

МИНИСТЕРСТВО НАУКИ И ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

Федеральное государственное бюджетное
образовательное учреждение
высшего образования
«КАЗАНСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ
ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

2-е издание, дополненное

Казань 2018

УДК 537.86.
ББК 22.336
Э50

Рецензенты:

доктор технических наук, профессор Казанского государственного
энергетического университета *И.М. Валеев*;

кандидат физико-математических наук, старший научный сотрудник
Казанского физико-технического института им. Е.К. Завойского *А.Н. Туранов*

Э50 Электромагнитная совместимость: учебное пособие / сост.:
Д.М. Валиуллина, В.К. Козлов. – 2-е изд., доп. – Казань: Казан. гос.
энерг. ун-т, 2018. – 95 с.

В пособии изложены вопросы обеспечения электромагнитной совместимости устройств в электроэнергетике и электротехнике. Рассмотрены основные виды помех, пути их проникновения в устройства, способы и средства защиты от помех, а также экологическое влияние электромагнитных полей.

Предназначено для студентов очной и заочной форм обучения по образовательной программе направления подготовки 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника», направленность «Электроэнергетические системы и сети».

УДК 537.86
ББК 22.336

© Валиуллина Д.М., Гарифуллин М.Ш., Козлов В.К.

© Казанский государственный энергетический университет, 2006 г.

© Валиуллина Д.М., Козлов В.К.

© Казанский государственный энергетический университет, 2018 г.

ВВЕДЕНИЕ

Последнее десятилетие в электроэнергетике все шире используется электронная аппаратура в системах релейной защиты и противоаварийной автоматики. Однако электронная аппаратура весьма чувствительна к помехам, появляющимся во вторичных цепях подстанций, источниками которых являются коммутации выключателей и разъединителей высокого напряжения, удары молний, а также большие токи замыканий на землю.

В связи с этим появилась необходимость решения задачи электромагнитного сосуществования электронных и электротехнических систем, реализованная в новом научно-техническом направлении «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике».

Необходимость переиздания учебного пособия обусловлена выходом стандарта организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.240.044-2010 «Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства» (дата введения 21.04.2010), стандарта организации ОАО «ФСК ЕЭС» СТО 56947007-29.130.15.114-2012 «Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6–750 кВ» (дата введения 03.02.2012) и приведением в соответствие учебного пособия и этих документов.

Целью данного учебного пособия является знакомство с основными понятиями и определениями, с физическими принципами электромагнитной совместимости (ЭМС) и помехоустойчивости информационных систем (ИС), причинами появления проблемы ЭМС, методами улучшения условий ЭМС и помехоустойчивости ИС, нормами на параметры ЭМС и современной измерительной аппаратурой, математическим и физическим моделированием условий ЭМС.

В учебном пособии содержатся основные термины и определения, рассматриваются общие вопросы электромагнитной совместимости, источники электромагнитных помех и механизмы их появления, пассивные помехоподавляющие устройства. Рассматриваются вопросы определения электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики, экологическое и техногенное влияние полей.

Учебное пособие направлено на формирование следующих компетенций:

– способности использовать правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда;

– способности использовать технические средства для измерения и контроля основных параметров технологического процесса.

При усвоении материала, представленного в учебном пособии, у студентов формируется способность использовать правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда.

В результате освоения дисциплины «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» студент должен:

– знать основы правил техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и норм охраны труда; решения конкретных задач в области организации и нормирования труда; основные технические средства для измерения и контроля параметров технологического процесса;

– уметь использовать правила техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда; использовать нормативные правовые документы в своей профессиональной деятельности; принимать организационно-управленческие решения в нестандартных условиях и в условиях различных мнений и нести за них ответственность; использовать технические средства для измерения и контроля основных параметров технологического процесса;

– владеть правилами техники безопасности, производственной санитарии, пожарной безопасности и нормы охраны труда; организационно-управленческим мышлением в нестандартных условиях и в условиях различных мнений; восприятием научно-технической информации, отечественного и зарубежного опыта по тематике исследования; способами решения конкретных задач в области организации и нормирования труда; навыками использования технических средств для измерения и контроля основных параметров технологического процесса.

ТЕМА 1. ОСНОВНЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ. ТЕХНИЧЕСКИЕ, ЭКОНОМИЧЕСКИЕ И ОРГАНИЗАЦИОННЫЕ ОСНОВЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

1.1. Основные понятия, определения

Приборы и устройства автоматики предназначены для реализации требуемой функции $a = Op[e]$, то есть осуществить взаимосвязь между несущими информацию входными (e) и выходными (a) величинами. При этом устройство автоматики постоянно подвергается электрическим и неэлектрическим воздействиям, которые обеспечивают стабильное функционирование и сами оказывают электрическое и неэлектрическое воздействие на определенную среду, которое должно оставаться в допустимых пределах. Пригодность к определенным условиям эксплуатации, в том числе и климатическим, подтверждается в паспортных данных с указанием вида защиты и допустимых пределов изменения вспомогательных энергетических параметров (напряжение, частота, наличие высших гармоник). В последнее время к этим параметрам добавляется степень защищенности от воздействий внешнего электромагнитного поля, характеризующая пригодность использования оборудования в тех или иных условиях электромагнитного влияния.

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС) любой электронной системы подразумевается способность системы нормально функционировать в заданной электромагнитной обстановке, не создавая при этом недопустимых помех другим средствам.

Надежная работа электронной аппаратуры является актуальной частью проблемы обеспечения электромагнитной совместимости электрооборудования.

Электромагнитная совместимость характеризуется не только взаимодействием устройств автоматики с окружающей средой, но и взаимодействием элементов этих устройств между собой.

Таким образом, электромагнитную совместимость можно определить как способность электрической установки или ее элементов функционировать в заданной электромагнитной обстановке так, чтобы не вызывать недопустимого электромагнитного воздействия на окружающую среду.

Дальнейшее рассмотрение проблемы электромагнитной совместимости требует более подробного определения основных понятий.

Электромагнитная помеха – случайное электромагнитное воздействие сторонней системы на рассматриваемую систему через паразитные или функциональные связи. В зависимости от того, находятся ли источник помех

и испытывающая его воздействие система в едином пространстве, или они разделены, подразделяют помехи на внутренние и внешние по отношению к системе.

При этом механизм мешающего воздействия предполагает наличие по крайней мере одного источника Q , от которого исходят помехи, и одного чувствительного к помехам элемента S , которому помехи могут причинить вред. Оба эти компонента взаимодействуют друг с другом через механизм связи K (рис. 1.1).

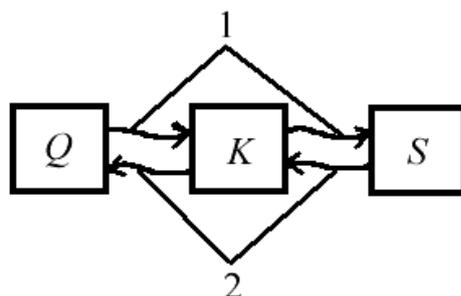


Рис. 1.1. Элементарная модель влияний:
1 – помехи; 2 – обратное влияние

Связь между источником помех и чувствительным к помехам элементом, в частности в рамках качественных оценок воздействия, может быть принята как не обладающая обратным влиянием. Однако этот упрощенный подход часто недопустим при точном анализе проблем воздействия и обратное влияние чувствительного к помехам элемента S на источник помех Q требуется учитывать. Особенно важно это для энергетических систем.

В зависимости от того, находится ли источник помех Q и слабое место S в рамках рассматриваемого единства (замкнутого функционального или конструктивного единства ВЕ, рис. 1.2, а) или они разделены (например, ВЕ1, ВЕ2 на рис. 1.2, б), подразделяют помехи на внутренние и внешние по отношению к системе. Оба вида помех при практической реализации электромагнитной совместимости разрабатываемых приборов требуют разной стратегии.

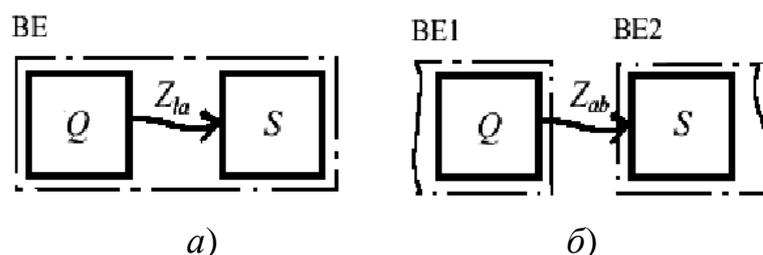


Рис. 1.2. Внутреннее (а) и внешнее (б) взаимодействия

Электромагнитная обстановка – совокупность электромагнитных явлений, существующих в рассматриваемом пространстве. Она описывается характеристиками источников помех и параметрами их воздействия, реализованными и нереализованными мероприятиями, а также неэлектрическими характеристиками окружающей среды, влияющими на электромагнитную совместимость (влажность воздуха, наличие вблизи материалов с трибоэлектрическими свойствами и т.д.).

Источник помех – причина появления помехи (прибор или физический процесс).

Помеха – электромагнитная величина, способная вызвать в электрическом устройстве нежелательный эффект (искажение сигнала, старение, нарушения функционирования, разрушение и т.п.). Она определяется разностью: $x_S = x - x_N$, где x – рассматриваемая электромагнитная величина; x_N – содержащийся в величине x полезный сигнал. Помехой x_S может быть напряжение, ток, напряженность поля и т.д.

При превышении определенного граничного предела уровень вредного сигнала может оказаться опасным для жизни человека и работы прибора.

Механизм связи – физический механизм воздействия источника помехи на чувствительный элемент, или механизм передачи электроэнергии электромагнитных процессов от источника к чувствительному элементу.

Уровень совместимости – установленное значение помехи, при которой с наибольшей вероятностью гарантируется нормальное взаимодействие всех элементов системы.

Помехоустойчивость – свойство чувствительного элемента нормально работать при воздействии помехи. Количественно она задается в виде допустимого воздействия напряженности поля граничной энергии и т.д. При воздействии, превышающем предел помехоустойчивости, может не происходить разрушение объекта. Это обратимое нарушение функционирования. Оно характеризуется пороговым значением опасной помехи.

1.2. Цели и основное содержание работ в области электромагнитной совместимости

Цель работ по электромагнитной совместимости при проектировании, изготовлении и эксплуатации средств автоматизации состоит в устранении возможных недостатков, обусловленных электромагнитной несовместимостью. Эти задачи решаются путем организованного применения технически реальных мер при оправданных затратах.

Принципиальные мероприятия по повышению электромагнитной совместимости:

1. Подавление возникновения помех путем воздействия на источник помех.

2. Подавление или ослабление помех в тракте распространения.

3. Повышение помехозащищенности и устойчивости слабого звена путем осуществления мероприятий, влияющих на условие проникновения помехи и интенсивность воздействия проникшей помехи.

4. Разделение во времени режимов появления помехи и функционирования чувствительного элемента.

1.3. Экономические аспекты электромагнитной совместимости

Электромагнитная совместимость наряду с другими параметрами рассматривается как комплексная характеристика качества создаваемого изделия. При изготовлении изделия добиваются минимизации общей стоимости K_G , обусловленной стоимостью потерь K_F вследствие работы системы с учетом влияния электромагнитной несовместимости, и стоимостью дополнительных мероприятий K_E по повышению электромагнитной совместимости (рис. 1.3). Это означает, что процесс повышения надежности в отношении электромагнитной совместимости требует все больших затрат.

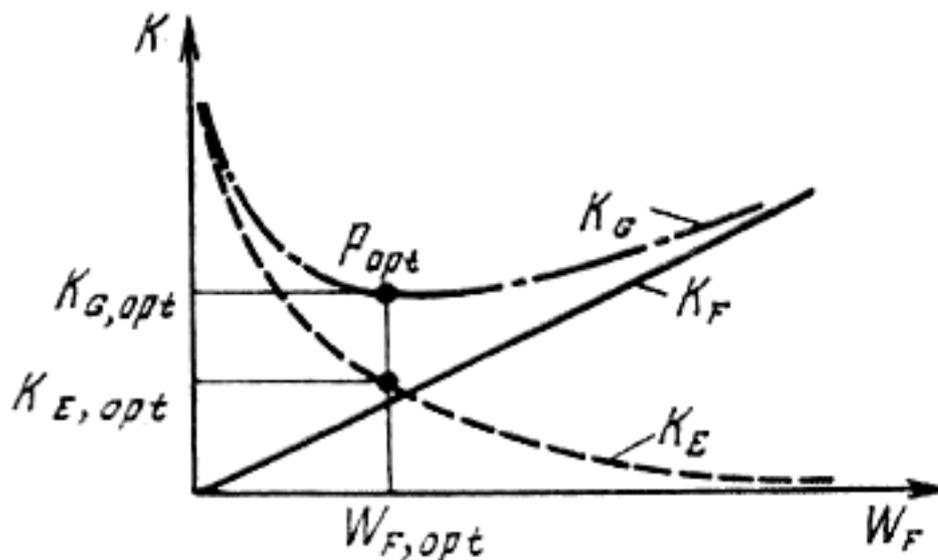


Рис. 1.3. График зависимости $K_F(W_F)$ и $K_E(W_F)$

Практически достаточно трудно определить зависимости $K_F(W_F)$ и $K_E(W_F)$ для каждого конкретного объекта. Однако известны затраты на обеспечение электромагнитной совместимости при производстве

различных изделий. Они составляют от 2 до 10 % стоимости разработки и могут быть приняты в качестве первого приближения к оптимальной стоимости P_{opt} .

1.4. Рекомендации по электромагнитной совместимости

При производстве изделия необходимо соблюдать целый ряд рекомендаций и норм, касающихся электромагнитной совместимости. В каждой стране существуют национальные комитеты, разрабатывающие национальные нормы по электромагнитной совместимости, эти институты тесно связаны с Международными организациями:

1. Международная конференция по большим энергетическим проблемам.
2. Международный консультативный комитет по телеграфии и телефонии.
3. Технический комитет и другие комитеты Международной электротехнической комиссии.
4. Специальный Международный комитет по радиопомехам и т.д.

Целевыми объектами работ в области электромагнитной совместимости, относящимися к энергетике и технике автоматизации процессов, являются:

- терминология, то есть формулирование понятий и определений, необходимых для осмысленных разработок и использования норм;
- определение уровней электромагнитной совместимости и классификация окружающей обстановки по значениям помех, служащих в качестве основы при установлении требований по помехоустойчивости промышленных средств и в качестве меры допустимого излучения помех;
- разработка допустимых значений помех и обратного действия, вызываемого приборами определенных классов;
- определение классов помехоустойчивости промышленных средств при определенных электромагнитных воздействиях;
- разработка способов и устройств для измерения помех и иных параметров, относящихся к электромагнитной совместимости.
- способы испытаний и устройства для тестирования.

1.5. Перечень продукции, связанной с электромагнитной совместимостью

Поставщиками продукции на европейском рынке являются примерно 270 фирм-производителей, которые производят следующие основные товары:

- 1) фильтры и другие помехозащитные средства – 24 %;
- 2) экранируемые кабины и помещения – 16 %;
- 3) проводящие покрытия – 13 %;
- 4) испытательные приборы – 12 %;
- 5) проводящие уплотнения – 7 %;
- 6) прочие товары – 28 %.

Причем на долю России приходится менее 1 % всех производимых товаров.

Контрольные вопросы

1. К каким помехам чувствительна электронная аппаратура?
Что является источником этих помех?
2. Что подразумевается под электромагнитной совместимостью электронной системы?
3. Дайте определение электромагнитной помехи.
4. Дайте определение помехоустойчивости.
5. Назовите принципиальные мероприятия по повышению электромагнитной совместимости.

ТЕМА 2. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

2.1. Классификация источников помех

Все помехи делятся на две группы:

- естественные источники;
- искусственные источники.

Естественные источники: разряды атмосферного электричества, заряды статического электричества между телами, получившими заряды разной полярности. Все другие естественные источники для системы автоматики не существенны.

Искусственные источники: все процессы при нормальных рабочих и аварийных режимах работы приборов, машин, электроэнергетических установок, устройств информационной техники, находящихся вблизи средств автоматизации.

Внутри прибора указанные помехи попадают совместно с полезными сигналами или с напряжением питания по проводам через параметры U и I , либо через поле. В дополнение к этим помехам, вызванным внешними источниками, могут возникнуть и внутренние помехи, распространяющиеся по проводам или в виде поля внутри системы.

Внутренние источники помех в системе:

- напряжение питания с частотой 50 Гц;
- высокочастотные и низкочастотные тактовые сигналы;
- коммутационные процессы;
- магнитные поля ходовых механизмов;
- изменения потенциала питания устройств электроники и др.

Каждое место спайки, скрутки или резьбового соединения двух различных материалов представляет собой термоэлемент, термонапряжение которого изменяется в пределах 40 мкВ при изменении температуры на 1 °С.

2.2. Внешние источники помех

К внешним источникам помех относятся:

- грозовой разряд;
- разряды статического электричества;
- технические электромагнитные процессы;
- ядерный взрыв.

Грозовой разряд

Грозовой разряд – одновременно на земном шаре происходит около 2000 гроз и 100 разрядов молний в секунду. Атмосферные возмущения, вызываемые грозовой деятельностью, создают помехи радиосвязи и обостряют проблемы ЭМС. В среднем в Европе число грозовых дней в году составляет от 15 до 35, а число ударов молнии, приходящихся на один квадратный километр площади, за год равно от 1 до 5, причем первая цифра относится к северным районам, а вторая – к южным.

В горных местностях амплитудные значения токов молнии снижаются примерно в два раза по сравнению с амплитудными значениями в равнинных местностях. Это объясняется уменьшением расстояния от земли до облаков. При меньших расстояниях молнии возникают меньшие скопления зарядов на облаках, что ведет к снижению амплитудных значений токов молнии.

Энергия канала разряда молнии составляет 105 Дж/м и вызывает акустическое (гром), термическое, световое и электромагнитное воздействие на окружающую среду. При непосредственных ударах в объект происходят специфические разрушения и пожары. За счет внедрения средств грозозащиты число таких повреждений непрерывно снижается. Однако, косвенное воздействие молнии на электронные средства приводит к все большему и большему ущербу (рис. 2.1).

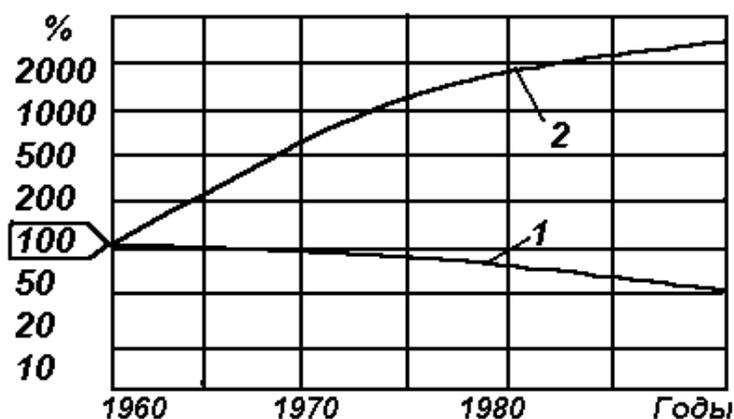


Рис. 2.1. Ущерб в Верхней Австрии, вызванный молниями, по годам: 1 – прямой ущерб; 2 – косвенный ущерб

Средние параметры молнии:

- средний заряд молнии 150 ÷ 300 А·с;
- максимальный ток в разряде 2 ÷ 200 кА;
- крутизна тока 2 ÷ 200 кА/мкс;
- средняя длительность 0,5 ÷ 4 мкс.

С точки зрения интенсивности воздействия молнии различают непосредственные или близкие удары и ударные разряды. При непосредственных и близких ударах молния ударяет в молниеприемники защищенных зданий или устройств, соединенных, например, кабелями низкого напряжения, линиями связи и управления.

При ударе молнии в защитное устройство его потенциал относительно удаленных точек земли может повышаться до 1 МВ при допустимом сопротивлении 10 Ом. В петлях, образованных сигнальными кабелями и проводами, связывающими различные объекты, может индуцироваться напряжение от нескольких десятков вольт до многих сотен киловольт.

При удаленных разрядах молнии, например, при разрядах на ЛЭП, индуцированные перед разрядом заряды на линии электропередачи освобождаются, и вдоль линии распространяется волна перенапряжения. При достижении подстанции, которая питает сеть низкого напряжения, перенапряжения ограничиваются либо электрической прочностью изоляторов, либо защитными разрядниками. Если у объекта отсутствует защитное устройство, происходит нарушение функционирования электронного оборудования.

Рекомендуется реализовывать двухступенчатую защиту объектов посредством внешних и внутренних мероприятий по молниезащите. Внешние мероприятия направлены на отвод тока молнии от внутренних цепей. Внутренние мероприятия снижают до приемлемых оставшиеся воздействия молнии.

Разряды статического электричества

Разряды статического электричества – процесс выравнивания зарядов между отдельными твердыми телами, жидкими и газообразными средами, несущими разные электростатические заряды. Они обычно сопровождаются скользящими, коронными, искровыми или подобными молнии разрядными явлениями. При возникновении искр вследствие разряда могут воспламениться горючие газы. Вызванные разрядами токи и поля могут повредить электронные элементы, эти воздействия относятся к области электромагнитной совместимости. Мерой защиты от первого воздействия является заземление объектов (бензовоз), а от второго воздействия – фильтры и экранирование.

Заряды статического электричества возникают за счет индукции (рис. 2.2) и за счет трения (рис. 2.3).

Токи в процессе зарядки составляют от сотен пикоампер до нескольких микроампер, а электростатические заряды – от 3 нКл до 5 мкКл. Электростатическая разность потенциалов между телами определяется после окончания процесса зарядки отношением приобретенного заряда Q к емкости C_{AB} тел между собой: $U_{AB} = Q/C_{AB}$.

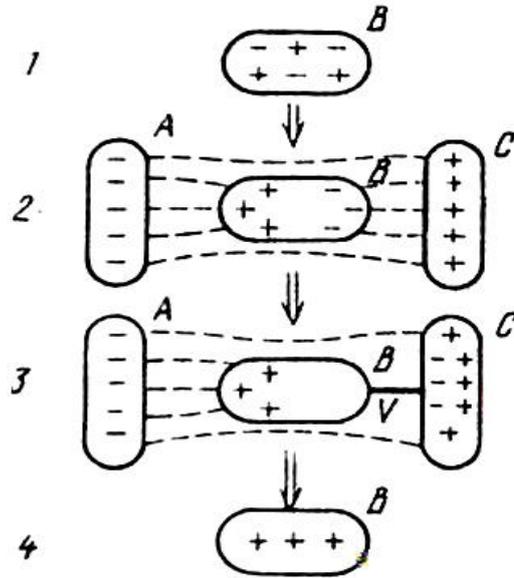


Рис. 2.2. Электризация за счет индукции:

- 1 – тело B электрически нейтрально; 2 – поляризация тела B в электрическом поле;
3 – отвод отрицательных зарядов при искровом разряде или касании тела C ;
4 – тело B заряжено положительно

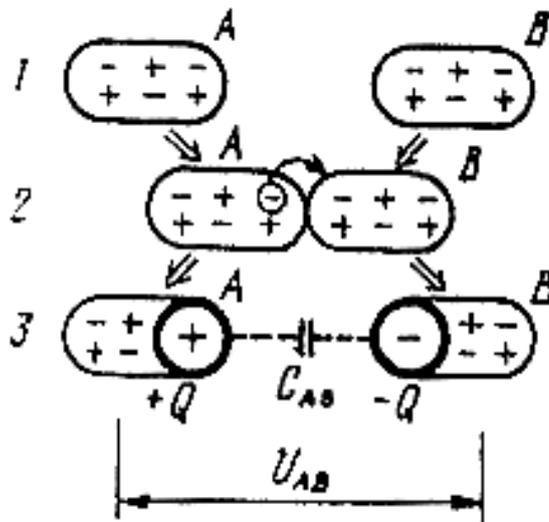


Рис. 2.3. Электризация трением:

- 1 – две субстанции A и B в нейтральном состоянии; 2 – фаза касания или трения;
3 – A заряжена положительно, B – отрицательно

Приведем ряд некоторых материалов и предметов по возрастанию степени способности передачи электронов, в порядке следования: воздух, рука человека, асбест, кроличья шкурка, стекло, слюда, волосы человека, нейлон, шерсть, мех, свинец, шелк, алюминий, бумага, хлопок, сталь, дерево, янтарь, сургуч, эбонит, никель, медь, латунь, серебро, золото, платина, сера, ацетатный шелк, полиэфир, целлулоид, полиуретан, полиэтилен, полипропилен, поливинилхлорид (винил).

Паразитная электризация трением проявляется в промышленности вследствие контакта тела человека с его одеждой, с сиденьем, с полом, с рабочими средствами и предметами, а также при соприкосновении деталей, панелей, приборов с устройствами для обработки и тарой при их хранении и транспортировке. Процессы трения могут быть обусловлены как естественными движениями тел, нормальными рабочими операциями, такими технологическими процессами как вентиляция, продувка, опрыскивание, распыление, упаковка и распаковка, загрузка, так и сотрясениями, вибрациями при транспортировке.

Тело человека обладает емкостью относительно земли $C = 100 \div 300$ мкФ. Человек, идущий по полу с синтетическим покрытием, приобретает потенциал равный $0,2 \div 0,9$ кВ. При извлечении пластиковой микросхемы из пластикового пакета появляется разность потенциала до 20 кВ.

Технические электромагнитные процессы

Технические электромагнитные процессы во всех устройствах, служащих для производства, передачи и потребления электроэнергии, происходят процессы, являющиеся источниками электромагнитных помех.

Все помехи делятся на два класса:

1. Помехи, производимые всеми устройствами электроснабжения, выпрямительными приборами и устройствами, кабелями и воздушными линиями, люминесцентными лампами и многими другими установками, характеризующимися стабильностью во времени и частотным диапазоном от нескольких Гц до 100 ГГц. Эти установки являются источниками электромагнитных помех, которые оцениваются следующими числами:

– электростанция, на расстоянии $0,3 \div 1,5$ м от сборных шин с $I = 2$ кА, производит напряженность магнитного поля $36 \div 6$ А/м; электростанция на расстоянии $0,3 \div 1$ м от трансформатора мощностью $S = 0,6$ МВ·А и напряжением $35 \div 10$ кВ производит магнитное поле напряженностью $H = 14 \div 4$ А/м;

– ЛЭП – 400 кВ, место измерения – под проводами в середине пролета при токе 1 кА, $H = 10$ А/м (для воздуха 1 А/м = 1,25 мкТл);

– радиопереговорное устройствомощностью $S = 1 \div 10$ Вт, на расстоянии 0,5 м, производит напряженность электрического поля $1 \div 10$ В/м на частотах $0,3 \div 3$ МГц.

2. Процессы, создающие аperiodические, случайно возникающие во времени помехи. Причинами появления таких помех являются разного рода коммутации и возникновение коротких замыканий. При этом появляются помехи с широким частотным спектром. Ширина спектра помех обратно пропорциональна времени коммутации и особо интенсивные помехи возникают при перенапряжении до 10 кВ, при этом крутизна перенапряжения достигает до 100 В/нс, а время нарастания импульса перенапряжения – 1 нс \div 1 мс.

Электромагнитный импульс ядерного взрыва

Термин «электромагнитный импульс ядерного взрыва» включает в себя множество категорий электромагнитных импульсов (ЭМИ), в том числе вызванных взрывами на поверхности Земли или в космическом пространстве. Высотные (выше 30 км) ядерные взрывы особенно опасны для объектов электроэнергетики. Они вызывают появление трех типов электромагнитных импульсов, которые могут проявить себя на поверхности Земли:

- первый ЭМИ высотного ядерного взрыва;
- второй ЭМИ высотного ядерного взрыва;
- третий магнитогидродинамический ЭМИ высотного ядерного взрыва.

Возникновение первого ЭМИ связано с отражением электронов Комптона, создаваемых X-излучением, γ -излучением и нейтронами при их взаимодействии с молекулами воздуха при ядерных взрывах на больших высотах (см. рис. 2.4). Эти электроны когерентно отражаются магнитным полем Земли, так что поперечный поток электронов создает поперечное электрическое поле, распространяющееся по направлению к поверхности Земли.

Первый импульс характеризуется значительными пиковыми напряженностями электрического поля (десятки кВ/м), малой длительностью фронта (порядка 1 нс), небольшой общей длительностью импульса (до 100 нс).

Непосредственно за быстрым первоначальным переходным процессом, нейтронами и гамма-излучением создается дополнительная ионизация, приводящая к появлению второго ЭМИ. Напряженность электрического поля этого импульса составляет от 10 до 100 В/м и может длиться от 1 до десятков мс.

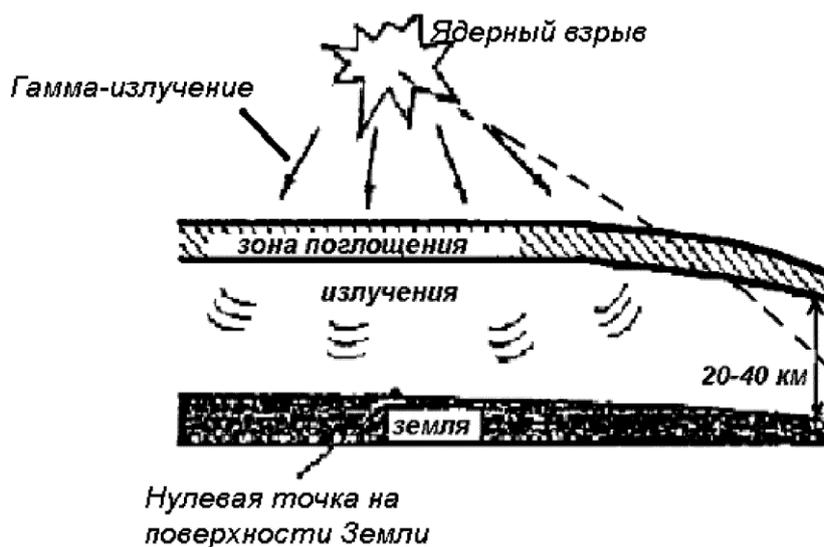


Рис. 2.4. Первый ЭМИ от высотного ядерного взрыва

Последний импульс, обычно называемый магнитогидродинамическим (МГД-ЭМИ), генерируется самим ядерным взрывом и характеризуется электрическим полем низкой амплитуды (порядка десятков мВ/м), длительным фронтом (порядка секунд) и длительным импульсом (сотни секунд).

Воздействие описанных выше ЭМИ может представлять угрозу работе электроустановок при двух условиях:

- ЛЭП имеют достаточную длину для образования больших разностей потенциалов на их концах;
- на обоих концах ЛЭП сопротивление заземлителя постоянному току небольшое, что создает возможность протекания по линии постоянных токов (при этом токи в несколько сотен ампер могут вызвать эффект насыщения сердечника трансформатора).

Благодаря своим свойствам МГД-ЭМИ могут взаимодействовать с ЛЭП очень большой длины и наводить в них токи, вызывающие появление гармонических составляющих тока и дисбаланса фаз, которые, в свою очередь, могут серьезно повредить некоторые компоненты энергосистемы (например, силовые трансформаторы). Поля, создаваемые МГД-ЭМИ,

вызывают появление наведенных токов, подобных токам в телефонных сетях (земляные токи), причиной появления которых являются магнитные бури, довольно часто случающиеся в северных странах.

ЭМИ характеризуется длительностью до 200 нс (при молнии до 350 мс). Фронт нарастания импульса до 5 нс (при молнии до 10 мс). Напряженность электромагнитного поля от взрыва на высоте 100 км достигает 50 В/м.

Контрольные вопросы

1. Чем объясняется образование грозовых облаков?
2. Какой процесс называется ударной ионизацией?
3. Охарактеризуйте канал стримера.
4. Назовите среднюю скорость продвижения лидерного разряда.
5. Чем опасны высотные ядерные взрывы для объектов электроэнергетики?

ТЕМА 3. МЕХАНИЗМЫ ПОЯВЛЕНИЯ ПОМЕХ

3.1. Возможные виды связи

Существенным при рассмотрении технико-экономических проблем электромагнитной совместимости является значение механизмов связи K между источником помех Q и чувствительным к помехам элементом прибора S , обусловленных этими механизмами воздействий и соответствующих основных правил, по которым можно эффективно противостоять этим воздействиям уже на стадии проектирования и создания устройств. Рис. 3.1 дает представление о принципиально возможных видах связи между двумя контурами с током (1 и 2) или о путях проникновения помехи Z от источника Q к элементу S по проводам или через поле. В первом случае говорят о гальванической связи; а во втором и в третьем в зависимости от условий, о внутренней или внешней емкостной связи (если преобладает электрическое поле), зависящей от частоты и расстояния между источником и чувствительным элементом, или же об индуктивной связи (если преобладает магнитное поле). Используется также понятие электромагнитной связи. В этом случае между напряженностями электрического и магнитного полей существует строгое соотношение:

$$E/H = 377 \text{ Ом.}$$

Гальваническая связь (рис. 3.1, а):

$$u_{st} = iR + L \frac{di}{dt} \quad \text{— сумма падения напряжения на этих элементах}$$

(напряжение помехи).

Емкостная связь (электрическое поле) (рис. 3.1, б):

C_{12} — паразитная емкость, ее можно минимизировать, но совсем избавиться от нее нельзя.

$$u_{st} = RC_{12} \frac{du}{dt} \quad \text{— напряжение помехи.}$$

Индуктивная связь (магнитное поле) (рис. 3.1, в):

$$u_{st} = M_{12} \frac{di}{dt},$$

где M_{12} — коэффициент взаимоиנדукции.

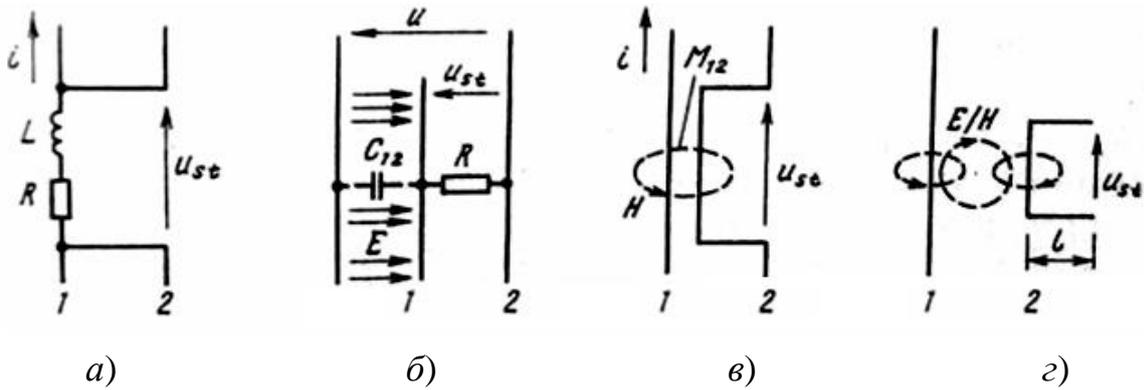


Рис. 3.1. Возможные виды связи между двумя контурами с током: *a* – гальваническая связь (полное сопротивление связи); *б* – емкостная связь (поле E); *в* – индуктивная связь (поле H); *г* – электромагнитная связь (поле E, H)

Электромагнитная связь (рис. 3.1, *г*):

$$u_{st} = E \cdot l_{\text{эфф}},$$

где $l_{\text{эфф}}$ – эффективная длина антенны.

Электромагнитная связь доминирует в дальнем поле, которое характеризуется величиной $x > \lambda/2\pi$, где x – расстояние между контурами; λ – длина волны излучаемой помехи.

$$\lambda = \frac{c}{f},$$

где f – частота, c – скорость света.

Второй, третий и четвертый виды связи являются связями через поле, то есть $x < \lambda/\pi$.

3.2. Гальваническое влияние

Гальваническое влияние через цепи питания и сигнальные контуры

Реальное значение помех U_{st} распределяется в диапазоне от мВ до В, например для рис. 3.2. Напряжение между точками 1 и 2 при длине провода $l = 10$ см, погонной индуктивности провода $0,5$ мкГн/м, сопротивлении $R = 1$ Ом, токи $di = 1$ А и $\Delta t = 100$ нс, получаем:

$$U_{st} = \Delta i R + L \frac{\Delta i}{\Delta t} = 1 + 500 = 501 \text{ мВ.}$$

Таким образом есть два пути уменьшения помехи:

1. Активное сопротивление проводника:

$R = l/\gamma A$, где l – длина проводника, γ – электрическая удельная проводимость материала, A – поперечное сечение проводника.

Для уменьшения помехи проводник должен быть предельно коротким, а его поперечное сечение должно быть большим. При больших скоростях изменения тока начинает проявляться поверхностный скин-эффект и его необходимо учитывать.

2. Для уменьшения L и U_{st} можно сокращать длину проводов, расстояние между ними, а для проводников прямоугольной формы увеличивать отношение сторон прямоугольника (проводник квадратного сечения имеет большую индуктивность, чем проводник прямоугольного сечения при одних и тех же площадях).

Для снижения гальванического влияния необходимо:

– выполнение геометрических рекомендаций о параметрах соединения проводов;

– устранение совместных проводящих соединений между различными контурами, чтобы ток мощного контура не протекал по слаботочному контуру – это реализуется отказом от общих обратных проводников в цепях передачи сигналов от использования корпусов и проводов заземления в качестве проводов сигнальных цепей.

Гальваническое влияние по контурам заземления

Два прибора G_1 и G_2 пространственно разделены друг от друга. Контур полезного сигнала заземлен в двух точках у корпусов приборов. По условиям техники безопасности корпуса приборов должны быть заземлены, а общие шины сигнального контура соединяются с корпусом прибора (рис. 3.2).

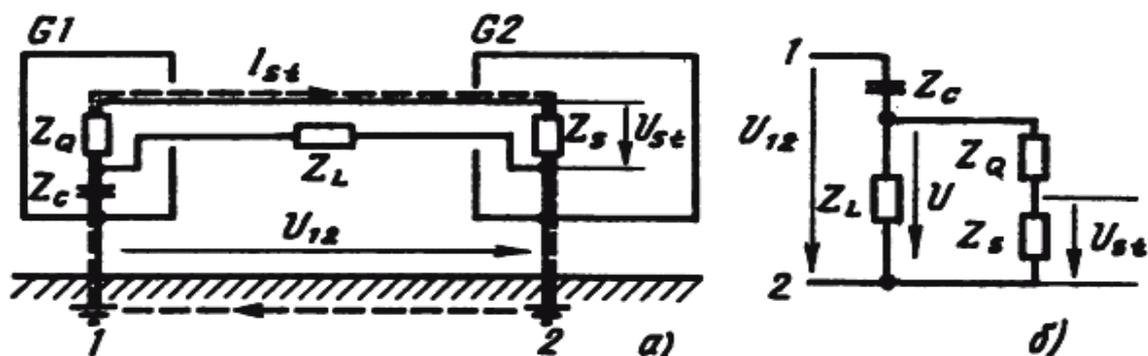


Рис. 3.2. Гальваническое влияние через разомкнутую петлю заземлений:
а – схема устройства; б – схема, поясняющая формирование напряжений помехи U_{st}

Между точками 1 и 2 может возникнуть разность потенциалов из-за тока в контуре заземления (однофазное короткое замыкание, удар молнии). Эта разность потенциалов U_{12} вызывает ток помехи I_{st} , который обуславливает величину помехи U_{st} .

Для снижения этого вида помех необходимо:

1. Уменьшать сопротивление между точками 1 и 2 путем выполнения пола в виде проводящей поверхности или соединением приборов массивными с большим сечением проводниками.

2. Вторым путем уменьшения влияния помехи является уменьшение тока I_{st} путем разделения контуров заземления. При этом общий провод прибора G_1 не соединяют с корпусом прибора, а вместо этого соединения появляется емкостная связь (паразитная) z_c . Эта емкость вызывает уменьшение тока помехи I_{st} .

3. Применение разделительного трансформатора в сигнальном контуре. Эффективно лишь для сигналов с низкой и средней частотой (рис. 3.3).

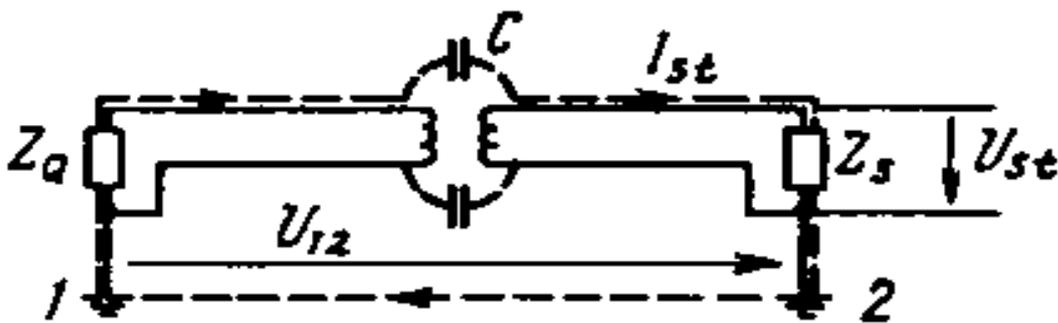


Рис. 3.3. Разделительный трансформатор

4. Применение нейтрализующего трансформатора, при этом обмотки намотаны согласно, магнитные потоки от полезного сигнала компенсируются, а от токов помех суммируются. Защитный эффект пропорционален частоте помехи (рис. 3.4).

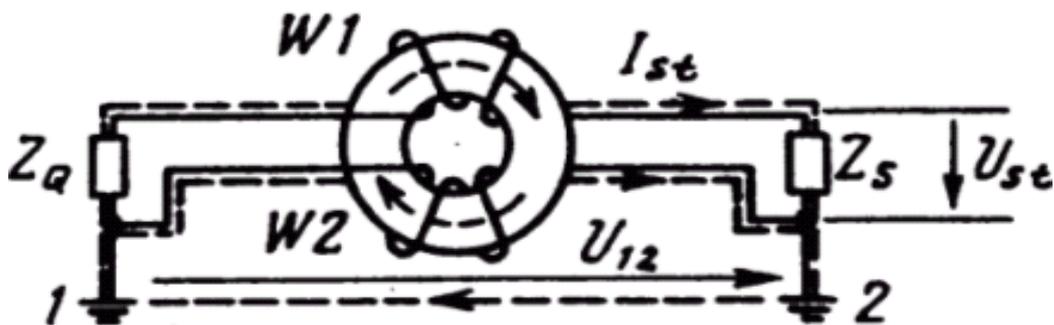


Рис. 3.4. Нейтрализующий трансформатор

5. Применение ферритовых колец. Сигнальный контур проходит внутри ферритового кольца. При этом магнитные поля от сигнала компенсируются, а помехи усиливаются (рис. 3.5).

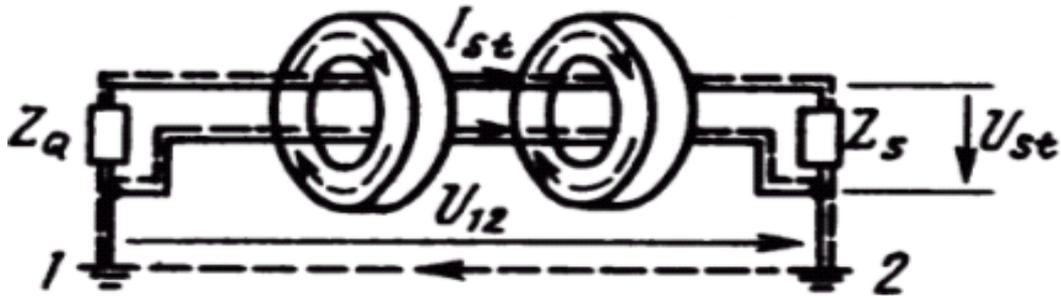


Рис. 3.5. Ферритовые кольца

6. Применение оптической развязки в виде оптоотронной пары. Пригодна лишь для бинарных (цифровых) сигналов, проходная емкость менее 1 пФ, электрическая прочность от 0,5 до 10 кВ (рис. 3.6).

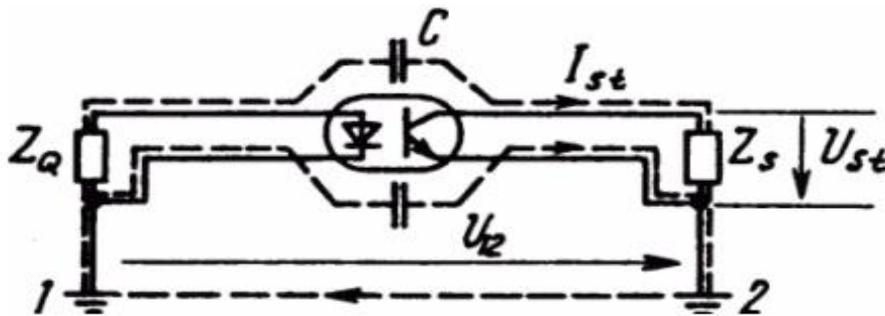


Рис. 3.6. Оптическая развязка

7. Симметричная передача (рис. 3.7). Входы и выходы приборов выполняют симметрично, среднюю точку входа и выхода заземляют. $U_{st} = U_{12} \cdot \frac{z_s - z_Q}{z_s + z_L + z_Q}$, при полной симметрии $U_{st} = 0$.

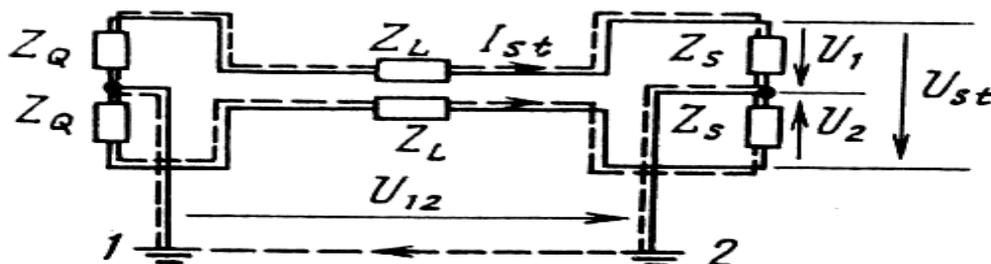


Рис. 3.7. Симметричная передача

3.3. Емкостное влияние

Причиной емкостного влияния могут быть паразитные емкости. Это влияние можно разделить на три случая:

1. Влияющий и испытываемый контуры гальванически разделены.
2. Оба контура имеют общий провод опорного потенциала.
3. Провода токового контура имеют большую емкость относительно земли.

Рассмотрим все эти случаи в отдельности.

Гальванически разделенные контуры

На рис. 3.8, *а* показана упрощенная модель емкостного влияния, а на рис. 3.8, *б* – ее схема замещения; отсюда нетрудно заметить, что напряжение помехи U_{st} равно нулю, если соблюдать условия симметрии $\frac{C_{13}}{C_{23}} = \frac{C_{14}}{C_{24}}$. Это условие можно обеспечить попарным скручиванием проводников (проводов 1 и 2 и проводов 3 и 4).

Вторая возможность для снижения емкостного влияния – применение экранирующих проводов, экраны которых соединяются с одной стороны обратным проводом (см. рис. 3.8, *в*). Экранирующее воздействие тем лучше, чем больше емкость C_{34} проводника относительно экрана по сравнению с емкостями C_{13} и C_{24} .

Контуры с общим проводом системы опорного потенциала

Такие контуры типичны для аналоговых и цифровых схем (рис. 3.9).

Принимая $R_S \gg R_Q$, напряжение помехи равно:

$$U_{st} = R_Q C_{13} \left(\frac{\Delta U}{\Delta t} \right) \cdot \left(1 - e^{-t/R_Q(C_{13} + C_{34})} \right);$$

при $R_Q(C_{13} + C_{34}) \gg \Delta t$, то $U_{st \max} = R_Q C_{13} \cdot \left(\frac{\Delta U}{\Delta t} \right)$.

В этих уравнениях $\Delta U/\Delta t$ представляют собой постоянную скорость линейно возрастающего выходного напряжения элемента A в интервале $0 \leq t \leq \Delta t$.

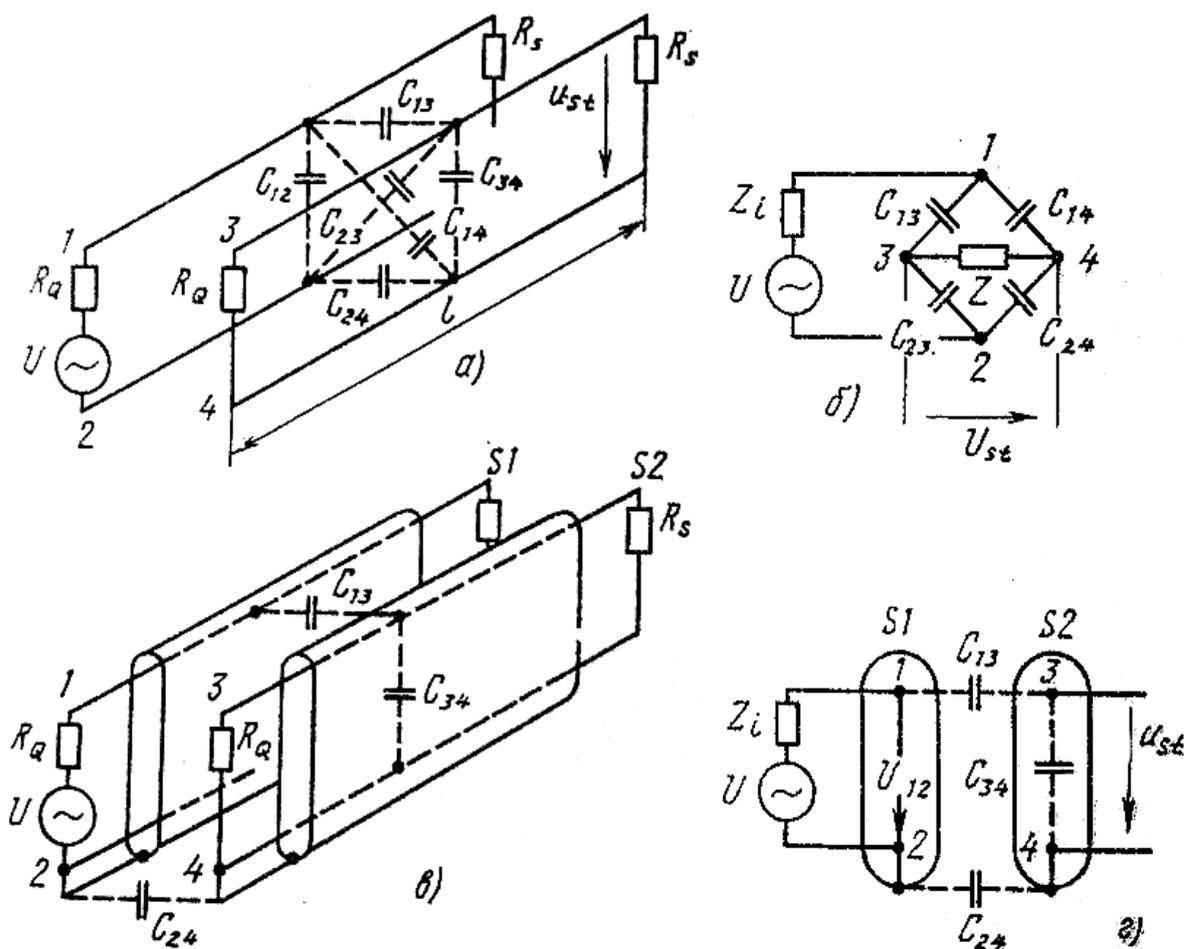


Рис. 3.8. Емкостное влияние между гальванически разделенными контурами:
 а – модель влияния; б – схема замещения; в – модель влияния при экранировании
 обоих контуров; г – схема замещения при наличии экранов

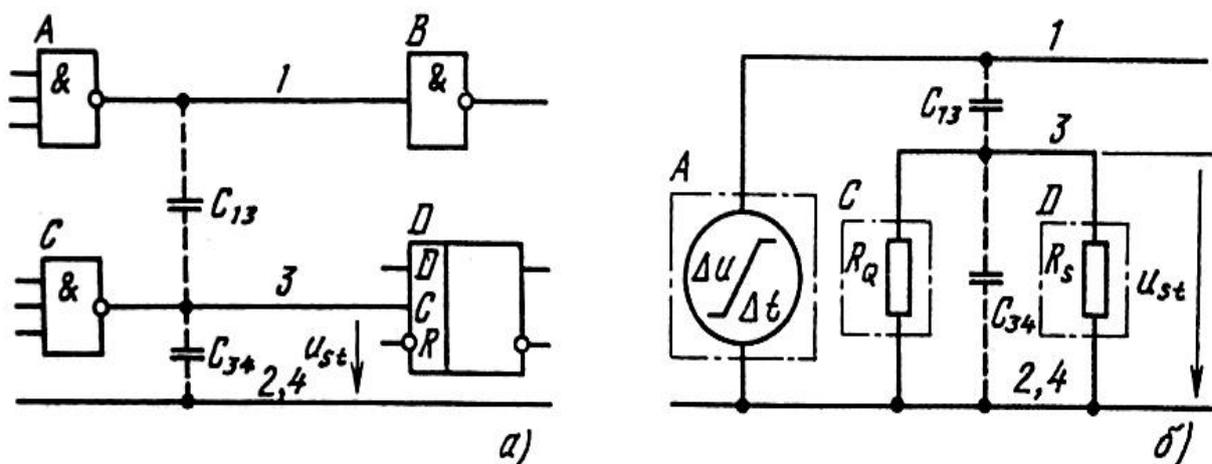


Рис. 3.9. Емкостное влияние контуров с общим проводом системы опорного потенциала 2, 4:
 а – схема с элементами логики; б – схема замещения; 1, 2 – влияющий контур;
 3, 4 – контур, испытывающий влияние; C_{13} – паразитная емкость связи

Емкость связи C_{13} определяется геометрическими размерами и топологией проводников. Два проводника диаметром D и длиной l , расположенных параллельно друг другу, на расстоянии d имеют следующую емкость связи:

$$C_{13} = \frac{\pi \varepsilon_0 \varepsilon_r l}{\ln \left[\frac{d}{D} + \sqrt{\left(\frac{d}{D} \right)^2 - 1} \right]}.$$

Реальное значение $C_{13} = 5 \div 100$ пФ/м. При $C_{13} = 100$ пФ/м, $R_Q = 50$ Ом, $l = 0,1$ м и $\Delta U / \Delta t = 4$ В/нс, $U_{st} = 2$ В.

Мероприятия по снижению емкостного влияния контуров с общим проводом опорного потенциала следующие:

- уменьшение емкости C_{13} достигается уменьшением длины проводов, диаметра проводов, увеличением расстояния d , применением изоляционных проводов и печатных плат;
- увеличение емкости C_{34} путем размещения сигнальных проводов между проводами системы опорного потенциала;
- выполнение предельно низкоомными токовых контуров, подверженных емкостному влиянию;
- ограничение скорости изменения напряжения $\Delta U / \Delta t$, которое должно быть не выше, чем требуемая для функционирования (выбором микросхем).

Токовый контур с большой емкостью относительно земли

В длинных заземленных с одной стороны сигнальных линиях при появлении изменяющегося во времени напряжения ΔU протекает ток помехи i_{st} , обусловленный емкостями C_1 и C_2 , и ΔU преобразуется в противофазное напряжение U_{st} , суммирующееся с напряжением сигнала, поступающего от источника (рис 3.10): $U_{st} = \Delta U / \sqrt{1 + 1 / (2\pi \cdot f \cdot C_1 \cdot R_Q)^2}$.

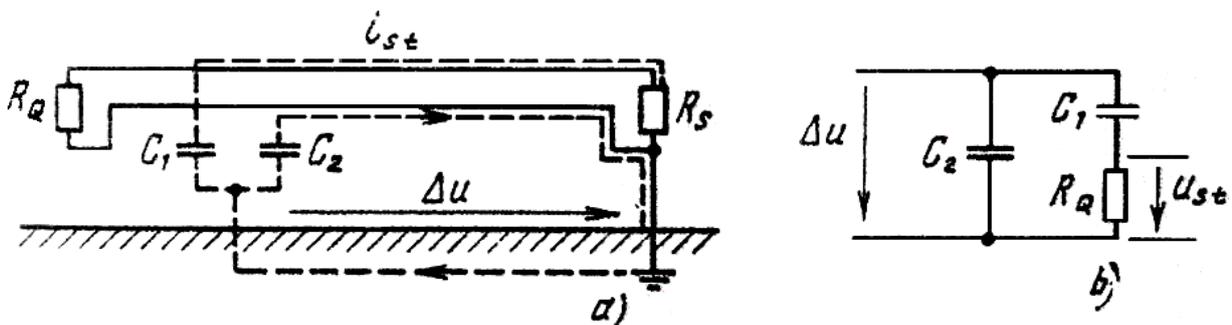


Рис. 3.10. Односторонне заземленная линия с большими емкостями на землю: C_1 и C_2 (а) и ее схема замещения (б) при $R_S \gg R_Q$; R_S – сопротивление помехи

Средства борьбы с помехами этого вида сводятся к:

- устранению соединения с землей приемной ступени;
- выполнению сигнального контура предельно низкоомным;
- экранированию сигнальной линии;
- введению на приемном конце элементов, разделяющих потенциалы (реле, оптическая развязка, разделительный трансформатор).

3.4. Индуктивная связь

Индуктивное влияние обусловлено паразитным потокоцеплением между контурами (рис. 3.11).

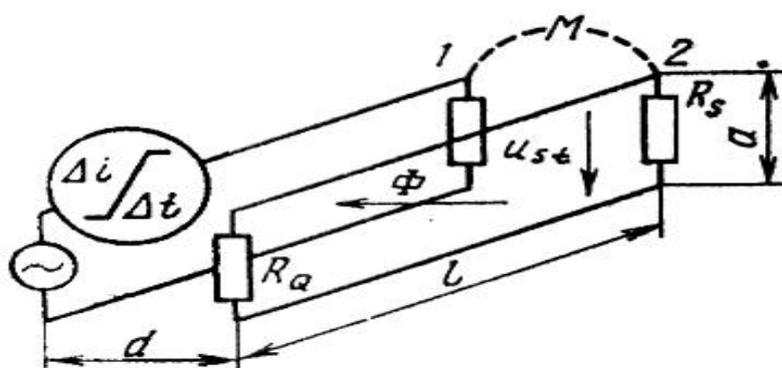


Рис. 3.11. Принципиальная схема двух токовых контуров 1 и 2 с расстоянием d между ними

Если в контуре 1 имеет место быстрое изменение тока, например при коммутационных переключениях, то в контуре 2 индуцируется напряжение помехи:

$$u_{st} = M_{12} \frac{\Delta i}{\Delta t} = - \frac{\Delta \Phi}{\Delta t},$$

где M_{12} – коэффициент взаимной индукции;

Φ – магнитный поток, пронизывающий контур 2:

$$M_{12} = \frac{\mu_0 l}{2\pi} \ln \left[1 + \left(\frac{a}{d} \right)^2 \right].$$

Взаимная индуктивность зависит от конфигурации и размеров контуров. Погонная взаимная индуктивность в зависимости от отношения l/d может быть получена из табличных графиков. При $l = 1$ м, $l/d = 0,1$ и $\Delta i/\Delta t = 2,3$ А/с, получаем напряжение помехи $U_{st} = 2,3$ В.

Мероприятия по уменьшению индуктированных напряжений предусматривают:

1. Уменьшение M_{12} за счет уменьшения площади контура, испытывающего воздействие, то есть уменьшение l и a и увеличение d .

2. Уменьшение скорости изменения во времени потока $\Delta\Phi/\Delta t$ при помощи короткозамкнутой петли, расположенной непосредственно у сигнального контура K . Короткозамкнутый контур испытывает большее влияние магнитного поля вследствие меньшего внутреннего сопротивления. В результате ток помехи i_{st} в сигнальном контуре уменьшается, по сравнению с отсутствием контура K .

3. Расположение контуров 1 и 2 ортогонально направлениям силовых линий магнитного поля.

4. Компенсация индуктируемого в контуре 2 напряжения путем скрутки проводов контура 2 (свитая пара).

5. Экранирование кабелей.

3.5. Электромагнитное влияние

Причиной воздействия излучения являются электромагнитные волны, излучаемые токовым контуром и распространяющиеся в окружающем пространстве со скоростью света $C = 300000$ км/с (рис. 3.12, а). Между длиной волны λ и частотой f существует известная связь:

$$\lambda = C/f.$$

При $x > \lambda/2\pi$ или же $x > C/2\pi f$ соблюдаются условия дальнего поля. Эти условия необходимо учитывать при частоте 1 МГц на расстоянии $x = 50$ м, а при частоте 1 ГГц – на расстоянии $x = 5$ см от источника (при частоте 10 МГц, $x = 5$ м, а при частоте 100 МГц, $x = 0,5$ м). Напряженность электрического поля на расстоянии x от источника мощностью P может быть определена из соотношения, В/м:

$$E_x = \frac{0,3\sqrt{P}}{x}.$$

Например, при $P = 100$ Вт и $x = 3$ м, $E_x = 10$ В/м.

При воздействии электромагнитной волны на электропроводные объекты вследствие антенного эффекта возникают высокочастотные напряжения, непосредственно или косвенно являющиеся помехами в сигнальных контурах. Приблизительно, индуктируемая ЭДС в антенне рассчитывается следующим образом:

$$U_{st} = E_x l_{eff},$$

где l_{eff} – эффективная длина антенны.

Длина l_{eff} зависит от размеров устройства, обладающего антенными свойствами (D_L и l на рис. 3.12, а) и длины падающей волны. Для конкретных объектов она определена в нормах DIN/VDE0848, ч. 1. Например, при частоте $f = 300$ МГц, $E_x = 10$ В/см, $l = 0,1$ м, $l_{eff} = 0,2$ м, напряжение $U_{st} = 2$ В.

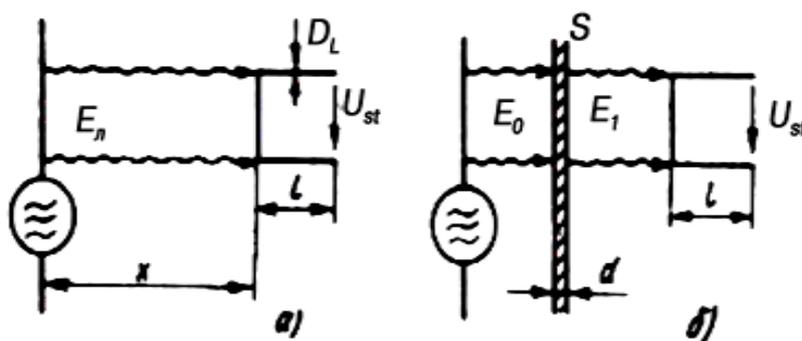


Рис. 3.12. Электромагнитное влияние на контур длиной l :
а – без экрана; б – с экраном S толщиной d

Защитой от электромагнитного поля как для ослабления излучения, так и для уменьшения проникновения служат экранирующие стенки, устанавливаемые между источником и приемником (рис. 3.12, б). Такой стенкой напряженность падающего поля уменьшается от значения E_0 до значения E_1 . Это обусловлено, с одной стороны, поглощением энергии поля в материале экрана, а с другой – отражением падающей волны. Затухание зависит от толщины экрана, электропроводности и магнитной проницаемости материала, частоты излучения.

Контрольные вопросы

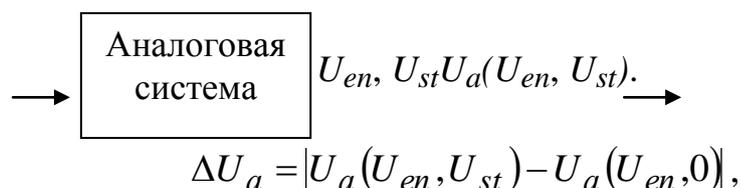
1. Чему равно отношение напряженности электрического и магнитного поля?
2. Что необходимо для снижения гальванического влияния?
3. Перечислите мероприятия по снижению емкостного влияния контуров с общим проводом опорного потенциала.
4. Перечислите мероприятия по изменению индуктивных напряжений.
5. С какой скоростью распространяются в окружающем пространстве электромагнитные волны?
6. Как рассчитывается индуцируемая ЭДС в антенне?

ТЕМА 4. ПОМЕХОУСТОЙЧИВОСТЬ ЧУВСТВИТЕЛЬНЫХ ЭЛЕМЕНТОВ УСТРОЙСТВ АВТОМАТИКИ

4.1. Помехоустойчивость аналоговых систем

Помехоустойчивость – способность противостоять воздействиям, вызывающим обратимые нарушения. Это свойство чувствительного элемента нормально работать при воздействии помехи. Количественно помехоустойчивость рассматриваемого объекта задается в виде допустимого воздействия в форме амплитуды импульса напряжения, напряженности поля, граничной энергии, стандартизированного испытательного воздействия и т.д. Если при воздействии, превышающем предел помехоустойчивости, не происходит разрушение объекта, то наблюдается обратимое нарушение функционирования. После исчезновения помехи или после повторного включения рассматриваемое устройство может работать нормально, ему не требуется ремонт или замена деталей или группы элементов.

Помехоустойчивость аналоговых систем характеризуется границами абсолютного отклонения:



где U_{en} – напряжение на входе аналоговой системы;

U_{st} – напряжение помехи на входе аналоговой системы;

U_a – выходной сигнал аналоговой системы.

Для классификации помехоустойчивости вводят следующую относительную величину:

$$s = 20 \lg \left| \frac{U_a(U_{en}, 0)}{\Delta U_a} \right|.$$

Техническое значение s для телефонных систем – 30 дБ, для телевидения – 48 дБ и для радиовещания 60 дБ.

4.2. Помехоустойчивость логических элементов

К дискретным системам относятся импульсные и цифровые системы.

Для определения импульсной помехоустойчивости транзисторных элементов необходимо знать реакцию элемента на импульсное воздействие по входу. Так как помехи, воздействующие на вход логического элемента,

могут иметь различную амплитуду, длительность, частоту и т.д., то возникает задача определения зависимости выходного сигнала от характеристик входного сигнала. Предлагается метод определения амплитудной характеристики передачи транзисторных логических элементов с учетом длительности, частоты и амплитуды входного сигнала, проводится анализ импульсной помехоустойчивости резистивно-транзисторного логического (РТЛ) элемента.

Для полупроводниковых элементов вводят характеристику помехоустойчивости в виде изображенного на рис. 4.1 графика.

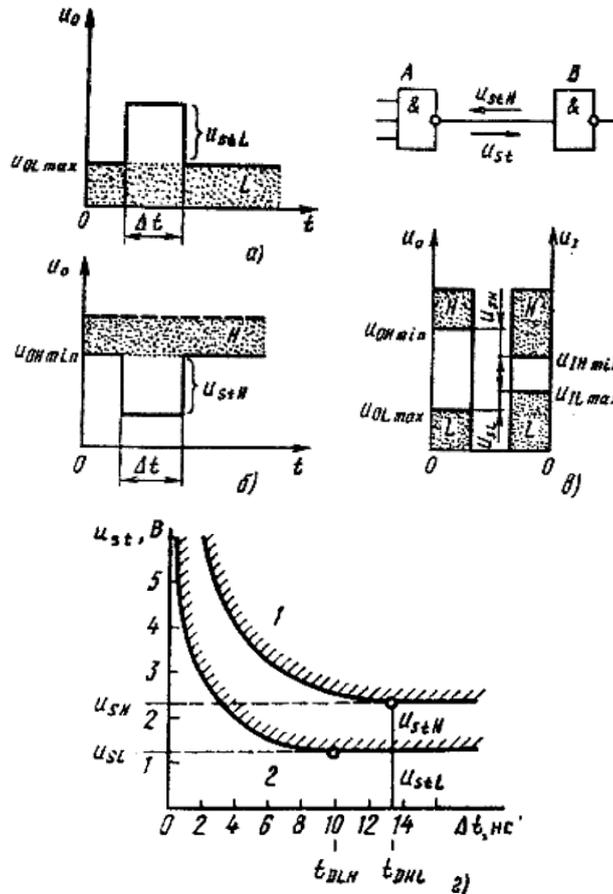


Рис. 4.1. Пояснение помехоустойчивости дискретных систем:
 H, L – потенциальные области уровней высокого и низкого состояний;
 U_0 – выходное напряжение схемы A ; U_1 – входное напряжение схемы B ;
 $(U_{QH\min} - U_{QL\max}), (U_{1H\min} - U_{1L\max})$ – запрещенные области;
 1 – область неустойчивости; 2 – область устойчивости;
 a – аналоговая система; b – дискретная система; v – логическая матрица;
 z – характеристики дискретной системы

4.3. Требования к помехоустойчивости

Для обеспечения помехоустойчивости приборов и их элементов необходимо гарантировать их работоспособность. С этой целью выделяется три класса требований к электронным устройствам: А1, А2, А3.

A1 – повышенные требования к устройствам управления технологическими процессами.

A2 – нормальные требования к персональным компьютерам и сложным приборам домашнего обихода.

A3 – пониженные требования к простейшим приборам домашнего обихода.

Прибор, кабель, линия – напряжение пробоя между корпусом и землей достигает $1 \div 8$ кВ, а напряжение пробоя между входными клеммами может варьироваться от 50 до 5 кВ.

При обеспечении внутренней помехоустойчивости S_E при заданных климатических условиях необходимо гарантировать работоспособность рассматриваемого устройства. Это требование понятно и не подлежит дальнейшему обсуждению. Напротив, требования к внешней помехоустойчивости связаны с экономическими проблемами: с одной стороны, необходимо учитывать имеющиеся или ожидаемые в данном месте электромагнитные условия, а с другой – риск и последствия, связанные с возможной электромагнитной несовместимостью.

Контрольные вопросы

1. Что называют помехоустойчивостью?
2. Что необходимо знать для определения импульсной помехоустойчивости транзисторных элементов?
3. Соблюдение каких требований обеспечивает помехоустойчивость приборов и их элементов?
4. Какая величина вводится для классификации помехоустойчивости?
5. Чем руководствуются при построении устройств цифровой техники на транзисторных логических элементах?

ТЕМА 5. ПАССИВНЫЕ ПОМЕХОПОДАВЛЯЮЩИЕ И ЗАЩИТНЫЕ КОМПОНЕНТЫ

5.1. Фильтры

Помехоподавляющие фильтры обеспечивают затухание поступающей по проводам помехи. Их применение предполагает, что спектральные составляющие полезного сигнала и помехи отличаются друг от друга, при этом затухание помехи достигается делением напряжения (рис. 5.1).

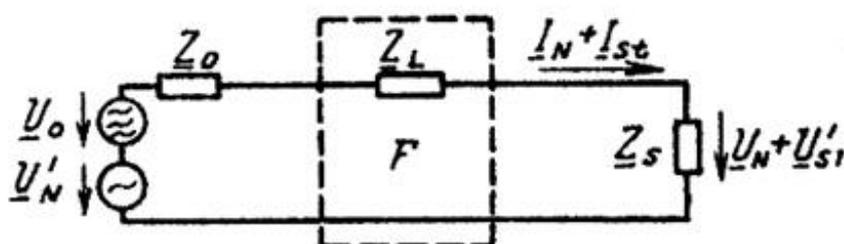


Рис. 5.1. Схема замещения участка цепи, по которому происходит передача полезного сигнала u'_N и помехи u_0

Напряжение помехи в нагрузке определяется следующим образом:

$$\underline{u}'_{st} = \underline{u}_0 \frac{z_S}{z_Q + z_L + z_S},$$

где F – фильтр низкой частоты, собственное сопротивление которого z_L мало для полезного сигнала (u'_N) и велико для помехи (u_0).

Коэффициент затухания фильтра оценивается в виде логарифма отношения напряжений и выражается в децибелах и зависит от параметров фильтра, от полных сопротивлений источника и от приемника сигналов:

$$a_e = 20 \lg \left| \frac{\underline{u}_{st}}{\underline{u}'_{st}} \right|,$$

где \underline{u}_{st} – напряжение помехи при отсутствии фильтра.

На рис. 5.2 приведено распределение сопротивления электроэнергетических сетей по частоте. Основными составными элементами фильтров являются катушки индуктивности и конденсаторы.

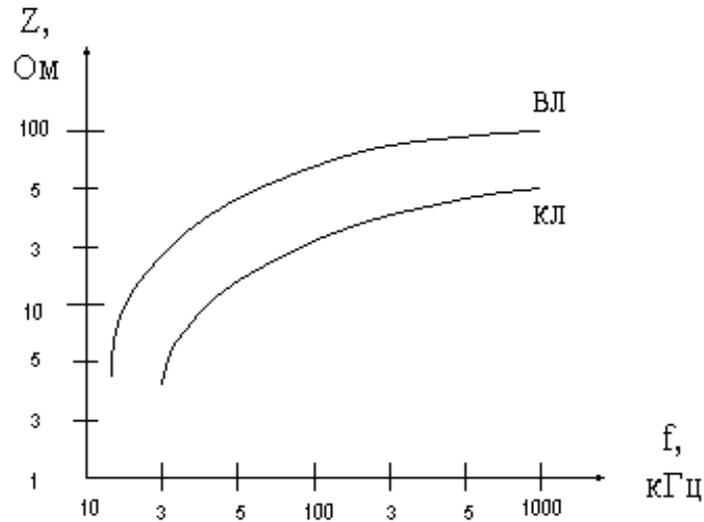


Рис. 5.2. Распределение по частоте сопротивления электроэнергетических сетей:
 ВЛ – жилые территории с воздушными линиями электропередач;
 КЛ – жилые территории с кабельными линиями

При использовании катушек индуктивности и конденсаторов для фильтрации следует иметь в виду, что любой конденсатор наряду с емкостью C обладает паразитной индуктивностью L_p , зависящей от длины выводов конденсатора. Она особенно велика у двухполюсных конденсаторов и мала у коаксиальных конденсаторов-вводов. Каждая катушка индуктивности в дополнение к ее индуктивности L имеет паразитную емкость C_p . Поэтому для кажущегося сопротивления существует зависимость от частоты, представленная на рис. 5.3, обладающая резонансной точкой, в отличие от идеальной характеристики.

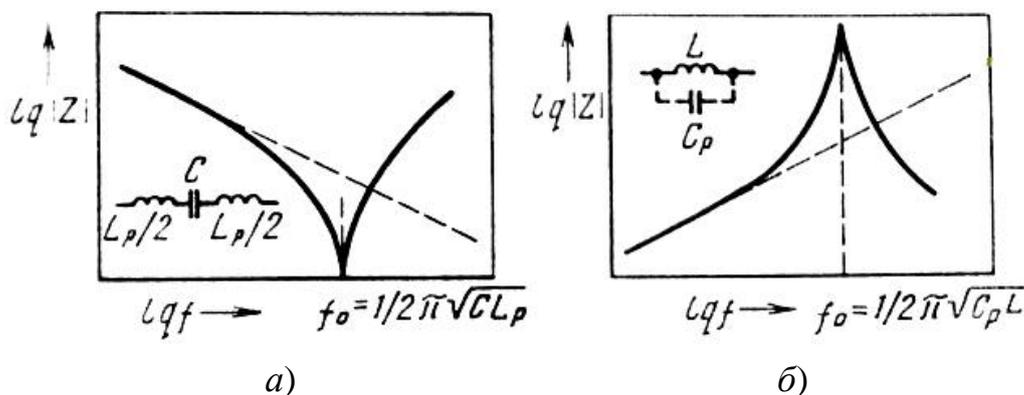


Рис. 5.3. Частотные зависимости кажущихся сопротивлений конденсатора (а) и катушки индуктивности (б)

Сведения о собственных резонансных частотах конденсаторов, применяемых для подавления помех, приведены на рис. 5.4.

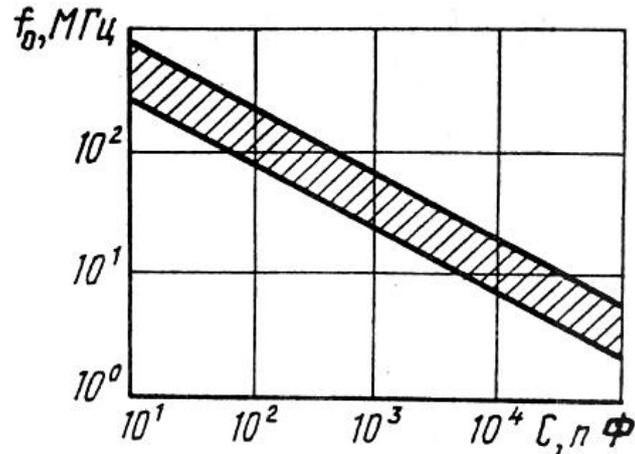


Рис. 5.4. Значения собственных резонансных частот f_0 помехоподавляющих конденсаторов в зависимости от их емкости C

Пренебрегая активной составляющей, можно для зависимостей на рис. 5.3 использовать следующие выражения.

Для конденсаторов (рис. 5.3, а) кажущееся сопротивление рассчитывается по формуле:

$$\underline{Z} = \frac{1}{j\omega C} + j\omega L_P. \quad (5.1)$$

Идеальная характеристика при отсутствии L_P :

$$\lg|\underline{Z}| = \lg(1/2\pi C) - \lg f. \quad (5.2)$$

Реальная характеристика с учетом L_P :

$$\lg|\underline{Z}| = \lg \left| \frac{(f/f_0)^2 - 1}{2\pi f C} \right|, \quad (5.3)$$

где $f_0 = 1/2\pi\sqrt{CL_P}$.

Для катушек индуктивности (рис. 5.3, б) кажущееся сопротивление:

$$\underline{Z} = \frac{j\omega L \frac{1}{j\omega C_P}}{j\omega L + \frac{1}{j\omega C_P}}. \quad (5.4)$$

Идеальная характеристика при отсутствии C_P :

$$\lg|\underline{Z}| = \lg 2\pi L + \lg f. \quad (5.5)$$

Реальная характеристика с учетом C_P :

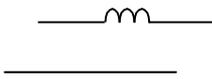
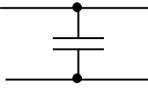
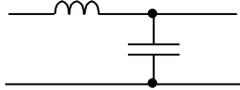
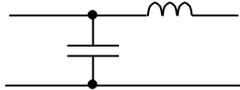
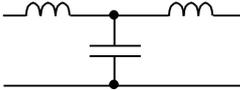
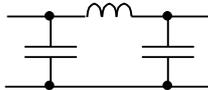
$$\lg|Z| = \lg \left| \frac{2\pi aL}{1 - (f/f_0)^2} \right|. \quad (5.6)$$

Здесь $f_0 = 1/2\pi\sqrt{C_P L}$.

В табл. 5.1 приведены рекомендации по выбору структуры фильтра.

Таблица 5.1

Рекомендации по выбору структуры фильтра

Сопротивление источника	Схема фильтра	Сопротивление приемника
Мало		Мало
Велико		Велико
Мало		Велико
Велико		Мало
Мало, неизвестно		Мало, неизвестно
Велико, неизвестно		Велико, неизвестно

5.2. Сетевые фильтры и фильтры сигнальных цепей

Сетевые фильтры и фильтры сигнальных цепей представляют собой фильтры низких частот, свободно пропускающие напряжение сети (полезный сигнал) и фильтрующие импульсные помехи.

Сетевой фильтр содержит конденсатор C_X для демпфирования симметричных напряжений помехи и два конденсатора C_Y для отвода асимметричных токов на помехи для сигнальных цепей и линий передачи данных (рис. 5.5).

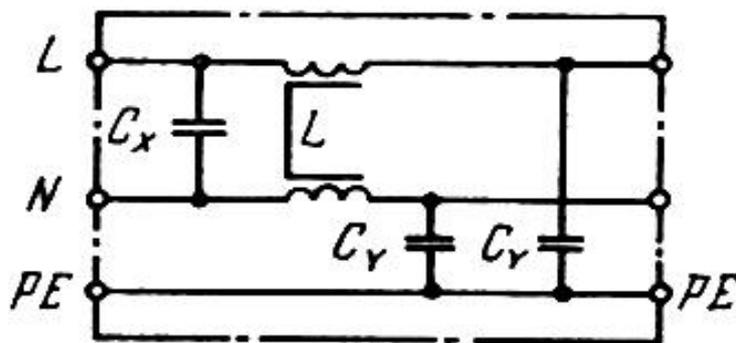


Рис. 5.5. Пример сетевого фильтра:
 $C_x = 0,1$ мкФ, $C_y = 3$ нФ, $L = 2\div 4$ мГн,
 частота срезаемого фильтра равна 500 кГц

Фильтры сигнальных цепей отличаются от сетевых тем, что они рассчитаны на полезные сигналы, имеющие широкий спектр частот в высокочастотном диапазоне спектра. Применяют трех- и четырехзвенные фильтры, которые обладают крутизной затухания до 100 дБ/кГц. Такие фильтры выполняются в виде микросхем.

5.3. Ограничители перенапряжения

Ограничители перенапряжения (ОПН) – специальные элементы, которые служат для снижения перенапряжений в электроэнергетических и информационных системах, вызванных молнией, разрядами статического электричества или коммутационными процессами. Принцип действия основан на нелинейной вольт-амперной характеристике.

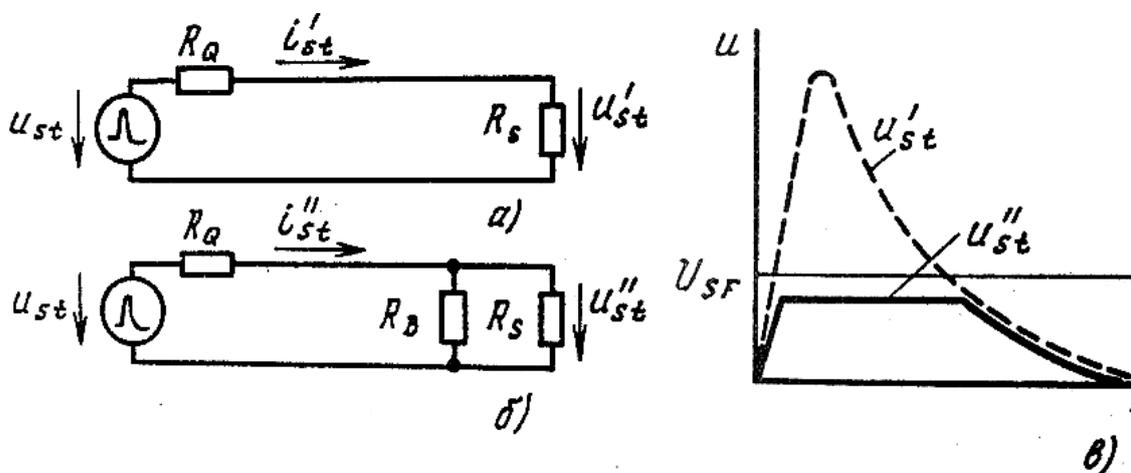


Рис. 5.6. Ограничение перенапряжений при помощи нелинейного сопротивления R_B :
 а – схема беззащиты; б – схема с защитой; в – изменение напряжения во времени;
 U_{SF} – импульсная прочность входной цепи

Принцип действия ограничителей базируется на использовании резисторов R_B , обладающих нелинейной вольт-амперной характеристикой (рис. 5.6). В конкретных случаях она выбирается такой, чтобы в допустимых пределах изменения рабочего напряжения имело место очень большое сопротивление, а превышение заданного напряжения – очень малое. Вместе с сопротивлением источника помехи ограничитель образует схему нелинейного делителя напряжения (рис. 5.6, б), который снижает переходное перенапряжение до допустимого значения, не превышающего импульсную электрическую прочность защищаемого элемента (рис. 5.6, в):

$$U_{st}'' = U_{st} - i_{st}'' R_Q. \quad (5.7)$$

Защитные элементы:

- разрядники (воздушные и газонаполненные);
- воздушные защитные промежутки;
- варисторы (переменные резисторы) – элементы с асимметричной вольт-амперной характеристикой;
- кремниевые лавинные диоды.

5.4. Защитные элементы для линии передачи информации

Эти элементы должны обладать способностью, с одной стороны, отводить сильные импульсные токи (до 10 кА), а с другой – быстро ограничивать перенапряжения, близкие к рабочим напряжениям. Это реализуется многоступенчатой защитой (рис. 5.7).

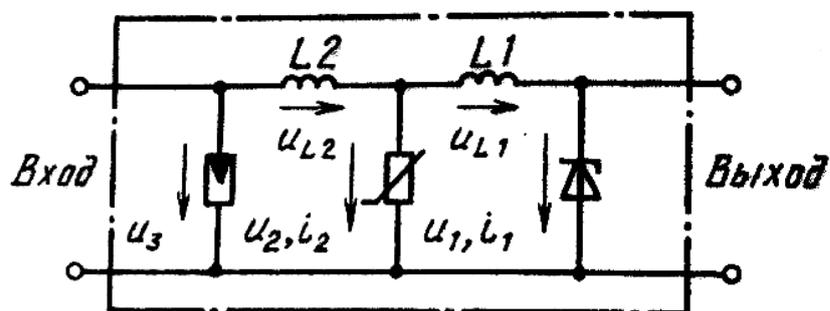


Рис. 5.7. Трехступенчатый ОПН с газонаполненным разрядником, варистором (грубая защита) и стабилитроном (тонкая защита)

При появлении импульса перенапряжения сначала срабатывает стабилитрон, ток которого вызывает падение напряжения на индуктивности L_1 , что приводит к срабатыванию варистора и затем газонаполненного

разрядника. Напряжение срабатывания стабилитрона – 35 В, варистора – 90 В, газонаполненного разрядника – 600 В. Конструктивно многоступенчатые защиты встраиваются в корпуса приборов, в стандартные шины и устройства европейского формата.

Защитные элементы для линий передачи данных должны обладать малой продольной индуктивностью и поперечной емкостью, чтобы не ухудшать частотные свойства линии, поэтому в них исключается использование индуктивностей и варисторов.

Схема, применяемая для передачи данных с малым ослаблением сигналов в области высоких частот, показана на рис. 5.8. Эта схема позволяет защищать от импульсов перенапряжения со скоростью изменения напряжения 1 кВ/мкс.

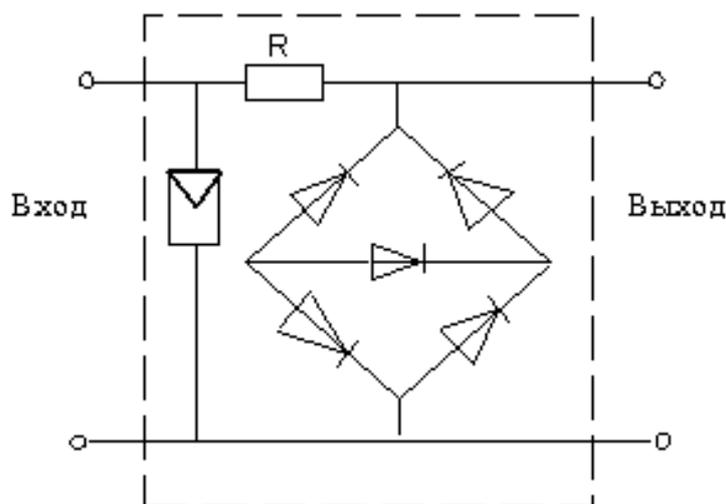


Рис. 5.8. Блок защиты от перенапряжений для коаксиальных линий

Это защитное устройство при применении диодов с малыми собственными емкостями позволяет пропускать частоты до 100 МГц.

5.5. Экранирование для защиты от влияния помех

Экран служит для ослабления электрических, магнитных и электромагнитных полей. Чтобы исключить их проникновение в электронные элементы, кабели и здания, и наоборот, чтобы подавить исходящие из промышленных средств и устройств помехи, обусловленные полями.

Эффективность экранирования зависит от частоты поля, электропроводности и магнитной проницаемости материала экрана, конфигурации и размера экрана.

1. Степень ослабления поля от частоты прямо пропорциональная: чем выше частота, тем больше ослабление поля. В первую очередь это можно объяснить влиянием скин-эффекта; глубина проникновения поля в проводящий материал обратно пропорциональна частоте.

2. Электропроводности, ее параметры также определяют скин-эффект: чем больше электропроводность, тем меньше глубина проникновения поля.

3. Для экрана всегда применяют проводящие материалы. Для экранирования используют как немагнитные материалы (алюминий, медь), так и ферромагнитные материалы. Экранирующее действие немагнитных материалов происходит из-за магнитных полей, созданных вихревыми токами. При этом постоянное магнитное поле совсем не экранируется, а степень экранирования повышается с частотой магнитного поля. Электрические поля немагнитными экранами ослабляются лучше, чем магнитными экранами. Экраны из ферромагнитных материалов ослабляют электрические поля хуже, чем экраны из немагнитных материалов, однако они вызывают ослабление постоянных магнитных полей.

4. Конфигурация. Эффективность экранирования зависит от дефектов и отверстий (трещин, кабельных вводов, отверстий для обслуживания и т.п.), которые выполняют роль магнитных и электрических антенн. По кромкам отверстий текут электрические токи, которые затекают внутрь экрана и вызывают наводку помехи.

5. Размеры экрана. В зависимости от них внутри экранирующего объема могут возникать резонансные эффекты, как в объемном резонаторе.

Контрольные вопросы

1. Назовите основные составные элементы фильтров.
2. Чем отличаются фильтры сигнальных цепей от сетевых?
3. В чем заключается принцип действия ОПН?
4. Какими свойствами должны обладать защитные элементы?
5. С какой целью выполняют экранирование?

ТЕМА 6. МЕРОПРИЯТИЯ ПО ОБЕСПЕЧЕНИЮ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ УСТРОЙСТВ И ПРИБОРОВ

При изготовлении приборов в процессе проектирования и создания устройств необходимо обеспечивать электромагнитную совместимость, то есть путем реализации соответствующих мероприятий гарантировать, что при вводе в эксплуатацию устройства не потребуются дорогостоящие дополнительные работы по совершенствованию, а при дальнейшей эксплуатации не возникнут ограничения функционирования, выходы из строя, повреждения или опасные режимы, вызванные недостаточной электромагнитной совместимостью.

Это обеспечивается:

- использованием промышленных элементов, показатели которых (помехоустойчивость, эмиссия помех) соответствует ожидаемым параметрам окружающей среды. А для промышленных устройств большой мощности – требуемым уровням совместимости в точке присоединения к сети;

- целесообразным выбором и размещением измерительных, управляющих и регулирующих приборов, соединений между ними и коммуникационных элементов с учетом имеющихся в устройстве электроэнергетических элементов (коммутационных, трансформаторных, электротехнологических, подъемных механизмов, лифтов и т.д.);

- проектированием здания (его конструкции, расположения помещений, экранирования помещений и здания, кабельных трасс);

- реализацией ряда дополнительных технических и организационных мероприятий.

Все мероприятия подразделяются на технические и организационные.

6.1. Технические мероприятия

Система электропитания

При создании системы электропитания технологических установок или устройств автоматизации, удовлетворяющей требованиям электромагнитной совместимости, необходимо позаботиться о том, чтобы:

- работу устройства не нарушали приходящие из сети помехи, вызванные спадами и исчезновением, быстрыми и медленными колебаниями напряжения, переходными процессами, несимметрией сети, гармониками и субгармониками в сетевом напряжении, отклонениями частоты от номинальной;

- не нарушали нормальную работу приборов автоматизации электроэнергетические промышленные устройства как через систему электропитания, так и из-за влияния магнитного поля;
- обратное воздействие элементов устройства с большой мощностью, таких как дуговые печи, сварочные агрегаты, прессы, пилорамы и другие, не вызвало недопустимого снижения качества напряжения сети, а эмиссия высокочастотных помех не превышала допустимой;
- не было взаимных помех электронных промышленных устройств через систему питания.

Прокладка кабелей

Имеющиеся в устройстве электронные и электрические, часто удаленные друг от друга, компоненты связаны с сетью проводами питания, а между собой – сигнальными проводами, линиями управления и передачи данных, в соответствии с предназначением устройства. Инфраструктура прокладки кабелей, удовлетворяющая требованиям обеспечения электромагнитной совместимости, должна:

- не вызывать нарушений нормальной работы, вызванных внешними помехами (токами молнии, замыканиями на землю, полями);
- предотвращать влияние силовых кабелей энергоемких потребителей (приводов с выпрямителями, сварочных аппаратов и т.д.) на измерительные, регулирующие, управляющие устройства через их систему питания, сигнальные провода, линии управления и передачи данных;
- исключать взаимные влияния сигнальных проводов, линий управления и передачи данных.

Заземляющие устройства

В устройствах автоматизации со многими приборами или шкафами взаимные помехи будут наименьшими, если все корпуса и проводящие детали здания и устройства находятся под одним напряжением. Для этого приборы автоматизации подходящим образом соединяют с заземляющим устройством, требующимся также для защиты от напряжения прикосновения, грозовых и коммутационных перенапряжений, а также для рабочего заземления электротехнических установок.

Для заземления электронных промышленных средств в устройствах автоматизации применяют в основном два вида соединений заземляющих проводов: соединение их в звезду или присоединение к плоскому заземлителю.

Ограничение грозových и коммутационных перенапряжений

Опасность, связанная с грозowymi разрядами и коммутациями в сети, 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, сооруженной наподобие клетки Фарадея, по которой ток молнии протекает по многим параллельным путям с учетом фундамента и металлических элементов фасада здания.

Внутренняя грозозащита направлена на то, чтобы остаточные воздействия на электронные приборы снизить до допустимых. Они одновременно защищают промышленные электронные приборы и от других помех, например, вызываемых находящимися вблизи электроэнергетическими и электротехнологическими устройствами, а также обусловленных 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 коробов, 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 земель через ограничивающие перенапряжения устройства.

Мероприятия по снижению влияния разрядов статического электричества

Из-за разрядов статического электричества с тела человека или передвижного устройства может наступить повреждение или нарушение функционирования электронных приборов на рабочих местах, пультах управления, в диспетчерских или компьютерных залах при работе с приборами или сервисном обслуживании. В комфортабельно

оборудованных помещениях с синтетическими непроводящими покрытиями полов и с покрытыми пластиком предметами устройства такая опасность особенно велика. Меры по устранению этой опасности 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 $10^5 \div 10^8$ 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.

Устранение влияния электромагнитного излучения

Электромагнитное излучение может быть вызвано радио- и телепередатчиками, устройствами дистанционного управления, радиопереговорными приборами, а также электротехнологическими устройствами, дугами в отключающих аппаратах, молнией, разрядами статического электричества и воздействовать на измерительные, управляющие процессами регулирующие приборы и т.д.

Достаточная защита электронных приборов от излучения обычно обеспечивается металлическими шкафами, пультами, корпусами, в которых электронные устройства находятся в рабочем режиме.

Защита от влияния выпрямительных устройств

При работе выпрямительных устройств вследствие процессов коммутации оказывается влияние на сеть в виде наложенных на нормальное напряжение напряжений помех с высокой di/dt , а также сетевых токов, содержащих составляющие с большими di/dt . Выпрямительные устройства в комбинации с требуемыми для их работы схемами управления могут создавать высокочастотные помехи в диапазоне мегагерц. Поэтому необходимо:

- информационные линии располагать подальше от приводов питания, которые идут к выпрямительному устройству;

- использовать схемы выпрямления, мало влияющие на сеть;
- целесообразно выбирать места присоединения выпрямительного устройства к сети;
- оптимально выбирать параметры сглаживающих реакторов;
- управление выпрямительным устройством, при котором воздействие на сеть минимально;
- правильно выбирать, размещать и определять параметры компенсации реактивной мощности (шунтирующие контуры, компенсационные конденсаторы, выпрямители и т. д.).

Защита от влияния электромагнита

Приборы, содержащие такие электромагнитные системы, как реле, пневматические контакторы, электромагниты, вибраторы, гидравлические клапаны, магнитные вентили, тормозные муфты, амортизаторы и другие аналогичные устройства, совместно с проводами питания могут создавать, особенно при отключении, индуктированные перенапряжения имеющие высокие скорости нарастания напряжения ($\Delta u_s / \Delta t = 0,1 \div 20 \text{ В/нс}$) и во много раз превышающие рабочее напряжение ($u_{s\max} = 100 \div 2000 \text{ В}$).

Если такой прибор функционально работает совместно с электронным устройством, то ожидаемые перенапряжения при отключении требуется ограничить при помощи соответствующих защитных схем, по возможности непосредственно в месте их возникновения. Можно сформулировать следующие рекомендации по применению помехозащитных устройств электромагнитов.

Для электромагнитов постоянного тока:

- если время обратного хода электромагнита не играет роли, то лучше всего для защиты использовать диод;
- если время реакции защищаемого устройства должно быть по возможности малым, то преимущественны комбинации с металло-оксидным варистором специальных ограничительных стабилизаторов или RC-цепей.

Для электромагнитов переменного тока:

- лучше использовать RC-цепи. RC-цепи компактны, в стационарном режиме компенсируют реактивную мощность и гарантируют при самом неблагоприятном моменте коммутации и достаточном ограничении перенапряжений времени обратного хода такие же, как и при их отсутствии.

6.2. Организационные мероприятия

Организационные мероприятия включают в себя предписания, такие как ношение экранирующей защитной одежды вблизи интенсивных источников излучения, порядок обращения с электронными деталями, блоками и приборами, или запрет использования радиопереговорных устройств в определенных чувствительных зонах, например в пультовых, диспетчерских помещениях.

Среди эксплуатационных и профилактических мероприятий, относящихся также к организационным, есть и такие, как осмотр и измерение сопротивления заземления соединений в заземляющем устройстве, которое может повлиять на электромагнитную совместимость, проверка устройств разделения различных потенциалов, эффективности фильтров, устройств защиты от перенапряжений и экранов, предусмотренных по условиям обеспечения электромагнитной совместимости.

Дальнейшие организационные мероприятия направлены на предотвращение неконтролируемого оснащения при расширении или реконструкции устройства компонентами, кабелями и проводами, которые могут создавать помехи или резко понижать эффективность мероприятий по обеспечению электромагнитной совместимости.

Контрольные вопросы

1. Чем обеспечивается ЭМС?
2. В каких случаях помехи будут иметь наименьшие значения?
3. Что является задачей внешней грозозащиты?
4. Какие меры предпринимаются для устранения образования статического электричества в помещениях?

ТЕМА 7. ИСПЫТАНИЯ И ПОДТВЕРЖДЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

7.1. Обзор

Электромагнитную совместимость промышленных устройств характеризует, с одной стороны, сопротивляемость (функциональная устойчивость) к воздействующим помехам, а с другой – отсутствие электромагнитного влияния на другие объекты. При проектировании и изготовлении электронных средств автоматизации для достижения требуемого качества электромагнитной совместимости необходимо испытывать и количественно определять электромагнитную совместимость лабораторных и опытных образцов, а также готовых изделий. В частности, речь идет при этом о доказательстве степени устойчивости S_{EK} внутренним помехам, определении помехоустойчивости к внешним воздействиям S_F и о проверке или об измерении эмиссии или излучения помех.

Исследования макетов и образцов преследуют цель проверки выполнения и эффективности мер по обеспечению электромагнитной совместимости, таких как:

- целесообразность схемного и конструктивного решения;
- целесообразность принятой системы соединений проводами и кабелями;
- эффективность встроенных фильтровых и разделительных ступеней;
- эффективность выбранного способа экранирования и соединения с корпусом;
- работоспособность предусмотренных помехоподавляющих элементов и устройств защиты от перенапряжений.

В остальном все испытательные и контрольные мероприятия для обеспечения электромагнитной совместимости должны гармонично сочетаться с прочими измерениями и испытаниями, предусмотренными при проектировании и изготовлении продукции.

7.2. Проверка собственной помехоустойчивости

При проверке собственной помехоустойчивости убеждаются, что для рассматриваемого объекта в пределах допустимых неэлектрических воздействий $z_{an 1}$ при любых возможных внутренних электромагнитных воздействиях не наступает нарушения функционирования.

Для практического подтверждения внутренней помехоустойчивости необходимо:

– установить такие режимы функционирования, которые гарантируют наибольшую активность внутренних источников помех;

– создать экстремальные внешние условия, то есть $z_{an \min}$ и $z_{an \max}$, в частности, установить наибольшую допустимую температуру, так как с изменением температуры изменяются пороговые значения характеристик полупроводниковых элементов;

– во время испытаний соблюдать условие $z_{ae} = 0$, то есть объект следует тщательно защитить от внешних влияний.

Данные о собственной помехоустойчивости прибора достоверны лишь в том случае, если точно засвидетельствованы условия испытаний (функции прибора, характеристики испытательной установки, окружающие условия).

7.3. Испытания на устойчивость к внешним помехам

Постановка задачи

Испытание промышленного устройства на устойчивость к внешним помехам должно показать способность устройства переносить без нарушения функционирования внешнее электромагнитное воздействие определенного вида и установленной интенсивности. Для этого при помощи генератора помех воспроизводятся испытательные помехи z_{pj} ($j = 1, 2, \dots, t$), которые непосредственно или косвенно через механизмы связи подводятся к различным участкам прибора. При этом речь идет об определении устойчивости к помехам, которые могут поступать по сетевому проводу, через информационные входы и выходы или через корпус прибора; а также к помехам, обусловленным электрическими, магнитными или электромагнитными полями, воздействующими на прибор.

Цель исследований при этом состоит в том, чтобы определить конкретные значения выбранных компонентов вектора внешней помехоустойчивости. Для этого параметр испытательной помехи z_{pj} ступенчато повышается до граничного значения S_F , то есть пока не наступит нарушение функционирования. Устойчивость к внешним помехам подтверждается воздействием на объект нормированной испытательной помехи в жестких условиях испытаний. При этом прибор должен безотказно работать.

Испытательные генераторы помех

Если ранее из-за отсутствия достаточного опыта и, как следствие, нормативов, испытания электронных приборов на электромагнитную совместимость проводились с использованием подручных средств,

то в настоящее время для объективной оценки помехоустойчивости имеются национальные и международные стандарты, в которых рекомендуются и предписываются репрезентативные испытательные воздействия на изделия. Соответствующие приборы и испытательные системы выпускаются промышленностью и предлагаются рядом фирм. По своим возможностям различаются следующие основные группы таких приборов:

- устройства для имитации типичных для сети помех, таких как: высшие гармоники; импульсы, наложенные на напряжение сети; изменения напряжения сети (снижения и паузы); несимметрия фаз и изменения частоты;

- генераторы для воздействия слабыми и сильными напряжениями и токами переходных режимов, которые могут возникать как в информационных, так и в энергетических линиях вследствие аварий или коммутаций, а также из-за воздействия молнии;

- генераторы для имитации разрядов статического электричества, в частности, с тела человека;

- генераторы промышленной частоты и импульсные устройства, имитирующие магнитные поля от рабочих токов и токов коротких замыканий, а также молний;

- генераторы средней и высокой частоты для имитации электромагнитного поля частотой от 10 кГц до 18 ГГц, создаваемого стационарными и передвижными передатчиками любого вида (с качающейся частотой и модуляцией).

Кроме того, известны специальные испытательные генераторы для имитации электромагнитных полей ядерного взрыва. Существуют также приборы для имитации помех, характерных только для определенных технических областей, например для автотранспорта.

Вспомогательными элементами при проведении испытаний на помехоустойчивость являются устройства связи в виде специальных схем и приспособлений (емкостные и индуктивные щупы, электроды для воспроизведения разрядов статического электричества, антенны) для присоединения объекта испытаний к генератору помех или для имитации воздействия поля на объект, а также необходимые измерительные средства. Важнейшие вспомогательные устройства нормированы.

Устойчивость к помехам, поступающим по проводам

Такие помехи могут попадать в прибор через вводы питания, входные и выходные элементы сигнальных и управляющих устройств и линий передачи данных.

На вводах питания могут иметь место возмущения напряжения питания, такие как гармоники, изменения (уменьшение и исчезновение) напряжения, несимметрия фаз, наложения на напряжение питания импульсов и высокочастотных колебаний, переходные перенапряжения и отклонения частоты от номинальной.

На рис. 7.1, *а* изображена принципиальная схема для испытаний на помехоустойчивость при спадах напряжения, перерывах питания, изменениях частоты, несимметрии сети, а на рис. 7.1, *б* – для определения помехоустойчивости при наложении на напряжение питания импульсов, напряжений сигналов, высокочастотных напряжений и гармоник. На рис. 7.1, впоказана компоновка испытательного устройства. В нем все приборы расположены на деревянной подставке на высоте 10 см от заземленной медной или алюминиевой поверхности.

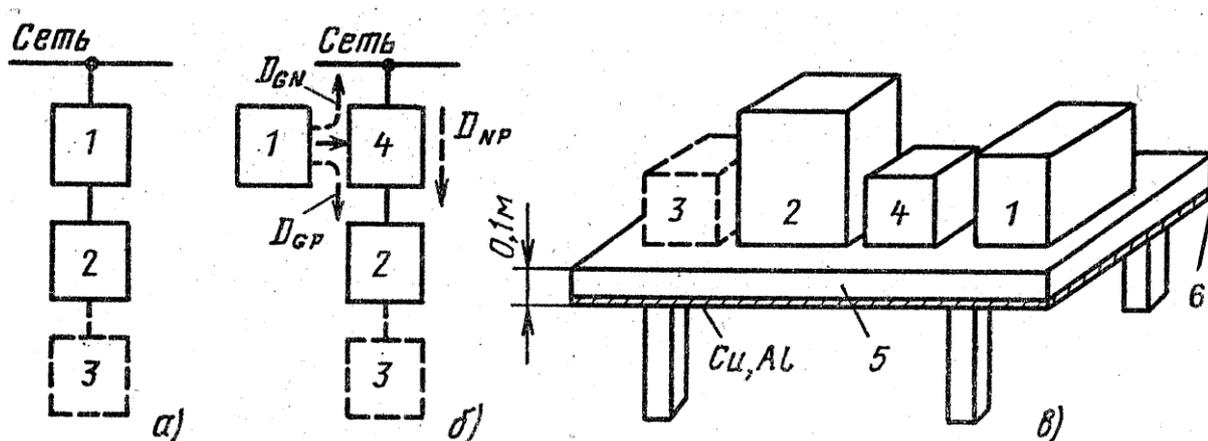


Рис. 7.1. Испытания сетевых входных цепей:

а, б – принципиальные схемы испытаний; *в* – компоновка испытательного устройства; 1 – генератор испытательной помехи; 2 – объект испытания; 3 – приборы контроля функционирования объекта; 4 – элемент связи с сетью; 5 – деревянный стол; 6 – заземление

При испытаниях объекта на устойчивость к снижениям напряжения или перерывам питания испытательный генератор помехи включается непосредственно между сетью и объектом (рис. 7.1, *а*). При воздействии на объект питающего напряжения с наложенными импульсами или высокочастотными колебаниями требуется устройство связи генератора, объекта и сети друг с другом (рис. 7.1, *б*), при помощи которого испытательная помеха подводится к объекту испытаний при нормированных условиях и при исключении сторонних помех.

Помехоустойчивость при воздействии разрядов статического электричества

Особое значение имеют разряды статического электричества, которые возможны с тела человека на корпус обслуживаемого прибора. Возникающие при этом воздействия, при соответствующих испытаниях на помехоустойчивость, имитируются генераторами. На рис. 7.2, *а, в, д* приведены типичные для таких испытаний схемы, а на рис. 7.2, *б, г, е* – виды стенов для испытаний настольных приборов. Устройства для испытаний, устанавливаемых на полу приборов (шкафов), аналогичны.

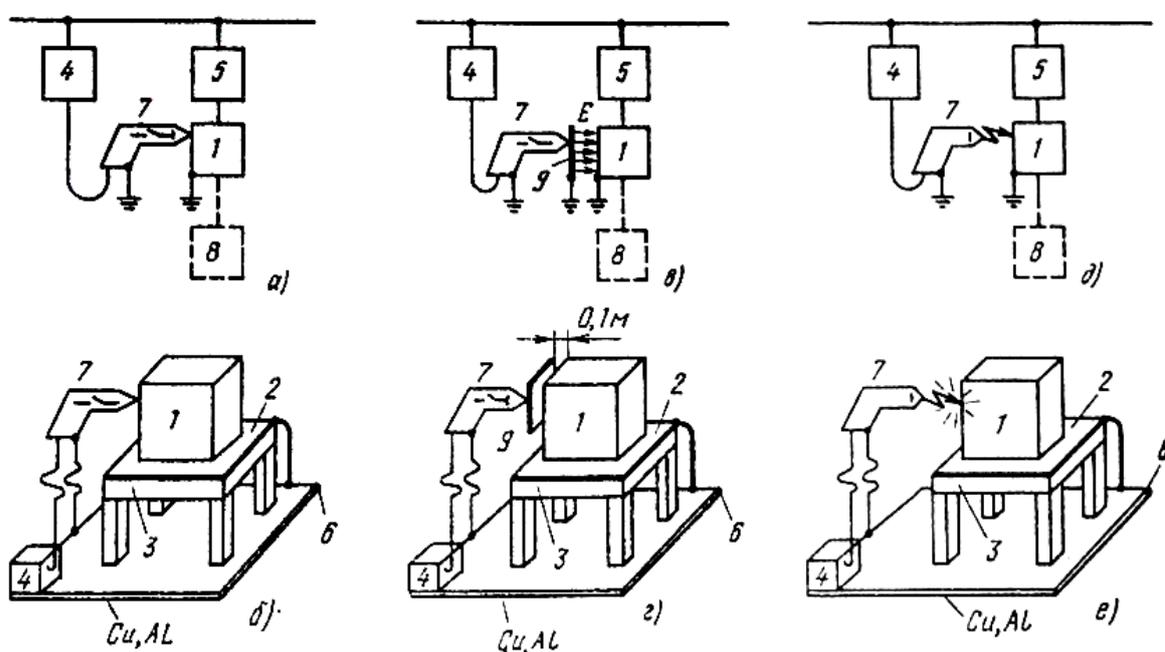


Рис. 7.2. Испытания на устойчивость к разрядам статического электричества:
а, б – с непосредственным контактом; *в, г* – без контакта; *д, е* – с искровым контактом; 1 – испытуемый объект; 2 – горизонтальная алюминиевая или медная пластина (0,8×1,6 м); 3 – деревянный стол высотой 0,8 м; 4 – блок питания; 5 – сетевой фильтр; 6 – защитное заземление; 7 – испытательный пистолет; 8 – приборы контроля функционирования объекта; 9 – вертикальная медная или алюминиевая пластина связи (0,5×0,5 м)

Питание (4) испытательного генератора осуществляется так, чтобы в сеть не попадали помехи по проводам. Накопительный конденсатор и разрядный резистор (рис. 7.2) вместе с разрядными электродами, конструкция которых нормирована, размещаются в электроде-пистолете (7).

Во всех случаях объект располагается изолированно на деревянном столе высотой 0,8 м, покрытом проводящей пластиной. Стол установлен

на проводящей плоскости (6), соединенной с защитным заземлением (рис. 7.2, б, г, е). Испытуемый объект питается через сетевой фильтр (5). Устройство (8) служит для контроля функционирования объекта во время испытания.

Помехоустойчивость к воздействиям поля

Электронные промышленные устройства, особенно работающие на электростанциях, обычно подвергаются воздействию длительных магнитных полей с частотой сети, обусловленных рабочими токами электроэнергетического оборудования; кратковременных электрических полей с частотой сети, вызванных аварийными режимами; импульсных полей, создаваемых молнией, токами коротких замыканий, а также высокочастотных затухающих полей, возникающих, например, при работе разъединителей в устройствах средних и высоких напряжений.

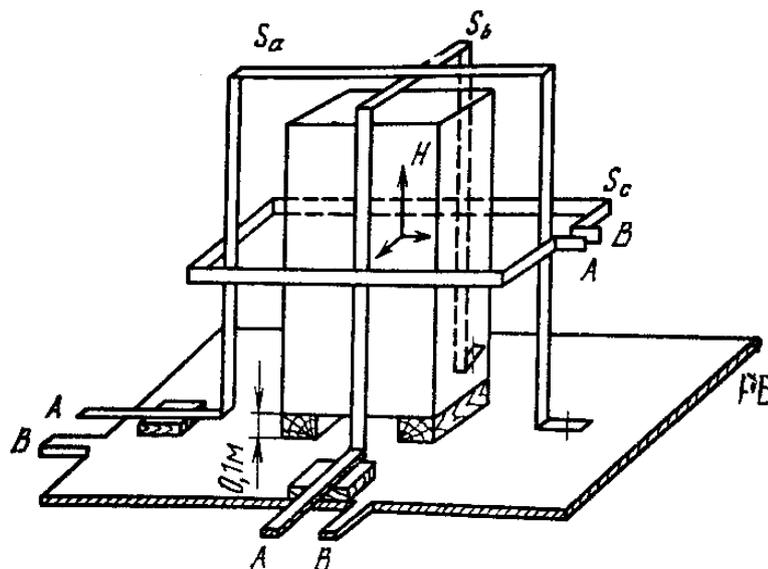


Рис. 7.3. Пример устройства для испытаний объекта на воздействие магнитных полей:

A, B - подсоединения испытательных генераторов; S_a, S_b, S_c – катушки;
 PE - защитное заземление

Для проверки приборов на помехоустойчивость при таких воздействиях применяются испытательные помехи. Они создаются при помощи генераторов и воздействуют на объект, помещенный в катушках специальной формы. На рис. 7.3 показаны такие катушки, предназначенные для испытания электронных шкафов. Объект устанавливается на изоляционной подставке высотой 0,1 м на металлическом полу, соединенном с защитным заземлением.

Три совмещенных катушки S_a , S_b и S_c , оси которых ортогональны друг другу, создают охватывающее объект трехмерное поле, переменное или импульсное, в зависимости от того, какой генератор помехи подсоединен к катушкам. Катушки S_a и S_b , электрически соединены с заземленной поверхностью, как показано на рисунке. Размеры катушек зависят от габаритных размеров объекта и выбираются такими, чтобы расстояние между катушкой и стенкой объекта было не менее 20 % длины катушки.

Размещение испытательного устройства в экранированном помещении не обязательно, однако рекомендуется, если имеется опасность создать помехи находящимся вблизи электронным устройствам.

7.4. Измерение эмиссии помех

Измерение эмиссии помех электрическими промышленными устройствами имеет цель: либо установить, в какой степени возмущается пространство вблизи них из-за излучения электромагнитной энергии, создающей помехи; либо доказать, например, в рамках типовых испытаний, что параметры излучения помех не выходят за границы, установленные нормативными документами. Специально для гарантии радиоприема без помех, а также для нормального функционирования радиослужб (радиопереговоры, радиорелейная связь, радионавигация) установлены предельные значения радиопомех в соответствующих нормативных документах DIN/VDE. Они базируются на интернациональных, согласованных с МЭК или Международным специальным комитетом по радиопомехам (SISPR) значениях. Кроме того, они ориентированы на всегда имеющееся неустранимое базовое нижнее (фоновое) значение таких естественных помех, как космические и атмосферные шумы. Это означает, что помехи, исходящие из промышленной установки, в зависимости от ее предназначения, должны уменьшаться до фонового значения, например при удалении на 3 или 10 м.

Для обеспечения воспроизводимости результатов при измерениях эмиссии помех, условия измерений и основные требования, предъявляемые к измерительным приборам, нормированы, как и при измерениях и испытаниях на помехоустойчивость. Этому способствует и документирование результатов в измерительном протоколе, где помимо измеренных значений и условий измерений приводят такие дополнительные сведения, как: точное обозначение объекта, его режим работы, использованные измерительные средства и стандарты, дата, фамилия проводившего измерения и т. д.

Измеряемые величины и измерительные средства

Частоты помех, обусловленных гальваническими связями, достигают 30 МГц, а вызванных полями – более 30 МГц. Это связано с тем, что длина волны излучения помехи соизмерима с геометрическими размерами объектов, включая длину соединительных проводов.

Распространение помех происходит вдоль сигнальных и сетевых проводов и линий управления и передачи данных, которые присоединены к промышленному устройству. Эти помехи представляют собой напряжения или токи и их можно измерить в виде симметричных, несимметричных или асимметричных компонентов.

Помехи при воздействии поля в ближней зоне ($x < \lambda/2\pi$) проявляются в виде электрического или магнитного полей, в зависимости от того, какое воздействие на антенну преобладает – напряжение или ток, а в дальней зоне ($x > \lambda/2\pi$) – в виде электромагнитного поля, для которого между напряженностями электрического и магнитного полей справедливо четкое соотношение: $E/H = 377$ Ом. В этом случае для характеристики эмиссии помех используют напряженность электрического поля и мощность.

На рис. 7.4 показаны важнейшие измерительные средства, используемые при измерениях эмиссии. В качестве измерительных датчиков применяются:

- токовые клещи (SWZ) для измерения токов помех I_{st} ;
- схемы (NNB) для регистрации напряжений помех U_{st} ;
- абсорбционные измерительные щупы (AMZ) для регистрации мощности помех P_{st} ;
- разнесенные антенны (рамочные, стержневые, логарифмические и др.) для измерения напряженностей электрического и магнитного полей.

От всех датчиков напряжения сигнал, пропорциональный измеряемому значению (u_U, u_P, u_I, u_H, u_E), подводится к единому приемнику измеряемых помех ME . Такой приемник работает по принципу избирательного селективного высокочастотного микровольтметра на базе высококачественного по чувствительности и точности гетеродинного радиоприемника с промежуточной частотой.

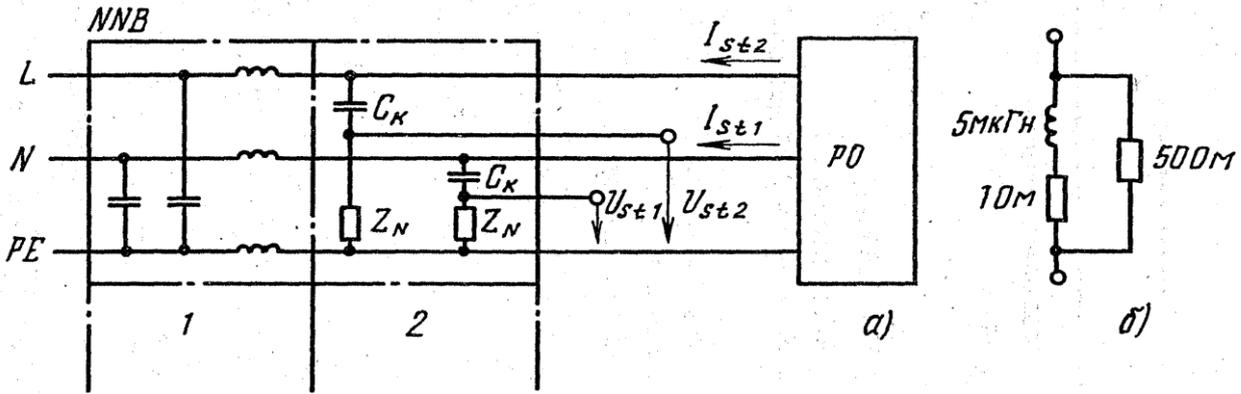


Рис. 7.5. Схема для измерения несимметричных напряжений помех U_{st1} , U_{st2} (а) и полного сопротивления сетевого элемента (б) в диапазоне частот 0,15÷30 МГц: PO – испытуемый объект; 1 – фильтр низких частот; 2 – область выделения помех

Имеются специальные сетевые эквиваленты для измерений симметричных, несимметричных и асимметричных напряжений помех в различных упомянутых выше категориях сетей. На рис. 7.5, а показан пример сетевого эквивалента для измерения напряжений помех в однофазной цепи питания испытуемого объекта. Исходящие из объекта токи помех I_{st1} , I_{st2} протекают по емкостям C_K и нормированным полным сопротивлениям Z_N . На этих сопротивлениях создаются падения напряжения, являющиеся несимметричными напряжениями помех U_{st1} и U_{st2} , которые могут быть измерены. Объект питается через фильтр низких частот, который одновременно отделяет объект от сети при высоких частотах. Структура полного сопротивления Z_N определяется особенностями рассматриваемой сети. На рис. 7.5, б изображена схема устройства, характерная для промышленной сети. Активное сопротивление (50 Ом) представляет собой входное сопротивление измерительного приемника.

7.5. Измерительные и испытательные центры

Для подтверждения электромагнитной совместимости требуется проведение измерений как помехоустойчивости, так и излучения помех приборами и системами. Такие измерения проводятся в специально создаваемых для этого испытательных центрах, принадлежащих фирмам или работающим на коммерческой основе. Они располагают, как правило, большим, объемом в несколько тысяч кубометров, безэховым помещением, а также рядом измерительных кабин для проведения стандартных или специально согласованных испытаний электромагнитной совместимости (рис. 7.6).

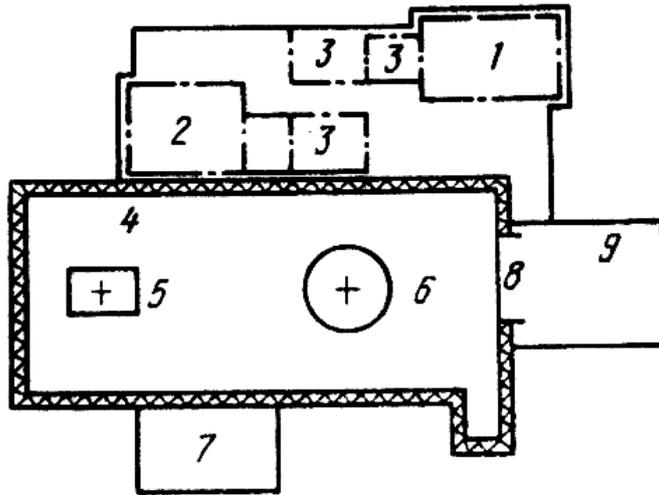


Рис. 7.6. План одного из испытательных центров:

- 1 – кабина для испытаний на воздействие электромагнитного импульса ядерного взрыва;
 2 – измерительная кабина; 3 – помещения управления и контроля; 4 – безэховый зал;
 5 – вращающийся стол; 6 – вращающаяся шайба; 7 – устройство с CO₂;
 8 – ворота; 9 – шлюз

Имитационное и измерительное оборудование управляется ЭВМ, а получение данных измерений, их обработка и документация производятся при помощи различных средств вычислительной техники.

Контрольные вопросы

1. Как практически подтверждается внутренняя помехоустойчивость?
2. Какова цель испытаний на устойчивость к внешним помехам?
3. Перечислите группы, по которым различаются приборы или испытательные системы для проверки помехоустойчивости.
4. Что понимается под возмущением напряжения питания при передаче помехи по проводам?
5. Приведите примеры разрядов статического напряжения.
6. Для какой цели измеряют эмиссию помех?

ТЕМА 8. ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ВОЗДЕЙСТВИЙ И ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ НА ЭЛЕКТРИЧЕСКИХ СТАНЦИЯХ И ПОДСТАНЦИЯХ

8.1. Общие положения

Электромагнитная обстановка на объектах электроэнергетики (электрических станциях, подстанциях, линиях электропередачи) резко отличается от электромагнитной обстановки других объектов (промышленных предприятий, офисных, жилищных помещений и т. д.).

Характерными особенностями этой обстановки являются: наличие постоянных во времени высоких напряженностей электрического поля промышленной частоты (до 25 кВ/м и выше) и напряженностей магнитного поля промышленной частоты (до 10^3 А/м и выше). Кроме того, на объектах электроэнергетики могут быть высокочастотные поля, обусловленные устройствами управления, сигнализации, передачи данных и т. д.

В целом электромагнитная обстановка достаточно сложна даже в стационарных условиях. Она представляет собой наложение полей естественного и искусственного происхождения, причем напряженности полей искусственного происхождения часто существенно превышают напряженности естественных полей. Ситуация осложняется тем обстоятельством, что электромагнитные поля искусственного происхождения подвержены быстрым изменениям вследствие изменения режимов работы объектов электроэнергетики, возникновения аварийных ситуаций и т. д. В результате возникают возмущения стационарной электромагнитной обстановки.

Характерными источниками электромагнитных воздействий, которые могут оказывать влияние на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами на электрических станциях и подстанциях, являются:

- переходные процессы в цепях высокого напряжения при коммутациях силовыми выключателями и разъединителями;
- переходные процессы в цепях высокого напряжения при коротких замыканиях, срабатывании разрядников или ограничителей перенапряжений;
- электрические и магнитные поля промышленной частоты, создаваемые силовым оборудованием станций и подстанций;
- переходные процессы в заземляющих устройствах подстанции, обусловленные токами КЗ промышленной частоты и токами молний;
- быстрые переходные процессы при коммутациях в индуктивных цепях низкого напряжения;
- переходные процессы в цепях различных классов напряжения при ударах молнии непосредственно в объект или вблизи него;

- разряды статического электричества;
- радиочастотные поля различного происхождения;
- электромагнитные возмущения в цепях оперативного тока.

Дополнительным источником электромагнитных возмущений на электрических станциях и подстанциях, которые могут вызвать сбои в работе электронных и микропроцессорных устройств, являются также такие виды вспомогательного электрооборудования, как сварочные аппараты, осветительные приборы, мощные тяговые механизмы, бытовые электроприборы, электроинструмент и др.

Кроме того, в устройствах автоматических и автоматизированных систем технологического управления электроэнергетическими объектами могут возникнуть и другие электрические явления, которые могут стать причиной их неправильного функционирования. К таким явлениям относятся: переходные сопротивления в контактных соединениях, шумы активных и пассивных элементов, дрейф параметров элементов, разброс времени коммутации в логических устройствах, исчезновения сигналов при передаче, явления отражения в линиях, вибрации и микрофонный эффект в контактах, пьезоэлектрические смещения зарядов при сжатии и изгибах изоляции, а также контактные напряжения, схемозлектрические и термоэлектрические эффекты в точках соединения проводников из различных материалов.

Наконец, два следующих вида воздействий должны рассматриваться в особых ситуациях:

- электромагнитные импульсы ядерных взрывов;
- магнитное поле Земли при аномальных явлениях на поверхности Солнца.

На рис. 8.1 изображены некоторые источники воздействий, из отмеченных выше, на электростанциях и подстанциях высокого напряжения.

Основные типы и возможные диапазоны значений электромагнитных помех. Помехи, создаваемые источниками электромагнитных возмущений, могут возникать как в виде периодически появляющихся, так и случайно распределенных во времени величин. В обоих случаях речь может идти как об узкополосных, так и широкополосных процессах. При систематизации, в первом приближении, несмотря на бесконечное разнообразие вариантов, выделяют четыре типа помех. Характерные их примеры приведены на рис. 8.2, а именно: синусоидальные (например, постоянно действующие периодические узкополосные помехи в форме переменного напряжения 50 Гц или большей частоты), прямоугольные одиночные импульсы, образованные двумя экспонентами и периодические затухающие однократные импульсы.

Помехи, возникающие в автоматических и автоматизированных системах технологического управления электротехническими объектами, могут рассматриваться как синфазные или противофазные напряжения (рис. 8.3).

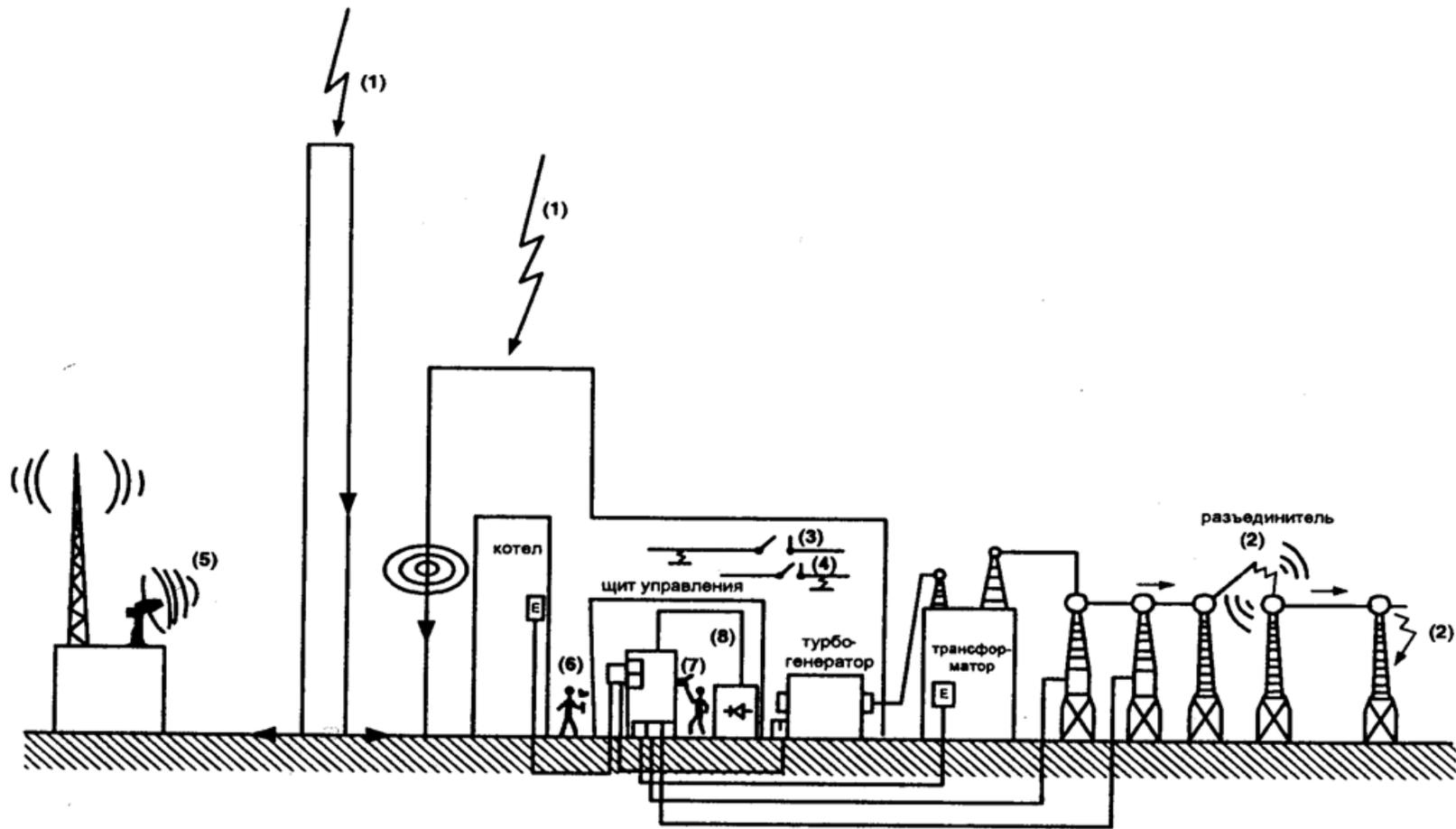


Рис. 8.1. Источники электромагнитных воздействий на электрических станциях и подстанциях:
 1 – удар молнии; 2 – переключения и короткие замыкания (КЗ) в сети высокого напряжения (ВН); 3 – переключения и КЗ в сети среднего напряжения (СН); 4 – переключения и КЗ в сети низкого напряжения (НН); 5 – внешние источники радиочастотных излучений;
 6 – внутренние источники радиочастотных излучений; 7 – разряды статического электричества;
 8 – источники кондуктивных помех по цепям питания

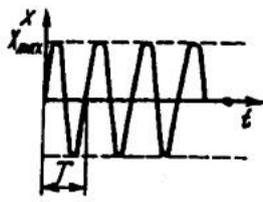
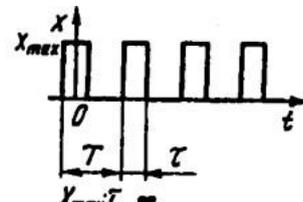
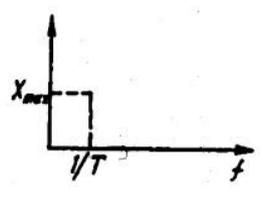
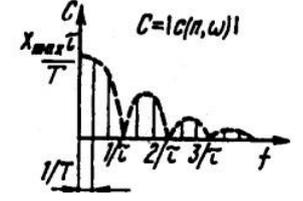
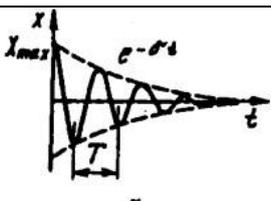
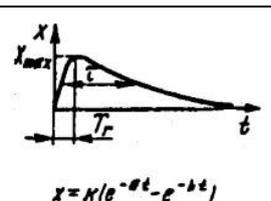
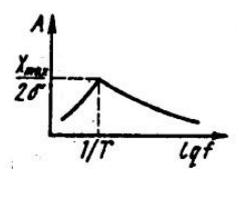
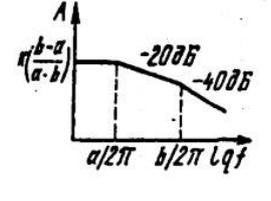
Периодические помехи	
Узкополосные	Широкополосные
Временная область, изменение помех во времени	
 <p> $x = X_{max} \sin \omega_0 t$ $\omega_0 = 2\pi/T$ </p>	 <p> $x = \frac{X_{max} \tau}{T} \sum_{n=1}^{\infty} c(n, \omega) \cos(n \omega t)$ $\omega_0 = 2\pi/T$ </p>
Частотная область, амплитудные спектры	
	 <p> $C = c(n, \omega)$ </p>
C – амплитудный спектр	
Непериодические, случайные помехи	
Узкополосные	Широкополосные
Временная область, изменение помех во времени	
 <p> $x = X_{max} e^{-\sigma t} \cos \omega_0 t$ $\omega_0 = 2\pi/T$ </p>	 <p> $x = K(e^{-a t} - e^{-b t})$ $K = f_1(X_{max}, T, \tau)$ $a = f_2(T, \tau)$ $b = f_3(T, \tau)$ </p>
Частотная область, амплитудные спектры	
	 <p> $K \frac{b-a}{a \cdot b}$ </p> <p> -20 dB -40 dB </p> <p> $a/2\pi$ $b/2\pi$ ωf </p>
A – спектр амплитудный плотности	

Рис. 8.2. Типы помех и их характерные примеры

Противофазные напряжения электромагнитных помех (поперечные, симметричные) возникают между проводами двухпроводной линии (u_d , рис. 8.3). Они непосредственно накладываются на полезные сигналы в сигнальных цепях или на напряжение питания в цепях электроснабжения, воздействуют на линейную изоляцию между проводами и могут быть восприняты как полезные сигналы в цепях автоматических и автоматизированных систем технологического управления на электрических станциях и подстанциях и тем самым определить ошибочное их функционирование.

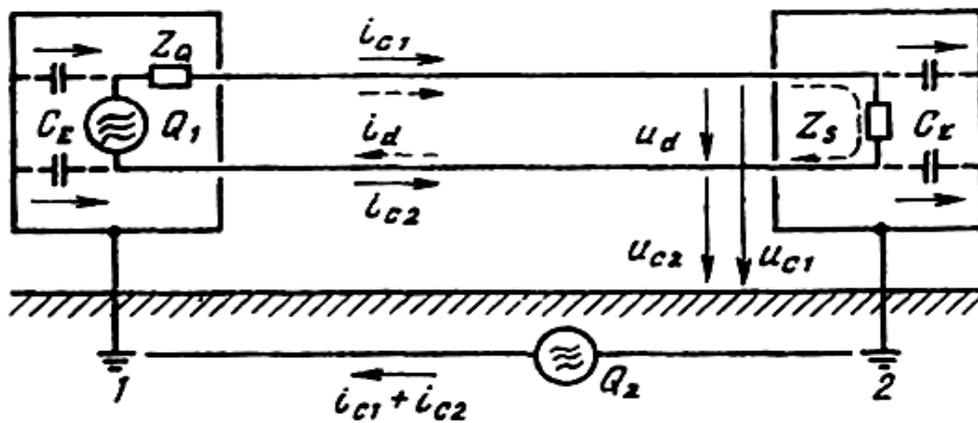


Рис. 8.3. Помехи, связанные с передачей сигналов по линии

Противофазные напряжения помех возникают в цепях автоматических и автоматизированных систем технологического управления через гальванические или полевые связи или преобразуются из синфазных напряжений помех в системах, несимметричных относительно земли.

Синфазные напряжения электромагнитных помех (несимметричные, продольные напряжения) возникают между каждым проводом и землей (u_{C1} , u_{C2} , рис. 8.3) и воздействуют на изоляцию проводов относительно земли. Синфазные помехи обусловлены главным образом разностью потенциалов в цепях заземления устройства, например, между точками 1 и 2 на рис. 8.3, вызванной токами в земле (токи короткого замыкания или токи молнии). Они могут также возникать в результате воздействия магнитных полей. Параметры помех, в зависимости от электромагнитной обстановки на энергообъекте, могут изменяться в очень широком диапазоне (табл. 8.1).

Возможные диапазоны значений параметров

Параметр	Обозначение	Значение
Частота, Гц	f	$0-10^{10}$
Максимальное значение напряжения, В	U_{\max}	$10^{-6}-10^6$
Скорость изменения напряжения, В/с	du/dt	$0-10^{12}$
Напряженность электрического поля, В/м	E	$0-10^3$
Максимальное значение тока, А	I_{\max}	$10^{-9}-10^5$
Скорость изменения тока, А/с	dI/dt	$0-10^{11}$
Напряженность магнитного поля, А/м	H	$10^{-6}-10^8$
Время нарастания импульса, с	T_1	$10^{-9}-10^2$
Длительность импульса, с	T	$10^{-8}-10$
Энергия импульса, Дж	W	$10^{-9}-10^7$

8.2. Способы описания и основные параметры помех

Помехи можно представить и описать как во временной, так и в частотной областях. Рассмотрим систему из двух контуров, имеющих гальваническую, емкостную или индуктивную связи (рис. 8.4). В первичном (влияющем) контуре возникает помеха, которая передается во вторичный (подверженный влиянию) контур.

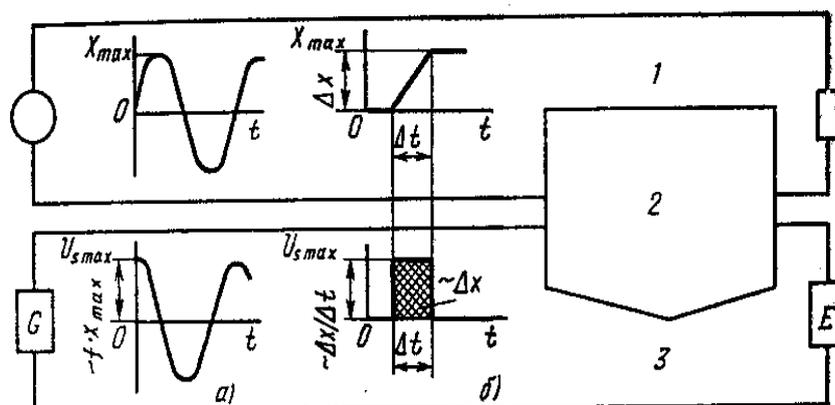


Рис. 8.4. Пояснение параметров периодических (а) и непериодических переходных (б) помех:

E – приемник сигналов; G – источник сигналов; x – помеха (напряжение или ток);
 u_s – напряжение помехи, обусловленное связью; 1 – влияющий контур; 2 – гальваническая, емкостная или индуктивная связь; 3 – контур, подверженный влиянию

Важнейшими параметрами периодических помех (рис. 8.4, *a*) являются частота f и амплитуда x_{\max} помехи в первичном контуре. Эти параметры определяют амплитуду напряжения помехи $u_{s\max}$ во вторичных контурах.

Важнейшими параметрами непериодических помех (рис. 8.4, *б*) являются:

- скорость изменения $\Delta x/\Delta t$ (скорость нарастания или спада) помехи x ; она определяет максимальное напряжение помехи $u_{s\max}$ во вторичной цепи;
- изменение времени Δt , или интервал времени, в течение которого, например, 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 используют при периодических помехах амплитудный спектр, а при импульсных – спектр амплитудной плотности (рис. 8.4). Применительно к рассматриваемой (измеряемой) помехе оба представления позволяют:

- оценить воздействие помехи на узкополосную систему;
- рассчитать воздействие, обусловленное заданной связью;
- выбрать параметры средств подавления помех, например, фильтров;
- определить граничные области, например, максимально возможного или допустимого излучения помех или характеризовать границы помехоустойчивости;
- наконец, получить представление о параметрах воздействий при испытаниях согласно нормам ЭМС.

Для количественной оценки величин, характеризующих ЭМС, пользуются логарифмическими масштабами электрических величин в относительных единицах, что позволяет наглядно представить соотношение величин, отличающихся на много порядков, а также умножать эти значения простым сложением их логарифмов. Различают два вида логарифмических относительных величин: уровень и меру сигнала.

Уровень – логарифм относительной величины с постоянной базой – знаменателем. При помощи понятия «уровень» можно описывать значения помех (напряжения, тока, напряженности полей помех и т. д.). В качестве базового значения напряжения часто принимают $U_0 = 1$ мкВ. Логарифм относительного напряжения называют уровнем напряжения. При применении десятичного логарифма справедливы следующие выражения для уровней:

– напряжения:

$$u = 20 \lg \frac{U_x}{U_0} \text{ дБ, при } u_0 = 1 \text{ мкВ};$$

– тока:

$$i = 20 \lg \frac{I_x}{I_0} \text{ дБ, при } I_0 = 1 \text{ мкА};$$

– напряженности электрического поля:

$$E = 20 \lg \frac{E_x}{E_0} \text{ дБ, при } E_0 = 1 \text{ мкВ/м};$$

– напряженности магнитного поля:

$$H = 20 \lg \frac{H_x}{H_0} \text{ дБ, при } H_0 = 1 \text{ мкА/м};$$

– мощности:

$$P = 10 \lg \frac{P_x}{P_0} \text{ дБ, при } P_0 = 1 \text{ пВт}.$$

Чаще уровень мощности выражается в неперах:

$$1 \text{ Нп} = 8,686 \text{ дБ}.$$

Уровень сигнала является величиной безразмерной. Физическая природа описываемых величин подчеркивается принятыми для них обозначениями, такими как u , i , E , H , P , а размерность базовой величины указывается в индексе или в скобках, например дБ (мкВ), дБ (мкА) и т. д.

Мера сигнала – логарифм отношения величин для обозначения измеряемых свойств объекта (степени передачи, коэффициентов усиления, ослабления). При этом берут отношение величин на входе и выходе системы или отношение величин в определенной точке при наличии и отсутствии демпфирующего элемента (фильтра, экрана). Например, коэффициент затухания (дБ), вносимого фильтром, выражают с помощью десятичного логарифма отношения:

$$\frac{U_{20}}{U_2 \cdot a_e} = 20 \lg \frac{U_{20}}{U_2},$$

Где a_e – общий коэффициент затухания (дБ), при наличии экрана

$a_s = 20 \lg \frac{E_0}{E_1}$. Здесь U_2 и U_{20} – напряжения помех на входе с фильтром и без

фильтра, а E_1 и E_0 – воздействующие на прибор напряженности электрического поля без экрана и с экраном, соответственно.

При помощи натурального логарифма можно образовать отношение величин в неперах (Нп), например,

$$U_{\text{Нп}} = \ln(U_x/U_0),$$

а для мощности

$$P_{\text{Нп}} = 0,5\ln(P_x/P_0).$$

1 непер соответствует отношению $(U_x/U_0) = e$, а для энергетических величин – отношению $P_x/P_0 = e^2$.

Между непером и децибелом существуют соотношения:

$$\ln(U_x/U_0) \text{ Нп} = 20\lg(U_x/U_0), \text{ дБ},$$

или

$$1 \text{ дБ} = 0,115 \text{ Нп}.$$

Понятие «помехоподавление» служит для характеристики защитного воздействия средств защиты от помех. Чаще всего оно указывается в зависимости от частоты. Помехоподавлением характеризуют, например, логарифм отношения напряжений на входе u_1 и выходе u_2 фильтра (коэффициент затухания $a_{\text{ф}}$) или напряженности поля перед экраном H_0 и за ним $H_э$ (коэффициент экранирования $a_э$): $a_{\text{ф}} = 20\lg(u_1/u_2)$; $a_э = 20\lg(H_0/H_э)$.

Контрольные вопросы

1. Какова особенность электромагнитной обстановки на объектах электроэнергетики?
2. Какими способами можно описать и представить помеху?
3. Перечислите важнейшие параметры периодических помех.
4. Перечислите важнейшие параметры непериодических помех.
5. Что используют для количественной оценки величин, характеризующих ЭМС?
6. Чем характеризуют понятие «помехоподавление»?

9. ВОЗДЕЙСТВИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ НА ОРГАНИЗМ ЧЕЛОВЕКА

9.1. Электромагнитное поле, его виды и классификация

На практике при характеристике электромагнитной обстановки используют термины «электрическое поле», «магнитное поле», «электромагнитное поле». Коротко поясним, что это означает и какая связь существует между ними (рис. 9.1). Электрическое поле создается зарядами. Например, во всех известных школьных опытах по электризации эбонита присутствует как раз электрическое поле. Магнитное поле создается при движении электрических зарядов по проводнику. Для характеристики величины электрического поля используется понятие «напряженность электрического поля», обозначение – E , единица измерения – В/м. Величина магнитного поля характеризуется напряженностью магнитного поля (H), единица измерения – А/м. При измерении сверхнизких и крайне низких частот часто также используется понятие «магнитная индукция» (B), единица – Тл (Тесла), одна миллионная часть Тл соответствует 1,25 А/м.

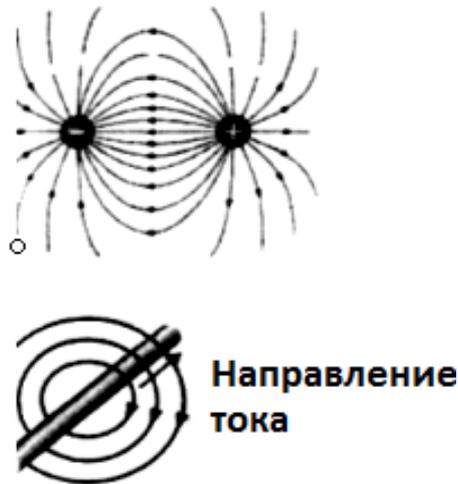


Рис. 9.1. Электрическое поле зарядов и магнитное поле проводника с током

По определению, электромагнитное поле (ЭМП) – это особая форма материи, посредством которой осуществляется воздействие между электрическими заряженными частицами. Физические причины существования электромагнитного поля связаны с тем, что изменяющееся во времени электрическое поле E порождает магнитное поле H , а изменяющееся магнитное поле H – вихревое электрическое поле: обе компоненты – E и H , непрерывно изменяясь, возбуждают друг друга

(рис. 9.2). ЭМП неподвижных или равномерно движущихся заряженных частиц неразрывно связано с этими частицами. При ускоренном движении заряженных частиц ЭМП «отрывается» от них и существует независимо в форме электромагнитных волн, не исчезая с устранением источника (например, радиоволны не исчезают и при отсутствии тока в излучившей их антенне).

Электромагнитные волны характеризуются длиной волны (λ). Источник, генерирующий излучение, а по сути, создающий электромагнитные колебания, характеризуется частотой, (f). Важная особенность ЭМП – это деление его на так называемую «ближнюю» и «дальнюю» зоны.

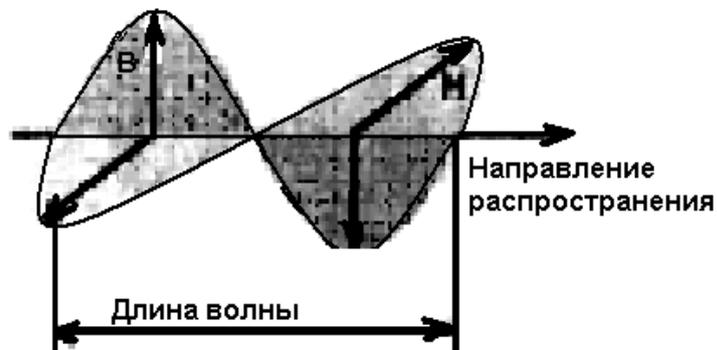


Рис. 9.2. Пространственное представление электромагнитного поля

В «ближней» зоне, или зоне индукции, на расстоянии от источника $r < \lambda$ ЭМП можно считать квазистатическим. Здесь оно быстро убывает с расстоянием, обратно пропорционально квадрату (r^{-2}) или кубу (r^{-3}) расстояния. В «ближней» зоне излучения электромагнитная волна еще не сформирована. Для характеристики ЭМП измерения переменного электрического поля E и переменного магнитного поля H производятся раздельно. Поле в зоне индукции служит для формирования бегущих составляющих полей (электромагнитной волны), ответственных за излучение.

«Дальняя» зона – это зона сформированной электромагнитной волны, начинается с расстояния $r > 3\lambda$. В «дальней» зоне интенсивность поля убывает обратно пропорционально расстоянию до источника (r^{-1}).

В «дальней» зоне излучения есть связь между E и H : $E = 377 H$, где 377 – волновое сопротивление вакуума, в Ом.

Поэтому измеряется, как правило, только E . В России на частотах выше 300 МГц обычно измеряется плотность потока электромагнитной энергии (ППЭ), или вектор Пойтинга (S), единица измерения Вт/м².

ППЭ характеризует количество энергии, переносимой электромагнитной волной в единицу времени через единицу поверхности, перпендикулярной направлению распространения волны.

Таблица 9.1

Международная классификация электромагнитных волн по частотам

Наименование частотного диапазона	Границыдиапазона	Наименование волнового диапазона	Границыдиапазона
Крайние низкие, КНЧ	3–30 Гц	Дека мега метровые	100–10 Мм
Сверхнизкие, СНЧ	30–300 Гц	Мегаметровые	10–1 Мм
Инфранизкие, ИНЧ	0,3–3 кГц	Гектокилометровые	1000–100 км
Очень низкие, ОНЧ	3–30 кГц	Мириаметровые	100–10 км
Низкие частоты, НЧ	30–300 кГц	Километровые	10–1 км
Средние, СЧ	0,3–3 МГц	Гектометровые	1–0,1 км
Высокие частоты, ВЧ	3–30 МГц	Декаметровые	100–10 м
Очень высокие, ОВЧ	30–300 МГц	Метровые	10–1 м
Ультра высокие, УВЧ	0,3–3 ГГц	Дециметровые	1–0,1 м
Сверхвысокие, СВЧ	3–30 ГГц	Сантиметровые	10–1 см
Крайне высокие, КВЧ	30–300 ГГц	Миллиметровые	10–1 мм
Гипервысокие, ГВЧ	300–3000 ГГц	Децимиллиметровые	1–0,1 мм

9.2. Основные источники ЭМП

Среди основных источников ЭМИ можно перечислить:

- электротранспорт (трамваи, троллейбусы, поезда,...);
- линии электропередач (городского освещения, высоковольтные,...);
- электропроводка (внутри зданий, телекоммуникации,...), бытовые электроприборы;
- теле- и радиостанции (транслирующие антенны);
- спутниковая и сотовая связь (транслирующие антенны);
- радары;
- персональные компьютеры.

9.2.1. Электротранспорт

Транспорт на электрической тяге – электропоезда (в том числе поезда метрополитена), троллейбусы, трамваи и т.п. – является относительно мощным источником магнитного поля в диапазоне частот от 0 до 1000 Гц. По данным Stenzeletal (1996), максимальные значения плотности потока

магнитной индукции B в пригородных «электричках» достигают 75 мкТл при среднем значении 20 мкТл. Среднее значение B на транспорте с электроприводом постоянного тока зафиксировано на уровне 29 мкТл.

9.2.2. Линии электропередач

Провода работающей линии электропередачи создают в прилегающем пространстве электрическое и магнитное поля промышленной частоты. Расстояние, на которое распространяются эти поля от проводов линии, достигает десятков метров. Дальность распространения электрического поля зависит от класса напряжения ЛЭП; чем выше напряжение, тем больше зона повышенного уровня электрического поля, при этом размеры зоны не изменяются в течении времени работы ЛЭП. Дальность распространения магнитного поля зависит от величины протекающего тока или от нагрузки линии. Поскольку нагрузка ЛЭП может неоднократно изменяться как в течение суток, так и со сменой сезонов года, размеры зоны повышенного уровня магнитного поля также меняются.

Биологическое действие линии электропередач

Электрические и магнитные поля являются очень сильными факторами влияния на состояние всех биологических объектов, попадающих в зону их воздействия. Например, в районе действия электрического поля ЛЭП у насекомых проявляются изменения в поведении: так, у пчел фиксируется повышенная агрессивность, беспокойство, снижение работоспособности и продуктивности, склонность к потере маток; у жуков, комаров, бабочек и других летающих насекомых наблюдается изменение поведенческих реакций, в том числе изменение направления движения в сторону с меньшим уровнем поля.

У растений распространены аномалии развития – часто меняются формы и размеры цветков, листьев, стеблей, появляются лишние лепестки.

Здоровый человек страдает от длительного пребывания в поле ЛЭП. Кратковременное облучение (минуты) способно привести к негативной реакции только у гиперчувствительных людей или у больных некоторыми видами аллергии. Например, хорошо известны работы английских ученых, в начале 90-х годов показавших, что у ряда аллергиков под действием поля ЛЭП развивается реакция по типу эпилептической.

При продолжительном пребывании (месяцы – годы) людей в электромагнитном поле ЛЭП могут развиваться заболевания преимущественно сердечно-сосудистой и нервной систем человека. В последние годы в числе отдаленных последствий часто называются онкологические заболевания.

Санитарные нормы

Исследования биологического действия ЭМП промышленной частоты, выполненные в СССР в 60-70-х годах, ориентировались в основном на действие электрической составляющей, поскольку экспериментальным путем значимого биологического действия магнитной составляющей при типичных уровнях не было обнаружено. В 70-х годах для населения по электрическим полям промышленной частоты были введены жесткие нормативы, и по настоящее время являющиеся одними из самых жестких в мире. Они изложены в Санитарных нормах и правилах «Защита населения от воздействия электрического поля, создаваемого воздушными линиями электропередачи переменного тока промышленной частоты» № 2971. В соответствии с этими нормами проектируются и строятся все объекты электроснабжения.

Несмотря на то, что магнитное поле во всем мире сейчас считается опасным для здоровья, предельно допустимая величина магнитного поля для населения в России не нормируется. Причина – отсутствие финансирования для исследований и разработки норм. Большая часть ЛЭП строилась без учета этой опасности.

На основании массовых эпидемиологических обследований населения, проживающего в условиях облучения магнитными полями ЛЭП, как безопасный или «нормальный» уровень для условий продолжительного облучения, не приводящий к онкологическим заболеваниям, независимо друг от друга шведскими и американскими специалистами рекомендована величина плотности потока магнитной индукции 0,2–0,3 мкТл.

Принципы обеспечения безопасности населения

Основной принцип защиты здоровья населения от электромагнитного поля ЛЭП состоит в установлении санитарно-защитных зон для линий электропередачи и снижении напряженности электрического поля в жилых зданиях и в местах возможного продолжительного пребывания людей путем применения защитных экранов.

Границы санитарно-защитных зон для ЛЭП на действующих линиях определяются по критерию напряженности электрического поля – 1 кВ/м, что соответствует расстояниям, показанным в табл. 9.2.

В табл. 9.3 приведены данные показывающие изменения размера санитарно-защитной зоны от величины напряжения ЛЭП на примере г. Москвы.

Таблица 9.2

Границы санитарно-защитных зон для ЛЭП согласно СН № 2971-84

Напряжение ЛЭП	330 кВ	500 кВ	750 кВ	1150 кВ
Размер санитарно-защитной (охранной) зоны	20 м	30 м	40 м	55 м

Таблица 9.3

Размер санитарно-защитных зон для ЛЭП в г. Москве

Напряжение ЛЭП	<20кВ	35 кВ	110 кВ	150-220 кВ	330-500 кВ	750 кВ	1150 кВ
Размер санитарно-защитной зоны	10 м	15 м	20 м	25 м	30 м	40 м	55 м

Таблица 9.4

Допустимые уровни воздействия электрического поля ЛЭП

ПДУ, кВ/м	Условия облучения
0,5	– внутри жилых зданий
1,0	– на территории зоны жилой застройки
5,0	– в населенной местности 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
10,0	– на участках пересечения воздушных линий электропередачи с автомобильными дорогами I–IV категорий
15,0	– в ненаселенной местности (незастроенные местности, хотя бы и часто посещаемые людьми, доступные для транспорта, и сельскохозяйственные угодья)
20,0	– в труднодоступной местности (недоступной для транспорта и сельскохозяйственных машин) и на участках, специально выгороженных для исключения доступа населения

К размещению ВЛ ультравысоких напряжений (750 и 1150 кВ) предъявляются дополнительные требования по условиям воздействия электрического поля на население (табл. 9.4). Так, ближайшее расстояние от оси проектируемых ВЛ 750 и 1150 кВ до границ населенных пунктов должно быть, как правило, не менее 250 и 300 м, соответственно.

В пределах санитарно-защитной зоны ВЛ запрещается:

- размещать жилые и общественные здания и сооружения;
- устраивать площадки для стоянки и остановки всех видов транспорта;
- размещать предприятия по обслуживанию автомобилей и склады нефти и нефтепродуктов;
- производить операции с горючим, выполнять ремонт машин и механизмов. Территории санитарно-защитных зон разрешается использовать как сельскохозяйственные угодья, однако рекомендуется выращивать на них культуры, не требующие ручного труда.

В случае, если на каких-то участках напряженность электрического поля за пределами санитарно-защитной зоны окажется выше предельно допустимой 0,5 кВ/м внутри здания и выше 1 кВ/м на территории зоны жилой застройки (в местах возможного пребывания людей), должны быть приняты меры для снижения напряженности. Для этого на крыше здания с неметаллической кровлей размещается практически любая металлическая сетка, заземленная не менее чем в двух точках. В зданиях с металлической крышей достаточно заземлить кровлю не менее чем в двух точках. На приусадебных участках или других местах пребывания людей напряженность поля промышленной частоты может быть снижена путем установления защитных экранов, например это железобетонные, металлические заборы, тросовые экраны, деревья или кустарники высотой не менее 2 м.

9.2.3. Электропроводка

Наибольший вклад в электромагнитную обстановку жилых помещений в диапазоне промышленной частоты 50 Гц вносит электротехническое оборудование здания, а именно кабельные линии, подводящие электричество ко всем квартирам и другим потребителям системы жизнеобеспечения здания, а также распределительные щиты и трансформаторы. В помещениях, смежных с этими источниками, обычно повышен уровень магнитного поля промышленной частоты, вызываемый протекающим электротоком. Уровень электрического поля промышленной частоты при этом обычно невысокий и не превышает ПДУ для населения 500 В/м.

На рис. 9.3 представлено распределение магнитного поля промышленной частоты в жилом помещении. Источник поля – распределительный пункт электропитания, находящийся в смежном нежилом помещении.



Рис. 9.3. Распределение магнитного поля промышленной частоты

В настоящее время результаты выполненных исследований не могут четко обосновать предельные величины или другие обязательные ограничения для продолжительного облучения населения низкочастотными магнитными полями малых уровней.

Рекомендации по защите

Основная мера защиты – предупредительная:

- необходимо исключить продолжительное пребывание (регулярно по несколько часов в день) в местах повышенного уровня магнитного поля промышленной частоты;

- кровать для ночного отдыха максимально удалять от источников продолжительного облучения, расстояние до распределительных шкафов, силовых электрокабелей должно быть 2,5–3 метра;

- если в помещении или в смежном есть какие-то неизвестные кабели, распределительные шкафы, трансформаторные подстанции – удаление должно быть максимально возможным; оптимально – измерить уровень электромагнитных полей до того, как жить в таком помещении;

- при необходимости установить полы с электроподогревом, выбирать системы с пониженным уровнем магнитного поля.

9.2.4. Бытовая электротехника

Все бытовые приборы, работающие с использованием электрического тока, являются источниками электромагнитных полей.

Наиболее мощными следует признать СВЧ-печи, аэрогрили, холодильники с системой «без инея», кухонные вытяжки, электроплиты, телевизоры. Реально создаваемое ЭМП в зависимости от конкретной модели и режима работы может сильно различаться среди оборудования одного типа. Все ниже приведенные данные относятся к магнитному полю промышленной частоты 50 Гц (табл. 9.5, 9.6).

Значения магнитного поля тесно связаны с мощностью прибора – чем она выше, тем выше магнитное поле при его работе. Значения электрического поля промышленной частоты практически всех электробытовых приборов не превышают нескольких десятков В/м на расстоянии 0,5 м, что значительно меньше ПДУ 500 В/м.

Таблица 9.5

Уровни магнитного поля промышленной частоты бытовых электроприборов на расстоянии 0,3 м

Бытовой электроприбор	Уровни магнитного поля промышленной частоты, мкТл
Пылесос	0,2–2,2
Дрель	2,2–5,4
Утюг	0–0,4
Миксер	0,5–2,2
Телевизор	0–2,0
Люминесцентная лампа	0,5–2,5
Кофеварка	0–0,2
Стиральная машина	0–0,3
Микроволновая печь	4,0–12
Электрическая плита	0,4–4,5

Таблица 9.6

Предельно допустимые уровни электромагнитного поля
для потребительской продукции, являющейся источником ЭМП

Источник	Диапазон	Значение ПДУ	Примечание
Индукционные печи	20–22 кГц	$E = 500 \text{ В/м}$ $H = 4 \text{ А/м}$	Условия измерения: расстояние 0,3 м от корпуса
СВЧ-печи	2,45 ГГц	$\Phi = 10 \text{ мкВт/см}^2$	Условия измерения: расстояние $0,50 \pm 0,05 \text{ м}$ от любой точки, при нагрузке 1 литр воды
Видеодисплейный терминал ПЭВМ	5 Гц–2 кГц	$E_{\text{пду}} = 25 \text{ В/м}$ $B_{\text{пду}} = 250 \text{ нТл}$	Условия измерения: расстояние 0,5 м вокруг монитора ПЭВМ
	2–400 кГц	$E_{\text{пду}} = 2,5 \text{ В/м}$ $B_{\text{пду}} = 25 \text{ нТл}$	
	поверхностный электростатический потенциал	$V = 500 \text{ В}$	Условия измерения: расстояние 0,1 м от экрана монитора ПЭВМ
Прочая продукция	50 Гц	$E = 500 \text{ В/м}$	Условия измерения: расстояние 0,5 м от корпуса изделия
	0,3–300 кГц	$E = 25 \text{ В/м}$	
	0,3–3 МГц	$E = 15 \text{ В/м}$	
	3 – 30 МГц	$E = 10 \text{ В/м}$	
	30–300 МГц	$E = 3 \text{ В/м}$	
	0,3–30 ГГц	$\text{ППЭ} = 10 \text{ мкВт/см}^9$	

Возможные биологические эффекты

Человеческий организм всегда реагирует на электромагнитное поле. Однако для того, чтобы эта реакция переросла в патологию и привела к заболеванию, необходимо совпадение ряда условий – в том числе достаточно высокий уровень поля и продолжительность облучения. Поэтому при использовании бытовой техники с малыми уровнями поля и/или кратковременно, ЭМП бытовой техники не оказывает влияния на здоровье основной части населения. Потенциальная опасность может грозить лишь людям с повышенной чувствительностью к ЭМП и аллергикам, также зачастую обладающим повышенной чувствительностью к ЭМП. Кроме того, согласно современным представлениям, магнитное поле промышленной частоты может быть опасным для здоровья человека, если происходит продолжительное облучение (регулярно, не менее 8 часов в сутки, в течение нескольких лет) с уровнем выше 0,2 микротесла.

9.2.5 Сотовая связь

Сотовая радиотелефония является сегодня одной из наиболее интенсивно развивающихся телекоммуникационных систем. В настоящее время во всем мире насчитываются миллионы абонентов, пользующихся услугами этого вида подвижной (мобильной) связи.

Основными элементами системы сотовой связи являются базовые станции (БС) и мобильные радиотелефоны (МРТ). Базовые станции поддерживают радиосвязь с мобильными радиотелефонами, вследствие чего БС и МРТ являются источниками электромагнитного излучения в УВЧ диапазоне.

Важной особенностью системы сотовой радиосвязи является весьма эффективное использование выделяемого для работы системы радиочастотного спектра (многократное использование одних и тех же частот, применение различных методов доступа), что делает возможным обеспечение телефонной связью значительного числа абонентов. В работе системы применяется принцип деления некоторой территории на зоны, или «соты», радиусом обычно 0,5–10 километров.

Базовые станции

Базовые станции поддерживают связь с находящимися в их зоне действия мобильными радиотелефонами и работают в режиме приема и передачи сигнала. В зависимости от стандарта, БС излучают электромагнитную энергию в диапазоне частот от 463 до 1880 МГц.

Антенны БС устанавливаются на высоте 15–100 метров от поверхности земли на уже существующих постройках (общественных, служебных, производственных и жилых зданиях, дымовых трубах промышленных предприятий и т. д.) или на специально сооруженных мачтах.

Среди установленных в одном месте антенн БС имеются как передающие (или приемопередающие), так и приемные антенны, которые не являются источниками ЭМП.

Исходя из технологических требований построения системы сотовой связи, диаграмма направленности антенн в вертикальной плоскости рассчитана таким образом, что основная энергия излучения (более 90 %) сосредоточена в довольно узком «луче». Он всегда направлен в сторону от сооружений, на которых находятся антенны БС, и выше прилегающих построек, что является необходимым условием для нормального функционирования системы.

БС являются видом передающих радиотехнических объектов, мощность излучения которых (загрузка) не является постоянной 24 часа в сутки. Загрузка определяется наличием владельцев сотовых телефонов в зоне обслуживания конкретной базовой станции и их желанием воспользоваться телефоном для разговора, что, в свою очередь, коренным образом зависит от времени суток, места расположения БС, дня недели и др. В ночные часы загрузка БС практически равна нулю, т.е. станции в основном «молчат».

Исследования электромагнитной обстановки на территории, прилегающей к БС, были проведены специалистами разных стран, в том числе Швеции, Венгрии и России. По результатам измерений, проведенных в Москве и Московской области, можно констатировать, что в 100 % случаев электромагнитная обстановка в помещениях зданий, на которых установлены антенны БС, не отличалась от фоновой, характерной для данного района в данном диапазоне частот. На прилегающей территории в 91 % случаев зафиксированные уровни электромагнитного поля были в 50 раз меньше ПДУ, установленного для БС. Максимальное значение при измерениях, меньшее ПДУ в 10 раз, было зафиксировано вблизи здания, на котором установлено сразу три базовые станции разных стандартов.

Мобильные радиотелефоны

Мобильный радиотелефон (МРТ) представляет собой малогабаритный приемопередатчик. В зависимости от стандарта телефона, передача ведется в диапазоне частот 453–1785 МГц. Мощность излучения МРТ является

величиной переменной, в значительной степени зависящей от состояния канала связи «мобильный радиотелефон – базовая станция», т.е. чем выше уровень сигнала БС в месте приема, тем меньше мощность излучения МРТ. Максимальная мощность находится в границах 0,125–1 Вт, однако в реальной обстановке она обычно не превышает 0,05–0,2 Вт.

Вопрос о воздействии излучения МРТ на организм пользователя до сих пор остается открытым. Многочисленные исследования, проведенные учеными разных стран, включая Россию, на биологических объектах (в том числе, на добровольцах), привели к неоднозначным, иногда противоречащим друг другу результатам. Неоспоримым остается лишь тот факт, что организм человека «откликается» на наличие излучения сотового телефона. Поэтому владельцам МРТ рекомендуется соблюдать некоторые меры предосторожности:

- не пользуйтесь сотовым телефоном без необходимости;
- разговаривайте непрерывно не более 3–4 минут;
- не допускайте, чтобы МРТ пользовались дети;
- при покупке выбирайте сотовый телефон с меньшей максимальной мощностью излучения;
- в автомобиле используйте МРТ совместно с системой громкоговорящей связи «hands-free» с внешней антенной, которую лучше всего располагать в геометрическом центре крыши.

Для людей, окружающих человека, разговаривающего по мобильному радиотелефону, электромагнитное поле, создаваемое МРТ, не представляет никакой опасности.

Исследования возможного влияния биологического действия электромагнитного поля элементов систем сотовой связи вызывают большой интерес у общественности. Публикации в средствах массовой информации достаточно точно отражают современные тенденции в этих исследованиях. Мобильные телефоны GSM: швейцарские тесты показали, что излучение, поглощенное головой человека, находится в допустимых европейскими стандартами пределах. Специалисты Центра электромагнитной безопасности провели медико-биологические эксперименты по исследованию влияния на физиологическое и гормональное состояние человека электромагнитного излучения мобильных телефонов существующих и перспективных стандартов сотовой связи.

При работе мобильного телефона электромагнитное излучение воспринимается не только приемником базовой станции, но и телом пользователя, и в первую очередь его головой. Что при этом происходит в организме человека, насколько это воздействие опасно для здоровья?

Однозначного ответа на этот вопрос до сих пор не существует. Однако эксперимент российских ученых показал, что мозг человека не только ощущает излучение сотового телефона, но и различает стандарты сотовой связи.

Руководитель исследовательского проекта доктор медицинских наук Юрий Григорьев считает, что сотовые телефоны стандартов NMT-450 и GSM-900 вызвали достоверные и заслуживающие внимания изменения в биоэлектрической активности головного мозга. Однако клинически значимых последствий для организма человека однократное 30-минутное облучение электромагнитным полем мобильного телефона не оказывает. Отсутствие достоверных изменений в электроэнцефалограмме, в случае использования телефона стандарта GSM-1800, может характеризовать его как наиболее «щадящий» для пользователя из трех использованных в эксперименте систем связи.

9.2.6. Персональные компьютеры

Основным источником неблагоприятного воздействия на здоровье пользователя компьютера является средство визуального отображения информации на электронно-лучевой трубке. Ниже перечислены основные факторы его неблагоприятного воздействия. Эргономические параметры экрана монитора:

- снижение контраста изображения в условиях интенсивной внешней засветки;
- зеркальные блики от передней поверхности экранов мониторов;
- наличие мерцания изображения на экране монитора.

Излучательные характеристики монитора:

- электромагнитное поле монитора в диапазоне частот 20 Гц–1000 МГц;
- статический электрический заряд на экране монитора;
- ультрафиолетовое излучение в диапазоне 200–400 нм;
- инфракрасное излучение в диапазоне 1050 нм–1 мм;
- рентгеновское излучение $> 1,2$ кэВ.

Основными составляющими частями персонального компьютера (ПК) являются: системный блок (процессор) и разнообразные устройства ввода/вывода информации: клавиатура, дисковые накопители, принтер, сканер и т.п. Каждый персональный компьютер включает средство визуального отображения информации называемое по-разному – монитор, дисплей. Как правило, в его основе – устройство на основе электронно-лучевой трубки. ПК часто оснащают сетевыми фильтрами (например, типа «Pilot»), источниками бесперебойного питания и другим вспомогательным

электрооборудованием. Все эти элементы при работе ПК формируют сложную электромагнитную обстановку на рабочем месте пользователя (табл. 9.8, 9.9 и 9.10).

Таблица 9.8

ПК как источник ЭМП

Источник	Диапазон частот (первая гармоника)
Монитор, сетевой трансформатор блока питания	50 Гц
Статический преобразователь напряжения в импульсном блоке питания	20–100 кГц
Блок кадровой развертки и синхронизации	48–160 Гц
Блок строчной развертки и синхронизации	15 110 кГц
Ускоряющее анодное напряжение монитора (только для мониторов с ЭЛТ)	0 Гц (электростатика)
Системный блок (процессор)	50 Гц–1000 МГц
Устройства ввода / вывода информации	0 Гц, 50 Гц
Источники бесперебойного питания	50 Гц, 20–100 кГц

Электромагнитное поле, создаваемое персональным компьютером, имеет сложный спектральный состав в диапазоне частот от 0 Гц до 1000 МГц. Электромагнитное поле имеет электрическую (E) и магнитную (H) составляющие, причем взаимосвязь их достаточно сложна, поэтому оценка E и H производится отдельно.

Таблица 9.9

Максимальные зафиксированные на рабочем месте значения ЭМП

Вид поля, диапазон частот, единица измерения напряженности поля	Значение напряженности поля	
	по оси экрана	вокруг монитора
Электрическое поле, 100 кГц–300 МГц, В/м	17,0	24,0
Электрическое поле, 0,02–2 кГц, В/м	150,0	155,0
Электрическое поле, 2–400 кГц В/м	14,0	16,0
Магнитное поле, 0,02–2 кГц, мА/м	550,0	600,0
Магнитное поле, 2–400 кГц, мА/м	35,0	35,0
Электростатическое поле, кВ/м	22,0	–

Диапазон значений электромагнитных полей,
измеренных на рабочих местах пользователей ПК

Наименование измеряемых параметров	Диапазон частот 5 Гц–2 кГц	Диапазон частот 2–400 кГц
Напряженность переменного электрического поля, (В/м)	1,0–35,0	0,1–1,1
Индукция переменного магнитного поля, (нТл)	6,0–770,0	1,0–32,0

Компьютер как источник электростатического поля

При работе монитора на экране кинескопа накапливается электростатический заряд, создающий электростатическое поле (ЭСтП). В разных исследованиях, при разных условиях измерения, значения ЭСтП колебались от 8 до 75 кВ/м. При этом люди, работающие с монитором, приобретают электростатический потенциал. Разброс электростатических потенциалов пользователей колеблется в диапазоне от -3 до $+5$ кВ. Когда ЭСтП субъективно ощущается, потенциал пользователя служит решающим фактором при возникновении неприятных субъективных ощущений.

Заметный вклад в общее электростатическое поле вносят электризующиеся от трения поверхности клавиатуры и мыши. Эксперименты показывают, что после начала работы с клавиатурой, электростатическое поле быстро возрастает с 2 до 12 кВ/м. На отдельных рабочих местах в области рук регистрировались напряженности статических электрических полей более 20 кВ/м.

Влияние на здоровье пользователя электромагнитных полей компьютера

По обобщенным данным, у работающих за монитором от 2 до 6 часов в сутки функциональные нарушения центральной нервной системы происходят в среднем в 4,6 раза чаще, чем в контрольных группах; болезни сердечно-сосудистой системы – в 2 раза чаще, болезни верхних дыхательных путей – в 1,9 раза чаще; болезни опорно-двигательного аппарата – в 3,1 раза чаще. С увеличением продолжительности работы на компьютере соотношение здоровых и больных среди пользователей резко возрастает.

Исследования функционального состояния пользователя компьютера, проведенные в 1996 году Центром электромагнитной безопасности, показали, что даже при кратковременной работе (45 минут), в организме пользователя под влиянием электромагнитного излучения монитора происходят значительные изменения гормонального состояния и специфические изменения биотоков мозга. Особенно ярко и устойчиво эти эффекты проявляются у женщин. Замечено, что у групп лиц (в данном случае это составило 20 %) отрицательная реакция организма не проявляется при работе с ПК менее 1 часа. Исходя из анализа полученных результатов сделан вывод о возможности формирования специальных критериев профессионального отбора для персонала, использующего компьютер в процессе работы (табл. 9.11).

К зрительному утомлению пользователя видеодисплейного терминала (ВДТ) относят целый комплекс симптомов: появление «пелены» перед глазами, глаза устают, делаются болезненными, появляются головные боли, нарушается сон, изменяется психофизическое состояние организма (табл. 9.11). Необходимо отметить, что жалобы на зрение могут быть связаны как с упомянутыми выше факторами ВДТ, так и с условиями освещения, состоянием зрения оператора и др.

У пользователей дисплеев развивается мышечная слабость, изменения формы позвоночника. В США признано, что синдромом длительной статической нагрузки (СДСН) – профессиональное заболевание 1990–1991 годов с самой высокой скоростью распространения. При вынужденной рабочей позе, при статической нагрузке мышцы ног, плеч, шеи и рук длительно пребывают в состоянии сокращения. Поскольку мышцы не расслабляются, в них ухудшается кровоснабжение; нарушается обмен веществ, накапливаются биопродукты распада, в частности, молочная кислота. У 29 женщин с синдромом длительной статической нагрузки бралась биопсия мышечной ткани, в которой было обнаружено резкое отклонение биохимических показателей от нормы.

Пользователи дисплеев часто находятся в состоянии стресса. По данным Национального Института охраны труда и профилактики профзаболеваний США (1990 г.), пользователи ВДТ в большей степени, чем другие профессиональные группы, включая авиадиспетчеров, подвержены развитию стрессовых состояний. При этом у большинства пользователей работа на ВДТ сопровождается значительным умственным напряжением. Показано, что источниками стресса могут быть: вид деятельности, характерные особенности компьютера, используемое программное обеспечение, организация работы, социальные аспекты. Работа на ВДТ имеет специфические стрессорные факторы, такие как: время задержки ответа (реакции) компьютера при выполнении команд человека, «обучаемость командам управления» (простота запоминания, похожесть,

простота использования и т. д.), способ визуализации информации и т. д. Пребывание человека в состоянии стресса может привести к изменениям настроения, повышению агрессивности, депрессии, раздражительности. Зарегистрированы случаи психосоматических расстройств, нарушения функции желудочно-кишечного тракта, нарушения сна, изменения частоты пульса, менструального цикла. Пребывание человека в условиях длительно действующего стресс-фактора может привести к развитию сердечно-сосудистых заболеваний.

Таблица 9.11

Жалобы пользователей персонального компьютера
и возможные причины их происхождения

Субъективные жалобы	Возможные причины
Резь в глазах	Визуальные эргономические параметры монитора, освещение на рабочем месте и в помещении
Головная боль	Аэроионный состав воздуха в рабочей зоне, режим работы
Повышенная нервозность	Электромагнитное поле, цветовая гамма помещения, режим работы
Повышенная утомляемость	Электромагнитное поле, режим работы
Расстройство памяти	Электромагнитное поле, режим работы
Нарушение сна	Режим работы, электромагнитное поле
Выпадение волос	Электростатические поля, режим работы
Прыщи и покраснение кожи	Электростатическое поле, аэроионный и пылевой состав воздуха в рабочей зоне
Боли в животе	Неправильная посадка, вызванная неправильным устройством рабочего места
Боль в пояснице	Неправильная посадка пользователя, вызванная устройством рабочего места; режим работы
Боль в запястьях и пальцах	неправильная конфигурация рабочего места, в том числе: высота стола не соответствует росту, высоте кресла; неудобная клавиатура; режим работы

В качестве технических стандартов безопасности мониторов широко известны шведские TCO92/95/98 и MPRII. Эти документы определяют требования к монитору персонального компьютера по параметрам, способным оказывать влияние на здоровье пользователя.

Наиболее жесткие требования к монитору предъявляет TCO 95. Он ограничивает параметры излучения монитора, потребление электроэнергии, визуальные параметры, так что делает монитор наиболее лояльным к здоровью пользователя. В части излучательных параметров ему соответствует и TCO 92. Разработан стандарт Шведской конфедерацией профсоюзов.

Стандарт MPR II – менее жесткий, устанавливает предельные уровни электромагнитного поля примерно в 2,5 раза выше. Разработан Институтом защиты от излучений (Швеция) и рядом организаций, в том числе крупнейших производителей мониторов.

В части электромагнитных полей стандарту MPRII соответствуют российские санитарные нормы СанПиН 2.2.2.542-96 «Гигиенические требования к видеодисплейным терминалам, персональным электронно-вычислительным машинам и организации работ».

В основном из средств защиты предлагаются защитные фильтры для экранов мониторов. Они используются для ограничения действия вредных факторов со стороны экрана монитора, улучшают эргономические параметры экрана монитора и снижают излучение монитора в направлении пользователя.

9.3. Действие ЭМП на здоровье

В СССР широкие исследования электромагнитных полей были начаты в 60-е годы. Был накоплен большой клинический материал о неблагоприятном действии магнитных и электромагнитных полей, было предложено ввести новый нозологический термин «Радиоволновая болезнь» или «Хроническое поражение микроволнами». В дальнейшем, работами ученых России было установлено, что, во-первых, нервная система человека, особенно высшая нервная деятельность, чувствительна к ЭМП, и, во-вторых, что ЭМП обладает так называемым информационным действием при воздействии на человека в интенсивностях ниже пороговой величины теплового эффекта. Результаты этих работ были использованы при разработке нормативных документов в России. В результате, нормативы в России были установлены очень жесткими и отличались от американских и европейских в несколько тысяч раз (например, в России ПДУ для профессионалов $0,01 \text{ мВт/см}^2$; в США – 10 мВт/см^2).

Биологическое действие электромагнитных полей

Экспериментальные данные как отечественных, так и зарубежных исследователей свидетельствуют о высокой биологической активности ЭМП во всех частотных диапазонах. При относительно высоких уровнях облучающего ЭМП современная теория признает тепловой механизм воздействия. При относительно низком уровне ЭМП (к примеру, для радиочастот выше 300 МГц это менее 1 мВт/см^2) принято говорить о нетепловом или информационном характере воздействия на организм. Механизмы действия ЭМП в этом случае еще мало изучены.

Многочисленные исследования в области биологического действия ЭМП позволяют определить наиболее чувствительные системы организма человека: нервная, иммунная, эндокринная и половая. Реакции этих систем должны обязательно учитываться при оценке риска воздействия ЭМП на население.

Биологический эффект ЭМП в условиях длительного многолетнего воздействия накапливается, в результате возможно развитие отдаленных последствий, включая дегенеративные процессы центральной нервной системы, рак крови (лейкозы), опухоли мозга, гормональные заболевания.

Особо опасными ЭМП могут быть для детей, беременных (эмбрион), людей с заболеваниями центральной нервной, гормональной, сердечно-сосудистой системы, аллергиков, людей с ослабленным иммунитетом.

Влияние на нервную систему

Большое число исследований, выполненных в России, и сделанные монографические обобщения, дают основание отнести нервную систему к одной из наиболее чувствительных систем в организме человека к воздействию ЭМП. На уровне нервной клетки, структурных образований по передаче нервных импульсов (синапсе), на уровне изолированных нервных структур возникают существенные отклонения при воздействии ЭМП малой интенсивности. Изменяется высшая нервная деятельность, память у людей, имеющих контакт с ЭМП. Эти лица могут иметь склонность к развитию стрессовых реакций. Определенные структуры головного мозга имеют повышенную чувствительность к ЭМП. Изменение проницаемости гемато-энцефалического барьера может привести к неожиданным неблагоприятным эффектам. Особенно высокую чувствительность к ЭМП проявляет нервная система эмбриона.

Влияние ЭМП на иммунную систему

В настоящее время накоплено достаточно данных, указывающих на отрицательное влияние ЭМП на иммунологическую реактивность организма. Результаты исследований ученых России дают основание считать, что при воздействии ЭМП нарушаются процессы иммуногенеза, чаще в сторону их угнетения. Установлено также, что у животных, облученных ЭМП, изменяется характер инфекционного процесса – его течение отягощается. Возникновение аутоиммунитета связывают не столько с изменением антигенной структуры тканей, сколько с патологией иммунной системы, в результате чего она реагирует против нормальных тканевых антигенов. В соответствии с этой концепцией, основу всех аутоиммунных состояний составляет, в первую очередь, иммунодефицит по тимус-зависимой клеточной популяции лимфоцитов. Влияние ЭМП высоких интенсивностей на иммунную систему организма проявляется в угнетающем эффекте на Т-систему клеточного иммунитета.

Влияние ЭМП на эндокринную систему и нейрогуморальную реакцию

В работах ученых России еще в 60-е годы в трактовке механизма функциональных нарушений при воздействии ЭМП ведущее место отводилось изменениям в гипофиз-надпочечниковой системе. Исследования показали, что при действии ЭМП, как правило, происходила стимуляция гипофизарно-адреналиновой системы, что сопровождалось увеличением содержания адреналина в крови, активацией процессов свертывания крови. Было признано, что одной из систем, рано и закономерно вовлекаемых в ответную реакцию организма на воздействие различных факторов внешней среды, является система «гипоталамус – гипофиз – кора надпочечников». Результаты исследований подтвердили это положение.

Влияние ЭМП на половую функцию

Нарушения половой функции обычно связаны с изменением ее регуляции со стороны нервной и нейроэндокринной систем. С этим связаны результаты работы по изучению состояния гонадотропной активности гипофиза при воздействии ЭМП. Многократное облучение ЭМП вызывает понижение активности гипофиза.

Любой фактор окружающей среды, воздействующий на женский организм во время беременности и оказывающий неблагоприятное влияние на эмбриональное развитие, считается тератогенным. Многие ученые относят ЭМП к этой группе факторов.

Первостепенное значение в исследованиях тератогенеза имеет стадия беременности, во время которой воздействует ЭМП. Принято считать, что ЭМП могут, например, вызывать уродства, воздействуя в различные стадии беременности. Хотя периоды максимальной чувствительности к ЭМП имеются. Наиболее уязвимыми периодами являются обычно ранние стадии развития зародыша, соответствующие периодам имплантации и раннего органогенеза.

Было высказано мнение о возможности специфического действия ЭМП на половую функцию женщин, на эмбрион. Отмечена более высокая чувствительность к воздействию ЭМП яичников нежели семенников. Установлено, что чувствительность эмбриона к ЭМП значительно выше, чем чувствительность материнского организма, а внутриутробное повреждение плода ЭМП может произойти на любом этапе его развития. Результаты проведенных эпидемиологических исследований позволяют сделать вывод, что наличие контакта женщин с электромагнитным излучением может привести к преждевременным родам, повлиять на развитие плода и, наконец, увеличить риск развития врожденных уродств.

Другие медико-биологические эффекты ЭМП

С начала 60-х годов в СССР были проведены широкие исследования по изучению здоровья людей, имеющих контакт с ЭМП на производстве. Результаты клинических исследований показали, что длительный контакт с ЭМП в СВЧ-диапазоне может привести к развитию заболеваний, клиническую картину которых определяют, прежде всего, изменения функционального состояния нервной и сердечно-сосудистой систем. Было предложено выделить самостоятельное заболевание – радиоволновая болезнь. Это заболевание, по мнению авторов, может иметь три синдрома по мере усиления тяжести заболевания:

- астенический синдром;
- астеновегетативный синдром;
- гипоталамический синдром.

Наиболее ранними клиническими проявлениями последствий воздействия ЭМ-излучения на человека являются функциональные нарушения со стороны нервной системы, проявляющиеся прежде всего в виде вегетативных дисфункций неврастенического и астенического

синдрома. Лица, длительное время находившиеся в зоне ЭМ-излучения, предъявляют жалобы на слабость, раздражительность, быструю утомляемость, ослабление памяти, нарушения сна. Нередко к этим симптомам присоединяются расстройства вегетативных функций. Нарушения со стороны сердечно-сосудистой системы проявляются, как правило, нейроциркуляторной дистонией: лабильность пульса и артериального давления, склонность к гипотонии, боли в области сердца и др. Отмечаются также фазовые изменения состава периферической крови (лабильность показателей) с последующим развитием умеренной лейкопении, нейтропении, эритроцитопении. Изменения костного мозга носят характер реактивного компенсаторного напряжения регенерации. Обычно эти изменения возникают у лиц, по роду своей работы постоянно находившихся под действием ЭМ-излучения с достаточно большой интенсивностью. Работающие с МП и ЭМП, а также население, живущее в зоне действия ЭМП, жалуются на раздражительность, нетерпеливость. Через 1–3 года у некоторых появляется чувство внутренней напряженности, светливость. Нарушаются внимание и память. Возникают жалобы на малую эффективность сна и на утомляемость. Учитывая важную роль коры больших полушарий и гипоталамуса в осуществлении психических функций человека, можно ожидать, что длительное повторное воздействие предельно допустимых воздействий ЭМ-излучения (особенно в дециметровом диапазоне волн) может повести к психическим расстройствам.

9.4. Защита от ЭМП

К организационным мероприятиям по защите от действия ЭМП относятся: выбор режимов работы излучающего оборудования, обеспечивающего уровень излучения, не превышающий предельно допустимый, ограничение места и времени нахождения в зоне действия ЭМП (защита расстоянием и временем), обозначение и ограждение зон с повышенным уровнем ЭМП.

Защита временем применяется, когда нет возможности снизить интенсивность излучения в данной точке до предельно допустимого уровня. В действующих ПДУ предусмотрена зависимость между интенсивностью плотности потока энергии и временем облучения.

Защита расстоянием основывается на падении интенсивности излучения, которое обратно пропорционально квадрату расстояния и применяется, если невозможно ослабить ЭМП другими мерами, в том числе и защитой временем. Защита расстоянием положена в основу зон нормирования излучений для определения необходимого разрыва между источниками ЭМП и жилыми домами, служебными помещениями и т.п.

Для каждой установки, излучающей электромагнитную энергию, должны определяться санитарно-защитные зоны, в которых интенсивность ЭМП превышает ПДУ. Границы зон определяются расчетно для каждого конкретного случая размещения излучающей установки при работе их на максимальную мощность излучения и контролируются с помощью приборов. В соответствии с ГОСТ 12.1.026-80 зоны излучения ограждаются либо устанавливаются предупреждающие знаки с надписями: «Не входить, опасно!».

Инженерно-технические защитные мероприятия строятся на использовании явления экранирования электромагнитных полей непосредственно в местах пребывания человека либо на мероприятиях по ограничению эмиссионных параметров источника поля. Последнее, как правило, применяется на стадии разработки изделия, служащего источником ЭМП.

Радиоизлучения могут проникать в помещения, где находятся люди, через оконные и дверные проемы. Для экранирования смотровых окон, окон помещений, застекления потолочных фонарей, перегородок применяется металлизированное стекло, обладающее экранирующими свойствами. Такое свойство стеклу придает тонкая прозрачная пленка либо окислов металлов, чаще всего олова, либо металлов – медь, никель, серебро и их сочетания. Пленка обладает достаточной оптической прозрачностью и химической стойкостью. Будучи нанесенной на одну сторону поверхности стекла, она ослабляет интенсивность излучения на 30 дБ (в 1000 раз). При нанесении пленки на обе поверхности стекла ослабление достигает 40 дБ (в 10000 раз).

Для защиты населения от воздействия электромагнитных излучений, в строительных конструкциях в качестве защитных экранов могут применяться металлическая сетка, металлический лист или любое другое проводящее покрытие, в том числе и специально разработанные строительные материалы. В ряде случаев достаточно использования заземленной металлической сетки, помещаемой под облицовочный или штукатурный слой. В качестве экранов могут применяться также различные пленки и ткани с металлизированным покрытием. В последние годы в качестве радиоэкранирующих материалов получили применение металлизированные ткани на основе синтетических волокон. Их получают методом химической металлизации (из растворов) тканей различной структуры и плотности. Существующие методы получения позволяют регулировать количество наносимого металла в диапазоне от сотых долей до единиц мкм и изменять поверхностное удельное сопротивление тканей от десятков до долей Ом. Экранирующие текстильные материалы обладают

малой толщиной, легкостью, гибкостью; они могут дублироваться другими материалами (тканями, кожей, пленками), хорошо совмещаются со смолами и латексами.

Контрольные вопросы

1. Назовите характеристики ЭМП в «ближней» и «дальней» зонах.
2. Перечислите источники ЭМИ.
3. Какие биологические влияния могут оказывать электрические и магнитные поля?
4. Какие болезни развиваются у человека при длительном воздействии электрических и магнитных полей?
5. Какая величина плотности потока магнитной индукции считается безопасной?
6. В каком диапазоне частот работает мобильный радиотелефон?
7. Какой стандарт мобильной связи является щадящим?

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Электромагнитная совместимость и молниезащита в электроэнергетике: учебник для вузов / А.Ф. Дьяков [и др.]; под ред. А.Ф. Дьякова. – М.: МЭИ, 2009. – 721 с.

2. Валиуллина, Д.М. Электромагнитная совместимость: учеб. пособие / Д.М. Валиуллина, М.Ш. Гарифуллин, В.К. Козлов. – Казань: Казан. гос. энерг. ун-т, 2006. – 109 с.

3. Вагин, Г.Я. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике: учебник для студ. высш. учебн. заведений / Г.Я. Вагин, А.Б. Лоскутов, А.А. Севостьянов. – М.: Академия, 2010. – 249 с.

4. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость: учеб. пособие / Э. Хабигер. – М.: Энергоатомиздат, 1995. – 253 с.

5. Методические указания по обеспечению электромагнитной совместимости на объектах электросетевого хозяйства. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2010. – 147 с.

6. Руководящие указания по проектированию заземляющих устройств подстанций напряжением 6–750 кВ. – М.: ОАО «ФСК ЕЭС», 2010. – 63 с.

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	3
1. Основные определения. Технические, экономические и организационные основы электромагнитной совместимости	4
1.1. Основные понятия, определения	4
1.2. Цели и основное содержание работ в области электромагнитной совместимости	6
1.3. Экономические аспекты электромагнитной совместимости	7
1.4. Рекомендации по электромагнитной совместимости	8
1.5. Перечень продукции, связанной с электромагнитной совместимостью...	8
2. Источники электромагнитных помех	10
2.1. Классификация источников помех	10
2.2. Внешние источники помех	10
3. Механизмы появления помех	18
3.1. Возможные виды связи	18
3.2. Гальваническое влияние	19
3.3. Емкостное влияние	23
3.4. Индуктивная связь	26
3.5. Электромагнитное влияние	27
4. Помехоустойчивость чувствительных элементов устройств автоматики..	29
4.1. Помехоустойчивость аналоговых систем	29
4.2. Помехоустойчивость логических элементов	29
4.3. Требования к помехоустойчивости	30
5. Пассивные помехоподавляющие и защитные компоненты	32
5.1. Фильтры	32
5.2. Сетевые фильтры и фильтры сигнальных цепей	35
5.3. Ограничители перенапряжения	36
5.4. Защитные элементы для линии передачи информации	37
5.5. Экранирование для защиты от влияния помех	38
6. Мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости устройств и приборов	40
6.1. Технические мероприятия	40
6.2. Организационные мероприятия	45

7. Испытания и подтверждение электромагнитной совместимости	46
7.1. Обзор	46
7.2. Проверка собственной помехоустойчивости	46
7.3. Испытания на устойчивость к внешним помехам	47
7.4. Измерение эмиссии помех	52
7.5. Измерительные и испытательные центры	55
8. Источники электромагнитных воздействий и электромагнитные помехи на электрических станциях и подстанциях	57
8.1. Общие положения	57
8.2. Способы описания и основные параметры помех	62
9. Воздействие электромагнитных полей на организм человека	66
9.1. Электромагнитное поле, его виды и классификация	66
9.2. Основные источники ЭМП	68
9.3. Действие ЭМП на здоровье	85
9.4. Защита от ЭМП	88
Библиографический список	92

Учебное издание

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Учебное пособие

для студентов очной и заочной форм обучения
по образовательной программе направления подготовки
13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»,
направленность «Электроэнергетические системы и сети»

2-е издание, дополненное

Составители: **Валиуллина Диля Мансуровна,**
Козлов Владимир Константинович

Кафедра электроэнергетических систем и сетей КГЭУ

Редактор издательского отдела *С.Н. Чемоданова*
Компьютерная верстка *Т.И. Лунченкова*

Подписано в печать 08.11.2018.

Формат 60 × 84/16. Гарнитура «Times». Вид печати РОМ.
Усл. печ. л. 5,46. Уч.-изд. л. 3,60. Заказ № 218/эл.

Редакционно-издательский отдел КГЭУ,
420066, Казань, Красносельская, 51