

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	7
Введение	11
Глава 1. Основные сведения об электромагнитной совместимости	15
1.1. Основные понятия. Термины и определения	15
1.3. Природные источники электромагнитного излучения	26
1.4. Антропогенные источники электромагнитного излучения	30
1.4.1. Источники электромагнитного поля диапазона до 3 кГц	31
1.4.2. Источники электромагнитного поля диапазона 3 кГц – 300 ГГц	42
1.5. Поражающее действие электроустановок как проблема электромагнитной совместимости	48
1.5.1. Термины и определения	48
1.5.2. Поражающее действие электроустановок	48
Глава 2. Влияние электромагнитного излучения на человека	54
2.1. Общие сведения. Биофизика взаимодействий	54
2.2. Электромагнитные излучения промышленной частоты	61
2.3. Разряды статического электричества. Электростатическое поле	66
2.4. Электромагнитные излучения высоких и сверхвысоких частот	67
Глава 3. Опасное действие электрического тока на людей и животных	75
3.1. Электротравма и ее виды	75
3.2. Статистика электротравматизма	76
3.3. Электрические параметры тела человека	81
3.4. Действие электрического тока на кожу человека	85
3.5. Первичные критерии электробезопасности	86
3.6. Действие электрического тока на животных	89
3.7. Предельно допустимые значения токов и напряжений прикосновения для людей и животных	90
Глава 4. Техногенные электромагнитные помехи	92
4.1. Классификация электромагнитных помех	92
4.2. Индуктивные (излучаемые) электромагнитные помехи	99
4.3. Кондуктивные электромагнитные помехи	100
4.4. Электромагнитные помехи электрифицированного железнодорожного транспорта	104
4.4.1. Источники электромагнитных помех	104
4.4.2. Расчетные модели и схемы замещения	107
4.4.3. Индуцируемые помехи контактной сети	110
4.4.4. Магнитное влияние контактной сети	114
4.4.5. Гальваническое влияние тяговой сети	121
4.4.6. Помехи, возникающие при коротком замыкании в тяговой сети	124

4.4.7. Влияние тяговой сети на линии электропередачи	127
4.4.8. Влияние тяговой сети на линии «провод — рельс» и «два провода — рельс»	132
4.4.9. Влияние тяговой сети на линии связи	135
4.5. Влияние электромагнитных помех на аппаратуру	142
4.6. Влияние разрядов статического электричества на аппаратуру	146
4.7. Влияния электромагнитных полей радиочастотного диапазона	147
4.8. Влияние магнитных и электрических полей промышленной частоты	149
Глава 5. Молния как природный источник электромагнитных влияний	161
5.1. Термины и определения	161
5.2. Основные сведения о разрядах молнии. Характеристики молнии	162
5.3. Механизмы и опасность поражения молнией	167
5.3.1. Прямой удар молнии и его последствия	167
5.3.2. Поражение человека молнией	168
5.3.3. Тепловое воздействие	169
5.3.4. Электродинамические воздействия	169
5.3.5. Индуцированные перенапряжения	171
5.3.5.1. Электростатическая индукция	172
5.3.5.2. Электромагнитная индукция. Индуктивное влияние грозовых разрядов на воздушные линии	173
5.3.6. Занос высокого потенциала по металлическим коммуникациям	176
5.3.7. Прорыв тока молнии по искровому каналу, скользящему вдоль поверхности грунта	179
5.3.8. Вероятность поражения объекта молнией	179
Глава 6. Электромагнитная обстановка на энергетических и промышленных объектах	182
6.1. Классификация электромагнитной обстановки окружающей среды	182
6.2. Состав и степень жесткости испытаний оборудования	183
6.3. Оборудование для испытания технических средств на помехоустойчивость и помехоэмиссию	193
6.4. Мероприятия по обеспечению электромагнитной совместимости в соответствии с классом жесткости электромагнитной обстановки	196
6.5. Контроль электромагнитной обстановки	199
6.6. Особенности электромагнитной обстановки на энергетических и промышленных объектах	200
6.7. Мероприятия по улучшению электромагнитной обстановки	210
Глава 7. Защита от влияния электромагнитных излучений и помех	214
7.1. Нормирование электромагнитных излучений	214
7.1.1. Электромагнитные излучения промышленной частоты	216
7.1.2. Электромагнитные излучения высоких и сверхвысоких частот	220
7.2. Защита от электромагнитных излучений	225
7.2.1. Организационные мероприятия по защите от электромагнитных излучений	226

7.2.2. Инженерно-технические мероприятия по защите населения от электромагнитных излучений.....	227
7.2.3. Лечебно-профилактические мероприятия.....	231
7.3. Аппаратура для измерения электромагнитных излучений.....	231
Глава 8. Соответствие молниезащитной системы условиям электромагнитной совместимости	246
8.1. Концепция молниезащиты	246
8.2. Классификация объектов по устройству молниезащиты.....	247
8.3. Способы и средства молниезащиты	250
8.4. Основные требования и рекомендации при устройстве молниезащиты объектов	254
8.5. Молниеотводы	258
8.6. Заземляющие устройства зданий и сооружений.....	262
8.6.1. Общие положения	262
8.6.2. Физический процесс стекания тока молнии с заземлителей	264
8.6.3. Расчетное удельное сопротивление земли.....	265
8.6.4. Типы и конструкции заземляющих устройств.....	267
8.6.5. Расчет заземляющих устройств	269
8.7. Примеры выполнения молниезащиты объектов.....	276
Глава 9. Соответствие систем безопасности электроустановок условиям электромагнитной совместимости.....	286
9.1. Термины и определения	286
9.2. Принципы построения систем безопасности электроустановок	288
9.3. Общая характеристика защитных мероприятий.....	289
9.3.1. Защитное заземление	289
9.3.1.1. Назначение. Принцип действия.....	289
9.3.1.2. Требования к электрическим характеристикам и конструкции заземляющих устройств электроустановок.....	290
9.3.2. Зануление	296
9.3.3. Уравнивание потенциалов	297
9.3.4. Выравнивание потенциалов	299
9.3.5. Защитное электрическое разделение сетей	300
9.3.6. Сверхнизкое (малое) напряжение	301
9.3.7. Изолирование рабочего места, двойная изоляция, контроль изоляции	302
9.4. Устройства защитного отключения как эффективная электрозащитная мера	302
9.4.1. Историческая справка	302
9.4.2. Назначение и принцип действия УЗО	304
9.4.3. Классификация УЗО	306
9.4.4. Основные технические параметры УЗО	308
9.4.5. Особенности применения УЗО в различных системах электроснабжения	309
9.4.6. Основные принципы проектирования установки УЗО	311
9.5. Проблемы пожарной безопасности электроустановок зданий	313
9.6. Построение оптимальных систем безопасности электроустановок зданий.....	315

9.6.1. Задача оптимизации систем безопасности электроустановок.....	315
9.6.2. Вероятностное моделирование пожаров от электроустановок.....	315
9.6.3. Вероятностное моделирование электробезопасности	320
9.6.4. Формирование вариантов технической реализации систем безопасности электроустановок.....	325
9.6.5. Оптимизация ПА-систем электрической защиты	329
9.6.6. Особенности оптимизации ПАУ-систем электрической защиты.....	338
Глава 10. ЭМС и качество электрической энергии	340
10.1. Основные сведения	340
10.2. Основные термины и определения	342
10.3. Общая характеристика показателей качества электрической энергии.....	345
10.4. Показатели и нормы качества электрической энергии	346
10.5. Вероятные причины нарушения показателей и способы повышения уровня качества электрической энергии	355
Глава 11. Социально-экономическая оценка ущерба от опасного влияния источников электромагнитного поля	367
11.1. Техногенные риски и основные принципы обеспечения безопасности жизнедеятельности человека.....	367
11.1.1. Понятия риска и безопасности.....	367
11.1.2. Приемлемый риск и его оценка	369
11.1.3. Структура техногенного риска.....	371
11.1.4. Математическая модель риска	374
11.2. Виды ущербов и их интегральная оценка	376
11.3. Экономический анализ техногенной безопасности	379
11.4. Концепция стоимости статистической жизни человека.....	384
11.5. Применение теории игр для оценки и прогнозирования электромагнитной обстановки	387
Послесловие.....	392
Библиографический список	393

ПРЕДИСЛОВИЕ

С введением в 2000 году в учебные программы Государственного образовательного стандарта высшего профессионального образования для электроэнергетических и электротехнических специальностей новой учебной дисциплины «Электромагнитная совместимость в электроэнергетике» были заложены методологические основы содержания учебного курса для подготовки инженеров-электриков и получения ими знаний по важнейшим научным и прикладным проблемам современной электротехники, связанным с изучением негативных последствий влияния электромагнитных процессов природного и техногенного характера на человека и среду его обитания.

XX век ознаменовался стремительным развитием электротехники и радиотехники. Широкое распространение линий электропередачи высокого напряжения, радиоэлектронных устройств и средств связи привело к существенному возрастанию уровней электромагнитных полей различных частотных диапазонов и расширению режимов генерации этих полей в окружающей среде. Было установлено, что электромагнитное поле (ЭМП) представляет серьезную опасность жизни и здоровью человека и оказывает негативное влияние на функционирование радиоэлектронных средств (РЭС). Развитие электроэнергетики и радиотехники стало сдерживаться отрицательными явлениями, порожденными этой техникой, ее количественным ростом. Дальнейший прогресс техники потребовал решения проблемы обеспечения безопасности человека, экологии внешней среды и совместного надежного функционирования различных радио- и электротехнических систем. Новое научное направление, призванное обеспечить одновременную и совместную работу различного радиотехнического, электронного и электротехнического оборудования, получило название электромагнитной совместимости.

Начало 1990-х годов характеризуется интенсивным развитием электротехнологии, телевизионной техники, компьютеров, мобильных средств связи, электронной бытовой и офисной техники, что вызвало появление большого количества искусственных источников электромагнитного поля и обусловило «электромагнитное загрязнение» среды обитания человека. Особенно электромагнитное загрязнение наблюдается вблизи линий электропередачи, тепловых сетей, электрифицированных железных дорог, телевизионных станций, спутниковой и сотовой связи, аэродромов и радаров ГИБДД. Электромагнитное загрязнение в крупных городах уже превышает природные уровни в тысячи раз.

Факты свидетельствуют, что обычный уровень низкочастотного электромагнитного поля крупного промышленного города соответствует ситуации природной «магнитной бури». Уже сегодня электромагнитное загрязнение окружающей среды, наряду с химическим и радиационным, — наиболее распространенный вид загрязнения, несущий опасные глобальные последствия и вызывающий большую обеспокоенность как ученых, так и населения.

Всемирная организация здравоохранения включила проблему электромагнитного загрязнения окружающей среды в перечень приоритетных проблем человечества. Исследования убедительно показали существование значимого неблагоприятного воздействия ЭМП на здоровье человека. Этот вывод был сделан учеными России, США, Швеции, Германии, Великобритании и других стран. В решении Межведомственной комиссии Совета безопасности Российской Федерации по экологической безопасности №2-2 от 20 февраля 1996 г. указано, что «неблагоприятное воздействие на человека и окружающую среду электромагнитных излучений принимает опасные размеры». Актуальность этой проблемы нашла свое отражение в специальном постановлении Президиума Российской академии медицинских наук.

В последние годы в высшей школе наметились положительные тенденции в понимании роли и актуальности изучения студентами проблем техногенной безопасности. Подготовка современных инженеров-электриков, способных эффективно решать многофакторные задачи обеспечения безопасности и комфортной среды обитания человека, а также надежного совместного функционирования радиоэлектронных средств и электрических установок, является сегодня своевременной и актуальной. Результатом этого было введение в образовательные программы междисциплинарного учебного курса по электромагнитной совместимости (ЭМС) в радиотехнике, на железнодорожном транспорте, в автомобилестроении.

ЭМС — сравнительно молодая, но быстро развивающаяся дисциплина, элементы которой зародились в 50-е годы XX века, а основные положения этой дисциплины были сформулированы только четверть века тому назад (США, Англия, Германия, Россия, Швейцария и др.). Как наука ЭМС возникла на стыке электроэнергетики и электроники, придав новый импульс развитию этих, ставших уже классическими, дисциплин. Основным инструментом новой науки остался физико-математический аппарат теоретической электротехники — в частности классическая теория электромагнитного поля. Поэтому студентам электроэнергетических, электротехнических и радиотехнических специальностей, прослушавших курсы «Теоретические основы электротехники», «Техника высоких напряжений», «Электрические сети», «Радиопередающие устройства» и пр., предстоит в полной мере использовать полученные знания, «то, что остается, когда выученное позабыто», для овладения новыми понятиями ЭМС.

Дисциплина «Электромагнитная совместимость» является новой в системе подготовки специалистов по электроэнергетике. Ее методология еще не сформирована в такой мере, как в признанных, ставших классическими, дисциплинах, например «Электрические сети и системы», «Электроснабжение», «Релейная защита и автоматика» и др. Одной из основных причин этого является то, что, несмотря на значительный опыт, накопленный при решении практических задач, теория электромагнитной совместимости еще не развита в достаточной степени. Другая причина связана с имевшей до недавнего времени тенденцией к недооценке роли ЭМС со стороны высшей школы. Наконец, сложность формирования этой дисциплины связана с комплексным характером решения проблемы в целом. Так, при рассмотрении ЭМС в электроэнергетике должен охватываться достаточно широкий круг вопросов — от изложения концепции электромагнитного поля до описания современных методов и технических средств обеспечения электромагнитной совместимости.

Проблема электромагнитной совместимости неисчерпаема. Это объясняется большим разнообразием как классов электроустановок, так и типов информационно-технологического оборудования (ИТО). Чрезвычайное разнообразие назначения и устройств электроустановок и ИТО в различных отраслях экономики исключило возможность применения рецептурного подхода к решению большинства задач электромагнитной совместимости. К сожалению, каждая из имеющихся в настоящее время нескольких высококачественных монографий по ЭМС отличается узкой направленностью (электрические станции и подстанции, бытовая электроника, железнодорожная связь, автомобильное и тракторное электрооборудование и т. д.) и потому не может быть использована в качестве универсального учебника по ЭМС, пригодного для подготовки инженера-электротехника по всем специальностям электротехнического профиля.

В связи с этим в настоящем учебнике разработана общая методология решения наиболее характерных задач электромагнитной совместимости. Выявлено сравнительно небольшое число наиболее характерных типовых ситуаций, на примере которых показана об-

щая методология решения основных задач электромагнитной совместимости различных электроустановок и информационно-технологического оборудования. В качестве таких задач рассмотрены:

- 1) разработка одного из условий электромагнитной совместимости электроустановок — условия электробезопасности;
- 2) разработка требований к заземляющим устройствам электроустановок всех классов напряжений и ИТО;
- 3) разработка требований к молниезащите зданий и сооружений, насыщенных электроустановками и ИТО всех категорий и уровней защиты;
- 4) разработка требований к оптимальным системам комплексной безопасности электроустановок зданий, включающей экологическую, электрическую и пожарную.

Изучение этих разделов должно помочь студентам овладеть навыками самостоятельного решения новых нестандартных задач электромагнитной совместимости. Овладение технологией обеспечения электромагнитной совместимости возможно только при условии ясного представления физических процессов, лежащих в основе проблем ЭМС. Именно поэтому в курсе особое внимание уделено физике электромагнитного влияния и защите от него посредством заземления, зануления, уравнивания потенциалов, экранирования, а также — электромагнитным процессам, определяющим форму импульса тока молнии. Приведенные в соответствующих разделах учебника материалы по перечисленным вопросам *развивают и дополняют* сведения, известные студентам из ранее прослушанных курсов ТОЭ, ТВН, «Электрические сети и системы», «Электрические станции и подстанции» и др.

«Основы электромагнитной совместимости» представляют собой первый учебник, предназначенный для электроэнергетических и электротехнических специальностей вузов.

Содержание книги определило вопросы, предусмотренные учебной программой дисциплины федерального компонента ОПД. Ф.09 Государственного образовательного стандарта. Ее целью является изложение необходимого объема знаний в области ЭМС в электроэнергетике. В результате изучения данной дисциплины студент должен знать причины электромагнитного загрязнения окружающей человека среды, иметь представления о механизме воздействия электромагнитного излучения и электрического тока на организм человека, быть способным анализировать факторы, обуславливающие электромагнитные помехи в электроустановках, линиях связи, а также факторы, влияющие на качество электрической энергии в системах электроснабжения. Изучение дисциплины должно способствовать развитию системы взглядов на принципы обеспечения электромагнитной совместимости с учетом влияния основных факторов, характеризующих электромагнитную обстановку как в производственных, так и в бытовых условиях.

Трудности освоения этой дисциплины обусловлены ее комплексным характером. Как уже отмечалось, проблемой ЭМС охватывается широкий круг объектов и явлений. Ее изучение должно опираться на известные студенту свойства и характеристики электроустановок, создающих отрицательную электромагнитную среду обитания, свои и помехи в их работе, ухудшающие качество электроэнергии. Однако в существующих учебных дисциплинах, в том числе в курсе «Безопасность жизнедеятельности», перечисленные выше вопросы не нашли достаточного отражения и мало освещены в соответствующих учебных пособиях. Поэтому целесообразно расширить содержание программы дисциплины, включив в учебник такие вопросы, как техногенные риски и методы их оценки, анализ и синтез оптимальных систем безопасности электроустановок, включая пожарную безопасность, нормирование и техническое регулирование в сфере техногенной безопасности. Перечисленный круг вопросов освещается с опорой на многолетние исследования авторского коллектива. При подготовке книги

возникли дополнительные трудности, обусловленные особенностями терминологии в области ЭМС, которая еще не сформировалась в полной мере и не охватывает всех используемых понятий, а некоторые из них продолжают оставаться предметом научной дискуссии. Отсутствие в настоящее время технических регламентов по электромагнитной совместимости не позволяет опираться на узаконенные терминологические стандарты.

В этой связи представляется целесообразным введение обобщенного понятия «электромагнитная безопасность» (ЭМБ) — состояние объекта, при котором с определенным (допустимым) значением риска (вероятности) исключены потенциальные опасности влияния ЭМП на здоровье человека, среду обитания, работоспособность электроустановок и радиоэлектронных средств. Заметим, что ЭМБ, равно как и «электробезопасность» (применительно к электроустановкам), характеризуют проявления одной и той же физической сущности — электромагнитного поля.

В учебнике невозможно было охватить все вопросы, относящиеся к проблеме ЭМС. Поэтому критические замечания и пожелания будут приняты с благодарностью.

Выражаем признательность д. т. н., профессору, заведующему кафедрой «Электрические станции» Московского энергетического института (технического университета) В. А. Старшинову и д. т. н., профессору, заведующему кафедрой «Электроснабжение и электрический транспорт» Красноярского государственного технического университета В. И. Пантелееву за ряд ценных замечаний и предложений, давших возможность улучшить книгу.

Авторы

ВВЕДЕНИЕ

Решение проблем обеспечения техногенной безопасности в любом современном государстве может служить наиболее достоверным критерием для оценки как степени экономического развития и стабильности этого государства, так и нравственного состояния общества. Это объясняется тем, что решение сложных проблем, порожденных научно-техническим прогрессом, требует значительных капиталовложений и высокой культуры производства, а следовательно, под силу только экономически развитому, стабильному государству, обладающему мощным научно-техническим и интеллектуальным потенциалом.

Определяющая роль в решении этих проблем должна принадлежать высшей школе, техническим вузам, в которых профессиональная подготовка будущих разработчиков новой техники и технологий, а также руководителей производства во многом будет определять эффективность мер по обеспечению техногенной безопасности. Важнейшей целью является формирование у будущих специалистов мышления, основанного на осознании главного принципа — безусловности приоритетов безопасности при решении любых инженерных задач, в том числе проблемы электромагнитной совместимости в электроэнергетике.

Как уже отмечалось, освоение человеком электрической энергии и электромагнитных технологий, начавшееся более ста лет назад, приобретает в настоящее время все большие масштабы.

Электромагнитную совместимость радиоэлектронных систем (РЭС) как научную проблему, имеющую важное практическое значение, начали целенаправленно решать примерно в середине XX века, т. е. в период бурного развития радиоэлектроники и систем связи. Однако первая отечественная публикация по электромагнитной совместимости появилась в 1900 году, т. е. вскоре после изобретения радио А. С. Поповым (1895 г.).

Представляют интерес выводы об условиях электромагнитной совместимости, которые были сделаны по результатам проведенных А. С. Поповым опытов. «Если в районе досягаемости станции работает другая пара станций, то одновременная их работа невозможна, и встает вопрос о дальнейшей разработке электрического «камертона» (здесь говорится о станции с возможностью настройки, при которой можно принимать сигналы только нужной станции.) Крайне желательно изобретение прибора, указывающего, откуда идет к станции волна...»

Оценивая результаты, полученные российскими исследователями 100 лет назад, с позиций настоящего времени, убеждаемся в их огромной практической значимости, так как уже тогда были заложены фундаментальные основы решения проблемы электромагнитной совместимости РЭС на десятилетия вперед, в частности решены вопросы обеспечения частотной избирательности радиоприемных устройств и сужения спектров излучения передающих устройств, повышения пространственной селективности их антенн, освоения более высоких диапазонов рабочих частот.

В конце XX века обозначился новый вид экологической опасности — электромагнитное загрязнение окружающей среды. Стало привычным использование радиоизлучателей на домах и автомашинах и применение радиотелефона как средства связи. Линии электропередачи и радиопередающие центры повсеместно размещаются в жилых районах и в местах отдыха. В настоящее время источники электромагнитных излучений все более распространяются и на производстве, и в быту, поэтому растет число людей, подвергающихся воздействию этих излучений. Электроэнергетическая отрасль в своем арсенале имеет мощные источники электромагнитных полей промышленной частоты, среди которых высоковольтные подстанции, воздушные линии электропередачи высокого, сверхвысокого и ультравысокого

напряжения. В квартирах наших граждан используются десятки видов современной бытовой техники, включая электрический подогрев пола, системы микроклимата и т. д., которые создают опасную среду обитания человека и домашних животных.

Среди зарегистрированных последствий воздействия электромагнитного загрязнения на человека самым распространенным является поражение сердечно-сосудистой и пищеварительной систем. Среди последствий электромагнитного загрязнения специалисты называют также нарушения поведения (вплоть до самоубийства), потерю памяти, болезни Паркинсона и Альцгеймера, синдром внезапной смерти у грудных детей, расстройства половой функции и другие серьезные патологические заболевания. По некоторым данным, значительная часть случаев инфаркта миокарда в крупных городах вызвана «скачками» мощных техногенных низкочастотных электромагнитных полей.

Задача преодоления негативного воздействия электромагнитного загрязнения значительно усложняется существованием взаимодействия естественного электромагнитного поля и антропогенного загрязнения. Парадокс заключается в том, что природное электромагнитное поле образует и поддерживает жизнь на Земле, а вызванное деятельностью человека искусственное электромагнитное загрязнение, интенсивность которого во многих случаях значительно превышает естественный фон, угрожает всему живому. Возникшее противоречие между природным и техногенным характером проявления ЭМП может быть преодолено, если изучать проблему электромагнитной совместимости не только с позиции рассмотрения совместимости функционирования радиотехнических и электротехнических устройств, но и в более широком аспекте — «совместимости» техники, человека и среды его обитания. В контексте изложенного рассмотрим более подробно основные негативные проявления электромагнитного поля:

1. Нежелательное деструктивное воздействие ЭМП на объекты, проявляющееся в виде помех, которые ухудшают качество функционирования радиоэлектронной аппаратуры. Эти помехи могут быть вызваны как естественными природными электромагнитными процессами, так и деятельностью человека.

Естественные помехи объективно существуют в природе и порождаются электрическими процессами в атмосфере (грозовыми разрядами, северными сияниями, разрядами статического электричества во время пылевых бурь и т. д.), а также тепловыми радиоизлучениями земной поверхности и радиоизлучением внеземных космических источников.

Помехи искусственного происхождения обусловлены различными электромагнитными процессами, протекающими в технических устройствах. Например, помехи (непреднамеренные) могут быть вызваны излучением РЭС или работ различных электротехнических установок. К непреднамеренным помехам также относят внутренние шумы устройств и приборов, объективно присущие любым электрическим цепям.

Наличие помех, создаваемых при работе различных радиоэлектронных систем, и негативные последствия их влияния, как уже отмечалось, породили в середине XX века проблему электромагнитной совместимости РЭС. В этом случае понятие «*электромагнитная совместимость*» определяется как способность радиоэлектронных средств и электротехнических установок одновременно и совместно функционировать в реальных условиях эксплуатации при воздействии непреднамеренных электромагнитных помех и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим устройствам.

2. Опасное воздействие техногенного электромагнитного излучения высоких и сверхвысоких частот на организм человека. Установлено, что влияние ЭМП на организм человека зависит от таких физических параметров, как длина волны, интенсивность излучения, режим облучения — непрерывный и прерывистый, а также от про-

должительности воздействия на организм. Биологическое действие ЭМП в диапазоне радиочастот характеризуется тепловым и нетепловым эффектом. Под тепловым действием подразумевается интегральное повышение температуры тела или отдельных его частей при общем или локальном облучении. Нетепловой эффект связан с переходом электромагнитной энергии в организме человека в нетепловую форму, проявляющуюся в виде молекулярного резонансного процесса, фотохимической реакции и др. Учитывая, что по своим биофизическим свойствам ткани организма неоднородны, возникает неравномерный нагрев на границе раздела с высоким и низким содержанием воды, что определяет высокий и низкий коэффициент поглощения энергии.

3. *Опасное воздействие электроустановок промышленной частоты — линий электропередачи высокого и сверхвысокого напряжения* — проявляется в виде электромагнитного загрязнения среды обитания человека, животных и растительного мира. Электрические и магнитные поля могут воздействовать на человека, если он находится кратковременно в непосредственной близости ЛЭП или других установок высокого напряжения (например, при производстве работ) или постоянно на определенном расстоянии (в случае, если линия электропередачи сверхвысокого напряжения проходит через жилую местность).

При оценке биологического влияния электрических и магнитных полей основное внимание должно уделяться тем их проявлениям, которые представляют опасность для здоровья людей. На основании многолетних исследований установлено:

а) кратковременное воздействие на людей электрического поля (ЭП) с напряженностью до 20 кВ/м не оказывает вредного влияния на здоровье человека;

б) вызывают определенную угрозу для жизни поверхностные и вторичные эффекты ЭП — разряды и токи, протекающие через тело человека при его прикосновении к металлическим объектам, находящимся под электрическим потенциалом;

в) магнитное поле (МП) — магнитостатическое и переменное — создает в биологических объектах магнитомеханические эффекты, проявляющиеся в виде магнитной ориентации диа- и парамагнитомеханических молекул или клеток.

Возникает также нежелательное электронное взаимодействие между магнитной индукцией МП и биополем человека. При плотности тока 10...50 мкА/см могут возникать стойкие опасные последствия для жизни и здоровья человека, начиная от ощущения неожиданного страха до воздействия поля на нервные волокна мозга, приводящие к параличу или остановке сердца.

4. *Опасное действие электрического поля промышленной частоты, возникающее при попадании человека под напряжение.* Оно проявляется за счет термического, электролитического, биологического, механического и светового воздействия на организм. Термическое воздействие характеризуется нагревом кожи тела и ткани вплоть до появления крупных ожогов. Электролитическое воздействие заключается в химическом разложении жидкости лимфы и крови. Биологическое действие электрического тока проявляется в нарушении физиологических процессов, протекающих в организме человека, и сопровождается возбуждением или разрушением ткани, судорожным сокращением мышц органов дыхания и сердца. Механическое воздействие приводит к разрыву тканей и органов, а световое — к поражению глаз.

Из всех видов проявления электромагнитного поля электрический ток в силу его массового использования во всех сферах человеческой деятельности в настоящее время представляет наибольшую опасность как для человека, так и для среды его обитания (например, пожары от электроустановок зданий и сооружений составляют 30-40 % общего числа пожаров в России).

5. *Негативное влияние на качество электроэнергии потребителей в системах электроснабжения, обусловленное искажением форм кривых тока и напряжения, появлением высших гармоник от нелинейных нагрузок в электрической цепи.* Генерируемые в электроустановках высшие гармоники оказывают также отрицательное влияние на расположенные вблизи линии связи. Кроме того, высшие гармоники могут проявляться и при изменениях режимов работы линий высокого напряжения. Так, при замыкании линии накоротко на одном из ее концов появляется пучность тока и, как следствие, увеличиваются гармоники тока. При размыкании в конце линии возникает пучность напряжения, приводящая к увеличению гармоник напряжения.

6. *Опасные последствия влияния воздушных линий электропередачи высокого напряжения на находящиеся вблизи трубопроводы, проходящие по территории населенных пунктов.* В нормальном или аварийном режиме линии на металлических конструкциях трубопровода могут возникать наведенные электрические потенциалы, тем самым увеличивается зона поражения электрическим током людей и животных.

Таким образом, мешающее и опасное электромагнитное загрязнение окружающей среды является продуктом техногенной деятельности человека. Эволюция жизни на Земле не выработала защиты от техногенных угроз, и только усилиями человека возможно улучшить техногенную обстановку среды обитания — уменьшить уровень электромагнитного загрязнения до сопоставимого природного его фона. Достичь этого можно путем принятия действенных государственных мер законодательного экономического и технологического характера.

В России формируется государственная политика в области охраны окружающей среды. Проводится комплекс исследований по изучению источников электромагнитного излучения и методов борьбы с ними. Российские специалисты сотрудничают с международными организациями, среди которых Всемирная организация здравоохранения, Международная ассоциация по радиационной защите (IRPA), Международный комитет по защите от неионизирующих излучений (INIRS), Европейский комитет по электромагнитной стандартизации (CENELEC), Международная электротехническая комиссия (МЭК).

Сегодня очевидна также необходимость ускорения темпов разработки и совершенствования системы гигиенического нормирования предельно допустимых уровней электромагнитного загрязнения, вызванного различными источниками, в том числе персональными компьютерами, радиотелефонами, телевизорами, микроволновыми печами, линиями электропередачи и др., а также обобщения различных отраслевых нормативных материалов и применяемых в России методик в единый нормативно-технический стандарт (технический регламент).

Важное значение имеет совершенствование мониторинга, включающего оценку электромагнитного загрязнения от излучающих источников (производственных и бытовых) на всех этапах жизненного цикла — проектирование, строительство, эксплуатация, реконструкция и утилизация с целью приведения уровня загрязнения к гигиеническим нормативам. Приоритетным направлением является развитие дозиметрии электромагнитного воздействия, в том числе индивидуальной, с разработкой и производством специальных измерительных приборов. Актуальной также является разработка методов защиты окружающей среды и человека от опасных проявлений ЭМП и электрического тока.

ГЛАВА 1

ОСНОВНЫЕ СВЕДЕНИЯ ОБ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

1.1. Основные понятия. Термины и определения

Приведенные основные понятия, термины и определения соответствуют действующим нормативно-правовым документам и используются при рассмотрении теоретических и практических вопросов, связанных с электромагнитной совместимостью в электроэнергетике. Некоторые термины приводятся в соответствии с определениями, представленными в книге «Электромагнитная совместимость в электротехнике и электроэнергетике» под редакцией А. Ф. Дьякова (2003 г.), а также вводятся авторские понятия, термины и определения.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) — способность электротехнических или электронных устройств надежно функционировать с заданным качеством в определенной электромагнитной обстановке и не создавать при этом недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам, а также не оказывать вредного воздействия на биологические объекты, в том числе и на организм человека.

Автоматические и автоматизированные системы технологического управления (АСТУ) электросетевыми объектами (энергосистемами) — совокупность систем управления, реагирующих на параметры электрического режима работы оборудования (электрической сети) и предназначенных для реализации функций управления оборудованием электросетевого объекта, электрическим режимом сети (энергосистемы) с целью достижения надежного и экономичного функционирования оборудования в нормальном режиме, обеспечения нормативных показателей качества электрической энергии и сохранения устойчивости функционирования электросетевого объекта (энергосистемы) в аварийных режимах. К таким системам относятся АСДУ (автоматизированные системы диспетчерского управления), АРН (системы автоматического регулирования напряжения), АРЧМ (системы автоматического регулирования частоты и перетока мощности), ПА (системы противоаварийной автоматики), РЗА (системы релейной защиты и автоматики), АСУТП (автоматизированные системы технологического управления на объектах), ССПИ (системы обзора и передачи оперативной и технологической информации, включая телекоммуникационные линии и линии связи).

Аппарат — конструктивно завершенное техническое средство, имеющее корпус (оболочку) и порты для внешних соединений, выполняющее прямую функцию, предназначенное для поступления в обращение и применения конечным пользователем.

Аппаратура, влияющая на безопасность и устойчивость работы электрической станции (подстанции) — аппаратура релейной защиты и автоматических систем управления (АСУ), автоматизированных систем контроля и учёта потребления электрической энергии (АСКУЭ) и т. п., нарушение нормального функционирования которой может привести к одному или нескольким из следующих событий или способствовать их наступлению: поражению персонала электрическим током, нарушению нормальной работы основного (первичного) оборудования электрической станции, подстанции или сети в целом, нарушению заданных алгоритмов работы устройств РЗА, возникновению значительного материального ущерба.

Безэховая камера — экранированное помещение, покрытое радиочастотным поглощающим материалом для уменьшения отраженных электромагнитных излучений от внутренних поверхностей.

Биологические объекты — люди (персонал, обслуживающий технические средства, и население), животные и растения.

Внешние устройства молниезащиты — комплекс, состоящий из молниеприемников, токоотводов и заземлителей.

Внутреннее устройство заземления (здания) — совокупность заземляющих проводников, расположенных внутри здания.

Внешняя помеха — помеха, источник которой находится за пределами вторичных цепей (например короткие замыкания и коммутационные операции в сети высокого напряжения, молниевые разряды, работа радиосредств).

Внутренняя помеха — помеха, возникающая непосредственно во вторичных цепях (включая цепи питания переменным и постоянным током).

Выносной заземлитель — заземлитель, выполненный за пределами территории энергетического объекта.

Внутренние устройства молниезащиты — устройства, ограничивающие электромагнитные воздействия тока молнии внутри защищаемого объекта (пространства).

Восприимчивость к электромагнитной помехе (электромагнитная восприимчивость) — неспособность технических средств работать без ухудшения качества функционирования при наличии электромагнитной помехи или недостаточная помехоустойчивость технических средств.

Вторичная цепь — любая цепь с номинальным напряжением ниже 1 кВ, используемая для передачи информации в виде дискретного или аналогового сигнала, либо для питания потребителей на территории данной электростанции или подстанции постоянным или переменным током.

Высокочастотная электромагнитная помеха — электромагнитная помеха, преобладающая часть спектра которой расположена на частотах, больших определенной частоты.

Высокочастотное устройство — техническое средство, предназначенное для генерирования и использования радиочастотной энергии в промышленных, научных, медицинских, бытовых или других целях, за исключением применения в области электросвязи.

Гальваническая связь — связь между различными элементами через активное сопротивление.

Гальваническая развязка (изоляция) — мероприятие или техническое средство, применение которого направлено на исключение гальванической связи между элементами.

Динамическое изменение напряжения электропитания — электромагнитная помеха, представляющая собой ступенчатое кратковременное изменение напряжения электропитания за регламентированный нижний или верхний предел, длительностью от полупериода частоты переменного тока до нескольких секунд с последующим возвращением к исходному значению.

Естественный заземлитель — находящиеся в соприкосновении с землей электропроводящие части коммуникаций, зданий и сооружений производственного или иного назначения, используемые для целей заземления.

Заземлитель — проводник или совокупность металлических соединенных между собой проводников, находящихся в соприкосновении с землей.

Заземляющее устройство — совокупность заземлителя и заземляющих проводников.

Заземляющий проводник — проводник, соединяющий заземляемые части с заземлителем.

Изготовитель технического средства — физическое лицо, являющееся индивидуальным предпринимателем, или юридическое лицо, осуществляющее разработку и изготовление компонента, аппарата, системы и/или проектирование и монтаж установки.

Изолированная электромагнитная обстановка — совокупность электромагнитных явлений или процессов в изолированной области пространства, в которой исключается создание техническими средствами, находящимися в ней, электромагнитных помех и электромагнитных воздействий за пределами указанной области, а также исключается влияние на эти технические средства внешних электромагнитных помех.

Испытательная лаборатория электромагнитной совместимости — испытательная лаборатория, осуществляющая испытания технических средств в части уровней создаваемых электромагнитных помех и устойчивости к электромагнитным помехам.

Испытательная лаборатория по качеству электрической энергии — испытательная лаборатория, осуществляющая испытания электрической энергии в электрических сетях в части уровней электромагнитных помех (показателей качества электрической энергии).

Индуктивная электромагнитная помеха — электромагнитная помеха (излучаемая электромагнитная помеха), распространяющаяся в виде электромагнитных полей в непроводящих средах.

Качество функционирования технического средства — совокупность характеристик, определяющих работоспособность технического средства в условиях эксплуатации.

Качество электрической энергии — совокупность свойств электрической энергии в электрической сети, определяющих электромагнитную совместимость технических средств, получающих питание от этой сети. Качество электрической энергии характеризуется уровнями электромагнитных помех, представляющих собой отклонения напряжения, формы синусоидальности, частоты и симметрии напряжений от установленных значений.

Класс жесткости испытаний (входа) аппаратуры на устойчивость к данному виду помех — определенный стандартами уровень испытательного воздействия данного вида, который прикладывается к аппаратуре (или ее конкретному входу) в условиях испытательной лаборатории ЭМС с целью проверки устойчивости аппаратуры к помехам.

Компонент — конструктивно завершенное техническое средство, выполняющее прямую функцию, предназначенное для использования в качестве составной части аппарата, системы или установки. Компонент может поступать в обращение для применения конечным пользователем и для применения изготовителем технического средства в составе аппарата, системы и установки, а также может применяться в составе аппарата, системы или установки без поступления в обращение.

Кондуктивная электромагнитная помеха — электромагнитная помеха (кондуктивные электромагнитные помехи представляют собой токи), распространяющаяся по элементам электрической сети, по проводящим конструкциям и в земле.

Молниезащитное устройство — система, предназначенная для защиты зданий или сооружений, оборудования и людей от воздействий молнии.

Национальный стандарт электромагнитной совместимости — национальный стандарт, устанавливающий требования, относящиеся к ограничению уровней электромагнитных помех, создаваемых техническими средствами, обеспечению устойчивости технических средств к электромагнитным помехам, к ограничению уровней электромагнитных помех в электрических сетях общего назначения (обеспечению качества электрической энергии), и/или соответствующие методы испытаний технических средств. В качестве основы для разработки национальных стандартов электромагнитной совместимости используются международные и/или европейские стандарты.

Параллельный заземленный проводник — проводник, предназначенный для снижения уровня наведенного на кабель напряжения и токовой нагрузки в экране кабеля.

Подвижная установка — совокупность взаимосвязанных аппаратов, систем и компонентов, и, при необходимости, других изделий, подлежащих монтажу для выполнения задач при перемещении и/или при использовании в различных местах размещения.

Помеха общего типа (провод — земля) — составляющая помехи, напряжение которой приложено между любым проводником рассматриваемой вторичной цепи и ближайшей заземленной конструкцией, не относящейся к токоведущим частям.

Помеха дифференциального типа (провод — провод) — составляющая помехи, напряжение которой приложено между любыми двумя проводниками рассматриваемой цепи.

Помехоэмиссия (электромагнитная эмиссия от источника помех) — генерирование источником помехи электромагнитной энергии или способность технических средств излучать электромагнитные поля различного диапазона частот, которые оказывают негативные воздействия на другие технические средства, а также на биологические объекты.

Потребитель электрической энергии — юридическое или физическое лицо, осуществляющее пользование электрической энергией (мощностью).

Противофазная (несимметричная) помеха — напряжение между проводником и регламентированным эталоном, обычно землей.

Прямая функция — любая функция, непосредственно выполняемая компонентом или аппаратом при его применении конечным пользователем в соответствии с назначением, определенным в технической документации изготовителя. При поступлении компонента в обращение для применения конечным пользователем прямая функция должна быть реализуемой без дополнительных подключений и настроек, кроме тех, которые могут быть выполнены любым пользователем.

Пульсации напряжения постоянного тока — процесс периодического или случайного изменения постоянного напряжения относительно его среднего уровня в установившемся режиме работы источника, преобразователя электрической энергии или системы электроснабжения.

Радиоэлектронное средство — техническое средство, состоящее из одного или нескольких радиопередающих или радиоприемных устройств либо из их комбинации и вспомогательного оборудования, предназначенное для передачи и/или приема радиоволн.

Разряд статического электричества — импульсный перенос электростатического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами при непосредственном контакте или при сближении их на некоторое, достаточно маленькое расстояние.

Сертификат электромагнитной совместимости — документ, выданный в соответствии с правилами сертификации для подтверждения соответствия сертифицированного технического средства установленным стандартам требованиям по электромагнитной совместимости.

Сертификация системы качества энергоснабжающей организации — действие организации, независимой от энергоснабжающей организации и потребителей электрической энергии, удостоверяющее, что должным образом идентифицированная система качества энергоснабжающей организации обеспечивает стабильность качества подаваемой потребителям электрической энергии в соответствии с установленными стандартами требованиями.

Синфазная (симметричная) помеха — напряжение между любыми двумя проводниками из заданной группы активных проводников.

Система — совокупность взаимосвязанных аппаратов и/или компонентов, выпускаемых в обращение для применения конечным пользователем в качестве изделия с единым функциональным назначением, подлежащих сборке в целях выполнения определенной задачи.

Система качества энергоснабжающей организации — совокупность организационной структуры, методик, процессов и ресурсов энергоснабжающей организации, необходимая для управления качеством подаваемой потребителям электрической энергии.

Система электроснабжения общего назначения — совокупность электроустановок и электрических устройств энергоснабжающей организации, предназначенных для обеспечения электрической энергией различных потребителей (приемников электрической энергии).

Средство измерения электромагнитных помех — средство измерения, обеспечивающее измерение параметров электромагнитных помех в регламентированных условиях.

Стандарт — нормативный документ, который в соответствии с законодательством Российской Федерации устанавливает обязательные требования к техническим средствам и к качеству электрической энергии (государственный стандарт Российской Федерации, государственные санитарно-эпидемиологические правила и нормативы, строительные нормы и правила и другие документы).

Стационарная установка — совокупность взаимосвязанных аппаратов, систем, компонентов, и, при необходимости, других изделий, подлежащих монтажу для выполнения задач в определенном месте.

Техническое средство (ТС) — электротехническое, электронное или радиоэлектронное изделие (оборудование, аппаратура или система), а также изделие (оборудование, аппаратура или система), содержащее электрические и/или электронные компоненты (схемы).

Точка общего присоединения — точка электрической сети общего назначения, электрически ближайшая к сетям рассматриваемого потребителя электрической энергии

(входным устройствам рассматриваемого приемника электрической энергии), к которой присоединены или могут быть присоединены электрические сети других потребителей (входные устройства других приемников).

Уровень электромагнитной совместимости в системе энергоснабжения — регламентированный уровень кондуктивной электромагнитной помехи, используемой в качестве эталонного для координации между допустимым уровнем помех, вносимым техническими средствами энергоснабжающей организации и потребителей электрической энергии, и уровнем помех, воспринимаемым техническими средствами без нарушения их нормального функционирования.

Устойчивость технических средств к электромагнитным помехам (помехоустойчивость технических средств) — способность технических средств сохранять заданное качество функционирования при воздействии на них, регламентированных стандартами электромагнитных помех (в качестве электромагнитной помехи может фигурировать практически любое электромагнитное явление в широком диапазоне частот).

Уровень устойчивости к электромагнитной помехе, уровень помехоустойчивости (допустимый уровень) — максимальный уровень электромагнитной помехи конкретного вида, воздействующей на определенное техническое средство (устройство), при котором техническое средство сохраняет заданное качество функционирования.

Уровень электромагнитной помехи — значение величины электромагнитной помехи, измеренное в регламентированных условиях.

Фликер — субъективное восприятие человеком колебаний светового потока искусственных источников освещения, вызванных колебаниями напряжения в электрической сети, питающей эти источники.

Центр питания — распределительное устройство генераторного напряжения электростанции или распределительное устройство вторичного напряжения понизительной подстанции энергосистемы, к которым присоединены распределительные сети данного района.

Эквивалентное удельное сопротивление грунта — значение удельного сопротивления однородного грунта, в котором заземлитель имеет то же сопротивление растеканию тока, что и в грунте многослойной структуры.

Экран — устройство, используемое для уменьшения электромагнитного поля, проникающего в защищаемую область.

Электромагнитное поле — особая форма материи, посредством которой осуществляется взаимодействие между заряженными частицами. Характеризуется напряженностями (или индукциями) электрического и магнитного полей.

Электромагнитные волны — электромагнитное поле, распространяющееся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды. В вакууме скорость распространения электромагнитных волн $c \approx 300000 \text{ км/с}$. В однородных изотропных средах направления напряженностей электрического \vec{E} и магнитного \vec{H} полей перпендикулярны друг другу и направлению распространения волны, т. е. электромагнитная волна является поперечной. По длине волны λ различают радиоволны $\lambda > 10^{-2} \text{ см}$; световые волны (инфракрасные $\lambda = 2 \cdot 10^{-1} - 7,4 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, видимый свет $\lambda \approx 7,4 \cdot 10^{-5} - 4 \cdot 10^{-5} \text{ см}$, ультрафиолетовое излучение $\lambda \approx 4 \cdot 10^{-5} - 10^{-6} \text{ см}$); рентгеновское излучение с $\lambda \approx 10^{-5} - 10^{-12} \text{ см}$;

гамма-излучение с $\lambda < 10^{-8}$ см. При прохождении электромагнитной волны через среду возможны процессы отражения, преломления, дифракции и интерференции, дисперсии и др.

Электромагнитное воздействие — электромагнитное явление или процесс, которые влияют или могут повлиять на биологические объекты. К электромагнитным воздействиям относятся создаваемые техническими средствами в окружающем пространстве электромагнитные, электрические и магнитные поля.

Электромагнитное излучение от источника помехи — явление, процесс, при котором электромагнитная энергия излучается источником помехи в пространство в виде электромагнитного поля.

Электромагнитная обстановка (ЭМО) — совокупность электромагнитных явлений и/или процессов в данной области пространства или данной проводящей среде в частотном и временном диапазонах. В понятие ЭМО включают некоторые характеристики (например параметры заземляющего устройства), от которых существенно зависит устойчивость электронной аппаратуры к помехам.

Электромагнитная помеха — электромагнитное явление или процесс естественного или искусственного происхождения, которые снижают или могут снизить качество функционирования технического средства. Электромагнитная помеха может излучаться в пространство или распространяться в проводящей среде.

Электромагнитная безопасность биологических объектов — состояние защищенности биологических объектов от неблагоприятных электромагнитных воздействий.

Электрическая сеть общего назначения — электрическая сеть энергоснабжающей организации, предназначенная для подачи электрической энергии различным потребителям электрической энергии или техническим средствам.

(Электрическая) прочность изоляции цепей — действующее значение напряжения промышленной частоты или амплитудное значение импульсного напряжения заданной формы, которое может быть приложено к изоляции цепей без возникновения электрического пробоя изоляции (независимо от того, происходит ли после пробоя восстановление изоляции).

Энергообъект — совокупность электроустановок, зданий и сооружений, функционально связанных друг с другом и территориально приближенных.

1.2. Классификация источников электромагнитного излучения

Электромагнитное поле (ЭМП) — это вид материи, определенный во всех точках двумя векторными величинами, которые характеризуют две его стороны, называемые соответственно электрическим полем и магнитным полем, и оказывающий силовое воздействие на заряженные частицы, зависящее от их скорости и заряда. Электромагнитные излучения представляют собою распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью взаимосвязанные и не могущие существовать друг без друга переменные электрические и магнитные поля. Они имеют дуальную природу и обладают волновыми и квантовыми свойствами.

Квантовые свойства электромагнитных полей характеризуются энергией кванта:

$$W_{\text{кванта}} = h \nu ,$$

где $h = 6,626 \cdot 10^{-34}$ Дж · с — постоянная Планка;

ν — частота излучения, Гц.

Волновые свойства ЭМП описываются частотой f и длиной волны λ :
 – в проводящей среде

$$\lambda = \frac{2\sqrt{2} \pi}{\sqrt{\omega \gamma \mu_0 \mu_r}} = \frac{2\sqrt{2} \pi}{\sqrt{2 \pi f \gamma \mu_0 \mu_r}} = \frac{2\sqrt{\pi}}{\sqrt{f \gamma \mu_0 \mu_r}};$$

– в однородном изотропном диэлектрике

$$\lambda = \frac{1}{f \sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \frac{\omega}{2 \pi \sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}},$$

где $\omega = 2 \pi f$ — круговая частота, c^{-1} ;

γ — удельная электропроводность, $Om^{-1} m^{-1}$;

$\mu_0 = 4 \pi \cdot 10^{-7} \text{ Гн} / \text{ м} = 1,256 \cdot 10^{-6} \text{ Гн} / \text{ м}$ — магнитная постоянная;

μ_r — относительная магнитная проницаемость среды;

$\varepsilon_0 = 8,86 \cdot 10^{-12} \text{ Ф} / \text{ м}$ — электрическая постоянная;

ε_r — относительная диэлектрическая проницаемость среды.



Рис. 1.1 — Электромагнитный спектр излучения (шкала электромагнитных волн)

Электромагнитные волны представляют собой электромагнитные колебания, распространяющиеся в пространстве с конечной скоростью, зависящей от свойств среды, в которой они распространяются. Если электромагнитная волна распространяется в вакууме (воздушном пространстве), то $\mu_r = 1$, $\varepsilon_r = 1$, а фазовая скорость равна скорости света:

$$V = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \mu_r \varepsilon_0 \varepsilon_r}} = \frac{1}{\sqrt{\mu_0 \varepsilon_0}} = \frac{1}{\sqrt{1,256 \cdot 10^{-6} \cdot 8,86 \cdot 10^{-12}}} \approx 300000 \text{ км} / \text{ с}$$

Длина волны определяется по соотношению

$$\lambda = \frac{V}{f}.$$

Каждому виду электромагнитного излучения соответствует определенная частота и, соответственно, длина электромагнитной волны (рис. 1.1).

Токи различного диапазона частот создают в воздухе излучения, имеющие однотипную электромагнитную природу; различие между этими видами излучений — в длине волны и частоте колебаний, а значит, и в величине энергии кванта, составляющего электромагнитное поле. Электромагнитные волны, возникающие при колебании электрических зарядов (при прохождении переменных токов), называются радиоволнами.

Следует отметить, что глаз человека не различает электромагнитных излучений, длины волн которых не соответствуют оптическому (видимому) диапазону излучения (длина волны лежит в пределах от 380 до 760 нм).

Все электротехнические устройства, потребляющие электрическую энергию, излучают электромагнитные поля разной интенсивности, которая зависит от частоты и мощности устройства. Эти электромагнитные излучения вместе с естественными полями Земли и Космоса создают сложную и изменчивую электромагнитную обстановку.

Физические причины существования переменного электромагнитного поля (ЭМП) связаны с тем, что изменяющееся во времени электрическое поле \vec{E} приводит к возникновению вихревого магнитного поля \vec{H} , а изменяющееся магнитное поле \vec{H} создает вихревое электрическое поле \vec{E} . Совокупность этих взаимосвязанных параметров представляет собой электромагнитную волну (в частности — плоскую электромагнитную волну — рис. 1.2).

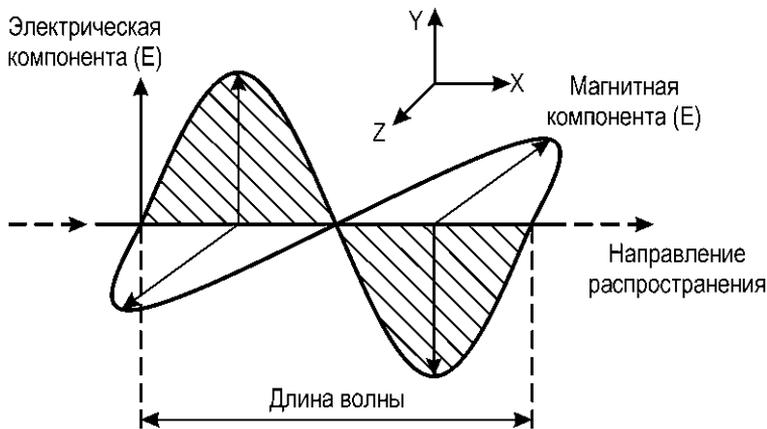


Рис. 1.2 – Две компоненты электромагнитного поля (дальняя зона излучения)

Переменное электромагнитное поле описывается уравнениями Максвелла:
– первое уравнение Максвелла

$$\text{rot } \vec{H} = \vec{j} + \left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right),$$

выражающее связь между ротором напряженности магнитного поля и плотностью тока в той же точке поля. Физический смысл этого уравнения состоит в том, что всякое изменение электрического смещения во времени $\left(\frac{\partial \vec{D}}{\partial t} \right)$ в некоторой точке поля, т. е. возникновение в ней тока смещения и тока проводимости, вызывает в этой точке вихрь магнитного поля $(\text{rot } \vec{H})$ — вихревое магнитное поле;

– второе уравнение Максвелла

$$\text{rot } \vec{E} = - \left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right),$$

которое определяет связь между ротором напряженности электрического поля и скоростью изменения магнитного поля в той же точке поля. Физический смысл этого уравнения состоит в том, что всякое изменение магнитного поля во времени $\left(\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \right)$ в какой-либо точке поля возбуждает вихрь или ротор электрического поля в той же точке поля, т. е. вызывает вихревое электрическое поле.

Конец ознакомительного фрагмента.

Приобрести книгу можно

в интернет-магазине

«Электронный универс»

e-Univers.ru