

ФЕДЕРАЛЬНОЕ АГЕНТСТВО ПО ОБРАЗОВАНИЮ
Государственное образовательное учреждение профессионального образования
«ТОМСКИЙ ПОЛИТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Д.В. Жгун

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ТЕХНИКИ

Учебное пособие

Издательство
Томского политехнического университета
2008

УДК 621.31.027.3:537.812(075.8)

ББК 31.241.я73

Ж41

Жгун Д.В.

Ж41

Электромагнитная совместимость высоковольтной техники: учебное пособие / Д.В. Жгун. – Томск: Изд-во Томского политехнического университета, 2008. – 150 с.

ISBN 5-98298-242-3

В учебном пособии даются общие представления об электромагнитной совместимости (ЭМС) высоковольтного оборудования. Рассматриваются каналы проникновения помех и их классификация; методы и средства измерения помех и испытания оборудования на помехоустойчивость; вопросы нормирования в области ЭМС, а также экологические проблемы воздействия электромагнитного поля на человека.

Пособие разработано в рамках реализации Инновационной образовательной программы ТПУ по направлению «Энергосберегающие, базовые, специальные и промышленные электроразрядные, радиационные и плазменно-пучковые технологии» и предназначено для магистрантов, обучающихся по программе «Техника и физика высоких напряжений».

УДК 621.31.027.3:537.812(075.8)

ББК 31.241.я73

Рекомендовано к печати Редакционно-издательским советом
Томского политехнического университета

Рецензент

Доктор технических наук
заведующий лабораторией НИИ высоких напряжений

Г.Е. Ремнёв

ISBN 5-98298-242-3

© Жгун Д.В., 2008

© Томский политехнический университет, 2008

© Оформление. Издательство Томского
политехнического университета, 2008

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	5
1. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ	6
1.1. Понятие «электромагнитная совместимость»	6
1.2. Возникновение поля. Волновое сопротивление	8
1.3. Характеристики помех	11
2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМ ЭМС В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ...	13
2.1. Классификация электрических и магнитных влияний на техно- и биосферу	13
2.2. Электромагнитная совместимость высоковольтных устройств.....	21
2.3. Влияние электрических и магнитных полей на человека	22
2.4. Примеры угроз от излучаемых полей	31
2.4.1. Низкочастотные магнитные поля	31
2.4.2. Низкочастотные электрические поля.....	32
2.4.3. Высокочастотные поля.....	32
3. ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ	33
3.1. Классификация источников помех по спектру частот	35
3.1.1. Источники узкополосных помех	37
3.1.2. Источники широкополосных импульсных помех	38
3.1.3. Источники широкополосных переходных помех	39
3.2. Классификация электромагнитной обстановки	45
3.2.1. Классификация электромагнитной обстановки по помехам, связанным с проводами	46
3.2.2. Классификация электромагнитной обстановки по помехам, вызванным излучением	47
4. МЕХАНИЗМЫ СВЯЗИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПОМЕХ	48
4.1. Гальваническая связь	49
4.1.1. Гальваническая связь через цепи питания	49
4.1.2. Гальваническая связь через контур заземления.....	51
4.2. Ёмкостная связь.....	55
4.3. Индуктивная связь	56
4.4. Электромагнитная связь	57
5. ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОМЕХ	59
5.1. Общие методы испытаний источников радиопомех	59
5.2. Измерение кондуктивных помех	60
5.3. Измерение помех, вызванных воздействием электромагнитных полей.....	62
5.4. Измерительная среда и рабочее место	64
6. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ.....	66
6.1. Помехоподавляющие фильтры	66
6.2. Разрядники для защиты от перенапряжений.....	74
6.2.1. Варисторы (ограничители перенапряжений)	75
6.2.2. Кремниевые лавинные диоды	77
6.2.3. Искровые разрядники	78
6.2.4. Гибридные разрядные цепи	79
6.3. Электромагнитные экраны.....	81
6.3.1. Экраны кабелей	91

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ	93
7.1. Испытания: виды, степени жесткости и условия проведения.....	93
7.2. Испытания оборудования (ТС) на устойчивость к кондуктивным переходным и высокочастотным помехам	96
7.2.1. Испытания на устойчивость к импульсам напряжения с волной 100/1300 мкс	96
7.2.2. Испытания на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии (импульсами напряжения 1/50 мкс и тока 6,4/16 мкс).....	97
7.2.3. Испытания на устойчивость к наносекундным импульсным помехам....	99
7.2.4. Испытания на устойчивость к затухающим колебаниям	101
7.2.5. Испытания на устойчивость к незатухающим или прерывистым индуцированным высокочастотным колебаниям (частотой 0,01 и 1 МГц)	102
7.3. Испытания оборудования (ТС) на устойчивость к электростатическим помехам	103
7.4. Испытания оборудования (ТС) на устойчивость к магнитным помехам.....	105
7.4.1. Испытания на устойчивость к воздействию магнитного поля с частотой сети	105
7.4.2. Испытания на устойчивость к воздействию затухающего колебательного магнитного поля.....	107
7.4.3. Испытания на устойчивость к воздействию импульсного магнитного поля	107
7.5. Испытания оборудования на устойчивость к радиочастотным электромагнитным помехам	108
8. ПРОБЛЕМЫ ЭМС В ЛАБОРАТОРИЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И В ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ.....	110
9. СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ОБЛАСТИ ЭМС	117
10. МЕНЕДЖМЕНТ В ОБЛАСТИ ЭМС СИСТЕМ	124
10.1. План обеспечения ЭМС	124
10.1.1. Контрольный совет ЭМС.....	124
10.1.2. Идентификация вопросов ЭМС	125
10.1.3. Идентификация критических частей	129
10.1.4. Контроль при сборке и установке.....	131
10.2. План испытаний в области ЭМС.....	132
10.2.1. Определение конфигурации элементов системы и их взаимосвязи...	132
10.2.2. Выбор необходимых испытаний.....	133
10.2.3. Испытания системы в целом	134
10.3. Документация	136
10.4. Закупки	136
10.5. Техническое обслуживание, доработка и модернизация	137
10.5.1. Техническое обслуживание	137
10.5.2. Доработка и модернизация	137
10.6. Обучение	139
10.6.1. Обучение: контрольный перечень вопросов.....	139
СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ.....	142
Приложение 1	143
Приложение 2	145

ВВЕДЕНИЕ

Проблемы электромагнитной совместимости (ЭМС) связаны, главным образом, с обеспечением надлежащей работы совокупности электрических и электронных аппаратов. Так как степень влияния электромагнитных помех зависит от расстояния между передатчиком электромагнитной энергии и приемником, оборудование, находящееся в непосредственной близости, должно быть совместимым. Поэтому «дисциплинированность» в вопросах обеспечения ЭМС возникла именно в тех отраслях промышленности, где правилом является системная интеграция. Это отрасли промышленности, производящие военную, аэрокосмическую технику, автотранспортные средства и средства железнодорожного и морского транспорта, а также отрасли, связанные с системами управления процессами.

При работе высоковольтного оборудования в пространстве возникают электромагнитные поля (ЭМП) различных частотных диапазонов, вызывающие нарушение ЭМС первичных (силовых) и вторичных цепей. В связи с широким внедрением во вторичных цепях микропроцессорной техники проблема ЭМС является очень актуальной.

Курс «Электромагнитная совместимость высоковольтной техники» в соответствии с требованиями образовательного стандарта направлен на формирование знаний о принципах обеспечения ЭМС установок высокого напряжения с объектами техно- и биосферы, умений анализа электромагнитной обстановки, а также нормативной и правовой базы в области ЭМС.

В качестве основы при работе над данным учебным пособием использовались нормативные документы (ГОСТы, стандарты МЭК и др.) по обеспечению ЭМС, монографии Э. Хабигера, А. Шваба, Т. Уильямса – известных зарубежных специалистов по данной тематике, а также работы российских специалистов.

1. Общие вопросы электромагнитной совместимости

1.1. Понятие «электромагнитная совместимость»

Электромагнитная совместимость – современное понятие, обобщающее возникшую еще в начале развития электротехники и приобретающую в настоящее время все большее значение проблематику.

С появлением первых передатчиков возникла необходимость согласования их частот и мощностей. Для радиоприема без помех необходимо было предотвратить неконтролируемое излучение высокочастотной энергии электропотребителями. С появлением электроники и микроэлектроники резко возросло число как излучающих помехи приборов, так и устройств, реагирующих на помехи. Это привело к необходимости введения нормирования уровней излучаемых помех и помехоустойчивости.

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС) понимают нормальное функционирование передатчиков и приемников электромагнитной энергии, исключающее нежелательные взаимные влияния.

Понятия «передатчик» и «приемник» здесь имеют более широкий смысл, чем, например, в средствах связи. Так, к передатчикам электромагнитной энергии, наряду с телевизионными и радиовещательными устройствами, относятся также электрические цепи и системы, которые излучают в окружающую среду влияющую электромагнитную энергию (так называемые источники помех), например автомобильные устройства зажигания, люминесцентные лампы, универсальные коллекторные двигатели, силовая электроника, контакты выключателей, атмосферные разряды и т. д. Приемниками электромагнитной энергии, помимо радио- и телевизионных приемников, являются системы автоматизации, автомобильная микроэлектроника, измерительные, управляющие приборы и регуляторы, устройства обработки информации, сердечные стимуляторы, биоорганизмы и т. д. Тем самым современное понятие ЭМС выходит далеко за рамки классической защиты от радиопомех, однако по-прежнему включает их, являясь понятием более общим.

Электрические устройства могут одновременно действовать как приемники, так и как передатчики. Поэтому говорят также об электромагнитной совместимости отдельных приборов (технических средств).

В нормативных документах РФ приняты следующие термины.

Электромагнитная совместимость – способность технических средств (ТС) функционировать с заданным качеством в определенной электромагнитной обстановке, не создавая при этом недопустимых

электромагнитных помех другим техническим средствам и недопустимых электромагнитных воздействий на биологические объекты.

Электромагнитная обстановка – совокупность электромагнитных явлений и (или) процессов в данной области пространства (или проводящей среде) в частотном и временном диапазонах.

Электромагнитная помеха – электромагнитное явление или процесс естественного или искусственного происхождения, которые снижают или могут снизить качество функционирования технического средства.

Поэтому электрическое устройство считается совместимым с другими устройствами, если оно в качестве передатчика является источником помех не выше допустимых, а в качестве приемника обладает допустимой чувствительностью к посторонним влияниям, т. е. достаточной помехоустойчивостью, или иммунитетом.

Устойчивость ТС к электромагнитным помехам (помехоустойчивость) – способность ТС сохранять требуемое качество функционирования при воздействии на них электромагнитных помех с регламентированными значениями параметров.

Проблема ЭМС возникает, как правило, прежде всего у приемников, если нарушается безупречный прием полезного сигнала, например случайно поступившей электромагнитной энергией нарушено или прекращено нормальное функционирование системы автоматизации. В таком случае говорят о наличии электромагнитных влияний.

Электромагнитные влияния могут проявляться в виде обратимых или необратимых нарушений. Примерами обратимых нарушений являются: эпизодически появляющийся шум при телефонных разговорах, треск при включениях и выключениях бытовых электроприборов. Примеры необратимых нарушений: разрушение электронных компонентов на платах разрядами статического электричества или пробой изоляции при грозовых перенапряжениях, непредвиденное срабатывание электрически управляемых компонентов в космической технике и т. д.

На практике обратимые влияния разделяют по их силе на влияния, которые вызывают допустимые нарушения функций, и влияния, которые ведут к недопустимым побочным воздействиям либо к чрезмерной перегрузке.

Уровень воздействия электромагнитных полей в условиях эксплуатации и уровень восприимчивости ТС в общем случае являются случайными величинами с распределениями, соответственно, $f(U_{\text{п}})$ и $G(U_{\text{в}})$ (рис. 1.1).

Уровень помехоустойчивости должен быть таким, чтобы обеспечить малую вероятность ухудшения качества функционирования ТС при испытаниях.

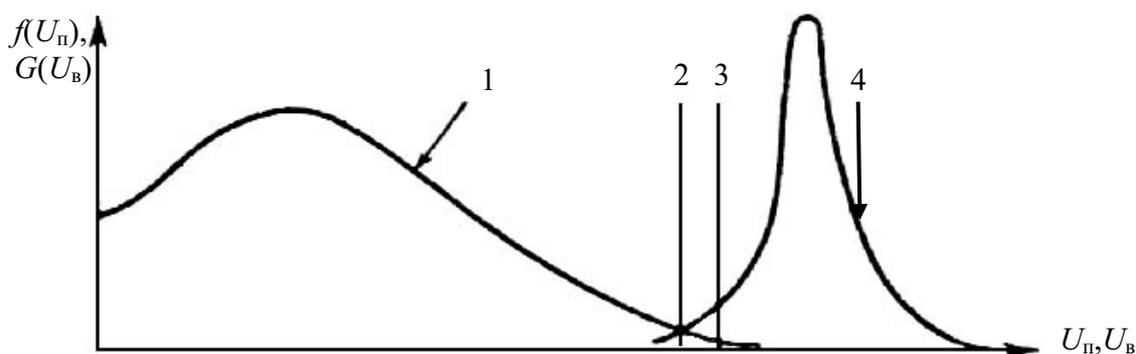


Рис. 1.1. Соотношение между уровнем электромагнитных помех и уровнями помехоустойчивости, электромагнитной совместимости и восприимчивости ТС:

1 – уровень электромагнитных помех, $f(U_n)$; 2 – уровень ЭМС;
3 – уровень помехоустойчивости; 4 – уровень восприимчивости ТС, $G(U_v)$

Уровень электромагнитной совместимости должен выбираться так, чтобы вероятность появления помех с большим уровнем была мала и ухудшение качества функционирования ТС при воздействии помех с амплитудой, меньшей уровня совместимости, было незначительным. Уровень электромагнитной совместимости является опорным значением, на основе которого устанавливается правильное соотношение между уровнем помех и уровнем помехоустойчивости. Он выбирается так, чтобы амплитуда помехи соответствовала значениям ее вероятности, равной 0,05; 0,02; 0,01. Конкретные значения допустимой вероятности превышения амплитудой помехи уровня совместимости устанавливают стандарты и разработанные на их основе технические условия. В отдельных случаях уровни ЭМС могут устанавливать производители ТС по согласованию с пользователями.

1.2. Возникновение поля. Волновое сопротивление

Электрическое поле (E -поле) создается между двумя проводниками с различными потенциалами, измеряется в вольтах на метр и пропорционально подаваемому напряжению, деленному на расстояние между проводниками.

Магнитное поле (H -поле) создается вокруг проводника, по которому протекает ток, измеряется в амперах на метр и пропорционально току, деленному на расстояние от проводника.

Когда переменное напряжение создает переменный ток в цепи проводников, вокруг них создается электромагнитная волна (ЭМВ), которая распространяется как комбинация E - и H -полей. Скорость ее распространения определяется средой; в свободном пространстве она рав-

на скорости света $3 \cdot 10^8$ м/с. Вблизи излучающего источника геометрия и напряженность поля зависят от характеристик источника. Проводник, по которому протекает ток с существенным значением di/dt , генерирует, главным образом, магнитное поле; а у которого напряжение изменяется с высокой скоростью dv/dt – генерирует, главным образом, электрическое поле. Структура этих областей будет определяться физическим расположением исходных проводников, а также другими близко расположенными проводниками, диэлектриками и магнитными материалами. Вдали от источника сложная трехмерная структура поля претерпевает изменения, и остаются только компоненты, которые являются ортогональными друг к другу и к направлению распространения. Рис. 1.2 демонстрирует эти идеи графически.

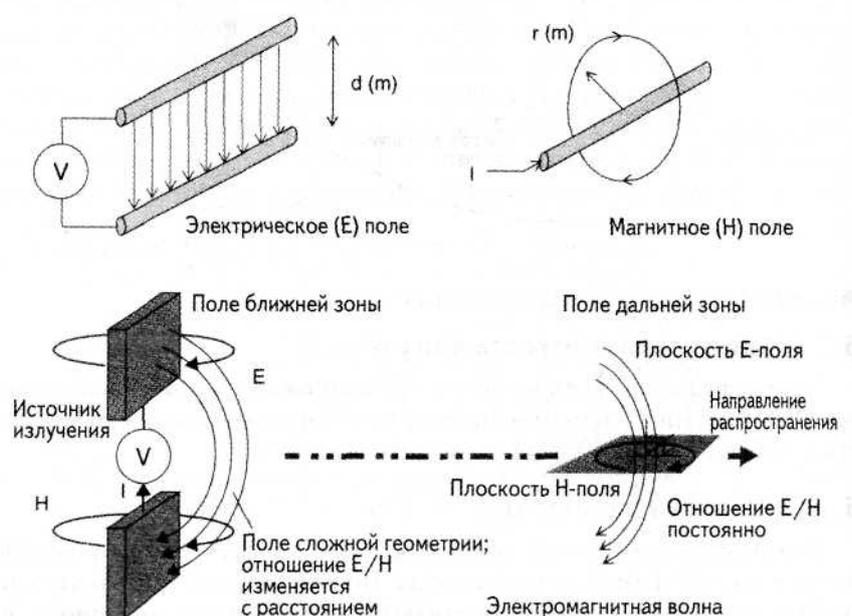


Рис. 1.2. Электромагнитные поля

Отношение напряженности электрического поля к напряженности магнитного поля (E/H) называется волновым сопротивлением (рис. 1.3). Волновое сопротивление – ключевой параметр любой электромагнитной волны, поскольку оно определяет эффективность связи с другими проводящими структурами и также эффективность любого проводящего экрана, который используется для блокировки поля. В дальней области, которая имеет место для $d > \lambda/2\pi$, интенсивность E - и H -поля волны, известной как плоская ЭМВ, уменьшается с расстоянием прямо пропорционально. Поэтому волновое сопротивление для ЭМВ постоянно и равно волновому сопротивлению свободного пространства, выражено уравнением:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0}} = 120\pi = 377 \text{ Ом}, \quad (1.1)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м (магнитная проницаемость свободного пространства – магнитная постоянная) и $\varepsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12}$ Ф/м (диэлектрическая проницаемость свободного пространства – диэлектрическая постоянная).

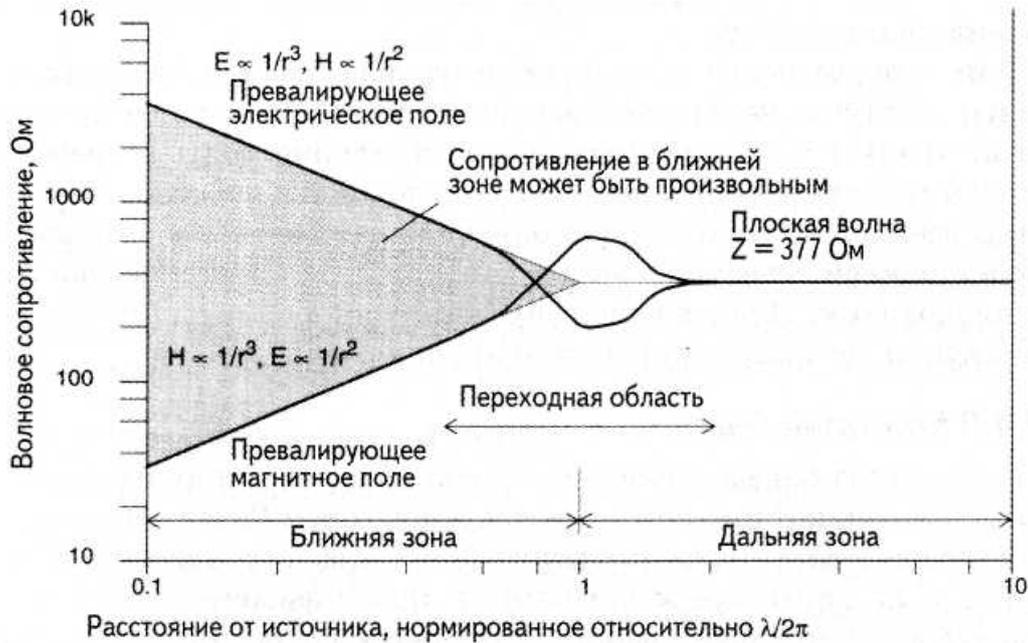


Рис. 1.3. Волновое сопротивление

В ближней зоне, $d < \lambda/2\pi$, волновое сопротивление определяется в соответствии с характеристиками источника. Низкий ток и высокий потенциал излучателя (например, штыря) создают электрическое поле с высоким волновым сопротивлением, в то время как большой ток и низкий потенциал излучателя (например, петля с током) будут создавать, главным образом, магнитное поле с низким волновым сопротивлением. Если в особом случае излучающая структура имеет волновое сопротивление около 377 Ом, то в зависимости от геометрии плоская волна может быть создана в ближней зоне.

Зона в окрестности, $\lambda/2\pi$ (приблизительно шестая часть длины волны), является переходной между ближней и дальней зонами. Это не точный критерий, скорее, это определяет зону, в пределах которой структура поля изменяется от сложной к простой. Плоские волны всегда описывают дальнюю зону, в то время как в ближней зоне отдельно рассматривается электрическое или магнитное поле.

1.3. Характеристики помех

Для целенаправленного планирования мероприятий по обеспечению ЭМС должны быть известны:

- электромагнитная обстановка, характеризующаяся амплитудными и частотными спектрами напряжений и токов источников помех, напряжённостью поля;
- механизм связи и ее количественная оценка в виде коэффициентов затухания или передаточных функций;
- восприимчивость, или чувствительность, приёмника помех, характеризующаяся пороговыми значениями помех в функции от частоты или времени.

Помехи можно представить и описать как временной, так и частотной характеристикой. Однако, обычно не так важно точное описание формы помехи, как ее точные параметры, от которых зависит ее мешающее воздействие.

Для периодических помех такими параметрами являются: частота f и амплитуда X_{max} . Эти параметры определяют амплитуду напряжения во вторичных контурах U_{max} .

Для непериодических помех важнейшими параметрами являются следующие:

- скорость изменения $\Delta x / \Delta t$ (скорость нарастания или спада). Данная величина определяет максимальное напряжение помехи U_{max} , вызванной во вторичной цепи;
- интервал времени Δt , в течение которого помеха x имеет максимальную скорость изменения амплитуды; этот интервал идентичен длительности действия напряжения помехи u_s во вторичной цепи;
- максимальное значение изменения амплитуды Δx , пропорциональное интегралу напряжения помехи вторичной цепи по времени (площади импульса помехи).

Для взаимосвязанного представления этих величин с точки зрения электромагнитной совместимости используют при периодических помехах амплитудный спектр, а для импульсных помех – так называемый спектр амплитудной плотности. Оба этих представления обеспечивают:

- оценку воздействия помехи на систему;
- расчет воздействий, обусловленных заданной связью;
- выбор параметров средств подавления помех, например фильтров;
- определение граничных областей, например максимально возможного или допустимого излучения помех, или характеристика границы помехоустойчивости;

- получение представлений о воздействии при испытаниях согласно нормам электромагнитной совместимости, т. е. о параметрах генераторов, применяемых при испытаниях.

Для количественной оценки ЭМС пользуются логарифмическими масштабами напряжений, токов, напряжённостей поля, мощностей в относительных единицах, что позволяет наглядно представить соотношения величин, отличающихся на много порядков.

Уровень помех определяет отношение величины, например напряжения, к её постоянному базовому значению, в качестве которого по умолчанию принимается $U_0 = 1$ мкВ. Чаще отношения выражают децибелами (дБ):

$$u_{\text{дБ}} = 20 \lg\left(\frac{U_x}{U_0}\right). \quad (1.2)$$

Другие характеристики помех определяют аналогично:

$$\text{ток, } i_{\text{дБ}} = 20 \lg\left(\frac{i_x}{i_0}\right), \quad (1.3)$$

$$\text{напряжённость электрического поля, } E_{\text{дБ}} = 20 \lg\left(\frac{E_x}{E_0}\right), \quad (1.4)$$

$$\text{напряжённость магнитного поля, } H_{\text{дБ}} = 20 \lg\left(\frac{H_x}{H_0}\right), \quad (1.5)$$

$$\text{мощность, } P_{\text{дБ}} = 20 \lg\left(\frac{P_x}{P_0}\right), \quad (1.6)$$

где $I_0 = 1$ мкА, $E_0 = 1$ мкВ/м, $H_0 = 1$ мкА/м, $P_0 = 1$ пВт.

Мера помех – логарифм отношения величин для обозначения изменяемых свойств объекта (коэффициента передачи, усиления, ослабления). При этом берется отношение величин на входе X_0 и выходе X_1 системы или при наличии, или при отсутствии защитного устройства.

$$\alpha_{\text{дБ}} = 20 \lg\left(\frac{X_1}{X_0}\right). \quad (1.7)$$

Если используется натуральный логарифм, можно образовать отношения величин в неперах (Нп):

$$u_{\text{Нп}} = 20 \ln\left(\frac{U_x}{U_0}\right), \quad P_{\text{Нп}} = 20 \ln\left(\frac{P_x}{P_0}\right). \quad (1.8)$$

Для отношений величин справедливы следующие равенства:

$10 : 1 = 2,3$ Нп = 20 дБ; $100 : 1 = 4,6$ Нп = 40 дБ; $1\ 000 : 1 = 6,9$ Нп = 60 дБ.

При обоих представлениях определенный уровень повышается на соответствующую одинаковую величину с каждым последующим порядком. Атрибуты дБ и Нп указывают исключительно на вид использования функции логарифма (\lg или \ln). Они не являются единицами измерения, однако часто используются как таковые.

2. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПРОБЛЕМ ЭМС В ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИКЕ

2.1. Классификация электрических и магнитных влияний на техно- и биосферу

Электрические сети высокого напряжения оказывают разнообразное неблагоприятное влияние на техно- и биосферу. Напряжения и токи в проводах линий электропередачи создают в окружающем пространстве электромагнитные поля, а в земле – блуждающие токи. Вследствие этого могут возникнуть мешающие и даже опасные влияния на биосферу (людей и животных) и техносферу (линии связи, сигнализации, трубопроводы и другие инженерные сооружения). Блуждающие токи в земле вызывают усиленную коррозию оболочек кабелей, трубопроводов, заземлителей и других подземных протяженных устройств. Сооружение электрических станций, линий и подстанций требует отчуждения определенных участков земли, создает другие негативные экологические последствия (рис. 2.1).

Опасное влияние – это такое влияние, которое может представлять опасность для здоровья и жизни обслуживающего систему персонала и населения, вызывать повреждение аппаратуры и приборов или ложные срабатывания цепей сигнализации и блокировки, создающие вероятность, например, железнодорожной аварии. Со всем этим приходится считаться при аварийных или ненормальных режимах работы сетей высокого напряжения.

При несимметричных коротких замыканиях в сетях с глухим заземлением нейтрали ($U_n \geq 110$ кВ) возникают большие токи в земле и сильные магнитные поля. Они могут вызвать опасные магнитные влияния. Они создают ЭДС взаимной индукции и напряжения относительно земли в воздушных и кабельных линиях связи (ЛС), трубопроводах, транспортных сооружениях и т. п.

В сети 35 кВ с изолированной нейтралью при замыкании на землю одной фазы на остальных двух фазах ВЛ напряжение повышается до линейного. Высокая напряженность электрического поля вблизи ВЛ может обусловить опасные влияния на воздушные линии связи, находящиеся в непосредственной близости от ВЛ. Под проводами линий СВН и УВН, у поверхности земли, имеет место повышенная напряженность электрического поля E даже в нормальном режиме работы. При $E > 20$ кВ/м прикосновение человека к крупногабаритному транспортному агрегату на резиновом ходу может быть опасным. Через человека, стоящего на земле, будет протекать значительная часть емкостного тока от проводов ВЛ к этой машине.

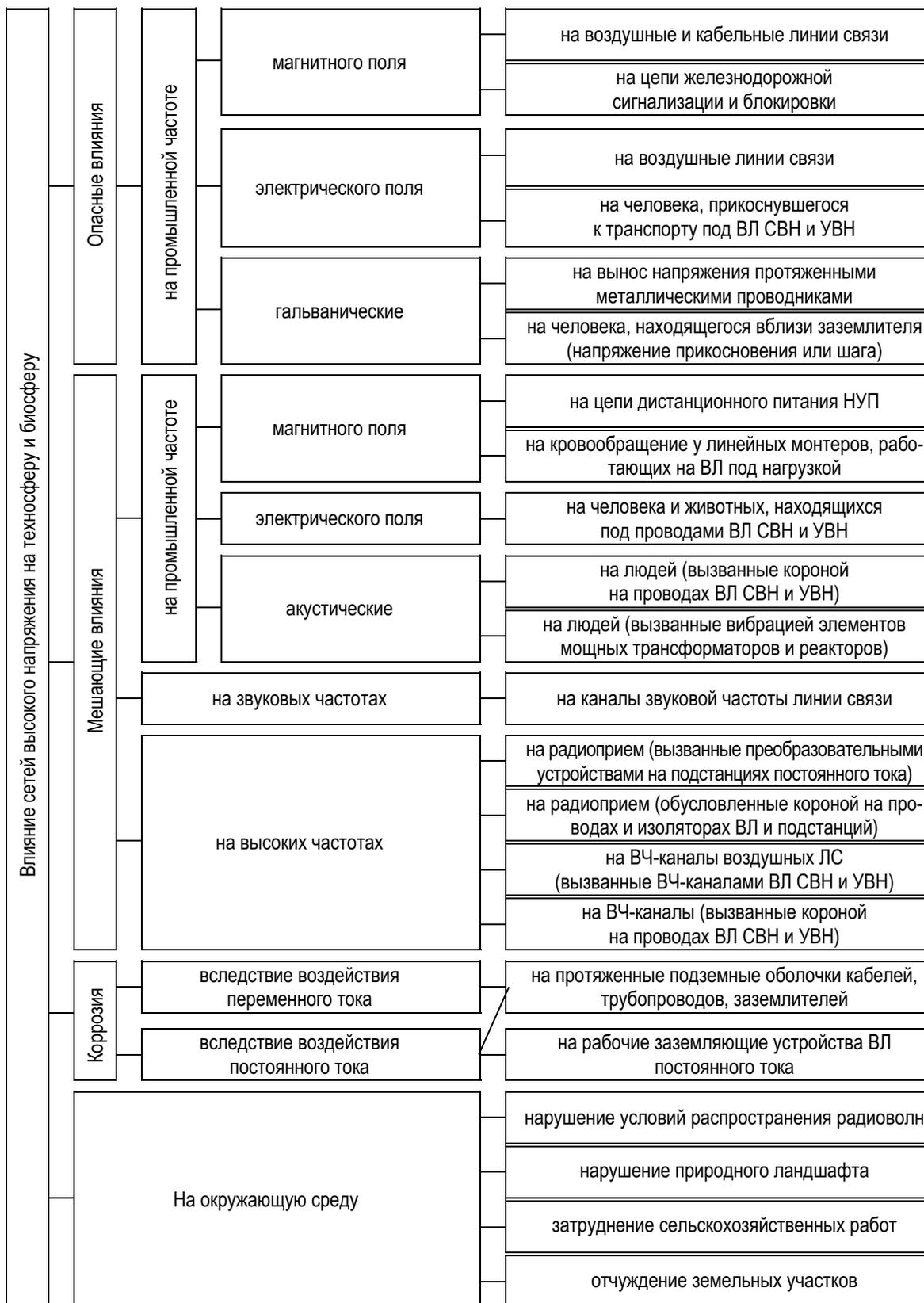


Рис. 2.1. Классификация влияния электрических сетей на техно- и биосферу

Опасные гальванические влияния вызываются большими аварийными токами короткого замыкания через заземляющие устройства подстанций и линий УВН и СВН. Эти токи достигают десятков килоампер, а потенциал заземлителя – тысяч вольт. Кроме этого, может представлять опасность высокое напряжение, выносимое с подстанции по рельсам, трубопроводам, оболочкам кабелей и другим протяженным металлическим предметам. Гальваническая составляющая напряжения может способствовать повышению разности напряжений между проводом линии связи и заземленной опорой этой линии, расположенной вблизи от аварийной опоры ВЛ.

Под *мешающим влиянием* следует понимать помехи, которые возникают в сетях высокого напряжения в условиях длительного (нормального) режима их работы. Они не создают непосредственной опасности для сооружений техносферы, однако ухудшают качество, снижают надежность или создают затруднения для нормального функционирования связи, телевидения, радио и т. д. Мешающие влияния не представляют опасности и для биосферы, однако вызывают неприятные ощущения, ухудшают самочувствие, затрудняют нормальный жизненный цикл или трудовой режим людей.

Рабочие токи 50 Гц в проводах ВЛ образуют магнитное поле, создающее мешающее влияние в цепях дистанционного питания неуправляемых усилительных пунктов высокочастотных каналов в кабелях связи, других устройствах связи, использующих землю в качестве обратного провода.

Высшие гармоники токов и напряжений крайне нежелательны: они неблагоприятно сказываются на работе электрических сетей, создают дополнительные потери в проводах и магнитопроводах, местные перегревы, резонансные повышения напряжения и, кроме того, помехи в тональных (звуковых) каналах ЛС. Основная работа связи осуществляется по высокочастотным каналам. Однако каналы связи на звуковых частотах оказываются основными в чрезвычайных условиях, особенно при сильном гололеде на проводах ЛС, когда затухание сигналов в высокочастотных каналах сильно возрастает.

Высшие гармоники в сетях высокого напряжения возникают главным образом вследствие работы полупроводниковых преобразовательных устройств, а также электроплавильных печей, электросварочных агрегатов и из-за насыщения стали трансформаторов.

Мешающие влияния токов высокой частоты линий ВН на линии связи возникают вследствие работы высокочастотных (ВЧ) каналов и короны на ВЛ.

Импульсы токов коронного разряда на проводах и изоляторах, накладываясь друг на друга со смещением вдоль линии и во времени, создают потери энергии и общий уровень радиопомех и высокочастотных помех в ВЛ и ЛС. Спектр частот излучения, создающий радиопомехи, охватывает диапазон от 10 кГц до 1 ГГц. Помехи на частоте выше 30 МГц оказывают мешающее влияние на телеприем и возникают только при коронировании линий 750 кВ. Источниками радиопомех в этом случае, помимо короны на проводах, служат частичные разряды в зазорах и трещинах изоляторов и корона на заостренных элементах арматуры. В хорошую погоду корона на проводах практически не создает помех телевизионному приему.

Интенсивность радиопомех характеризуется вертикальной составляющей электрического поля вблизи поверхности земли E_3 . Уровень радиопомех определяется величиной

$$Y = 20 \lg E_3, \quad (2.1)$$

где E_3 – напряженность электрического поля, мкВ/м.

В качестве расчетной частоты принимается $f = 0,5$ МГц. Допустимый уровень радиопомех в хорошую погоду составляет 40 дБ, что в соответствии с (2.1) дает $E_3 = 100$ мкВ/м. Это значение напряженности электрического поля принято в качестве допустимого на расстоянии 100 м от проекции крайнего провода линии электропередачи напряжением 300 кВ и выше.

Увеличение радиуса проводов, при неизменной напряженности поля, приводит к росту уровня радиопомех, поскольку спад напряженности поля у провода в радиальном направлении при этом замедляется, и создаются условия для развития более интенсивной стримерной короны. Радиопомехи практически не зависят от числа составляющих в фазе, поскольку происходит взаимное электромагнитное экранирование проводов фазы. На величину радиопомех оказывают влияние ряд факторов, основные из которых: радиус проводов, погодные условия, состояние поверхности провода, степень загрязненности атмосферы. Дождь, мокрый снег повышают уровень радиопомех на 10 дБ, сухой снег, изморось на – 5 дБ. При включении новых линий радиопомехи примерно в 4...5 раз выше, чем от линий с состарившимися проводами. Полное старение проводов в основном заканчивается через 4...5 лет эксплуатации.

Практически на всех ВЛ работают высокочастотные каналы релейной защиты и противоаварийной автоматики, обеспечивающие диспетчерское и технологическое управление нормальной и безаварийной работой энергосистем в диапазоне 30...300 кГц. Передача высокочастотных сигналов требует применения вспомогательной аппаратуры, со-

стоящей из конденсатора связи и высокочастотного заградителя. Уровень сигналов по ним должен значительно превышать уровень высокочастотных помех даже в самых неблагоприятных условиях. Поэтому на ВЛ, особенно в случае СВН и УВН, применяются мощные высокочастотные передатчики ($P > 100$ Вт). Они могут оказать мешающее влияние на значительно менее мощные ВЧ-каналы связи по ЛС. Для уменьшения влияния важно избегать совпадения частот каналов по ВЛ и ЛС и выполнять указанные выше дополнительные меры.

Акустические помехи высокой интенсивности также неблагоприятно сказываются на самочувствии людей. В отдельных элементах электрических аппаратов под влиянием переменных электромагнитных полей возникают электродинамические силы. Они пульсируют с двойной частотой (100 Гц) и создают механическую вибрацию.

В последнее время внимание специалистов привлек еще один эффект ВЛ СВН, влияющий на экологическую обстановку. Речь идет о создаваемом линиями шуме. Шум можно слышать при хорошей погоде (без осадков), но особенно он усиливается при дожде. Шум вызывается коронным разрядом на проводах. При отсутствии осадков он определяется «электрическим ветром» – движением воздуха по замкнутым траекториям (рис. 2.2), вызванным лавинно-импульсным механизмом разряда с отдельных точек поверхности провода, положение которых регулируется сопряженными воздушными потоками. Скорость воздушного потока в зоне ионизации вокруг провода, определяемая движением положительных ионов к границе зоны ионизации со скоростью ~ 500 м/с, достигает 20 м/с. При наличии капель дождя на проводе возникает новый процесс, связанный с деформацией заряженных капель и их отрывом от поверхности провода.

Наиболее сильные акустические помехи возникают при морозящем дожде или тумане, когда вибрирующими элементами оказываются капли воды, ионизированные коронным разрядом у поверхности провода. В результате такой вибрации ВЛ 110...220 кВ при дожде «шипят», ВЛ 330...500 кВ «гудят», а ВЛ 750 кВ «ревут».

Уровень шума в децибелах (дБА), в зависимости от напряженности поля на проводах и конструктивных параметров провода, можно приближенно определить по формуле:

$$A = 16 + 1,11 \cdot E_{max} + 9r_0 + 15 \lg(n) - 10 \lg(X), \quad (2.2)$$

где E_{max} – действующее значение максимальной напряженности поля на поверхности провода, кВ/см; r_0 – радиус провода, см; n – число проводов в фазе; X – расстояние от крайней фазы, м.

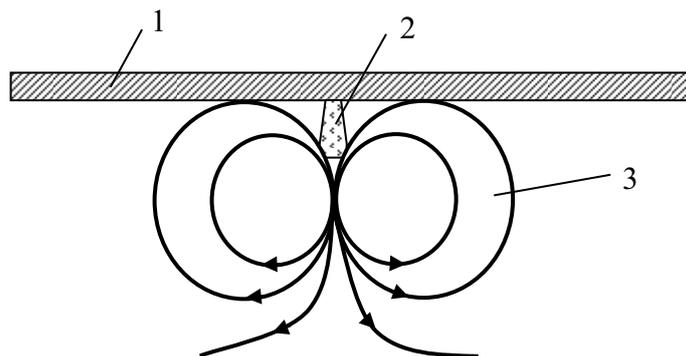


Рис. 2.2. Воздушный поток у поверхности провода:

1 – провод; 2 – многолапчатый импульс короны; 3 – вихревой поток воздуха

Наличие трех фаз можно учесть путем добавления 3...4 дБ.

Санитарным уровнем является $A = 45$ дБ. Согласно СНиП ВЛ, СВН и УВН не должны приближаться к населенным пунктам ближе 300 м.

Значительное шумовое воздействие на окружающую среду производят распределительные устройства. Основным источником шума в РУ являются силовые трансформаторы, реакторы (постоянный шум) и воздушные выключатели (только в процессе отключения). При этом вибрируют стальные листы магнитопроводов и медные провода обмоток, особенно если частота колебаний их элементов приближается к 100 Гц. Шум, создаваемый трансформаторами, усиливается при увеличении массы магнитопровода.

Одним из способов управления качеством трансформаторов является нормирование допустимого уровня шума (ГОСТ 12.1.003–83).

Однако эти нормированные уровни шума значительно превышают допустимые для территории жилой застройки, располагающейся вблизи РУ. Для согласования этих норм уровней шума (вблизи трансформаторов и на территории жилой застройки) используется эффект уменьшения уровня звука при увеличении расстояния от трансформатора до точки измерения уровня звука (уровень звука изменяется примерно обратно пропорционально этому расстоянию).

Таким образом, при проектировании РУ определяется расстояние, на котором следует его располагать для ограничения уровня шума до допустимого на территории жилой застройки. Если такое расстояние реализовать невозможно, может быть использовано одно из следующих мероприятий.

- Создание звукового экрана между РУ и территорией жилой застройки, как правило, в виде стенки необходимой высоты и толщины с учетом рельефа местности (см. СНиП II–12–77).

- Окружение трансформатора со всех сторон звукопоглощающими преградами (естественно, это крайняя мера).
- Создание полос зеленых насаждений между РУ и территорией жилой застройки; при этом должно быть обеспечено плотное прилегание крон деревьев между собой и заполнение пространства под кронами до земли кустарником.

Электрохимическая коррозия возникает в подземных металлических предметах главным образом в местах выхода из них положительных ионов под действием электрического поля блуждающих токов в земле. При нормальном симметричном режиме работы трехфазной линии электропередачи в земле протекает лишь небольшой уравнивающий ток нулевой последовательности. В несимметричном режиме работы трехфазной сети ток в земле значительно увеличивается. Однако вследствие поверхностного эффекта этот ток концентрируется вблизи поверхности земли, и в основном под проводами линии, с шириной полосы (в метрах).

$$b = 800\sqrt{\rho / f}, \quad (2.3)$$

где ρ – удельное сопротивление земли, Ом·м; f – частота, Гц.

Кроме того, переменный ток вызывает значительно меньшую электрохимическую коррозию, чем постоянный. Следовательно, основным источником электрохимической коррозии является блуждающий постоянный ток, область которого практически неограниченна. Он создается в основном несимметричными линиями постоянного тока (трамвай, электрифицированная железная дорога, линия электропередачи постоянного тока в несимметричном режиме работы).

Наиболее интенсивной коррозии подвергаются рабочие заземляющие устройства электропередач постоянного тока сверхвысокого напряжения в несимметричном режиме работы. Особенно сильная коррозия возникает у заземлителя, работающего в анодном режиме, при котором ионы металла переходят из электрода в окружающую землю, грунтовые воды. Поэтому можно допускать несимметричную работу таких передач лишь в течение крайне ограниченного времени.

Механизм электрохимической коррозии протяженных подземных оболочек кабелей, трубопроводов и заземлителей под воздействием постоянных блуждающих токов $I_{бл}$ заключается в следующем: блуждающий ток стекает в проводник на катодных участках, где потенциал проводника оказывается отрицательным по отношению к окружающему грунту и избыточные электроны переходят из металла в грунт. На анодном участке проводник заряжен положительно, ток вытекает из проводника, ионы металла переходят в грунт, и проводник (оболочка кабеля,

трубопровод или заземлитель) разрушается под воздействием общей коррозии (рис. 2.3). Кроме того, в местах нарушения изоляционных покрытий неплотных контактов, трещин и других неоднородностей на поверхности металла образуются питтинги с местными анод-катодными парами. Возникают наиболее опасные виды коррозии: язвенная и щелевая, приводящие к местному разрушению металла на всю его глубину и преждевременному выходу из строя кабеля или трубопровода.

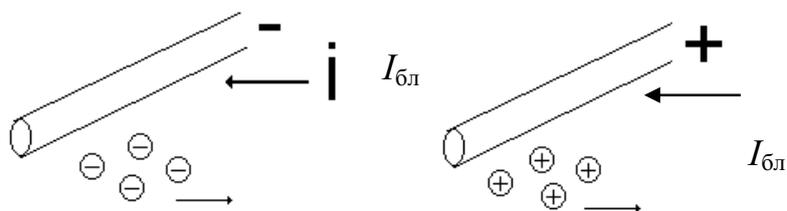


Рис. 2.3. Механизм электрохимической коррозии

Для уменьшения интенсивности коррозии, необходимо принять все меры для уменьшения блуждающих токов и их длительности, устроить дренаж (отвод) блуждающих токов на специальные защитные электроды (протекторная защита), применить анодную защиту (т. е. принудительно сообщить защищаемому проводнику отрицательный потенциал от специального, достаточно мощного источника постоянной ЭДС, положительный полюс которой заземлен в достаточном удалении от защищаемого проводника), выполнить надежные изоляционные покрытия оболочек кабеля или трубопровода.

Электрические сети высокого напряжения требуют отчуждения участков земли и оказывают неблагоприятное влияние на окружающую среду вследствие эксплуатации крупногабаритных опор и подвешенных на них проводов и тросов, нарушающих условия распространения радиоволн и искажающих показания радиотелескопов, устройств космической связи, радиолокаторов, радиорелейных линий. Наличие опоры и оттяжек затрудняет сельскохозяйственные работы. Нарушение природного ландшафта требует разработки конструкций и окраски опор и подвески проводов, удовлетворяющих требованиям эстетики.

При наличии широкой просеки вдоль трассы ВЛ деревья теряют устойчивость, характерную для сплошных лесных массивов. В связи с этим велика опасность падения деревьев на линию с последующим обрывом проводов. В этой связи ПУЭ предусматривает соответствующие меры безопасности, в частности, в лесных массивах высотой более 4 м для всех ВЛ 330 кВ и выше, а также для радиальных ВЛ 220 кВ, служащих единственным источником электропитания потребителей, ширина просеки определяется расстоянием между крайними проводами линий плюс рас-

стояние от крайних проводов до лесного массива, равное высоте деревьев основного лесного массива. Из табл. 2.1, в которой в качестве примера приведены различные параметры, характеризующие влияние ЛЭП на лесные массивы, видно, что общая площадь ВЛ в лесных угодьях (принято, что половина трасс ВЛ проходит в лесных массивах, а для ВЛ 220 кВ этот показатель снижен до 1/3) приближается к половине миллиона гектар, что, очевидно, наносит огромный ущерб лесному хозяйству.

По данным РАО «ЕЭС России», в 1997 году энергосистемы эксплуатируют 2 млн 400 тыс. км воздушных линий напряжением 0,4...1150 кВ, из них более 250 тыс. км (10,4 %) проходят по лесным массивам и зеленым насаждениям, что привело к потере миллионов гектаров леса.

Для уменьшения ущерба от вырубки леса в настоящее время ведутся работы по проектированию линий электропередач с увеличенной высотой опор (в том числе и для прохождения ВЛ над лесом), а также с применением опор специальных типов, позволяющих значительно сократить ширину просеки и вырубки леса.

Таблица 2.1

Влияние воздушных линий электропередач на лесные массивы

$U_{\text{ном}}$, кВ	220	330	500	750	1150
Площадь отчужденной земли под опоры, м ²	240	260	320	830	1280
Площадь отчужденной земли на 1 км линии, м ²	600	650	800	2100	3200
Расстояние между крайними проводами, м	14	18,5	23,5	40	47
Ширина просеки (при высоте деревьев 20 м), м	54	59	64	80	87
Протяженность ВЛ на конец 1985 г., тыс. км	116	29	38	6,2	1,3
Общая площадь линий в лесах, тыс. га	200	84	120	25	6

2.2. Электромагнитная совместимость высоковольтных устройств

При эксплуатации высоковольтного оборудования имеют место проблемы, связанные с ЭМС первичных (силовых) и вторичных цепей (устройства релейной защиты и автоматики (РЗА), режимной и противоаварийной автоматики (ПА), автоматизированных систем управления технологическими процессами (АСУ ТП) и устройства высокочастот-

ной (ВЧ) связи по проводам и грозозащитным тросам). Вторичные цепи имеют рабочие напряжения, не превышающие сотен вольт, т. е. на три порядка ниже, чем у первичных цепей. Поэтому для вторичных цепей представляют опасность воздействия помех, которые возникают при коммутациях электрооборудования, коротких замыканиях, грозовых перенапряжениях, разрядах статического электричества и др.

Для электромеханических устройств систем управления, обладающих высокой электрической прочностью изоляции и инерционностью срабатывания, импульсные помехи не представляют такой серьёзной опасности, как для устройств, выполненных с применением электронных и микропроцессорных элементов, которые из-за низкого уровня и широкого частотного спектра рабочих сигналов имеют высокую чувствительность к импульсным помехам (табл. 2.2).

2.3. Влияние электрических и магнитных полей на человека

В настоящее время все большее значение приобретают проблемы негативного влияния на человека электромагнитных полей. Электромагнитное загрязнение является одним из наименее изученных на сегодняшний день факторов, в исследовании которых принимают участие специалисты различных направлений (биофизики, медики, биологи, сангигиенисты и др.). В силу этого в настоящее время нет однозначной трактовки количественных и качественных показателей по вредному влиянию ЭМП на людей, животных и растения. Принято отдельно рассматривать влияние на человека электрического и магнитного поля, в соответствии с этим нормируются допустимые для полей значения.

При производстве работ на не отключенном оборудовании ВЛ и ПС персонал может подвергаться воздействию комплекса неблагоприятных факторов производственной среды – электрических и магнитных полей промышленной частоты (ЭП и МП ПЧ); связанных с электрическим полем токов смещения и импульсных токов, имеющих место в момент выравнивания потенциалов тела человека и токопроводящих предметов, и шума. Существенное влияние могут иметь факторы коронного разряда: электромагнитное излучение широкополосного спектра частот, озон и окислы азота, слышимый треск и ультразвук.

Таблица 2.2

*Чувствительность технических устройств
к электромагнитным помехам*

Устройства	Степень повреждения при энергии, Дж													
	-7	-6	-5	-4	-3	-2	-1	0	1	2	3	4	5	6
Электродвигатели, силовые трансформаторы												•	•	
Катушки индуктивности фильтров						•	•							
Измерительные приборы, реле					•	•	•							
Мощные проволочные резисторы					•	•	•	•	•	•				
Плёночные резисторы				•	•	•								
Варисторы				•	•	•	•	•	•	•				
Конденсаторы				•	•	•								
Выпрямительные диоды и стабилитроны				•	•	•	•	•						
Светодиоды и переключающие диоды		•	•	•	•	•								
СВЧ-диоды	•	•	•	•										
Тиристоры			•	•	•	•	•							
Мощные транзисторы			•	•	•	•								
Интегральные микросхемы и чувствительные элементы ЭВМ	•	•	•	•	•									

• – нарушение режимов работы изделия

■ – разрушение изделия

Все эти воздействия обуславливают тормозные процессы в центральной нервной системе, головную боль, вялость, быструю утомляемость. Наблюдаются изменения состава крови и давления, учащения пульса. Токи смещения в переменном ЭП или индуктированные токи в переменном МП при большой напряженности могут изменить процесс обмена веществ. Больше влияние на людей оказывают поля промышленной частоты, т. к. при увеличении частоты сказывается инерцион-

ность открытия мембран, а при уменьшении частоты уменьшаются индуктированные и емкостные токи.

Восприимчивость людей к полям сугубо индивидуальна, например 5 % чувствуют ЭП с $E = 7$ кВ/м, а 60 % не ощущают поле с $E = 20$ кВ/м. Как правило, даже сильные МП находятся ниже зоны восприимчивости человеком (мерцания на периферийных участках поля зрения).

В России уровни ЭМП для персонала регламентированы СанПиН 2.2.4.1191–03 «Электромагнитные поля в производственных условиях». Санитарные правила устанавливают предельно допустимые уровни (ПДУ) ЭМП, а также требования к проведению контроля уровней ЭМП на рабочих местах, методы и средства защиты работающих.

В электроэнергетике основное воздействие оказывают ЭМП ПЧ (50 Гц), нормирование которых осуществляется отдельно по напряженности электрического поля и напряженности магнитного поля или индукции магнитного поля.

Электрическое поле (50 Гц)

Различают следующие виды воздействия электрического поля на человека:

1. Непосредственное влияние:

- воздействие емкостного тока I_c на сердечно-сосудистую, центральную и периферийную нервную систему при нахождении человека в зоне электрического поля, в том числе стоящего непосредственно на земле (рис. 2.4, а), а также изолированного от земли (рис. 2.4, б), приводящее к изменению давления и пульса, аритмии, повышенной нервной возбудимости и утомляемости, беспokoйству, депрессиям, головным болям;
- электростатическое влияние на волосяной покров человека (вибрация волос при напряженности ЭП 20...50 кВ/м).

2. Косвенное воздействие:

- электрических разрядов (импульсного тока I_p), возникающих при прикосновении человека, изолированного от земли, к растениям, заземленным конструкциям и другим заземленным объектам (рис. 2.5, а);
- электрических разрядов (импульсного тока I_p), возникающих при прикосновении человека к изолированным от земли конструкциям, корпусам машин и механизмов на пневматическом ходу (рис. 2.5, б);
- тока стекания I_3 , проходящего через человека, находящегося в длительном контакте с изолированными от земли объектами (рис. 2.5, б).

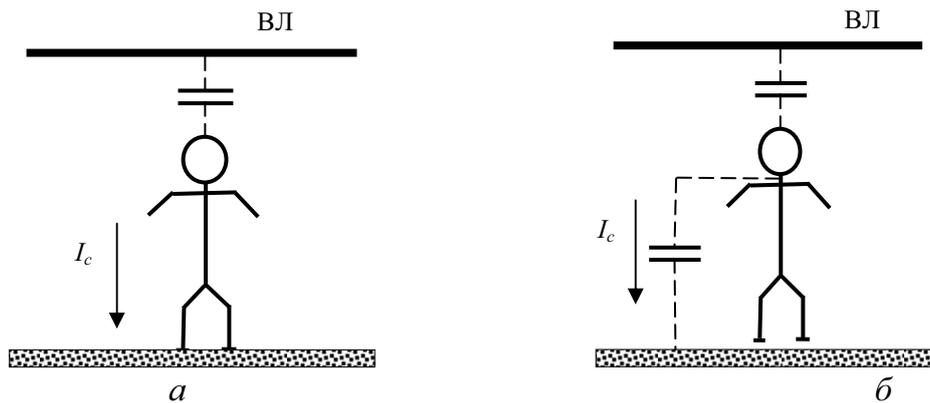


Рис. 2.4. Прямое влияние электрического поля на человека

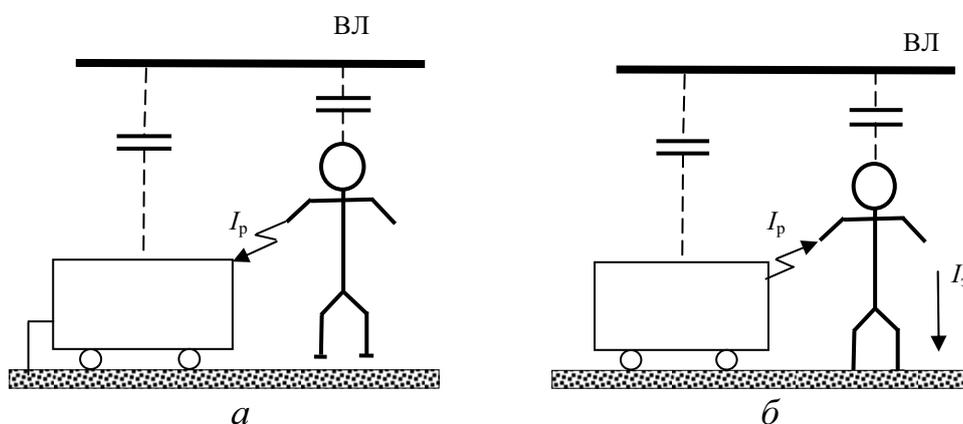


Рис. 2.5. Примеры косвенного влияния электрического поля на человека

Кроме того, электрическое поле может стать причиной воспламенения паров горючих материалов и смесей в результате возникновения электрических разрядов при соприкосновении предметов и людей с машинами и механизмами. Степень опасности возрастает с увеличением напряженности электрического поля.

СанПиН установлены предельно допустимые уровни напряженности электрического поля промышленной частоты для персонала:

- $E \geq 25$ кВ/м – пребывание в ЭП без средств защиты не допускается;
- $20 < E < 25$ кВ/м – пребывание в ЭП не более 10 минут;
- при $5 < E \leq 20$ кВ/м допустимое время пребывания в ЭП вычисляют как

$$T = \frac{50}{E} - 2, \text{ ч}; \quad (2.4)$$

- $E \leq 5$ кВ/м – пребывание в ЭП допускается в течение полного рабочего дня.

Допустимое время пребывания в ЭП может быть реализовано однократно или дробно в течение рабочего дня. В остальное рабочее время необходимо находиться вне зоны влияния ЭП или применять средства защиты.

Время пребывания персонала в течение рабочего дня в зонах с различной напряженностью ЭП ($T_{пр}$) вычисляют по формуле:

$$T_{пр} = 8 \cdot \left(\frac{t_1}{T_{E1}} + \frac{t_2}{T_{E2}} + \dots + \frac{t_i}{T_{Ei}} \right), \quad (2.5)$$

где $T_{пр}$ – приведенное время, эквивалентное по биологическому эффекту пребыванию в ЭП нижней границы нормируемой напряженности; $t_{E1}, t_{E2}, \dots, t_{En}$ – время пребывания в контролируемых зонах с напряженностью E_1, E_2, \dots, E_i ; $T_{E1}, T_{E2}, \dots, T_{En}$ – допустимое время пребывания для соответствующих контролируемых зон.

Приведенное время не должно превышать 8 ч.

Количество контролируемых зон определяется перепадом уровней напряженности ЭП на рабочем месте. Различие в уровнях напряженности ЭП контролируемых зон устанавливается 1 кВ/м.

Эти требования действительны при условии, что проведение работ не связано с подъемом на высоту, исключена возможность воздействия электрических разрядов на персонал, а также при условии защитного заземления всех изолированных от земли предметов, конструкций, частей оборудования, машин и механизмов, к которым возможно прикосновение работающих в зоне влияния ЭП.

Электрические поля от линий электропередач также воздействуют на население. Существует определенная вероятность ошибок при проектировании и расположении питающих сетей в районах массовой застройки или разводки сетей в пределах дома (как правило, первый этаж). Первый признак превышения норм по этому показателю – частые сбои при работе бытовой техники: помехи на экранах телевизоров, мониторов персональных компьютеров, радиопомехи. Для населения определены допустимые уровни воздействия электрического поля промышленной частоты (табл. 2.3).

Предельно допустимые значения напряженности нормируются для электрического поля, не искаженного присутствием человека. Поэтому напряженность электрического поля определяется на высоте 1,8 м от уровня земли, а для помещений – от уровня пола.

В целях защиты населения от воздействия электрического поля ВЛ устанавливаются санитарно-защитные зоны. Санитарно-защитной зоной является территория вдоль трассы ВЛ, в которой напряженность электрического поля превышает 1 кВ/м. Для вновь проектируемых ВЛ, а также зданий и сооружений допускается принимать границы санитарно-защитных зон вдоль трассы ВЛ с горизонтальным расположением прово-

дов и без средств снижения напряженности электрического поля по обе стороны от нее на следующих расстояниях от проекции на землю крайних фазных проводов в направлении, перпендикулярном к ВЛ: 20 м – для ВЛ напряжением 330 кВ; 30 м – 500 кВ; 40 м – 750 кВ; 55 м – 1150 кВ.

Таблица 2.3

Допустимые уровни напряженности электрического поля промышленной частоты для населения

$E_{\text{пду}}$, кВ/м	Тип местности
0,5	Внутри жилых зданий
1	Территория зоны жилой застройки
5	Населенная местность вне зоны жилой застройки (земли городов в пределах городской черты в границах их перспективного развития на 10 лет, пригородные и зеленые зоны, курорты, земли поселков городского типа в пределах поселковой черты и сельских населенных пунктов в пределах черты этих пунктов), а также на территории огородов и садов
10	Участки пересечения ВЛ с автомобильными дорогами I–IV категории
15	Ненаселенная местность (незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта, и сельскохозяйственные угодья)
20	Труднодоступная местность (недоступная для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населению)

В пределах санитарно-защитной зоны запрещается:

- размещение жилых и общественных зданий и сооружений, площадок для стоянки и остановки всех видов транспорта, предприятий по обслуживанию автомобилей и складов нефти и нефтепродуктов;
- производство операций с горючим, выполнение ремонта машин и механизмов.

Для ограничения напряженности электрического поля под ВЛ проводятся следующие мероприятия.

1. Установка заземленных тросов под проводами линий. Наведенные на заземленных тросах заряды частично компенсируют поле проводов линии и ограничивают напряженность поля. Однако подвеска дополнительных тросов приводит к заметному удорожанию линии. Поэтому тросовые экраны применяются только при пересечениях линией дорог. При этом они натягиваются между дополнительными железобетонными стойками.

2. Увеличение высоты подвеса проводов. Для обеспечения допустимых значений напряженности поля под ВЛ, в ПУЭ регламентируется минимальное расстояние от провода ВЛ до земли – габарит линии.

3. Использование растительного массива под линиями. Стволы и ветки деревьев, кустарников имеют высокую проводимость в течение всего года. Погонное сопротивление составляет 1...3,5 МОм/м при положительных температурах и 100...500 МОм/м при отрицательных температурах. В связи с этим при высоте древесно-кустарниковой растительности под проводами 4 м напряженность поля не превышает 1 кВ/м при отрицательных температурах и 0,01 кВ/м при положительных температурах. Это обеспечивает полную экологическую безопасность людей и животных под линиями.

Магнитное поле (50 Гц)

Магнитное поле имеет место в электроустановках всех классов напряжения. Его интенсивность выше вблизи выводов генераторов, токопроводов, блочных силовых трансформаторов и автотрансформаторов связи ОРУ разных напряжений (особенно на уровне разъема бака), а также ЗРУ 6...10 кВ и вблизи них. В помещениях вблизи КРУ, вблизи электродвигателей, ОРУ, КЛ, ВЛ всех напряжений интенсивность магнитного поля существенно ниже.

Воздействие магнитного поля на персонал может быть как общим, так и преимущественно локальным (на конечности). Магнитное поле индуцирует в теле человека вихревые токи. Согласно современным представлениям, индуцирование вихревых токов является основным механизмом биологического действия магнитных полей. Основным параметром, его характеризующим, является плотность вихревых токов. Допустимое значение плотности вихревого тока в организме положено в основу и всех действующих в мире гигиенических регламентов магнитного поля (с разными коэффициентами гигиенического запаса).

Интенсивность воздействия МП определяется напряженностью (H) или магнитной индукцией (B) (их эффективными значениями). Напряженность МП выражается в А/м (кратная величина кА/м); магнитная индукция в Тл (дольные величины мТл, мкТл, нТл). Индукция и напряженность МП связаны соотношением:

$$B = \mu_0 \cdot H = 1,25 \cdot H, \text{ мкТл}, \quad (2.7)$$

где $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ Гн/м – магнитная постоянная; H – напряженность магнитного поля, А/м.

Предельно допустимые уровни напряженности магнитного поля для персонала устанавливаются в зависимости от времени пребывания персонала для условий общего (на все тело) и локального (на конечности) воздействия (табл. 2.4).

Допустимая напряженность МП внутри временных интервалов определяется в соответствии с кривой интерполяции, приведенной на рис. П. 1. При необходимости пребывания персонала в зонах с раз-

личной напряженностью (индукцией) МП общее время выполнения работ в этих зонах не должно превышать предельно допустимое для зоны с максимальной напряженностью. Допустимое время пребывания может быть реализовано однократно или дробно в течение рабочего дня.

Таблица 2.4

Предельно допустимые уровни воздействия магнитного поля

Время пребывания (ч)	Допустимые уровни МП, H (А/м)/ B (мкТл) при воздействии поля	
	общем	локальном
< 1	1 600/2 000	6 400/8 000
2	800/1 000	3 200/4 000
4	400/500	1 600/2 000
8	80/100	800/1 000

Для населения установлена предельно-допустимая гигиеническая норма: 10 мкТл внутри жилых помещений и 50 мкТл на территории зоны жилой застройки (СанПиН 2.1.2.1002–00).

Обеспечение защиты работающих от неблагоприятного влияния ЭМП осуществляется путем проведения организационных, инженерно-технических и лечебно-профилактических мероприятий.

Организационные мероприятия при проектировании и эксплуатации оборудования, являющегося источником ЭМП, или объектов, оснащенных источниками ЭМП, включают:

- выбор рациональных режимов работы оборудования;
- выделение зон воздействия ЭМП (зоны с уровнями ЭМП, превышающими предельно допустимые, где по условиям эксплуатации не требуется даже кратковременное пребывание персонала, должны ограждаться и обозначаться соответствующими предупредительными знаками);
- расположение рабочих мест и маршрутов передвижения обслуживающего персонала на расстояниях от источников ЭМП, обеспечивающих соблюдение ПДУ;
- ремонт оборудования, являющегося источником ЭМП, следует производить (по возможности) вне зоны влияния ЭМП от других источников;
- соблюдение правил безопасной эксплуатации источников ЭМП.

Инженерно-технические мероприятия должны обеспечивать снижение уровней ЭМП на рабочих местах путем внедрения новых технологий и применения средств коллективной и индивидуальной защиты (когда фактические уровни ЭМП на рабочих местах превышают ПДУ, установленные для производственных воздействий).

Средствами защиты от воздействия ЭМП частотой 50 Гц являются: стационарные экранирующие устройства в виде пассивных или активных экранов и экранирующие комплекты. Индивидуальные средства защиты (защитная одежда) должны изготавливаться из металлизированной (или любой другой ткани с высокой электропроводностью) и иметь санитарно-эпидемиологическое заключение. Защитная одежда включает в себя: комбинезон или полукомбинезон, куртку с капюшоном, халат с капюшоном, жилет, фартук, средство защиты для лица, рукавицы (или перчатки), обувь. Все части защитной одежды должны иметь между собой электрический контакт.

Экранирующие комплекты типа Эп (рис. 2.6) являются универсальным средством защиты от вредного воздействия всех факторов электромагнитной природы, создаваемых электроустановками с напряжением до 1150 кВ переменного тока. Они обеспечивают снижение неблагоприятного воздействия электрического поля на человека до уровня не выше имеющего место при выполнении работ, без применения средств защиты в зоне с напряженностью неискаженного электрического поля до 5 кВ/м.

Экранирующие комплекты типа Эп обеспечивают защиту:

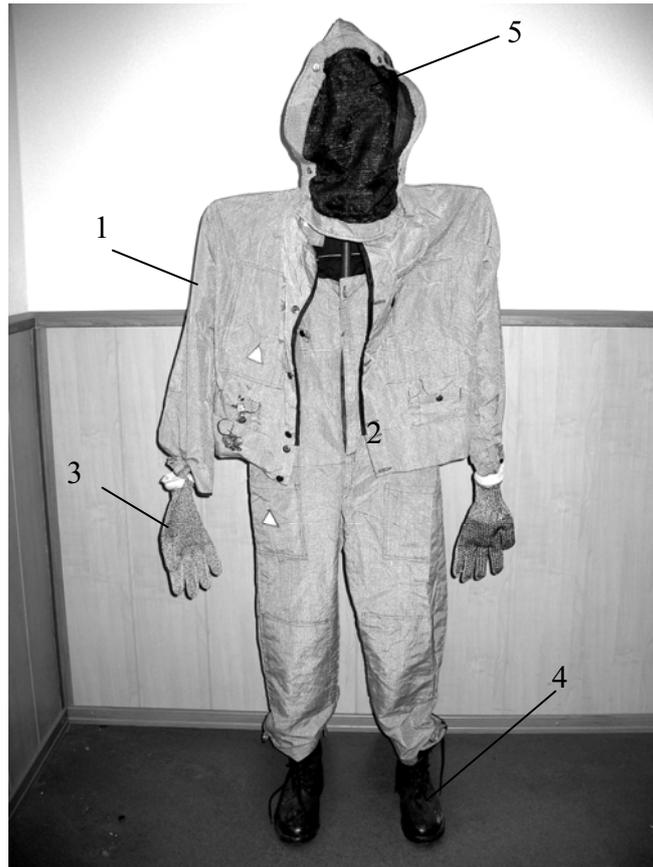
- от воздействия электрического поля;
- воздействия тока смещения, протекающего через тело человека, когда он находится в электрическом поле;
- воздействия импульсного тока (разрядов) при прикосновении к заземленным или изолированным предметам, частям оборудования, а также траве и мелкому кустарнику;
- воздействия интенсивного электромагнитного излучения, возникающего при оперировании разъединителями;
- воздействия возможной электротравмы при работе в зоне наведенного напряжения.

В состав экранирующих комплектов типа Эп входят гальванически соединенные друг с другом элементы: экранирующая куртка с капюшоном и экраном для лица, экранирующий полукомбинезон, экранирующий нагасник, экранирующие трикотажные перчатки, кожаные экранирующие ботинки.

Технические характеристики:

коэффициент экранирования комплекта не менее 60 дБ;
сопротивление экранирующей одежды не более 40 Ом;
сопротивление экранирующих перчаток не более 30 Ом;
сопротивление экранирующей обуви не более 500 Ом.

Применение экранирующих комплектов запрещается при работах в действующих сборках, панелях, цепях до 1000 В, расположенных в ОРУ 110...750 кВ, и при всех видах атмосферных осадков.



*Рис. 2.6. Экранирующий комплект типа Эп:
 1 – экранирующая куртка с капюшоном;
 2 – экранирующий полукомбинезон;
 3 – экранирующие трикотажные перчатки;
 4 – кожаные экранирующие ботинки; 5 – экран для лица*

2.4. Примеры угроз от излучаемых полей

2.4.1. Низкочастотные магнитные поля

- Напряженность 100 А/м отмечена на расстоянии 10 м от кабеля (8 кА) привода прокатного стана и более 1000 А/м на расстоянии менее 1 м.
- Напряженность 100 А/м отмечена на расстоянии 1 м от индуктора разогрева стальных заготовок мощностью 800 кВт на частоте 1,1 кГц.
- Напряженность 40 А/м наблюдается на расстоянии 0,25 м от катушки диаметром 50 мм аппарата сварки стальных труб мощностью 400 кВт на частоте 230 кГц.
- Напряженность 430 А/м наблюдается на расстоянии 1 м от установки нагрева медных заготовок мощностью 6 МВт на частоте 50 Гц.
- Электролитическая установка при постоянном напряжении 700 В и токе 60 кА создает напряженность 15 кА/м на позиции оператора.

- Напряженность поля на уровне земли под высоковольтной линией 400 кВ составляет 32 А/м.
- Коммерческое панельное подпольное отопление может создавать напряженность 160 А/м на уровне пола, 16 А/м на высоте 1 м от пола.
- Напряженность 8 А/м отмечена выше фальшпола, под которым уложены кабели электропитания от распределительного щита, на нижнем этаже многоэтажного офиса, и 2 А/м – на уровне стола.
- Водяной насос мощностью 1 кВт создает поле напряженностью 800 А/м на расстоянии 10 мм и 3 А/м на расстоянии 400 мм, а насос мощностью 18 кВт – 6 А/м на расстоянии 200 мм.
- Для сварочного аппарата получена напряженность 800 А/м около поверхности сварочного кабеля и его кабеля питания и не более 160 А/м на позиции оператора.

2.4.2. Низкочастотные электрические поля

- Устройство нагрева стальных труб с катушкой диаметром 60 мм, мощностью 8 кВт, частотой 490 кГц создает 100 В/м на расстоянии 0,3 м от катушки.
- Индукционная печь мощностью 1,5 кВт на частоте 20 кГц создает поле напряженностью 28 В/м на расстоянии 250 мм.
- Напряженность 1 кВ/м на открытом воздухе под линией 30 кВ и в закрытом помещении под линией 765 кВ.
- Напряженность поля на открытом воздухе под линией 400 кВ составляет 10 кВ/м.
- Напряженность поля на открытом воздухе под линией 765 кВ составляет 20 кВ/м.

2.4.3. Высокочастотные поля

- Установки нагрева диэлектриков, работающие в мегагерцевом диапазоне, мощностью от 3 до 15 кВт, могут создавать поля напряженностью 300 В/м на рабочем месте оператора (это не может рассматриваться как безопасный уровень!).
- Переносные радиостанции и мобильные телефоны могут генерировать поля напряженностью 30 В/м.
- Средневолновые радиостанции мощностью 1200 кВт создают поля напряженностью 32 В/м на расстоянии 0,5 км.
- Установки эрозионной обработки создают поля, эквивалентные 0,02 В/м на расстоянии 1 м.

3. ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ

Электромагнитная обстановка, в которой работает любая электронная техника, характеризуется наличием большого числа источников помех. Их можно разделить на две большие группы: *естественные* и *искусственные*.

Естественные источники электромагнитных помех: разряды атмосферного электричества при локальной грозовой деятельности в виде молний, а также возможные разряды статического электричества между телами, получившими заряды разной полярности. Все другие естественные источники глобального космического происхождения и вызванные ими помехи в виде атмосферных шумов, геомагнитных и геоэлектрических полей играют для рассматриваемой области слабую роль.

К *искусственным* источникам помех относятся разнообразные электроэнергетические, электротехнические, радиотехнические и иные устройства, использующиеся в быту, на производстве, для целей телекоммуникаций и т. д. В результате их действия возникает электромагнитный фон, включающий в себя поля промышленной частоты и высокого напряжения, а также импульсные воздействия. По интенсивности этот фон может значительно превышать естественные поля. В зарубежной литературе применительно к подобной электромагнитной обстановке появился термин «электросмог». К ним также относится электромагнитный импульс, возникающий при внеатмосферных ядерных взрывах.

Электромагнитные помехи, излучаемые различными источниками, воздействуют на приборы, линии сигналов или передачи данных, а также на системы электропитания, заземления устройств автоматизации отдельно или комбинированно при случайном наложении времени. Внутрь прибора они могут попасть совместно с полезными сигналами или с напряжением питания по проводам либо полевым путем, а также через антенны.

В дополнение к помехам, вызванным *внешними* источниками, могут возникнуть и *внутренние* помехи, распространяющиеся по проводам или в виде поля внутри системы. Не следует забывать, что прибор автоматизации может быть одновременно и чувствительным к помехам, и сам излучать помехи.

Причинами появления *внутренних* помех в системе, т. е. взаимного влияния приборов или конструктивных элементов, являются:

- напряжение питания с частотой 50 Гц;
- изменение потенциала в сетевых проводах питания устройств электроники;

- изменение сигналов в проводах управления или линиях передачи данных;
- высокочастотные или низкочастотные тактовые сигналы;
- коммутационные процессы в индуктивностях;
- магнитные поля ходовых механизмов с накопителями энергии;
- искровые разряды при замыканиях и размыканиях контактов;
- резонансные явления при замыкании контактов.

Кроме того, в устройствах автоматизации могут возникнуть и другие электрические факторы, которые станут причиной нарушения функционирования. Это – переходные сопротивления в контактах, шумы активных и пассивных элементов, дрейф параметров элементов, явления отражения в линиях и др. Эти возможные паразитные эффекты необходимо учитывать при разработке и изготовлении электронных средств автоматизации и соответствующими мерами ограничивать их влияние.

Во всех устройствах и приборах, использующих электрическую энергию, протекают нормальные и аварийные электромагнитные процессы, являющиеся потенциальными источниками помех. В зависимости от того, возникают ли электромагнитные влияния при преднамеренной генерации электромагнитных волн или они являются паразитными и имеют мало общего с первичной функцией источника, различают функциональные и нефункциональные источники помех.

К *функциональным* источникам относят радио- и телепередатчики, которые распространяют электромагнитные волны через передающие антенны в окружающую среду в целях передачи информации. К этой группе относятся также генераторы высокой частоты для промышленного или медицинского применения, микроволновые печи, устройства радиоуправления и т. д. Они создают помехи в областях низких, средних и высоких частот от нескольких герц до 100 ГГц в нормальном режиме работы.

Для функциональных источников интенсивность помех может быть точно установлена в соответствии с мощностью передачи и указана как предел в разрешении на эксплуатацию.

К *нефункциональным* источникам относятся автомобильные устройства зажигания, люминесцентные лампы, сварочное оборудование, релейные и защитные катушки, электрический транспорт, тиристорные выпрямители, контактные и бесконтактные (полупроводниковые) переключатели, проводные линии и компоненты электронных узлов, переговорные устройства, коронные и частичные разряды, коммутации в сетях высокого напряжения и т. д. Для нефункциональных источников

уровни помех должны быть ниже граничных значений, определяемых соответствующими нормативными документами. Создаваемые помехи случайно возникают во времени, как правило с широким частотным спектром, или являются паразитными, т. к. имеют мало общего с первичной функцией источника.

Соблюдение ЭМС с функциональными источниками оказывается сравнительно простым, так как их природа как передатчиков очевидна. Напротив, выявление нефункциональных источников оказывается сложной задачей. Их существование проявляется чаще всего в процессе поиска причины неожиданного аварийного поведения приёмной системы. Поэтому идентификация нефункциональных источников помех является важной задачей при обеспечении ЭМС. Только когда установлены источники помех и механизмы связи с приемниками, обеспечение ЭМС оказывается сравнительно простым.

Обобщающие сведения о параметрах электромагнитных помех представлены в табл. 3.1.

Таблица 3.1

Диапазоны значений помех

Параметр	Обозначение	Значение
Частота, Гц	f	$0 \dots 10^{10}$
Максимальное значение напряжения, В	U_{\max}	$10^{-6} \dots 10^6$
Скорость изменения напряжения, В/с	du/dt	$0 \dots 10^{12}$
Напряженность электрического поля, В/м	E	$0 \dots 10^5$
Максимальное значение тока, А	I_{\max}	$10^{-9} \dots 10^5$
Скорость изменения тока, А/с	di/dt	$0 \dots 10^{11}$
Напряженность магнитного поля, А/м	H	$10^{-9} \dots 10^{-2}$
Время нарастания импульса, с	T_{ϕ}	$10^{-8} \dots 10^{-2}$
Длительность импульса, с	$T_{и}$	$10^{-8} \dots 10^1$
Энергия импульса, Дж	W	$10^{-9} \dots 10^7$

3.1. Классификация источников помех по спектру частот

Источники электромагнитной энергии классифицируются по излучаемому ими спектру частот. Различают источники *широкополосных* и *узкополосных* помех.

Сигнал считается широкополосным, если его частотный спектр превышает ширину полосы частот приёмной системы, и узкополосным, если его спектр меньше ширины полосы приёмника (рис. 3.1).

Источники *узкополосных* помех являются искусственными. Это, например, радиопередатчики, которые на предоставленных им частотах излучают больше мощности, чем допустимо, или излучают высшие гармоники вследствие нелинейности элементов, промышленные ВЧ-генераторы,

а также электросеть 50 Гц. Такие источники характеризуются амплитудой или действующим значением помехи при соответствующей частоте (линейчатый спектр).

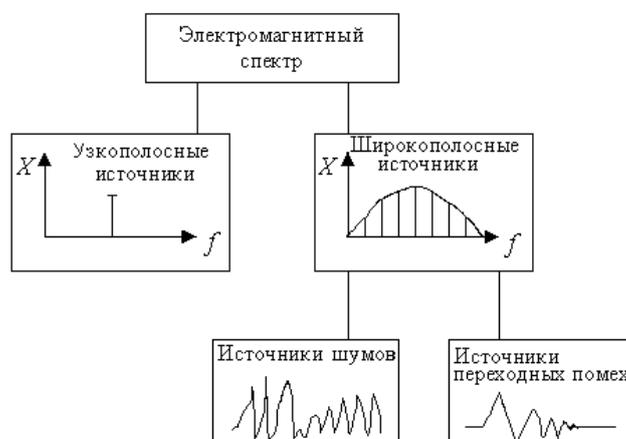


Рис. 3.1. Разделение передатчиков электромагнитной энергии на источники узкополосных и широкополосных помех

Широкополосные помехи обладают спектром с очень плотно расположенными друг к другу спектральными линиями (непрерывный спектр). Типичные их представители – естественные помехи, например космический шум, а также все переходные электромагнитные процессы.

Источники широкополосных помех подразделяют на источники шумовых и переходных помех. Шумовые помехи (например, рябь на экране телевизора, космические шумы) состоят из многих, вплотную соседствующих или перекрывающихся импульсов разной амплитуды, которые нельзя разделить или описать аналитическими временными функциями, хотя в совокупности шумовые помехи имеют определённые статистические закономерности.

Переходные помехи чётко отличаются одна от другой и проявляются в виде импульсов. Моменты появления помех могут быть распределены случайным образом (помехи от короны и частичных разрядов в изоляции оборудования, процессы при выключении катушек реле) или быть периодическими (помехи от тиристорных устройств).

Основополагающими в практике обеспечения ЭМС являются понятия *синфазных* и *противофазных* помех.

Синфазные помехи (несимметричные, продольные) возникают между каждым проводом и землёй (u_{c1} , u_{c2} на рис. 3.2) и воздействуют на изоляцию проводов относительно земли. Они вызываются главным образом уравнительными токами в заземлениях, а также магнитными полями.

Противофазные помехи (симметричные, поперечные) возникают между проводами двухпроводной линии (u_d на рис. 3.2).

Помехи большой амплитуды приводят к устранению, искажению или подмене полезных сигналов, и как следствие – к неправильной работе или повреждению устройств автоматики. Противофазные помехи возникают через гальванические или полевые связи или преобразуются из синфазных помех в системах, несимметричных относительно земли.

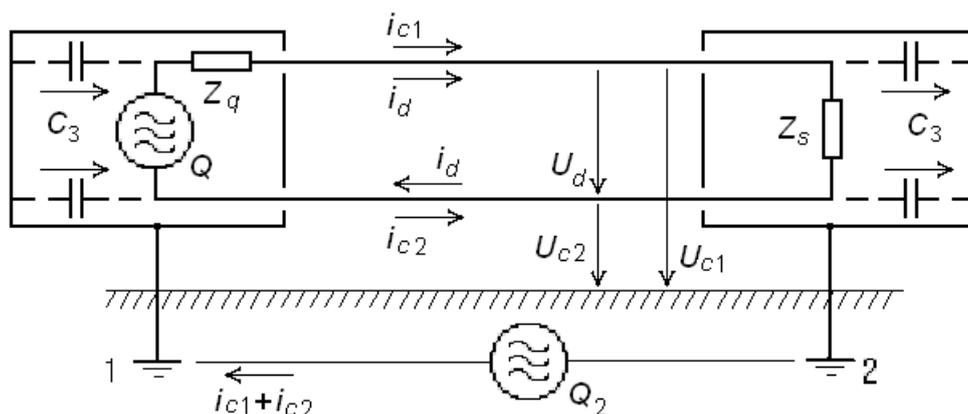


Рис. 3.2. Помехи при передаче сигналов:

- C_3 – паразитные ёмкости относительно заземлённого корпуса;
- Q_1 – источник противофазных помех; Q_2 – источник синфазных помех;
- Z_q, Z_s – полные сопротивления источника и приёмника помех;
- i_{c1}, i_{c2} и U_{c1}, U_{c2} – токи и напряжения синфазных помех;
- i_d и U_d – ток и напряжение противофазных помех

В нормативных документах, регламентирующих правила испытаний технических средств на устойчивость к помехам, синфазные помехи называются помехами *общего типа*, а противофазные – помехами *дифференциального типа*.

Напряжение общего вида – напряжение между каждым из проводников и установленным эталоном, обычно землёй или металлическим листом.

Напряжение дифференциального вида – напряжение между любыми двумя проводниками из заданной группы активных проводников.

3.1.1. Источники узкополосных помех

Передатчики устройств связи излучают в окружающую среду электромагнитную энергию контролируемым образом (функциональные передатчики). Тем не менее, наличие разрешения на эксплуатацию передатчиков на соответствующих частотах не препятствует им выступать в качестве источников помех. По этой причине, например, часто отказываются от эксплуатации радиотелефонов в непосредственной близости от АСУ ТП, в самолетах и т. д.

Генераторы высокой частоты. Большое количество ВЧ-генераторов средней и большой мощности используется в промышленности, науке, медицине и в быту. Эти приборы целенаправленно производят высокочастотную энергию, чтобы вызвать локальные электрофизические воздействия. При работе на предусмотренных частотах следует экспериментально доказывать, что уровни высших гармоник излучений установок не превышают граничных значений, нормируемых для источников радиопомех. Кроме того, следует обеспечить ЭМС излучающих установок со средой обитания человека, т. е. обеспечить санитарные нормы.

Радиоприёмники, приборы с кинескопами, вычислительные системы. Хотя эти приборы чаще являются объектами электромагнитных влияний, они нередко сами создают помехи, так как для выполнения своих функций нуждаются в собственных генераторах, которые через входные и выходные цепи, а также через корпуса отдают электромагнитную энергию во внешнюю среду.

Линии электропередачи. В густонаселённых областях ВЛ высокого напряжения часто располагаются параллельно линиям связи на протяженных участках. В результате возникают нежелательные влияния на линии связи и линии передачи данных, на устройства катодной защиты от коррозии трубопроводов, на человека и окружающую среду (рис. 2.1).

3.1.2. Источники широкополосных импульсных помех

Автомобильные устройства зажигания. При прерывании первичного тока в катушке зажигания возникает изменение тока di/dt . Связанное с этим изменение магнитного потока индуктирует во вторичной обмотке катушки и проводах зажигания импульс высокого напряжения с высокой скоростью нарастания du/dt , которая вследствие тока смещения через паразитные ёмкости также может вызывать в соседних контурах и проводниках помехи. При разрыве тока распределителем в цепях зажигания вновь возникают быстрые изменения тока и напряжения, которые за счет индукции и взаимного влияния также вызывают помехи. Частоты помех от систем зажигания перекрывают очень широкий диапазон и достигают гигагерцевого диапазона.

Газоразрядные лампы. Люминесцентные лампы низкого напряжения создают помехи при включении вследствие появления одного или нескольких импульсов напряжения сравнительно большой амплитуды, но также при работе в результате периодических затуханий и новых зажигания разряда или после каждого прохождения тока через ноль при амплитудах напряжения всего в несколько сотен вольт.

Коллекторные двигатели. При перемене направления тока в двигателях постоянного тока и в универсальных коллекторных двигателях

в обмотках происходят быстрые изменения токов. Если при отделении края щёток и коллекторных пластин ток не равен нулю, то он поддерживается через электрическую дугу. При обрыве напряжение самоиндукции $L(di/dt)$ дуги возникает быстрое изменение тока di/dt , которое индуцирует напряжение самоиндукции $L(di/dt)$ во включенных в обмотках и проводах, а в соседних контурах – напряжение взаимной индукции $M(di/dt)$. Для локального ограничения помех включают последовательно в цепь катушки индуктивности, а параллельно со щётками – конденсаторы. Большие двигатели постоянного тока имеют специальные дополнительные полюса и компенсационные витки, которые индуцируют в обмотках якоря противодействующее напряжение в момент отделения края щётки от пластины коллектора и снимают ток в обмотке.

Воздушные линии и оборудование высокого напряжения. На поверхности проводов ВЛ ВН напряжённость электрического поля превышает в отдельных местах электрическую прочность воздуха и приводит к образованию коронных разрядов. Частичные разряды в изоляции оборудования вызывают импульсы тока с крутыми фронтами (вплоть до пикосекунд), которые распространяются вдоль проводов в виде электромагнитных волн. В совокупности многочисленные накладывающиеся друг на друга импульсы разрядов образуют источник шумовых помех, которые нарушают радиоприём. Их спектр распространяется вплоть до ультравысоких частот.

Еще одним источником помех, который чаще всего наблюдается на линиях среднего напряжения, являются искровые разряды между неплотно соединенными металлическими частями и поверхностями изоляторов. Спектр этих искровых разрядов простирается до очень высоких частот и вызывает в первую очередь помехи телевизионному приему.

3.1.3. Источники широкополосных переходных помех

Коммутация тока в индуктивных цепях. Наиболее распространенными источниками переходных помех в аппаратуре управления являются отключаемые катушки индуктивности: обмотки реле, контакторов в устройствах автоматического управления и в электромагнитных приводах выключателей, а также все обмотки электрических машин и трансформаторов. При отключении возникают высокие переходные перенапряжения, которые могут привести к повторному включению коммутируемого участка, к пробоем изоляции катушки, а также к электромагнитным влияниям на соседние элементы. Помехи, сопровождающие перенапряжения, создаются в моменты исчезновения дуги (обрыв тока при отключении) или при её возникновении (электрический пробой между

сходящимися контактами или повторные зажиганияя). Чрезвычайно короткое время, необходимое для образования пробоя между контактами и для гашения дуги, объясняет крутые фронты изменения тока. Перенапряжения в коммутируемых индуктивных цепях являются наиболее частыми причинами помех в электронных устройствах управления.

Переходные процессы в сетях высокого напряжения. Коммутации разъединителями элементов схем подстанций ВН сопровождаются многократными искровыми пробоями межконтактных промежутков, в результате которых формируются как опасные перенапряжения на оборудовании, так и сверхтоки высокой частоты, которые вызывают интенсивные помехи и наводки на вторичные цепи, измерительную и контрольную аппаратуру и системы связи. Импульсные помехи, время воздействия которых при машинном приводе составляет 1...2 с, а при ручном может достигать десятков секунд, способны вызвать сбои, ложные срабатывания и даже повреждения вторичных устройств. Кроме того, следствием перенапряжений в первичных цепях является ускоренное старение изоляции измерительных трансформаторов тока и напряжения и преждевременный выход из строя защитных аппаратов. Быстрые изменения потенциала подключаемого участка ошиновки вызывают токи смещения через паразитные ёмкости относительно земли $i = C_{\text{нап}} \frac{dU}{dt}$, максимальные значения которых могут достигать 1000 и более ампер. Магнитные поля, генерируемые током заряда ошиновки и током смещения, также индуктируют в соседних контурах напряжения. Похожие процессы протекают и при размыкании разъединителей, но при этом последний пробой межконтактного промежутка генерирует самую мощную помеху, и такую коммутацию следует считать более опасной.

Разряды статического электричества. Под разрядами статического электричества понимают процессы выравнивания зарядов между отдельными твердыми телами, жидкими и газообразными средами, несущими разные электростатические заряды. Вызванные разрядами токи и созданные электромагнитные поля могут повредить электронные элементы, вывести из строя или нарушить функции электронного оборудования. Выделяют два вида повреждений:

- повреждение или разрушение устройств при непосредственном воздействии тока или вызванных им полей при касании рукой или инструментом, несущим заряд статического электричества (рис. 3.3, а);
- повреждение элементов или создание помех за счет напряжения индуцированного магнитным полем в низкоомной или электрическим полем в высокоомной петлях (рис. 3.3, б).

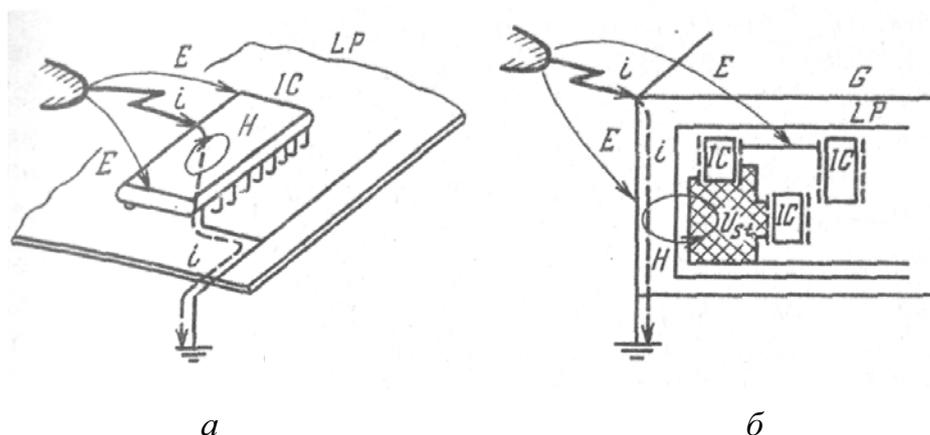


Рис.3.3. Примеры разряда статического электричества:
 а – разряд на устройство; б – разряд на корпус прибора

Заряды статического электричества, вызывающие опасные воздействия, могут возникнуть различными путями. Однако при изготовлении и применении электронных элементов и приборов существенны два механизма электризации – за счет индукции и трения.

В промышленности паразитная электризация трением проявляется вследствие контакта тела человека с одеждой, сидением, полом, рабочими средствами и предметами, а также при соприкосновении деталей, приборов, панелей с устройствами для обработки, тарой при технологических процессах, хранении и транспортировке.

Характерные значения электростатических напряжений лежат в пределах от 100 В до 20 кВ, что значительно выше допустимых для электронных элементов.

Наиболее сильное воздействие разрядов статического электричества получается тогда, когда в руке или на руке человека имеется металлический предмет (ключ, отвертка, проводящие браслеты и т. п.). В этом случае крутизна тока, определяющая индуцированные напряжения помех, может достигать 100 А/нс. В компьютерных залах, кабинетах управления, испытательных помещениях наблюдаются также разряды статического электричества с подвижных предметов на корпусы электронных приборов при их случайном касании. Кроме этого, каждый разряд статического электричества сопровождается созданием электрических и магнитных полей (табл. 3.3).

Меры по устранению опасного влияния электростатических разрядов и ограничению несанкционированного функционирования средств электроники в основном направлены на то, чтобы вблизи электронных устройств затормозить образование статических зарядов или

нейтрализовать заряды, если их образование неизбежно. В частности, это осуществляется:

- применением проводящих покрытий полов (проводящей резины, войлочных материалов, специальных проводящих пластмасс, а также половой краски с поверхностным сопротивлением порядка 100 Ом);
- покрытием гладких полов антистатической мастикой;
- поддержанием относительной влажности воздуха выше 50 % увлажнителями воздуха или кондиционерами;
- использованием приборов, стойких и испытанных к воздействиям разрядов статического электричества.

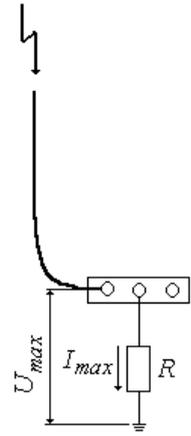
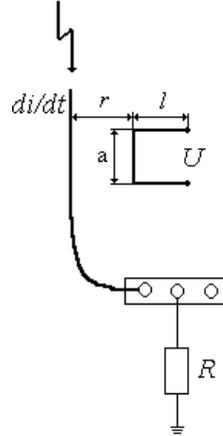
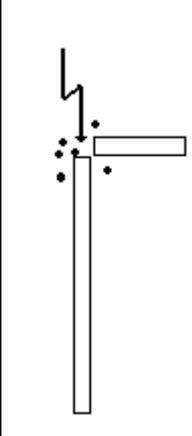
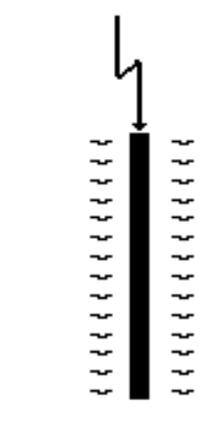
При обращении с электронными деталями и платами, например при сервисном обслуживании, необходимо соблюдать меры защиты от разрядов статического электричества. Важнейшими из них являются хранение и транспортировка отдельных схем и плат с закороченными выводами в упаковке из проводящих антистатических материалов. Все требуемые манипуляции с электронными элементами следует проводить только на рабочих местах с заземленным инструментом.

Электромагнитный импульс молнии. Энергия канала разряда, составляющая примерно 10^5 Дж/м, вызывает акустическое, термическое, световое, электромагнитное воздействие на окружающую среду. При этом может происходить специфическое повреждение объекта при непосредственных ударах в объект. Несмотря на то что число таких повреждений за счет внедрения средств грозозащиты непрерывно снижается, ущерб, наносимый косвенным воздействием молнии на электронные средства в промышленности, сфере обслуживания и других, резко возрастает.

По интенсивности воздействия молнии различают непосредственные, или близкие удары, и удаленные разряды. При непосредственных и близких ударах молния ударяет в молниеприемники защищенных зданий, устройств, соединенных, например, кабелями низкого напряжения, линиями связи и управления. Табл. 3.2 дает представление о параметрах молнии и об их специфических значениях. С точки зрения электромагнитной совместимости интерес представляет то обстоятельство, что при ударе молнии в заземляющее устройство может повыситься его потенциал относительно удаленных точек земли до миллиона вольт и что в петлях, образованных сигнальными кабелями и проводами, связывающими различные объекты, в том числе и в линиях электроснабжения, передачи данных, может, в зависимости от размера петель и расстояния до места удара, индуцироваться напряжение от нескольких десятков вольт для многих сотен киловольт.

Таблица 3.2

Характеристики воздействия молнии на объекты

Параметр	Максимальный ток, I_{\max}	Крутизна тока $S = di/dt$	Заряд $Q = \int idt$	Интеграл $W/R = \int i^2 dt$
Значение	2...200 кА	2...200 кА/мкс	150...300 А·с	2,5...10 МДж/Ом
Воздействие в точке удара	Повышение потенциала на заземлителе	Индуктирование напряжения в петлях	Плавление металла в точках удара	Нагрев проводников, по которым протекает ток молнии
				
Примеры	$I_{\max} = 200 \text{ кА}$ $R = 5 \text{ Ом}$ $U_{\max} = 1 \text{ МВ}$	$S = 200 \text{ кА/мкс}$ $r = 25 \text{ м}, l = 20 \text{ м}$ $a = 0,4 \text{ см (60 см)}$ $U = 128 \text{ В (19,2 кВ)}$	При $Q = 300 \text{ Кл}$ плавятся алюминиевые стенки толщиной до 5 мм	При $W/R = 10 \text{ МДж/Ом}$ плавятся медные провода с сечением 10 мм^2 и стальные с сечением 25 мм^2

При удаленных ударах молнии, например при разрядах на линии среднего напряжения или при междуоблачных разрядах, на ЛЭП возникает волна перенапряжения. При достижении подстанции она ограничивается либо электрической прочностью изоляции, либо остающимся напряжением защитных разрядников до нескольких киловольт. Если у объекта отсутствуют защитные устройства, ограничивающие перенапряжения, то могут происходить неконтролируемые перекрытия и пробой в слабых местах изоляции или, в самом простом варианте, нарушение функционирования оборудования из-за проникновения помехи через систему питания.

Любая молния и любой ток в проводах, обусловленный молнией, создает переходные электромагнитные поля, которые могут вызвать в электрических контурах напряжение с мешающими или разрушающими последствиями (табл. 3.3).

Опасность, связанная с разрядами молнии, устраняется реализацией внешней и внутренней защиты. Задачей внешней грозозащиты является отвод тока молнии в землю таким образом, чтобы внутри помещения не возникало больших разностей потенциалов и сильных электромагнитных полей помех. Практически это достигается заземленной системой проводников, сооруженных наподобие клетки Фарадея, по которой ток молнии протекает по многим параллельным путям, в том числе стекает с фундамента и металлических элементов здания.

Внутренняя грозозащита направлена на то, чтобы остаточные воздействия на электронные приборы снизить до допустимых. Они одновременно защищают электронные приборы и от других помех, например вызываемых коммутациями в сети. К внутренней грозозащите относятся:

- выравнивание напряжения между металлическим оборудованием, системой трубопроводов, оболочками кабелей, металлическими фундаментами оборудования путем соединения их проводами и подсоединения к заземлению;
- выравнивание потенциалов при помощи экранирующих проводников – металлических труб, кабельных перемычек, металлических коробов и закрытых кабельных каналов, в которых прокладываются провода управления, сигнальные линии и линии передачи данных между зданиями и пространственно разделенными устройствами;
- выравнивание напряжения между сетевыми, телефонными и измерительными линиями, линиями передачи данных управления, регулирования и землёй с помощью ограничителей перенапряжений.

Электромагнитный импульс ядерного взрыва. При взрыве ядерного заряда в результате ядерной реакции освобождается большое количество энергии. Наряду с другими явлениями при этом возникает импульс гамма-излучения, длящийся примерно 100 нс и уносящий около 0,1 % общей энергии. Гамма-излучение в атмосфере вызывает электронный ток, сопровождающийся сильным электрическим полем. Это весьма кратковременное явление называют электромагнитным импульсом ядерного взрыва. Его влияние особенно сильно, если взрыв происходит за пределами атмосферы. Вблизи поверхности земли на расстоянии от нескольких сотен до тысяч километров от точки взрыва возникают сильные электромагнитные поля, по своей интенсивности такие же, как и при грозовых разрядах, однако имеющие значительно меньшее время нарастания (табл. 3.3).

Таблица 3.3

Параметры электромагнитных импульсов различной природы

Параметр	Источник импульса						
	Молния на расстоянии от места удара, м		Разряд статического электричества на расстоянии от канала разряда, см		Коммутация в РУ на расстоянии 10 м от устройства	Ядерный взрыв на высоте	
	10	100	10	20		0...2 км	более 40 км
E , кВ/м	сотни	40	4	1	1...100	100	30...60
H , А/м	тысячи	160	14	4	до 300	до 1000	до 130
T_{ϕ} , нс	десятки – тысячи		0,2...20		10...50	5...8	
Частотный спектр	1 кГц...5 МГц		до 1 ГГц		1кГц...100 МГц	0,1МГц...100 МГц	
Область действия	Локальная, несколько километров		Точечная, несколько сантиметров		Локальная, десятки метров	Региональная или континентальная, сотни км	

При взрыве в кабелях и линиях электропередачи индуцируются очень высокие напряжения, которое вследствие гораздо большей скорости изменения не может быть снижено обычными разрядниками. В этом случае могут помочь лишь защитные мероприятия, заключающиеся в использовании параллельно включенных элементов, основанных на различных физических принципах. Принципиальное значение при обеспечении стойкости приборов и устройств к электромагнитному импульсу ядерного взрыва имеет тщательное высокочастотное экранирование, осуществление передачи информационных сигналов оптическим путем, а в остальном необходимо позаботиться о концепции структурного ступенчатого снижения помех до допустимого уровня. Стоимость средств защиты от электромагнитного импульса ядерного взрыва может достигать 5 % общей стоимости устройства системы.

3.2. Классификация электромагнитной обстановки

Многообразие источников помех вызывает необходимость упрощенного стандартизированного описания электромагнитной обстановки. Можно определить отдельно следующие стандартные классы для помех, обусловленных проводами и вызванных электромагнитным излучением.

3.2.1. Классификация электромагнитной обстановки по помехам, связанным с проводами

Класс 1 (очень низкий уровень помех):

- коммутационные перенапряжения в цепях управления подавлены соответствующими цепями;
- линии сильного тока и линии управления проложены отдельно от частей установок более высокого класса;
- линии электропитания на обоих концах снабжены заземленными экранами и сетевыми фильтрами;
- наличие люминесцентных ламп.

Пример: помещение для вычислительной техники.

Класс 2 (низкий уровень помех):

- коммутационные перенапряжения при отключениях реле частично ограничены, контакторы отсутствуют;
- линии сильного тока и линии управления проложены отдельно от частей установок более высокого класса;
- раздельная прокладка неэкранированных линий питания и линий управления, сигнальных линий;
- наличие люминесцентных ламп.

Пример: контрольно-измерительные щиты на электростанциях, промышленных предприятиях.

Класс 3 (уровень промышленных помех):

- релейные катушки не снабжены ограничительными цепями, нет контакторов;
- необязательное разделение линий сильного тока и линий управления от частей установок с более высоким уровнем помех;
- линии питания проложены раздельно от линий управления, сигнальных и телефонных линий;
- необязательное отделение линий управления, сигнальных и телефонных линий друг от друга;
- может использоваться общая система заземления.

Пример: щиты управления электростанций и промышленных объектов.

Класс 4 (высокий уровень промышленных помех): реле и контакторы, не снабженные ограничительными цепями;

- необязательное отделение проводов от частей установок с различным уровнем помех;
- совместная прокладка линий управления, сигнальных и телефонных линий; использование многожильных кабелей для линий управления и сигнальных линий.

Пример: установки открытого типа электростанций и устройства управления технологическими процессами, распределительные устройства высокого напряжения.

Класс X (экстремальный уровень помех). Здесь речь идет, как правило, о работе приборов в непосредственной близости от источников экстремальных помех. Для этих особых случаев, которые по своей природе не могут быть учтены обычно действующими нормами, должны быть достигнуты особые договоренности между производителем и потребителем приборов, устройств или при определенных обстоятельствах потребителем должны быть приняты дополнительные меры для подавления помех.

3.2.2. Классификация электромагнитной обстановки по помехам, вызванным излучением

Класс 1: низкий уровень электромагнитного излучения, например местные радио- и телевизионные станции находятся на расстоянии более чем 1 км, допустимо наличие разговорных радиоприборов низкой мощности.

Класс 2: средняя интенсивность электромагнитного излучения. Работающие радиотелефоны должны располагаться на расстоянии $l > 1$ м от чувствительных устройств.

Класс 3: очень сильное электромагнитное излучение, вызванное, например, приборами радиотелефонии большой мощности в непосредственной близости от устройств.

Класс 4: очень сильное излучение. Степень строгости контроля должна быть согласована между заказчиком и изготовителем. Аналогичным образом можно установить классы окружения на борту самолетов и судов, в исследовательских установках или в зависимости от климатических условий (например, для условий возникновения разрядов статического электричества) и т. д. Перечисленные в п. 3.2.1 и 3.2.2 критерии могут быть предметом договоренности, между классами электромагнитной обстановки нет резких границ. С точки зрения экономичности мер по обеспечению ЭМС нельзя без проверки отдавать предпочтение максимальному классу электромагнитной обстановки. Напротив, нужно тщательно взвесить на основании стратегии минимального риска вероятность возникновения помех, стоимость сооружений, расходы на простой по сравнению с дополнительными расходами на работу без помех в определенном классе электромагнитной обстановки.

Выбранный класс электромагнитной обстановки устанавливает строгость контроля, т. е. амплитуды испытательных токов и напряжений, которые, например, должны в 2 раза, или на 6 дБ, превышать уровень помех, характерных для соответствующих классов окружающей среды. Дальнейшие сведения по этим вопросам содержатся в соответствующих действующих нормативных документах.

4. МЕХАНИЗМЫ СВЯЗИ ПРИ РАСПРОСТРАНЕНИИ ПОМЕХ

Основными понятиями в теории электромагнитной совместимости являются понятия передатчиков и приемников электромагнитной энергии (электромагнитных помех) в их расширенном понимании.

Идентификация механизмов связи, включённых между источником и приёмником помех, является непростой задачей, так как часто речь идёт о не предусмотренных конструктором путях передачи, например через паразитные ёмкости, индуктивности рассеяния, которые часто проявляются лишь в виде вызванных ими электромагнитных влияний (рис. 4.1). Блоки не должны быть соединены непосредственно, для того чтобы существовала связь между ними. Как только в проводнике возникает ток, вокруг него создается магнитное поле; как только между проводниками появляется напряжение, между ними возникает электрическое поле. Каждое из этих полевых явлений способно к индукции мешающего сигнала во вторичной цепи, охваченной полем. Эти принципиальные положения используются в трансформаторах и конденсаторах; полевые задачи ЭМС, относящиеся к связи в ближней зоне, есть не что иное, как управление нежелательными «трансформаторами» и «конденсаторами» в конструкции. Их называют распределенными или паразитными. На высоких частотах они становятся весьма значительными.

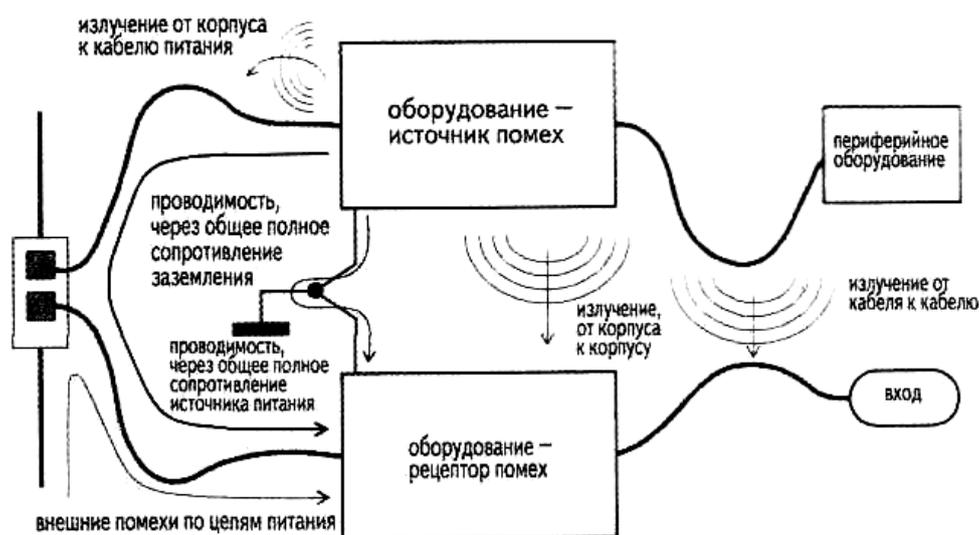


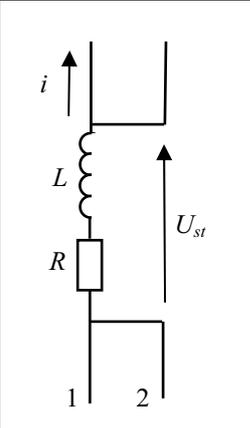
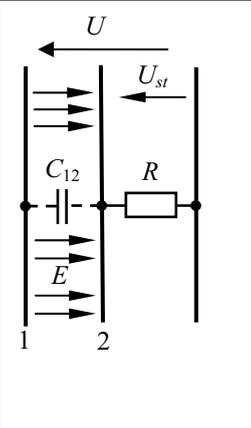
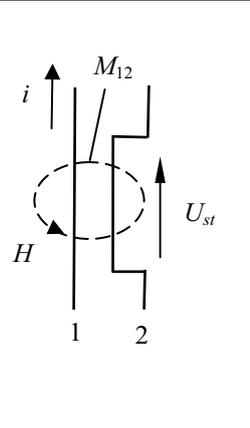
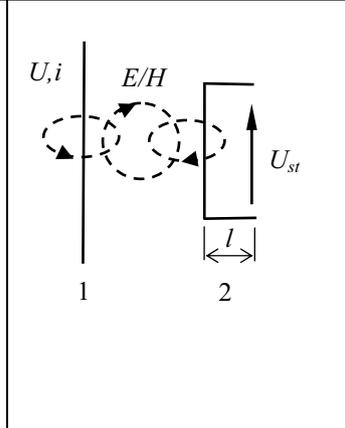
Рис. 4.1. Пути связей

Если длина волны велика по отношению к размерам источника помехи, электромагнитные влияния распространяются преимущественно за счет токов или посредством электрического или магнитного поля. Если длина волны и размеры источника соизмеримы, проявляется излучение. Граница между механизмами влияния подвижна, однако для многих практических случаев она имеет место при длине проводов порядка 10 м соответственно частоте 30 МГц. Другими словами, в радиочастотной области от 0,1 до 30 МГц помехи связаны с током, в УКВ-области и выше – с излучением.

Различают четыре вида связей (табл. 4.1).

Таблица 4.1

Механизмы электромагнитных связей источников (1) и приемников помех (2)

По проводам	Через поле		
Гальваническая связь	Емкостная связь (E-поле)	Индуктивная связь (H-поле)	Электромагнитная связь (E/H-поле)
			
$U_{st} = iR + L \frac{di}{dt}$	$U_{st} = RC_{12} \frac{du}{dt}$	$U_{st} = M_{12} \frac{di}{dt}$	$U_{st} \approx E \cdot l_{eff}$
	ближнее поле $x < \lambda/2\pi$		дальнее поле $x > \lambda/2\pi$

4.1. Гальваническая связь

Гальваническая, или металлическая, связь возникает, если некоторое полное сопротивление оказывается общим для двух или нескольких контуров (рис. 4.1, а). Различают гальваническую связь рабочих контуров через цепь общего питания от одного источника; гальваническую связь между рабочими контурами через контур заземления.

4.1.1. Гальваническая связь через цепи питания

Если два или несколько электрических контуров имеют общее полное сопротивление Z , то ток одного контура создает в другом кон-

туре падение напряжения, которое появляется в другом контуре как напряжение противофазной помехи. На рис. 4.1, *a* изменения тока в контуре 1 вызывают падение напряжения на общем сопротивлении, величина которого рассчитывается как

$$u(t) = Ri(t) + L \frac{di(t)}{dt}. \quad (4.1)$$

При передаче высокочастотного или импульсного сигнала падение напряжения на индуктивности чаще всего превосходит падение напряжения на сопротивлении.

Для снижения помех через гальваническую связь в соединительных проводах сетей питания и сигнальных контурах рекомендуют следующие мероприятия:

1. Выполнение соединения между двумя и более контурами с насколько возможно низким полным сопротивлением, особенно низкой индуктивностью. Для этого используются проводники с большим сечением или плоские шины.

2. Гальваническая развязка (рис. 4.2), т. е. устранение совместных проводящих соединений между различными контурами или гальваническое разъединение контуров таким образом, чтобы ток наиболее мощного контура не протекал по слаботочному контуру. Гальваническая развязка предполагает:

- отказ от общих обратных проводников в цепях передачи сигнала (рис. 4.2, *a*);
- присоединение системы опорного потенциала лишь к точкам заземления или к корпусу прибора (рис. 4.2, *б*);
- соединение системы питания компонентов автоматизации звездой (рис. 4.2, *в*);
- разделение питания силовых, измерительных устройств (рис. 4.2, *г*).

3. Выбор скорости изменения тока не большей, чем требуется по условиям функционирования.

Верхний предел для полного сопротивления линии электропитания образует при бесконечно большой di/dt волновое сопротивление Z_0 , так что для «электрически длинных» отрезков линии, $l/v > T_0$, падение напряжения, в отличие от (4.1), рассчитывается как

$$\Delta \bar{U} = Z_0 \Delta \bar{I}. \quad (4.2)$$

Формулы для расчета волновых сопротивлений часто встречающихся типов проводов приведены в табл. П2.

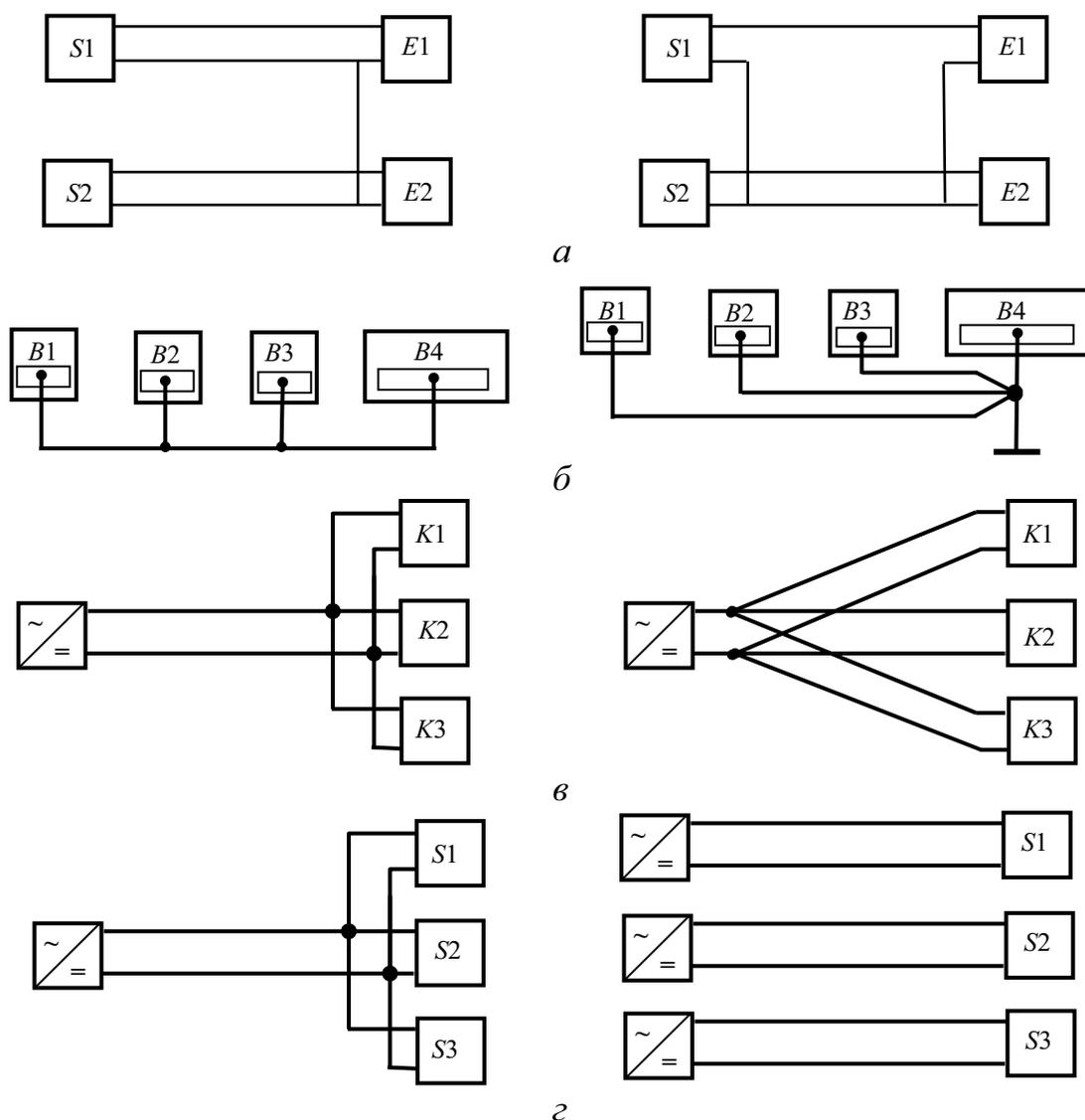


Рис. 4.2. Примеры гальванической развязки:
слева – неправильно; справа – правильно

4.1.2. Гальваническая связь через контур заземления

Существует также связь через контуры заземления (петли в контурах заземления).

Контуры заземления или петли относятся к наиболее частым причинам электромагнитных влияний. Рассмотрим типичный пример при выполнении высоковольтных измерений: датчик сигнала соединен коаксиальным кабелем с осциллографом. Корпусы обоих приборов из соображений безопасности заземлены через защитные контакты сетевых проводов (рис. 4.3). Синфазное напряжение U_c , индуктированное в контуре заземления или вызванное различными потенциалами земли,

возбуждает ток как во внутреннем проводнике, так и в оболочке сигнального кабеля, причем они по отношению к источнику синфазного напряжения включены параллельно. Тогда полные сопротивления источника и приемника образуют для синфазного напряжения U_c делитель, так что из отношения напряжения противофазной помехи на полном сопротивлении приемника получается следующий коэффициент преобразования синфазной помехи в противофазную:

$$K = \frac{|Z_s|}{|Z_s + Z_q|}. \quad (4.3)$$

При этом принято, что полными сопротивлениями внутреннего проводника и оболочки по отношению к полным сопротивлениям источника и приемника можно пренебречь. В часто встречающемся случае $Z_s \gg Z_q$ синфазная помеха появляется на входе приемника в полном объеме как противофазная. Если эти сопротивления равны, например $Z_q = Z_s = 50$ Ом, противофазная помеха ослаблена наполовину.

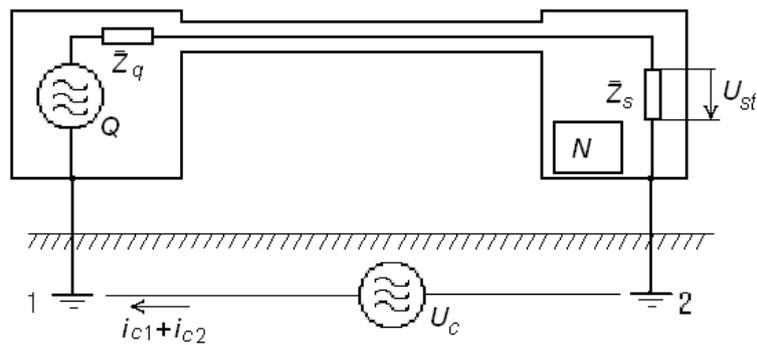


Рис. 4.3. Контур заземления, возникающий благодаря заземлению в нескольких точках (полное сопротивление кабеля не изображено)

Для уменьшения сопротивления между точками заземления цепей используют пол в виде эквипотенциальной поверхности (рис. 4.4, а) или соединяют точки заземления массивными проводниками (рис. 4.4, б).

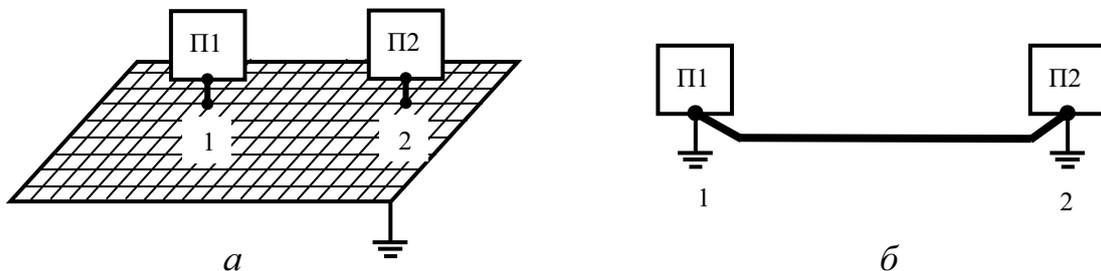


Рис. 4.4. Примеры выполнения контуров заземления

Принятой мерой для уменьшения степени преобразования синфазной помехи в противофазную является гальваническое разделение

контура заземления за счет того, что либо приемник, либо передатчик используются без защитного заземления. В этом случае гальванически не заземленный прибор имеет паразитную емкость относительно земли, так что при высоких частотах, по-прежнему, существует контур заземления. В этом случае эффективная защита возможна только на постоянном напряжении и низких частотах.

Некоторые из рассматриваемых следующих мер также направлены на разделение контура заземления. Они применяются в основном тогда, когда ни передатчик, ни приемник не могут использоваться не заземленными или если они при высоких частотах неоднократно связаны с землей большими паразитными емкостями, несмотря на отсутствие гальванического соединения с землей.

Разделительные трансформаторы являются испытанным средством разрыва контуров заземления при полезных сигналах низкой и средней частоты (рис. 4.5). В то время как при высоких частотах через межвитковые паразитные емкости C к приемнику будут течь синфазные токи (рис. 4.5, а), они, при наличии экрана, проходят мимо приемника (рис. 4.5, б). Это шунтирующее действие предполагает малоиндуктивное соединение экрана с землей.

Так как разделительный трансформатор находится в цепи сигнала, его коэффициент трансформации в полосе частот сигнала должен быть постоянным. Часто разделительные трансформаторы используются на стороне сети.

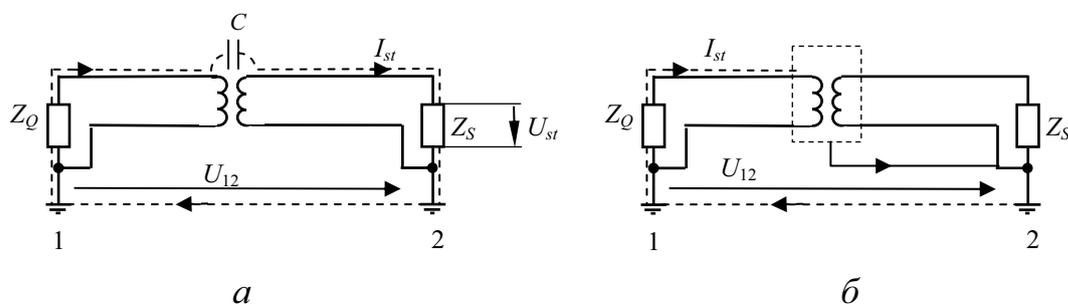


Рис. 4.5. Разделительные трансформаторы для разрыва контуров заземления:

а – емкостная остаточная связь; б – «шунтирующий» экран для тока I_{st}

Нейтрализующие трансформаторы. Разделительные трансформаторы характеризуются нижней граничной частотой и не передают постоянных напряжений. Если это необходимо, могут быть применены компенсирующие, или нейтрализующие, трансформаторы (рис. 4.6). Обе катушки таких трансформаторов, $W1$ и $W2$, выключаются так, чтобы потоки текущих в противоположных направлениях токов компенсировались, поэтому трансформатор представляет для них малое сопротивление.

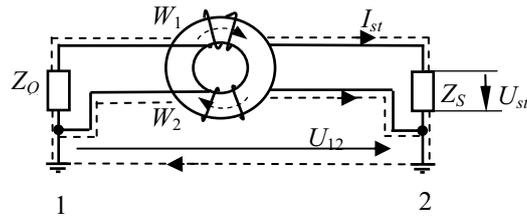


Рис. 4.6. Нейтрализующий трансформатор для «разрыва» контура заземления

Обмотки, для синфазных токов, действуют как индуктивности и этим повышают полное сопротивление контура заземления, что при высоких частотах по смыслу равносильно разделению потенциалов. При частотах выше 1 МГц вместо компенсирующих трансформаторов можно использовать ферритовые бусы и кольца, которые надеваются поверх обеих жил сигнального кабеля, либо ферритовые сердечники, на которые наматываются обе жилы сигнального контура (рис. 4.7). Сами провода тогда образуют равнонаправленные обмотки компенсирующего трансформатора.

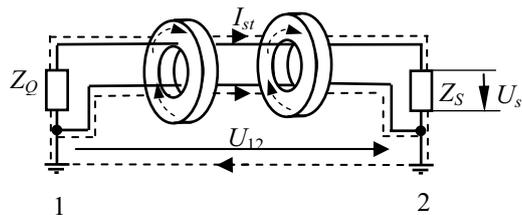


Рис. 4.7. Ферритовые кольца для увеличения полного сопротивления контура заземления

Оптроны и световоды. Светодиод, или лазерный диод, преобразует сигнал передатчика в световой сигнал. После передачи через электрически изолированную светопроницаемую среду в фотодиоде или фототранзисторе световой сигнал преобразуется в электрический сигнал (рис. 4.8). Обычные напряжения пробоя изоляции оптронов находятся в пределах 500 В до 10 кВ. Участки каналов со световодами могут выдерживать разность до мегавольтов.

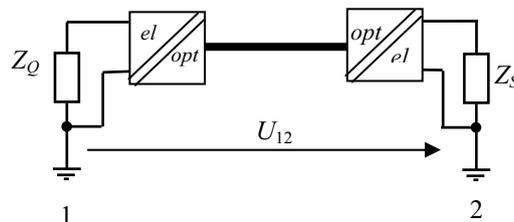


Рис. 4.8. Участок линии со световодом

Оптроны и световоды идеально передают цифровые сигналы, а во многих случаях с достаточной точностью и аналоговые.

4.2. Ёмкостная связь

Ёмкостная, или электрическая связь, возникает через паразитные емкости между двумя контурами, проводники которых находятся под разными потенциалами, и действует на небольшом расстоянии (рис. 4.1, б) или между протяженными линиями и землёй (рис. 4.9).

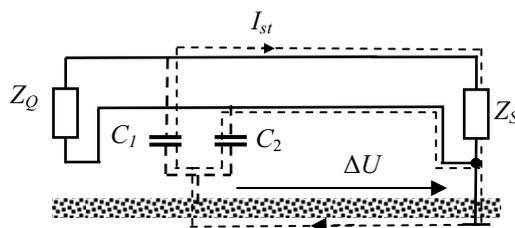


Рис. 4.9. Ёмкостная связь между протяженной линией и землёй

Мероприятия по снижению помех через ёмкостную связь:

1. Гальванически разделенные контуры:

- попарное скручивание проводников каждого контура;
- применение экранированных проводов.

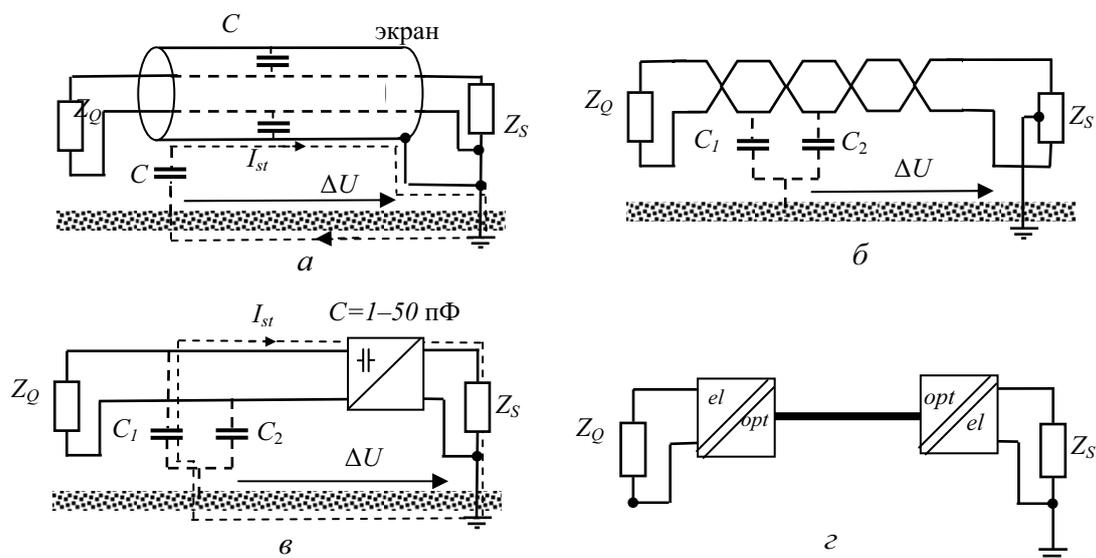


Рис. 4.10. Мероприятия для снижения помех через ёмкостную связь

2. Токовые контуры с большой ёмкостью относительно земли:

- выполнение сигнального контура предельно низкоомным;
- экранирование сигнальной линии (рис. 4.10, а);
- симметричное выполнение линии относительно земли; при полной симметрии $U_{st} = 0$ (рис. 4.10, б);

- введение на приемном конце разделяющих элементов проникающие помехи определяется паразитной емкостью (рис. 4.10, в);
- применение для передачи сигналов световодов. Практически устраняет влияние паразитной емкости (рис. 4.10, з).

4.3. Индуктивная связь

Индуктивная, или магнитная, связь возникает между двумя или несколькими контурами с токами (рис. 4.1, в; 4.11, а). Ток I вызывает переменное магнитное поле, которое индуцирует в контуре 2, подверженном помехе, напряжение, накладывающееся на полезный сигнал. Воздействие магнитного поля контура 1 на контур 2 в эквивалентной схеме соответствует взаимной индуктивности M или индуцируемой ЭДС. Кроме этого, индуктивная связь обусловлена паразитным потокоцеплением между контурами промышленных устройств, возникающим при ударах молнии или разрядах статического электричества.

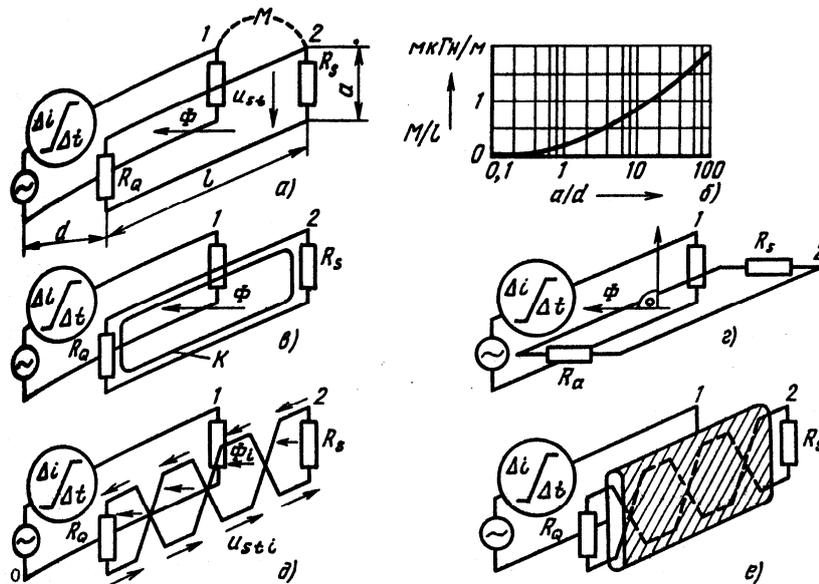


Рис. 4.11. Индуктивная связь между промышленными токовыми контурами: а – принципиальная схема двух токовых контуров 1 и 2 с расстоянием d между ними; б – погонная взаимная индуктивность M/l в зависимости от a/d ; в–е – меры по снижению влияния (пояснения см. в тексте)

Мероприятия по снижению индуцированных напряжений предусматривают:

- снижение до возможных пределов взаимной индуктивности M , т. е. уменьшение за счет сокращения длины проводников, увеличение расстояния между сетевыми и информационными проводами, уменьшение площади контура, подвергающегося воздействию;

- уменьшение скорости изменения во времени потока $\Delta\Phi/\Delta t$ при помощи короткозамкнутой петли К, расположенной непосредственно у сигнального контура (рис. 4.11, в);
- осуществление связи контуров 1 и 2 ортогонально направлению силовым линиям магнитного поля (рис. 4.11, з). Этот способ эффективен в устройствах, выполненных в виде катушек;
- компенсация индуктированного в контуре 2 напряжения путем скрутки проводов (рис. 4.11, д). При этом частичные потоки Φ_i создают напряжения, направленные противоположно;
- снижение действия созданного магнитного потока скручиванием соединительных проводов контура 1. При этом даются встречно направленные компоненты потока, а их действие на вторичный контур компенсируется;
- экранирование кабелей, соединительных проводов (рис. 4.11, е), модулей и приборов ферромагнитными экранами (трубами, металлическими шлангами, стальными корпусами), причем экранирующее воздействие тем сильнее, чем выше магнитная проницаемость материала и толще стенка экрана. Проводящие соединения между экраном и землей не обязательны, однако они необходимы для защиты от напряжения прикосновения. Для ослабления воздействий, вызванных молнией, применяется ферромагнитное экранирование кабелей передачи данных, проложенных по воздуху, экраны которых заземляются на обоих концах.

4.4. Электромагнитная связь

Рассматривалась связь посредством магнитного и электрического поля, независимо друг от друга. На постоянном токе и низких частотах это вполне приемлемо, и такой подход известен как «квазистатическая аппроксимация». Но любое изменение электрического поля между проводниками вызовет ток, приводящий к изменению напряжения, а любое изменение тока вызывает изменение разности потенциалов. Таким образом, поля на переменном токе по сути являются композицией как электрической, так и магнитной компоненты, и при повышении частоты становится все труднее и менее необходимо трактовать их раздельно.

На достаточном расстоянии от структуры, несущей излучающие токи и напряжения, магнитная и электрическая компоненты формируются в распространяющуюся электромагнитную волну. Два компонентных вектора расположены под прямым углом друг к другу и к направлению распространения и лежат в плоскости, которая может быть

наглядно представлена как распространяющаяся от излучателя во все направления (рис. 4.1, z). В свободном пространстве в любой точке этой плоскости отношение электрической и магнитной компоненты постоянно и равно 120π , или 377 Ом . Оно известно как *волновое сопротивление свободного пространства*. Амплитуда обеих компонент при удалении от источника будет изменяться в зависимости от геометрии и фазы различных излучающих элементов.

«Достаточное расстояние», после которого начинается область постоянного волнового сопротивления для плоской электромагнитной волны, может быть определено из полевых уравнений Максвелла и равняется $\lambda/2\pi$, или приблизительно одна шестая часть длины волны. Примером граничных расстояний могут являться $1,6 \text{ м}$ для частоты 30 МГц , 48 м – для 1 МГц , 16 см – для 300 МГц и 48 км – для 1 кГц . При превышении этой дистанции, *в дальней зоне*, связь происходит за счет излучения электромагнитных волн, что предполагает появление индуцированных напряжений и токов в структурах рецептора, как будто они действуют как антенны. Уровень помехового воздействия волны может быть оценен плотностью потока мощности (ватты на кв. метр или милливольты на кв. сантиметр), или для электрического поля в виде его напряженности (вольт на метр), или в виде напряженности магнитного поля (ампер на метр). Как правило, для частотного диапазона, представляющего интерес для задач ЭМС, указывается напряженность электрического поля.

Связь посредством излучения зависит от антенных параметров источника и рецептора. Конструкции электронных средств (не радио) не проектируются специально в виде антенн, но в некоторых случаях они могут достаточно эффективно преобразовывать электромагнитную энергию на некоторых частотах. Эффективные антенны располагаются так, чтобы токи и напряжения были в желаемых фазовых соотношениях на резонансных частотах, обеспечивая максимальную передачу энергии на этих частотах.

Для уменьшения величины помехи применяется экранирование.

На практике в большинстве случаев действуют несколько видов помех и одновременно по нескольким каналам связи, что существенно затрудняет достоверное описание помех.

5. ТЕХНИКА И ТЕХНОЛОГИЯ ИЗМЕРЕНИЯ ПОМЕХ

5.1. Общие методы испытаний источников радиопомех

Измерения помех, генерируемых электроустановками, имеют целью установить, в какой мере они являются опасными для окружающих технических объектов и человека. Для гарантированного радиоприема в соответствующих нормативных документах установлены предельные уровни радиопомех. Они базируются на нормах, согласованных с международной электротехнической комиссией (МЭК или IEC) и международным специальным комитетом по радиопомехам (СИСПр). Для обеспечения воспроизводимости результатов методы измерений эмиссии помех, а также требования к испытательным установкам и регистрирующей аппаратуре строго регламентированы.

Распространение кондуктивных помех происходит вдоль линий управления и передачи данных, а также по сетевым проводам, которые присоединены к оборудованию. Измерения этих помех производят датчиками, присоединенными к проводам (левая часть блок-схемы на рис. 5.1).

Вследствие значительного затухания при распространении по проводам и в земле эти помехи имеют диапазон частот, обычно не превышающий 30 МГц, и представляют собой токи или напряжения, которые можно измерить. Для измерения тока помех применяют измерительный трансформатор тока ИТТ в виде токовых клещей. Мощность помех регистрируется абсорбционными измерительными клещами АИК. Напряжение помех в виде составляющих общего и дифференциального типа измеряют импульсными вольтметрами, осциллографами или анализаторами спектра, которые подключаются к клеммам эквивалента сети.

В частотном диапазоне свыше 30 МГц преобладает полевой механизм распространения помех. В ближней зоне помехи измеряются в виде электрической $E_{б.з}$ и магнитной $H_{б.з}$ составляющих поля. В дальней зоне измеряется напряженность электромагнитного поля $E_{д.з}$ и мощность. В качестве измерительных датчиков используются разнесенные антенны различного вида исполнения (рамочные для магнитной составляющей; стержневые, логарифмические и др. для электрической составляющей) и амплитудно-частотных характеристик.

От всех датчиков сигналы, пропорциональные измеряемым параметрам помех, передаются на входы приемника помех в виде напряжений U_U , U_P , U_I , U_H , U_E и $U_{E\infty}$. Обязательным элементом приемника является селективный микровольтметр, или сканер. Для регистрации

формы сигналов импульсных и редко повторяющихся периодических помех используются широкополосные осциллографы.

Чтобы можно было лучше оценить воздействие измеренной помехи на тот или иной чувствительный элемент, в специальных приемниках предусмотрены режимы измерения средних, максимальных, квази-максимальных и эффективных значений входных сигналов. Современные измерительные приемники могут автоматически выполнять сложные измерения, обрабатывать и документировать результаты измерений.

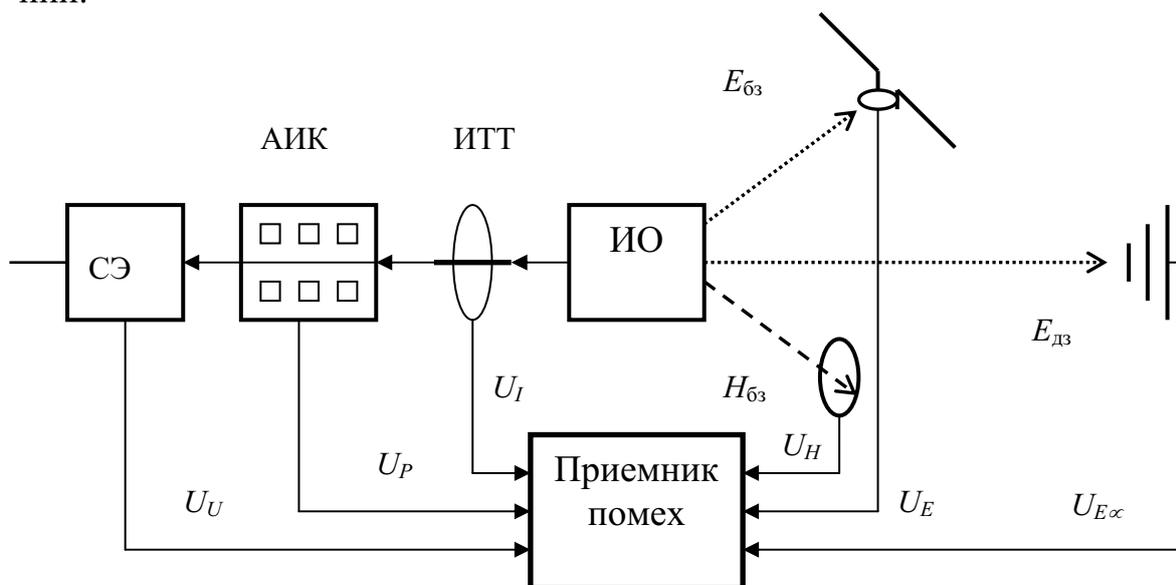


Рис. 5.1. Средства измерений эмиссии помех:

ИО – исследуемый объект; ИТТ – импульсный трансформатор тока; АИК – абсорбционные измерительные клещи; СЭ – сетевой эквивалент

5.2. Измерение кондуктивных помех

Токи помех создают на внутреннем сопротивлении сети питания падение напряжений, которые являются напряжениями кондуктивных помех. Для объективности и воспроизводимости измерений этих помех в разных лабораториях применяют сетевой эквивалент, схема которого для однофазной сети питания приведена на рис. 5.2.

Эквиваленты сети выполняют три функции:

- создание нормированного сопротивления для токов помех;
- фильтрация внешних сетевых помех с целью ограничить их влияние на результаты измерений помех, генерируемых испытуемым объектом;
- выделение сигналов помех с помощью блокирующих катушек индуктивности $L_{\text{бл}}$, разделительных конденсаторов C_p и нормированных сопротивлений Z_n .

Измеряемые напряжения на линейном U_L и нулевом проводе U_H относятся к помехам общего типа, а разность между ними – дифференциального типа. Имеются также эквиваленты сетей управления и связи с объектами, другие модификации, обеспечивающие дополнительно выделение асимметричных помех и т. д.

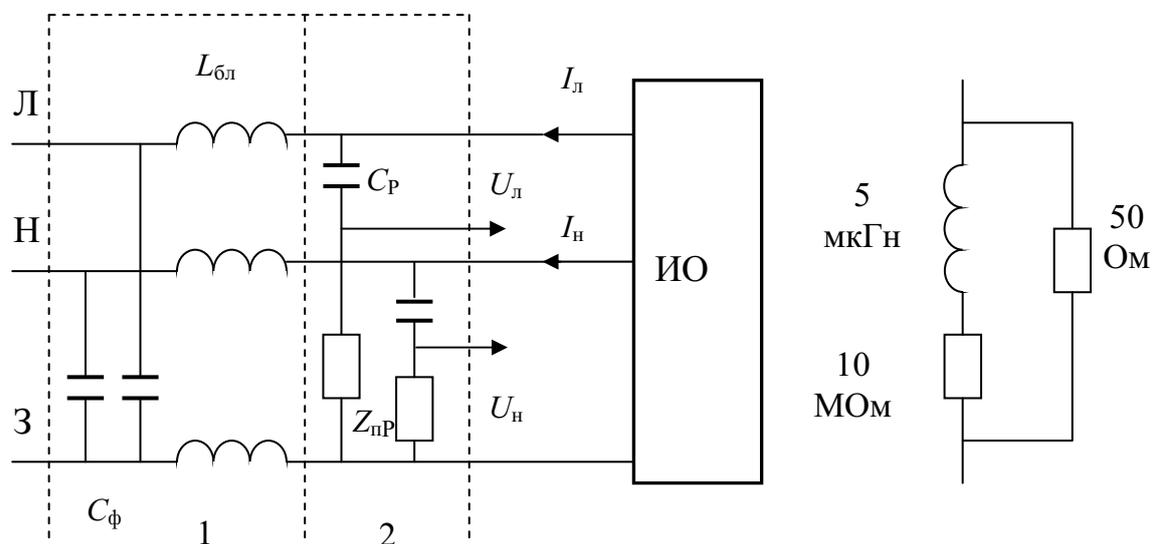


Рис. 5.2. Схема измерения помех общего типа и схема замещения эквивалента сети в диапазоне частот 0,15...30 МГц:

1 – фильтр нижних частот; 2 – область выделения сигналов помех;
 $L, H, 3$ – линейный, нулевой и заземляющий провода

Непосредственное измерение токов помех I_L и I_H , генерируемых источником помех, можно выполнить с помощью высокочастотного трансформатора тока. При этом между линейным и нулевым проводом устанавливается малоиндуктивный конденсатор, который шунтирует токи внешних помех.

Датчики поверхностного тока с помощью индукционной катушки воспринимают связанное с токами в экранирующих корпусах или листах магнитное поле, тем самым позволяют измерять локальную поверхностную плотность тока.

Воспроизводимость измерений напряжений помех требует не только применения надлежащих сетевых эквивалентов и чувствительных элементов, но и соблюдения установленного в действующих нормах пространственного расположения всех участвующих в измерении излучений компонентов, соединительных проводов, конфигурации системы опорного потенциала (рис. 5.3).

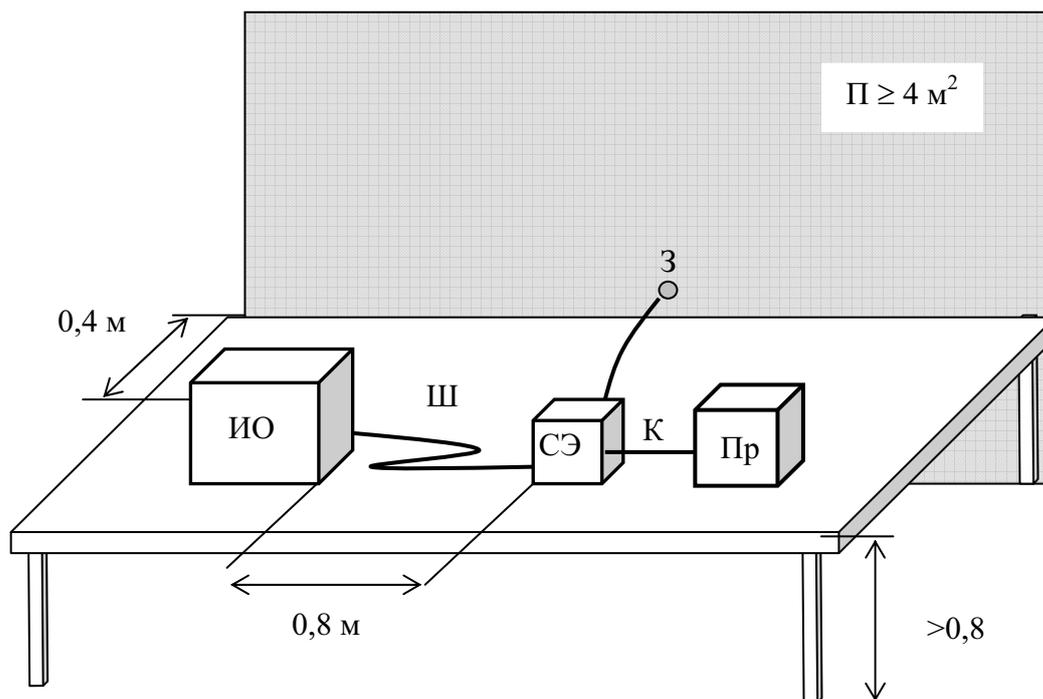


Рис. 5.3. Типовой стенд для испытаний и измерений кондуктивных помех:
 П – пластина опорного потенциала (земли);

З – клемма для присоединения провода опорного потенциала (заземляющего провода);
 К – экранированный кабель; Ш – шнур сетевого питания испытуемого объекта

5.3. Измерение помех, вызванных воздействием электромагнитных полей

Если размеры источников помех, включая их подводящие провода, оказываются одного порядка с длиной волны, электромагнитная энергия излучается в форме электромагнитных волн. Электромагнитные волны, а также квазистатические электрические и магнитные поля, воспринимаются антеннами, которые выдают на своих зажимах напряжение, пропорциональное напряженности измеряемого поля. Связь между напряженностью воздействующего на антенну поля и напряжением на входе подключенного к ней измерительного приемника характеризуется коэффициентами преобразования или антенными коэффициентами A_E и A_H . Они учитывают затухание в кабеле связи и нагрузку антенны (входное сопротивление приемника). Обычно волновое сопротивление кабеля и входное сопротивление приемника выбирают равными 50 Ом.

Применение различных типов антенн зависит от частотного диапазона, места, уровня помех и т. д. При этом следует руководствоваться соответствующими нормами, а также каталогами изготовителей.

Антенны для измерения напряженности электрического поля. Электрические поля вызывают в проводниках смещение зарядов и приводят к разности потенциалов между изолированными, находящимися в поле

проводниками. Поэтому антенны для измерения электрических полей естественным образом всегда состоят по меньшей мере из двух электродов.

Различают следующие типы антенн:

- антенны-монополи и дипольные антенны (рис. 5.4);
- рамочные, для полосы частот 9 кГц...30 МГц;
- биконические, логопериодические или гибридные (билогарифмические) антенны для полосы частот 30 МГц...1 ГГц;
- рупорные антенны, для частот выше 1 ГГц (некоторые логопериодические антенны и антенны типа ViLog могут работать до частоты 2 ГГц).

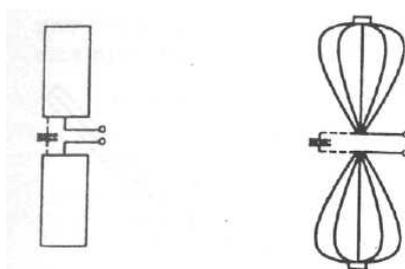


Рис. 5.4. Широкополосные диполи:

а – широкополосный диполь с цилиндрическими стержнями;

б – конический широкополосный диполь 20...200 МГц

Антенны для измерения напряженности магнитного поля

Магнитные поля индуктируют в электрически коротком проводящем контуре определенное электрическое напряжение (ЭДС), которое может быть измерено между концами разомкнутого контура (закон электромагнитной индукции). Поэтому пассивные рамочные антенны состоят просто из одного или нескольких витков проволоки (рис. 5.5). Малый диаметр витка и небольшое число витков дают высокую верхнюю граничную частоту и наоборот. При верхней граничной частоте контур начинает вести себя как электрически длинная линия.

Активные рамочные антенны имеют батарейный высокочастотный предусилитель, который не только поддерживает коэффициент антенны постоянным в широком диапазоне частот, но и в целом уменьшает его, иными словами, делает антенну, особенно на низких частотах, более чувствительной. К недостаткам активных антенн следует отнести опасность перевозбуждения и интермодуляции.

Рамочные антенны чаще всего экранированы проводящей трубой от электрической составляющей поля. Во избежание короткозамкнутого витка труба имеет разрез. Остаточное ослабление магнитного поля вихревыми токами в экране учитывается коэффициентом антенны. Если вставить в рамку ферритовый стержень, получим очень компактную рамочную антенну высокой чувствительности и направленности, или так называемую ферритовую антенну.

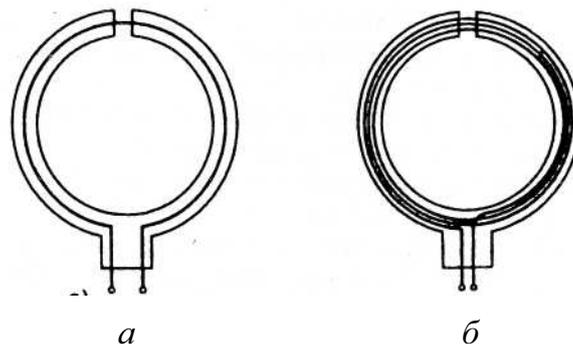


Рис. 5.5. Рамочные антенны для магнитных полей, 20 Гц...200 МГц:
а – с одним витком; *б* – с несколькими витками

Наряду с вышеприведенными откалиброванными измерительными антеннами для электрических и магнитных полей, имеются еще для контроля так называемые поисковые антенны. Они годятся для обнаружения паразитных полей у экранов, трансформаторов, катушек индуктивности, электронных узлов и т. д. Они не калиброваны, состоят из одного или нескольких витков проволоки или высовывающегося внутреннего проводника коаксиального кабеля, и поэтому могут быть без особых затрат легко изготовлены самим экспериментатором.

5.4. Измерительная среда и рабочее место

Измерение помех проводят на открытых площадках либо в экранированных помещениях, стены которых практически полностью поглощают излучение, не отражая его (рис. 5.6). Такие помещения получили название безэховых камер.

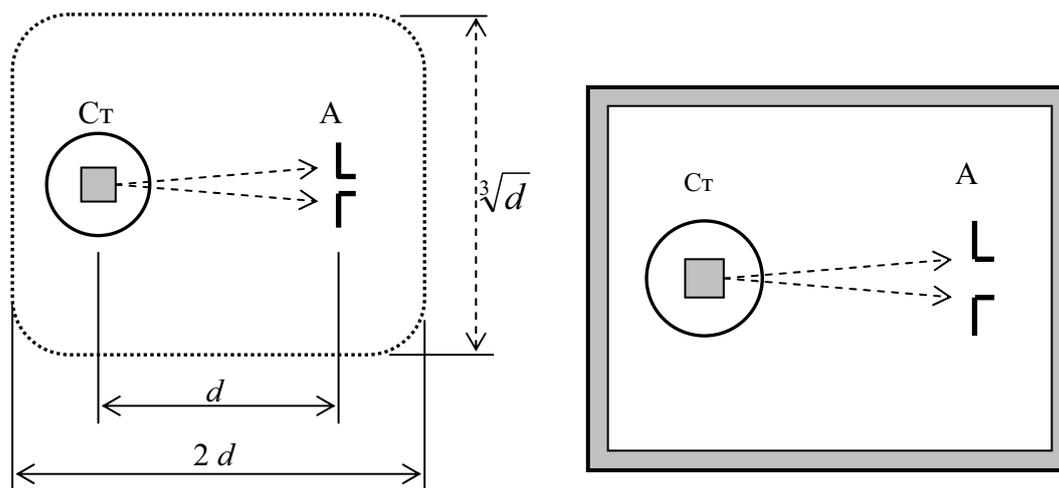


Рис. 5.6. Открытая (*а*) и закрытая (*б*) площадки для измерения излучения помех: Ст – вращающийся стол с испытуемым объектом;
d – нормированное расстояние ($d = 3; 10; 30$ м)

На открытой площадке в зоне, ограниченной эллипсом с нормированными размерами, не должно быть никаких отражающих предметов. Отражения от объектов, находящихся за пределами площадки, не должны создавать помех, сопоставимых по уровню с измеряемыми.

В процессе измерений объект поворачивается на вращающемся столе, и для каждой частоты измеряется максимальное значение напряженности поля. Если длина волны излучаемых помех больше размеров испытуемого объекта, то излучение обусловлено, в основном, присоединенными к нему проводами и линиями. В этом случае измеряют мощность излучения, для чего используют специальные абсорбционные измерительные датчики, подобные приведенным на рис. 5.1.

6. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

При обеспечении ЭМС, особенно на энергетических объектах, требуется выполнение ряда мероприятий для ослабления помех. Наиболее часто для этой цели применяются пассивные помехоподавляющие устройства в виде фильтров, ограничителей напряжения, разделительных элементов и экранов. Они могут быть установлены непосредственно у чувствительного элемента или около источника помех (рис. 6.1).

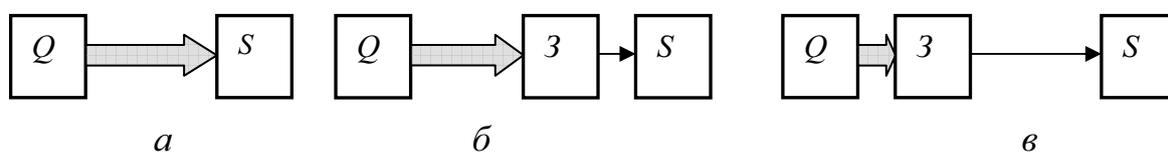


Рис. 6.1. Взаимное расположение источников помех Q , приемника S и защитного устройства Z :

a – защита отсутствует; б – защита приемника;

в – подавление помех у источника

Не менее важны общие правила монтажа оборудования и линий связи, способов и качества заземления оборудования и экранов линий связи.

Для характеристики средств защиты от помех служит понятие «помехоподавление». Им характеризуют, например, логарифм отношения напряжений на выходе U_2 и входе U_0 фильтра (коэффициент затухания α_ϕ) или напряжённостей магнитного поля в точках пространства перед экраном H_0 и за ним H_1 (коэффициент экранирования α_s''):

$$\alpha_\phi = 20 \lg(U_1/U_0); \quad \alpha_s'' = 20 \lg(H_1/H_0). \quad (6.1)$$

6.1. Помехоподавляющие фильтры

Целью фильтрации в контексте ЭМС является предотвращение проникновения помех в аппаратуру или утечки помех от аппаратуры по сигнальным цепям или цепям питания. Это непосредственно уменьшает уровень гальванической связи и способствует уменьшению связи посредством излучения от кабелей, снижает их восприимчивость к излучаемым помехам и позволяет ограничить опасные для изоляции и функционирования приборов напряжения помех.

Помехоподавляющие фильтры представляют собой элементы для обеспечения затухания поступающей по проводам помехи. Целесооб-

разное их применение предполагает, что частоты полезного сигнала и помехи достаточно отличаются. Это позволяет при соответствующих параметрах фильтра обеспечить выборочное ослабление помехи при отсутствии заметного искажения полезного сигнала.

Качество фильтра оценивают, прежде всего, по амплитудно-частотной характеристике (АЧХ) или ее основным элементам: частоте и крутизне среза, коэффициенту пропускания в полосе прозрачности. По виду АЧХ различают фильтры: полосовые (ПФ), режекторные (РФ), нижних (ФНЧ) и верхних (ФВЧ) частот (рис. 6.2).

Во вторичных цепях подстанционного оборудования для защиты от помех в сети используют ФНЧ и ПФ, в каналах телемеханики и связи чаще встречаются ПФ (заградительные фильтры на шинах и настроенные узкополосные фильтры присоединения к конденсаторам связи, входные фильтры в приёмниках).

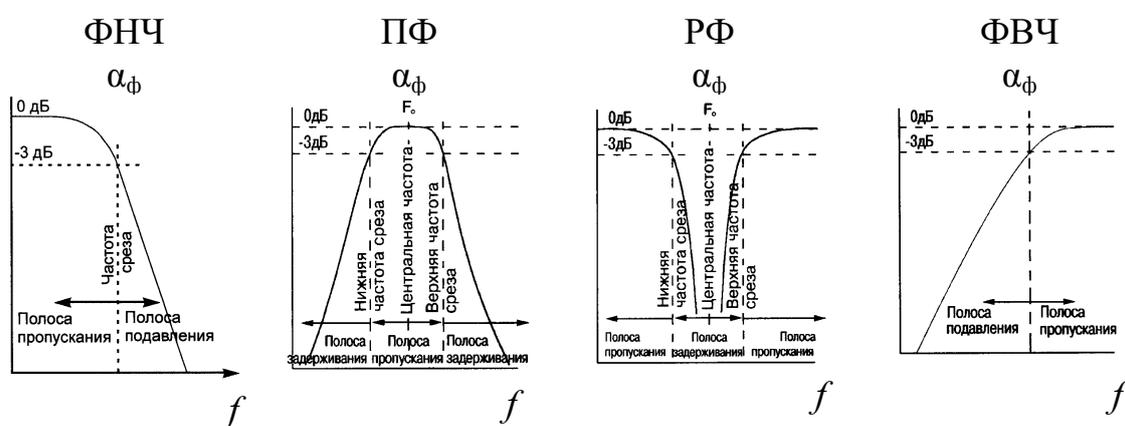


Рис. 6.2. Амплитудно-частотные характеристики фильтров

Частота среза $f_{ср}$ определяется на некотором уровне, например 0,9 от максимального значения коэффициента пропускания. Крутизну среза определяют в децибелах при двойном отклонении от частоты среза ($0,5 f_{ср}$ для ФВЧ и $2 f_{ср}$ для ФНЧ), которое называют октавой. Например, ФНЧ, имеющий $f_{ср} = 1000$ Гц и крутизну среза $\alpha_{\phi} = 20$ дБ/окт, на частоте 500 Гц имеет коэффициент пропускания, который в 10 раз меньше, чем на частоте 2000 Гц. Для полосовых фильтров задают верхнюю и нижнюю частоту среза, для режекторных – центральную частоту f_0 .

Все фильтры по исполнению делятся на две большие группы: пассивные и активные. Пассивные собираются из пассивных элементов – резисторов, конденсаторов и дросселей (катушек индуктивности). В активных фильтрах, наряду с упомянутыми элементами, используются также полупроводниковые приборы, микросхемы и схемы их питания. Активные фильтры делятся на аналоговые и цифровые. Достоинством

активных фильтров, по сравнению с пассивными, является большая крутизна среза и большой коэффициент пропускания в полосе прозрачности, высокое входное и низкое выходное сопротивление.

В понятиях ЭМС «фильтрация» всегда подразумевает низкочастотный фильтр, свободно пропускающий напряжение сети (полезный сигнал) и фильтрующий содержащиеся в сети высокочастотные составляющие (гармонические и образующие спектр импульсных помех). Их применение преследует две цели: во-первых, защиту устройства от помех, поступающих из сети питания, во-вторых, снижение уровня эмиссии возможной помехи, исходящей от прибора по проводам питания.

Обычный ФНЧ построен на двух элементах: последовательной индуктивности или резистора и параллельно подключенном конденсаторе. При минимальной конфигурации фильтр содержит только один из указанных компонентов, а их комбинация сформировать LC -фильтр, T -фильтр или Π -фильтр (табл. 6.1). Выбор индуктивности или резистора обычно определяется значением тока полезного сигнала, который проходит через него: для фильтров источников питания типичное значение сопротивления не превышает нескольких ом. Преимуществом сопротивлений является их способность поглощать энергию помех и препятствовать возникновению резонансов, и конечно меньшая стоимость и размеры по сравнению с индуктивностью. Индуктивность, с другой стороны, может обеспечить значительный уровень полного сопротивления на высоких частотах с малыми потерями на постоянном токе низких частот. Индуктивность обладает высоким полным сопротивлением для помех и наиболее эффективна в цепях с низким полным сопротивлением. Конденсаторы создают низкое полное сопротивление, обеспечивающее ослабление помех на частотах, и поэтому наиболее эффективны в цепях с высоким полным сопротивлением. В общем случае любой компонент позволяет достичь максимального ослабления в 40...50 дБ из-за ограничений, вносимых его паразитными параметрами, поэтому фильтры с высокими показателями строятся по многозвенной схеме.

Исходя из требований ослабления помехи и сопротивлений источника и нагрузки, между которыми должен быть фильтр, производится выбор его электрической схемы. Если значения \bar{Z}_o и \bar{Z}_s известны приблизительно, выбор подходящей фильтровой структуры может производиться с использованием данных табл. 6.1.

При этом используется следующее правило: фильтр должен быть установлен так, чтобы конденсатор был обращен к высокому сопротивлению цепи, а индуктивность – к низкому. Это связано с тем, что

для получения оптимальных характеристик помехоподавления структура фильтра должна обеспечивать достижение максимального рассогласования на входе и выходе фильтра.

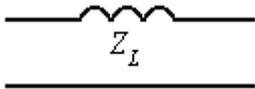
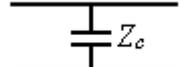
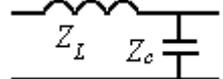
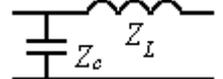
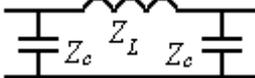
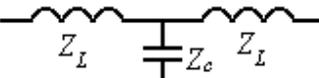
Поэтому при большом сопротивлении источника, первым элементом ставится конденсатор. В этом случае, когда частота помехи возрастает, реактивная составляющая C_x уменьшается, в цепи происходит необходимое рассогласование, при котором помеха шунтируется на землю.

При малом сопротивлении источника первым элементом должна быть индуктивность. С ростом частоты реактивная составляющая L_x увеличивается, обеспечивается рассогласование между индуктивностью и малым сопротивлением источника. Создаются условия поглощения или отражения сигнала помехи. Аналогично происходит при выборе последнего элемента фильтра.

Однако если существует вероятность выбросов тока, перенапряжений и других нестационарных процессов в аппаратуре, то на входе фильтра рекомендуется ставить индуктивность, для того чтобы ослаблять перечисленные выше процессы, обеспечивая тем самым определенную степень защиты конденсатора.

Таблица 6.1

Основные типы фильтров нижних частот и оценка вносимого затухания

№	Сопротивление источника, \bar{Z}_Q	Схема фильтра	Сопротивление приемника, \bar{Z}_S	Вносимое затухание
1	Мало		Мало	20 дБ/дек
2	Велико		Велико	20 дБ/дек
3	Мало		Велико	40 дБ/дек
4	Велико		Мало	40 дБ/дек
5	Велико, неизвестно		Велико, неизвестно	60 дБ/дек
6	Мало, неизвестно		Мало, неизвестно	60 дБ/дек

Рассмотрим каждый из приведенных в таблице типов фильтров.

Фильтр типа *C* (табл. 6.1, строка 1) представляет собой проходной конденсатор, шунтирующий помеху на землю.

В основном используется для ослабления паразитных высокочастотных колебаний в линиях питания постоянного тока. Рекомендуется не использовать такой фильтр в цепях, где возможны броски напряжения или нестационарные процессы, так как это может разрушить конденсатор.

Фильтр типа *LC* (табл. 6.1, строки 3, 4) состоит из одного индуктивного и одного емкостного элемента.

Такой тип фильтра применяется в тех случаях, когда полные сопротивления источника и нагрузки значительно отличаются друг от друга. Возможны два варианта их подключения. В первом случае, когда имеется низкое сопротивление источника и высокое сопротивление нагрузки, подключение необходимо производить, как показано в табл. 6.1 (строка 3). Если имеется высокое сопротивление источника и низкое сопротивление нагрузки, то подключение необходимо производить, как показано в табл. 6.1 (строка 4). В силу простоты конструкции такие фильтры являются более экономичными, чем обусловлено их широкое распространение.

Фильтр типа *Π* (табл. 6.1, строка 5) состоит из двух емкостных и одного индуктивного элемента. Часто используются в линейных фильтрах, когда импедансы источника и нагрузки неизвестны. Эти фильтры получили наибольшее распространение, поскольку они при прочих, практически равных показателях оказались менее сложными по конструкции и обеспечивают достаточно высокое затухание помех. Однако случайные резонансы могут способствовать проникновению наводок через фильтр, особенно при импульсных переходных процессах.

Фильтр типа *T* (табл. 6.1, строка 6) состоит из двух индуктивных элементов и одного емкостного. Широко применяется в цепях, которые могут быть подвержены нестационарным процессам. Используется в цепях с низким сопротивлением источника и нагрузки, например в источниках электропитания. Но случайные резонансы могут увеличить нефильтрованные наводки, особенно при импульсных переходных процессах. Из рассмотренных фильтров они являются наиболее дорогими.

LC-фильтры выполняются из нескольких конденсаторов и индуктивностей, т. е. многозвенными, для одновременного демпфирования симметричных, несимметричных и асимметричных помех, увеличения крутизны подъема и спада АЧХ, достижения высокой равномерности демпфирования в широком диапазоне частот, но это существенно увеличивает их стоимость.

Компоненты фильтра, так же как и все другие, не идеальны. При использовании катушек индуктивности и конденсаторов для фильтрации следует иметь в виду, что любой конденсатор с емкостью C обладает паразитной индуктивностью $L_{\text{п}}$, зависящей от длины выводов конденсатора. Она особенно велика у двухполюсных конденсаторов и мала у коаксиальных конденсаторов-выводов. Каждая катушка индуктивности, в дополнение к ее индуктивности L , имеет паразитную емкость $C_{\text{п}}$.

Рис. 6.3 дает представление о затухании LC -фильтра с реальными элементами в зависимости от диапазона частот коэффициент затухания определяется параметрами фильтра L , C или паразитными параметрами $L_{\text{п}}$, $C_{\text{п}}$. При низких частотах, когда элементы фильтра можно считать идеальными, коэффициент затухания $\alpha_{\text{ф}}$ увеличивается пропорционально квадрату частоты. Затем начинает сказываться влияние параметров $L_{\text{п}}$ и $C_{\text{п}}$, и α остается приблизительно неизменным. При высоких частотах эффект демпфирования в основном определяется паразитными параметрами $L_{\text{п}}$, $C_{\text{п}}$, и коэффициент $\alpha_{\text{ф}}$ уменьшается обратно пропорционально квадрату частоты (рис. 6.3, б).

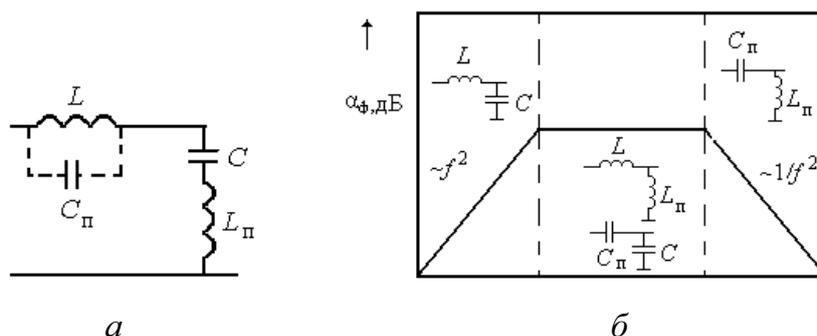


Рис. 6.3 Коэффициент затухания $\alpha_{\text{ф}}$ фильтра LC :

а – схема замещения фильтра;

б – принципиальная частотная зависимость коэффициента затухания $\alpha_{\text{ф}}$

Помехоподавляющие конденсаторы. Полное сопротивление конденсатора в широком диапазоне частот определяется не только его емкостью, но и индуктивностью его выводных проводников. Эквивалентная схема конденсатора может быть представлена в виде последовательного L – R – C -контура. Таким образом, каждый конденсатор имеет определенную резонансную частоту, выше которой его полное сопротивление определяется уже не емкостью, а его собственной индуктивностью. Для расширения диапазона частот, в котором полное сопротивление конденсатора не превышало бы определенной величины, необходимо уменьшить собственную индуктивность конденсатора. Кроме того, к конденсаторам, в зависимости от условий их работы, предъявляются требования в отношении влагостойкости, теплостойкости, электриче-

ской и механической прочности и т. д. Для фильтрации радиочастот обычно применяются керамические конденсаторы. Часто используются субминиатюрные полиэстровые или полистирольные конденсаторы.

Промышленностью выпускаются специальные помехоподавляющие конденсаторы типа КЗ. Эти конденсаторы имеют собственную индуктивность меньше $50 \cdot 10^{-9}$ Гн. Однако, в ряде случаев ввиду недостаточно широкой номенклатуры конденсаторов типа КЗ, а также из-за ограничений по весу и габаритам приходится применять обычные конденсаторы. Из них для фильтрации помехонесущих сетей рекомендуется применение конденсаторов типа КСО и КБГ и др. Но эти конденсаторы применяются на частотах до 10...20 МГц. Если частоты выше, то применяют проходные конденсаторы, например типа КБП.

Помехоподавляющие дроссели. Катушки индуктивности выполняются в виде обмотки из провода. Чем физически больше этот элемент, тем больше его индуктивность, но также выше и собственная емкость. Число витков может быть уменьшено при использовании сердечника с высокой магнитной проницаемостью, но это также сопровождается включением высокой диэлектрической проницаемости, которая будет способствовать увеличению емкости. Для достижения минимальной собственной емкости начало и конец обмотки должны быть по возможности разделены; одним из путей достижения этого является применение многосекционной намотки. Однослойная намотка обеспечивает меньшую собственную индуктивность. Если необходимо использовать число витков большее, чем возможно разместить в одном слое, то предпочтительнее применить прогрессивную намотку, чем послойную; это приведет к минимизации емкости (рис. 6.4).

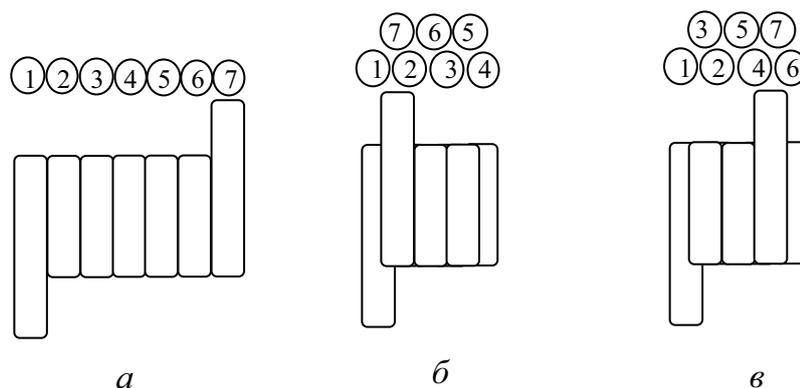


Рис. 6.4. Виды намотки катушек индуктивности:
a – однослойная намотка; *б* – послойная намотка; *в* – прогрессивная намотка

Расположение компонентов и монтаж фильтра. Индуктивность выводов и паразитные емкости приводят к ухудшению заданных параметров фильтров на высоких частотах. Две основные причины при применении фильтров не могут обеспечить низкоиндуктивное заземление и соединение выводов входа и выхода, расположенных близко один от другого.

Неправильное заземление обуславливает общее полное сопротивление, которое уменьшается с частотой, и связь на высоких частотах усиливается из-за локального пути заземления через фильтр. Общий монтаж входа/выхода способствует этому посредством паразитной емкости или взаимной индуктивности; это также возможно при «чистом» монтаже за счет связи со стороной, где сигнал не фильтрован, через непредусмотренные пути. Выходом из положения является монтаж фильтра, когда его точка заземления непосредственно соединяется с низкоимпедансной землей, а контакты ввода/вывода разнесены и, по возможности, экранированы друг от друга. Наилучшим решением является расположение фильтра непосредственно на экране аппаратуры. Ни в коем случае не допускается соединение в месте оплеток входных и выходных кабелей, подходящих к фильтру (рис. 6.5).

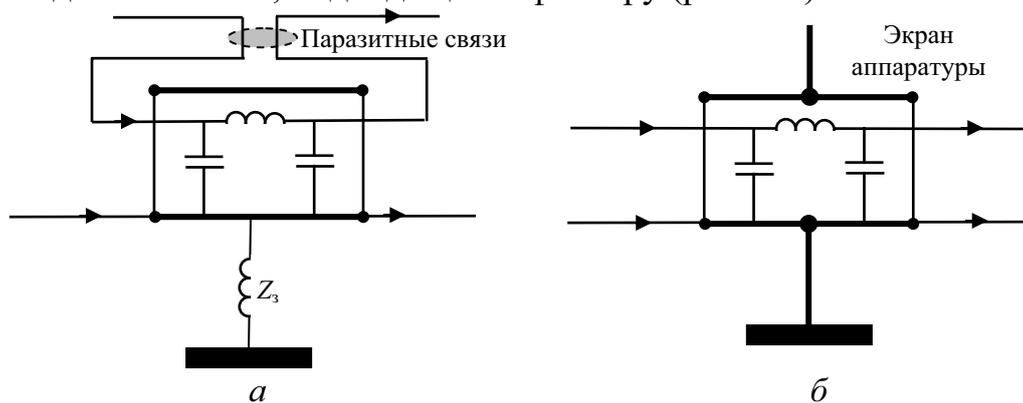


Рис. 6.5. Неправильная (а) и правильная (б) компоновка фильтра:
 Z_3 – полное сопротивление контура заземления

Расположение элементов внутри фильтра также играет существенную роль. Компоненты входа и выхода должны быть разнесены друг от друга для минимальной емкостной связи, все сигнальные проводники, и особенно проводники заземления, должны быть по возможности короче и массивнее. Лучшим решением является компоновка элементов фильтра в той последовательности, как они нарисованы на принципиальной схеме. Если применяются индуктивные компоненты, то они должны быть спроектированы и расположены таким образом, чтобы магнитная связь между ними (через поля рассеяния) была минимальна; наилучшим решением является использование тороидальных сердечников.

Для подавления помех в диапазонах УВЧ и СВЧ обычно применяют ненастраиваемые ФНЧ. По конструкции защитные фильтры СВЧ обычно коаксиальные, а по принципу действия – поглощающие. Важное место в проектировании таких фильтров занимает выбор поглощающего материала и расстояний между его частицами в спрессованном виде, так как для этих целей в большинстве случаев используются порошковые магнитные сплавы, состоящие из металлических частиц, покрытых оксидной или фосфатной пленкой. Частицы распределены в связующем веществе типа эпоксидной смолы. Изменяя расстояние между частицами, можно изменять распределение вихревых токов, а следовательно и затухание фильтра. Выбор параметров конденсаторов и дросселей, применяемых как в качестве элементов фильтра, так и элементов помехоподавления, производится на основании расчета фильтра. Однако произвести точно этот расчет в подавляющем большинстве случаев затруднительно, так как необходимые для расчета параметры эквивалентной схемы могут быть неизвестны. Поэтому окончательный выбор параметров дросселей и конденсаторов рекомендуется производить после экспериментальной проверки при нормальном функционировании измерительной аппаратуры и системы экранирования.

6.2. Разрядники для защиты от перенапряжений

Разрядники для защиты от перенапряжений служат для ограничения переходных перенапряжений, вызванных молнией, электромагнитным импульсом ядерного взрыва, при отключении индуктивных потребителей, разрядах статического электричества и т. д. Они являются нелинейными резисторами, которые в пределах рабочего напряжения обладают высоким сопротивлением, а при перенапряжениях их сопротивление снижается. Вместе с полным сопротивлением источника помех (при длинных линиях – это волновое сопротивление Z_0) они образуют делитель напряжения с нелинейным коэффициентом деления, который снижает перенапряжения до значений, меньших импульсной электрической прочности защищаемых элементов (координация изоляции при защите от перенапряжений) (рис. 6.6). Напряжение на нелинейном резисторе определяется как

$$u_{st} = u_{st}(t) - i_{st}(t)R_q. \quad (6.2)$$

В основном различают три группы разрядников, которые заметно отличаются по напряжениям срабатывания, устойчивости к импульсам тока, сопротивлениям при рабочем напряжении, остаточному сопротивлению при включении, динамическим характеристикам, а также

многочисленным другим свойствам и имеют предпочтительные области применения (табл. 6.2).

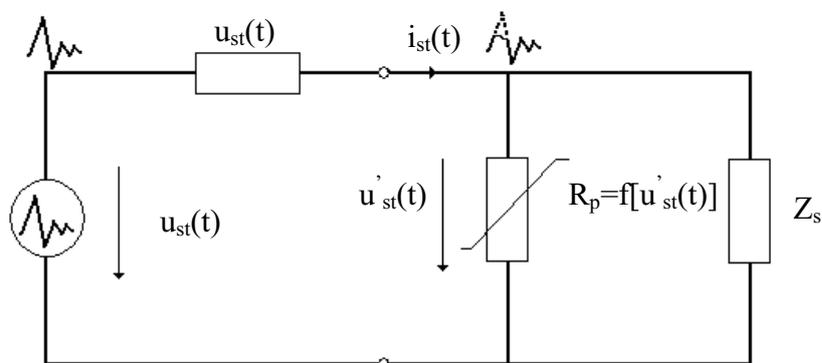


Рис. 6.6. Ограничение перенапряжения разрядником

Таблица 6.2

Основные характеристики ограничителей напряжения

Характеристики	Диапазон значений для различных ограничителей		
	Газонаполненные разрядники	Варисторы	Полупроводниковые ограничители
Рабочие напряжения, В	$10^1 \dots 1,2 \cdot 10^4$	$10^1 \dots 2 \cdot 10^3$	3...600
Импульсные токи, А	$10^2 \dots 2 \cdot 10^5$	$10^2 \dots 10^5$	$10^1 \dots 10^3$
Максимальная поглощаемая энергия, Дж	60	2 000	0,1
Время срабатывания, с	$10^{-6} \dots 10^{-5}$	$10^{-9} \dots 10^{-8}$	$10^{-11} \dots 10^{-9}$
Межэлектродные емкости, пФ	2...30	200...20 000	10...10 000
Защитное действие	Грубая защита		Тонкая защита

6.2.1. Варисторы (ограничители перенапряжений)

Варисторы – это нелинейные резисторы, изготавливаемые на основе окиси цинка, сопротивление которых зависит от напряжения. Вольт-амперная характеристика в рабочей области (рис. 6.7, б) приближенно описывается выражением

$$I = K \cdot U^\alpha. \quad (6.3)$$

Коэффициент K зависит от размеров (диаметра и толщины диска), а показатель степени α ($\alpha > 25$) зависит от материала варистора. Характеристика симметрична по отношению к полярности напряжения.

Из (6.3) для нелинейного статического сопротивления в зависимости от напряжения следует:

$$R = U / I(U^\alpha) = U / (KU^\alpha) = \frac{1}{K} U^{1-\alpha}. \quad (6.4)$$

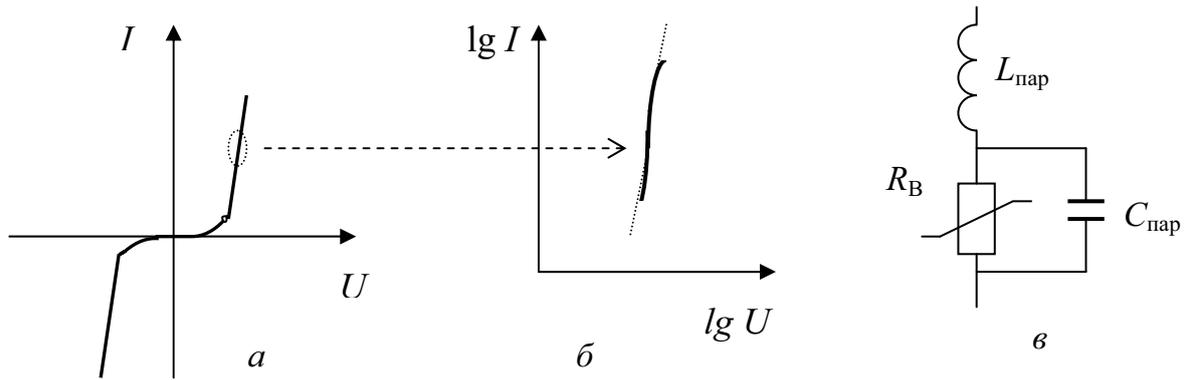


Рис. 6.7. Полная вольт-амперная характеристика (а), ее фрагмент в рабочей области (б) и схема замещения варистора (в)

В паспортах на варисторы нелинейная зависимость сопротивлений чаще всего дается в двойном логарифмическом масштабе, благодаря чему характеристики принимают форму прямых, изображенных на рис. 6.7, б. За пределами рабочей области, при экстремально больших или малых токах появляются отклонения от степенной зависимости, которые возникают по причине зависящего от напряжения остаточного сопротивления внутри зерен или от внешних токов утечки.

При быстрых изменениях напряжения в схему замещения варистора (рис. 6.7, в) необходимо ввести, как минимум, последовательно включенную индуктивность и параллельно включенную емкость. Индуктивность обусловлена индуктивностями выводов варистора и отражает, в какой-то мере, следствия явлений поверхностного эффекта инерции инжекции зарядов через границы зерен. Емкость $C_{\text{пар}}$ обусловлена высокой относительной диэлектрической проницаемостью материала ($\epsilon_r = 1200$) и находится в диапазоне от ста до десятков тысяч пикофарад в зависимости от нагрузочной способности варистора. Влияние емкости препятствует применению варисторов на высокой частоте, однако этот недостаток можно преодолеть последовательным включением диодов с малой емкостью.

Выбор варистора производится поэтапно.

1. Выбор варистора по заданному номинальному рабочему напряжению с учетом 10...20 % на повышение напряжения. Спектр рабочих напряжений распространяется от 5 В до нескольких киловольт.

2. Определение размеров варистора в зависимости от максимального импульсного тока. Максимальный импульсный ток цепи вычисляется с учетом переходного напряжения и внутреннего сопротивления источника помех (полного сопротивления Z_q или волнового сопротивления Z_0 при электрически длинных подводных линиях). Максималь-

но допустимая нагрузка варистора импульсным током зависит от числа срабатываний варисторов во время срока службы. При однократном срабатывании диапазон простирается от 100 А до 70 кА (блочные варисторы). При повторяющихся срабатываниях эти значения при определенных обстоятельствах должны уменьшаться на несколько порядков.

3. Определение размеров варистора по способности потреблять энергию.

Импульсный ток выделяет в варисторе тепловую энергию

$$W = \int_0^{\tau} i^2 R(u) dt = \int_0^{\tau} i(t) u(t) dt, \quad (6.5)$$

которая в простейшем, «наихудшем» случае определяется как $W_{\max} = i_{\max} \cdot u_{\max} \cdot t$.

Как и для максимального импульсного тока, максимальная способность поглощения энергии также является вопросом числа срабатываний варистора во время всего срока службы. При однократном срабатывании энергетический диапазон простирается от 0,14 Дж до 10 кДж. При повторяющихся срабатываниях эти значения при определенных обстоятельствах могут быть на несколько порядков меньше.

4. Определение размеров варистора по мощности P при воздействиях перенапряжений с энергией W , повторяющихся с частотой f : $P = Wf$. В зависимости от конструкции варистора предельные нагрузки составляют 0,01...2 Вт.

5. Проверка уровня защиты. Если известен максимальный импульсный ток, то остаточное напряжение на варисторе можно определить из вольт-амперной характеристики; оно должно быть ниже значения электрической прочности защищаемого устройства. Если максимальный ток неизвестен, то исходят из остаточного напряжения и рассчитывают приближенное значение тока и уточняют остаточное напряжение. Многократное повторение этих вычислений дает искомое остаточное напряжение.

6.2.2. Кремниевые лавинные диоды

Кремниевые лавинные диоды по сравнению с обычными полупроводниковыми диодами обладают тем преимуществом, что при превышении напряжения пробоя p - n -переход не разрушается, а пропускает большой ток в обратном направлении. До тех пор, пока допустимая термическая мощность потерь в закрытом состоянии или при импульсной нагрузке, допустимый интеграл квадрата тока $\int i^2 dt$ не превышает, не наступает разрушения запирающего слоя (контролируемый пробой). Диоды Зенера находят применение для защиты от перенапряжений в электронных схемах. Для обеспечения ЭМС были разработаны специаль-

ные кремниевые лавинные диоды с большим по площади р–п-переходом для высокого допустимого тока в обратном направлении (ограничительные диоды, стабилитроны, диоды-поглотители и т. д.). Кремниевые лавинные диоды имеют, как и варисторы, время срабатывания в субнаносекундном диапазоне, которое, однако, на практике из-за индуктивности токопроводов перемещается в наносекундный диапазон. Аналогично варисторам они имеют сравнительно большие емкости (до 15 000 пФ), что препятствует их применению в высокочастотных системах (исключение: последовательное включение с малоемкостными диодами, см. п. 6.2.4).

Кремниевые лавинные диоды являются обычно однополярными конструктивными элементами. Путем встречного последовательного включения двух диодов получают симметричную характеристику. Выбор кремниевых лавинных диодов происходит аналогично выбору варисторов на основании характеристик или предельных данных, даваемых изготовителем.

6.2.3. Искровые разрядники

До недавнего времени разрядники были абсолютными «рекордсменами» среди других защитных устройств по величинам номинальных напряжений, коммутируемым энергиям и токам. Они имеют очень небольшие емкости межэлектродного промежутка, что важно, например, для сохранения высокочастотных свойств защищаемых цепей. Разрядники применяются для защиты входных и выходных цепей РЗ и ПА, антенн и линий связи, источников питания и т. д. от естественных и искусственных источников перенапряжений практически всех видов. Различают:

- газонаполненные разрядники (крутая вольтсекундная характеристика (ВСХ), пропускают стандартные токи 8/20 мкс до 10^4 А. Способны гасить сопровождающие токи до 1 А;
- воздушные защитные промежутки (крутая ВСХ, не способны гасить сопровождающие токи);
- разрядники со скользящим разрядом (более пологая ВСХ, ограничивают перенапряжения независимо от крутизны импульса, способны обрывать сопровождающие токи).

Разрядникам свойственны два недостатка.

Во-первых, при большой крутизне нарастания напряжение перед срабатыванием может на короткое время принимать очень большие значения по сравнению со статическим напряжением пробоя искрового промежутка.

Динамическое напряжение пробоя можно оценить из выражения:

$$U_{дин} = U_{ст} + t_3 \frac{dU}{dt}, \quad (6.6)$$

где $U_{ст}$ – статическое напряжение пробоя, t_3 – время запаздывания возникновения разряда, dU/dt – скорость нарастания напряжения.

Во-вторых, напряжение горения разряда при срабатывании (рис. 6.8) бывает меньше рабочего напряжения в защищаемой цепи, и разряд может гореть и после времени воздействия помехи. В низкоомных цепях сопровождающий ток может привести к отказу разрядника из-за термического разрушения.

Первый недостаток в некоторой мере можно устранить подбором типа разрядника с требуемой вольт-секундной характеристикой либо ступенчатой или тонкой защитой (см. ниже). Вторая проблема решается путем последовательного подключения к разряднику варистора.

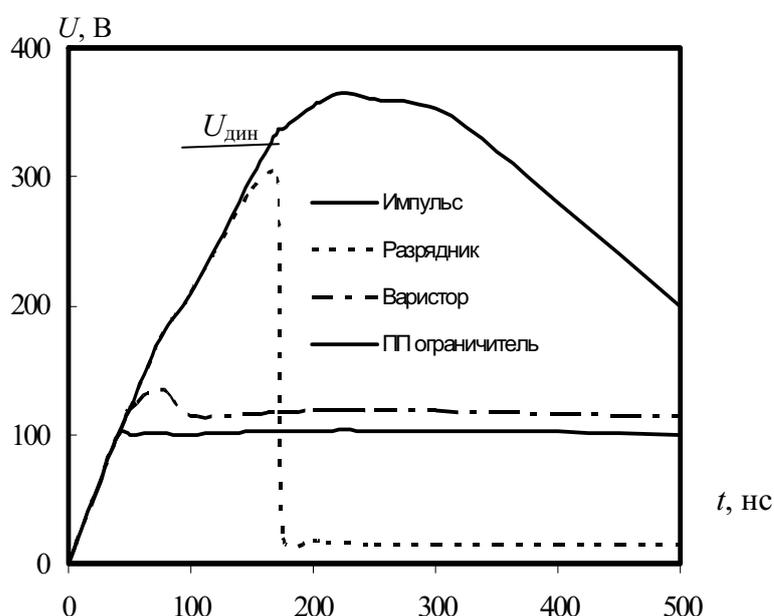


Рис. 6.8. Сравнительные характеристики ограничителей напряжения разных типов

6.2.4. Гибридные разрядные цепи

Высокая работоспособность искровых разрядников, а также большое быстродействие и отсутствие сопровождающего тока у варисторов и диодов делают целесообразным создание гибридных схем и их комбинаций. Схемы некоторых комбинированных (гибридных) ограничителей напряжения приведены на рис. 6.9.

Последовательное соединение разрядника с варистором (рис. 6.9, а), с одной стороны, способствует гашению сопровождающего тока через разрядник после его срабатывания. С другой стороны, разрядник исключает протекание тока через варистор в нормальном эксплуатацион-

ном режиме, что позволяет оптимизировать уровень ограничения и уменьшить размеры варистора.

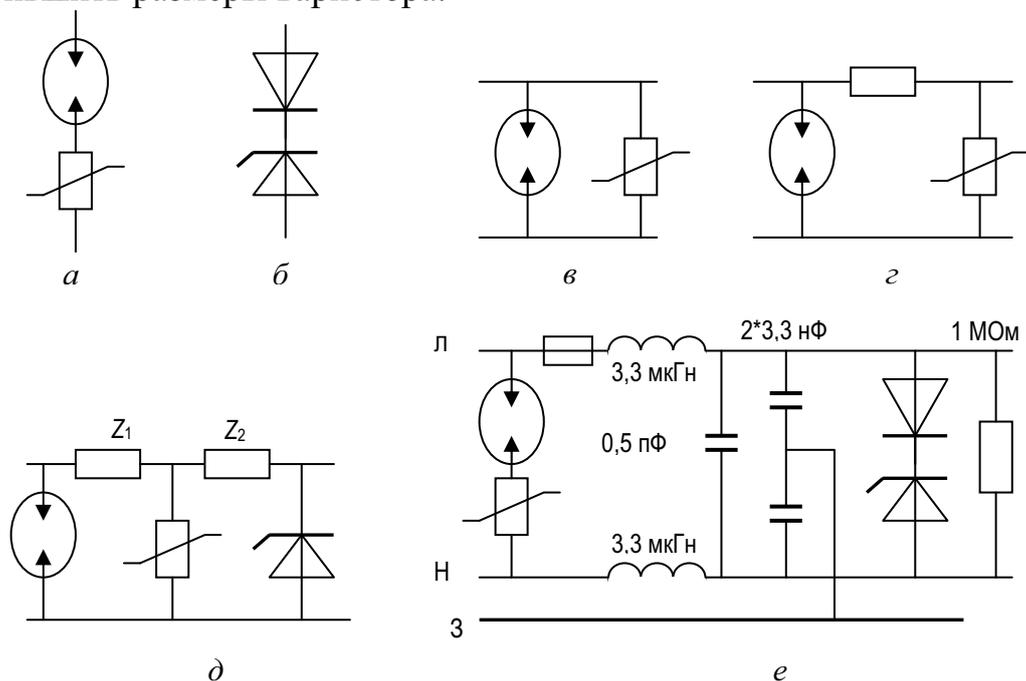


Рис. 6.9. Схемы комбинированных ограничителей: последовательное включение разрядника и варистора (а), помехоподавляющего и малоемкостного диода (б); параллельное включение разрядника и варистора, прямое (в) и косвенное (г); трехступенчатая защита (д) и сетевой защитный фильтр (е)

Для устранения влияния большой емкости одно- или двунаправленных стабилитронов (диодов Зенера) последовательно с ними включают малоемкостные диоды (рис. 6.9, б). Параллельное соединение разрядника и варистора (рис. 6.9, в) обеспечивает требуемое быстродействие при условии, что в первые моменты времени перенапряжение ограничивается только варистором. По истечении статического времени запаздывания искровой разрядник срабатывает и напряжение падает до значения, которое меньше 20 В. Ток через варистор уменьшается до обычных малых значений тока утечки, а разрядник весь импульсный ток берет на себя. Если требуется более низкий уровень защиты, меньше 100 В, то используют развязку ограничителей резистором или дросселем (рис. 6.9, г). Этот принцип подразделения на грубую и тонкую защиту можно при высоких требованиях распространить на трехступенчатую защиту (рис. 6.9, д) или использовать схемы с LC-фильтрами нижних частот (рис. 6.9, е).

Разрядники и гибридные устройства всех видов в многочисленных вариантах – от защитных розеток, защитных адаптеров кабельных линий и линий передачи данных до защитных блоков, вставляемых в

стандартную европейскую плату, – все это поставляется многими фирмами и имеется в продаже.

6.3. Электромагнитные экраны

Экранирование служит для ослабления электрических, магнитных и электромагнитных полей, а именно для того, чтобы исключить проникновение и воздействие таких полей на элементы, блоки, приборы, кабели, помещения, здания, а также для того, чтобы подавить исходящие из электрических и электронных промышленных средств и устройств помехи, обусловленные полями. Экран устанавливается между источником и приемником помех и снижает напряженности воздействующего поля E_0 и H_0 до значений E_1 , H_1 за экраном (рис. 6.10).

Результирующий коэффициент экранирования можно определить как:

$$\alpha_s^E = 20 \lg(E_1/E_0) \quad \alpha_s^H = 20 \lg(H_1/H_0), \text{ дБ.} \quad (6.7)$$

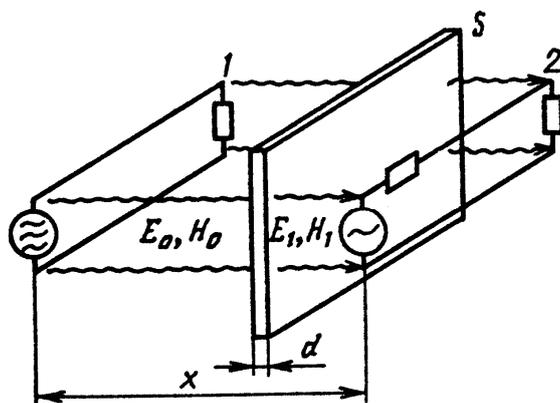


Рис. 6.10. Экранирование токовых контуров от внешних электрических и магнитных полей

Физическая сущность электромагнитного экранирования сводится к тому, что под действием источника электромагнитной энергии на стороне экрана, обращенной к источнику, возникают заряды, а в его стенках – токи, поля которых во внешнем пространстве по интенсивности близки к полю источника, а по направлению противоположны ему, в результате чего происходит взаимная компенсация полей.

С точки зрения волновых представлений эффект экранирования проявляется из-за многократного отражения электромагнитных волн от поверхности экрана и затухания энергии волн в его металлической толще (рис. 6.11). Отражение электромагнитной энергии обусловлено несоответствием волновых характеристик диэлектрика, в котором расположен экран, и материала экрана. Чем больше это несоответствие, чем больше отличаются волновые сопротивления экрана и диэлектрика, тем

интенсивнее частичный эффект экранирования, определяемый отражением электромагнитных волн. Такое рассмотрение является упрощенным, природа же электромагнитного экранирования гораздо сложнее.

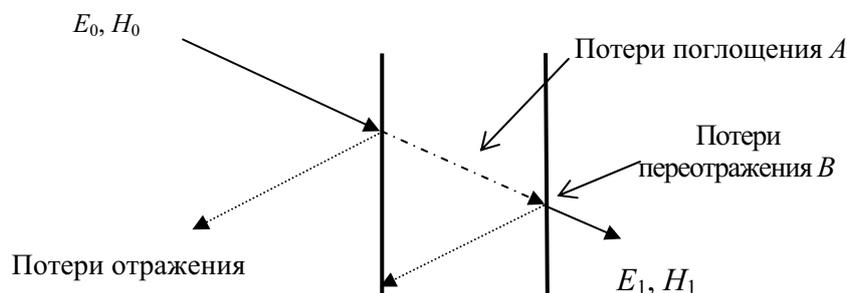


Рис. 6.1. Экранирование с точки зрения волновых представлений

Эффективность экранирования сплошного проводящего барьера также может быть записана как сумма потерь отражения, переотражения и поглощения:

$$\alpha_s = R + A + B, \text{ дБ.} \quad (6.8)$$

Это выражение известно как «модель линии передачи» для эффективности экранирования, и среди других моделей она выделяется важнейшим предположением, что связь между токами экрана и источника падающих волн ничтожно мала. Оно существенно упрощает модель, когда это допустимо.

Значение потерь на отражение R можно рассчитать из следующих выражений:

- для дальней зоны (плоская электромагнитная волна):

$$R = 168 - 10 \lg[(\mu_r / \sigma_r) \cdot f], \text{ дБ,} \quad (6.9)$$

- для электрического поля (ближняя зона):

$$R_E = 322 - 10 \lg[(\mu_r / \sigma_r) \cdot f^3 \cdot r^2], \text{ дБ,} \quad (6.10)$$

- для магнитного поля (ближняя зона):

$$R_H = 14,6 - 10 \lg[(\mu_r / \sigma_r) \cdot f \cdot r^2], \text{ дБ,} \quad (6.11)$$

где μ_r – относительная магнитная проницаемость; σ_r – относительная проводимость (проводимость материала относительно проводимости меди); f – частота поля, Гц; r – расстояние до источника излучения, м.

Потери на поглощение A :

$$A = 8,69(t / \delta), \text{ дБ,} \quad (6.12)$$

где t – толщина экрана, м; $\delta = 0,0661(f \cdot \mu_r \cdot \sigma_r)^{-0,5}$, м – глубина проникновения (толщина скин-слоя).

Повторные отражения B :

$$B = 20 \lg(1 - e^{-2\sqrt{2(t/\delta)}}), \text{ дБ.} \quad (6.13)$$

Значение B всегда имеет отрицательное значение, поскольку многократные повторные отражения ухудшают эффективность экранирования.

Однако расчет электромагнитных экранов с достаточной точностью пока возможен только в некоторых идеализированных случаях:

- бесконечно плоский экран на пути распространения плоской волны;
- размещение точечного источника в центре герметичного идеального проводящего экрана сферической формы;
- бесконечно длинный, идеально проводящий цилиндр с излучателем в виде бесконечной нити, расположенной на оси этого цилиндра.

Все эти случаи не отражают реальных условий работы экрана, поскольку не учитывают соотношений между длиной волны и линейными размерами экрана, характером источника, неравномерностью распределения поля внутри экрана, неоднородностью материала и конструкции самого экрана и возможность проникновения поля через щели и отверстия, имеющиеся в реальном экране.

На эффективность экранирования оказывают существенное влияние частота поля, электропроводность и магнитная проницаемость материала экрана, конфигурация, размеры и толщина экрана. Принципиально следует иметь в виду, что эффективность экранирования зависит от наличия дефектов и отверстий в стенке экрана (трещин, дверных, вентиляционных и оконных проемов, кабельных вводов и отверстий для элементов обслуживания и сигнализации), а также то, что внутри экранированных объемов могут возникать резонансные эффекты.

Эффективность экранирующих устройств ориентировочно может быть оценена следующим образом:

- $\alpha_3 < 10$ дБ – недостаточное экранирование;
- $10 < \alpha_3 < 30$ дБ – минимальные требования по экранированию;
- $30 < \alpha_3 < 60$ дБ – достаточное экранирование;
- $60 < \alpha_3 < 90$ дБ – хорошее экранирование;
- $90 < \alpha_3 < 120$ дБ – предельно хорошее экранирование.

Опыт проектирования и эксплуатации показывает, что эффективность экранирования может быть достигнута на уровне данных, приведенных в табл. 6.3.

Эти данные относятся к верхнему пределу частоты поддиапазона. Общая эффективность определяется самым низким значением эффективности одного из узлов экрана. Отсутствие в табл. 6.3 цифровых значений для отдельных устройств означает, что рассматриваемый вариант не рекомендуется или является нереализуемым. Данные табл. 6.3 упрощают выбор основных узлов экрана и конструирование его в целом, так как сокращают объем вычислений.

Таблица 6.3

Эффективность экранирования устройств замкнутыми экранами, дБ

Экранируемое устройство, материал и конструкция экрана	Диапазон частот, МГц			
	0,15...3	3...30	30...300	300...3000
Экранирование оконных проемов:				
• штора из металлической сетки с ячейкой 1...1,5 мм;	70	60	60	40
• приваренный стальной или припаянный жестяной лист;	100	100	80	80
• сотовая решетка;	100	100	100	–
• металлическая сетка с ячейкой до 2 мм;	70	60	40	20
• стекло с токопроводящей поверхностью	70	30	–	30
Экранирование дверных проемов:				
• одинарная дверь на каркасе, обшитом стальным листом, контакт сплошной регулируемый;	80	70	70	60
• то же, но контакт щеточный с шагом 100 мм;	70	60	40	30
• двойная дверь с тамбуром, контакт сплошной регулируемый	100	100	80	60
Экранирование вводов коммуникаций:				
• металлические трубы, приваренные к экрану по всему периметру;	100	100	100	100
• металлические трубы, проложенные в каналах	100	100	100	100

Для изготовления экранов используются два типа материалов:

1. Радиопоглощающие материалы (резины, поглощающие покрытия, ферритовые пластины, табл. П2). Эти материалы не относят к экранирующим материалам, хотя некоторые из них выпускаются на металлической основе, которая, при тщательном соединении ее отдельных частей и элементов, может служить экраном. Однако монтаж таких экранов очень сложен, поэтому поглощающим материалом экран покрывают внутри с целью уменьшения отражения радиоволн. Они ис-

пользуются для защиты от СВЧ-излучений, но имеют ограниченное применение из-за высокой стоимости и узости спектра поглощения.

2. Радиоотражающие материалы (металлы), которые получили очень широкое применение. Они выбираются из условий:

- достижения заданной величины ослабления электромагнитного поля и его составляющих в рабочем диапазоне частот при соответствующих ограничениях размеров экранов и его влияния на экранируемый объект;
- устойчивости против коррозии и механической прочности;
- технологичности конструкции экрана, требуемых его конфигурации массогабаритных характеристик.

Первому требованию удовлетворяют практически все применяемые в настоящее время *листовые материалы* (сталь, медь, алюминий, латунь и др., табл. П. 3), так как при соответствующей их толщине обеспечивают достаточно высокую эффективность экранирования.

Для экранирования используются как немагнитные материалы, так и ферромагнитные материалы. Экранирующее действие немагнитных материалов ($\mu_r = 1$, $\sigma_r = 0,6 \dots 1$) происходит из-за магнитных полей, созданных вихревыми токами. При этом постоянное магнитное поле совсем не экранируется, а низкочастотное переменное ослабляется незначительно. Напротив, электрические поля очень хорошо демпфируются такими экранами.

Экраны из магнитных материалов ($\mu_r \gg 1$, $\sigma_r < 1$) ослабляют электрические поля в области низких частот хуже, чем экраны из немагнитных, однако они вызывают определенное ослабление постоянных магнитных полей. С повышением частоты демпфирующее действие в отношении электрических и магнитных полей возрастает.

Однако в реальных экранах указанные свойства магнитных и немагнитных материалов проявляются слабо. Ввиду экономических и конструктивных соображений предпочтение отдается стальным конструкциям экранов. Преимущества стали теряются только при экранировании токонесущих элементов, критичных к вносимым в них потерям (т. е. применение стальных экранов ограничено из-за больших потерь, вносимых ими).

Применение стали для экранов обусловлено еще тем, что при монтаже такого экрана можно широко использовать сварку.

Толщина стали выбирается с учетом вида и назначения конструкции, условий ее монтажа и возможности осуществления сплошных сварных швов. При сварке на переменном токе толщину берут примерно 1,5...2 мм, на постоянном токе – около 1 мм, при газовой сварке – 0,8 мм.

К недостаткам листовых металлических экранов можно отнести:

- высокую стоимость (бронза, серебро и т. д.);
- значительный вес и габариты;
- сложность пространственного решения конструкции;
- низкую эффективность самого металла, реализуемую лишь на 10...20 % из-за несовершенства конструкции.

Сетчатые материалы получили широкое распространение. У сетчатых материалов поглощение энергии в металле проволок очень мало и происходит в основном в результате отражения электромагнитной волны от поверхности. Параметрами сетки, определяющими ее качество как экрана, являются: шаг сетки, S , равный расстоянию между соседними центрами проволоки; диаметр проволоки, d ; удельная проводимость материала, ρ . Различают густые и редкие сетки. К первым относятся сетки, для которых $S/d \leq 4$; у вторых $S/d > 4$. Для сетчатых материалов за толщину экрана принимают эквивалентную толщину сетки:

$$d_s = \pi \cdot r_s^2 / S. \quad (6.14)$$

Сетчатые материалы имеют ряд преимуществ перед листовыми: металлические сетки значительно легче, проще в изготовлении, удобны в сборке и эксплуатации, обеспечивают достаточный обмен воздуха, светопроницаемы, они обладают достаточной эффективностью экранирования во всем диапазоне радиочастот. Однако сетки имеют невысокую механическую прочность, быстро теряют эффективность экранирования из-за старения (потеря происходит за счет коррозии сеток, поэтому сетки специально покрывают антикоррозийным лаком).

Фольговые материалы. К ним относятся электрически тонкие материалы толщиной 0,01...0,05 мм. В сортамент фольговых материалов входят в основном диамагнитные материалы – алюминий, латунь, цинк. Стальные фольговые материалы промышленность не выпускает.

Монтаж фольговых экранов несложен, т. к. крепление фольги к основе экрана проводится приклепыванием. Выбор клея должен производиться с учетом условий эксплуатации экрана, к которым относятся температура, влажность, вибрационные нагрузки и др. Выбор толщины материала должен производиться с учетом возможностей возникновения резонансных явлений. Существуют графики для различных материалов, где указывается для самой низшей резонансной частоты экрана зависимость толщины от частоты при различной эффективности экранирования.

Эффективность экранирования фольговыми материалами достаточно высока для электромагнитного поля и электрической состав-

ляющей. Магнитную составляющую такие материалы ослабляют сравнительно мало, и тем меньше, чем больше длина волны.

Проводящие покрытия. Значительные объемы электронной продукции выпускаются по эстетическим или экономическим соображениям в пластмассовых корпусах. За счет нанесения покрытий на одной или двух сторонах стенок корпуса может быть обеспечена определенная степень экранирования аппаратуры. Возможно использование композиционных пластиков с проводящим наполнителем для получения определенной степени экранирования (около 20 дБ).

Использование проводящих красок исключает необходимость проведения сложных и трудоемких работ по монтажу экрана, соединению его листов и элементов между собой. Проводящие краски создаются на основе диэлектрического пленкообразующего материала с добавлением в него проводящих составляющих, пластификатора и отвердителя. В качестве токопроводящих пигментов используют коллоидное серебро, графит, сажу, оксиды металлов, порошковую медь, алюминий. Такая краска обычно устойчива и сохраняет свои начальные свойства в условиях резких климатических изменений и механических нагрузок.

Металлизация различных материалов получает все большее распространение благодаря большой производительности и универсальности методов нанесения покрытий. Нанести металлический слой можно на любую поверхность таких материалов, как плотная бумага, картон, ткань, дерево, текстолит, пластмасса, сухая штукатурка, цементированные поверхности и др.

В табл. 6.4 приведено сравнение наиболее типичных, широко применяемых проводящих покрытий (другие применимые варианты более дороги и имеют ограниченные приложения). Они обеспечивают при правильном применении эффективность экранирования в диапазоне 30...70 дБ.

Металлизационные слои могут быть различной толщины. Толщина слоя не зависит от вида металла – покрытия, а зависит от свойств подложки (основания). Количество наносимого слоя металла должно соответствовать физико-химическим свойствам материала подложки, его прочным и деформационным характеристикам. Для жесткой подложки количество наносимого металла существенно не ограничивается, т. к. более существенные ограничения обуславливаются массогабаритными характеристиками экрана.

Таблица 6.4

Сравнение проводящих покрытий

Материал	Стоимость, USD/м ²	Экранирование, E	Толщина	Адгезия	Сопротивляемость царапанию	Примечания
Проводящая краска (никель, медь)	10...30	слабое/среднее	0,05 мм	плохая	плохая	Пригодно для прототипа
Горячее распыление (цинк)	10...20	среднее/хорошее	0,1... ...0,15 мм	зависит от подготовки поверхности	хорошая	Неровные поверхности несовместимы
Электролитическое осаждение (медь, никель)	20...30	среднее/хорошее	1...2 мкм	хорошая	плохая	Дешево, если поверхность очищена
Вакуумная металлизация (алюминий)	20...30	среднее	2...5 мкм	зависит от подготовки поверхности	плохая	Плохая стойкость к воздействию окружающей среды

Следует заметить, что при прочих равных условиях эффективность экранирования металлизированным слоем ниже, чем сплошным листом той же толщины. Это объясняется тем, что проводимость нанесенного слоя меньше, чем проводимость исходного материала (металла).

Металлизация поверхностей может успешно применяться для экранирования помещений и кабин в условиях деления РЭС на отдельные экранированные отсеки при неметаллической общей несущей конструкции, для отдельных устройств, монтируемых в пластмассовых корпусах.

Металлические поверхности наносят и на стеклянные поверхности. Стекла с токопроводящими покрытиями в основном используются в смотровых окнах, в экранированных системах РЭС и камерах с целью обеспечения доступа в них света. Замкнутый экран из стекол с токопроводящим покрытием используют и тогда, когда требуется наблюдать за происходящими внутри экрана процессами.

Материалы, применяемые дополнительно:

- *Специальные (проводящие) ткани* изготавливаются из нитей, скрученных изолированной или расплющенной и посеребренной медной проволокой диаметром 35...50 мкм. Из таких тканей обычно изготавливают специальные костюмы для индивидуальной биологической защиты.
- *Электропроводные клеи (ЭПК)* – это эпоксидная смола, заполненная тонкодисперсными порошками (железо, кобальт, никель). Их целесообразно использовать вместо пайки, болтовых соединений там, где нужно электромагнитное экранирование. Шовное соединение, крепление контактных систем и различных элементов экранов, заполнение щелей и малых отверстий, установка экрана на несущей конструкции – эти и другие операции успешно могут быть осуществлены с помощью ЭПК при высокой эффективности экранирования и сокращения объема работ.

Вспомогательные элементы экранов

Экраны, которые должны служить для достижения определенной технической цели, имеют, как правило, отверстия или являются разборными, имеются снабженные фильтрами вводы и выходы, решетчатые фланцы для вентиляции и отопления, отверстия для механических валов, тяг, металлизированные окна для наблюдения и т. д. Эти дополнительные устройства часто представляют собой при высоких частотах разрывы в экране, которые могут сделать малоэффективным экранирующий корпус.

Для обеспечения электрического контакта в зазорах между элементами стенок экрана и дверных щелях применяют дополнительные уплотнители: различного рода контактные пружинящие планки из электропроводных эластомеров, металлические пружинные ленты, вязаные проволочные плетенки, жестко интегрированные в экранные части уплотнители и др. Необходимо иметь в виду ряд факторов, которые влияют на выбор прокладок или пружинных лент:

- *проводимость*: она должна быть такой же, как и материал стенок экрана;
- *легкость монтажа*: прокладки должны легко устанавливаться в пазах, полученных механической обработкой или при литье кожухов, и иметь размеры, которые позволяют выдерживать контактные усилия без недопустимых деформаций и перенапряжений. Пружинные прокладки устанавливаются при помощи клеевого слоя, сварки, пайки и т. п. Выбор метода непосредственно зависит от контактного давления;

- гальваническая совместимость с соединяемыми материалами: для уменьшения коррозии металл прокладки и корпуса должны быть предпочтительно одной группы в электрохимическом ряду. Материал корпуса должен быть проводящим после финишной обработки – никель или олово для стали;
- характеристики стойкости к внешним климатическим воздействиям: проводящие эластомеры часто предназначены для комбинированной электрической и климатической защиты, но могут быть эффективны для защиты от пыли, плесени, влаги и тепла. Если прокладки выбираются отдельно для повышения проводимости и для защиты от воздействия окружающей среды, то проводящая прокладка должна быть расположена внутри по отношению к защитной прокладке, а также внутри относительно болтового соединения.

Отверстия в стенках для осей потенциометров и переключателей из изоляционного материала могут быть экранированы при высокой частоте при помощи металлических трубок. Для экранировки больших отверстий применяются «сотовые» панели – множество экранных трубок располагаются в виде матрицы (рис. 6.12). В этой конструкции толщина экрана в несколько раз превышает ширину отдельного отверстия.

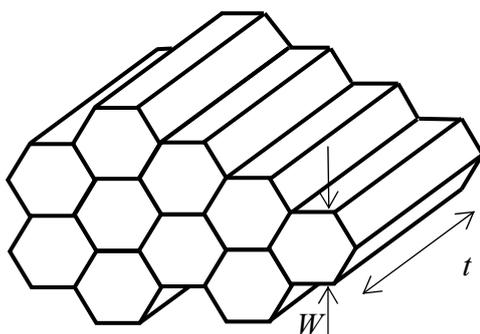


Рис. 6.12. Сотовая решетка $t/W \geq 4$

Для соблюдения условий хорошего экранирования все входные и выходные линии питания и управления необходимо вводить в корпус через фильтры. Все фильтры, заземления и кабельные экранированные вводы, должны быть установлены в непосредственной близости друг к другу (рис. 6.13). Для обеспечения низкоомного соединения всех входящих кабельных экранов и заземления кабины рекомендуется в месте расположения всех входов усилить стенку экрана массивной медной пластиной. С точки зрения безопасности все экранирующие корпуса и экранированные кабины должны быть соединены с проводом защитного заземления.

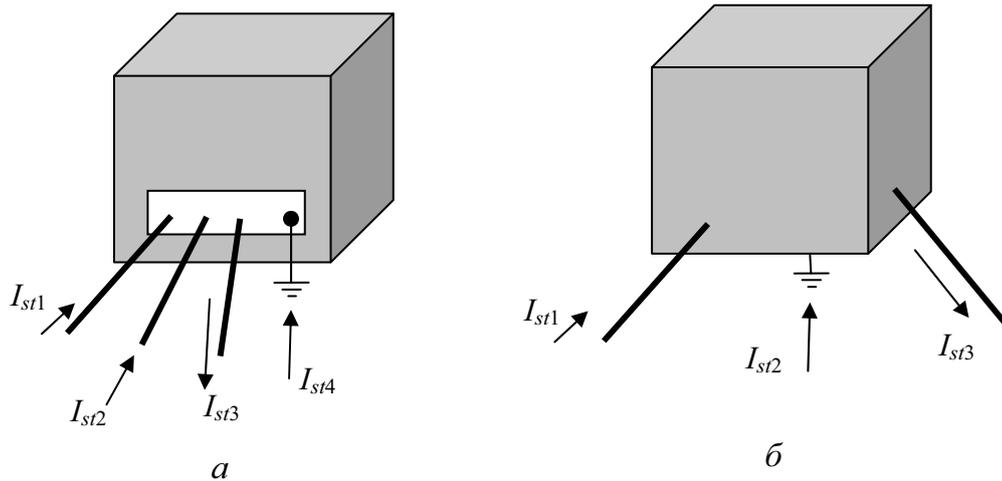


Рис. 6.13. Правильное (а) и неправильное (б) устройство вводов к экранному корпусу

6.3.1. Экраны кабелей

В неэкранированных проводах под действием электрического поля E создается поперечное (противофазное) напряжение U_{\uparrow}^H , а под действием магнитного поля H – продольное (синфазное) напряжение U_{\rightarrow}^H (рис. 6.14, а).

Кабельные экраны снижают величины этих напряжений, однако существенную роль играет способ заземления экрана. Если экран заземлен с одной стороны, то снижается только поперечное напряжение (рис. 6.14, б). При двустороннем заземлении экрана (рис. 6.14, в) возникает замкнутый контур, в котором под действием переменного магнитного поля индуктируется ток I . Продольное напряжение при этом уменьшается до величины $U_{\rightarrow} = Z_k \cdot I$, где Z_k – комплексное сопротивление связи экранированного кабеля.

Если затухание в одном экране недостаточное, используют два экрана, наложенные друг на друга и изолированные между собой. При двустороннем заземлении обоих экранов продольное напряжение

$$U_{\rightarrow} = I \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2 + j\omega L}, \quad (6.15)$$

а при одностороннем заземлении внутреннего экрана и двустороннем заземлении внешнего экрана

$$U_{\rightarrow} = I \frac{Z_1 \cdot Z_2}{Z_1 + Z_2 + 1/j\omega C}, \quad (6.15)$$

где L – индуктивность перемычки между экранами, C – емкость изоляции между экранами, Z_1 и Z_2 – комплексные сопротивления внутреннего и внешнего экрана.

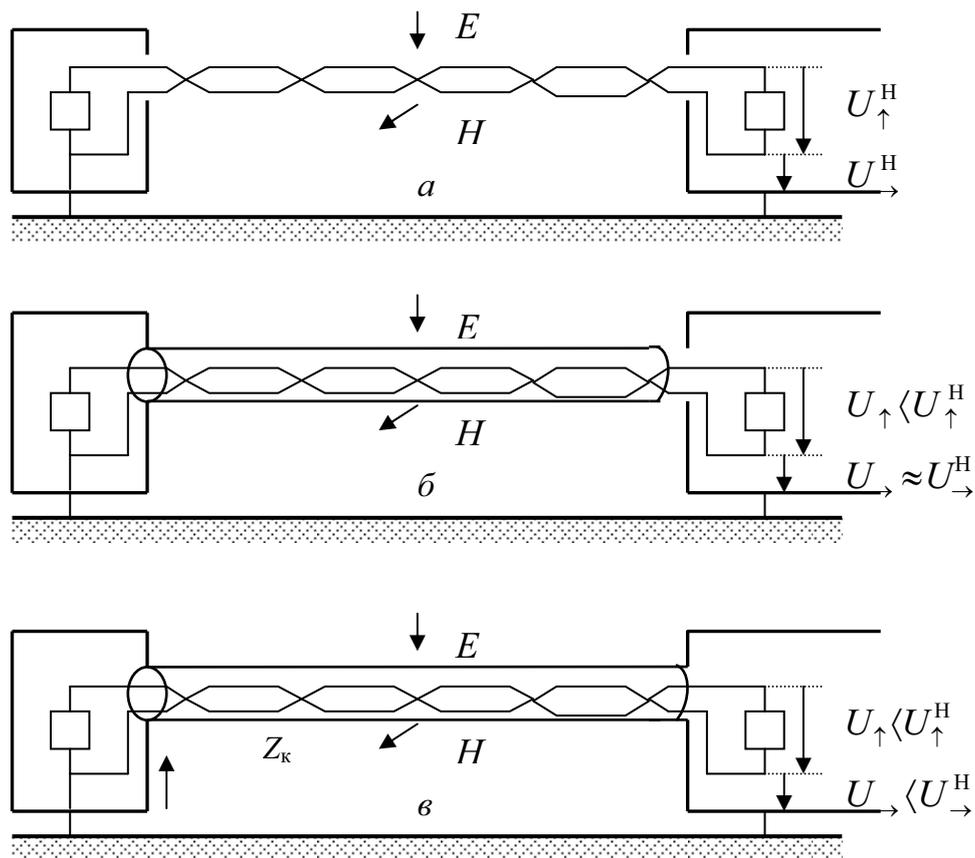


Рис. 6.14. Воздействие экранов:

а – незранированный провод; *б* – одностороннее заземление экрана;

в – двустороннее заземление экрана

Сравнение (6.14) и (6.15) приводит к следующим выводам. Двусторонне заземленный внутренний экран при низких частотах не оказывает сильного экранирующего действия, т. к. индуктивным сопротивлением перемычки можно пренебречь, и сказывается только сопротивление параллельно соединенных экранов. В области высоких частот $|j\omega L| \gg |Z_1 + Z_2|$ эффективность экранирования возрастает в сравнении с одним экраном. При одностороннем заземлении внутреннего экрана наблюдается обратная картина.

Для того чтобы полностью использовать возможности кабельных экранов, необходимо соблюдать следующие правила:

- экраны обычных кабелей и внешние экраны при двойном экранировании должны иметь хорошие контакты (пайка, сварка) с корпусами приборов или стенками экранированных кабин;
- внутренний экран следует заземлять с одной или с обеих сторон в зависимости от частоты поля помехи;
- внешний экран нельзя вводить внутрь корпуса прибора (кабины), т. к. при этом частично теряются экранирующие свойства корпуса (кабины).

7. ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ОПРЕДЕЛЕНИЕ ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТИ

В отличие от испытаний на помехоэмиссию, основной особенностью испытаний на помехоустойчивость является воздействие электромагнитных помех на испытуемое оборудование, создаваемых испытательным оборудованием (генераторами помех), и контроль его характеристик с целью обнаружения нарушений функционирования.

7.1. Испытания: виды, степени жесткости и условия проведения

Испытания на помехоустойчивость проводят в следующих случаях:

- при сертификационных испытаниях импортируемых и серийных ТС;
- периодических и типовых испытаниях серийных ТС;
- при приемо-сдаточных испытаниях разрабатываемых ТС.

В связи с разнообразием объектов и различием условий их эксплуатации невозможно указать точные правила выбора видов испытаний. Рекомендации по выбору видов испытаний приведены в ГОСТ 29280–92 применительно к ТС:

- подключаемым к электрическим сетям общего назначения для бытового или коммерческого применения, когда требования к помехоустойчивости невысоки;
- для применения производителями энергии, при этом в связи с их особыми функциями и длительным периодом эксплуатации без обслуживания могут иметь место более высокие требования к помехоустойчивости;
- подключаемым к промышленным сетям с высоким ожидаемым уровнем ожидаемых помех;
- устанавливаемым на электростанциях и подстанциях среднего и высокого напряжения, где из-за коммутаций силового оборудования и коротких замыканий может иметь место чрезвычайно высокий уровень помех.

Отдельно должны рассматриваться и характеризоваться соответствующим выбором вида испытаний и степени жесткости хорошо защищенные помещения для информационного оборудования (например, комнаты для ЭВМ, пункты управления и т. д.) и для медицинского оборудования.

Виды испытаний ТС

Испытания на устойчивость к кондуктивным низкочастотным помехам в низковольтных силовых электрических сетях:

- гармоникам;
- интергармоникам;
- сигналам систем управления и сигнализации;
- провалам напряжения и кратковременным перерывам питания;
- несимметрии напряжений;
- изменениям частоты питания;
- составляющим постоянного тока в электрических сетях переменного тока.

Испытания на устойчивость к кондуктивным переходным и высокочастотным помехам:

- импульсам напряжения длительностью 100/1300 мкс;
- микросекундным импульсным помехам большой энергии (импульсам напряжения/тока длительностью 1/50 мкс и 6,4/16 мкс, соответственно);
- наносекундным импульсным помехам (импульсам напряжения длительностью $n \cdot 50$ нс, где n – число импульсов);
- затухающим колебаниям (длительностью фронта 0,5 мкс и частотой 100 кГц);
- незатухающим или прерывистым индуцированным высокочастотным колебаниям (частотой 0,01...1 МГц);
- инжектированному току;
- импульсам напряжения длительностью 10/700 мкс.

Испытания на устойчивость к электростатическим помехам: электростатическим разрядам.

Испытания на устойчивость к магнитным помехам:

- магнитному полю с частотой питающей сети;
- импульсному магнитному полю;
- затухающему колебательному магнитному полю.

Испытания на устойчивость к радиочастотным электромагнитным помехам: радиочастотному электромагнитному полю.

Испытания на устойчивость цепей управления и линий передачи информации:

- к напряжению с частотой питающей сети;
- напряжению постоянного тока.

Виды испытаний устанавливаются в стандартах и/или ТУ на конкретные ТС с учетом приведенного перечня. Допускается применение

видов испытаний, регламентированных другими нормативно-техническими документами, и дополнительных испытаний, учитывающих совместное воздействие нескольких видов помех на ТС.

Выбор степени жесткости

Для большинства видов испытаний устанавливают несколько степеней жесткости. При выборе степени жесткости необходимо учитывать:

- электромагнитную обстановку, т. е. виды и уровни помех;
- требования потребителя к надежности ТС;
- экономические ограничения (выбор испытаний с высокой степенью жесткости может привести к снижению экономичности ТС).

Указанные факторы должны рассматриваться во взаимосвязи, так как по отдельности они могут оказывать противоположное влияние на выбор степени жесткости.

Рекомендуемые степени жесткости для различных видов испытаний приведены в приложении 5 ГОСТ 29280–92.

Условия проведения испытаний

- Испытания должны проводиться в нормальных климатических условиях, если иные требования не оговорены в стандартах или ТУ на ТС.
- При испытаниях ТС на устойчивость к помехам конкретного вида, другие помехи, которые могут действовать в месте испытаний, не должны оказывать влияния на качество функционирования ТС.
- При проведении испытаний ТС должно функционировать в режиме, установленном в технической документации и обеспечивающем наибольшую восприимчивость к воздействию помех.
- При испытаниях ТС на устойчивость к одновременному воздействию помех нескольких видов должно быть выбрано сочетание уровней воздействующих помех, приводящее к наибольшей восприимчивости.
- При проведении испытаний должна быть обеспечена безопасность персонала, проводящего испытания.

Оценка результатов испытаний

При испытаниях на помехоустойчивость применяют критерии качества функционирования ТС, указанные в табл. 7.1.

Критерии качества функционирования *A*, *B* или *C* при испытаниях ТС, а также порядок оценки результатов испытаний должны быть установлены в стандартах и (или) ТУ на ТС конкретного типа.

Таблица 7.1

Критерии качества функционирования технических средств

Критерии качества	Качество функционирования ТС при испытаниях
<i>A</i>	Нормальное функционирование с параметрами в соответствии с требованиями, установленными в технической документации на ТС
<i>B</i>	Временное ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции с последующим самовосстановлением нормального функционирования
<i>C</i>	Временное ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции, которые требуют вмешательства оператора или перезапуска системы
<i>D</i>	Ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения функций, которые не подлежат восстановлению из-за повреждения оборудования (компонентов), нарушения программного обеспечения или потери данных

7.2. Испытания оборудования (ТС) на устойчивость к кондуктивным переходным и высокочастотным помехам

7.2.1. Испытания на устойчивость к импульсам напряжения с волной 100/1300 мкс

На устойчивость к воздействию импульсов напряжения длительностью 100/1300 мкс могут испытываться ТС, подключаемые к электрическим сетям общего назначения, промышленным сетям и устанавливаемые на электростанциях. В случае, когда испытательное оборудование, вследствие значительной потребляемой мощности ТС, становится громоздким и дорогостоящим, целесообразно применять расчетные методы оценки помехоустойчивости ТС.

Цель испытаний: оценить соответствие ТС требованиям по устойчивости к воздействию импульсных помех, создаваемым при перегорании плавких предохранителей в низковольтных электрических сетях.

Импульсная помеха, возникающая при перегорании плавких предохранителей, может быть представлена однополярным импульсом длительностью 100/1300 мкс, наложенным на положительную или отрицательную полуволну напряжения сети электропитания (рис. 7.1).

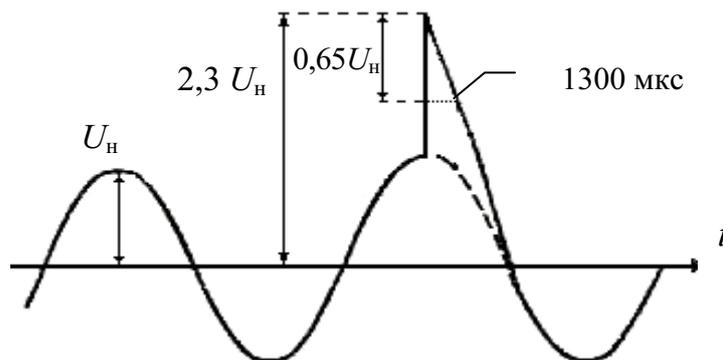


Рис. 7.1. Импульс напряжения для испытания устойчивости к перенапряжениям электронных устройств в цепи переменного тока

Степени жесткости испытаний. Амплитуду испытательного импульса принимают в 1,3 раза большей, чем напряжение сети электропитания. Например, для сети 230 В испытательное напряжение составляет 425 В, для сети 400 В – 735 В.

Особенности проведения испытаний. Испытания проводятся трижды для каждой полярности полуволны напряжения сети электропитания. Испытательный импульс подают при максимальном значении сетевого напряжения. Интервал времени между испытаниями должен быть достаточным для возвращения устройств защиты ТС в исходное состояние. Испытания проводят в лабораторных условиях.

7.2.2. Испытания на устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии (импульсами напряжения 1/50 мкс и тока 6,4/16 мкс)

Цель испытаний: оценить соответствие ТС требованиям по устойчивости к микросекундным импульсным помехам большой энергии, образуемым переходными процессами от разрядов молнии и некоторых видов коммутаций.

На устойчивость к воздействию микросекундных импульсных помех большой энергии могут испытываться ТС, подключаемые к электрическим сетям общего назначения, промышленным сетям и устанавливаемые на электростанциях.

Испытания проводят в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61000-4-5.

Испытательный импульс должен иметь характеристики:

- на ненагруженном выходе испытательного генератора (импульс напряжения): длительность импульса 1/50 мкс, форма импульса приведена на рис. 7.2, а;

- на короткозамкнутом выходе испытательного генератора (импульс тока): длительность импульса 6,4/16 мкс, форма импульса приведена на рис. 7.2, б.

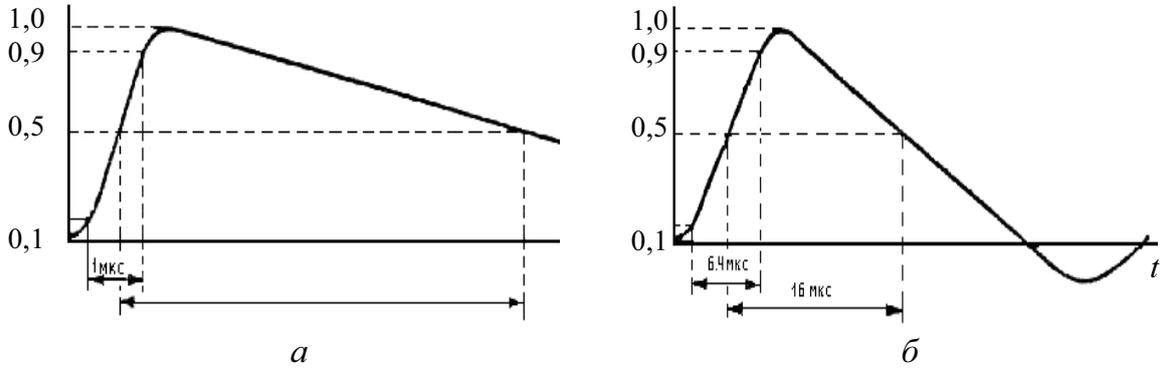


Рис. 7.2. Испытательный импульс напряжения (а) и тока (б)

Параметры схемы выбирают таким образом, чтобы генератор создавал импульс напряжения 1/50 мкс при холостом ходе и импульс тока 6,4/16 мкс на короткозамкнутом выходе и чтобы эффективное внутреннее сопротивление генератора равнялось 2 Ом (рис. 7.3).

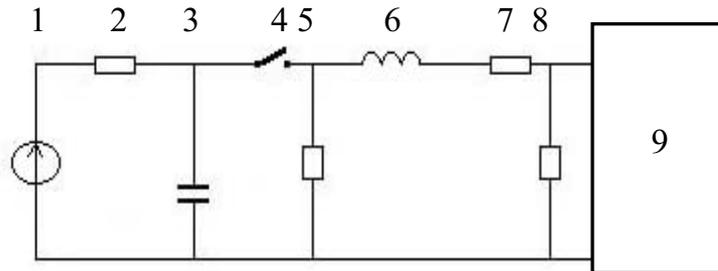


Рис. 7.3. Упрощенная схема испытательного генератора:

1 – источник высокого напряжения; 2, 3 – зарядный резистор и конденсатор; 4 – коммутирующий ключ; 5, 8 – резисторы цепи формирования длительности импульса; 6 – индуктивность цепи для формирования длительности фронта импульса; 7 – резистор, определяющий внутреннее сопротивление испытательного генератора; 9 – испытуемое ТС

Характеристики генератора должны быть следующими:

- амплитуда напряжения на выходе ненагруженного генератора: 0,5...4,0 кВ;
- полярность импульсов тока: положительная и отрицательная;
- сдвиг по фазе по отношению к переменному напряжению в сети электропитания, регулируемый в диапазоне 0...360°;
- период следования – не менее чем 1 раз в минуту.

Для увеличения эффективного внутреннего сопротивления генератора должно быть предусмотрено подключение добавочных резисторов 10 Ом и 40 Ом.

Испытательное оборудование содержит устройства связи-развязки для подачи испытательных импульсов на цепи электропитания, цепи ввода-вывода и исключения нежелательного воздействия испытательного генератора на другие ТС; также применяют устройства связи емкостного, индуктивного тока и с использованием разрядников. Степени жесткости испытаний приведены в табл. 7.2.

Таблица 7.2

Степени жесткости испытаний

Степень жесткости	Амплитуда импульса напряжения на ненагруженном выходе испытательного генератора, кВ, $\pm 10\%$
1	0,5
2	1,0
3	2,0
4	4,0
*	По согласованию между производителем и потребителем

Особенности проведения испытаний. Испытания проводят пять раз с каждой полярностью испытательного импульса в разном положении импульса по отношению к фазе сетевого напряжения. Время между испытательными импульсами должно быть достаточным для восстановления устройств защиты ТС.

7.2.3. Испытания на устойчивость к наносекундным импульсным помехам

Цель испытаний: оценить соответствие ТС требованиям по устойчивости к помехам в виде пачек наносекундных импульсов, возникающим в цепях электропитания и в цепях ввода-вывода в результате процессов коммутации.

На устойчивость к воздействию наносекундных импульсных помех могут испытываться ТС, подключаемые к электрическим сетям общего назначения, промышленным сетям и устанавливаемые на подстанциях. Испытания проводят (в соответствии с требованиями ГОСТ Р 51317.4.4–99) повторяющимися пачками испытательных импульсов (рис. 7.4, а) с характеристиками:

- длительность фронта импульса: 5 нс (допускаются отклонения $\pm 30\%$);
- длительность импульса: 50 нс ($\pm 30\%$);
- частота повторения: 5 кГц ($\pm 20\%$) или 2,5 кГц ($\pm 20\%$);
- длительность пачки: 15 мс ($\pm 20\%$);
- период следования пачек: 300 мс ($\pm 20\%$).

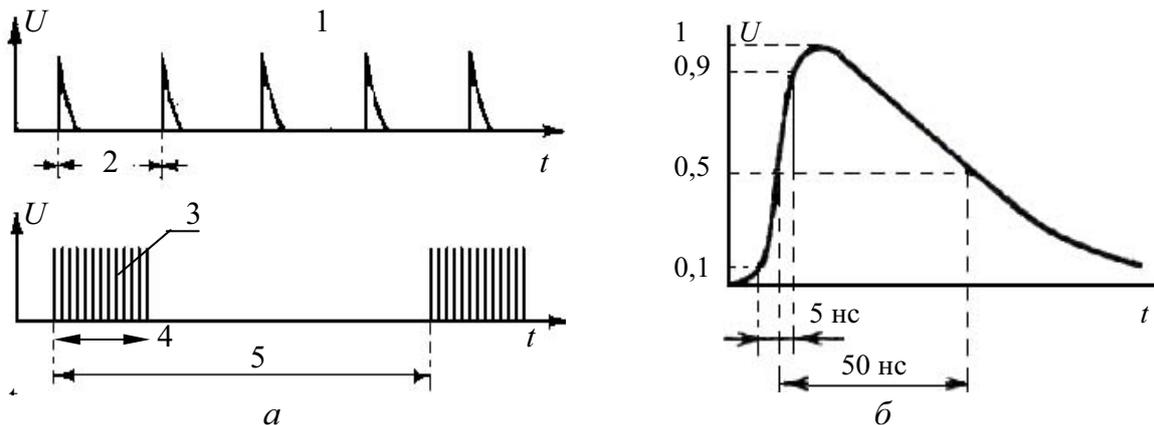


Рис. 7.4. Пачки испытательных наносекундных импульсов (а) и форма испытательного импульса на нагрузке 50 Ом (б):
 1 – импульс; 2 – период повторения импульсов; 3 – пачка импульсов;
 4 – длительность пачки импульсов (15 мс);
 5 – период повторения пачек импульсов (300 мс)

Выходное напряжение ненагруженного генератора (рис. 7.5) должно составлять от 0,25 кВ (–10 %) до 4 кВ (+10 %). Характеристики испытательного генератора при работе на нагрузку 50 Ом должны быть следующими:

- максимальная энергия импульса при напряжении 2 кВ: 4 мДж;
- полярность импульсов: положительная и отрицательная;
- вид выходного соединителя: коаксиальный;
- внутреннее сопротивление в диапазоне частот 1...100 МГц: 50 Ом ($\pm 30\%$).

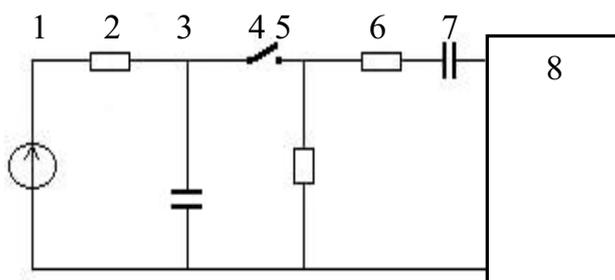


Рис. 7.5. Упрощенная схема испытательного генератора наносекундных импульсных помех:

- 1 – источник высокого напряжения; 2, 3 – зарядный резистор и конденсатор;
 4 – разрядник; 5 – резистор для формирования длительности импульса;
 6 – согласующий резистор; 7 – разделительный конденсатор; 8 – испытуемое ТС

Испытательное оборудование содержит устройство связи-развязки для цепей питания постоянного и переменного тока и емкостные клещи связи.

Степени жесткости испытаний приведены в табл. 7.3.

Таблица 7.3

Степени жесткости испытаний

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
*	По согласованию между потребителем и изготовителем	

7.2.4. Испытания на устойчивость к затухающим колебаниям

Цель испытаний: оценить соответствие ТС требованиям устойчивости к колебательным помехам, индуцированным в низковольтные сети электропитания в результате коротких замыканий и коммутационных процессов в электрических сетях высокого и среднего напряжения. Именно эти испытания наиболее близко имитируют помехи, генерируемые при коммутациях разъединителями холостых шин ОРУ. Поэтому на устойчивость к затухающим колебаниям испытываются все виды аппаратуры релейной защиты, автоматики и связи, устанавливаемые на электрических подстанциях, а также другие ТС, подключаемые к электрическим сетям общего назначения и промышленным сетям.

Испытания проводят в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61000-4-12 с применением испытательного напряжения, характеризующегося временем нарастания 0,5 мкс и последующими колебаниями частотой 100 кГц с таким декрементом затухания, при котором амплитудное значение каждого следующего колебания составляет 60 % амплитуды предыдущего (рис. 7.6, а).

Характеристики испытательного генератора должны составлять (рис. 7.6, б):

- выходное напряжение ненагруженного генератора: 0,25...4 кВ;
- внутреннее сопротивление генератора: 12 Ом или 30 Ом;
- полярность импульсов: положительная и отрицательная;
- сдвиг по фазе переменного напряжения в сети электропитания: 0...360°;
- частота повторения: 6 имп/мин.

Испытательное оборудование содержит также цепи развязки.

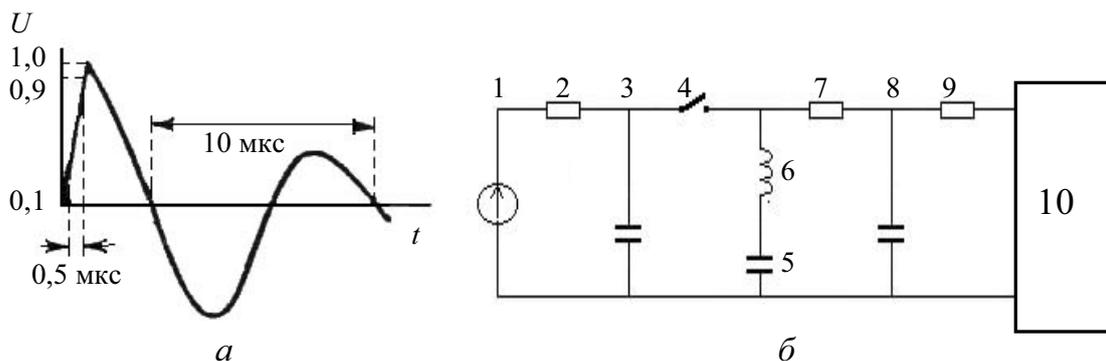


Рис. 7.6. Форма испытательного напряжения «звонящей волны» (а) и упрощенная схема испытательного генератора «звонящих волн» (б):
 1 – источник высокого напряжения; 2, 3 – зарядный резистор и зарядный конденсатор; 4 – индуктивность колебательной цепи; 5 – конденсатор колебательной цепи; 6 – согласующий резистор; 7, 9 – согласующие конденсаторы; 8 – резистор, определяющий внутреннее сопротивление испытательного генератора; 10 – испытуемое ТС

Степени жесткости испытаний приведены в табл. 7.4.

Таблица 7.4

Степени жесткости испытаний

Степень жесткости	Напряжение общего вида, кВ	Напряжение дифференциального вида, кВ
1	0,5	0,25
2	1	0,5
3	2	1
4	4	2
*	По согласованию между потребителем и производителем	

7.2.5. Испытания на устойчивость к незатухающим или прерывистым индуцированным высокочастотным колебаниям (частотой 0,01 и 1 МГц)

Цель испытаний: оценить устойчивость ТС к высокочастотным незатухающим или прерывистым помехам в диапазоне частот 0,01...1 МГц, индуцируемым в низковольтных сетях питания, управления и передачи данных в результате коммутационных процессов в электросетях высокого и среднего напряжения. Этим испытаниям подвергаются ТС, монтируемые на ПС и подключаемые к электрическим сетям промышленных предприятий.

Испытательное напряжение представляет собой последовательность синусоидальных колебаний с частотой, пилообразно изменяющейся в диапазоне 0,01...1 МГц, со скоростью 0,1 декада/с и с интервалом между колебаниями 20 мс. Испытательное напряжение подают на цепи ввода-вывода ТС.

Характеристики испытательного генератора должны составлять: выходное напряжение ненагруженного генератора – не более 100 В; внутреннее сопротивление генератора – 200 Ом; выходной ток генератора – не более 0,25 А.

Степени жесткости испытаний приведены в табл. 7.5.

Таблица 7.5

Степени жесткости испытаний

Степень жесткости	Испытательное напряжение, кВ
1	10
2	20
3	50
4	100
*	По согласованию с потребителем и производителем

7.3. Испытания оборудования (ТС) на устойчивость к электростатическим помехам

Цель испытаний: оценить соответствие ТС требованиям по устойчивости к воздействию электростатических разрядов, возникающих при прикосновении к ТС операторов и между объектами, находящимися вблизи ТС.

На устойчивость к воздействию электростатических разрядов могут испытываться ТС всех типов, подключаемые к электрическим сетям общего назначения, промышленным сетям, устанавливаемые на электростанциях и подстанциях.

Испытания проводят в соответствии с требованиями МЭК 61000-4-2. Испытательное воздействие представляет собой импульс тока с регламентированными параметрами, возникающий между испытательным генератором и испытуемым ТС при их контакте (контактный разряд) или сближении (воздушный разряд) (рис. 7.7).

Основным методом испытания является метод контактного разряда, поскольку он дает более стабильные параметры воздействия. Методом воздушного разряда пользуются в случаях, когда невозможно применить контактный разряд. Характеристики испытательного генератора электростатических разрядов (рис. 7.8) должны быть следующими:

- общая емкость генератора: 150 пФ ($\pm 10\%$);
- разрядное сопротивление: 330 Ом ($\pm 5\%$);
- испытательное напряжение: при контактном разряде – не более 8 кВ; при воздушном разряде – не более 15 кВ;
- полярность выходного напряжения: положительная и отрицательная;
- вид разряда: одиночные разряды (время между разрядами не менее 1 с).

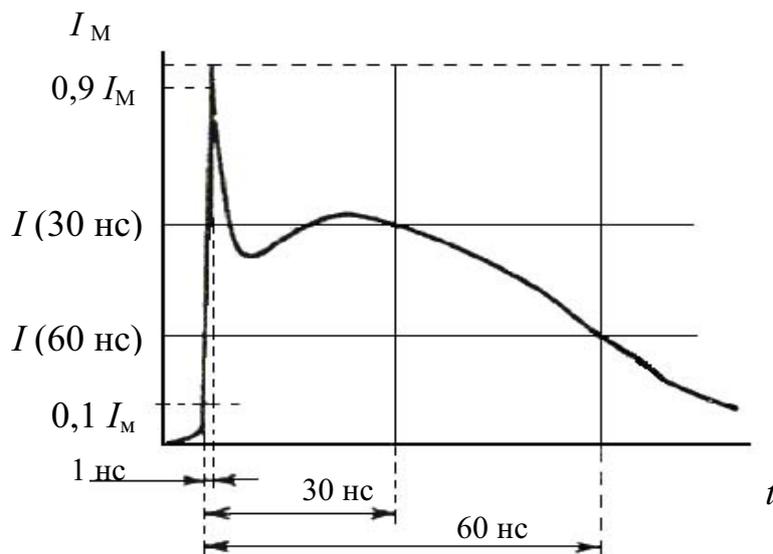


Рис. 7.7. Форма импульса разрядного тока испытательного генератора электростатических разрядов

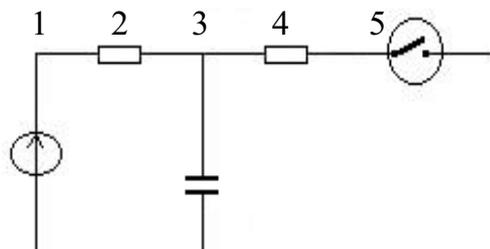


Рис. 7.8. Упрощенная схема испытательного генератора электростатических разрядов:

1 – источник высокого напряжения; 2 – зарядный резистор;
3 – зарядный конденсатор 150 пФ; 4 – разрядный резистор 330 Ом;
5 – разрядный ключ

Степени жесткости испытаний приведены в табл. 7.6.

Таблица 7.6

Степени жесткости испытаний

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

Особенности проведения испытаний. Разряды производят только на те точки и поверхности ИТС, которые доступны персоналу при эксплуатации ИТС (включая кабели электропитания и ввода-вывода). Раз-

ряды, возникающие между объектами, находящимися вблизи ИТС, имитируют контактными разрядами на плоскости связи.

7.4. Испытания оборудования (ТС) на устойчивость к магнитным помехам

7.4.1. Испытания на устойчивость к воздействию магнитного поля с частотой сети

Цель испытаний: оценить соответствие ТС требованиям по устойчивости к магнитному полю, вызванному протеканием токов сетевой частоты в близко расположенных проводниках. На устойчивость к воздействию магнитного поля с частотой сети могут испытываться ТС бытового и промышленного назначения, а также ТС, устанавливаемые на подстанциях среднего и высокого напряжения.

Испытания проводят в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61000-4-8. Испытательное магнитное поле должно иметь установленную величину напряженности, быть свободным от гармоник и однородным при отсутствии испытуемого ТС. Испытательное оборудование состоит из индукционной катушки, источника тока и вспомогательных измерительных приборов.

Используют три типа измерительных катушек:

- одиночную индукционную катушку квадратной формы (рис. 7.9) со стороной стандартной длины, равной 1 м, для испытаний ТС малых размеров;
- катушку Гельмгольца квадратной формы со стандартным размером сторон $a = 1$ м и расстоянием между сторонами $b = 0,6$ м (рис. 7.10, а) для испытаний ТС малых размеров, но с большим, по сравнению с одиночной катушкой, испытательным объемом;
- усложненную одиночную индукционную катушку для испытания ТС больших размеров (рис. 7.10, б).

Индукционная катушка может быть сконструирована в соответствии с размерами испытуемого ТС. Напряженность испытательного магнитного поля в рабочем объеме не должна отличаться от номинального значения более чем на 3 дБ.

Источник тока должен обеспечивать испытания ТС на устойчивость к магнитному полю постоянной напряженности и к кратковременному (длительностью 1...3 с) магнитному полю большой интенсивности. Источник тока подключают к той же сети электропитания, что и испытуемое ТС.

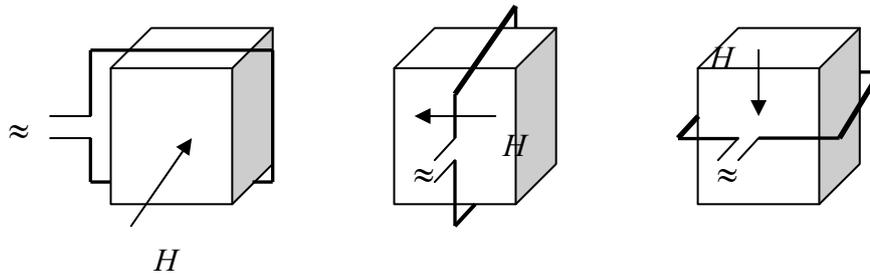


Рис. 7.9. Размещение катушки относительно испытуемого ТС

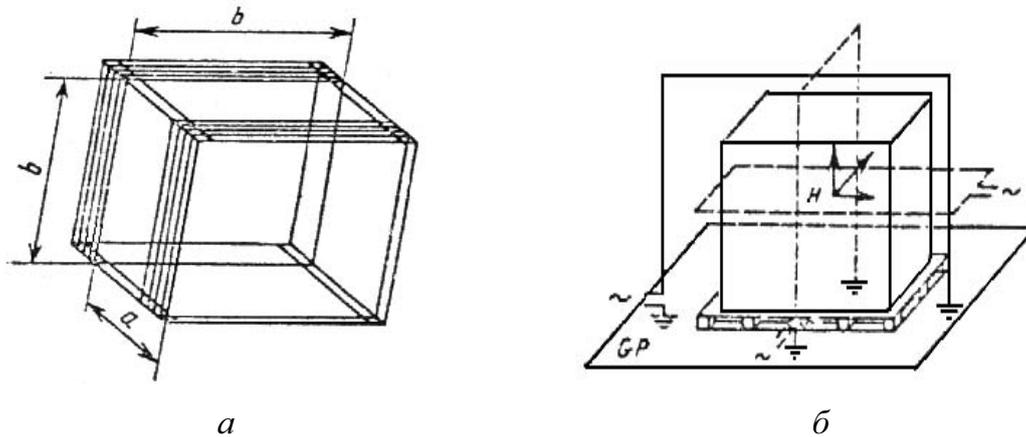


Рис. 7.10. Катушка Гельмгольца (а) и индукционная катушка (б) для испытаний ТС значительного размера

Индукционная катушка может быть сконструирована в соответствии с размерами испытуемого ТС. Напряженность испытательного магнитного поля в рабочем объеме не должна отличаться от номинального значения более чем на 3 дБ.

Источник тока должен обеспечивать испытания ТС на устойчивость к магнитному полю постоянной напряженности и к кратковременному (длительностью 1...3 с) магнитному полю большой интенсивности. Источник тока подключают к той же сети электропитания, что и испытуемое ТС.

Степени жесткости испытаний приведены в табл. 7.7.

Таблица 7.7

Степени жесткости испытаний

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

7.4.2. Испытания на устойчивость к воздействию затухающего колебательного магнитного поля

Цель испытаний: оценить соответствие ТС требованиям по устойчивости к затухающим колебательным магнитным полям, возникающим в результате процессов коммутации в электрических сетях высокого напряжения. Степени жесткости испытаний приведены в табл. 7.8.

Таблица 7.8

Степени жесткости испытаний

Степени жесткости	Максимальная напряженность магнитного поля, А/м
1	–
2	–
3	10
4	30
5	100
*	По согласованию с производителем

При испытаниях, в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61000-4-10, применяют магнитное поле, создаваемое в индукционной катушке при протекании тока частотой 0,1 или 1 МГц при частоте повторения 40 или 400 Гц. Декремент колебаний должен быть такой, чтобы пиковое значение уменьшилось на 50 % между третьим и шестым периодами. Применяют те же индукционные катушки. Длительность испытания должна составлять 1 с.

7.4.3. Испытания на устойчивость к воздействию импульсного магнитного поля

Цель испытаний – оценить соответствие ТС требованиям по устойчивости к магнитным полям, возникающим в результате прямых или близких разрядов молнии и коротких замыканий в сетях электропитания.

На устойчивость к воздействию импульсного магнитного поля сети могут испытываться ТС, устанавливаемые на электростанциях и подстанциях.

При испытаниях, в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61000-4-9, применяют магнитное поле, создаваемое в индукционной катушке при протекании импульса тока стандартной волны 8/20 мкс. Испытуемые ТС помещают в поле индукционных катушек, характеристики которых приведены на рис. 7.9 и 7.10.

ТС испытывают воздействием пяти импульсов каждой полярности в каждом ортогональном направлении при частоте повторения не более 1 импульса в 10 секунд.

Степени жесткости испытаний приведены в табл. 7.9.

Таблица 7.9

Степени жесткости испытаний

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

7.5. Испытания оборудования на устойчивость к радиочастотным электромагнитным помехам

Цель испытаний: оценить соответствие ТС требованиям устойчивости к излучаемым радиочастотным электромагнитным полям, создаваемым переносными приемопередатчиками, стационарными радио- и телевизионными передатчиками, различными промышленными источниками электромагнитных излучений, научной и медицинской аппаратурой.

На устойчивость к воздействию излучаемых радиочастотных электромагнитных полей могут испытываться все типы ТС, подключаемые к электрическим сетям общего назначения, промышленным сетям и устанавливаемые на электростанциях и подстанциях.

Испытания проводят в соответствии с требованиями стандарта МЭК 61000-4-3. Излученное радиочастотное электромагнитное поле создается антенной в экранированной безэховой камере с использованием метода замещения (с предварительной калибровкой поля). Частота колебаний изменяется от 80 до 1000 МГц при скорости перестройки менее $1,5 \cdot 10^{-3}$ дек/с. Время воздействия испытательного поля на каждой частоте должно быть не менее времени, необходимого для проверки качества функционирования испытуемого оборудования. Необходимо проведение восьми (двенадцати) испытаний, в том числе по одному для каждой поляризации испытательного поля при воздействии поля на каждую из четырех сторон оборудования (если испытуемое оборудование эксплуатируют в вертикальном и горизонтальном положениях, испытания проводят при облучении всех его сторон). Допускается использование альтернативного метода испытаний, основанного на применении полосковой линии или *ТЕМ*-камеры (табл. 7.10). При этом должны быть удовлетворены требования к неоднородности поля и к расположению испытательного оборудования и соединительных кабелей, установленные в стандарте.

Таблица 7.10

Основные характеристики TEM- и GTEM-камер

Тип камеры	K15	K30	K45	K90	GTEM
Диапазон частот, МГц	500	300	200	100	1 000
Волновое сопротивление, Ом	50				
Коэффициент стоячей волны не более	1,2				1,4
Напряженность электрического поля, В/м	36 000	18 000	12 000	6 000	0...50
Размеры, см	30×30×60	60×60×120	90×90×180	180×180×360	700×350×250
Максимальные размеры испытуемого средства (при неоднородности поля ± 2 дБ), см	10×10×5	20×20×10	30×30×15	60×60×30	100×100×50

TEM-камера Крауфорда представляет собой отрезок квадратной коаксиальной линии с волновым сопротивлением 50 Ом большого сечения с плоским внутренним проводником. С обоих концов камеры имеются пирамидальные сужения и переходы на стандартные коаксиальные разъемы.

GTEM-камера представляет собой четырехгранную пирамиду, лежащую на боковой грани. В поперечном сечении это прямоугольная коаксиальная линия с центральным проводником специального профиля. На узком конце линия плавно переходит к входному коаксиальному разъёму. Нагрузкой линии является комбинация поглощающего материала и резисторов.

Степени жесткости испытаний приведены в табл. 7.11.

Таблица 7.11

Степени жесткости испытаний

Степень жесткости	Напряженность электромагнитного поля, В/м
1	1
2	3
3	10
4	По согласованию с потребителем

8. ПРОБЛЕМЫ ЭМС В ЛАБОРАТОРИЯХ ВЫСОКОГО НАПРЯЖЕНИЯ И В ЭЛЕКТРОФИЗИЧЕСКИХ УСТАНОВКАХ

При исследованиях в лабораториях высокого напряжения всегда ставится задача измерения быстроменяющихся высоких напряжений и токов с амплитудами порядка сотен киловольт или килоампер и временем нарастания в микро- или даже наносекундном диапазоне. При вводе в эксплуатацию требуемых для этого измерительных устройств, состоящих из делителя напряжения или шунта для импульсных токов, соединительного кабеля и электронного осциллографа, можно получить на экране картину, аналогичную изображенной на рис. 8.1. В подавляющем большинстве случаев, в особенности при использовании электронных осциллографов в блочном исполнении, эта картина не соответствует фактическому временному ходу регистрируемого процесса. На подлинный измерительный сигнал $u_u(t)$ наложены напряжения помех, которые достигают отклоняющей системы различными путями. В сомнительном случае можно путем контрольных измерений легко выяснить, действительно ли высокочастотные колебания на осциллограмме свойственны измеряемому сигналу или являются напряжениями помех.

Причины появления помех заключаются в повышении потенциалов и наличии связанных с быстроменяющимися напряжениями и токами электромагнитных полей, особенно изменений полей рассеяния, возникающих при заряде или разряде паразитных емкостей.

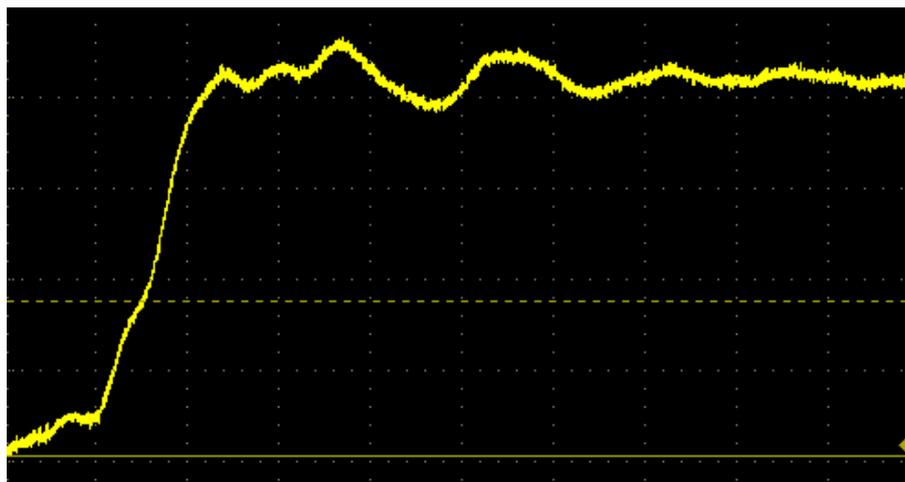


Рис. 8.1. Осциллограмма напряжения при разряде генератора импульсов 400 кВ на активную нагрузку ($dU = 100$ кВ/дел, $dt = 0,1$ мкс/дел)

Для получения искажений, показанных на рис. 8.1, имеются четыре возможности:

1. Электромагнитные поля проникают через экранирующий корпус электронного осциллографа и вызывают напряжение помех прямо в канале горизонтального отклонения. Это может быть устранено, если установить осциллограф в экранированной измерительной кабине. В зависимости от напряженности поля и частоты часто бывает достаточно открытого с одной стороны ящика из листового материала. Влияние напряженности полей помех уменьшается, если увеличить расстояние между осциллографом и исследуемым контуром.

2. Квазистатические магнитные и электрические поля проникают через несовершенный экран измерительного кабеля. Электрические поля при малой плотности плетеной оболочки кабеля достигают внутреннего провода и индуктируют непосредственно на нем напряжение помехи. Мерой ослабления поля является проводимость связи. Магнитные поля создают на обеих сторонах внутреннего провода два противофазных напряжения, которые взаимно компенсируются. Из-за всегда имеющегося небольшого эксцентриситета внутреннего провода остается некоторое результирующее напряжение. Однако этими помехами можно пренебречь по сравнению с напряжением помех, вызываемым токами в оболочках кабелей.

3. Электронный осциллограф воспринимает помеху, передающуюся по проводам ($f < 30$ МГц), через систему электропитания. Это может быть устранено фильтром. Чтобы достичь широкополосной связи высокого качества, фильтры обычно экранируются. Иногда достаточно навить сетевой кабель на ферритовый сердечник или надеть на него гибкий проводящий шланг, который наглухо соединяется с экранирующей стенкой или корпусом осциллографа.

4. Токи в оболочке кабеля, текущие по корпусу, обусловленные разностями потенциалов в цепях заземления, вызывают падение напряжения, которое через полное сопротивление связи создает помехи.

Далее объясняется природа напряжений, вызывающих возникновение токов в оболочках кабелей, и формулируются соответствующие защитные меры.

Падение напряжения вдоль провода защитного заземления

Для обеспечения техники безопасности корпуса электрических приборов обычно соединены с нулевым проводом многофазной системы или специальным проводом защитного заземления. Через эти провода протекают токи утечки всех прочих работающих от той же сети потребителей, а через нулевой провод – дополнительно еще часть рабочих токов этих приборов. Благодаря гальваническим соединениям между обоими проводами,

провод защитного заземления тоже может проводить часть рабочих токов. Эти токи вызывают на проводах защитного заземления падение напряжения, так что между заземленными контактами разных штепсельных розеток, а также между разными зажимами заземления одного распределительного щита могут существовать значительные напряжения.

Если несколько электронных приборов питаются от разных источников, то вместе с оболочками коаксиальных сигнальных кабелей возникают замкнутые контуры. Через эти контуры текут уравнивающие токи, которые накладывают на полезные сигналы напряжение помехи с основной частотой 50 Гц. Чтобы избежать этого, контуры заземления разрываются так, чтобы только один прибор эксплуатировался с защитным заземлением. При этом безопасность при эксплуатации экспериментальной установки не нарушается, так как между одним заземленным прибором и приборами, не заземленными через провод защитного заземления, существует гальваническая связь через кабельные оболочки сигнальных проводов. Несмотря на это рекомендуется применение дополнительных защитных мер, таких как защитное разделение, местное изолирование и т. д.

Тот же самый эффект возникает и при измерении быстроизменяющихся высоких напряжений, если цепь высокого напряжения заземлена глухо, а электронный осциллограф – через провод защитного заземления. В то время как помехи частотой 50 Гц сразу устраняются, если осциллограф эксплуатируется без провода защитного заземления, высокочастотные и импульсные помехи существуют и после отключения проводов заземления, так как осциллограф и другие приборы для высоких частот по-прежнему соединены с землей через свои паразитные емкости.

Индуктированные напряжения. Квазистатические магнитные и электрические поля индуктируют в оболочке кабеля ($C_{\text{пар}}$ на рис. 8.2) или в контуре заземления (защитрихованная площадь на рис. 8.2) ЭДС, которые тоже вызывают токи в оболочке кабеля и корпусе прибора. Воздействие обоих полей уменьшается путем прокладки измерительных проводов в стальных трубах, концы которых заземлены. Стальная труба экранирует от электрических полей почти идеально, так как электрические силовые линии заканчиваются не на оболочке кабеля, а на заземленной трубе. При очень высоких частотах коэффициент экранирования электрических полей уменьшается, однако в большинстве случаев он имеет еще достаточно высокие значения. Экранирующее действие переменных магнитных полей основывается на том факте, что в контуре, образованном заземленной на обоих концах стальной трубой и землей, течет ток, магнитное поле которого частично компенсирует внешнее поле.

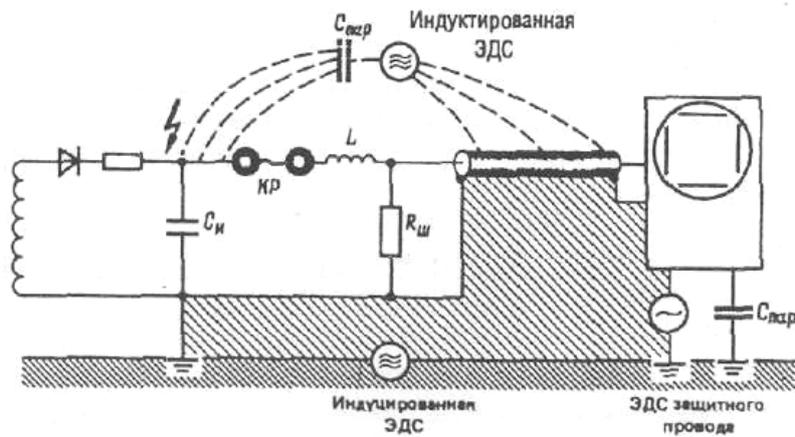


Рис. 8.2. Схематичное представление контура импульсного разряда: KP – коммутационный разрядник; $C_{пар}$ – емкость рассеяния; $C_{н}$ – конденсатор; $R_{ш}$ – шунт, L – индуктивность разрядного контура

Повышение потенциалов в контуре импульсного разряда. Повышение потенциалов в генераторе импульсов, наряду с индуктированными электродвижущими силами, является существенной причиной возникновения напряжений помех.

На рис. 8.3, а, б показан контур высокого напряжения, состоящий из генератора Γ и испытуемого образца O ; Z_3 – сопротивление заземления. От частей установки, находящихся под высоким потенциалом, исходят электрические силовые линии к окружающим предметам, находящимся под потенциалом земли. Этим силовым линиям соответствуют емкости рассеяния $C_{пар}$, которые при импульсных процессах за короткое время заряжаются или разряжаются. Из-за больших скоростей изменения напряжений токи заряда могут принимать очень большие значения. Эти токи через сопротивление заземления текут обратно к основанию генератора и создают даже при малых значениях заметное повышение потенциала, которое вызывает уравнительные токи во всей сети заземления. Если контур высокого напряжения находится внутри клетки Фарадея (рис. 8.3, б), то все линии поля рассеяния оканчиваются на экране. Зарядные токи текут по внутренней стороне стенки клетки и не могут вызвать повышения потенциала на Z_3 . Особые заземлители в этом случае излишни.

Рис. 8.4 поясняет возникновение повышений потенциала вдоль обратного провода, ведущего к основанию генератора импульсов. После зажигания искрового промежутка конденсатор разряжается через индуктивность L и шунт $R_{ш}$. У точки разветвления P (подключения ка-

белой оболочки сигнального кабеля) ток разряда делится. Преобладающая часть тока течет обратно к заземленной обкладке импульсного конденсатора. При этом он вызывает падение напряжения на сопротивлении обратного провода и тем самым повышает потенциал точки P . Повышение потенциала вызывает ток в оболочке кабеля. Чтобы его устранить, рекомендуется заземлять не основание генератора импульсов, а точку разветвления P , зажим шунта.

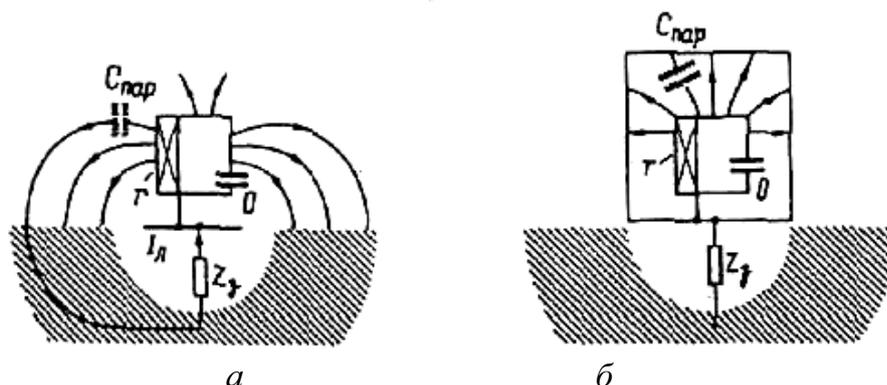


Рис. 8.3. Повышение потенциала земли в высоковольтном разрядном контуре:
 а – положение линий поля рассеяния экспериментальной установки;
 б – расположение линий поля, если устройство находится внутри клетки Фарадея;
 Г – генератор импульсных напряжений; О – объект; $C_{\text{пар}}$ – емкость рассеяния;
 $Z_{\text{з}}$ – сопротивление заземления; $I_{\text{л}}$ – ток заряда емкостей рассеяния

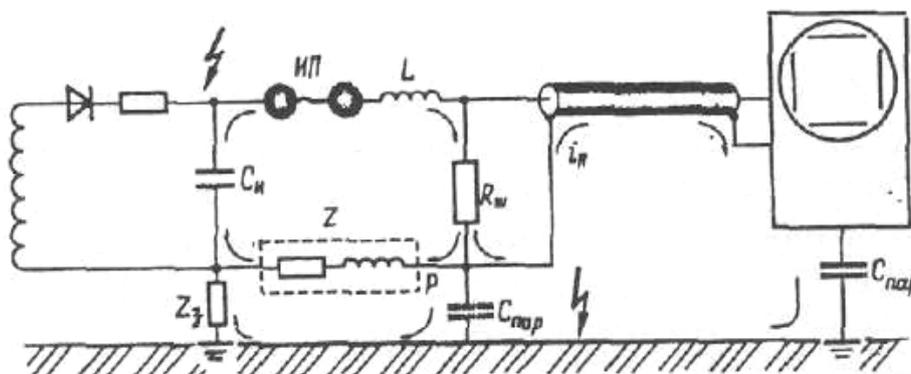


Рис. 8.4. Схема контура импульсного разряда с заземлением $C_{\text{н}}$

В этом случае точка P находится под потенциалом земли. Однако при этом повышается потенциал основания генератора. Из-за емкости рассеяния относительно земли рабочего контура повышение напряжения вызывает токи в оболочке кабеля (рис. 8.5).

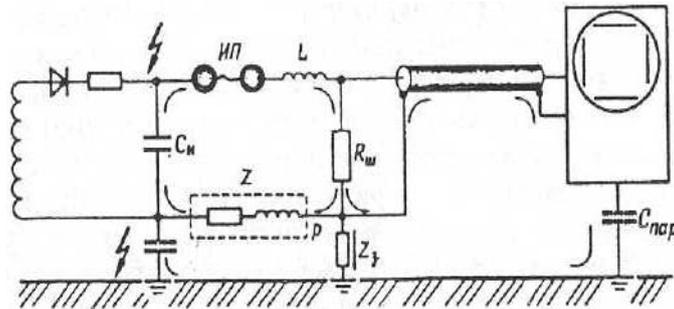


Рис. 8.5. Схема импульсного разряда с заземлением в точке P

Хотя, очевидно, существуют определенные оптимальные условия заземления, при которых напряжения источников и токи в оболочках кабелей и корпусах принимают сравнительно малые значения, совсем избежать их нельзя.

Следует рекомендовать прокладку измерительных проводов в стальных трубах, проложенных на полу или под полом лаборатории. Так как токи зарядки паразитных емкостей из-за поверхностного эффекта текут преимущественно по внутренней стороне экрана (ср. пояснение к рис. 8.3, б), измерительные линии остаются свободными от токов в оболочках кабелей.

Импульсные установки, предназначенные для испытаний изоляции электроэнергетического оборудования, имеют не только одну коаксиальную измерительную линию от делителя напряжения к электронному осциллографу, но большое количество проводов цепей управления и измерительных проводов между импульсной установкой и пультом управления, измерительными устройствами. В этом случае опасность случайного, непредусмотренного образования контуров заземления особенно велика (рис. 8.6).

На рис. 8.6, б показана структурная схема импульсной установки, не отвечающей нормам, в которой с уверенностью следует ожидать неконтролируемых повышений потенциалов и неудовлетворительных результатов измерений. На рис. 8.6, а, наоборот, показана структурная схема той же установки, отвечающая нормам. Все провода отходят от одной общей точки. Монтаж не содержит замкнутых контуров, а только ответвления.

Если внешняя ситуация столь неблагоприятна, что несмотря на все описанные меры подавления помех невозможно достичь безупречных результатов измерений, то всегда существует возможность полного гальванического разделения цепей рабочего тока и измерительного контура световодами и передачи сигнала оптоэлектрическим способом.

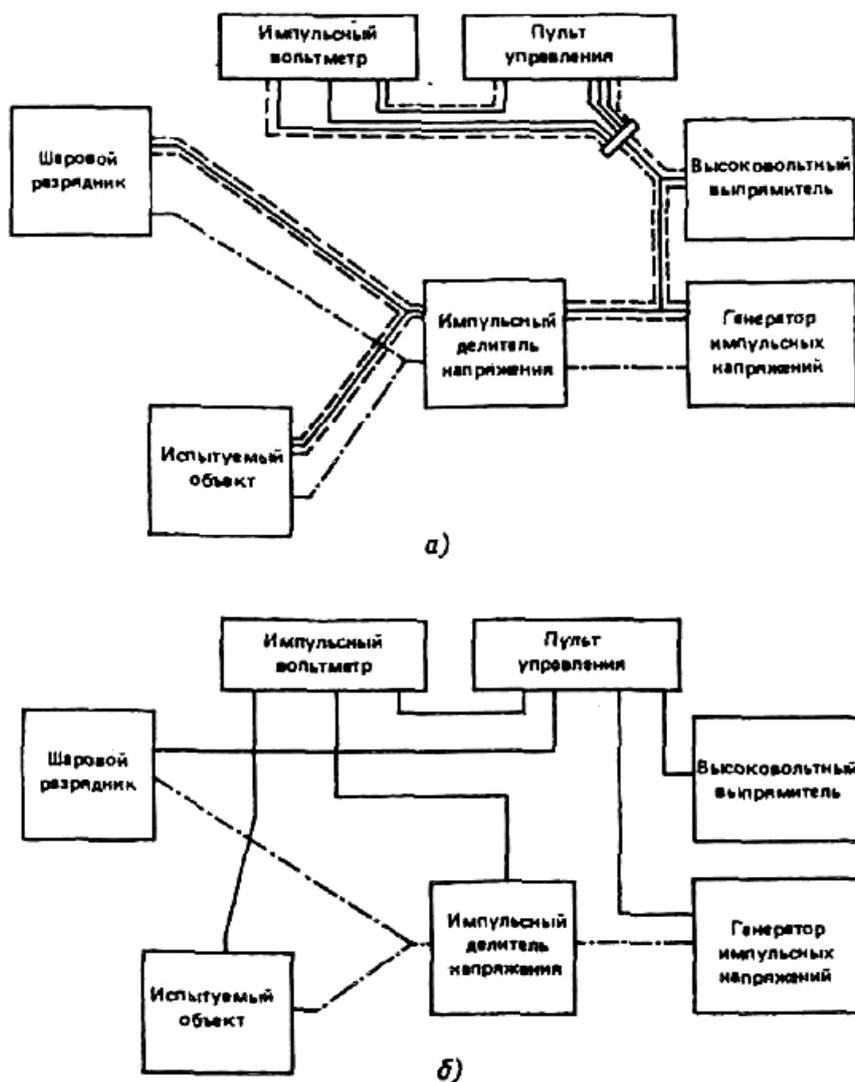


Рис. 8.6. Схема устройства для испытаний импульсным напряжением:
 а – рациональная прокладка проводов цепей управления и измерительных проводов;
 б – нерациональная прокладка цепей управления и измерительных проводов
 (образование контуров)

В заключение следует упомянуть, что испытательные лаборатории высокого напряжения, как правило, полностью экранированы и, вероятно, относятся к самым большим клеткам Фарадея в мире. Экранирование, с одной стороны, не пропускает связанные с испытаниями, при импульсных напряжениях, импульсные электромагнитные поля в окружающую среду, с другой стороны, допускает проведение высокочувствительных измерений частичных разрядов в изоляции электротехнических устройств без влияния помех радиопередатчиков, автомобилей и т. д.

9. СТАНДАРТИЗАЦИЯ В ОБЛАСТИ ЭМС

Вследствие повсеместного присутствия проблем ЭМС во всех областях электротехники и ее бесчисленных применений в других отраслях, в прошлом были изданы различные указания, касающиеся нормирования ЭМС. Это многообразие, наряду с общей сложностью тематики ЭМС, и современное стремление к европейской интеграции делают развитие законодательства по ЭМС особенно актуальным.

В соответствии с определениями, данными выше, критериями ЭМС являются: с одной стороны, не превышение определенного граничного значения излучения, а с другой – допущение определенного значения помех (помехоустойчивость). Это достигается целенаправленным применением помехоподавляющих средств или мероприятий. Нормы ЭМС разделяют на три или шесть классов:

1. Нормы излучения	1. Предельные значения излучения 2. Способы и средства измерения излучения
2. Нормы помехоустойчивости	3. Предельные значения помехи (жесткость испытаний) 4. Помехоустойчивость – способы и средства для проведения испытаний
3. Нормы для средств подавления помех	5. Средства подавления – их свойства 6. Средства подавления – способы и приборы, средства для проведения испытаний

Нормирование средств подавления помех относится к взаимоотношениям между поставщиком и потребителем и не регулируется законодательными актами.

Приведенная классификация на практике не может быть хорошо реализована вследствие специфических различий в граничных значениях для различных отраслей техники и окружающих условий, а также разных взглядов на развитие нормирования ЭМС. Поэтому в отдельных случаях практикуются иные подходы.

Над проблемой ЭМС долгое время не задумывались, пока не были зарегистрированы массовые сбои в банковских системах при воздействии помех. Это привело к появлению Директивы ЭМС №89/336/ЕЕС, которая обязала страны Европейского сообщества ввести единые стандарты по электромагнитной совместимости и разработать систему сертификации. В результате с 1996 года в Европе не допускается продажа технических средств без сертификации соответствия стандартам по электромагнитной совместимости.

В России до начала 2001 года обязательной сертификации по ЭМС подлежало электротехническое и электронное оборудование, включенное в соответствующий реестр. Теперь Россия приблизилась к Европе и ввела свою систему стандартов и сертификации. С введением новых стандартов практически вся электротехническая продукция попадает под обязательную сертификацию по ЭМС. Базовые стандарты на устойчивость к помехам соответствуют МЭК 61000-4. Стандарты на допустимые уровни создания помех основываются на стандартах СИСПР. С 1 января 2001 года в России введено 26 новых стандартов в области ЭМС, из них 19 введены впервые.

Комитеты по стандартизации в области ЭМС

Структура организаций, которые несут ответственность за подготовку стандартов в области ЭМС, показана на рис. 9.1.

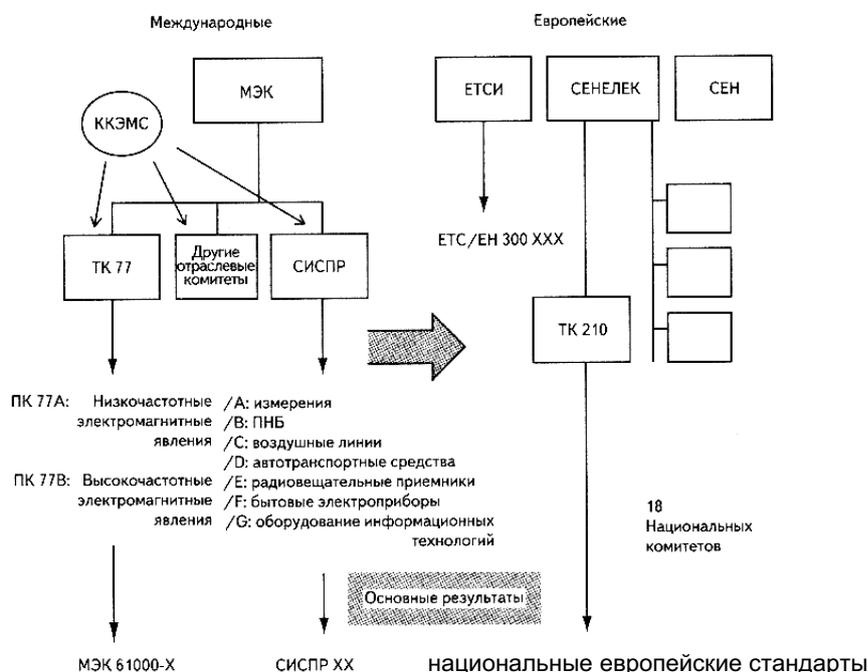


Рис. 9.1. Структура стандартов ЭМС

На международном уровне стандартизацией всей электротехники в широких границах, а также стандартизацией ЭМС занимается Международная электротехническая комиссия (МЭК). Два технических комитета МЭК полностью заняты работами, относящимися к ЭМС: ТК77 «Электромагнитная совместимость оборудования, включая электрические сети» (рис. 9.2), Международный специальный комитет по радиопомехам – СИСПР (табл. 9.1). Кроме того, еще около сорока комитетов частично решают вопросы ЭМС при проведении работ в области своей ответственности. Организация взаимодействия по вопросам ЭМС между многими техническими

комитетами МЭК возлагается на Консультативный комитет по ЭМС, который должен предпринимать меры, исключая разработку конфликтных стандартов. Стандарты МЭК сами по себе не имеют юридического статуса. Если национальный комитет не согласен с указанными стандартами, он не обязан применять их. Но, как правило, большинство стандартов МЭК переводится в категорию национальных стандартов (например, в Великобритании в категорию национальных переведено 85 % стандартов МЭК).

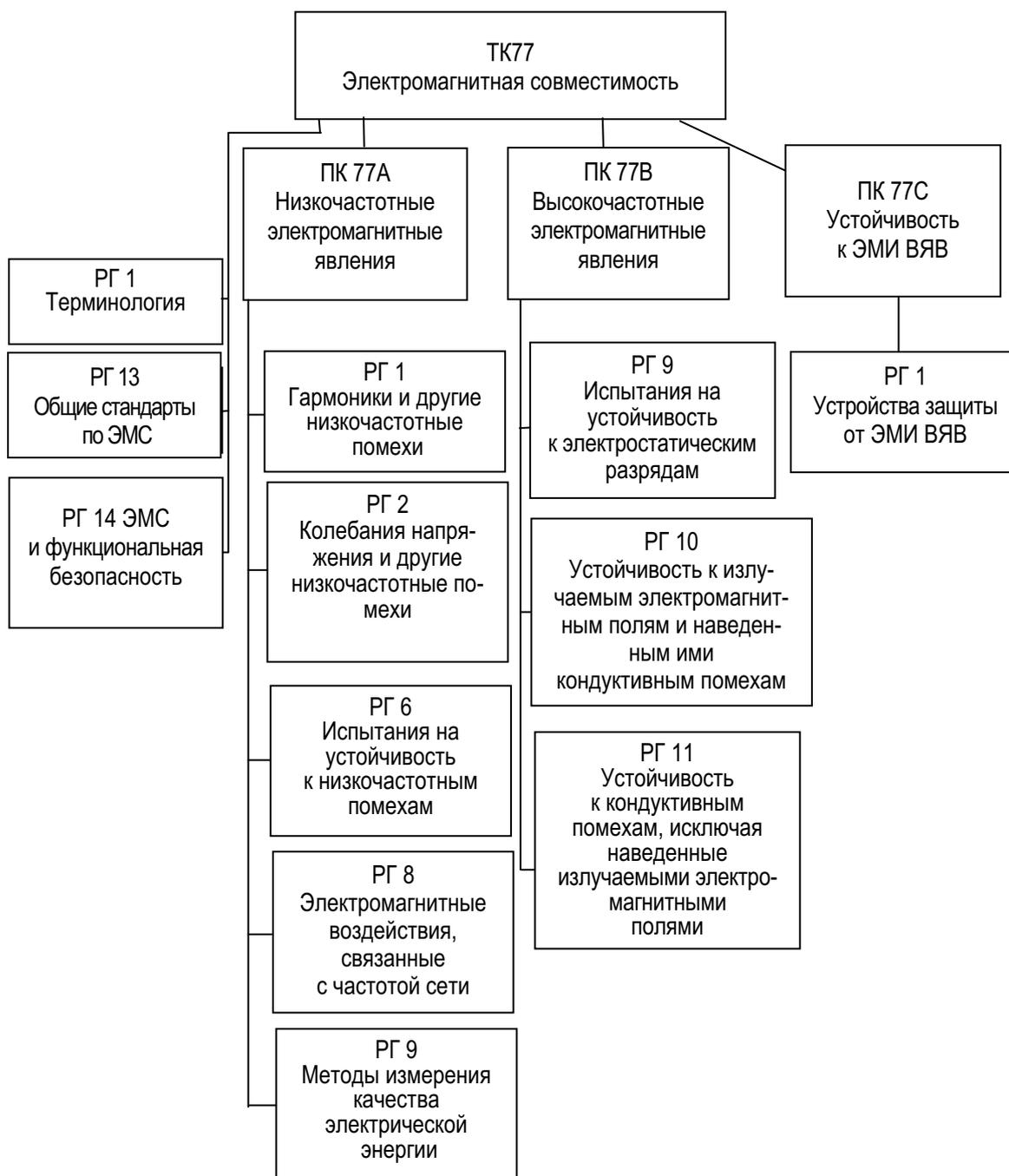


Рис. 9.2. Структура TK77

Результатом работы МЭК являются:

- стандарты и публикации МЭК;
- публикации и рекомендации СИСПР.

СЕНЕЛЕК (Европейский комитет по стандартизации в области электротехники) является ответственной европейской организацией в области стандартизации, которая уполномочена Европейской комиссией для проведения работ по подготовке европейских стандартов, обеспечивающих применение Директивы ЭМС. Внутри СЕНЕЛЕК вопросами ЭМС занимается Технический комитет 110, причем впервые этим комитетом также широко нормирована помехоустойчивость.

Таблица 9.1

Структура СИСПР

Подкомитет	Наименование / область применения	Главные публикации
СИСПР/А	Измерения радиопомех и статистические методы	СИСПР 16, СИСПР 17
СИСПР/В	Промышленные, научные и медицинские радиочастотные устройства	СИСПР 11, СИСПР 19 СИСПР 23, СИСПР 28
СИСПР/С	Воздушные линии электропередачи, высоковольтное оборудование и системы электрической тяги	СИСПР 18
СИСПР/Д	Автотранспортные средства и двигатели внутреннего сгорания	СИСПР 12, СИСПР 21 СИСПР 25
СИСПР/Е	Радиовещательные приемники	СИСПР 13, СИСПР 20
СИСПР/Ф	Бытовые электрические приборы, электрические инструменты, световое оборудование и аналогичные устройства	СИСПР 14, СИСПР 15
СИСПР/Г	Оборудование информационных технологий	СИСПР 22, СИСПР 24
СИСПР/Н	Нормы защиты для радиослужб	

По содержанию стандарты подразделяются на три класса.

1. Генеральные стандарты, включающие в себя минимальные требования к излучению помех и к помехоустойчивости, связанные с типом окружающей среды, например жилой район, промышленный район, специальные условия ЭМС.

2. Базовые стандарты, включающие описание физических основ измерительных и испытательных методов для доказательства ЭМС, а также требуемые граничные значения параметров. Они имеют большое значение для изготовителей испытательных устройств ЭМС.

3. Рабочие стандарты содержат детальные указания по созданию испытательного и измерительного оборудования, по направленности испытаний для определенной группы изделий.

Кроме СЕНЕЛЕК, разработкой стандартов занимаются ЕТСИ (Европейский институт телекоммуникационных стандартов) и СЕН (Европейская организация по стандартизации).

В каждой стране существуют национальные комитеты. В России это Государственный комитет по радиочастотам (ГКРЧ) и Региональные унитарные предприятия ГКРЧ, которые разрабатывают Государственные стандарты, нормы ГКРЧ, а также отраслевые стандарты (ОСТы) и руководящие технические материалы (РТМ) различных министерств и ведомств.

Начиная с 1992 г. новые европейские нормы, включенные в документы ЕЭС, стали обязательными. Существовавшие национальные нормы действовали в качестве альтернативных на переходный период до 31 мая 1995 года, однако без права присвоения знака *CE* (рис. 9.3).

С 1 января 1996 года в рамках ЕЭС при свободном товарообороте должны удовлетворяться требования новых европейских норм или согласованных с ними национальных норм.

От изготовителя требуется удостоверить, что требования по защите, установленные Директивой ЭМС, были выполнены. Для этого изготовитель наносит знак соответствия *CE* на аппараты или, если это невозможно, на упаковку, инструкцию по эксплуатации, гарантийный сертификат (в данном порядке очередности).

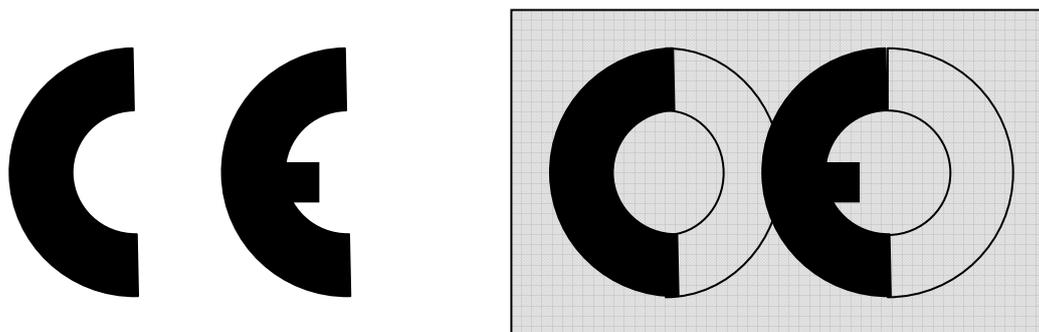


Рис. 9.3. Знак соответствия нормам по ЭМС и его вариант с элементами дизайна

Цель маркирования продукции знаком соответствия *CE* состоит в том, чтобы сделать возможным свободное движение оборудования, на которое нанесен этот знак в пределах Европейского сообщества. Никаких иных целей маркирование этим знаком не преследует.

Директивы, которые требуют маркирования продукции знаком соответствия *CE*, в большинстве допускают самодекларирование в ка-

честве способа применения требований этих директив. Это означает, что декларирование соответствия требованиям определенной директивы осуществляется изготовителем под его собственную ответственность. Надзор третьей стороны за оправданностью этих действий изготовителя отсутствует, за исключением крайне несовершенно и неочевидного механизма принуждения после выявления факта несоответствия продукции, существующего в каждом государстве – члене ЕС. Следовательно, *наличие знака соответствия CE не связано с подтверждением соответствия продукции третьей стороной*. Это полностью контрастирует со значением других знаков, обычно связанных с безопасностью продукции (таких как BSI Kitemark или UL, VDE и символы SEMKO/ NEMKO/ DEM-KO), которые гарантируют, что изделие однажды было подвергнуто независимым испытаниям в соответствующей испытательной лаборатории.

С юридической точки зрения наличие знака соответствия *CE* означает, что изготовитель надеется, что его продукция соответствует требованиям всех директив, которые распространяются на эту продукцию и которые должны в основном рассматриваться как содержащие минимальный состав требований, необходимый для обращения на европейском рынке. Таким образом, знак соответствия *CE* не является индикатором качества изделий и, что особенно важно для системных интеграторов, не позволяет утверждать, что некоторое изделие, маркированное знаком соответствия *CE*, будучи включено в состав системы или установки, автоматически обеспечит соответствие этой системы или установки требованиям конкретной директивы.

В России была попытка урегулировать проблему ЭМС на государственном уровне. Федеральный закон «О государственном регулировании в области обеспечения электромагнитной совместимости технических средств» принят Государственной думой 01.12.99 г., направлен Советом Федерации без рассмотрения на пленарном заседании Президенту РФ, отклонен Президентом РФ 30.12.99 г. (Пр №-1738).

Президент РФ отметил, что представленный Федеральный закон не имеет собственного предмета правового регулирования, так как большая часть отношений, затрагиваемых в нем, либо уже урегулирована нормами других отраслей законодательства Российской Федерации, либо в принципе не может быть предметом регулирования закона.

Так, в статье 1 Федерального закона предусматривается, что предметом его регулирования являются организационные основы деятельности органов государственной власти в области обеспечения электромагнитной совместимости технических средств. В соответствии с этой нормой в нем устанавливаются полномочия федеральных органов ис-

полнительной власти в указанной сфере (статья 9, пункт 4 статьи 11, пункты 2...4 статьи 12, пункт 2 статьи 13, пункт 2 статьи 15, пункт 2 статьи 16, пункт 1 статьи 18, пункты 2 и 3 статьи 21 Закона). Однако вопросы организации и деятельности федеральных органов исполнительной власти в соответствии со статьями 10, 11, 110 и 114 Конституции РФ и статьями 12 и 32 Федерального конституционного закона «О Правительстве Российской Федерации» отнесены к компетенции Правительства РФ.

Ряд вопросов, регулируемых положениями Закона (статьи 11, 12, 15, пункт 1 статьи 16, статьи 18 и 19), в той или иной степени уже решен Федеральными законами «О стандартизации», «О сертификации продукции и услуг», «О связи», «О поставках продукции для федеральных государственных нужд» и Законом РСФСР «О защите прав потребителей». Относительно проблем, действительно требующих законодательного регулирования, Президент РФ полагал, что решить их целесообразно путем внесения соответствующих изменений и дополнений в нормативные акты. К ним, в частности, относятся проблемы, касающиеся установления в государственных стандартах и иных нормативных документах по стандартизации требований обеспечения электромагнитной совместимости и осуществления обязательной сертификации технических средств на соответствие этим требованиям.

10. МЕНЕДЖМЕНТ В ОБЛАСТИ ЭМС СИСТЕМ

Электромагнитная совместимость не возникает сама по себе, независимо от того, имеем ли мы дело с аппаратом, системой или установкой. Как и в отношении любого другого аспекта процесса, обеспечение ЭМС должно быть результатом менеджмента. В настоящей главе рассматриваются основные инструменты, которые менеджер проекта должен использовать для того, чтобы вопросы ЭМС были соответствующим образом решены применительно ко всем элементам проектирования.

10.1. План обеспечения ЭМС

Порядок включения вопросов ЭМС в структуру программы разработки системы схематически изображен в табл.10.1. План обеспечения ЭМС должен быть тесно увязан с указанной программой разработки. На начальной стадии программы должны быть выработаны основные аспекты ЭМС, включая руководящие принципы конструирования. По мере выполнения программы разработки системы в план обеспечения ЭМС вносятся изменения и уточнения.

10.1.1. Контрольный совет ЭМС

Крайне важно, чтобы была определена структура менеджмента для решения задач ЭМС. Это достигается путем образования Контрольного совета (комитета) ЭМС, задачей которого является эффективное выполнение в назначенные сроки Плана обеспечения ЭМС. В типичном случае председателем Контрольного совета ЭМС является менеджер проекта организации, являющейся основным подрядчиком работ, или его заместитель по вопросам ЭМС. Деятельность Контрольного совета ЭМС должна быть, в значительной степени, связана с поставками оборудования, удовлетворяющего определенным требованиям, и поэтому Контрольный совет должен иметь полномочия для решения вопросов, связанных с поставками. Кроме этого, Контрольный совет ЭМС должен обладать определенными полномочиями в отношении процесса обсуждения проекта и иметь возможности и средства для того, чтобы вырабатывать и устанавливать различные требования в отношении ЭМС на уровне модулей и аппаратов и осуществлять необходимые испытания, с тем чтобы была обеспечена электромагнитная совместимость на уровне системы.

Таблица 10.1

Включение вопросов ЭМС в программу разработки системы

Узловые точки программы	Вопросы ЭМС
Начало проекта: создание Контрольного совета ЭМС	Требования к функционированию системы в отношении ЭМС: требования ЭМС, относящиеся к интерфейсам системы; известные характеристики электромагнитной обстановки, создаваемой системой и внешними источниками
Обсуждение принятых требований	Определение системного уровня требований ЭМС: определение допустимых значений помехоэмиссии и помехоустойчивости на модульном уровне и требований к поставляемым элементам системы (выбор применяемых стандартов); определение требований электромагнитной совместимости системы с сетью электропитания
Предварительное обсуждение конструкции	Полная оценка электромагнитной обстановки, включая ожидаемые уровни излучаемых и кондуктивных помех. Определение структуры систем распределения энергии и заземления/изоляции
Представление на рассмотрение первого плана обеспечения ЭМС	Установление функциональных и конструктивных требований к кабелям и ответственности за осуществление соединений модулей и системы. Выбор способов кабельных соединений и экранирования. Предварительные испытания для определения уровней кондуктивных помех в линиях электропитания и обоснования необходимости дополнительной фильтрации. Идентификация источников и рецепторов электромагнитных помех, представляющих опасность в отношении обеспечения ЭМС
Критическое обсуждение конструкции	Рассмотрение предлагаемого плана испытаний. Уточнение требований к помехоэмиссии и помехоустойчивости на уровне модулей и оборудования. Выявление и решение вопросов ЭМС, имеющих особое значение
Испытания на соответствие требованиям ЭМС	Осуществление испытаний применительно к системе в целом для подтверждения соответствия системы требованиям ЭМС (при необходимости). Осуществление предпродажных испытаний на соответствие или испытаний на соответствие на месте установки

10.1.2. Идентификация вопросов ЭМС

В качестве хорошей исходной точки для разработки любого плана обеспечения ЭМС (табл. 10.2) следует рассматривать контрольный перечень вопросов ЭМС. В приложении 2 приведен контрольный перечень вопросов, предлагаемый разными авторами для использования менеджерами ЭМС.

Содержание плана обеспечения ЭМС

	Содержание
Программа менеджмента в области ЭМС	Ответственность за поставляемые элементы системы, система отчетной документации, система контроля внесения изменений в конструкции. Планирование и оформление программы управления, включая ресурсы и процедуры обсуждения и взаимодействия
Функционирование и конструирование на уровне системы	Определение электромагнитной обстановки, для применения в которой предназначается система. Определение критических модулей и цепей. Вопросы конструирования систем и подсистем: контролируемая схема заземления, структурное уравнивание потенциалов, прокладка кабелей, экранирование и заделка экранов кабелей, контроль коррозии и т. д.
Функционирование и верификация на уровне подсистем	Установление функциональных характеристик ЭМС на уровне оборудования путем применения конкретных стандартов ЭМС или специально разработанных требований. Обобщение результатов испытаний в области ЭМС на уровне оборудования для анализа и определения эффектов допустимого ухудшения качества функционирования
Анализ условий обеспечения ЭМС	Оценка ожидаемой внутрисистемной ЭМС на основе известных характеристик ЭМС подсистем, а также предусмотренных планом мероприятий по решению проблем, связанных с ожидаемыми или существующими электромагнитными помехами
Верификация на системном уровне	План испытаний на системном уровне, включая обоснование выбора критических подсистем для демонстрации имеющегося запаса безопасности, критериев качества функционирования и рабочей конфигурации для проведения испытаний на соответствие на месте установки системы

Электромагнитная обстановка. Важнейшей начальной стадией обеспечения ЭМС при проектировании любой системы является оценка электромагнитной обстановки, в условиях которой будет функционировать система. Эта оценка необходима для выбора компонентов системы в отношении их устойчивости к различным электромагнитным помехам, требований помехоустойчивости и нормы помехоэмиссии, а также допустимой степени ухудшения качества функционирования каждого компонента в отношении электромагнитных помех различных видов. Комплект общих стандартов ЭМС и стандартов ЭМС, распро-

страняющихся на группы однородной продукции, характеризует в определенной степени указанную электромагнитную обстановку, но только в исключительно общих терминах. Для согласования с любым конкретным проектом необходим более детальный анализ электромагнитной обстановки.

В некоторых случаях требования могут быть менее жесткими в сравнении с требованиями, установленными в общих или продуктовых стандартах, в других случаях они могут быть более жесткими.

Интерфейсы системы. Компоненты системы взаимодействуют друг с другом и с объектами, внешними по отношению к системе, и должны проявлять свойства электромагнитной совместимости как в первом, так и во втором случае. Так как электромагнитные помехи воздействуют через интерфейсы, идентификация указанных интерфейсов и перечисление видов электромагнитных помех, которые могут воздействовать на каждый из них, является необходимым этапом в установлении уровней электромагнитной совместимости и видов необходимых испытаний.

Помехоэмиссия и помехоустойчивость на уровне модулей. Если на основе характеристик электромагнитной обстановки определены требования ЭМС, относящиеся к интерфейсам, то могут быть перечислены требования электромагнитной совместимости для каждого модуля, и следовательно могут быть установлены требования по проведению испытаний на соответствие для каждого модуля. Эти требования могут быть разделены на требования по контролю помехоэмиссии и по контролю устойчивости к помехам.

Имея в виду, что контроль радиочастотной помехоэмиссии осуществляется с целью защиты радиоприемных устройств от радиопомех, в то время как контроль радиочастотной помехоустойчивости осуществляется с целью защиты аппаратов от излучений радиопередающих устройств, существует значительная разница между уровнями соответствующих требований к аппаратам (в одном случае – микровольты на метр, в другом случае – вольты на метр). Во многих случаях указанные требования удовлетворяются при соответствии аппаратов требованиям общих и продуктовых стандартов ЭМС, но в определенных случаях необходимы дополнительные или более жесткие требования. Такие случаи могут, например, иметь место, если известно об использовании в непосредственной близости к аппаратам подвижных радиопередатчиков или оборудования, создающего радиочастотные излучения (такого, как высоковольтное импульсное оборудование). Следует отметить, что

в большинстве гармонизированных стандартов в области помехоустойчивости подобные случаи специально исключены из рассмотрения.

Электромагнитная совместимость с сетью электропитания. Питающая электрическая сеть является основным интерфейсом для многих, если не для всех функциональных модулей системы, и поэтому электромагнитная совместимость в отношении электромагнитных помех, существующих в электрической сети, а также контроль создания таких помех являются необходимыми для всех модулей. Международный стандарт МЭК 61000-2-5 устанавливает ряд видов электромагнитных помех, воздействие которых осуществляется через питающую электрическую сеть. Многие из них относятся к низкочастотным кондуктивным помехам, ряд из которых (такие, как изменения в установленных пределах напряжения и частоты) могут рассматриваться скорее как функциональные требования, нежели как требования ЭМС. Подключенные силовые кабели действуют так же, как проводники для передачи высокочастотных помех, уровень которых достаточно трудно предсказать и для ослабления которых трудно предпринять что-либо, кроме установки фильтров в цепях питания модулей.

Основные характеристики помех в сети питания могут быть идентичными повсюду в системе. Однако, если сеть электропитания в пределах системы разбита на несколько сегментов и каждый сегмент имеет определенную степень фильтрации или подавления помех, создаваемых в других сегментах, то характеристики помех, передаваемых по сети электропитания, могут быть совершенно различными для разных сегментов.

Заземление, уравнивание потенциалов и изоляция. Важнейшим способом контроля ЭМС в любых системах является контролируемая схема эквипотенциального электрического соединения проводящих частей. В основном использование любой части механической структуры в качестве функционального пути электрического тока должно быть исключено. Все возвратные пути тока должны быть обеспечены собственными кабелями. Если функциональное соединение через металлическую конструкцию необходимо по конструктивным причинам, должен быть установлен путь тока через эту структуру и проведен анализ полного сопротивления для важнейших путей тока (в полосе используемых частот). Это возможно для некоторых замкнутых систем, таких, как летательные и космические аппараты, но, как правило, крайне затруднительно для распределенных систем в зданиях и на промышленных предприятиях.

Использование металлических структур для «помехового» заземления является часто необходимым (в противоположность функциональному заземлению). Это обстоятельство требует детального рассмотрения вопросов эквипотенциального электрического соединения

проводящих частей и контроля коррозии. Электрическое соединение необходимо для управления путями токов помех и для минимизации разностей потенциалов между элементами конструкции как в целях защиты от помех, так и в целях безопасности.

Вопросы кабельных соединений. Компоненты системы взаимодействуют друг с другом, и их взаимные связи осуществляются, как правило, с использованием электрических кабелей. Ранее вопросам влияния техники кабельных соединений на обеспечение ЭМС систем часто не уделялось должного внимания, однако эти вопросы должны занимать существенное место в Плане обеспечения ЭМС. Хорошая техника кабельных соединений может повысить барьер между системой и внешней электромагнитной обстановкой, в то время как плохая техника кабельных соединений может понизить его. Все аспекты техники кабельных соединений существенны в этом отношении: прокладка кабелей, разделение, установление классов сигналов, выбор сигналов в каждом пучке проводов, выбор проводников. Нельзя не упомянуть о выборе конструкции и заделке концов самого кабеля. На этом этапе следует принять решение об использовании экранированных или неэкранированных кабелей, учитывая, что характеристики каждого интерфейса были детализированы, как указывалось выше.

Первичное решение по технике прокладки кабелей может быть обусловлено и другими соображениями. Например, в здании может быть в наличии структурированная система кабелей, предназначенная для обеспечения функционирования систем здания, так что определение схем прокладки кабелей, их разделения и экранирования может не потребоваться. В этом случае необходимо вернуться к предыдущим пунктам Плана обеспечения ЭМС и рассмотреть вопрос об идентификации интерфейсов и видов воздействующих электромагнитных помех, основываясь на известных характеристиках структурированных кабелей.

10.1.3. Идентификация критических частей

Системы конструируются из взаимосвязанных модулей. В контексте настоящего раздела существует два аспекта критичности указанных модулей: функциональная критичность и критичность в отношении ЭМС. Указанные два аспекта отражают, соответственно, важность модуля для обеспечения нормального функционирования системы и его важность для обеспечения ЭМС системы.

Категории функциональной критичности могут быть установлены в соответствии с табл. 10.3. Эти категории определяют вес, который должен быть учтен вместе с устойчивостью каждого образца к электромагнитным помехам.

Таблица 10.3

Функциональная критичность модулей

Категория в отношении функционирования	Описание
Критичность в отношении безопасности	Результатом воздействия помех может быть опасность для жизни, собственности или системы
Критичность в отношении выполняемой функции	Результатом воздействия помех может быть повреждение или выход из строя системы, потеря некоторых функций или прекращение функционирования или такое нарушение функционирования, которое в неприемлемой степени снижает эффективность работы
Отсутствие критичности	Результатом воздействия помех может быть лишь неудобство, раздражение, или некоторый дискомфорт пользователя, или временное и приемлемое ухудшение качества функционирования

Критичность в отношении ЭМС (табл. 10.4) показывает, следует ли применительно к данному модулю рассматривать вопросы ЭМС, и если следует, то в какой степени. Частично это есть мера «электромагнитной мягкости» модуля. Существуют, однако, некоторые модули, не являющиеся элементами «активными в электромагнитном отношении», которые, тем не менее, необходимо рассматривать с точки зрения обеспечения ЭМС, так как они оказывают воздействие на характеристики ЭМС других модулей. Хорошим примером таких модулей являются кабели.

Контроль поставок. Закупаемые компоненты систем, не являющиеся пассивными в электромагнитном отношении, подлежат некоторому анализу на стадии закупки. Этот вопрос обсуждается более детально в разделе 10.4.

Таблица 10.4

Критичность модулей в отношении ЭМС

Категория в отношении ЭМС	Описание
Пассивность в отношении ЭМС	Модуль не является источником помех, его функционирование не подвержено воздействию помех. Модуль не влияет на характеристики ЭМС системы (пример – пассивные переключатели, индикаторы)
Имеет отношение к ЭМС	Модуль сам по себе не является источником помех и его функционирование не подвержено воздействию помех. Однако модуль может оказать влияние на характеристики ЭМС других модулей, с которыми он связан (пример – кабели, соединитель и кожухи (оболочки))
Критичность в отношении ЭМС	Активное электронное оборудование, другие источники помех, такие, например, как коллекторные двигатели и световые приборы

Система контроля изменений. Природа закупок такова, чтокупаемые части рано или поздно становятся устаревшими и непригодными и должны заменяться другими частями. Для контроля влияния, которое это обстоятельство оказывает на ЭМС, следует иметь систему, защищающую статус соответствиякупаемых частей. Эта система в типичном случае должна предусматривать анализ аспектов, указанных в разделе 9.4 настоящей главы (декларации соответствия, инструкций по сборке и т. д.), таким образом, чтобы обнаружить изменения характеристик, имевшие место. Обычно в этом нет необходимости для пассивных в электромагнитном отношении частей, и поэтому в перечне частей для каждой системы должно быть определено, какие части имеют отношение к ЭМС и какие являются критичными в отношении ЭМС, чтобы система контроля изменений могла обнаружить изменение статуса части, когда это действительно необходимо. Контроль изменений конструкции в части ЭМС следует осуществлять не в большей степени, чем это уже осуществляется производственной системой компании для других целей, в этом случае расширение указанной деятельности применительно к аспектам ЭМС достигается чисто административным путем.

10.1.4. Контроль при сборке и установке

Обеспечение ЭМС требует, чтобы при сборке и установке систем были выполнены определенные «правила хорошей практики». Они могут включать:

- создание защитных зон в установках зданий;
- эквипотенциальное электрическое соединение структурных элементов кабельных полок, кожухов и коробов;
- размещение и соединение аппаратов, фильтров и устройств защиты от импульсных помех в кожухах;
- размещение, разделение и прокладка кабелей в пределах системы;
- соответствующая заделка экранированных концов кабелей.

План обеспечения ЭМС должен показывать, каким образом будут выполняться эти правила. Применение указанных правил должно быть обязательным для производственных компаний, хотя многим системным компаниям, не имевшим ранее опыта в вопросах обеспечения ЭМС, потребуется овладеть «правилами хорошей практики» с самого начала. Даже если указанные правила и применяются в деятельности компании, этого не всегда будет достаточно для обеспечения полного соответствия требуемым результатам, а иногда может привести к противоположным результатам. В этом случае существуют две возможности:

- применение инструкций по установке определенных аппаратов, предусматривающих особые требования, не применяемые в практике компании;
- осуществление испытаний частей системы или системы в целом для выявления зон, в которых соответствие нарушено.

В любом случае План обеспечения ЭМС должен предусматривать гибкий и обоснованный ответ на подобную ситуацию и возможность таких изменений сборочных и монтажных работ, которые могут повлиять на показатели ЭМС.

10.2. План испытаний в области ЭМС

План выполнения проекта включает комплекс испытаний в области ЭМС. Для этого должны быть определены объекты и длительность испытаний. Именно это является целью разработки Плана испытаний в области ЭМС. В типичном случае содержание Плана испытаний в области ЭМС будет включать вопросы, указанные на рис. 10.1.

Содержание плана испытаний ТС
<ul style="list-style-type: none"> • Описание испытываемой системы • Заявление о целях испытаний • Проводимые испытания и их график • Критерии качества функционирования при испытаниях на устойчивость к помехам • Критерии определения точек контроля помехоэмиссии и ввода помех • Описание вспомогательного оборудования, имитаторов и программного обеспечения • Сведения об испытательных установках • Оценка результатов испытаний

Рис. 10.1. Содержание Плана испытаний в области ЭМС

10.2.1. Определение конфигурации элементов системы и их взаимосвязи

Первый и наиболее важный этап разработки Плана испытаний в области ЭМС заключается в том, чтобы определить, какова та система (или совокупность модулей), которая должна быть испытана. Обычно такая система должна иметь сходство с той, которая будет подлежать сертификации, но не всегда возможно (или разумно) испытывать именно ту систему, которая будет введена в эксплуатацию. Очень часто требуется провести испытания системы в такой конфигурации, которая будет использоваться как изделие, представляющее характеристики ЭМС для нескольких других вариантов конструкции. В этом случае

будет необходимо изучение вопроса о представительности указанной конфигурации.

Понятие «конфигурация» в настоящем контексте относится как к конструкции отдельных модулей системы, так и их расположению и взаимному соединению. В равной мере это понятие применимо к режиму (режимам) функционирования, что, в свою очередь, связано с критериями качества функционирования, применяемыми при испытаниях на помехоустойчивость. Все эти аспекты должны быть отражены в Плане испытаний в области ЭМС.

10.2.2. Выбор необходимых испытаний

Полосы частот, в которых должны быть проведены испытания, и состав соответствующих средств испытаний определяются в соответствии с используемыми стандартами ЭМС, хотя часто имеется желание расширить области применения указанных стандартов. Большинство стандартов ЭМС предусматривает специфические требования к средствам испытаний, аналогичные тем, которые установлены в СИСПР 16-1 для средств измерений радиопомех. Внешние испытательные лаборатории определяют состав аппаратуры для осуществления необходимых испытаний, в противном случае за определение состава средств испытаний несет ответственность изготовитель.

Выбор точек, в которых проводятся испытания, может иметь критическое значение, особенно при испытаниях кабелей на помехоэмиссию и помехоустойчивость в больших системах и при воздействии электростатических разрядов. Обычно для определения испытательных точек проводятся некоторые предварительные испытания, результаты которых должны фиксироваться.

Как изготовитель, так и все органы власти, которые могут быть привлечены к подтверждению соответствия, должны знать, почему было принято решение о проведении испытаний применительно к определенным точкам испытываемого оборудования (ИО). В ряде случаев указанные испытательные точки могут быть установлены в выбранном стандарте (стандартах) ЭМС, как, например, сетевые кабели при измерениях кондуктивных помех. Однако в случае испытаний на устойчивость к электростатическим разрядам выбор испытательных точек для подачи разрядов должен быть подтвержден оценкой предполагаемого применения оборудования и (или) результатами предварительных испытаний с целью выявления «слабых» точек. Решение о том, чтобы не проводить испытания на помехоэмиссию или на помехоустойчивость для определенных сигнальных портов или портов ввода-вывода, может основываться на согласованных ограничениях допустимых длин провод-

ников, которые могут быть подключены к указанным портам. Использование пробников напряжения вместо эквивалентов сети электропитания при измерениях помехоэмиссии может быть оправдано недостаточным предельным значением тока имеющихся эквивалентов сети.

10.2.3. Испытания системы в целом

Из-за взаимодействия модулей между собой и взаимовлияния размещенных элементов систем, испытания индивидуальных модулей в отдельности редко позволяют получить адекватную информацию о характеристиках ЭМС системы в целом. Испытания системы в целом обычно бывают необходимыми применительно лишь к некоторым видам электромагнитных помех, особенно к радиочастотным помехам. Важнейшим аспектом таких испытаний является детализация физического расположения элементов.

Физическое расположение элементов определяется в общем виде в различных стандартах ЭМС, но положения этих стандартов должны быть соответствующим образом интерпретированы для того, чтобы их можно было применить к конкретному ИО. Критическое значение имеют расстояния, ориентация и близость объектов к другим объектам, прежде всего к пластине заземления. Окончательный протокол испытаний должен включать фотографии, отображающие вид испытательной установки, а также схемы, на которых указываются соответствующие расстояния.

Размещение и прокладка кабелей имеют критическое значение на высоких частотах и должны быть детально определены. Кабели, которые проходят в непосредственной близости к пластине заземления и ориентированы противоположно по отношению к измерительной антенне, излучают в направлении антенны существенно меньше электромагнитной энергии, чем кабели, проходящие в свободном пространстве параллельно антенне. Типы соединителей и кабелей, применяемых для каждого модуля, должны быть четко установлены, так как применение других соединителей и кабелей может привести к отказам в работе из-за протекания токов помех между модулем и кабелем.

Большое значение при испытаниях систем в области ЭМС может иметь специальное программное обеспечение для полного просмотра всех режимов работы системы; если система не испытывается в отдельности, необходимо вспомогательное поддерживающее оборудование. Как специальное программное обеспечение, так и вспомогательное поддерживающее оборудование должны быть документально описаны, калиброваны, или их пригодность для целей испытаний должна быть декларирована. Если поддерживающее оборудование не является объектом

испытаний, оно может быть подключено с использованием соответствующих фильтров или при удалении на значительное расстояние, что обеспечивает снижение уровня нежелательных помех и обеспечивает изоляцию вспомогательного оборудования от помех, прикладываемых к системе. Сведения об используемых фильтрах или разделительных расстояниях должны быть отражены в документации.

Если система имеет несколько различных режимов функционирования, то в некоторых случаях может быть выявлен «наихудший» режим, результаты испытаний которого будут охватывать большинство режимов функционирования и большинство профилей помехоэмиссии и помехоустойчивости. Выявление такого режима потребует, вероятно, проведения некоторых исследовательских испытаний. Выбор режима функционирования при испытаниях непосредственно влияет на время испытаний. Темп, в котором подаются помехи при испытаниях на помехоустойчивость или осуществляются измерения помехоэмиссии, также будет зависеть от длительности рабочего цикла в установленном режиме функционирования. Если система лишь в течение определенной части рабочего цикла является источником помехоэмиссии или обладает восприимчивостью к воздействию помех, проведение испытаний должно быть синхронизировано с этой частью рабочего цикла (рис. 10.2). Кроме того, рабочий цикл может быть «подправлен» таким образом, чтобы испытания осуществлялись непрерывно.

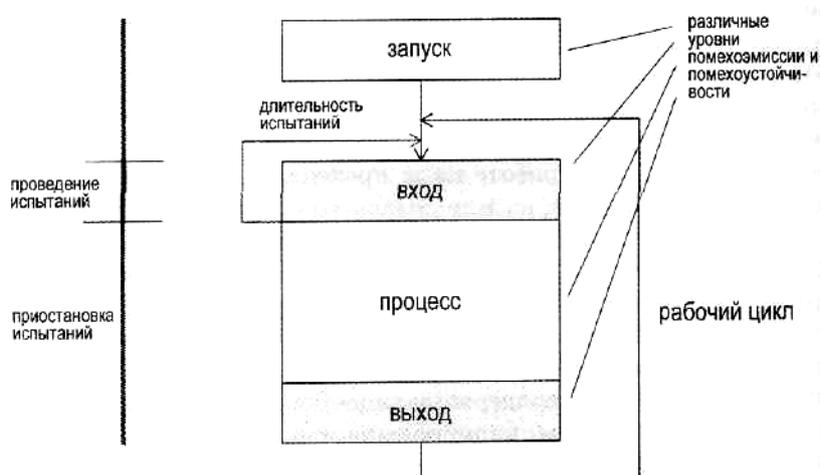


Рис. 10.2. Синхронизация испытаний с рабочим циклом

Необходимо установить порядок, в котором будут проводиться испытания, и последовательность проверки различных режимов функционирования; последствия одного из испытаний могут непреднамеренно (или преднамеренно) оказывать влияние на проведение следующего испытания. Необходимо также учитывать возможность повреж-

дений ИО при слишком длительном времени испытаний – особенно при испытаниях на устойчивость к импульсным помехам большой энергии, что требует осторожности при их проведении.

10.3. Документация

Документация для внутреннего применения

Общей практикой компаний, которые следуют процедурам менеджмента качества, установленным в стандартах серии ИСО 9000, является содержание в актуализированном состоянии документации, относящейся к конструированию и производству изделий, которая устанавливает процедуры создания и контроля каждого изделия. Документация, относящаяся к маркированию продукции знаком соответствия СЕ, должна разрабатываться в дополнение к указанной практике и, что само собой разумеется, будет обычно включать ссылки на различные материалы, относящиеся к ЭМС, разработанные вне компании.

10.4. Закупки

Многие изделия, предназначенные для конечного использования, содержат сложные электрические и (или) электронные изделия, закупаемые у других поставщиков. Примеры приведены ниже.

- Аппараты, предназначенные для конечного использования, могут содержать закупаемые субборки, такие, как компьютерные платы, или комплектные блоки, такие, как источники питания, программируемые контроллеры, компьютеры, двигатели, измерительные приборы, измерительные и управляющие модули и т. д. (некоторые из них могут быть сами конечными продуктами).

- Системы, предназначенные для конечного использования и установки, обычно конструируются из закупаемых конечных продуктов и систем, таких, как компьютеры, телекоммуникационные устройства, измерительные и управляющие системы, машины и т. д.

Соответствие конечного изделия требованиям ЭМС зависит от характеристик ЭМС закупаемых элементов. Следует иметь в виду, что ответственность за несоответствие конечного изделия требованиям ЭМС не может быть легко возложена на поставщика элемента, который не соответствует требованиям ЭМС. Даже в том случае, когда это является возможным, непредвиденные потери, например связанные со стоимостью возврата изделия или вредом, причиняемым потерей имиджа, могут доказать невозможность возмещения убытков за счет поставщика или его страхователя.

Если обнаружено, что аппарат, предназначенный для конечного использования, не соответствует требованиям ЭМС из-за несоответствия элемента, включенного в его состав, действия контролирующего

органа будут, вероятнее всего, предприняты как против конечного изготовителя, так и против поставщика элемента.

Правильный путь, который может обеспечить соответствие конечного изделия требованиям ЭМС, заключается в том, чтобы не полагаться на знак соответствия СЕ, а вместо этого обеспечить адекватность конструктивных характеристик составных частей системы, относящихся к ЭМС и безопасности.

10.5. Техническое обслуживание, доработка и модернизация

Система редко остается неизменной в течение срока эксплуатации. Технологическое «толкай» и потребительское «тяни» будут создавать возможности и формировать стремление к изменениям. Естественное ухудшение физических структур со временем также оказывает воздействие на характеристики ЭМС.

10.5.1. Техническое обслуживание

Если система должна соответствовать требованиям ЭМС для того, чтобы быть примененной по назначению, то разумно предполагать, что указанное соответствие должно быть сохранено в течение всего срока эксплуатации. Следовательно, для таких систем техническое обслуживание должно стать неотъемлемой частью Плана обеспечения ЭМС. Аспекты ЭМС, подлежащие анализу при техническом обслуживании систем, а также возможные способы контроля указаны в табл. 10.5.

Отметим, что неисправности некоторых элементов, используемых для обеспечения ЭМС (таких, как конденсаторы фильтра, устанавливаемые в открытой цепи, или устройства защиты от перенапряжений), невозможно выявить с помощью функциональных проверок, для выявления отказов необходимо применять некоторые способы испытаний системы на устойчивость к «синтетическим» помехам.

10.5.2. Доработка и модернизация

В течение срока эксплуатации системы часто подвергаются доработке. Может изменяться конфигурация установленных систем. Это обуславливается необходимостью:

- расширить существующие возможности системы;
- обеспечить выполнение системой новых функций;
- улучшить качество функционирования или устранить недостатки в выполнении существующих функций;
- осуществить ремонт.

За исключением ремонта, в ходе которого заменяются идентичные компоненты (хотя не все подобные компоненты идентичны в терминах ЭМС), осуществление доработки и модернизации может оказать воздействие на характеристики ЭМС.

Рассматривая установки, необходимо отметить, что реконфигурированные системы и установки не будут вновь размещаться на рынке. Поэтому процедуры оценки соответствия для маркирования изделий знаком соответствия CE не должны в данном случае применяться. Однако в этом случае сохраняется первоначальная ответственность изготовителя системы, который должен обеспечить соответствие системы или установки существенным требованиям Директивы ЭМС. Чтобы выполнить эту задачу при любых модификациях, считающихся обычными, необходимо проводить определенный анализ вопросов ЭМС. Выполнить указанный анализ должно лицо, осуществляющее изменения системы или установки, т. е. изготовитель системы либо пользователь. В худшем случае потребуются осуществлять повторные испытания реконфигурированной системы, но возможна менее обременительная альтернатива, которая может включать лишь документальное доказательство соответствия вновь вводимых элементов, или технический анализ, показывающий, что уровни помехоэмиссии или восприимчивости ничтожно малы.

Таблица 10.5

Вопросы, проверяемые при периодическом техническом обслуживании

Неисправность	Испытание
Экранированные помещения	
Коррозия проводников потенциаловыравнивающих сеток	Проверка сопротивления соединений с подачей больших токов
Повреждение проводящих прокладок	Визуальный осмотр
Уменьшение момента в ускорителях коммутационных устройств	Периодическая настройка ускорителей
Кабели	
Ухудшение соединений экранов кабелей	Высокочастотные испытания эффективности экранирования
Замыкания на землю из-за ухудшения изоляции	Проверка проводимости соединений и сопротивления изоляции
Фильтры	
Повышение сопротивления на землю	Проверка сопротивления соединяющих проводников
Обрывы в помехоподавляющих конденсаторах	Высокочастотные испытания эффективности фильтрации

Такой же анализ должен быть выполнен и при доработке систем в тех случаях, когда соответствие требованиям ЭМС является непременным условием применения систем по назначению или когда системы связаны с безопасностью. Во многих случаях основная трудность этого анализа заключается в том, чтобы решить, в какой степени доработка системы окажет влияние на характеристики ЭМС и, следовательно, какой уровень анализа является необходимым. Эта трудность может быть преодолена, если оригинальная проектная документация включает яс-

ное описание критичности для обеспечения ЭМС всех элементов системы. В этом случае изменение каждого элемента может быть проанализировано с учетом ранее подготовленной информации.

10.6. Обучение

Иногда предполагается, что технический персонал знает все, что необходимо знать о продукции компании, без какого-либо формального обучения или руководства, т. е. в соответствии с принципом «они обучаются на работе, и если делают ошибки, то это нормально, если они их исправляют».

Как кажется, такая позиция преобладает в отношении выполнения персоналом простых функций, операций и сборочных работ. Странно, что эта позиция преобладает в еще большей степени, когда дело касается обеспечения ЭМС, несмотря на тот факт, что значительная, если не бóльшая, часть технического персонала компаний имеет, как правило, крайне мало знаний и опыта в решении проблем ЭМС, если вообще их имеет.

Поэтому на уровне рядовых сотрудников и на уровне персонала, осуществляющего проектирование установок, традиционные методы сборки должны быть изменены с учетом «хорошей практики обеспечения ЭМС». Это может потребовать изменений в сознании части работников, особенно тех, чья позиция выражается фразами: «мы делали это таким образом много лет, и знаем, что это лучший способ» или «не вижу какой-либо разницы в применении нового способа в сравнении с прежним».

10.6.1. Обучение: контрольный перечень вопросов

Наиболее эффективным в отношении затрат способом доведения знаний, относящихся к обеспечению ЭМС, до сотрудников является организация в компании соответствующих курсов подготовки персонала. Ниже предлагаются рекомендации по структуре программы обучения персонала компании и обеспечения необходимой осведомленности по вопросам ЭМС. Указанная программа состоит из типовых модулей, подготовляемых организаторами курсов. Модули применяются соответствующим образом с учетом функциональных обязанностей, выполняемых сотрудниками.

Менеджеры проекта

Модули:

- Введение в ЭМС.
- Применение Директивы ЭМС.
- Планирование обеспечения ЭМС.
- Обзор факторов, влияющих на ЭМС при конструировании и установке систем.

Конструкторы систем, инженеры по установке и сдаче в эксплуатацию

Модули:

- Введение в ЭМС.
- Основы воздействия помех и механизм связи.
- Заземление и соединения.
- Прокладка кабелей и присоединение экранов.
- Техника экранирования.
- Разделение оборудования.
- Фильтрация и защита от импульсов.

Поставки и контроль качества

Модули:

- Введение в ЭМС.
- Обзор факторов, влияющих на ЭМС при установке систем.
- Использование стандартов при установлении требований к компонентам по обеспечению ЭМС.
- Проверка доказательств соответствия требованиям ЭМС, предъявляемым поставщиком.
- Обеспечение соответствия требованиям ЭМС при изменениях конструкции.

Специалисты по установке и монтажу, инженеры по эксплуатации и техническому обслуживанию

Модули:

- Введение в ЭМС.
- Обзор факторов, влияющих на ЭМС при установке систем.
- Практические приемы обеспечения ЭМС при установке, применяемые в компании.
- Обеспечение ЭМС при модернизации изделий.

Менеджмент и персонал подразделений продаж и маркетинга

Модули:

- Введение в ЭМС.
- Применение Директивы ЭМС.
- Преимущества маркетинга, основанного на правильном подходе к ЭМС.
- Оценка электромагнитной обстановки пользователя и допустимого ухудшения функционирования при воздействии помех.

- Маркетинг и продажа изделий, соответствующих требованиям ЭМС, только для использования их в электромагнитной обстановке и по назначению.

Общий и финансовый менеджмент

Модули:

- Введение в ЭМС.
- Применение Директивы ЭМС.
- Финансовые выгоды следования правильному подходу к ЭМС.

Специалисты по подготовке документации и инструкций по эксплуатации

Модули:

- Введение в ЭМС.
- Применение Директивы ЭМС.
- Подготовка технической документации, демонстрирующей соответствие требованиям ЭМС.
- Информирование пользователей об ограничениях в использовании и методах установки.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Шваб А.Й. Электромагнитная совместимость. – М.: Энергоатомиздат. – 1998. – 480 с.
2. Хабигер Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике. – М.: Энергоатомиздат. – 1995. – 304 с.
3. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2003. – 540 с.
4. Уилльямс Т., Армстронг К. ЭМС для систем и установок. – М.: Издательский Дом «Технологии», 2004. – 508 с.
5. СанПиН 2.2.4.1191–03. Электромагнитные поля в производственных условиях.
6. Овсянников А.Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике. – Новосибирск: Изд. НГТУ, 2001. – 94 с.
7. Костенко М.В., Михайлов Ю.А., Халилов Ф.Х. Электроэнергетика. Электромагнитная совместимость. Часть 1: учебное пособие. – Л.: СПбГТУ, 1997. – 102 с.
8. Журавлев Э.Н. Радиопомехи от коронирующих линий электропередачи. – М.: Энергия, 1971. – 200 с.
9. Александров Г.Н. Установки сверхвысокого напряжения и охрана окружающей среды. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 360 с.
10. Шапиро Д.Н. Основы теории электромагнитного экранирования. – М.: Энергия, 1975. – 109 с.
11. Зиновьев Г.С. Электромагнитная совместимость устройств силовой электроники (электроэнергетический аспект). – Новосибирск: Изд-во НГТУ, 1998. – 91 с.
12. Рикетс Л., Бриджес Дж., Майлетта Дж. Электромагнитный импульс и методы защиты. – М.: Атомиздат, 1979. – 328 с.
13. Электронные приборы для защиты РЭА от электрических перегрузок: справочник / В.П. Черепанов, А.К. Хрулев, И.П. Блудов. – М.: Радио и связь, 1994.
14. ГОСТ 30429-96. Совместимость технических средств электромагнитная. Радиопомехи промышленные от оборудования и аппаратуры, устанавливаемых совместно со служебными радиоприемными устройствами гражданского назначения. Нормы и методы испытаний. М.: Госкомстандарт. – 1996.
15. ГОСТ Р 51317.6.4-99. Совместимость технических средств электромагнитная. Помехоэмиссия от технических средств, применяемых в промышленных зонах. Нормы и методы испытаний. – М.: Госкомстандарт, 1999.

Приложение 1

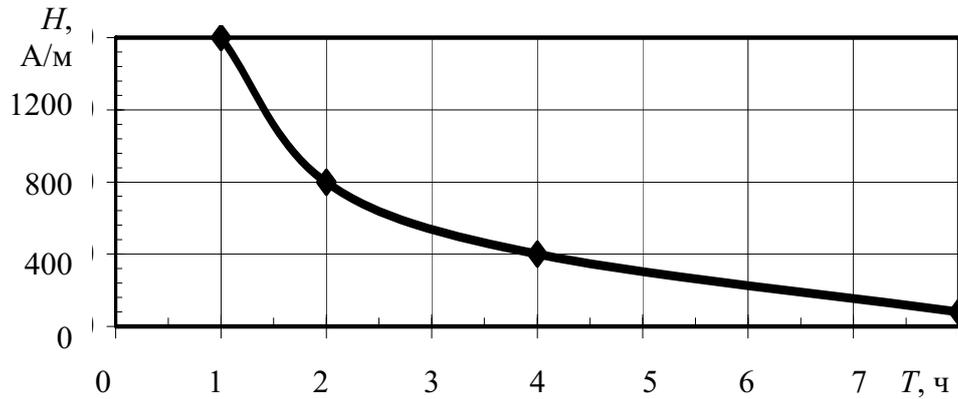


Рис. П.1. Предельно допустимые уровни напряженности МП ПЧ для персонала в условиях общего воздействия

Таблица П.1

Формулы для оценочного расчета индуктивности и волнового сопротивления часто встречающихся типов проводов

Конфигурация проводника	Индуктивность на единицу длины	Волновое сопротивление
	$\frac{\mu_0}{\pi} \ln \frac{2d}{D}$	$\frac{377}{\pi \sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{2d}{D}$
	$\frac{\mu_0}{\pi} \operatorname{arch} \frac{2d}{D}$	$\frac{377}{\pi \sqrt{\epsilon_r}} \operatorname{arch} \frac{2d}{D}$
	$\frac{b}{h} \geq 0,35; \frac{\mu_0}{4 \left(\frac{2}{\pi} \ln 2 + \frac{b}{h} \right)}$ $\frac{b}{h} \leq 0,35; \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \frac{8h}{\pi b}$	$\frac{377}{4 \left(\frac{2}{\pi} \ln 2 + \frac{b}{h} \right) \sqrt{\epsilon_r}}$ $\frac{377}{2\pi \sqrt{\epsilon_r}} \ln \frac{8h}{\pi b}$
 $\epsilon_{\text{эф}} = \frac{\epsilon_r + 1}{2} + \frac{\epsilon_r - 1}{2 \sqrt{1 + \frac{10h}{b}}}$	$\frac{b}{h} \geq 1; \frac{\mu_0}{\frac{b}{h} + 2,24 - 0,44 \frac{h}{b} + \left(1 - \frac{h}{b}\right)^6}$ $\frac{b}{h} \leq 1; \frac{\mu_0}{2\pi} \ln \left(\frac{8h}{b} + \frac{b}{4h} \right)$	$\frac{377}{\sqrt{\epsilon_{\text{эф}}} \left[\frac{b}{h} + 2,42 - 0,44 \frac{h}{b} + \left(1 - \frac{h}{b}\right)^6 \right]}$ $\frac{377}{2\pi \sqrt{\epsilon_{\text{эф}}} \ln \left(\frac{8h}{b} + \frac{b}{4h} \right)}$

Таблица П.2

Характеристики некоторых радиопоглощающих материалов

	Материал	Диапазон поглощенных волн, см	Коэффициент отражения по мощности, %	Ослабление проходящей мощности, %
1	Резиновые коврики	0,8...4	1...2	98...99
		0,8...4	1...2	98...99
		0,8...4	1...2	98...99
2	Магнитодиэлектрическая пластина	0,8	1...2	98...99
		2,0	1...2	98...99
		3,2	1...2	98...99
		10,6	1...2	98...99
3	Поглощающее покрытие на основе поролона	0,8...100	1...2	98...99
		0,8...40	1...2	97...99
4	Ферритовая пластина	15...200	3...4	96...97

Таблица П.3

Свойства типичных проводников

Материал	Относительная проводимость σ_r (медь = 1)**	Относительная магнитная проницаемость μ_r при $f = 1 \text{ кГц}^*$
Серебро	1,08	1
Медь	1,00	1
Золото	0,70	1
Хром	0,66	1
Алюминий	0,61	1
Цинк	0,30	1
Олово	0,15	1
Никель	0,22	50...60
Сталь малоуглеродистая	0,10	300...600
Мю-металл	0,03	20 000
* – относительная магнитная проницаемость материалов приблизительно равна 1 на частотах выше 1 МГц для большинства материалов		
** – абсолютная проводимость меди $5,8 \cdot 10^6 \text{ 1/Ом}\cdot\text{м}$		

Процедуры обеспечения ЭМС систем: контрольный перечень

1. Компания

Компания должна:

1) применять на практике процедуры менеджмента и контроля, направленные на обеспечение соответствия требованиям ЭМС;

2) дополнить и модифицировать, по необходимости, указанные процедуры применительно к условиям деятельности и опыту компании, учитывая результаты проведенных испытаний в области ЭМС и анализ реальных случаев нарушения функционирования при воздействии помех;

3) разработать и документировать систему испытаний в области ЭМС, которой должна следовать компания в практической деятельности. Система может включать испытания различных видов: простые («делай сам»), частичные или полные испытания на сборочной площадке компании, испытания на месте конечного использования, в независимой испытательной лаборатории ЭМС, а также любые сочетания этих процедур;

4) подготовить детальные рабочие инструкции, включающие вопросы:

- оценки электромагнитной обстановки при использовании изделия, определения допустимого ухудшения качества функционирования при воздействии электромагнитных помех, установления допустимых значений помехоэмиссии (как правило, для применения при участии в торгах и в процессе одобрения контракта);
- установления характеристик ЭМС закупаемых электрических/электронных/программируемых блоков, а также блоков, конструируемых в компании;
- получения инструкций, касающихся обеспечения ЭМС, от изготовителей электрических/электронных блоков и детального выполнения требований этих инструкций;
- определения применяемых методов заземления и экранирования;
- определения применяемых классов кабелей (и стандартных типов кабелей, например по нумерации изготовителя);
- определения правил прокладки проводников на платах/шасси и минимального разнеса кабелей различных классов;
- определения пространственного разнеса различных аппаратов и других защитных мер в области ЭМС;
- отражения указанных выше сведений в сборочных чертежах и инструкциях по установке;

- хранения в течение не менее десяти лет чертежей, материалов, относящихся к проектированию; и результаты испытаний, позволяющие «доказать тщательность» подтверждения соответствия требованиям ЭМС.

2. Проектировщики

Проектировщики должны:

- 1) должны учитывать при решении вопросов ЭМС установленные процедуры технологического процесса и применяемые рабочие инструкции.
- 2) уделять особое внимание адекватности характеристик ЭМС поставляемых блоков характеристикам электромагнитной обстановки при их использовании по назначению.
- 3) получить и проверить документацию поставщика, относящуюся к ЭМС;
- 4) получить все инструкции изготовителя, касающиеся обеспечения ЭМС, и следовать им. В сомнительных случаях запросить дополнительную информацию и воспользоваться советом эксперта.

Детально отразить в сборочных чертежах все необходимые требования по обеспечению ЭМС в процессе сборки, в том числе в части:

- применяемых способов заземления и экранирования;
- классов кабелей (а также их типов и качественных характеристик);
- положения проводников на платах/шасси основных образцов аппаратов и аппаратов, критичных для обеспечения ЭМС;
- пространственного разнеса аппаратов и применения других защитных мер в процессе сборки (фильтрации, защиты от импульсных помех, заземления);
- показа на сборочных и установочных чертежах путей прокладки кабелей различных классов.

Необходимо помнить, что некоторые электрические/электронные блоки требуют принятия специальных мер по обеспечению ЭМС при установке и сборке, таких как подключение экранов кабелей к заземлению только на одном конце, или подключение экранов кабелей к незаземленному шасси (например, к некоторому изолированному терминалу), или применение кабелей специального вида (например, с двойным экранированием). В каждом таком случае в сборочных чертежах с помощью рисунков или текстуального описания должно быть четко указано, что именно требуется.

3. Специалисты по сборке

Специалисты по сборке должны:

- 1) соблюдать при решении вопросов ЭМС процедуры сборки, установленные в компании, и применяемые рабочие инструкции;

2) отказываться от применения любых сборочных чертежей, которые не завершены в части обеспечения ЭМС, например чертежей, в которых для заземляющих проводников не указаны соответствующие методы электрического соединения или в которых не определены классы кабеле;

3) точно следовать чертежам проектировщиков, в том числе:

- при реализации методов заземления и экранирования;
- использовании правильных типов кабелей различных классов;
- установке электрических и электронных блоков на платах и шасси;
- прокладке и разное кабелей различных классов;
- выполнении других специальных инструкций при сборке.

Любые необходимые изменения должны быть согласованы с проектировщиками и внесены в сборочные чертежи. В сомнительных случаях, когда указания в чертежах отсутствуют, необходимо получить консультацию.

4. Руководство по установке и руководство пользователя

Необходимо, чтобы в этих документах были определены практические приемы обеспечения ЭМС применительно к этапам монтажа и использования изделий, включая:

- определение классов кабелей для всех соединений, осуществляемых пользователем;
- определение видов кабелей и соединителей, которые должны применяться пользователями (например, указание о том, что изготовитель рекомендует применять витую пару, экранированную путем оплетки фольгой, и т. д.).

В указанных документах следует рекомендовать применение мероприятий по обеспечению ЭМС, установленных в стандарте МЭК 61000-5-2 или в других подходящих стандартах ЭМС, включая:

- взаимный разнос кабелей разных классов;
- соответствующие методы прокладки кабелей;
- создание объединенной системы заземления в виде сетки;
- соединение экранов кабелей на обоих концах на 360°;
- использование параллельных проводников заземления (РЕС).

Эти документы должны включать специальные положения по обеспечению ЭМС при сборке, полученные из инструкций по обеспечению ЭМС изготовителей электронных блоков.

В указанных документах необходимо также установить, кто может быть допущен к сборке (например, какой необходим для этого уро-

вень знаний, опыта или квалификации). В некоторых случаях сборку изделия должны осуществлять только специалисты компании.

В заключение должно быть указано, что соответствие требованиям ЭМС не может быть обеспечено, если не будут выполнены все положения указанных документов или если установка, подготовка к эксплуатации, техническое обслуживание или модификации будут осуществляться неаттестованными или некомпетентными лицами. В сомнительных случаях или при возникновении трудностей должна быть предложена помощь компании.

Полезно продублировать в указанных документах чертежи компании, устанавливающие способы заземления и экранирования, и документы, определяющие правила выбора классов кабелей и их прокладки. В этом случае пользователь будет полностью осведомлен о том, что необходимо делать для обеспечения ЭМС, и, следовательно, будет не в состоянии утверждать, что компания не обеспечила его достаточно детализированной информацией об обеспечении ЭМС при сборке и установке изделия.

5. Установка, ввод в эксплуатацию, обслуживание

При решении вопросов ЭМС в ходе установки и ввода в эксплуатацию и при техническом обслуживании необходимо :

1) строго придерживаться процедур, установленных в компании и соблюдать требования рабочих инструкций;

2) отказаться от применения любых чертежей, которые не завершены в части обеспечения ЭМС, например чертежей, в которых для заземляющих проводников не указаны соответствующие методы электрического соединения или в которых не определены классы кабелей (или порядок их прокладки);

3) точно следовать чертежам проектировщиков и инструкциям по установке, в том числе:

- при осуществлении заземления и экранирования;
- при использовании правильных типов кабелей различных классов;
- при поддержании установленных расстояний между блоками аппаратов и их кабелями;
- при прокладке и разnose кабелей различных классов;
- при выполнении других специальных требований, установленных в сборочных чертежах и руководствах по установке;
- не допускать каких-либо изменений или модификаций важных характеристик ЭМС изделия.

Персонал, осуществляющий установку, ввод в эксплуатацию и техническое обслуживание, должен быть соответствующим образом

подготовлен для того, чтобы идентифицировать проблемы, связанные с ухудшением функционирования в результате воздействия электромагнитных помех. Он должен также иметь необходимый комплект оборудования и приборов, позволяющий в процессе работы осуществлять немедленные измерения в области ЭМС.

Любые необходимые изменения должны быть согласованы с проектировщиками и внесены в окончательные чертежи. Если имеются сомнения в отношении каких-либо вопросов в чертежах или инструкциях по установке и подготовке к эксплуатации, необходимо получить консультацию.

Учебное издание

ЖГУН Дмитрий Владимирович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ВЫСОКОВОЛЬТНОЙ ТЕХНИКИ

Учебное пособие

Научный редактор
доктор физ.-мат. наук
профессор

В.В. Лопатин

Редактор
Верстка

О.Н. Свинцова

В.П. Аршинова

Д.В. Сотникова

Дизайн обложки

О.Ю. Аршинова

О.А. Дмитриев

Подписано к печати 30.09.2008. Формат 60x84/16. Бумага «Снегурочка».

Печать Херох. Усл. печ. л. 8,72. Уч.-изд. л. 7,89.

Заказ 823. Тираж 100 экз.



Томский политехнический университет
Система менеджмента качества
Томского политехнического университета сертифицирована
NATIONAL QUALITY ASSURANCE по стандарту ISO 9001:2000



ИЗДАТЕЛЬСТВО  ТПУ. 634050, г. Томск, пр. Ленина, 30.