт на 1 кг массы тела. Для этого требуется 4 мВ/м и 50 мА/м - достаточно большие значения. Влияет также время экспозиции электромагнитного поля.

В мире в последние годы все большее внимание уделяется влиянию магнитных полей на здоровье населения. Электрики и медики все чаще говорят о необходимости снижать уровень магнитного поля, инициируемого воздушными линиями высокого напряжения (ВЛ ВН), зачастую локально (например, около школ, площадок для игр и т.д.). К сожалению, даже сильные поля находятся ниже зоны восприимчивости человеком (мерцания на периферийных участках поля зрения). Однако отсутствие восприимчивости не исклю-

чает вредного влияния магнитных полей относительно небольшой напряженности, какими являются поля, инициируемые ВЛ ВН.

Одним из возможных механизмов влияния магнитных полей на человека является влияние на выработку жизненно важного гормона - мелатонина. Мелатонин вырабатывается в темное время суток и является веществом, подавляющим развитие раковых клеток. Магнитные поля влияют на организм человека следующим образом: замедляется выработка мелатонина во время сна и снижается подавление размножения раковых клеток при наличии магнитного поля. Первое обстоятельство не подтвердилось экспериментально: у людей, находившихся в течение двух ночей в магнитном поле 1600 А/м, не обнаружено снижения концентрации мелатонина. Второе обстоятельство в настоящее время экспериментально невозможно ни опровергнуть, ни подтвердить. Возможность утраты свойств подавления раковых клеток под влиянием магнитного поля может быть подтверждена или опровергнута лишь с помощью длительных эпидемиологических исследований.

Таким образом, электроэнергетики должны точнее рассчитать магнитные поля и применять конструкции электрооборудования, которые приводят к снижению  $H$  или  $B$ , а медики – усилить наблюдение за людьми, работающими на ЭУ и проживающими вблизи ВЛ.

По мнению многих авторов эффект влияния электрических и магнитных полей надо рассматривать совместно. Быть может, в этом случае «работает» принцип синэнергетики - влияние двух совместно действующих факторов больше, чем простая сумма влияния каждого фактора порознь. Очевидно одно: надо по возможности так проектировать ВЛ ВН, чтобы обеспечивать минимальный уровень электромагнитного поля по их трассе в плоскости, перпендикулярной к оси линии примерно на расстоянии от оси  $\pm 30$  м (расстояние, обычно принимаемое при оценке интенсивности электромагнитного поля в мировой электроэнергетике).

Рассмотрим влияние электромагнитных полей на ихтиофауну.

В последнее время хозяйственная деятельность человека все более распространяется на водоемы, занимающие 2/3 поверхности Земли. При строительстве новых и эксплуатации существующих линий электропередач необходимо учитывать их экологическое влияние на ихтиофауну пересекаемых ими водоемов. В литературе по электроэкологии в основном оценивается только напряженность электрического поля в воде и декларируется, что оно значительно меньше допустимого уровня. Несмотря на это при строительстве постоянно увеличивающихся линий сверхвысокого класса напряжения, пересекающих водоемы, необходимо тщательно оценивать их опасность для ихтиофауны.

ЛЭП как экологический фактор представляет интерес не только в связи с его влиянием на ориентацию и сигнализацию у рыб. Высокая электропроводность воды, различия в диэлектрических свойствах многих водных объектов и, наконец, способности рыб генерировать биоэлектрические токовые поля послужили предпосылкой появления у рыб высокой электрической чувстви-



тельности. Многие виды рыб оказались единственными существами, обладающими способностью воспринимать и анализировать окружающий мир с помощью электрических и магнитных полей. По степени развития электрочувствительности рыб можно разбить на две группы: имеющих и не имеющих морфологически выраженных рецепторов. Однако, по сравнению с другими позвоночными все рыбы обладают высокой электрочувствительностью.

По данным [5] опасным воздействием на ихтиофауну нужно считать не только гибель ее представителей, но и разрушение сложившихся внутри- и межвидовых взаимоотношений. Особенно опасным может оказаться нарушение нерестового цикла. Например, осетровые способны метать икру только в том месте, где они родились. Достаточно один раз не пустить рыбу в нерестовую речку, чтобы речка перестала быть нерестовой. Подобный эффект был обнаружен впервые на Волге при ее пересечении ВЛ-500 кВ. Этот «барьер» на время приостановил миграцию волжского осетра.

Рыбы гораздо легче переносят импульсные или кратковременные воздействия электрического поля, чем длительное поле 50 Гц.

Еще в XIX веке было показано, что в яйцеклетках и икринках при длительной экспозиции электрического поля, во многих случаях происходит сильное расслаивание цитоплазмы.

Рассмотрим несколько гипотез А.С. Прессмана по влиянию биоэлектрических полей на жизнь живых организмов:

- «ЭМП поля могут использоваться для быстрой координации особей в группах и сообществах животных (маневры, координация движения...). Во всех этих случаях связь должна осуществляться на относительно небольших расстояниях с помощью однократных сигналов ЭМП, несущих небольшое количество информации»;
- «Излучаемые организмами дипольные по форме ЭМП могут служить сигналами для связи между особями противоположных полов». Сразу же отметим, что «факты» (отыскание самками самцов, групповая реакция стаи) могут быть объяснены иными механизмами (зрение и др.);
- «Организмы в популяции могут обмениваться электромагнитными сигналами, регулируя в популяции численность и способствуя посредством взаимосвязи электромагнитных сигналов обмену генетической информацией, приводящей к определенному видovому отбору» (никаких фактов в доказательство этой гипотезы не приводится);
- «ЭМП организмов в сообществах и группах животных, взаимодействуя с ЭМП внешней среды, могут быть причиной определенного поведения сообществ (например, миграций)».

Рыб подразделяют на три группы:

- *сильно электрические виды* (есть морфологически четко выраженные электрические органы, создающие вокруг тела рыбы сильные электрические поля с целью нападения и обороны);
- *слабо электрические виды второго рода* (нет специальных электрогенераторных тканей - так называемые неэлектрические);

• *рыбы с «рудиментными электрическими органами»* (применяют свои слабые электрические поля для локации и связи) - их в свое время выявил Лисман, применяя электронную технику. Им было доказано, что некоторые электрические виды рыб воспринимают и анализируют поля.

Высокая чувствительность слабоэлектрических видов рыб позволяет им электрически ориентироваться в окружающей среде: определять качество и локализацию объектов в воде, отличающихся проводимостью, различать электрохимически соленость воды, использовать свои сигналы в меж- и внутривидовых отношениях. Таким образом, мир ощущений у этих рыб - электрический.

Оказалось, что большинство слабо электрических видов рыб и некоторые электрические рыбы имеют особые электрические рецепторы - дериваты органов боковой линии - особые (электрические центры) в головном мозге. При этом различна электрочувствительность разных участков тела рыб с электроорганами. Эта особенность находится в прямой зависимости от локализации на теле рыбы электрических рецепторов. У некоторых рыб рецепторы отсутствуют на электрических органах и наиболее густо присутствуют на голове, спине и брюхе.

В [5] показано, что основными характеристиками, определяющими антропогенное влияние электрического поля на ихтиофауну, являются напряженность электрического поля и плотность тока в водной среде.

Неопределенно указываются характеристики электрического поля, при которых у рыб наступают возбуждение и шок. Однако до сих пор нет ясности относительно механизмов влияния на рыб электрического и магнитного полей.

У ряда видов рыб, обладающих электрическим ощущением, электрофизиологически удалось обнаружить в мозгу несколько типов нейронов, которые позволяют по-разному реагировать и ориентироваться на внешние электрические поля и движения, проводящих и непроводящих предметов в воде относительно тела рыбы. Оказалось, что в зависимости от движения объектов в воде относительно рыбы активность одних нейронов электрического центра повышается, а других, наоборот, подавляется. Деятельность таких нейронов-детекторов дает возможность рыбе получать информацию о положении и перемещении в воде заряженных объектов.

С помощью электрорецепторов рыбы исключительно тонко анализируют окружающую среду. Этому способствуют организация рецепторов и функционально разнообразные приемы кодирования их нервными волокнами электрической информации, посылаемой в мозг.

В ряде работ в качестве критерия показателей чувствительности рыб к действию электрического тока применяются данные о параметрах тока, вызывающих у рыб и других организмов реакцию возбуждения электроанемии и электронаркоза. Наиболее опасным для рыб является переменный ток с частотой 10... 100 Гц. Постоянный ток существенно меньше воздействует на рыб, чем переменный, причем воздействия электрических полей на рыб необходимо учитывать физические величины (или параметры), характеризую-

ющие начало (порог) определенных реакций рыб, которые выражаются или в плотностях тока, создаваемого электрическим полем, или в его напряженности, а также в условном напряжении на теле рыбы. Эти параметры зависят от ряда биотических и абиотических факторов.

*К биотическим факторам* относятся: вид рыб, их длина, возраст и физиологическое состояние в жизненно-годовом цикле, общая электропроводность тела.

*К абиотическим факторам* относятся: вид тока (постоянный, переменный в непрерывном или импульсном режиме); скважность, частота и длительность импульсов; форма импульсов; электропроводность воды; температура воды и ионный состав растворенных в воде солей.

Применяются следующие критерии (в основном для однородных полей и в предположении, что поле не искажается при внесении в него рыбы):

$U_1$  - напряжение тела рыбы, В;  $E_0$  - напряжение поля в водоеме, В/м;

$\delta_0$  - плотность продольного тока в воде, А/м<sup>2</sup>;  $dP$  - мощность, расходуемая на единицу объема воды, Вт/м<sup>3</sup>;  $P$  - полная мощность, поглощаемая телом рыбы, Вт;  $U$  - напряжение между электродами.

Широкое распространение имеет критерий  $E_0$  однако, так же как и  $U_1$  он не отражает влияния электропроводности воды. Это приводит к трудностям при сопоставлении или экстраполяции результатов экспериментов. В этом смысле выгодно отличается критерий  $\delta_0$ , который исчерпывающе характеризует интенсивность самого источника физиологического раздражения, т.е. поля токов в воде.

Видовая чувствительность рыб с биологической точки зрения объясняется различной организацией нервной системы у различных видов рыб, а с биофизической - различной общей электропроводностью тела у различных видов рыб.

*Абиотический фактор - температура воды* - косвенно может быть биотическим фактором. Действительно, изменение температуры воды непосредственно отражается на физиологическом состоянии и активности рыб, и в то же время изменение температуры окружающей среды, в свою очередь, изменяет электропроводность воды и общую электропроводность тела рыбы. Отсюда происходит изменение в распределении токов между телом рыбы и окружающей средой из-за различных величин электропроводности.

В [5] неоднократно встречается упоминание, что величина пороговых параметров реакций рыб на электрический ток зависит от возраста рыб. Однако статистически достоверных данных этой зависимости не приводится. Вместе с этим возраст прямо связан с длиной рыбы. Вероятно, что именно через длину тела рыбы осуществляется связь пороговых параметров реакций рыбы с ее возрастом.

Изменение физиологического состояния рыбы в годовом цикле ее жизни влияет на изменение величины пороговых параметров реакций рыбы на электрический ток.

Электропроводность воды отдельных водоемов значительно различается по величине. Так, электропроводность воды Онежского озера составляет 0,0038 1/(Ом·м), а Веселовского водохранилища 0,999 1/(Ом·м). Состав растворенных в воде солей влияет на чувствительность рыб к электрическому току. Так, в воде с одинаковой электропроводностью при преобладании соли  $\text{NaHCO}_3$  первичная реакция у плотвы (длина тела 20 см) проявляется при условном напряжении тела 0,25 В, а с преобладанием соли  $\text{KHCO}_3$  – 0,56 В. При тех же условиях порог шока у плотвы наступил при 3,26 В (в случае преобладания соли  $\text{NaHCO}_3$ ) и 1,17 В (с преобладанием в растворе соли  $\text{Na}_2\text{SO}_4$ ).

Под ВЛ переменного тока рыба долго не может прийти в себя после его воздействия. При длительном воздействии (свыше 60 с) возбуждение рыбы меняется на ее заторможенность, т.е. в стационарном режиме уровни напряженности выше порога возбуждения могут привести к необратимым изменениям в экосистеме. В нестационарных режимах вследствие их малой длительности 0,5...1 с при коротком замыкании на ВЛ и 0,5...3 с при однофазном автоматическом повторном включении ВЛ) рыба хотя и останется живой, но может получить травмы мышц, костей и дыхательных органов. Таким образом, ее гибель будет наблюдаться через определенное время, однако косвенно её гибель также может быть электрического происхождения. Для большинства рыб пороговые значения напряженности постоянного тока составляют: анодная реакция 5...10 В/м, для наркоза 20 В/м. Рыбы, находящиеся под воздействием электрического поля в стадии возбуждения и анодной реакции, не травмируются. У представителей пресноводных беспозвоночных порог гибели значительно выше, чем у рыб, и составляет около 20..50 В/см. У морских животных восприимчивость к электрическим полям выше, чем у пресноводных.

Как отмечалось, реакция рыб на переменный ток отличается от реакции на постоянный или импульсный ток. Первая стадия - вздрагивание. При дальнейшем увеличении напряжения наступает оборонительная реакция. Следующий этап - осциллотаксис. Это явление, когда рыба занимает положение поперек линий тока. При дальнейшем увеличении напряженности наступает электрошок. Переменный ток по сравнению с постоянным вызывает у рыб более сильное возбуждение. После его воздействия рыбы находятся в состоянии своеобразного гипноза.

Длительность воздействия электрического поля достаточно существенно влияет на выживаемость рыб. И этой связи постоянное воздействие в водной среде электрического поля, создаваемого рабочими токами в воздушных линиях электропередачи, несомненно, оказывает влияние, как на условия обитания рыб, так и на их нерест и миграцию.

Таким образом, пороговые значения характеристик электромагнитного поля, как под воздушными, так и над подводными ЛЭП существенным образом зависят как от характеристик водоема, так и от вида представителей ихтиофауны, обитающих, мигрирующих или нерестящихся в пересекаемом

ЛЭП водоеме. Как показал проведенный анализ, наиболее информативной характеристикой электромагнитного поля в водоеме может служить плотность продольного тока в воде, инициируемого токами в ЛЭП, пересекающей водоем. За основу по допустимой величине плотности продольного тока для разных видов рыб при отсутствии конкретных данных могут быть приняты величины (табл.7.2).

Таблица 7.2  
Пороговые значения плотности продольного тока для некоторых видов рыб

Вид рыбы	Длина рыбы, см	$\gamma_v \cdot 10^3$ , 1/Ом·м	$T_v$ , °С	$\delta$ , А/м <sup>2</sup>	
				возбуждения	иммобилизации
Гольян	3...4	-	-	0.97	1.25
Карп-сазан	5...7	30.3	15. .16	0.1 1	0.95... 1.26
Плотва	12.6	24.5	15... 18	0.12	0.55
Окунь	12	19.5	9... 10	0.11	0.41
Форель	5...7	30.3	15. .16	0.08...0,11	0,86... 0.96
Скорпена	17.1	24.6	16...17	0.13	0.59
Чавыча	62...80	25.1	7	-	0.19...0.25
Щука	32	70.7	-	0.09	0.56
Кета	-	6	2.,,7	0.01...0.04	0.06... 0.11
Лещ	18.4	15.4	4. .5	-	-
Судак	34.2	40	-	-	-

## 7.2. Расчет электрических полей под ВЛ

Длина волны электрического поля при частоте 50 Гц составляет ~ 6000 км, а реальная длина участков воздушных линий значительно меньше (рис. 7.1), поэтому электрическое поле под фазными проводами воздушных линий может рассматриваться как электростатическое. При определении  $E$  по трассе ВЛ обычно принимаются следующие допущения:

- поверхностная плотность заряда распределяется равномерно по периметру провода;
- поверхность земли принимается эквипотенциальной.

Оба этих допущения были подтверждены с помощью вычислительных экспериментов при расчете электростатического поля в воздушной среде численным методом конечных элементов (МКЭ).

С целью облегчения чтения текста пособия рассмотрим двухцепную линию по рис. 7.2, где фазные провода 1-3 и 4-6 имеют вертикальное расположение.

Напряженность электростатического поля в точке  $P$  с координатами  $y$  и  $h_p$  зависят от линейных плотностей зарядов, которые определяются на основе

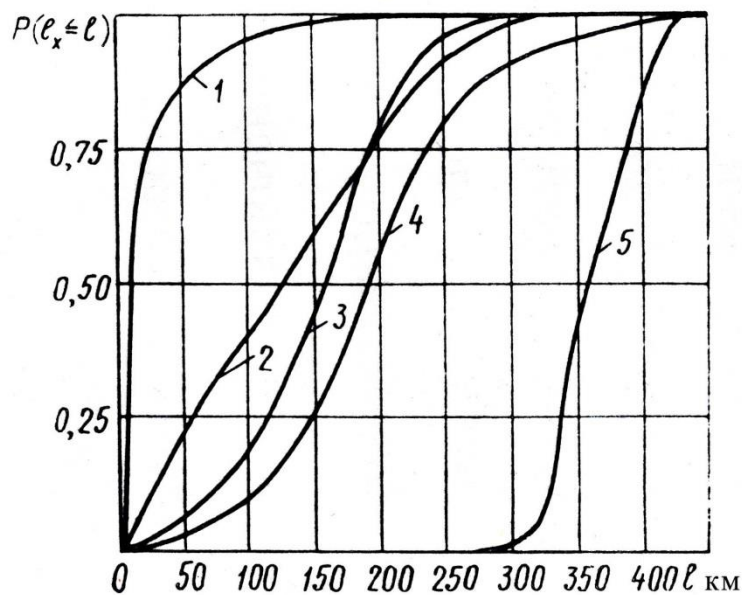


Рис. 7.1. Функции распределения длины линий 110 (1), 220 (2), 330 (3), 500 (4), 750 кВ (5)

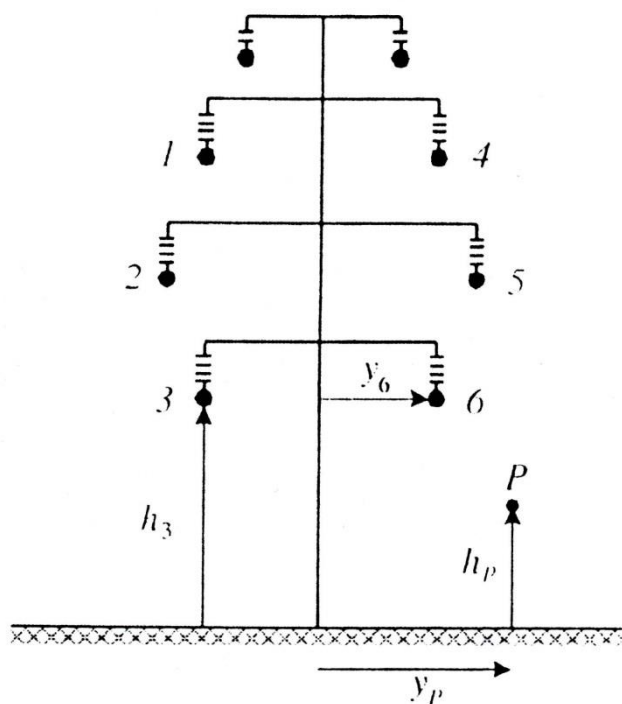


Рис. 7.2. Эскиз двухцепной опоры уравнений Максвелла

$$\tau = \beta \cdot U,$$

где  $\beta$  – матрица коэффициентов электростатической индукции:

$$\beta = \alpha^{-1};$$

$\alpha$  – матрица потенциальных коэффициентов, зависящая от габаритов подвески проводов ВЛ. При этом высота подвеса проводов в пролете, отвечающая наибольшей напряженности поля, может быть принята равной

$$H_{\min} = h_{\text{оп}} - f_{\text{пр}},$$

где  $h_{\text{оп}}$  – высота подвеса провода на опоре;  $f_{\text{пр}}$  – стрела провеса провода.

Как показано в [5], напряженность ЭП в точке Р с координатами  $y_p$  и  $h_p$ , определяемая линейной плотностью заряда  $i$ -го провода:

$$E_i(y, z) = \frac{\tau_i h_i}{\pi \epsilon_0} \frac{\exp - j \arctg \frac{(y_p - y_i)^2 + h_i^2 - h_p^2}{2(y_p - y_i)h_p}}{\sqrt{((y - y_i)^2 + h_i^2 - h_p^2)^2 + 4(y - y_i)^2 h_p^2}}, \quad (7.1)$$

где  $\tau_i$  – линейная плотность заряда  $i$ -го провода.

Результирующий вектор напряженности в рассматриваемой точке Р с координатами  $y_p$  и  $h_p$  определится как

$$E_p(y_p, h_p) = \sum_{i=1}^n E_i(y_p, h_p). \quad (7.2)$$

Как видно из (7.1) и (7.2), в каждой точке пространства, окружающего провода ВЛ, результирующий вектор напряженности электрического поля  $E(t)$  за период времени, равный периоду изменения напряжения на фазах ВЛ, изменяется во времени как по величине, так и по направлению, описывая своим концом эллипс, т.е. поле является вращающимся и поляризованным, то есть в какие-то моменты времени величина результирующего вектора в фиксированной точке пространства Р принимает максимальное и минимальное значения. При проведении практических расчетов электрического поля под ВЛ обычно определяется наибольшее значение напряженности электрического поля, тем не менее в ряде случаев интерес может представлять и минимальное значение напряженности в данной точке пространства.

Вектор напряженности электрического поля может быть в каждый момент времени разложен на компоненты в декартовой системе координат:

$$E(t) = \{E_x(t); E_y(t)\}.$$

Каждая из компонент  $E_x(t)$  и  $E_y(t)$  представляет собой синусоидальную функцию во времени:

$$E_x(t) = E_{x \max} \sin(\omega t + \varphi_x), E_y(t) = E_{y \max} \sin(\omega t + \varphi_y).$$

Модуль напряженности электрического поля в любой момент времени может быть записан в виде

$$E(t) = \sqrt{E_x^2(t) + E_y^2(t)},$$

или

$$E(t) = \sqrt{\dot{A}_{\sigma \max}^2 \sin^2(\omega t + \varphi_x) + \dot{A}_{y \max}^2 \sin^2(\omega t + \varphi_y)}.$$

Заменяя  $\sin^2(\omega t + \varphi)$  на  $(1 - \cos(2\omega t + 2\varphi))/2$ , получим

$$E^2(t) = \frac{\dot{A}_{\sigma \max}^2 + \dot{A}_{y \max}^2}{2} - \frac{\dot{A}_{\sigma \max}^2 \cos(2\omega t + 2\varphi_x) + \dot{A}_{y \max}^2 \cos(2\omega t + 2\varphi_y)}{2}$$

или

$$E^2(t) = A - B(t), \quad (7.3)$$

$$\text{где } A = \frac{\dot{A}_{\delta \max}^2 + \dot{A}_{y \max}^2}{2}, \quad B = \frac{\dot{A}_{\delta \max}^2 \cos(2\omega t + 2\varphi_x) + \dot{A}_{y \max}^2 \cos(2\omega t + 2\varphi_y)}{2}.$$

Из выражения (7.3) видно, что квадрат напряженности электрического поля представляет собой разность постоянной составляющей (А) и составляющей, изменяющейся по синусоидальному закону с двойной частотой (В(t)). Представив В в комплексной форме, получим

$$\begin{aligned} \dot{B} &= \frac{1}{2} \left[ E_{x \max}^2 e^{j(2\omega t + 2\varphi_x)} + E_{y \max}^2 e^{j(2\omega t + 2\varphi_y)} \right] = \\ &= \frac{e^{j2\omega t}}{2} \left[ E_{x \max}^2 e^{j2\varphi_x} + E_{y \max}^2 e^{j2\varphi_y} \right] = \dot{B}_{\max} e^{j2\omega t}. \end{aligned}$$

Так как  $E^2(t)$  максимальной величины достигает при минимальном значении  $\dot{B}$ , а максимальной, наоборот, при  $\dot{B}_{\max}$ , то  $E_{\max} = \sqrt{\dot{A} + |\hat{A}|}$ ,

$E_{\min} = \sqrt{\dot{A} - |\hat{A}|}$ . Или:

$$\begin{aligned} E_{\max} &= \sqrt{\frac{\dot{A}_{\delta \max}^2 + \dot{A}_{y \max}^2 + \left| \dot{A}_{\delta \max}^2 \dot{a}^{j2\varphi_x} + \dot{A}_{y \max}^2 \dot{a}^{j2\varphi_y} \right|}{2}}. \\ E_{\min} &= \sqrt{\frac{\dot{A}_{\delta \max}^2 + \dot{A}_{y \max}^2 - \left| \dot{A}_{\delta \max}^2 \dot{a}^{j2\varphi_x} + \dot{A}_{y \max}^2 \dot{a}^{j2\varphi_y} \right|}{2}}. \end{aligned}$$

Эффективное (действующее) значение напряженности поля в каждой точке пространства определится как

$$E_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \dot{A}^2(t) dt} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (\dot{A}_x^2(t) + \dot{A}_y^2(t)) dt}.$$

С учетом приведенных выше выражений получим

$$E_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{\dot{A}_{\delta \max}^2 + \dot{A}_{y \max}^2}{2}}.$$

Из последнего соотношения следует, что действующее значение напряженности электрического поля не зависит от фаз его компонент ( $E_x$  и  $E_y$ ), а определяется только их амплитудами.

### 7.3. Расчет магнитных полей под ВЛ

Для расчета магнитного поля под воздушными линиями высокого напряжения обычно принимают следующие допущения:

1) распределение тока в проводах принято асимметричным, то есть не учитывается эффект близости за счет соседних фазных проводов и составляющих в расщепленной фазе;

2) не учитываются поперечные проводимости и смещения в земле.



Первое допущение обосновано в ряде работ, в том числе в [5], а второе – Карсоном [5] при условии, что частоты не более 1 МГц, а удельное объемное сопротивление грунтов  $\rho_r \leq 100$  Ом·м.

При принятых допущениях, правомочность которых была достаточно убедительно доказана [5], напряженность магнитного поля, инициируемого током в  $i$ -м проводе, может быть определена с помощью простейшего выражения

$$\dot{I}_i = \frac{I_i}{2\pi\sqrt{(h_i - y)^2 + x_i^2}},$$

где  $h_i$ , - высота подвеса провода над землей;

$y$  и  $x_i$  - высота над землей и расстояние от оси линии точки наблюдения.

Составляющие напряженности магнитного поля по осям  $x$  и  $y$  определяются

$$\text{как } H_{ix} = H_i \cos \varphi_i, \quad H_{iy} = H_i \sin \varphi_i, \quad \text{tg } \varphi_i = \frac{h_i - y}{x_i}.$$

Для многопроводной ВЛ модуль напряженности магнитного поля в точке с координатами  $x$  и  $y$  можно найти следующим образом:

$$H(x, y, t) = \sqrt{\left(\sum_{i=1}^n H_{ix}(t)\right)^2 + \left(\sum_{i=1}^n H_{iy}(t)\right)^2}.$$

Как было показано применительно к напряженности электрического поля, напряженность магнитного также эллиптически поляризована и не является синусоидальной функцией времени. Причем максимальное, минимальное и действующее значения вектора  $H$  могут быть определены по выражениям:

$$H_{\max} = \sqrt{\frac{H_{\delta\max}^2 + H_{y\max}^2 + \left|H_{\delta\max}^2 \dot{a}^{j2\varphi_x} + H_{y\max}^2 \dot{a}^{j2\varphi_y}\right|}{2}},$$

$$H_{\min} = \sqrt{\frac{H_{\delta\max}^2 + H_{y\max}^2 - \left|H_{\delta\max}^2 \dot{a}^{j2\varphi_x} + H_{y\max}^2 \dot{a}^{j2\varphi_y}\right|}{2}},$$

$$H_{\text{эфф}} = \sqrt{\frac{H_{\delta\max}^2 + H_{y\max}^2}{2}}.$$

#### 7.4 . Электромагнитные поля под воздушными линиями высокого напряжения

Материалы, приведенные выше показывают, что напряженности электрического ( $E$ ) и магнитного ( $H$ ) полей по трассе ВЛ высокого напряжения зависят от рабочего напряжения ВЛ, токов в фазах, геометрического расположения проводов и фазировки последних.

В многопроводных ВЛ при уравновешенных системах трехфазных токов и напряжений наибольшая напряженность электромагнитного поля воз-

никает при достаточно больших расстояниях между фазными проводами, что обеспечивается малым влиянием на компенсацию электрических и магнитных полей, инициируемых зарядами на проводах и токами в них.

Последнее условие обычно имеет место на одноцепных ВЛ с горизонтальным расположением проводов на опорах portalного типа с металлическими стойками в окне опоры (рис. 7.3, таблица 7.1).

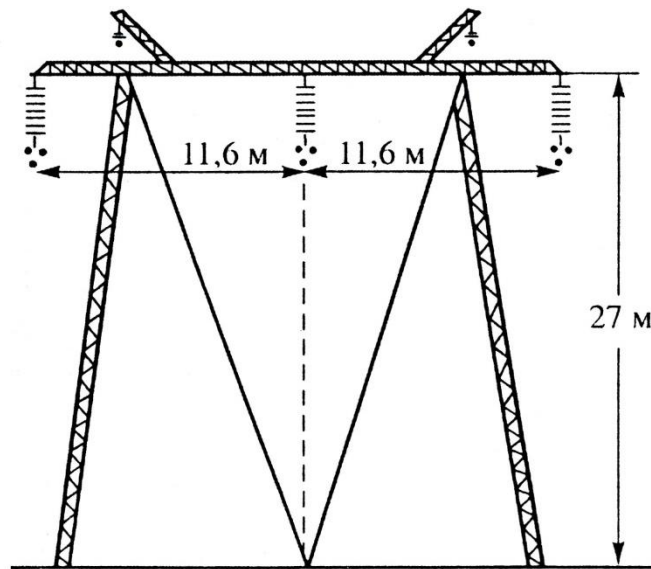


Рис. 7.3. Эскиз опоры воздушной линии 500 кВ

На рис. 7.3 качестве примера приведен эскиз конструкции опоры 500 кВ с горизонтальным расположением проводов.

Распределение  $E$  и  $H$ , кроме всего прочего, зависит от типа линии. С этой точки зрения можно выделить:

- одноцепные линии;
- двухцепные линии;
- линии повышенной пропускной способности.

Таблица 7.1

Габариты подвесок проводов воздушных линий 110–1150 кВ при горизонтальной подвеске фаз и натуральные токи

Характеристики ВЛ	$U_{ном}$ , кВ				
	110	220	500	750	1150
$I_{нат}$ , Аэфф	159	318	1069	1665	2656
$h_{пр.оп}$ , м	17,5	17,6	27	38	40
$h_{из.подв}$ , м	1,2	2,5	6	8	9
$d_{фф}$ , м	5	5,6	11,5	14,5	22,4
Стрела провеса, м	9	10	11	12	14
$h_{min.пр}$ , м	10,3	8,4	13,7	22	21,7
$r_{пр}$ , мм	10,53	12	15,3	11,2	12,6
$n_{сост}$	1	1	3	4	8

Далее приводятся распределения  $E$  и  $H$  для перечисленных линий влево и вправо от оси ВЛ на 30 м. Эти распределения заимствованы из [5]. На рис. 7.4 приведено распределение  $E$  и  $H$  в плоскости, перпендикулярной трассе одноцепной ВЛ-500 кВ. Она имеет провода  $3 \times AC$  400/51 с сечением  $445,1 \text{ мм}^2$ , стрелу провеса 12 м. Изоляторы на ВЛ – 24 штук, типа П - 4,5, строительная высота одного изолятора 16,7 см.

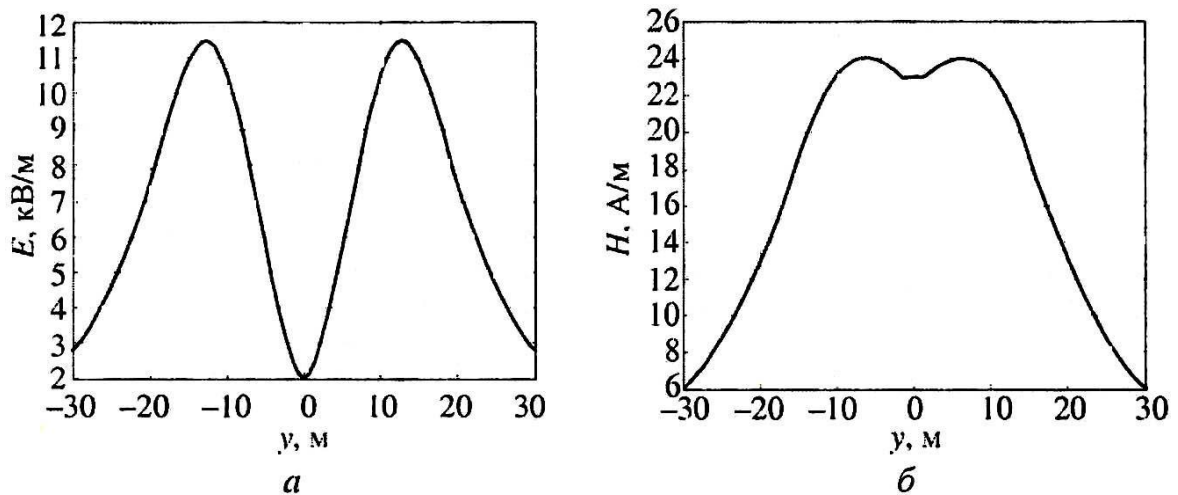


Рис. 7.4. Напряженности электрического (а) и магнитного (б) полей на расстоянии 2 м от поверхности земли по трассе воздушной линии 500 кВ с горизонтальным расположением проводов (рис.7.3)

Упомянутые выше распределения  $E$  и  $H$  по трассе ВЛ зависят от высоты точки наблюдения над землей, от класса напряжения, от вида расположения фазных проводов и их фазировки. Для примера на рис. 7.5 и 7.6 приведены распределения  $E$  и  $H$  для ВЛ 330 кВ с вертикальным расположением фаз. Как следует из этих рисунков, изменение фазировки проводов на оптимальное на двухцепных ВЛ 110, 220, 330 кВ с вертикальным расположением фаз позволяет уменьшить максимальные уровни напряженностей электрического поля на уровне подвеса троса в 1,8, 1,6 и 1,8 раза соответственно, а на высоте 2 м – в 3,6, 3,0 и 1,9 раза.

Результаты аналогичных расчетов магнитных полей по трассам двухцепных ВЛ 110 и 220 кВ показали, что нетрадиционная фазировка проводов на двухцепных опорах с вертикальной подвеской проводов позволяет уменьшить напряженность электромагнитного поля под трассами ВЛ 110-330 кВ на высоте 2 м от поверхности земли примерно в 3,0...3,3 раза, а на высоте подвески тросов - в 1,2... 1,3 раза.

В последние годы в мире все шире стали применяться компактные ВЛ (КВЛ), позволяющие передать большую энергию в отведенном объеме для электропередачи, чем ВЛ традиционного исполнения. Натуральная мощность КВЛ выше, чем ВЛ традиционного исполнения, что и позволяет добиться большей пропускной способности ВЛ. Очевидно, что при проектировании таких ВЛ должен быть применен системный подход. Компактирование каналов передачи электроэнергии осуществляется как сближением фаз на опоре,

так и изменением конструкции фазного провода - увеличением либо числа составляющих, либо радиуса расщепленной фазы.

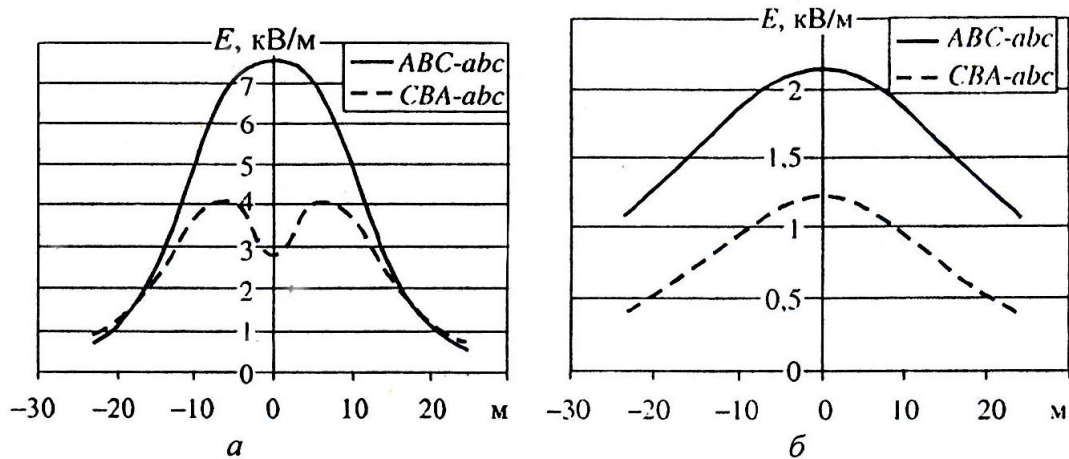


Рис. 7.5. Напряженности электрического поля по трассе двухцепной воздушной линии 330 кВ с вертикальным расположением фаз: а – на высоте 2 м, б – на высоте 43 м

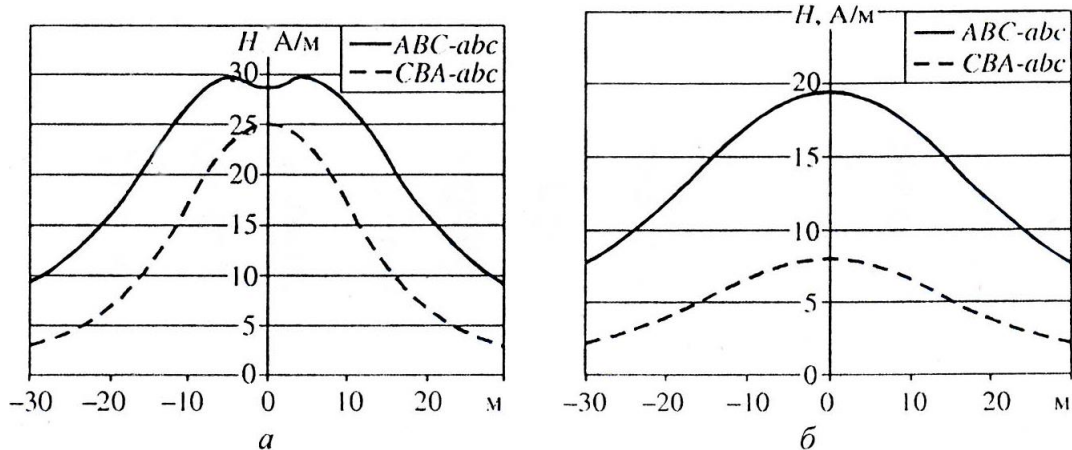


Рис. 7.6. Напряженности магнитного поля по трассе двухцепной воздушной линии 330 кВ с вертикальным расположением фаз: а – на высоте 2 м, б – на высоте 43 м

На рис. 7.7 и 7.8 приведены максимальные мгновенные значения напряженностей электрического и магнитного полей в сечениях ВЛ и КВЛ, отвечающих наименьшей высоте подвеса провода над землей на расстоянии 2 м от поверхности земли. Параметры ВЛ и КВЛ приведены в таблице 7.2.

Из приведенных рисунков видно, что максимумы напряженностей электрического и магнитного полей по трассам ВЛ и КВЛ 500 кВ снизились примерно в 4 и 2 раза соответственно, а их значения на расстоянии 30 м от оси опоры - в 4 и 3 раза. Напряженности электрического и электромагнитного полей под КВЛ 500 кВ на расстоянии 30 м от оси опоры составляют 0,8 кВ/м и 2,5 А/м. Таким образом, сближение фаз и расположение их треугольником позволило не только увеличить передаваемую мощность в 1,34 раза и уменьшить требуемую ширину коридора ВЛ в 5,2 раза, но и существенно снизить интенсивность электромагнитного поля под КВЛ 500 кВ. И хотя стоимость сооружения КВЛ 500 кВ из-за большей высоты V-образной подвески

проводов примерно на 10% превышает стоимость сооружения ВЛ 500 кВ, но удельная стоимость сооружения на единицу передаваемой мощности оказывается меньше на 20%.

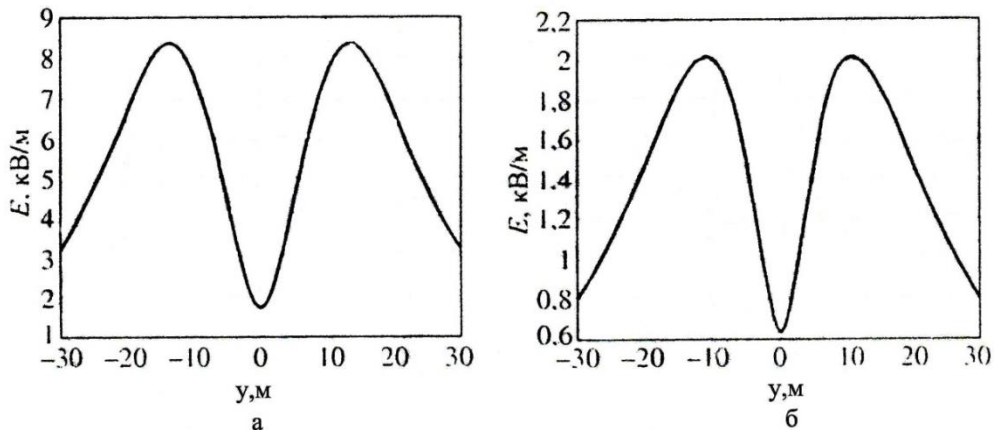


Рис. 7.7. Распределение напряженности электрического поля в направлении плоскости, перпендикулярной оси воздушной линии (а) и компактной воздушной линии (б) 500 кВ

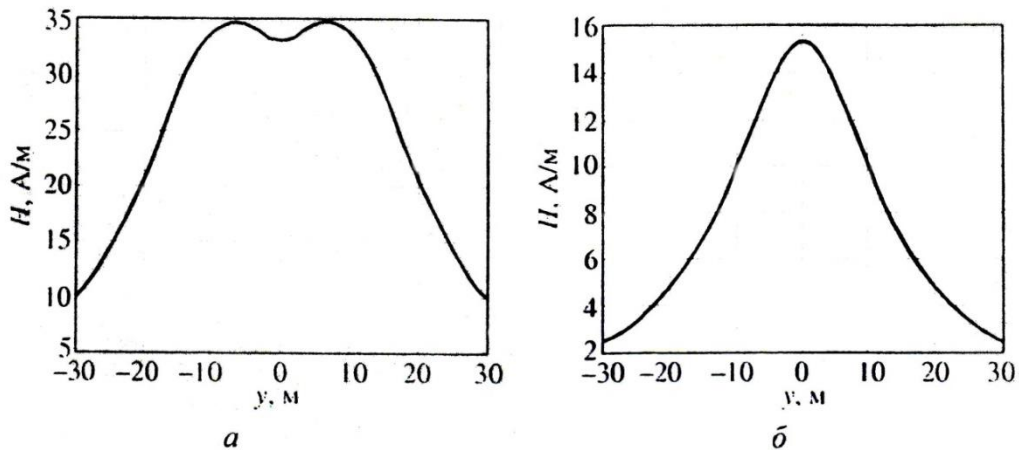


Рис. 7.8. Распределение напряженности магнитного поля в направлении плоскости, перпендикулярной оси воздушной линии (а) и компактной воздушной линии (б) 500 кВ

Таблица 7.2

Некоторые характеристики воздушных линий и компактных воздушных линий 500 кВ.

Параметры	ВЛ-500	КВЛ-500
$Z_B$ , Ом	251	187,7
$P_{нат}$ , МВт	996	1332
$J$ , А/мм <sup>2</sup>	0,736	1,049
Шум, дБ	32,5	39,9
Ширина коридора, м	24,6	6,7
$I_{ном}$ , А <sub>действ</sub>	1663	2328
Стрела провеса, м	13,5	12,8

В последние годы в мировой литературе обсуждаются различные варианты расположения фаз на опоре компактных линий (рис. 7.9). В таблице 7.3 приведены величины  $H$  на расстоянии 30 м от центра системы фазных проводов на высоте 2 м от поверхности земли. Расстояние между фазными про-

водами принималось равным 6 и 11,9 м. Высота подвеса центра системы фазных проводов принималась равной 10,5 м. Все результаты даны в относительных единицах по отношению к напряженности магнитного поля для первой конструкции при горизонтальном расположении фаз (1 на рис. 7.9).

Таблица 7.3

Влияние способа расположения фаз в окне опоры на напряженность магнитного поля

S, м	Вариант подвески проводов (рис. 2.9)				
	1	2	3	4	5
6	1	1,12	0,22	0,81	0,62
11,9	1	0,77	0,63	2,81	0,51

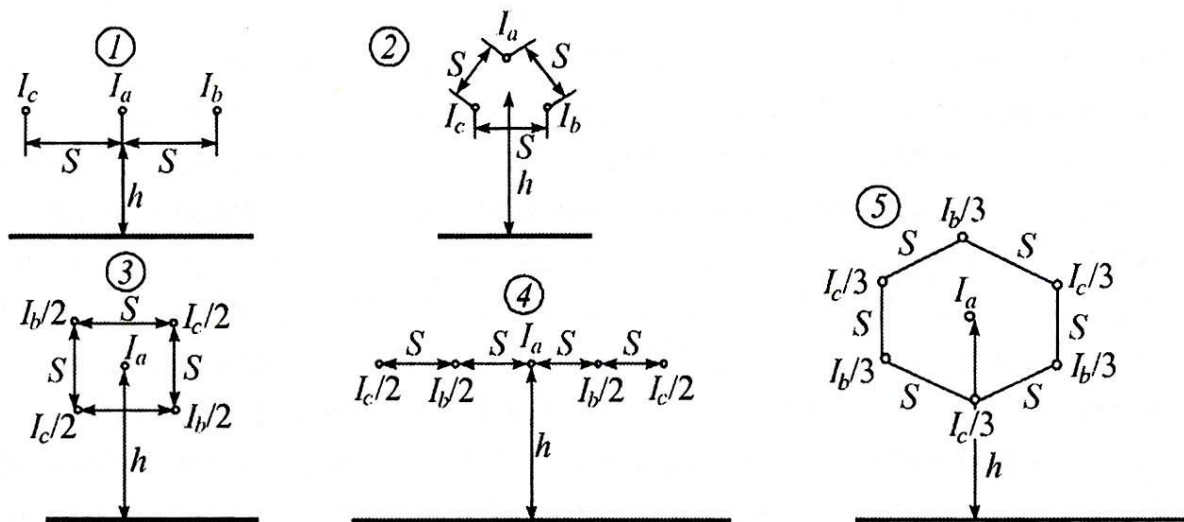


Рис. 7.9. Различные способы расположения фаз на опорах воздушных линий высокого напряжения

Из таблицы видно, что преимущество того или иного расположения фаз при традиционных способах подвески проводов: горизонтальном и треугольном (1 и 2 на рис. 7.9) - зависит от расстояния между фазами. При близко расположенных фазах преимущество с точки зрения интенсивности магнитного поля имеет горизонтальное расположение проводов. При более удаленном расположении фаз преимущество имеет их треугольное расположение.

К наибольшему ослаблению магнитного поля при любом расстоянии между проводами приводит нетрадиционное расположение фаз в варианте 5. Одна нерасщепленная фаза расположена в центре системы, две другие, расщепленные на три нитки, расположены по кругу при чередовании фаз b и c.

Результаты еще раз показывают достаточно существенное влияние взаимного расположения фазных проводов на интенсивность электромагнитного поля по трассам ВЛ.

Нельзя не отметить также, что сближение фаз может привести к повышению вероятности перекрытия изоляционных промежутков ВЛ при коммутационных и грозовых перенапряжениях. При оснащении ВЛ устройствами ОАПВ увеличивается вероятность непогасания дуги за приемлемое время бестоковой паузы ОАПВ, так как электрические и магнитные связи между включенными и отключенной фазами в компактных ВЛ усиливаются. В последнем случае теряются преимущества ОАПВ, так как с помощью устройств автоматики в результате будут отключаться все три фазы.

### 7.5. Электромагнитная совместимость подземных и подводных линий электропередачи с окружающей средой и ихтиофауной

В настоящее время находят широкое применение кабели с пластмассовой изоляцией, у которых отсутствует, броня и поверх экранов накладывается оболочка из поливинилхлоридного пластика.

Разумеется, в таких кабелях имеются два источника тепла: жилы, по которым течет рабочий ток, и токи в экранах. Если первый источник диктуется основным назначением кабеля, то второй, наоборот, ухудшает тепловой баланс кабеля и вызывает нагрев окружающей почвы. Последний процесс может привести, например, к снижению урожайности.

Здесь наибольшее значение имеет ток в экранах, который в значительной степени зависит от конструкции кабеля.

Для определения токов в экранах кабелей существуют две теоремы С.А.Шелкунова С.А. [5].

1. Если обратный ток возвращается полностью либо по внутренней поверхности цилиндрического полого проводника, либо внутри его, то продольная напряженность электрического поля  $E$  на соответствующей поверхности проводника, ближайшая к пути обратного тока, равна сопротивлению проводника на единицу длины, умноженному на полный ток в проводнике. При этом  $E$  поля на противоположной поверхности равна взаимному сопротивлению, умноженному на полный ток в проводнике.

2. Если обратный ток возвращается частично снаружи, а частично внутри, то составляющие напряженности рассчитываются от каждой доли тока в соответствии с теоремой 1, а затем складываются.

Токи в экранах кабелей с пластмассовой изоляцией  $I_{ЭА}$ ,  $I_{ЭВ}$  и  $I_{ЭС}$  вызывают потери  $P_{\text{доп}}$ , равные

$$P_{\text{доп}} = P_{\text{э}} = (I_{ЭА}^2 + I_{ЭВ}^2 + I_{ЭС}^2) \cdot R_{\text{э}},$$

где  $R_{\text{э}}$  – погонное активное сопротивление экрана.

$P_{\text{доп}}$ , отнесенное к потерям в жилах, будут

$$\frac{P_{\text{доп}}}{P_{\text{ж}}} = \frac{1}{3} \left( \frac{I_{ЭА}^2}{I_{\text{ж}}^2} + \frac{I_{ЭВ}^2}{I_{\text{ж}}^2} + \frac{I_{ЭС}^2}{I_{\text{ж}}^2} \right) \frac{R_{\text{э}}}{R_{\text{ж}}},$$

где  $R_{\text{ж}}$  – погонное активное сопротивление жилы.

Во многих работах, допускают, что в первом приближении  $R_{\text{э}} \approx R_{\text{ж}}$ .

Расчетная схема для определения теплового режима КЛ в грунте имеет вид (рис. 7.10)

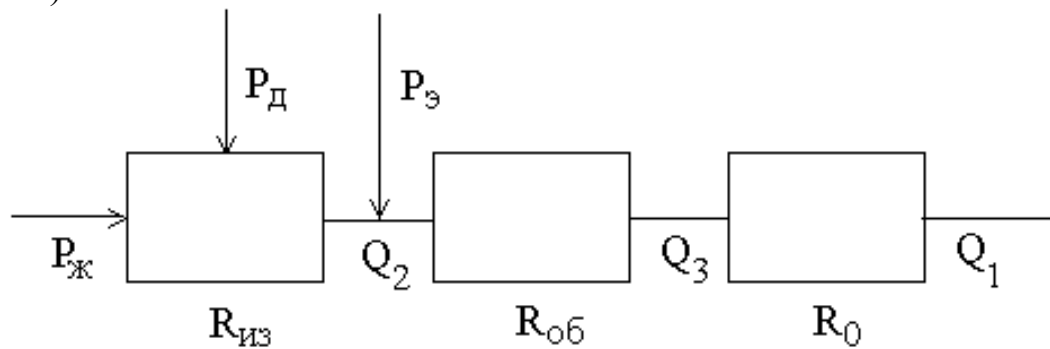


Рис. 7.10. Расчетная схема для определения теплового режима кабельной линии в грунте

где  $R_{ж} = I_{ж}^2 \cdot R_{пог.ж}$  – мощность, генерируемая жилой;

$I_{ж}$  – ток в жиле;

$R_{пог.ж}$  – погонное активное сопротивление жилы;

$P_{д}$  – диэлектрические потери в изоляции, определяемые по формуле

$$P_{д} = U_{\phi}^2 \cdot \omega \cdot C \cdot \operatorname{tg} \delta,$$

$U_{\phi}$  – фазное напряжение КЛ;

$\omega$  – угловая частота;

$$C = \frac{2\pi \cdot \varepsilon \cdot \varepsilon_0}{\ln \frac{r_2}{r_1}} - \text{емкость между жилой и экраном;}$$

$\operatorname{tg} \delta$  – тангенс угла диэлектрических потерь в диэлектрике между жилой и экраном, так, например, для термопластического полиэтилена  $\operatorname{tg} \delta = 0,001$ ;

$P_{э} = I_{э}^2 \cdot R_{пог.э}$  – активная мощность, выделяемая в диэлектрике,

где

$I_{э}$  – ток в экране;

$R_{пог.э}$  – погонное активное сопротивление экрана;

$R_{из}$  – термическое сопротивление изоляции;

$$R_{из} = \frac{\rho_{из}}{2\pi} \ln \frac{r_2}{r_1},$$

где  $\rho_{из}$  – удельное термическое сопротивление изоляции: для полиэтилена

-  $\rho_{из} \approx 3,5 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ , для ПВХ – пластика -  $\rho_{из} = 5,5 \text{ К}\cdot\text{м}/\text{Вт}$ ;

$R_{об}$  – термическое сопротивление оболочки;

$R_0$  – термическое сопротивление грунта

$$R_0 = \frac{\rho_{оз} \cdot \ln \left( \frac{d/r_4 + \sqrt{(d/r_4)^2 - 1}}{d/r_4 - \sqrt{(d/r_4)^2 - 1}} \right)}{4\pi}, \quad (7.4)$$

где  $d$  – расстояние от оси кабеля до поверхности земли;



$r_4$  – внешний радиус кабеля;

$\rho_{oz}$  – удельное термическое сопротивление грунта.

При условии  $d \gg r_4$  формула (7.4) упрощается и приобретает вид

$$R_0 = \frac{\rho_{oz}}{2\pi} \ln \frac{2d}{r_4}.$$

В [5] для определения  $R_0$  предлагается следующее выражение при прокладке фаз в вершинах равностороннего треугольника:

$$R_0 = \frac{\rho_{oz}}{2\pi} \left( \ln \frac{2d}{r_4} + 2 \ln \frac{d}{r_4} \right).$$

Уравнение теплового баланса для схемы рис. 7.10 будет иметь вид

$$T_{ж} - T_0 = P_{ж} (R_{из} + R_{об} + R_0) + P_{д} (R_{из}/2 + R_{об} + R_0) + P_{э} (R_{об} + R_0). \quad (7.5)$$

Известно, что для КЛ с пластмассовой изоляцией  $T_{ж} = 80 \div 85^\circ\text{C}$ . Воспользуясь уравнением теплового баланса (7.5) можно решать прямую или обратную задачи:

1. при заданном токе в жиле и температуре окружающей среды  $T_0$  определяем температуру жилы.
2. при заданной температуре  $T_{ж}$  определяем  $T_0$  и сравниваем ее с допустимой для района расположения КЛ (с точки зрения эскалации тепла и эрозии почвы).

Директивными документами оговорена продолжительность эксплуатации КЛ в режиме перегрузки (не более 8 ч в сутки и не более 1000 ч за время нормируемого срока службы), при коротких замыканиях – не более 4 с.

В таблице 7.4 приведены допустимые температуры для жил КЛ с различными изоляциями, в таблице 7.5 – влияние температуры на пропускную способность КПИ 35 кВ с параметрами:  $r_1 = 5,5$  мм;  $r_2 = 15,1$  мм;  $\gamma_m = 5,7 \cdot 10^7$  1/Ом·м;  $\gamma_{ал} = 3,8 \cdot 10^7$  1/Ом·м;  $d = 0,8$ ;  $T_0 = 15^\circ\text{C}$ ;  $T_{ж} = 80^\circ\text{C}$ .

Из таблицы 7.5 видно, что  $T_0$  значительно влияет на пропускную способность кабеля с полиэтиленовой изоляцией (КПИ). Если он превышает величину на  $50\text{--}60^\circ\text{C}$ , то пропускная способность КПИ будет определяться не нагревом изоляции, а перегревом грунта. При  $T_0 = 15^\circ\text{C}$ , а также номинальном токе жилы  $T_{ж}$  практически всегда не превышает  $\sim 70\%$  от предельно допустимой по нагреву изоляции.

Таблица 7.4

Допустимая температура нагрева жил

Материал изоляции	Длительная температура, $^\circ\text{C}$	Предельно допустимая температура при коротком замыкании, $^\circ\text{C}$
Полиэтилен	70	150
Сшитый полиэтилен	90	250
Поливинилхлорид	70	160
Этиленпропиленовая резина	90	250

Таблица 7.5

Влияние температуры грунта на пропускную способность кабеля с полиэтиленовой изоляцией

Материал жилы и экрана	Способ прокладки	$T_{ж}, ^\circ\text{C}$ ( $I_{ж} 250 \text{ A}_{эфф}, T_0=15$ $^\circ\text{C}$ )		$T_0, ^\circ\text{C}$ ( $T_{ж}=80^\circ\text{C}$ )
		Толщина экрана, мм		
		0.05	0.20	0.05
Медные жила и экран	Траншейная	47.9	48.0 60.7	56.4
	Свободная	51.7		56.2
Алюминиевые жила и экран	Траншейная	57.9	59.0 68.5	51.9
	Свободная	65.1		59.1
Алюминиевая жила Медный экран	Траншейная	45.8	45.6 45.6	59.1
	Свободная	45.9		50.2

В ряде случаев КПИ помещают в защитные трубы, в качестве которых используют водо- и газопроводные трубы. Разумеется, труба является источником тепла, и она должна быть учтена в расчетах.

Схема теплового баланса в этом случае имеет вид, приведенный на рис. 7.11, где:

$R_{из}$  – термическое сопротивление основной изоляции кабеля;

$R_{об}$  – термическое сопротивление воздушной прослойки между внешней оболочкой кабеля и защитной трубой;

$R_0$  – термическое сопротивление грунта, окружающего трубу.

Здесь новыми по сравнению с рис. 7.10 являются  $R_{тр}$  и  $P_{тр}$ .

Тепловыделение в трубе (обычно из стали) вызывается продольными вихревыми токами, которые при отсутствии мер по заземлению трубы практически полностью замыкаются по толще трубы.

Полные потери в трубе могут быть определены как

$$P_{тр} = \frac{1}{\gamma_a} \iint_{\text{по сечению труб}} |\dot{\delta}_z(x, y)|^2 dx dy,$$

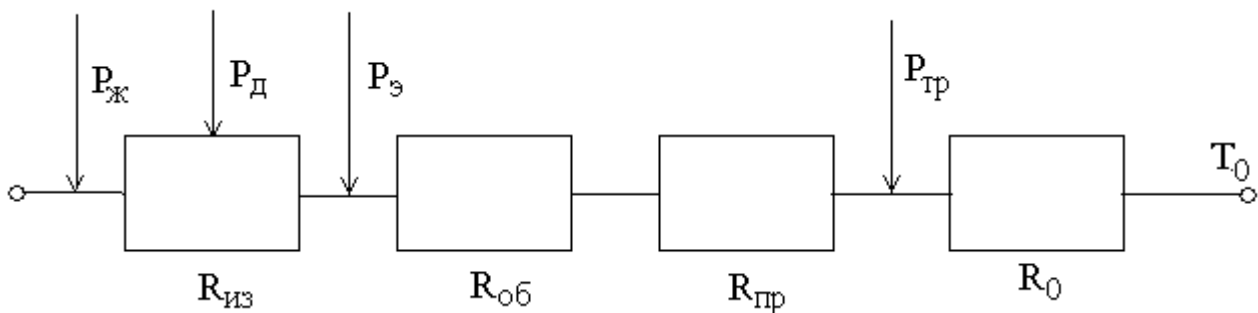


Рис. 7.11. Схема теплового баланса кабеля с полиэтиленовой изоляцией, помещенного в защитные трубы.

а тепловое сопротивление воздушной прослойки

$$R_{пр} = \frac{1}{2\pi \cdot \varepsilon_k \cdot \lambda_{возд}} \ln \frac{A_1}{A_2},$$

где  $\gamma_a$  – проводимость;

$\delta_z$  – плотность тока;

$$A_1 = \frac{1 + x_0 - r_x^2}{2x_0} - \frac{1}{2x_0} \sqrt{(x_0^2 - r_x^2 + 1)^2 - 4x_0^2}, \quad A_2 = \frac{a(a + r_x - x_0)}{1 + a(r_x - x_0)},$$

$$x_0 = (r_{тр} - r_2 - \Delta_{ПВХ});$$

$r_2$  – внешний радиус экрана;

$r_{тр}$  – внутренний радиус трубы;

$\Delta_{ПВХ}$  – толщина внешней ПВХ оболочки кабеля.

Как отмечалось, в настоящее время кабели с бумажно-пропитанной изоляцией и масло- наполненные кабели заменяются кабелями с пластмассовой изоляцией, причем последние имеют как однофазные, так и трехфазные конструкции. Поскольку КПИ испытывают большие механические нагрузки, они для работы под водой в обязательном порядке имеют броню.

Эскизы конструкций КПИ однофазного и трехфазного исполнения приведены на рис. 7.12. где приняты следующие обозначения:

- 1 - многопроволочная медная жила;
- 2 - полупроводящий слой по жиле;
- 3 - изоляция из сшитого полиэтилена (СПЭ);
- 4 - полупроводящий слой по изоляции;
- 5 - экран из медной проволоки и медной ленты;
- 6 - полупроводниковый слой;
- 7 - водонабухающий блокирующий слой;
- 8 - полиэтиленовая оболочка;
- 9 - три фазных изолированных провода с пропиленовыми лентами;
- 10 - оплетка, выполненная из пластиковых лент;
- 11 - подушка брони из полипропиленовых жгутов;
- 12 - броня из стальных проволок;
- 13 - защитная оболочка.

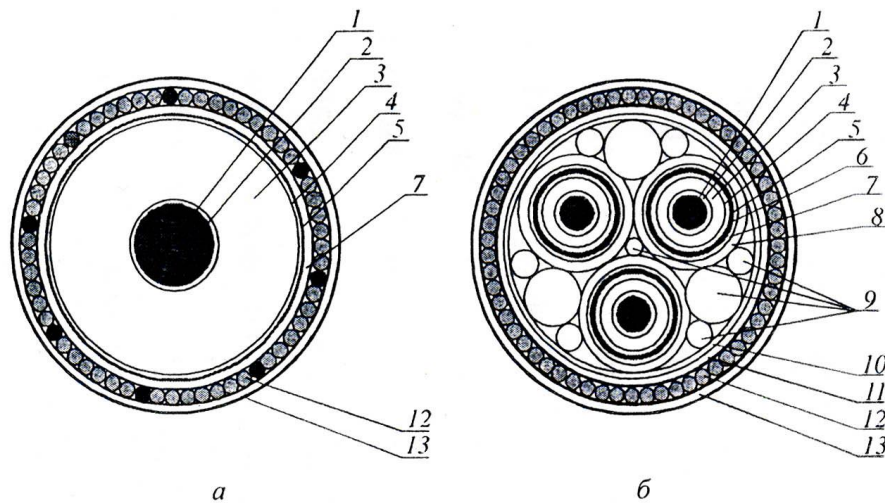


Рис. 7.12. Эскизы конструкций подводных кабелей с полиэтиленовой изоляцией 35 – 110 кВ однофазного (а) и трехфазного (б) исполнений

В зависимости от физико-механических свойств грунта, рельефа и структуры дна, скорости подводных течений, а также степени судосходности водоема возможны следующие способы подводной прокладки КЛ:

- для трехфазной системы однофазных КЛ - на дне водоема (горизонтальное расположение фаз на удалении 50...80 метров друг от друга, рис. 7.13, а) и в траншее, вырытой в дне водоема (прокладка фаз треугольником вплотную, рис. 7.13, б);
- для КЛ ТИ - на дне водоема (рис. 7.13, в).

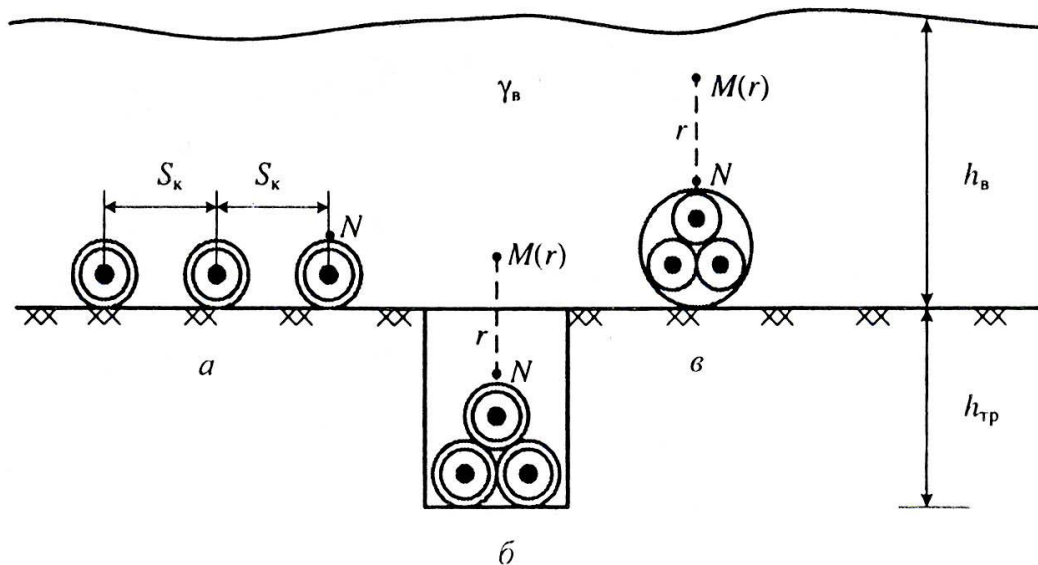


Рис. 7.13. К анализу интенсивности электромагнитного поля в водной среде при различном расположении кабельных линий на дне водоема

Как отмечалось в главе первой, для ихтиофауны важное значение имеет плотность продольного тока в водной среде. Учитывая то, что кабельные линии имеют броню при расчетах напряженности электромагнитного поля можно пренебречь эффектом близости. Справедливость такого допущения вызвана двумя обстоятельствами:

- 1) обычно на дне водоема фазы КЛ удалены друг от друга на десятки метров;
- 2) реальные глубины залегания КЛ в водной среде значительно превышает радиус кабеля.

Поэтому электромагнитные поля, создаваемые токами в отдельных фазах, следует рассматривать изолированно.

Плотность продольного тока в точке М равна

- при свободной прокладке фаз КЛ на дне водоема

$$\delta_z(M) = \mu_0 \cdot f \cdot \gamma_{cp} \cdot \left[ \dot{I}_{cp\phi} \sqrt{(\ln 0,8905 \cdot k \cdot r_k)^2 + \pi^2 / 16} \right];$$

- при траншейной прокладке фаз КЛ на дне водоема (рис. 3.4)

$$\delta_z(M) = \mu_0 \cdot f \cdot \gamma_{cp} \cdot \left[ \dot{I}_{cpA} \sqrt{(\ln 0,8905 \cdot k \cdot r_k)^2 + \pi^2 / 16} + \right.$$

$$+ 2I_{\text{ср В}} \sqrt{(\ln 0,8905 \cdot \dot{k} \cdot 2,9 r_{\kappa})^2 + \pi^2 / 16} \Big],$$

где  $\dot{k} = \sqrt{j \cdot \mu_0 \cdot f \cdot \gamma_{\text{ср}}}$  – волновое число водной среды;  $\gamma_{\text{ср}}$  – проводимость водной среды;  $f$  – промышленная частота;  $I_{\text{ср}}$  – суммарный ток в водной среде, определяемый как векторная сумма токов в жиле, экране и броне (в металлических элементах фаз КЛ).

Таким образом, при прокладке трехфазной системы КЛ триаксиальной конструкции в водоеме вдоль трассы каждой фазы КЛ течет ток, равный геометрической сумме токов в жиле, экране и броне, а вдоль трассы трехфазной КЛ – ток, равный геометрической сумме тока, инициируемых тремя фазами КЛ.

Наибольшую величину  $\delta_z$  (м) имеет при горизонтальном расположении фаз КЛ, проложенных на дне водоема при значительном расстоянии друг от друга. При других расположениях фаз надо стремиться к тому, чтобы электромагнитные поля, инициируемые разными фазами, максимально компенсировали друг друга. При прокладке КЛ однофазной конструкции такая компенсация достигается расположением фаз КЛ на дне водоема, либо в траншее в вершинах правильного треугольника.

При передаче энергии по кабелю триаксиальной конструкции (жила-экран-броня) ток в водной среде зависит от суммы токов, протекающих по жиле, экрану и броне. Токи в экране и броне направлены по отношению к току в жиле под углом, близким к  $180^\circ$ , зависящим от соотношения между активными и реактивными составляющими собственных и взаимных продольных погонных сопротивлений в триаксиальной конструкции. Результаты исследований показали, что электромагнитная совместимость ихтиофауны с подводными кабелями однофазного исполнения зависит от следующих факторов:

- конструкции экрана и брони КПИ (толщины экрана и брони);
- материала, из которого они выполнены экран (медь или алюминий), и брони (стальные проволоки или комбинация из медных и стальных проволок);
- мощности, передаваемой по КПИ;
- способа прокладки кабелей на дне водоема;
- удельной проводимости водоема и его ихтиологической характеристики (видового разнообразия рыб, их миграции и нереста);
- значений пороговой чувствительности ЭМП рыбами, величины которых зависят от вида рыбы, ее размеров и скорости движения, температуры воды и т.д.

Таким образом, при прочих равных условиях увеличение интенсивности ЭМП в водной среде оказывается большим в случае бестраншейной (свободной) прокладки фаз в сравнении со случаем их траншейной прокладки.

Расчеты, выполненные в НЭТУ, позволяют сделать следующие выводы:

1. плотность продольного тока в водной среде при прокладке КПИ однофазного исполнения превышает порог реакции возбуждения у лососевых и существенно зависит от параметров экрана и способа прокладки КПИ;

2. ток в водной среде может быть уменьшен за счет увеличения токов, текущих в экранах и броне (практически противоположных токам в жилах). Этого можно достичь уменьшением их активного сопротивления, например, выполнив медный экран большей толщины и заменив броню из стальных проволок комбинированной броней, состоящей из стальных и медных проволок в соотношении примерно 4 : 1;
3. на стадии эксплуатации можно предложить уменьшение мощности, передаваемой по КЛ, в период нереста или миграции рыб;
4. при использовании КПИ трехфазного исполнения, представляющих собой симметричную конструкцию с треугольным расположением экранированных фаз в одной металлической оболочке из стальных проволок несколько улучшает электромагнитную обстановку в водной среде.

### **7.6. Меры защиты от гальванических влияний воздушных линий на человека**

Как отмечалось выше, гальванические влияния электроэнергетики могут выражаться в виде опасных напряжений прикосновения  $U_{пр}$  и шага  $U_{ш}$  и выноса опасного напряжения за пределы заземляющего контура.

Как было показано выше, для снижения  $U_{пр}$  и  $U_{ш}$  до безопасных величин необходимо снизить  $E_{пр}$  и  $E_{ш}$ , а также  $\rho_{зп}$ . Искусственное уменьшение  $E_{пр}$  и  $E_{ш}$  достигается путём обеспечения небольших величин сопротивления заземления электроустановки, которое, как будет показано ниже, зависит от эквивалентного удельного сопротивления грунта и конструкции заземлителя.

Уменьшение сопротивления заземления достигается увеличением количества горизонтальных и вертикальных металлических элементов, закладываемых в грунт, причём целесообразно располагать эти элементы в виде сетки со стороны ячейки порядка нескольких метров, что улучшает распределение потенциала точек на поверхности земли и снижает  $E_{пр}$  и  $E_{ш}$ . Снижение вероятности поражения персонала электрическим током обеспечивает также укладка в местах установки оборудования выравнивающих проводников в виде частой сетки, присоединённой к основному контуру заземления электроустановки. Кроме того, в местах установки электрооборудования следует посыпать площадку плохопроводящим покрытием (слой щебня, щебня с асфальтом и т. п.), что способствует увеличению эквивалентного сопротивления верхних слоев земли  $\rho_{зп}$  и уменьшению тока через тело человека.

Заземляющие устройства электроустановок выше 1 кВ сети с эффективно заземлённой нейтралью следует выполнять с соблюдением требований либо к их сопротивлению, либо к напряжению прикосновения, а также с соблюдением требований к конструктивному выполнению и ограничению напряжения на заземляющем устройстве.

Напряжение на заземляющем устройстве при стекании с него тока заземления на землю не должно превышать 10 кВ. Напряжение выше 10 кВ до-

пускается на заземляющих устройствах, с которых исключён вынос потенциалов за пределы зданий и внешних ограждений электроустановки.

Опасный вынос потенциала может иметь место при контакте токоведущих элементов сети высокого напряжения с проводниками сетей более низкого напряжения. При однофазном коротком замыкании через заземляющее устройство подстанции может протекать ток, достигающий десятков килоампер. Такой ток на сопротивлении заземления подстанции вызывает падение напряжения ( $U_3$ ) до нескольких киловольт по отношению к удаленной земле. Как отмечалось выше для уменьшения напряжения шага  $U_{ш}$  и прикосновения  $U_{пр}$  заземляющее устройство подстанции выполняют в виде сетки, чтобы обеспечить условия:

$$U_{ш} = (0,02 - 0,1) U_3; \quad U_{пр} = (0,02 - 0,1) U_3.$$

Основную опасность может представить вынос высокого напряжения за пределы контура заземления подстанции по заземленным оболочкам кабелей связи, силовых кабелей, железнодорожным рельсам, трубопроводам. Рекомендуется иметь изоляционные стыки в местах выхода протяженных проводников за пределы контура заземления распреустройства.

Особую опасность могут создавать провода линий связи, заходящих на подстанцию сетей с глухим заземлением нейтрали. На таких подстанциях по требованиям правил электробезопасности, все металлические корпуса аппаратуры заземляются через общий контур распреустройства и поэтому они в момент к.з. имеют потенциал, равный потенциалу заземляющего устройства. В то же время провода линий связи имеют практически нулевое напряжение по отношению к удаленной земле. По перечисленным причинам возникает опасность одновременного прикосновения к корпусу и проводу линии связи. Поэтому между всеми, проводами линии связи и контуром, заземления подстанции предусматривают разрядники типа РБ. При возникновении к.з. эти разрядники срабатывают и защищают обслуживающий персонал. Однако при этом возникает возможность выноса высокого напряжения с заземляющего контура подстанции через разрядники по проводам линии связи на значительное расстояние за пределы контура. Такое напряжение может оказаться опасным для обслуживающего персонала соседнего узла связи и абонентов.

В целях защиты от опасного гальванического влияния вследствие выноса высокого напряжения рекомендуется:

- а) устанавливать на выходящих за пределы подстанции фидерах связи изолирующие трансформаторы;
- б) включать комплекты разрядников и защитных промежутков на подходе воздушной или кабельных линий связи к подстанции;
- в) на соседнем узле связи дополнительно к пункту б) подключать разрядники между проводами линий связи и заземляющим устройством этого узла.

### 7.7. Меры защиты от электрического поля на человека, прикоснувшегося к транспорту под воздушными линиями сверхвысокого и ультравысокого напряжения

Как отмечалось выше, специфическую опасность может представить прикосновение человека к крупногабаритному транспорту на резиновом ходу под проводами ВЛ сверхвысокого и особенно ультравысокого напряжения (рис. 7.14).

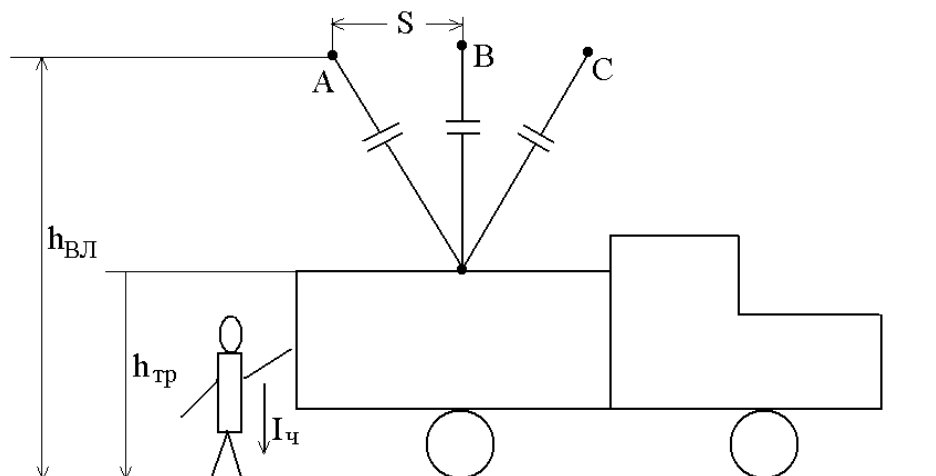


Рис. 7.14. К расчету тока через человека при опасном электрическом влиянии воздушных линий на транспорт

Через тело человека, стоящего на земле и коснувшегося корпуса транспорта, будет протекать суммарный ток, обусловленный напряжением всех трех фаз ВЛ

$$I_{\text{ч}} = j \cdot \omega \cdot (C_A \dot{U}_A + C_B \dot{U}_B + C_C \dot{U}_C),$$

где  $U_i$  и  $C_i$  ( $i$  - А, В, С) соответственно напряжения на фазах А, В, С и емкости между транспортной платформой и фазными проводами.

Если транспортное средство находится под средней фазой, то вертикальная составляющая напряженности электрического поля у поверхности земли (при  $h_{\text{тр}} < 0,2 h_{\text{вл}}$ ) в первом приближении равна

$$E_{\text{э}} = \frac{U_{\text{л}} S^2 \lg \frac{2 h S}{r_{\text{э}} \sqrt{h^2 + S^2}}}{2 h (h^2 + S^2)},$$

где  $U_{\text{л}}$  - линейное напряжение;  $r_{\text{э}} = r_{\text{р}} \sqrt{\frac{n r_{\text{н}}}{r_{\text{р}}}}$  - эквивалентный радиус расщепленной фазы;  $r_{\text{р}}$  - радиус окружности, по которой расположены провода расщепленной фазы;  $r_{\text{н}}$  - радиус проводов в фазе;  $n$  - число проводов в фазе.

Так, например,  $E_{\text{э}}$  в середине пролета ВЛ 750 кВ, имеющей  $h_{\text{вл}} = 13$  м,  $S = 18$  м,  $r_{\text{н}} = 17$  мм,  $n = 4$ ,  $r_{\text{р}} = 430$  мм,  $r_{\text{э}} = 270$  мм:



$$E_3 = \frac{750 \cdot 18^2 \lg \frac{2 \cdot 18 \cdot 13}{0,27 \sqrt{13^2 + 18^2}}}{2 \cdot 13 \cdot (13^2 + 18^2)} \approx 10 \text{ кВ/м.}$$

Если высота транспорта  $h_{\text{тр}} = 1,5$  м, то  $U_{\text{тр}} = E_3 \cdot h_{\text{тр}} = 10 \cdot 1,5 = 15$  кВ, а ток через тело человека, прикоснувшегося к транспорту:

$$I_{\text{ч}} \approx \omega \cdot \epsilon_0 \cdot S \cdot E_3 \approx 0,8 \text{ мА,}$$

где  $S = 3 \cdot 8 = 24 \text{ м}^2$  - площадь транспортного средства в плане.

Такой ток не представляет непосредственной опасности для человека, но он вызывает неприятное ощущение внезапного укола.

Однако во избежание таких ситуаций под фазными проводами рекомендуется устанавливать металлические сетки.

### **7.8. Защита от мешающего влияния воздушных линий на людей**

Как отмечалось в главе первой, при работе линий электропередачи сверхвысокого и ультравысоких классов напряжения под нагрузкой и даже на холостом ходу они оказывают неблагоприятное воздействие на окружающее население и особенно обслуживающий персонал вследствие воздействия магнитного и электрического полей.

По данным НИИГТ и ПЭ под действием магнитного поля, напряженность которого определяется током установки, затрудняется движение крови в кровеносных сосудах, что вызывает синюшность рук у монтеров, работающих на линиях под нагрузками. То же самое происходит с персоналом, работающим на подстанциях вблизи сильноточного оборудования. На основании многочисленных жалоб электротехнического персонала и населения, проживающего вблизи линий электропередачи высокого, сверхвысокого и ультравысокого классов напряжения, и исследований ВИИОТ установлено, что длительное систематическое нахождение человека в электрическом поле с высокой напряженностью ( $E > 5$  кВ/м) и выше при отсутствии человека отрицательно сказывается на его самочувствии. Поэтому в ряде мест на подстанциях и ВЛ, где имеет место повышенное значение  $E$ , рекомендуется устанавливать стандартные экранирующие устройства в виде козырьков, навесов или перегородок из заземленных металлических сеток.

### **7.9. Защита от акустического влияния элементов линий электропередачи на людей**

Акустические помехи высокой интенсивности также неблагоприятно сказываются на самочувствии людей. Под влиянием переменных электромагнитных полей возникают электродинамические силы в отдельных элементах. Они пульсируют с двойной частотой (100 Гц) и создают механическую вибрацию. В зависимости от интенсивности эта вибрация воспринимается человеческим ухом как шорох, гудение или рев. Так, например, у по-

верхности проводов линий высокого напряжения может возникнуть коронный разряд, создающий значительные добавочные потери энергии, акустические и радиопомехи. Характер и интенсивность короны существенно зависят от амплитуды напряженности  $E$  электрического поля у поверхности провода и погоды (иней, изморозь, гололед, дождь).

Известна [6] так называемая критическая напряженность короны, кВ/см

$$E_k = 16,5 \sqrt{2} \cdot m \cdot \delta \cdot [1 + 0,62 / (\delta^{0,3} \cdot r_0^{0,38})],$$

где  $m = 0,82 \dots 0,85$  - коэффициент негладкости провода.

Если  $E > E_k$ , то коронирует весь провод и возникает "общая корона", создающая большие потери энергии. Чтобы избежать этого, применяют расщепленные провода, изобретенные одним из ведущих профессоров ЛПИ академиком В.Ф. Миткевичем еще в 1910 году. На линии 330 кВ используют фазы, расщепленные не два составляющих провода, на линии 500 кВ - на три, на линии 750 кВ - на четыре - пять проводов. Такое решение обеспечивает  $E \approx (0,8 \dots 0,85) \cdot E_k$  и отсутствие общей короны. Однако, в точках неоднородности (заусеницы, загрязнения, и особенно капли дождя) напряженность оказывается повышенной, и в результате возникает местная корона. Наиболее сильные помехи наблюдаются при морозящем дожде, когда вибрирующими элементами оказываются капли дождя у поверхности провода, поэтому ЛЭП 110-220 кВ при дожде "шуршат" и "шипят", ВЛ 330-500 кВ "гудят", а ВЛ 750 кВ "ревут".

Как отмечалось, большие акустические помехи могут возникать также вблизи мощных трансформаторов, автотрансформаторов и реакторов СВН. При этом вибрируют стальные листы магнитопроводов и медные провода обмоток, особенно, если частота собственных колебаний их элементов близка к 100 Гц.

Во избежание негативных влияний вибраций на здоровье людей рекомендуется:

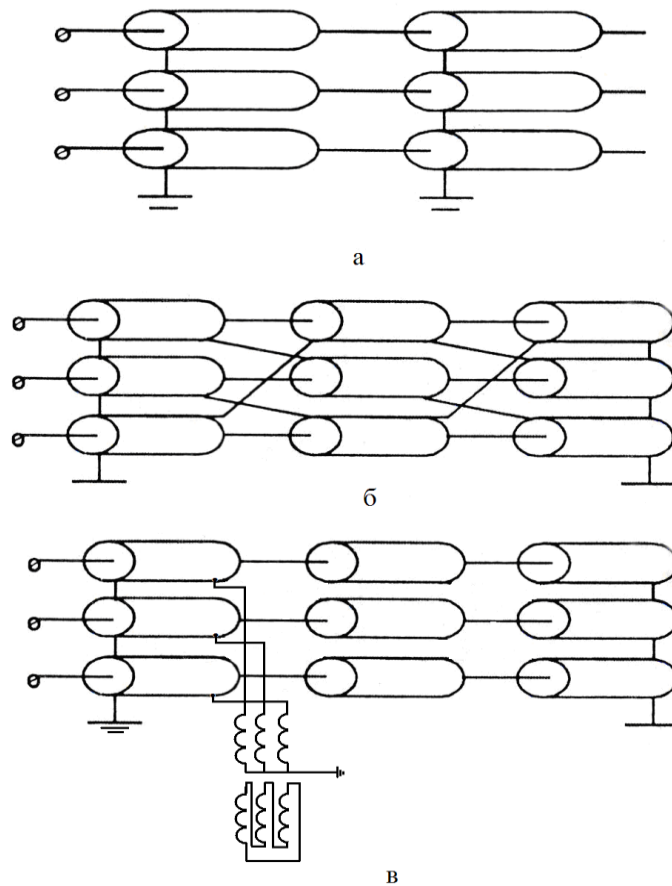
- ограничить длительность нахождения людей в зоне сильных вибраций, например, около силовых трансформаторов и шунтирующих реакторов;
- работать в зонах интенсивных вибраций в активфонах, в значительной степени ослабляющих помехи от вибраций;
- уменьшить интенсивность короны путем применения расщепленных проводов линий 330 кВ и выше.

### **7.10. Меры защиты от влияния линий электропередачи на окружающую среду**

Анализ, проведенный выше, показывает, что ЛЭП оказывают опасное и мешающее влияние на окружающую среду. Основные положения этих влияний со стороны ВЛ были рассмотрены выше. Здесь лишь отметим мероприятия от негативного влияния подземных и подводных электропередач.

Добиться одновременно и улучшения теплового режима работы КЛ и повышения экономичности её эксплуатации можно либо размыканием пути

для протекания токов в экранах (рис. 7.15,а), либо электромагнитной их компенсацией на участке строительной длины с помощью транспозиции экранов фаз (рис. 7.15,б).



*Рис. 7.15. Эксплуатация участка кабельной линии при одностороннем разземлении экранов (а), при их транспозиции (б) и при подключении трансформаторов нулевой последовательности (в)*

Как одностороннее заземление экранов, так и их транспозиция приводят к вытеснению электромагнитного поля вне concentрических систем жила - экран и возврату обратного тока по экранам соседних фаз и по земле. Поэтому при несимметричных режимах, в том числе и при воздействии грозовых перенапряжений между экранами одной и той же фазы в месте транспозиции, так же как и на изоляции экранов, относительно земли, возникают перенапряжения, которые в ряде случаев требуется ограничивать. При одностороннем размыкании экранов и при их транспозиции в местах разрыва экрана следует устанавливать ОПН (между экраном и землей). Расчеты показывают, что эти защитные аппараты характеризуются весьма малой требуемой емкостью. Одностороннее заземление экранов целесообразно применять по трассам коротких КЛ, однократную транспозицию экранов - по трассам более длинных КЛ. И, наконец, возможно применение трансформаторов нулевой последовательности, первичная обмотка, соединенная в звезду, соединится с экранами, а вторичная соединена в треугольник.

Для обеспечения экологической безопасности подводных кабельных линий с ихтиофауной необходимо принять во внимание следующие реко-

мендации по конструктивному исполнению, способам подводной прокладки и режимам эксплуатации КЛ, исходя из их минимального влияния на ихтиофауну пересекаемых водоемов.

1. При свободной прокладке подводных КЛ однофазного исполнения необходимо принимать специальные меры по уменьшению интенсивности ЭМП вдоль трассы КЛ и обеспечению экологической безопасности для рыб, обитающих в пересекаемом КЛ водоеме. Приемлемая для ихтиофауны электромагнитная обстановка достигается при траншейной прокладке в вершинах правильного треугольника кабелей однофазной конструкции.

2. При прокладке КЛ трехфазного исполнения с экранированными жилами отрицательное влияние на ихтиофауну минимально, что обусловлено конструкцией кабеля, обеспечивающей практическое отсутствие в нормальном эксплуатационном режиме ЭМП за пределами кабельной конструкции. При подводной прокладке трехфазного исполнения не требуется проводить какие-либо организационно-технические мероприятия по предотвращению негативных последствий от воздействия ЭМП для тех представителей ихтиофауны, которые обитают, мигрируют или нерестятся в пересекаемом КЛ водоеме. Необходимо лишь ограничиться экологическим мониторингом на стадии прокладки кабельной линии.

3. Применение подводных КЛ трехфазного исполнения обеспечивает электромагнитную безопасность для ихтиофауны, однако на стадии проектирования особое внимание следует уделить вопросам защиты кабельной электропередачи от воздействия грозových, коммутационных и иных видов перенапряжений. Это обусловлено тем, что при возникновении аномального режима эксплуатации КЛ, сопровождающегося электрическим пробоем главной изоляции, ремонт кабеля трехфазного исполнения существенно сложнее ремонта КЛ однофазного исполнения. При прокладке подводной КЛ на основе КПИ следует предусмотреть дополнительно лишь одну резервную фазу, при использовании же КПИ трехфазного исполнения необходимо дополнительно прокладывать еще одну КЛ.

4. На стадии эксплуатации подводных КЛ однофазного исполнения можно предусмотреть уменьшение передаваемой по КЛ мощности в ответственные периоды для ихтиофауны водоемов - при нересте и миграции рыбы.

5. При проектировании, конструировании и выборе рациональных режимов эксплуатации подводных КЛ необходимо при системном подходе одновременно учитывать факторы, которые зачастую находятся в противоречии между собой. К таким факторам относятся: экономичность, эксплуатационная надежность и экологическая совместимость КПИ с ихтиофауной.

## Литература

1. Методические указания по определению электромагнитной обстановки и совместимости на электрических станциях и подстанциях. Стандарт организации СО 34.35.311-2004, РАО “ЕЭС”, М., 2004.
2. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике. Под ред. Б.К. Максимова. М., Энергоатомиздат, 1995.
3. Шваб А. Электромагнитная совместимость. Под ред. И.П. Кужекина. М., Энергоатомиздат. 1998.
4. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике. Под ред. А.Ф. Дьякова. М. Энергоатомиздат, 2003.
5. Кадомская К. П., Кандаков С. А., Лавров Ю. А., Шевченко С.С. Электромагнитная совместимость воздушных, подземных и подводных линий электропередачи высокого напряжения с биосферой и окружающей средой. Учебное пособие. –Новосибирск.: Издательство НГТУ, 2007. –150 с.
6. Халилов Ф.Х., Егоров В.В., Смирнов А.А. Техника высоких напряжений. Учебник. –СПб.: Издательство “БИОНТ”, 2007. – 540 с.

Д.т.н., профессор  
Халилов Фирудин Халилович

**Электромагнитная совместимость  
электроэнергетики, техносферы и биосферы**

Учебное пособие

Издание Центра подготовки кадров энергетики,  
194223, Санкт-Петербург, а/я 44,  
Тираж 500 экз.2014г.