

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ И НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ
федеральное государственное бюджетное образовательное учреждение
высшего образования
«УЛЬЯНОВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»
Институт дистанционного и дополнительного образования

Р. Ф. ТИМИРГАЗИН

Электромагнитная совместимость

Учебное пособие

Ульяновск
УлГТУ
2017

УДК 621.311 (075)

ББК 31.27 я7

Т 41

Утверждено редакционно-издательским советом университета
в качестве учебного пособия.

Рецензенты:

генеральный директор ООО «Прометей», канд. техн. наук, доцент
Свиридов Ю. П.;

генеральный директор АО «Ульяновский Гипроавиапром»
Бицкий А. С.

Тимиргазин, Рустем Фидусович

Т 41 Электромагнитная совместимость : учебное пособие / Р. Ф. Тимиргазин;
Ульян. гос. техн. ун-т. – Ульяновск : УлГТУ, 2017. – 48 с.

ISBN 978-5-9795-1649-3

Учебное пособие включает руководство по изучению дисциплины, теоретический материал, тестовые задания и предназначено для студентов, обучающихся по направлению 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» очной и заочной форм обучения, изучающих дисциплину «Электромагнитная совместимость».

УДК 621.311 (075)

ББК 31.27 я7

ISBN 978-5-9795-1649-3

© Тимиргазин, Р. Ф., 2017
© Оформление. УлГТУ, 2017

ОГЛАВЛЕНИЕ

ВВЕДЕНИЕ	4
1. РУКОВОДСТВО ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ.....	5
1.1. Компетенции студента, формируемые в результате освоения учебной дисциплины, и ожидаемые результаты	5
1.2. Связь разделов дисциплин с формируемыми компетенциями	5
2. УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ	6
Раздел 1. Электромагнитная совместимость технических объектов	6
1.1. Электромагнитная совместимость, электромагнитные влияния	8
1.2. Уровень помех. Степень передачи. Помехоподавление.....	11
1.3. Классификация помех в зависимости от среды распространения и механизма связи. Помехоустойчивость	12
1.4. Механизмы и пути передачи помех. Способы ослабления помех.....	13
1.5. Электрические фильтры.....	17
1.6. Теория экранирования.....	23
Раздел 2. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения	30
2.1. Требования к ПКЭ согласно ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия, совместимость технических средств, электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения».....	32
2.2. Классификация кратковременных прерываний напряжения по длительности	37
2.3. Средства измерения ПКЭ, контроль КЭ и диагностика СЭС	37
2.4. Порядок работы и интерфейс измерителя «Ресурс UF-2».....	38
ЗАКЛЮЧЕНИЕ	46
ПРИЛОЖЕНИЕ А.....	47
БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК	48

ВВЕДЕНИЕ

Согласно ГОСТ 29073-91 под термином «Электромагнитная совместимость» (ЭМС) в настоящее время принято понимать в узком смысле слова непосредственно электромагнитную устойчивость технического средства (ТС), т. е. способность ТС сохранять требуемое качество функционирования при воздействии на него электромагнитных помех с регламентированными значениями параметров и не создавать при этом электромагнитных помех другим ТС.

Электромагнитная совместимость в электроэнергетике имеет пять аспектов:

- ЭМС электроэнергетики с окружающей средой (ЭКО-ЭМС);
- ЭМС электроэнергетики с биосферой (БИО-ЭМС);
- ЭМС электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями техносферы (ТЕХНО-ЭМС);
- ЭМС электроэнергетики с информационной, компьютерной и радиотехнической электроносферой (ЭЛЕКТРОНО-ЭМС);
- внутренняя авто-ЭМС между подсистемами электроэнергетики (ИНТЕР-ЭМС).

Содержание пособия не предполагает рассмотрения всех задач, связанных с электромагнитной совместимостью, однако его проработка поможет в дальнейшем студентам – энергетикам в изучении электроэнергетических дисциплин.

Электромагнитная совместимость – современное понятие, обобщающее возникшую еще в начале развития электротехники и приобретающую в настоящее время все большее значение проблематику. С появлением первых передатчиков возникла необходимость согласования частот и мощностей, с которыми они могут работать. Именно ЭМС определяет, могут ли два различных электрических устройства работать рядом, не выдавая мешающих друг другу сигналов. Считается, что эта задача не имеет принципиального решения, и абсолютная электромагнитная совместимость недостижима, поскольку все источники, генерирующие помехи, учесть невозможно. Перенапряжения, удары молнии, статическое электричество, переходные процессы производственных механизмов – вот только начало списка весомых причин генерации помех, мешающих работе приборов.

Переход в современных условиях к микропроцессорным устройствам автоматики и релейной защиты, как правило, выполняющим одновременно несколько функций управления, обусловил дальнейшую проработку способов защиты от электромагнитных помех и выделению вопросов электромагнитной совместимости в отдельный учебный курс электроэнергетических специальностей.

1. РУКОВОДСТВО ПО ИЗУЧЕНИЮ ДИСЦИПЛИНЫ

1.1. Компетенции студента, формируемые в результате освоения учебной дисциплины, и ожидаемые результаты

Процесс изучения дисциплины направлен на формирование следующих компетенций:

- **ОПК-2** способность применять соответствующий физико-математический аппарат, методы анализа и моделирования, теоретического и экспериментального исследования при решении профессиональных задач;
- **ОПК-3** способность использовать методы анализа и моделирования электрических цепей;
- **ПК-1** способность участвовать в планировании, подготовке и выполнении типовых экспериментальных исследований по заданной методике;
- **ПК-3** способность принимать участие в проектировании объектов профессиональной деятельности в соответствии с техническим заданием и нормативно-технической документацией, соблюдая различные технические, энергоэффективные и экологические требования.

В результате изучения дисциплины студент должен:

- *знать* основные источники помех и механизмы их влияния на приемники помех, а также способы и средства их ослабления;
- *быть* ознакомлен с причинами нарушения КЭ, влиянием КЭ на работу электроприемников, а также со способами и средствами контроля и обеспечения КЭ.

1.2. Связь разделов дисциплин с формируемыми компетенциями

№	Наименование раздела	Формируемые компетенции/уровень компетенции							
		Лекции	Консультации	Семинары, (практич.) занятия	Коллоквиумы	Лабораторные работы	РГР*, реферат, эссе	Курсовой проект (работа)	Самостоят. прораб. теор. курса**
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	Электромагнитная совместимость технических объектов	ПК-1 ПК-3 ОПК-2 ОПК-3				ОПК-2 ОПК-3			ПК-1 ПК-3 ОПК-2 ОПК-3
2	Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения								ПК-1 ПК-3 ОПК-2 ОПК-3

* РГР – расчетно-графическая работа, ** включая самотестирование.

2. УЧЕБНОЕ ПОСОБИЕ

Раздел 1. Электромагнитная совместимость технических объектов

Основные термины и понятия

Электромагнитная совместимость технических средств, электромагнитная обстановка, электромагнитная помеха, влияние помехи, допустимая помеха, недопустимая помеха, приемлемая помеха, уровень помехи, норма на помеху, источник помехи, рецептор, электромагнитная эмиссия от источника помехи, уровень эмиссии, норма на эмиссию, электромагнитное излучение, уровень излучения, электромагнитная кондукция, уровень кондукции, норма на уровень кондукции.

Основные обозначения

ЗУ – заземляющее устройство.
КЗ – короткое замыкание.
КЭ – качество электроэнергии.
ОРУ – открытое распределительное устройство.
ПС – подстанция.
РЗА – релейная защита и автоматика.
РУ – распределительное устройство.
СЭС – система электроснабжения.
ТЭЦ – теплоэлектростанция.
ЭМО – электромагнитная обстановка.
ЭМП – электромагнитная помеха.
ЭМС – электромагнитная совместимость.

Глоссарий к разделу

Влияние помехи – снижение показателей качества функционирования технического средства, вызванного электромагнитной помехой.

Допустимая помеха – электромагнитная помеха, при которой качество функционирования технического средства, подверженного ее воздействию, сохраняется на заданном уровне.

Источник помехи – естественная или искусственная причина появления электромагнитной помехи (устройство или физический процесс).

Кондукция – явление, процесс, при котором помеха распространяется от источника помехи к приемнику кондуктивным путем.

Недопустимая помеха – электромагнитная помеха, воздействие которой снижает качество функционирования технического средства до недопустимого уровня.

Норма на помеху – регламентированный максимальный уровень помехи.

Норма на уровень излучения – регламентированный максимальный уровень излучения.

Норма на уровень кондукции – регламентированный максимальный уровень кондукции.

Норма на эмиссию – регламентированный максимальный уровень эмиссии.

Приемлемая помеха – электромагнитная помеха, превышающая допустимую и устанавливаемая путем соглашения.

Приемник помех (рецептор) – техническое средство, чувствительное к электромагнитным сигналам и(или) электромагнитным помехам.

Уровень излучения – уровень электрического и (или) магнитного поля и (или) плотности потока мощности, излучаемые техническим средством, измеренные в регламентированных условиях.

Уровень кондукции – уровень электрического тока и (или) напряжения, и (или) мощности, кондуктируемые техническим средством, измеренный в регламентированных условиях.

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

Уровень эмиссии – значение величины электромагнитной помехи, эмитируемой от источника, измеренный в регламентированных условиях.

Электромагнитная кондукция (от источника помехи) – явление, процесс, при котором помеха распространяется от источника кондуктивным путем в проводящей среде. Проводящей средой могут быть сигнальные цепи ввода-вывода, цепи электроснабжения, экраны, заземляющие устройства.

Электромагнитная обстановка (ЭМО) – совокупность электромагнитных явлений, процессов, существующих в заданном пространстве, частотном и временном диапазонах.

Электромагнитная помеха (ЭМП) – любое электромагнитное явление, процесс, которое может ухудшить функционирование работы устройства, оборудования или системы, или неблагоприятно повлиять на живую или неживую материю. ЭМП может быть шумом, нежелательным сигналом или изменением среды распространения.

Электромагнитная совместимость технических средств (ЭМС) – способность устройства, оборудования или системы функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке, не создавая недопустимых электромагнитных помех чему-либо в этой обстановке.

Электромагнитная эмиссия от источника помехи – помехоэмиссия: генерирование источником помехи электромагнитной энергии. *Примечание.* Генерируемая источником энергия может излучаться в пространство или распространяться кондуктивным путем.

Электромагнитное излучение – излучение: явление, процесс, при котором энергия излучается источником в пространство в виде электромагнитных волн.

Методические рекомендации для студента по изучению раздела

Цель: изучить общие вопросы электромагнитной совместимости.

Учебные вопросы:

Электромагнитная совместимость, уровни помех, основные типы и возможные диапазоны значений электромагнитных помех, земля и масса, способы описания и основные параметры помех.

Изучив раздел, студент должен:

знать:

- основные источники и приемники помех;
- способы помехоподавления;
- диапазоны, спектры и пути передачи электромагнитных помех.

При освоении раздела необходимо:

- изучить раздел 1 из учебного пособия, а также материал по данному разделу из источников, указанных в библиографии;
- выполнить тесты к разделу 1;
- ответить на вопросы для самоконтроля.

Методическое руководство для преподавателя

Изучение данного раздела производится на основе лекционного материала, лабораторных и самостоятельных работ.

Изложение лекций должно быть ясным и доступным, обеспечивать условия для усвоения и возможность конспектирования материала. Часы, отведенные на лекцию, необходимо распределить так, чтобы в ее конце осталось время для ответов на вопросы обучающихся.

На лабораторных работах необходимо добиваться активного участия в занятиях всех студентов группы, развивать у студентов навыки практического использования полученных знаний при решении производственных задач.

Самостоятельная работа студентов является важным фактором усвоения учебного материала без участия преподавателя, но преподаватель должен регулярно проводить опрос обучающихся для разъяснения задаваемых ими вопросов.

1.1. Электромагнитная совместимость, электромагнитные влияния

Электромагнитная совместимость (ЭМС) является современным понятием, объединяющим такие известные электромагнитные явления, как радиопомехи, влияние на сеть, перенапряжения, колебания напряжения сети, электромагнитные влияния, паразитные связи, фон промышленной частоты 50 Гц, воздействия заземления и т. д. Существует несколько определений понятия «Электромагнитная совместимость». Так стандарт VDE 0870 (Общество немецких электротехников) определяет ЭМС как *«способность электрического устройства удовлетворительно функционировать в его электромагнитном окружении, не влияя на это окружение, к которому принадлежат также и другие устройства, недопустимым образом»*. ГОСТ Р 50397-92 определяет электромагнитную совместимость как *«способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам»*.

Основными понятиями в теории электромагнитной совместимости являются понятия передатчиков и приемников электромагнитной энергии (электромагнитных помех) в их расширенном понимании. Так к передатчикам электромагнитной энергии относятся телевизионные и радиовещательные устройства, электрические цепи и системы, непреднамеренно излучающие в окружающую среду электромагнитную энергию, электроприемники, являющиеся источниками электромагнитных помех, распространяющихся по цепям питания.

На объектах электроэнергетики передатчиками электромагнитных воздействий, которые могут оказывать влияние на автоматические и автоматизированные системы технологического управления электротехническими объектами, 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 подстанций, обусловленные токами КЗ промышленной частоты и токами молний;
- быстрые переходные процессы при коммутациях в индуктивных цепях низкого напряжения;
- разряды статического электричества;

- переходные процессы в цепях различных классов напряжения при ударах молнии непосредственно в объект или вблизи него;

- электромагнитные возмущения в цепях оперативного тока.

В качестве примеров передатчиков электромагнитных воздействий можно также перечислить:

- автомобильные устройства зажигания;
- люминесцентные лампы;
- коллекторные электродвигатели;
- силовая электроника;
- сварочные аппараты;
- электроинструмент и т. д.

В особых ситуациях рассматриваются такие виды электромагнитных воздействий, как:

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

Источники электромагнитных помех на электрических станциях и подстанциях изображены на рис. 1.1.

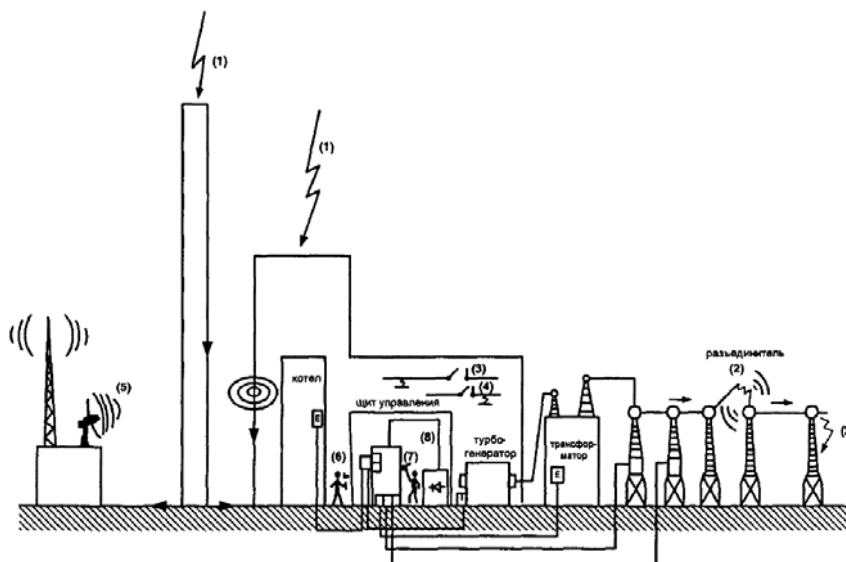


Рис. 1.1. Источники электромагнитных воздействий на электрических станциях и подстанциях:

- 1 – удар молнии; 2 – переключения и короткие замыкания (КЗ) в сети высокого напряжения;
- 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

К приемникам электромагнитных воздействий относятся теле- и радиоприемники, силовые электроприемники, системы автоматизации, автомобильная микроэлектроника, управляющие приборы и регуляторы, средства релейной защиты и автоматики, устройства обработки информации и т. д.

Многие электрические устройства могут одновременно действовать как приемники, так и как передатчики. С учетом изложенного: *электрическое устройство считается совместимым, если оно в качестве передатчика является источником электромагнитных помех не выше допустимых, а в качестве приемника обладает допустимой чувствительностью к посторонним влияниям, т. е. достаточной помехоустойчивостью и иммунитетом.*

Электромагнитные влияния могут проявляться в виде обратимых и необратимых нарушений. Так, в качестве обратимого нарушения можно назвать шум при телефонном разговоре. К необратимому нарушению относится сбой в работе системы релейной защиты, приведший к отключению нагрузки. В табл. 1.1 приведены примеры повреждений и неправильной работы устройств РЗА, вызванных воздействиями электромагнитных помех.

Таблица 1.1

Примеры повреждений и неправильной работы устройств РЗА
из-за воздействия электромагнитных помех

№ ПП	События	Последствия	Причины
1	2	3	4
Коммутация в первичных цепях			
1	Коммутация разъединителем на ПС с элегазовым РУ	Ложное срабатывание РЗА. Отключение линии 110 кВ	Неисправность ЗУ. Высокий уровень импульсных помех
2	Коммутация выключателем 10 кВ на ПС с закрытым РУ	Ложная работа РЗА. Отключение линии 110 кВ	Импульсные помехи в сети постоянного тока более 2 кВ
3	Коммутация разъединителем на ПС с элегазовым РУ	Повреждение электронного реле	Высокий уровень импульсных помех. Низкая помехоустойчивость реле
4	Коммутация разъединителем на ПС с элегазовым РУ	Сбой в работе автоматики контроля плотности элегаза. Потеря управления выключателями 110 кВ	Низкая помехоустойчивость аппаратуры
5	Коммутация выключателем 110 кВ на ПС с открытым РУ	Ложное отключение выключателя 220 кВ	Импульсные помехи в цепях оперативного тока
Короткие замыкания на землю в цепях высокого напряжения			
6.1	КЗ на землю на шинах 110 кВ ПС с открытым РУ	Повреждение аппаратуры РЗА, коммутационных аппаратов в сети постоянного тока. Отключились 6 линий 110 кВ	Неисправность ЗУ
6.2	Ближнее КЗ на землю ПС с открытым РУ	Возгорание кабелей в кабельном канале	Перекрытие с ЗУ на цепи постоянного тока
7	КЗ на шинах 110 кВ ПС с открытым РУ	Ложная работа. Отключилась линия 500 кВ	Неисправно ЗУ
8	КЗ на шинах ПС с закрытым РУ	Ложная работа РЗА. Отключилась линия 110 кВ	Неисправно ЗУ
9	КЗ на шинах ОРУ-110 кВ открытой ПС с открытым РУ	Ложно отключается блок генераторов на ТЭЦ	Неисправно ЗУ
Удары молнии в территорию подстанции			
10	Удар молнии в молниеприемник на ОРУ ПС	Повреждение устройств системы автоматического управления. Загорелось реле на распределительном щите	Неправильно выполнена молниезащита

1	2	3	4
11	Удар молнии в молниеприемник ОРУ ПС	Отключение 8 выключателей на РУ 110 кВ, 2 на РУ 220 кВ	Неправильно выполнена молниезащита
Стационарные режимы			
12	Нормальный режим на ТЭЦ	Ложно работает микропроцессорная защита генератора. Отключился блок генератора	Помехи в цепях дискретных сигналов. Неэкранированный кабель

1.2. Уровень помех. Степень передачи. Помехоподавление

Для количественной оценки электромагнитной совместимости широко применяют так называемые логарифмические масштабы, позволяющие наглядно представлять соотношения величин, отличающихся на несколько порядков. Различают два вида логарифмических характеристик – уровень и степень передачи.

Уровень передачи – десятичный логарифм отношения величины к постоянному базовому значению в децибелах.

Степень передачи – логарифм отношения входных и выходных величин.

Различают следующие уровни:

Напряжения $U_{дб} = 20 \log \frac{U}{U_0}$, где $U_0 = 1$ мкВ.

Тока $I_{дб} = 20 \log \frac{I}{I_0}$, где $I_0 = 1$ мкА.

Напряженности электрического поля $E_{дб} = 20 \log \frac{E}{E_0}$, где $E_0 = 1$ мкВ/м.

Напряженности магнитного поля $H_{дб} = 20 \log \frac{H}{H_0}$, где $H_0 = 1$ мкА/м.

Мощности $P_{дб} = 10 \log \frac{P}{P_0}$, где $P_0 = 1$ пВт.

Кроме десятичных логарифмов используются также и натуральные логарифмы. При этом уровень помех измеряется в неперах:

Напряжения $U_{нп} = \ln \frac{U}{U_0}$, где $U_0 = 1$ мкВ.

Тока $I_{нп} = \ln \frac{I}{I_0}$, где $I_0 = 1$ мкА.

Напряженности электрического поля $E_{нп} = \ln \frac{E}{E_0}$, где $E_0 = 1$ мкВ/м.

Напряженности магнитного поля $H_{нп} = \ln \frac{H}{H_0}$, где $H_0 = 1$ мкА/м.

Мощности $P_{нп} = 0,5 \ln \frac{P}{P_0}$, где $P_0 = 1$ пВт.

Между децибелом и непером существуют соотношения: 1 Нп = 8,686 дБ или 1 дБ = 0,115 Нп. Приведем наиболее часто используемые характерные значения децибела и соответствующие им отношения, стоящие под знаком логарифма:

2:1 – 6 дБ; 10:1 – 20 дБ = 2,3 Нп; 100:1 – 40 дБ = 4,6 Нп; 1000:1 – 60 дБ = 6,9 Нп; 10 000:1 – 80 дБ = 9,2 Нп; 100 000:1 – 100 дБ = 11,5 Нп; 1 000 000:1 – 120 дБ = 13,8 Нп.

Таким образом, при обоих представлениях уровень помехи увеличивается на одну и ту же величину с каждым последующим порядком. Обозначения дБ и Нп указывают исключительно на вид использованной функции логарифма (lg или ln). Данные обозначения не являются единицами, но часто используются как таковые.

Одним из понятий, характеризующих степень передачи системы, является понятие «помехоподавление». Понятие «*помехоподавление*» служит для характеристики защитного воздействия средств защиты от помех. Как правило, степень помехоподавления зависит от частоты.

Различают две характеристики степени помехоподавления – коэффициент затухания фильтра a_{ϕ} и коэффициент экранирования a_3 .

Коэффициент затухания фильтра – есть десятичный логарифм отношения напряжения на входе и выходе фильтра:

$$a_{\phi} = 20 \log \frac{U_1}{U_2} [\text{дБ}].$$

Коэффициент экранирования напряженности электрического поля – определяется отношением напряженности поля перед экраном и за ним:

$$a_{\phi} = 20 \log \frac{H_1}{H_2} [\text{дБ}].$$

1.3. Классификация помех в зависимости от среды распространения и механизма связи. Помехоустойчивость

Механизм связи – это физический принцип передачи энергии электромагнитных процессов от источника к приемнику помех.

Классификация помех приведена в таблице 1.2.

Таблица 1.2

Классификация электромагнитных помех в зависимости от среды распространения и механизма связи

Среда распространения	Проводящая среда (кондуктивные помехи)		Переход непроводящей среды в проводящую	Непроводящая среда (полевые помехи)		
	1	2		3	4	
Механизмы связи источников и приемников помех	Связь по напряжению через силовые и сигнальные линии	Связь по току через общее сопротивление	Разряды электричества	Емкостная связь через электрическое поле	Индуктивная связь через магнитное поле	Электромагнитная связь через электромагнитное поле

1	2		3	4
Пути проникновения или источники помех	1) СЭС 2) информационные входы/выходы	1) СЭС 2) системы заземления	1) грозовые разряды; 2) разряды статического электричества; 3) коронные разряды и перекрытия между проводниками; 4) искрения контактных соединений	1) искусственные источники окружающие – окружающие технические объекты; 2) природные источники

Помехоустойчивость устройства характеризуется пороговым уровнем помехи, при превышении которого нарушается его функционирование. За уровень электромагнитной совместимости в конкретной ЭМО принимают уровень, располагающийся между максимумами плотности вероятности помех и плотности вероятности помехоустойчивости устройств, чтобы этот уровень с вероятностью 95% не был превзойден помехами, и чтобы помехоустойчивость устройств была принципиально выше этого уровня (рис. 1.2).

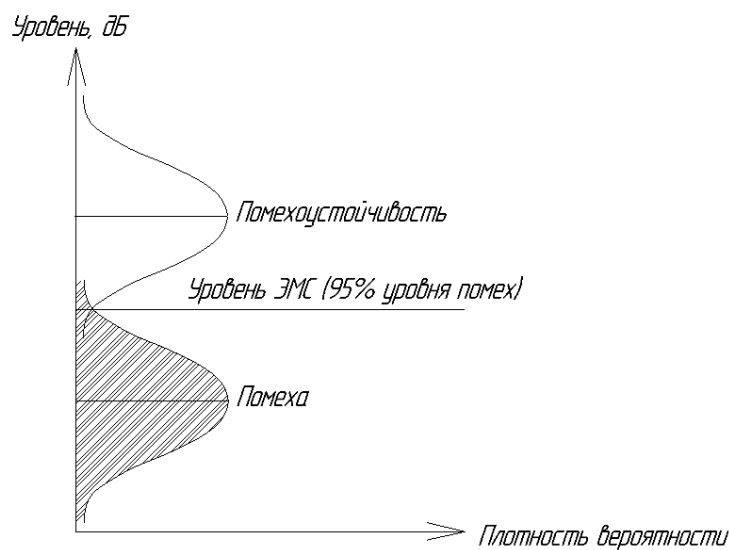


Рис. 1.2. Уровень электромагнитной совместимости

Устройство должно иметь помехоустойчивость выше уровня ЭМС и помехоэмиссию ниже уровня ЭМС.

1.4. Механизмы и пути передачи помех. Способы ослабления помех

Связь между источником и приемником помех может быть гальванической (непосредственно от силовых и сигнальных линий или через общее сопротивление), через ближнее поле (емкостные или индуктивные) или посредством энергии излучения.

Типичным примером непосредственной связи источника и рецептора помех через силовые кабели и сигнальные линии является источник питания и нагрузка, помеха источника питания попадает на вход нагрузки, для подавления помех используются фильтры.

При гальванической связи через общее сопротивление в цепях электропитания и проводных линиях происходит следующий процесс (рис. 1.3). Изменение тока одного модуля создает падение напряжения на сопротивлении и индуктивности проводов, которое накладывается на напряжение питания всех модулей.

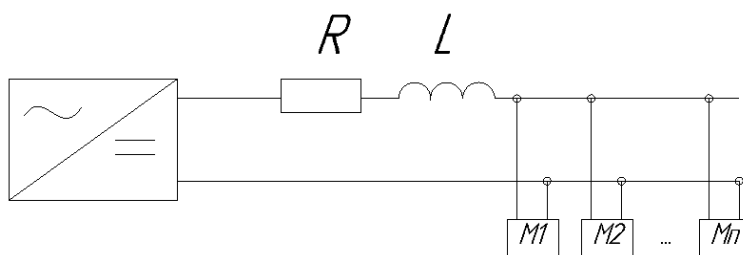


Рис. 1.3. Схема гальванической связи через общее сопротивление

Для снижения таких помех рекомендуются следующие мероприятия:

- Выполнение соединений с возможно более низким сопротивлением и низкой индуктивностью, для этого требуется возможно меньшая длина общих линий, большее сечение проводников, малое расстояние между прямым и обратным проводом, выполнение проводов в виде плоских шин.

- Гальваническая развязка, т. е. устранение совместных проводов между различными контурами. Это осуществляется выполнением питания в виде звезды, отказом от общих обратных проводников, раздельным питанием модулей с сильно различающимися мощностями.

- Разделение потенциалов путем использования оптопар и оптоволоконных линий.

- Выбор скорости изменения тока не больше, чем требуется для функционирования модулей.

- Установка стабилизирующих конденсаторов или применение индивидуальных стабилизаторов для узлов и модулей с быстрыми коммутационными процессами.

При гальванической связи через общее сопротивление в системе заземления между точками 1 и 2 (рис. 1.4) возникает разность потенциалов U_{12} , обусловленная токами в земле. Эта разность потенциалов вызывает ток помехи I_n и напряжение помехи U_n на зажимах электроприемника.

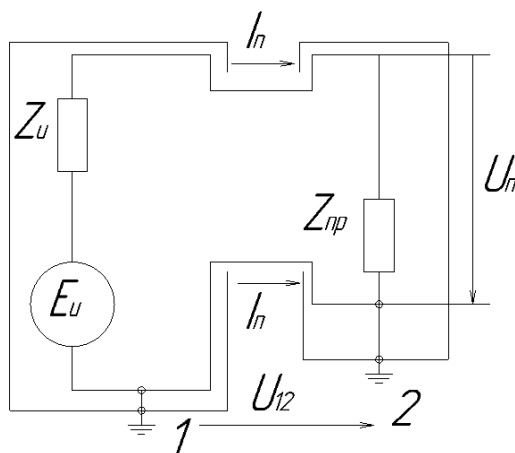


Рис. 1.4. Схема гальванической связи через общее сопротивление в системе заземления

Мероприятия по снижению влияния через контур заземления заключаются в снижении разности потенциалов U_{12} за счет уменьшения сопротивления между точками 1 и 2.

Это достигается, например, выполнением полов в виде проводящей эквипотенциальной поверхности, соединением приборов массивными проводниками или экранированием линий с заземлением экранов у обоих концов.

Другим методом снижения таких помех является уменьшение тока помехи. Наиболее простой способ – разрыв контура заземления.

Однако между контуром и корпусом прибора остается емкостная связь через паразитные емкости, поэтому такая защита эффективна лишь при постоянном напряжении или низких частотах помехи.

Для снижения тока помехи также используют:

- разделительные трансформаторы и реле;
- нейтрализующие трансформаторы и ферритовые кольца;
- оптические развязки и светодиоды;
- симметричные передачи и симметрирующие трансформаторы.

Рассмотрим далее механизм связи с гальваническим разделением контуров.

Типовой пример емкостной связи (влияние через электромагнитное поле) представлен на рис. 1.5.

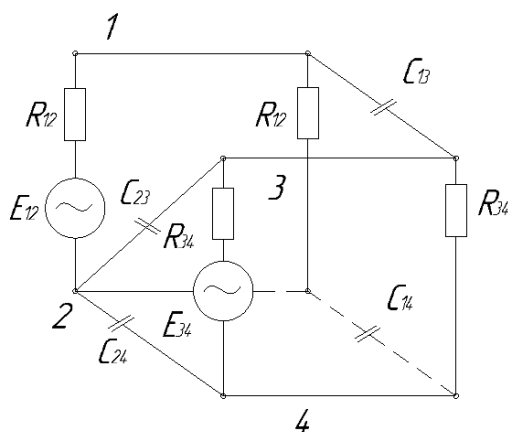


Рис. 1.5. Схема емкостной связи гальванически разделенных контуров

Система проводников 1 и 2 оказывает воздействие на контур 3 и 4. Напряжение помехи в данном случае будет равно нулю, если будет соблюдаться условие:

$$C_{13}/C_{23} = C_{14}/C_{24}.$$

Это условие возможно обеспечить скручиванием проводников 1 и 2 и/или провода 3 с проводом 4.

Другой возможностью снижения емкостной связи разделенных контуров является экранирование проводов 1,2 или 3,4.

Также существует емкостная связь контуров с общим проводом системы опорного потенциала. На рис. 1.6 приведена схема, в которой может произойти непредусмотренное изменение состояния триггера D при изменении сигнала на выходе элемента A из за наличия паразитной емкости C_{13} .

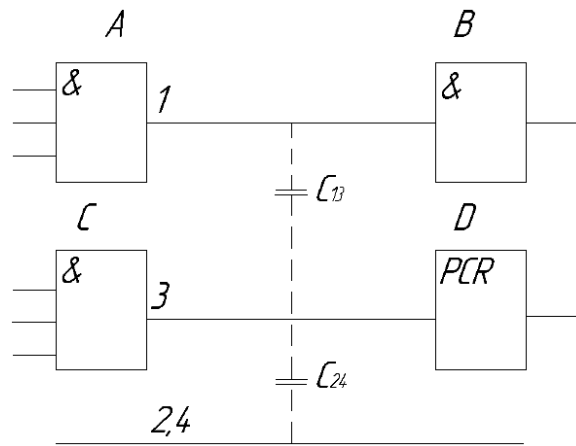


Рис. 1.6. Схема емкостной связи контуров с общим проводом системы опорного потенциала

Мероприятие по снижению емкостного влияния контуров с общим проводом:

- обеспечение малой емкости C_{13} путем уменьшения длины и диаметра проводов, увеличение расстояния между проводниками 1 и 3, исключение их параллельной прокладки, применение изоляции с малой диэлектрической проницаемостью;
- увеличение емкости C_{34} путем скрутки сигнальных проводов или использованием плоских проводов;
- выполнение предельно низкоомными контуров, подверженных влиянию;
- ограничение скорости изменения напряжения;
- экранирование проводов и контуров, чувствительных к влиянию.

Индуктивная связь возникает между двумя или несколькими контурами с током (рис. 1.7).

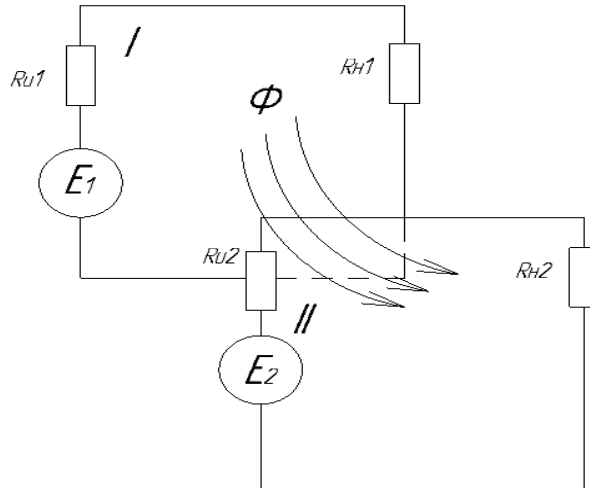


Рис. 1.7. Схема индуктивной связи

Если в контуре I имеет место быстрое изменение тока, например при коммутации, то в контуре II индуцируется напряжение помехи.

Мероприятия по снижению магнитного влияния помехи:

- снижение до возможных пределов взаимной индуктивности за счет сокращения длины проводников, увеличение расстояния между сетевыми и информационными проводами, уменьшение площади контура, подвергающего влиянию;
- уменьшение скорости изменения магнитного потока при помощи короткозамкнутой петли, расположенной непосредственно у контура;

- расположение контуров I и II ортогонально (перпендикулярно);
- компенсация индуцированного в контуре II напряжения скруткой проводов;
- экранирование кабелей и проводов, а также приборов ферромагнитными экранами.

Связь через электромагнитное поле. Причиной воздействия излучения являются электромагнитные волны, излучаемые токоведущими контурами.

В дальнем поле при расстояниях от источника помехи, больше чем $\frac{\lambda}{2\pi}$, где λ – длина волны, на электропроводных объектах возникают высокочастотные помехи вследствие антенного эффекта.

Защитой от такого типа помех служат экранирующие стенки, устанавливаемые между источником и приемником. Уменьшение напряженности поля за экраном обуславливается, с одной стороны, отражением падающей волны, а с другой – поглощением энергии поля материалом экрана.

Затухание зависит от толщины экрана, электропроводности и магнитной проницаемости материала экрана и частоты излучения.

1.5. Электрические фильтры

Электрическими частотными фильтрами называют четырехполюсники (или многополюсники), которые устанавливают между источником питания и электроприемником для беспрепятственного пропускания сигнала (с малым затуханием) одних частот и поглощением (или пропусканием с большим затуханием) сигнала других частот.

Фильтры классифицируются по признаку рабочего диапазона частот:

- фильтры низкочастотные ($f < 200$ кГц);
- фильтры радиочастотные ($f < 500$ МГц);
- СВЧ фильтры ($f > 500$ МГц).

Также можно классифицировать фильтры по полосе пропускания и подавления (рис. 1.8):

- 1) фильтр низких частот;
- 2) фильтр верхних частот;
- 3) полосовой фильтр (полосно пропускающий);
- 4) полосно подавляющий фильтр;
- 5) режекторный фильтр.

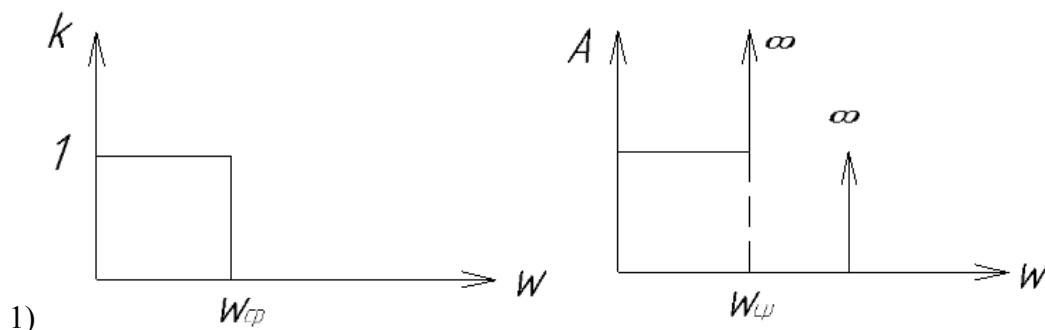


Рис. 1.8. Диапазон частот электрического фильтра (начало)

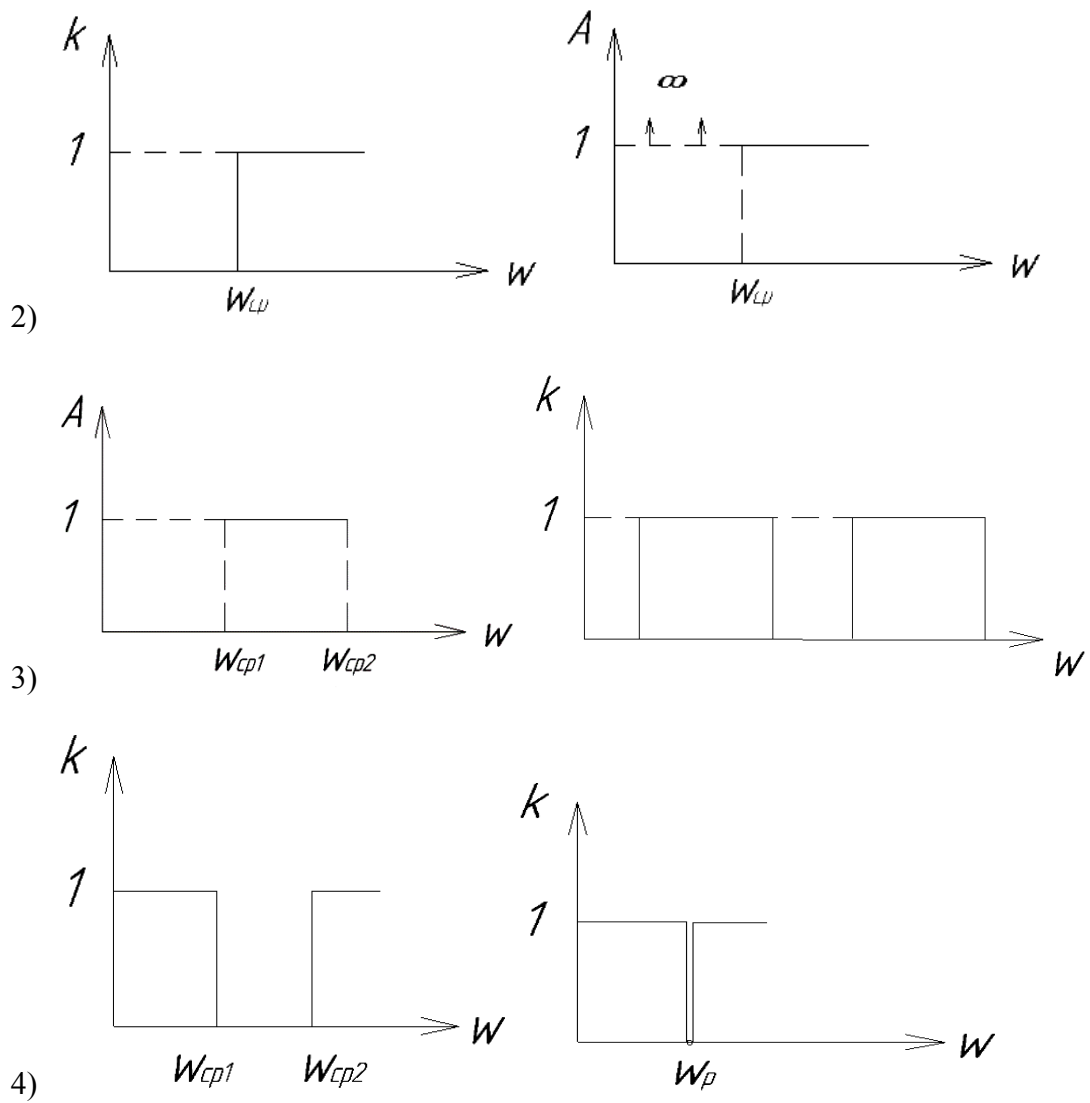


Рис. 1.8. Диапазон частот электрического фильтра (окончание)

Диапазон частот (рис. 1.9), в котором затухание мало, называется *полосой пропускания* (прозрачности), а в котором велико – *полосой задерживания*. Между этими диапазонами зачастую вводят так называемую *полосу перехода*.

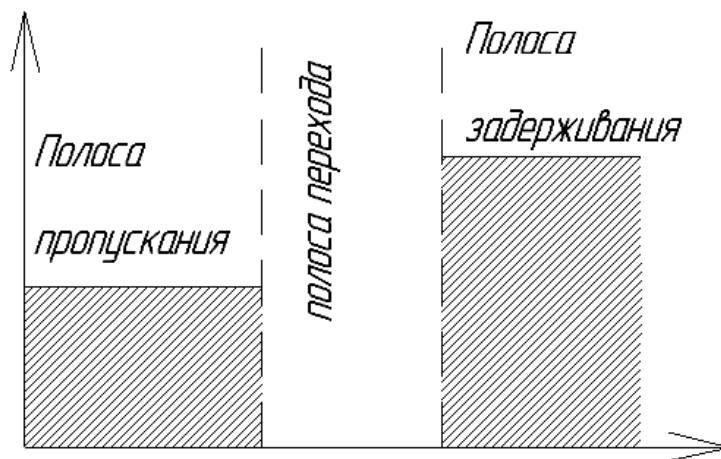


Рис. 1.9. График расположения полос фильтра

С помощью конденсаторов и катушек можно создать фильтры – четырехполюсники (многополюсники), которые в разной степени могут пропускать электрические сигналы разных частот. Так как конденсаторы и катушки индуктивности являются реактивными элементами, то их сопротивление зависит непосредственно от частоты электрического сигнала (рис. 1.10), что может оказать весьма негативное воздействие в случаях, когда по цепи с реактивными элементами идут переменные токи разных частот, для которых необходимо создать равные условия протекания.

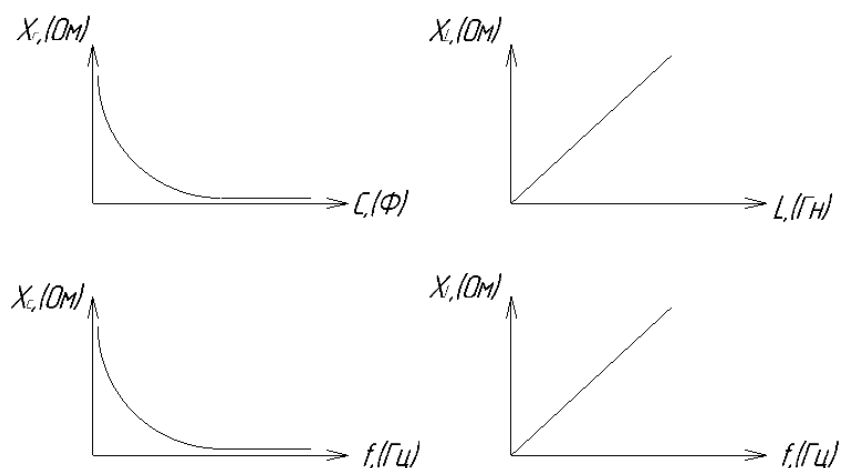


Рис. 1.10. Зависимость реактивного сопротивления конденсатора и катушки индуктивности от частоты, емкости и индуктивности

Когда необходимо в одинаковой степени передавать (поглощать) электрические сигналы различных частот, конденсаторы или катушки индуктивности будут оказывать негативный эффект, так как их сопротивление в разной степени будет влиять на проходящие токи. Однако такая особенность реактивных элементов становится полезной, когда появляется необходимость разделить сигналы различных частот, протекающих в общей цепи.

Например, когда ток промышленной частоты проходит в нагрузку, а токи третьей и кратной ее гармоник поглощаются. При решении таких задач реактивные элементы незаменимы, так как только конденсатор и катушка могут разделить токи разных частот, одни из них пропуская легко, другим оказывая большое сопротивление.

Существует множество схем электрических фильтров, однако все они используют одни и те же принципы, рассмотрим некоторые из них.

Различают параллельные и последовательные фильтры. На рис. 1.11 показан последовательный фильтр, причем емкостное сопротивление поглощает сигнал низкой частоты, а индуктивное – высокочастотный. Активное же сопротивление для разных частот остается одинаковым.

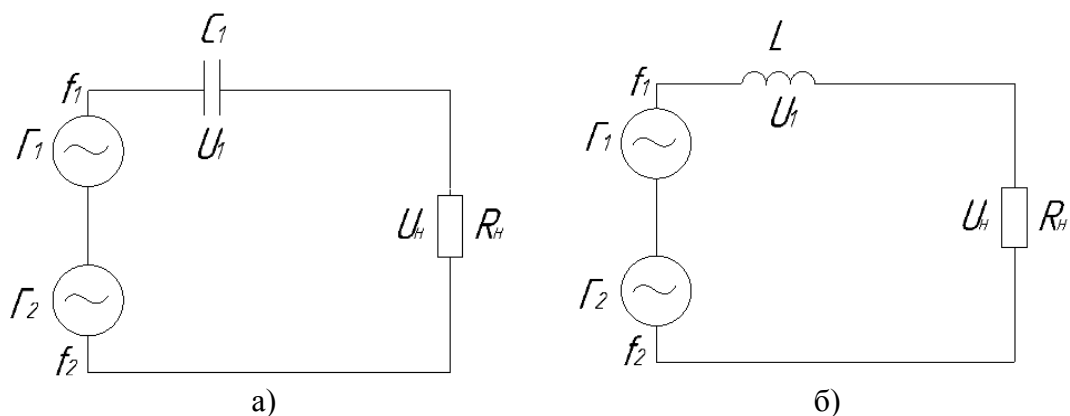


Рис. 1.11. Схема последовательного фильтра:
 а – последовательный фильтр низких частот;
 б – последовательный фильтр высоких частот

Пример простейшего параллельного RC-фильтра показан на рис. 1.12. Подобный фильтр позволяет произвести разделение постоянного и переменного тока. Постоянный ток проходит через сопротивление нагрузки, так как не может идти через конденсатор. Таким образом, мы можем получить только переменный ток, однако возможно и выделить чисто постоянный ток. Для этого необходимо, чтобы на частоте f переменного тока емкостное сопротивление X_C конденсатора C было бы пренебрежительно мало по сравнению с сопротивлением нагрузки. В этом случае переменный ток пойдет по пути наименьшего сопротивления, а к нагрузке пойдет почти чистый постоянный ток (рис. 1.13).

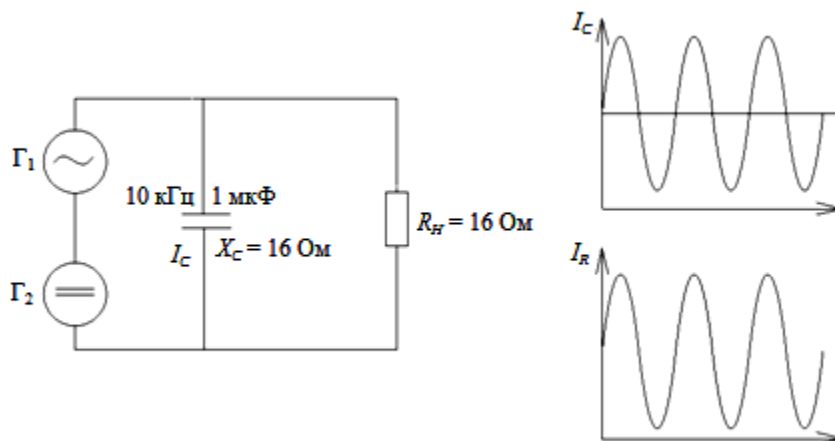


Рис. 1.12. Пример параллельного RC-фильтра

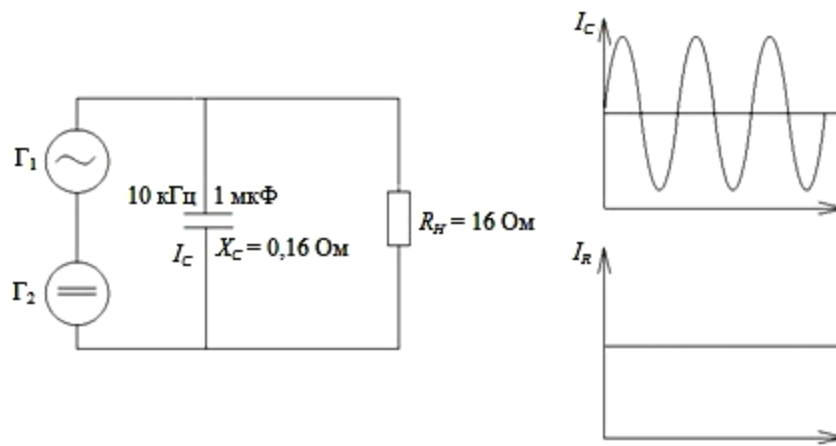


Рис. 1.13. Пример параллельного RC-фильтра с пренебрежительно малым сопротивлением конденсатора

Различают пассивные LC-фильтры, состоящие из емкости и индуктивности, пассивные RC-фильтры, состоящие из сопротивлений и емкостей, активные ARC-фильтры, кварцевые, магнестрикционные, с переключающими конденсаторами, цифровые и другие. RC-фильтры используют при больших сопротивлениях нагрузки. Широкое распространение имеют пассивные LC-фильтры, однако в настоящее время они активно вытесняются ARC-фильтрами. Особо перспективными являются фильтры с переключающимися конденсаторами. Кварцевые фильтры позволяют добиться больших добротностей высокочастотных контуров, а магнестрикционные фильтры – на низких частотах.

Свойства четырехполюсников (многополюсников) фильтровать электрические сигналы обусловлены протекающими в них резонансными режимами токов и напряжений.

Фильтры собирают, как правило, по T- или П-образной схеме (рис. 1.14, 1.15).

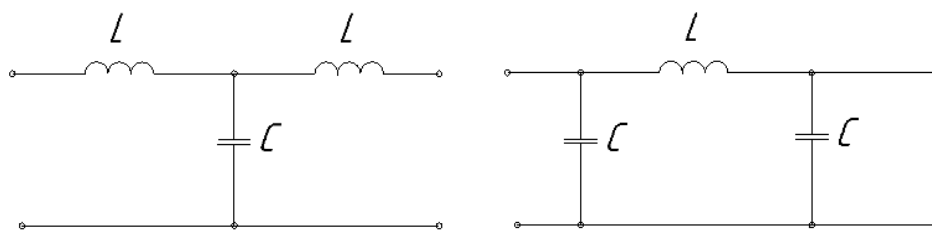


Рис. 1.14. Схемы T- и П-образного низкочастотного фильтра

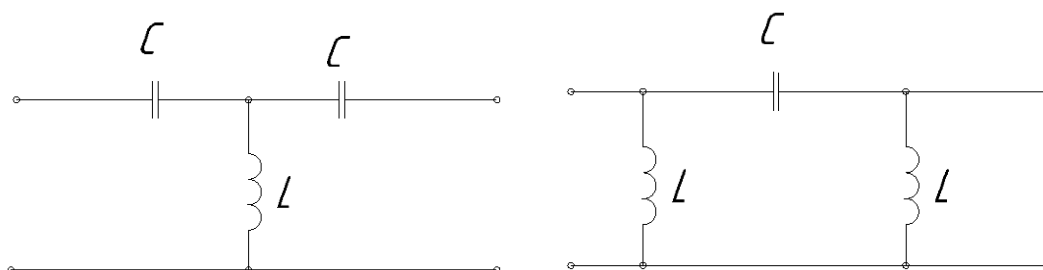


Рис. 1.15. Схемы T- и П-образного высокочастотного фильтра

В любой электрической цепи, в которой имеются накопители энергии, амплитуды мгновенных значений выходных напряжений сдвинуты по времени аналогичных входных

напряжений. Например, на рис. 1.16 выходное напряжение отстает по фазе от входного, из-за чего между этими напряжениями образуется сдвиг во времени. Стоит отметить, что повышение частоты сокращает время задержки, так как емкость является частотозависимым элементом.

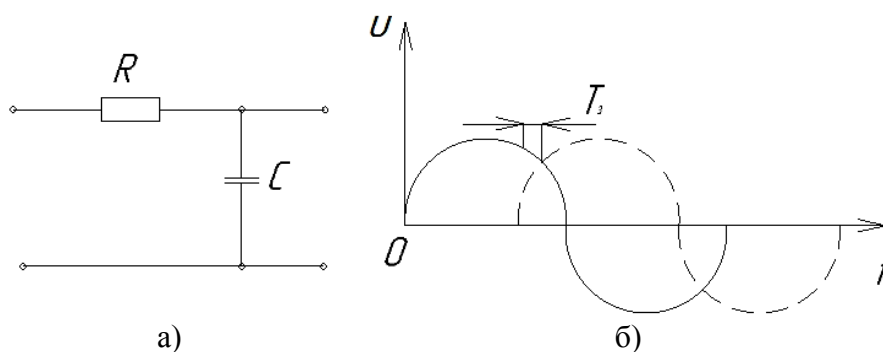


Рис. 1.16. Схема фильтра с задержкой (а) и вольт-секундная характеристика фильтра (б)

В условиях реальной работы добротности контуров составляют десятки иногда сотни, но для получения необходимых параметров в ряде случаев требуются добротности больших порядков, прежде всего в полосовых фильтрах с узкой полосой пропускания. Для таких целей используются кварцевые фильтры (рис. 1.17).

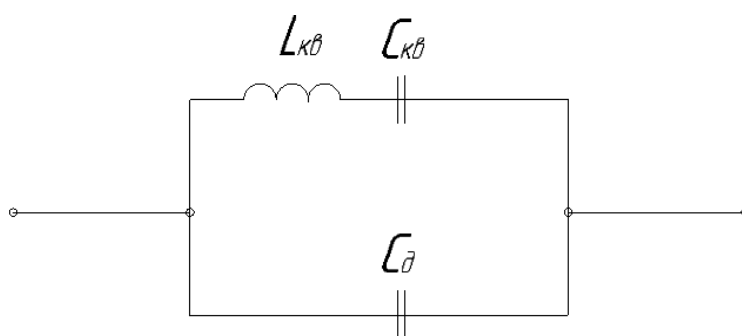


Рис. 1.17. Эквивалентная схема кварцевого фильтра

Принцип работы таких фильтров заключается в следующем: пьезоэлектрический элемент – металлизированная кварцевая пластинка, подключенный к переменному напряжению, сжимается и растягивается, т. е. получают механические колебания, которые вызывают генерирование противоЭДС во внешнюю цепь.

По принципу использования колебательных свойств разработаны и широко используются в радиотехнике электромеханические фильтры, добротности которых очень высоки. Принцип действия таких фильтров заключается в эффекте изменения геометрических размеров некоторых материалов (никель, феррит и др.) при изменении магнитного поля, в которых они находятся. Этот эффект, открытый Джеймсом Прескоттом Джоулем (1818 – 1889) в 1842 году, получил название *магнестрикционный эффект*.

На этом эффекте базируется работа электромеханических магнестрикционных фильтров. Конструктивно они представляют собой неподвижно закрепленный никелевый или ферритовый стержень длиной в несколько сантиметров. На стержне расположена катушка с индуктивностью порядка десятка микрогенри и постоянный магнит. При протекании переменного электрического тока по катушке возникает переменное

магнитное поле, что приводит к изменению длины ферритовых или никелевых стержней и их резонансным частотам. Схема такого фильтра представлена на рис. 1.18.

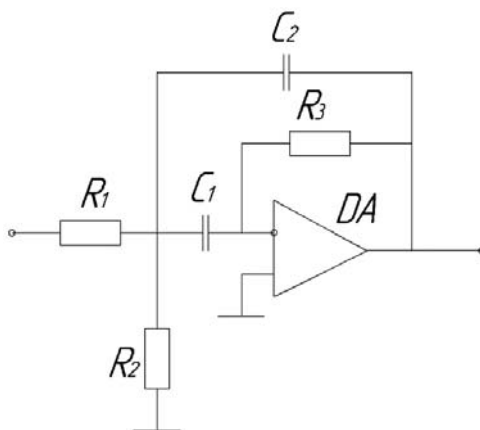


Рис. 1.18. Схема кварцевого фильтра

ARC-фильтры получили название *активные фильтры*, в качестве активных элементов – операционные усилители.

Цифровые фильтры, которые также называются *эквалайзерами*, получили широкое распространение благодаря интенсивному развитию компьютерной техники. При обработке цифровым эквалайзером возможно получать добротности до 1000, а коэффициенты усиления на определенной частоте до 50 дБ, а коэффициент ослабления – до отрицательной бесконечности (полного подавления частоты), чего невозможно получить при использовании аналоговых фильтров. Цифровые фильтры не имеют фазовых сдвигов частот, однако при необходимости его имитация не вызывает затруднений. Цифровые эквалайзеры никогда не генерируют шумов в основной сигнал, так как обрабатывают оцифрованный сигнал, и качество этой обработки зависит от сложности алгоритма, битности и частоты дискретизации сигнала.

1.6. Теория экранирования

Смысл экранирования заключается в ослаблении электрических, магнитных и электромагнитных полей в том пространстве, где эти поля вызывают негативный эффект. Наиболее актуальна задача экранирования устройств РЗ и А, локально-вычислительных и сетей связи от внешних электромагнитных полей, возникающих при работе электроэнергетических технологических установок, радиопередающих устройств или при атмосферных грозных разрядах.

Простейший экран представляет собой металлический лист, установленный между источником помехи и рецептором. Электрическое поле индуцирует на поверхности экрана заряды, поле которых компенсирует за экраном внешнее поле, а магнитная составляющая индуцирует в материале экрана токи, которые также компенсируют внешнее магнитное поле.

Эффективность экрана зависит:

- от конфигурации экрана;
- от геометрических размеров экрана;
- от частоты или скорости изменения поля;
- от магнитной проницаемости материала экрана;
- от электропроводности экрана.

Как было написано в п. 1.2, количественная характеристика эффективности экрана оценивается коэффициентом экранирования.

Расчет коэффициентов экранирования даже для самых простых конфигураций экрана – плоского листа – в общем случае требует рассмотрение волновых процессов: процесс отражения электромагнитных волн от экрана, преломление волны в экране, затухание волны при прохождении через экран и преломление электромагнитной волны на внутренней поверхности экрана.

Основной характеристикой среды, в которой распространяется электромагнитное возмущение, является волновое сопротивление среды.

$$Z_{\text{в}} = E/H.$$

Величина, обратная коэффициенту экранирования, называется *коэффициентом затухания поля*:

$$A = 20 \log \frac{1}{S}.$$

Для плоской электромагнитной волны, которая движется вдали от источника излучения, волновое сопротивление равно:

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

где ω – угловая частота поля; μ и ϵ – магнитная и диэлектрическая проницаемость соответственно; σ – удельная проводимость среды.

Если волна распространяется в воздухе, то σ можно не учитывать в расчетах, так как она пренебрежительно мала. В таком случае волновое сопротивление равно:

$$Z = \sqrt{\mu/\epsilon} = 120\pi.$$

Если волна распространяется в металле, то пренебрегать уже допустимо слагаемым $j\omega\epsilon$, тогда:

$$Z = \sqrt{j\omega\mu/\sigma}.$$

При отражении от первой плоскости экрана, размеры которого много больше длины волны, коэффициент затухания равняется:

$$A_{\text{зат}} = 20 \log \frac{Z_{\text{в}}}{4Z_0},$$

где Z_0 – сопротивление экрана.

Анализируя формулу для коэффициента затухания, мы видим, что затухание поля при первом отражении тем сильнее, чем выше проводимость материала экрана и ниже магнитная проницаемость.

Потери энергии поля поглощаемой материалом экрана при толщине экрана d дают затухание:

$$A_{\text{погл}} = 8,96 \frac{d}{\delta} = 6,16d \sqrt{\omega\mu_3\sigma},$$

где μ_3 – магнитная проницаемость материала экрана; $\delta = \sqrt{2/\omega\mu_3\sigma}$ – глубина скин-слоя (глубина, на которую должна распространиться электромагнитная волна в материал, чтобы ее амплитуда уменьшилась в e раз ($e \approx 2,71828$)).

Анализируя вышенаписанное, можно увидеть, что потери на поглощения растут с увеличением толщины экрана, частоты поля помехи, магнитной проницаемости и удельной проводимости материала экрана.

При отражении волны внутри самого экрана происходят потери энергии, равные:

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

Несмотря на то, что электрические и магнитные поля отражаются от внешней и от внутренней поверхности по-разному, суммарный эффект после прохождения через материал экранов одинаков для обоих полей. При этом максимальное отражение происходит с электрическим полем на внешней, а с магнитным – на внутренней поверхности экрана.

Написанные выше формулы справедливы в общем случае, однако при рассмотрении частных случаев можно воспользоваться допущением, что внешнее поле является квазистационарным, при условии:

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

При таких допущениях становится возможным переходить при расчетах поля к схемам замещения с сосредоточенными параметрами.

Рассмотрим в качестве примера случай, когда на внутренней полости замкнутого экрана наводится поле, вызванное внешним квазистационарным электрическим полем.

Пусть нам дан экран прямоугольной формы, расположенный на поверхности, обладающий нулевым потенциалом (рис. 1.19). Слой зарядов является источником однородного электрического поля, расположенного над поверхностью экрана. Эти заряды располагаются равномерно на некоторой плоскости, параллельной плоскости с нулевым потенциалом. Пока напряженность влияющего электрического поля является константой, отсутствует поле в толщине самого экрана и во внутреннем его объеме ввиду того, что заряды, наведенные полем, равномерно распределяются таким образом, что потенциал является одинаковым в любой точке.

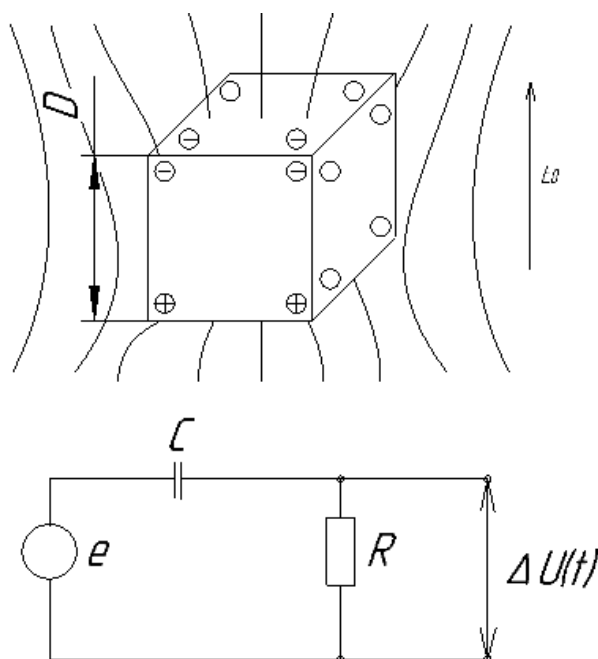


Рис. 1.19. Схема электростатического экрана в медленно меняющемся электрическом поле. Наводимые внешним полем заряды, эквивалентная схема для оценки поля, проникающего во внутрь экрана

При изменении внешнего поля происходит перемещение зарядов на поверхности экрана, т. е. по стенкам экрана пойдет электрический ток, который будет создавать падение напряжения на сопротивлении стенок, что в свою очередь приведет к появлению разности потенциалов между верхней и нижней стенками внутренней плоскости экрана, т. е. внутри экрана появляется электрическое поле.

При расчетах величины сопротивления стенок экрана, емкости его верхней части относительно нижней рекомендуется применять формулы для экранов сферической формы:

$$C = 3\pi\epsilon D;$$

$$R = \frac{1}{2\pi\sigma Dd},$$

где D – высота экрана; d – толщина стенок; σ – удельная проводимость материала.

При увеличении скорости изменения внешнего поля растет наведенный в экране электрический ток, что увеличивает глубину проникновения поля в экран. Однако с ростом частоты изменения внешнего поля начинает проявляться так называемый скин-эффект, т. е. плотность тока на наружной поверхности начинает превышать плотность тока внутри экрана. Толщину скин-слоя в стенках экрана можно определить по формуле

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\omega\mu_a\sigma_a}}.$$

До тех пор пока толщина стенки экрана меньше толщины скин-слоя, зависимость отношения внутреннего поля к внешнему от частоты будет иметь вид

$$E(\omega)/E_0(\omega) = (3/2)(D\omega\epsilon_0/\sigma_0d).$$

При $d > \delta$ описанная выше зависимость будет иметь вид

$$E(\omega)/E_0(\omega) = 3/\sqrt{2}\omega\epsilon_0D \exp(-d/\delta)/(\sigma_0\delta).$$

Данные зависимости показывают, что чем выше частота внешнего поля, тем менее эффективно применение экрана, до тех пор пока толщина скин-слоя не превысит во много раз толщину стенки экрана.

Если материал, из которого изготовлен экран, является магнитным материалом, то скин-эффект усиливается, что улучшает качество экранирования. Однако проводящая способность таких экранов, как правило, ниже, чем у меди и алюминия, что делает их более подходящими материалами для изготовления электростатических экранов. В конструкциях, где от экранов требуется высокая надежность, их покрывают золотом для увеличения электрической проводимости.

Далее рассмотрим влияние магнитного низкочастотного поля на прямоугольную, тонкостенную, проводящую камеру (рис. 1.20).

При постоянном поле напряженность внутри камеры будет равна напряженности поля снаружи камеры, однако это не приведет к наведению токов или напряжений в проводниках, расположенных внутри экрана, если они неподвижны. При изменении внешнего поля в стенках камеры наводятся токи, как показано на рис. 1.20, их поле частично компенсирует внешнее поле внутри экрана.

На стенке, перпендикулярной линиям поля, соседние петли вихревых токов стремятся скомпенсировать друг друга, поэтому максимальные токи будут сосредотачиваться возле краев экрана на стенках, расположенных вдоль линий поля. Они образуют виток с током, поле которого противоположно по направлению внешнему полю. Из-за наличия активного сопротивления у стенок экрана поле витка компенсирует внешнее поле не полностью.

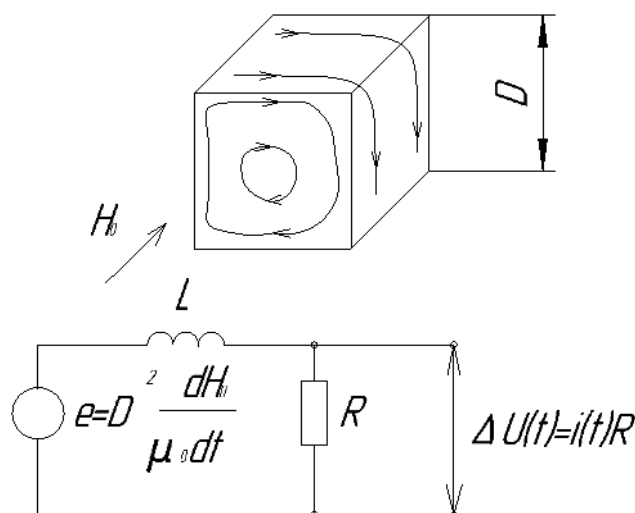


Рис. 1.20. Схемы электростатического экрана в медленно меняющемся магнитном поле. Наводимые внешним полем токи в стенках экрана, эквивалентная схема для оценки поля, проникающего во внутрь экрана

Как видно из эквивалентной схемы замещения, рост частоты изменения внешнего поля приводит к росту эффективности экрана. На низких частотах, когда выполняется условие $\delta \geq d$, эффективность экрана рассчитывается по формуле

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

Сопrotивление одновитковой катушки определяют по формуле

$$R = 2\pi / 3d\sigma.$$

Последовательная индуктивность:

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

На больших частотах, когда глубина скин-слоя меньше толщины стенок, т. е. будет соблюдаться условие $\delta \leq d$, эффективность экранирования будет возрастать:

$$H_i(\omega) / H_0(\omega) = \sqrt{2}\delta\mu_r \exp(-d/\delta) / D,$$

где $\delta = \sqrt{2\omega\mu\sigma}$, μ_r – относительная магнитная проницаемость ферромагнитного материала стенки камеры.

Как показали результаты расчетов, эти формулы справедливы и для других конфигураций экранов: прямоугольных, эллиптических, цилиндрических и т. д.

Таким образом, мы видим, что при экранировании магнитного поля в отличие от экранирования электрического поля, эффективность при низких частотах очень мала и возрастает с увеличением частоты внешнего поля. Необходимо отметить, что в реальных экранах существуют различного рода отверстия, наличие которых приводит к тому, что рост эффективности происходит лишь до некоторого значения частоты, выше которого эффект проникновения поля сквозь отверстия начинает доминировать, и внутреннее поле будет усиливаться. Поэтому свойства реальных экранов будут зависеть от способа соединения стенок друг с другом, способов выполнения технологических отверстий и дверок в стенках экрана. Во всех случаях необходимо обеспечить минимальное сопротивление в местах стыковки частей экрана, минимальные зазоры между накладными деталями и минимальные размеры отверстий в стенках экрана.

Вопросы для самоконтроля

1. Дайте определение электромагнитной помехи.
2. Дайте определение электромагнитной обстановки.
3. Что называют приемлемой помехой?
4. Что можно отнести к передатчикам помехи?
5. При каких условиях электрическое устройство можно назвать совместимым?
6. Классифицируйте помехи в зависимости от среды распространения.
7. Назовите причину повреждения электронных реле при коммутации разъединителем на подстанции с элегазовыми выключателями в распределительном устройстве.
8. Перечислите мероприятия по снижению емкостного влияния контуров с общим проводом.
9. Назовите, какие устройства используют для снижения тока помехи.
10. Дайте определения электрического фильтра.
11. Классифицируйте фильтры по признаку рабочего диапазона частот.
12. Классифицируйте фильтры по полосе пропускания и подавления.
13. Проиллюстрируйте схему параллельного RC-фильтра и его передаточную характеристику.
14. Каков принцип действия кварцевого фильтра?
15. Какой недостаток имеют реактивные элементы при прохождении через них сигналов разных частот?
16. От чего зависит эффективность экрана?
17. Назовите процессы, происходящие при падении на экран электромагнитной волны.
18. Назовите основную характеристику среды, в которой распространяется электромагнитное возмущение.
19. Напишите формулу для определения коэффициента затухания.
20. Что такое скин-эффект?
21. При каких частотах эффективно экранировать магнитное поле, а при каких электрическое?
22. Перечислите виды логарифмических характеристик.
23. Как перевести децибелы в неперы?
24. Перечислите характеристики степени помехоподавления.
25. Рассчитайте коэффициент затухания, если толщина экрана равна 5 мм, а толщина скин-слоя 2 мм.

Тесты к разделу

1. Емкостное сопротивление поглощает сигнал:
 - а) низкой частоты;
 - б) высокой частоты;
 - в) сверхвысокие частоты;
 - г) сигналы радиочастот;
 - д) все ответы верны;
 - е) все ответы не верны.
2. Причинами ложного отключения выключателя 220 кВ являются:
 - а) перекрытие с ЗУ на цепи постоянного тока;
 - б) импульсные помехи в цепях оперативного тока;
 - в) импульсные помехи в сети постоянного тока более 2 кВ;
 - г) помехи в цепях дискретных сигналов;
 - д) все ответы верны;
 - е) все ответы не верны.

3. Один непер равен:
 - а) 17,3 дБ;
 - б) 0,115 дБ;
 - в) 2,3 дБ;
 - г) 8,686 дБ;
 - д) все ответы не верны.
4. К мероприятиям по снижению магнитного влияния помехи не относятся:
 - а) снижение до возможных пределов взаимной индуктивности за счет сокращения длины проводников, увеличение расстояния между сетевыми и информационными проводами, уменьшение площади контура, подвергающегося влиянию;
 - б) уменьшение площади контура, подвергающегося влиянию;
 - в) уменьшение скорости изменения магнитного потока при помощи короткозамкнутой петли, расположенной непосредственно у контура;
 - г) расположение контуров ортогонально;
 - д) компенсация индуцированного в контуре напряжения скруткой проводов;
 - е) все ответы верны;
 - ж) все ответы не верны.
5. Эффективность экрана зависит:
 - а) от конфигурации экрана;
 - б) от геометрических размеров экрана;
 - в) от частоты или скорости изменения поля;
 - г) от магнитной проницаемости материала экрана;
 - д) от амплитуды электромагнитного поля;
 - е) все ответы верны;
 - ж) все ответы не верны.

Перечень рекомендуемой литературы и Интернет-ресурсов

Основная литература

1. Аполлонский, С. М. Справочник по расчету электромагнитных экранов / С. М. Аполлонский. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
2. Овсянников, А. Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / А. Г. Овсянников. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 194 с.
3. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике : пер. с нем. / Э. Хабигер, И. П. Кужекин; под ред. Б. К. Максимова. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
4. Харлов, Н. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебное пособие / Н. Н. Харлов. – Томск : Изд-во ТПУ, 2007. – 207 с.

Дополнительная литература

1. Шаталов, А. Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебное пособие / А. Ф. Шаталов, И. Н. Воротников, И. И. Боровлев. – СтГАУ. Ставрополь : АГРУС, 2012. – 200 с.
2. Шаталов, А. Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / А. Ф. Шаталов [и др.]. – Ставрополь : АГРУС, 2014. – 60 с.

Раздел 2. Электромагнитная совместимость в системах электроснабжения

Основные термины и понятия

Электромагнитная совместимость технических средств, электромагнитная обстановка, электромагнитная помеха, влияние помехи, допустимая помеха, недопустимая помеха, приемлемая помеха, уровень помехи, норма на помеху, источник помехи, рецептор, электромагнитная эмиссия от источника помехи, уровень эмиссии, норма на эмиссию, электромагнитное излучение, уровень излучения, электромагнитная кондукция, уровень кондукции, норма на уровень кондукции.

Основные обозначения

АЦП – аналогово-цифровой преобразователь.

КЭ – качество электроэнергии.

ПКЭ – показатели качества электроэнергии.

СЭС – система электроснабжения.

ЦП – центральный процессор.

ЦСП – цифровой сигнальный процессор.

Глоссарий к разделу

Гармоническая составляющая – составляющая порядка выше, чем первый член ряда Фурье периодической величины.

Длительность перенапряжения – интервал времени между моментом, когда напряжение в конкретной точке системы электроснабжения возрастает выше порогового значения начала *перенапряжения*, и моментом, когда напряжение падает ниже порогового значения окончания перенапряжения.

Длительность провала напряжения – интервал времени между моментом, когда напряжение в конкретной точке системы электроснабжения падает ниже порогового значения начала провала напряжения, и моментом, когда напряжение возрастает выше *порогового значения окончания провала напряжения*.

Доза фликера – мера восприимчивости человека к воздействию колебаний светового потока, вызванных колебаниями напряжения в питающей сети, за установленный промежуток времени.

Импульсное напряжение – перенапряжение, представляющее собой одиночный импульс или колебательный процесс (обычно сильно демпфированный), длительностью до нескольких миллисекунд.

Качество электрической энергии (КЭ) – степень соответствия характеристик электрической энергии в данной точке электрической системы совокупности нормированных показателей КЭ.

Напряжение интергармонической составляющей – среднеквадратическое значение синусоидального напряжения, частота которого не является кратной основной частоте напряжения электропитания.

Несимметрия напряжений – состояние трехфазной системы энергоснабжения переменного тока, в которой среднеквадратические значения основных составляющих междуфазных напряжений или углы сдвига фаз между основными составляющими междуфазных напряжений не равны между собой.

Отклонение частоты – отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения.

Перенапряжение – временное возрастание напряжения в конкретной точке электрической системы выше установленного порогового значения.

Пороговое значение окончания провала напряжения – среднеквадратическое значение напряжения в системе электроснабжения, установленное для определения окончания провала напряжения.

Прерывание напряжения – ситуация, при которой напряжение в точке передачи электрической энергии меньше 5%-го опорного напряжения.

Провал напряжения – временное уменьшение напряжения в конкретной точке электрической системы ниже установленного порогового значения.

Усреднение по времени – усреднение нескольких последовательных значений конкретного показателя КЭ, измеренных на одинаковых интервалах времени, для получения значения показателя при большем интервале времени.

Методические рекомендации для студента по изучению раздела

Цель: изучить показатели качества электроэнергии, их допустимые значения и способ мониторинга этих показателей.

Учебные вопросы:

ГОСТ 32144-2013, Классификация кратковременных прерываний напряжения по длительности. Средства измерения ПКЭ, контроль КЭ и диагностика СЭС. Порядок работы и интерфейс измерителя «Ресурс UF-2».

Изучив раздел, студент должен:

знать:

- основные показатели качества электроэнергии;
- интервалы усреднения, нормально допустимые и предельно допустимые значения показателей качества электроэнергии;
- технические характеристики и интерфейс измерителя показателей качества электроэнергии «Ресурс-2F».

При освоении раздела необходимо:

- изучить раздел 2 из учебного пособия, а также материал по данному разделу из источников, указанных в библиографии;
- выполнить тесты к разделу 2;
- ответить на вопросы для самоконтроля.

Методическое руководство для преподавателя

Изучение данного раздела производится на основе лекционного материала, лабораторных и самостоятельных работ.

Изложение лекций должно быть ясным и доступным, обеспечивать условия для усвоения и возможность конспектирования материала. Часы, отведенные на лекцию, необходимо распределить так, чтобы в ее конце осталось время для ответов на вопросы обучающихся.

На лабораторных работах необходимо добиваться активного участия в занятиях всех студентов группы, развивать у студентов навыки практического использования полученных знаний при решении производственных задач.

Самостоятельная работа студентов является важным фактором усвоения учебного материала без участия преподавателя, но преподаватель должен регулярно проводить опрос обучающихся для разъяснения задаваемых ими вопросов.

2.1. Требования к ПКЭ согласно ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия, совместимость технических средств, электромагнитная нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения»

ГОСТ 32144-2013 устанавливает показатели и нормы качества электрической энергии (КЭ) в точках передачи электрической энергии пользователям электрических сетей низкого, среднего и высокого напряжения систем электроснабжения общего назначения переменного тока частотой 50 Гц.

ГОСТ 32144-2013 применяют при установлении норм показателей качества электрической энергии в электрических сетях:

- систем электроснабжения общего назначения, присоединенных к Единой энергетической системе;

- изолированных систем электроснабжения общего назначения.

Требования настоящего стандарта применяют во всех режимах работы систем электроснабжения общего назначения, кроме режимов, обусловленных:

- обстоятельствами непреодолимой силы: землетрясениями, наводнениями, ураганами, пожарами, гражданскими беспорядками, военными действиями;

- опубликованием нормативно-правовых актов органов власти, устанавливающих правила временного энергоснабжения;

- введением временного электроснабжения пользователей электрических сетей в целях устранения неисправностей или выполнения работ по минимизации зоны и длительности отсутствия электроснабжения.

Согласно ГОСТ 32144-2013 все показатели качества электроэнергии подразделяются на две категории – продолжительные изменения характеристик напряжения и случайные события.

К продолжительным изменениям характеристик напряжения:

1. Отклонение частоты

Показателем КЭ, относящимся к частоте, является отклонение значения основной частоты напряжения электропитания от номинального значения Δf , Гц

$$\Delta f = f_m - f_{nom},$$

где f_m – значение основной частоты напряжения электропитания.

Отклонение частоты в изолированных системах электроснабжения с автономными генераторными установками, не подключенных к синхронизированным системам передачи электрической энергии, не должно превышать ± 1 Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и ± 5 Гц в течение 100% времени интервала в одну неделю

Отклонение частоты в синхронизированных системах электроснабжения не должно превышать $\pm 0,2$ Гц в течение 95% времени интервала в одну неделю и $\pm 0,4$ Гц в течение 100% времени интервала в одну неделю.

2. Медленные изменения напряжения электропитания обусловлены обычно изменениями нагрузки электрической сети.

Показателями КЭ, относящимися к медленным изменениям напряжения электропитания, являются отрицательное $\delta U_{(-)}$ и положительное $\delta U_{(+)}$ отклонения напряжения электропитания в точке передачи электрической энергии от номинального/согласованного значения, %:

$$\delta U_{(-)} = \left[\frac{U_0 - U_{m(-)}}{U_0} \right] 100;$$

$$\delta U_{(+)} = \left[\frac{U_m + U_{0(-)}}{U_0} \right] 100,$$

где $U_{m(-)}$, $U_{m(+)}$ – значения напряжения электропитания, меньшие U_0 и большие U_0 соответственно.

3. Кратковременная и долговременная дозы фликера P_{st} и P_{lt} .

Они обусловлены колебаниями напряжения электропитания (как правило, продолжительностью менее 1 мин), в том числе одиночными быстрыми изменениями напряжения.

4. Быстрые одиночные изменения

Одиночные быстрые изменения напряжения вызываются в основном резкими изменениями нагрузки в электроустановках потребителей, переключениями в системе либо неисправностями и характеризуются быстрым переходом среднеквадратического значения напряжения от одного установившегося значения к другому.

Гармонические составляющие напряжения обусловлены, как правило, нелинейными нагрузками пользователей электрических сетей, подключаемыми к электрическим сетям различного напряжения. Гармонические токи, протекающие в электрических сетях, создают падения напряжений на полных сопротивлениях электрических сетей. Гармонические токи, полные сопротивления электрических сетей и, следовательно, напряжения гармонических составляющих в точках передачи электрической энергии изменяются во времени.

Показателями КЭ, относящимися к гармоническим составляющим напряжения, являются:

1) значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения до 40-го порядка $K_{U(n)}$ в процентах напряжения основной гармонической составляющей U_1 в точке передачи электрической энергии;

2) значение суммарного коэффициента гармонических составляющих напряжения (отношения среднеквадратического значения суммы всех гармонических составляющих до 40-го порядка к среднеквадратическому значению основной составляющей) K_U , %, в точке передачи электрической энергии.

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

а) значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в табл. 2.1 – 2.3 [5], в течение 95% времени интервала в одну неделю;

б) значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в табл. 2.1 – 2.3, увеличенных в 1,5 раза, в течение 100% времени каждого периода в одну неделю;

в) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в табл. 2.4 [5], в течение 95% времени интервала в одну неделю;

г) значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать значений, установленных в табл. 2.5 [5], в течение 100% времени интервала в одну неделю.

Таблица 2.1

Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения, не кратных трем $K_{U(n)}$ [5]

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, % U_1			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6 – 25	35	110 – 220
5	6	4	3	1,5
7	5	3	2,5	1
11	3,5	2	2	1
13	3,0	2	1,5	0,7
17	2,0	1,5	1	0,5
19	1,5	1	1	0,4
23	1,5	1	1	0,4
25	1,5	1	1	0,4
> 25	1,5	1	1	0,4

Таблица 2.2

Значения коэффициентов нечетных гармонических составляющих напряжения, кратных трем $K_{U(n)}$ [5]

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов напряжения гармонических составляющих $K_{U(n)}$, % U_1 [5]			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6 – 25	35	110 – 220
3	5	3	3	1,5
9	1,5	1	1	0,4
15	0,3	0,3	0,3	0,2
21	0,2	0,2	0,2	0,2
> 21	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 2.3

Значения коэффициентов напряжения четных гармонических составляющих $K_{U(n)}$ [5]

Порядок гармонической составляющей n	Значения коэффициентов гармонических составляющих напряжения $K_{U(n)}$, % U_1			
	Напряжение электрической сети, кВ			
	0,38	6 – 25	35	110 – 220
2	2	1,5	1	0,5
4	1	0,7	0,5	0,3
6	0,5	0,3	0,3	0,2
8	0,5	0,3	0,3	0,2
10	0,5	0,3	0,3	0,2
12	0,2	0,2	0,2	0,2
> 12	0,2	0,2	0,2	0,2

Таблица 2.4

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U [5]

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6 – 25	35	110 – 220
8,0	5,0	4,0	2,0

Таблица 2.5

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U [5]

Значения суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U , %			
Напряжение электрической сети, кВ			
0,38	6 – 25	35	110 – 220
12,0	8,0	6,0	3,0

Измерения напряжения гармонических составляющих U_n должны быть проведены в соответствии с требованиями ГОСТ 30804.4.7, класс I, в интервалах времени 10 периодов без промежутков между интервалами с последующим усреднением в интервале времени 10 мин. В качестве результатов измерений в интервалах времени 10 периодов должны быть применены гармонические подгруппы по ГОСТ 30804.4.7, подраздел 3.2.

В качестве суммарных коэффициентов гармонических составляющих напряжения K_U должны быть применены суммарные коэффициенты гармонических подгрупп по ГОСТ 30804.4.7, подраздел 3.3.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к гармоническим составляющим напряжения, установленным в этом стандарте, маркированные данные не учитывают.

Интергармонические составляющие напряжения

Уровень интергармонических составляющих напряжения электропитания увеличивается в связи с применением в электроустановках частотных преобразователей и другого управляющего оборудования.

Допустимые уровни интергармонических составляющих напряжения электропитания находятся на рассмотрении.

Несимметрия напряжений в трехфазных системах

Несимметрия трехфазной системы напряжений обусловлена несимметричными нагрузками потребителей электрической энергии или несимметрией элементов электрической сети.

Показателями КЭ, относящимися к несимметрии напряжений в трехфазных системах, являются:

- 1) коэффициент несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} ;
- 2) коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} .

Для указанных показателей КЭ установлены следующие нормы:

– значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 2% в течение 95% времени интервала в одну неделю;

– значения коэффициентов несимметрии напряжений по обратной последовательности K_{2U} и несимметрии напряжений по нулевой последовательности K_{0U} в точке передачи электрической энергии, усредненные в интервале времени 10 мин, не должны превышать 4% в течение 100% времени интервала в одну неделю.

При оценке соответствия электрической энергии нормам КЭ, относящимся к несимметрии напряжений, установленным в настоящем стандарте [5], должны быть проведены измерения по ГОСТ 30804.4.30, подраздел 5.7, класс А, при этом маркированные данные не учитывают.

Допустимые уровни напряжения сигналов, передаваемых по электрическим сетям, и методы оценки соответствия требованиям находятся на рассмотрении.

Случайные события

1) Прерывания напряжения

Прерывания напряжения относят к создаваемым преднамеренно, если пользователь электрической сети информирован о предстоящем прерывании напряжения, и к случайным, вызываемым длительными или кратковременными неисправностями, обусловленными в основном внешними воздействиями, отказами оборудования или влиянием электромагнитных помех.

Создаваемые преднамеренно прерывания напряжения, как правило, обусловлены проведением запланированных работ в электрических сетях.

Случайные прерывания напряжения подразделяют на длительные (длительность более 3 мин) и кратковременные (длительность не более 3 мин).

Ежегодная частота длительных прерываний напряжения (длительностью более 3 мин) в значительной степени зависит от особенностей системы электроснабжения (в первую очередь, применения кабельных или воздушных линий) и климатических условий. Кратковременные прерывания напряжения наиболее вероятны при их длительности менее нескольких секунд.

В трехфазных системах электроснабжения к прерываниям напряжения относят ситуацию, при которой напряжение меньше 5% опорного напряжения во всех фазах. Если напряжение меньше 5% опорного напряжения не во всех фазах, ситуацию рассматривают как провал напряжения.

Пороговое значение начала прерывания считают равным 5% опорного напряжения.

2) Провалы напряжения

Провалы напряжения обычно происходят из-за неисправностей в электрических сетях или в электроустановках потребителей, а также при подключении мощной нагрузки.

Провал напряжения, как правило, связан с возникновением и окончанием короткого замыкания или иного резкого возрастания тока в системе или электроустановке, подключенной к электрической сети. В соответствии с требованиями настоящего стандарта [5] провал напряжения рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность провала напряжения может быть до 1 мин.

В трехфазных системах электроснабжения за начало провала напряжения принимают момент, когда напряжение хотя бы в одной из фаз падает ниже порогового значения начала провала напряжения, за окончание провала напряжения принимают момент, когда напряжение во всех фазах возрастает выше порогового значения окончания провала напряжения.

3) Перенапряжения

Перенапряжения, как правило, вызываются переключениями и отключениями нагрузки. Перенапряжения могут возникать между фазными проводниками или между фазными и защитным проводниками. В зависимости от устройства заземления короткие замыкания на землю могут также приводить к возникновению перенапряжения между фазными и нейтральным проводниками. В соответствии с требованиями настоящего стандарта перенапряжение рассматривается как электромагнитная помеха, интенсивность которой определяется как напряжением, так и длительностью. Длительность перенапряжения может быть до 1 мин.

Оба явления – провалы и перенапряжения – непредсказуемы и в значительной степени случайны. Частота возникновения их зависит от типа системы электроснабжения, точки наблюдения, времени года.

Импульсные напряжения в точке передачи электрической энергии пользователю электрической сети вызываются в основном молниевыми разрядами или процессами коммутации в электрической сети или электроустановке потребителя электрической энергии. Время нарастания импульсных напряжений может изменяться в широких пределах (от значений менее 1 микросекунды до нескольких миллисекунд).

Импульсные напряжения, вызванные молниевыми разрядами, в основном имеют большие амплитуды, но меньшие значения энергии, чем импульсные напряжения, вызванные коммутационными процессами, характеризующимися, как правило, большей длительностью.

2.2. Классификация кратковременных прерываний напряжения по длительности

Провалы и прерывания напряжения измеряют в соответствии с ГОСТ 30804.4.30 на основе измерений среднеквадратических значений напряжения, обновляемых для каждого полупериода. Параметрами провалов, прерываний напряжения, являющимися объектами рассмотрения в настоящем стандарте, являются остаточное напряжение и длительность.

В электрических сетях низкого напряжения, четырехпроводных трехфазных системах учитывают фазные напряжения; в трехпроводных трехфазных системах учитывают линейные напряжения; в случае однофазного подключения учитывают питающее напряжение (фазное или линейное в соответствии с подключением потребителя).

Пороговое значение начала провала напряжения принимают равным 90% опорного напряжения. Пороговое значение начала прерывания напряжения принимают равным 5% опорного напряжения.

При измерениях в многофазных системах рекомендуется определять и записывать число фаз, затрагиваемых каждым событием.

Для электрических сетей трехфазных систем следует использовать многофазное сведение данных, которое заключается в определении эквивалентного события, характеризующегося одной длительностью и одним остаточным напряжением.

2.3. Средства измерения ПКЭ, контроль КЭ и диагностика СЭС

На сегодняшний день на рынке существует огромное множество различных измерителей показателей качества электроэнергии, различных стран производителей с различными техническими характеристиками.

Одним из таких измерителей является производимый НПП «Энерготехника» прибор для учета ПКЭ «Ресурс UF-2».

Рассмотрим технические характеристики данного устройства. Измеритель имеет две группы трехфазных измерительных входов напряжения с фазным и линейным напряжением (прямой вход 380 В и вход 220 В), и входы с номинальным напряжением 57 В и 100 В (трансформаторный вход 100 В и вход 57 В). Напряжение подается только на одну группу входов. К трансформаторным входам подключаются измерительные трансформаторы напряжения.

Модификации измерителя ПКЭ «Ресурс UF2С», «Ресурс UF2М» имеют четыре измерительных канала напряжения, работа которых рассчитана на диапазоны номинальных напряжений 220/380 В и 57/100 В.

В зависимости от модификации устройства у него имеются три («Ресурс UF-2») или четыре («Ресурс UF2С» и «Ресурс UF2М») группы выходов для измерения тока с номинальным действующим значением тока 1 и 5А при непосредственном подключении, и с большим значением тока при подключении через трансформаторы тока.

Трансформаторы тока, поставляемые в комплекте с измерителем, имеют первичный номинальный ток: 1 А, 5 А, 50 А, 100 А, 200 А, 500 А, 1000 А, 3000 А. Измеритель обеспечивает работу с двумя типами разъемных трансформаторов тока: тип «Т» – с токовым выходом, «П» – с потенциальным выходом. При комплектации измерителя трансформатором тока их количество и краткое обозначение и номинальные значения первичных токов указываются через дефис в наименовании прибора без обозначения единицы измерения.

Модификация «Ресурс UF2В» (рис. 2.1) имеет низковольтный вход «10 В» и может использоваться для определения режимов работы измерительных трансформаторов тока.



Рис. 2.1. Лицевая панель измерителя «Ресурс UF-2»

Входное сопротивление имеет по прямым входам напряжения 400 кОм, по трансформаторным входам 100 кОм. Модификации («Ресурс UF2С» и «Ресурс UF2М») имеют по измерительным каналам напряжения не менее 400 кОм.

Входное сопротивление измерителя по токовым входам «5А» не более 0,05 Ом. Входное сопротивление по токовым входам с номинальным током в 1 А не более 0,25 Ом. Входное сопротивление измерителя «Ресурс UF2МВ» по низкоомным измерительным выходам с номинальным напряжением 10 В не менее 30 кОм.

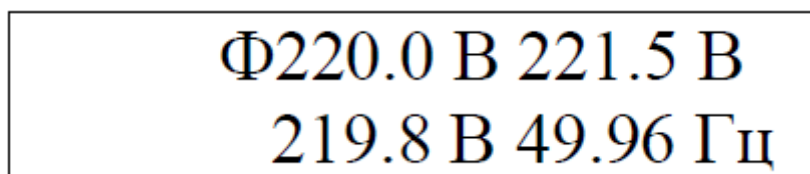
2.4. Порядок работы и интерфейс измерителя «Ресурс UF-2»

При первом включении измерителя расчетные данные обнуляются, а исходные данные устанавливаются по умолчанию (установлены на заводе изготовителе). Перед пуском измерителя в работу первым делом необходимо настроить правильное время и дату, для безошибочного мониторинга ПКЭ.

Клавиши «↑» «↓» служат для того, чтобы перемещаться по пунктам меню, выбор необходимого пункта или ввод данных осуществляется нажатием кнопки «SET». Клавишей «ESC» осуществляется отказ или возврат в предыдущее меню. При вводе данных над редактируемой строкой появляется курсор «_». Стрелки «↑» «↓» также служат для редактирования параметров. Редактирование исходных данных происходит только при снятой перемычке «Запись». Измеритель «Ресурс UF-2» может отображать как абсолютное значение напряжения и частоты электрического сигнала, так и их отклонение от заданного номинального значения. Для этого необходимо войти в меню «Отображение» и выбрать либо «Абс. значение» либо «Отклонение». В режиме «Отклонение» отображается относительное отклонение напряжения в процентах и абсолютное отклонение частоты в герцах.

Клавиша «F1» предназначена для оперативного контроля усредненных на трехсекундном временном интервале абсолютных значений напряжения и частоты или их отклонения.

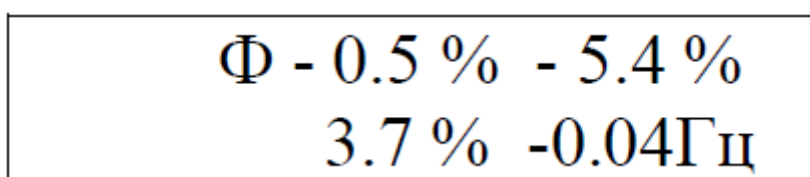
Установившееся действующее значение основной гармоники фазных напряжений частоты представляется в следующем виде (рис. 2.2):



Ф220.0 В 221.5 В
219.8 В 49.96 Гц

Рис. 2.2. Представление на индикаторе измерителя напряжения и частоты

Индикатор, показывающий отклонение этих величин, показан на рис. 2.3.



Ф - 0.5 % - 5.4 %
3.7 % -0.04Гц

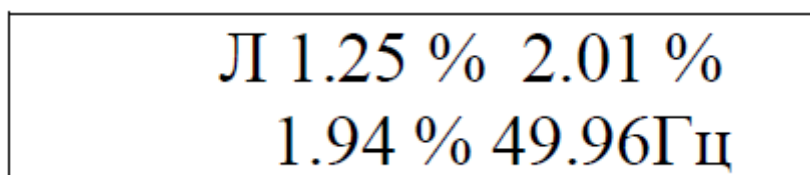
Рис. 2.3. Представление на индикаторе измерителя отклонения напряжения и частоты

При нажатии клавиши «F1» на индикаторе отображается информация о фазных или междуфазных напряжениях или их отклонениях, переключение между ними осуществляется повторным нажатием «F1».

При выводе информации о фазных напряжениях на первой строке индикатора выводится буква «Ф» и значение напряжения или отклонения фазы А, В, на нижней фазе С. При выводе информации о линейных напряжениях на первой строке индикатора выводится буква «Л» и значение линейных напряжений или отклонений АВ, ВС, на нижней строке СА. Дополнительно к значениям напряжений к нижней строке выводится среднее значение частоты.

В случае, когда необходимо оперативно проконтролировать на интервале усреднения 3 с значений частоты и коэффициентов несинусоидальности напряжения, используют клавишу «F2».

При нажатии клавиши «F2» на индикаторе отображается информация о коэффициентах искажения синусоидальности кривой фазных или линейных напряжений, переключения между которыми выполняется аналогично «F1». Вывод коэффициентов несинусоидальности происходит аналогично индикации номинального напряжения. Дополнительно к коэффициентам искажения синусоиды выводится значение частоты или ее отклонения от 50 Гц. В режиме индексации абсолютных значений частоты данные представляются в следующем виде (рис. 2.4):



Л 1.25 % 2.01 %
1.94 % 49.96Гц

Рис. 2.4. Представление на индикаторе измерителя коэффициентов искажения кривой междуфазных напряжений и частоты

В режиме индикации отклонений отображается абсолютное отклонение частоты, и данные выглядят следующим образом (рис. 2.5):

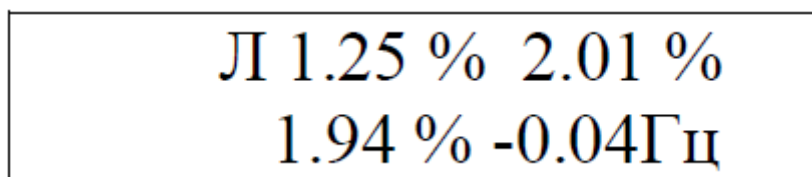


Рис. 2.5. Представление на индикаторе измерителя коэффициентов искажения кривой междуфазных напряжений и абсолютного отклонения частоты

Данные также обновляются каждые три секунды.

После включения измерителя на индикаторе высветиться первый пункт меню «ПАРАМЕТРЫ», два других пункта «ДАННЫЕ», «ПРОТОКОЛ» станут доступными после нажатия клавиш «↑» «↓».

В разделе «ПАРАМЕТРЫ» пользователь может задать параметры сигнала, который необходимо измерить, используемый вход, нормально и предельно допустимые значения, типы и параметры внешних устройств, подключаемых к интерфейсам R-232 и R-485.

В разделе «ДАННЫЕ» можно посмотреть результаты измерений контролируемых ПКЭ.

В разделе «ПРОТОКОЛ» имеются сведения о работе самого измерителя: включении и отключении питания, коррекция времени.

Выбрав раздел «ПАРАМЕТРЫ», пользователю предлагается выбрать один из пунктов меню:

- «Календарь»;
- «Напряжение»;
- «Частота»;
- «Несимметрия»;
- «Гармоники»;
- «Интерфейс»;
- «Работа».

При этом на первую строку индикатора выводится пункт меню, а на вторую – текущее время.

Раздел «Календарь» позволяет корректировать время, текущую дату, дату перехода на зимнее/летнее время, время максимальных и минимальных нагрузок. Для редактирования этих параметров нужно воспользоваться клавишей «SET» при снятой перемычке «Запись», при этом на нижней строке появится курсор «_».

Если измеритель был запущен в работу, то коррекция времени возможна только в пределах 20 секунд. Текущую дату при этом изменить невозможно.

Измеритель также позволяет задать два интервала времени пиковых нагрузок «ВРЕМЯ ПИК1», «ВРЕМЯ ПИК2». Дискретность задания границ интервалов составляет 30 минут.

Время на индикаторе выводится как начало и конец временного интервала, при этом начальное значение получасового интервала входит, а конечное не входит в задаваемый интервал.

Раздел «Напряжение» позволяет задать параметры измеряемого напряжения. При его выборе на индикаторе появляется одно из следующих сообщений:

- «Вход»;
- «Кэф. транс.»;
- «U Фазное» «U линейное».

В разделе «Вход» нужно указать, какой тип входа необходимо использовать, – прямой («Прямой») или трансформаторный («Трансф.»).

Раздел «Коеф. транс» доступен, только если в разделе «Вход» выбран трансформаторный вход. Допустимые значения коэффициента трансформации приведены в инструкции по эксплуатации к измерителю «Ресурс UF-2М»

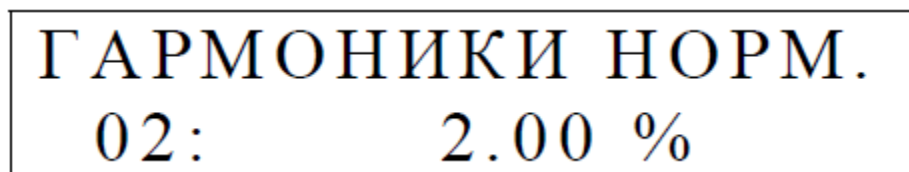
В разделе «U фазное» и «U линейное» пользователь должен задать номинальное значение фазных, линейных напряжений, нормально допустимые и предельно допустимые значения отклонений в часы максимальных и минимальных нагрузок. В этих разделах также задается уровень провалов и перенапряжений.

Раздел «Частота» позволяет пользователю задавать нормально и предельно допустимые значения отклонения частоты от 50 Гц.

Раздел «Несимметрия» предназначен для ввода нормально и предельно допустимых значений коэффициентов несимметрии по обратной и нулевой последовательности.

Раздел «Искажения» позволяет задать нормально и предельно допустимые значения коэффициента искажения синусоидальных фазных/междуфазных напряжений. Дискретность задания значений составляет 0,1%.

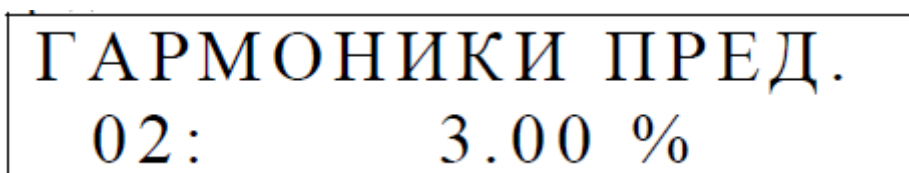
Раздел «Гармоники» предназначен для задания нормально и предельно допустимые значения коэффициентов n -й гармонической составляющей (n варьируется от 2 до 40). На индикатор выводятся сообщения вида (рис. 2.6):



ГАРМОНИКИ НОРМ.
02: 2.00 %

Рис. 2.6. Индикатор при введении нормально допустимых значений коэффициентов гармонической составляющей

При вводе допустимого значения коэффициентов гармонической составляющей на индикатор выходит сообщения вида (рис. 2.7):



ГАРМОНИКИ ПРЕД.
02: 3.00 %

Рис. 2.7. Индикатор при введении предельно допустимых значений коэффициентов гармонической составляющей

В начале второй строки выводиться номер гармоники. По нажатию клавиш «↑» «↓» происходит переключение между номерами гармоник. При нажатии клавиш «←», «→» происходит переход от редактирования нормально допустимых значений к предельно допустимым и обратно.

Дискретность задания значений составляет 0,1%.

Раздел «RS232» позволяет задать тип внешнего устройства, подключаемого к интерфейсу RS-232. Измеритель обеспечивает работу со следующими устройствами: телефонный модем, радиомодем, принтер, ЭВМ.

При работе с телефонным модемом, радиомодемом, ЭВМ необходимо учитывать, что измеритель будет обеспечивать обмен данными, только если команда, посылаемая измерителю, правильно указывает номер измерителя. Номер измерителя является порядковым номером, указанным на маркированной планке и паспорте изделия.

Измеритель также обеспечивает работу по интерфейсу RS-485 или передачу информации по двухпроводной токовой линии связи в системы верхнего уровня.

Для пуска измерителя в работу необходимо в разделе «Работа» установить значение «Пуск» в данном разделе меню. Для остановки изменений необходимо установить параметр в значение «Стоп».

Изменение режима производится с помощью нажатия клавиш «SET»«←» «→»«SET». При запуске измерителя в работу все расчетные данные в измерителе очищаются. При остановке работы измерителя все расчетные данные сохраняются, а дальнейший расчет не производится.

Для режима работы, когда невозможно осуществить съем показаний на объекте, рекомендуется установить следующий порядок работы:

1. Установить измеритель на объекте, произвести подключение.
2. Произвести пуск измерителя.
3. По окончании измерения перевести измеритель в режим «Стоп».
4. Выключить измеритель и перенести его в лабораторию.
5. Подключить измеритель к компьютеру, включить измеритель.
6. С помощью программного обеспечения считать с измерителя необходимые данные.

Все измеряемые величины и рассчитываемые параметры находятся в разделе «Данные». На первую строку индикатора выходит один из пунктов меню:

- «Средние»;
- «Архив»;
- «Гармоники»;
- «Провалы»;
- «Перенапряжения»;
- «Чередование фаз».

В разделе «Средние» имеется возможность просмотра большинства значений усредненных параметров. Переключения между ними осуществляется с помощью стрелок «←» «→», переход между экранами осуществляется с помощью «↑» «↓».

Раздел «Архив» позволяет просматривать усредненные и накопленные за время работы измерителя данных.

При выборе раздела «Гармоники» на индикатор выводится информация в виде (рис. 2.8):

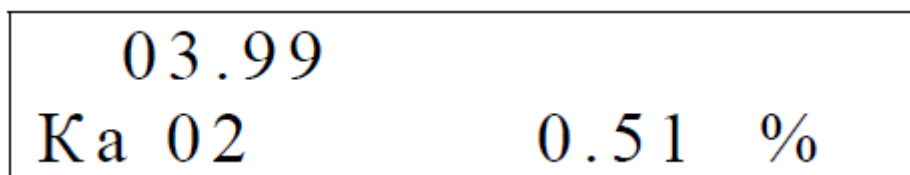


Рис. 2.8. Индуктор при выборе раздела «Гармоники»

В данном разделе меню предоставляются данные о последнем измеренном значении коэффициентов гармоник. Пользователь также может выбрать тип расчетного периода и интересующее напряжение. Выбрав расчетный период и нажав клавишу «SET» пользователь получит доступ к данным по выбранному коэффициенту гармоник. За расчетный период по коэффициенту гармоник предоставляются данные, аналогичные коэффициенту несинусоидальности: максимальное значение, время выхода за нормально и предельно допустимые значения в процентах от времени работы.

Информация по провалам напряжения находится в разделе «Провалы» в виде протокола. На первой строке выводится общее время провалов с момента пуска измерителя в работу, на второй строке – общее количество провалов. Данные выводятся отдельно для каждого фазного и линейного напряжения.

Данные по перенапряжениям хранятся в разделе «Перенапряжения». Данные выводятся отдельно для каждой фазы и напряжения.

Чередование фаз можно проверить в следующем разделе меню. При правильном подключении должно выводиться сообщение А В С, при неверном подключении А С В. Данными о чередовании фаз необходимо использовать при измерении параметров реальных трехфазных электрических систем.

Работа самого измерителя фиксируется в протоколе, доступ к которому можно получить в разделе «Протокол». В протоколе фиксируется:

- Пуск прибора.
- Выключение питания (после пуска).
- Включение питания (после пуска).
- Коррекция времени.
- Переход на летнее/зимнее время.
- Отказ АЦП (после пуска).
- Отказ ЦСП.

Первоначально выводиться общее количество сбоев питания, а следующая информация имеет вид (рис. 2.9):

03	13-03-99
ВКЛ.	08:55:04

04	13-03-99
КОРР Т	09:14:13

06	22-03-99
Т.ЛЕТО	02:00:00

Рис. 2.9. Индуктор при выборе раздела «ПРОТОКОЛ»

Сообщение «Т.ЗИМА», «Т.ЛЕТО» появятся в протоколе при программировании перевода часов на зимнее и летнее время.

Сообщение «АЦП» появится в протоколе после пуска прибора, если ЦСП перестанет принимать данные от аналого-цифрового преобразователя. При этом параметр «Работа» программно установится в значение «СТОП». Об этом также будет свидетельствовать соответствующая запись в протоколе.

Сообщение «АЦП» появится в протоколе работы, если в течение трех секунд ЦСП ни разу не передаст центральному процессору данные о результатах расчетов параметров, контролирующих сигналы. После записи в протокол об отказе ЦСП измеритель автоматически перезапустится и в случае, если работоспособность ЦСП не восстановится, параметр «Работа» программно установится в значение «СТОП, появится соответствующая запись в протоколе.

Вопросы для самоконтроля

1. Перечислите все ПКЭ.
2. Дайте определение гармоническая составляющая.
3. Дайте определения кратковременной и долговременной дозе фликера.
4. Какие ПКЭ относятся к случайным событиям?

5. Назовите интервалы усреднения для коэффициентов гармонических составляющих.
6. Назовите предельно и нормально допустимые значения отклонения частоты.
7. Пороговое значение начала провала напряжения.
8. Назначение и область применения измерителя «Ресурс UF2M».
9. Назовите, какие группы трехфазных измерительных входов имеются у измерителя «Ресурс UF2M».
10. Расположение и назначение клавиш измерителя «Ресурс UF2M».
11. Какие параметры можно задавать в разделе «НАПРЯЖЕНИЕ»?
12. С каким интерфейсом работает измеритель «Ресурс UF2M»?
13. Какие пункты находятся в разделе «ПАРАМЕТРЫ»?
14. В каком разделе фиксируется работа самого измерителя?
15. На какие напряжения рассчитаны измерительные каналы?
16. Какой номинальный ток трансформаторов работающих с измерителем «Ресурс UF2M»?
17. Расскажите, каким образом можно поменять коэффициент трансформации?
18. Какие ПКЭ относятся к медленным изменениям напряжения?
19. Чем обусловлены медленные изменения напряжения электропитания?
20. Чем обусловлены импульсные напряжения в точке передачи электрической энергии?
21. В каком разделе находятся все измеряемые ПКЭ?
22. Чем обусловлено появление интергармонических составляющих?

Тесты к разделу

1. Какие ПКЭ не относятся к медленным изменениям напряжения:
 - а) положительное отклонение напряжения;
 - б) перенапряжение;
 - в) отрицательное отклонение напряжения;
 - г) коэффициент несимметрии напряжений по нулевой последовательности;
 - д) все ответы верны;
 - е) все ответы не верны.
2. Предельно допустимым отклонением частоты синхронизированных системах электроснабжения считается:
 - а) $\pm 0,2$ Гц;
 - б) $\pm 0,1$ Гц;
 - в) ± 1 Гц;
 - г) $\pm 0,4$ Гц;
 - д) все ответы верны;
 - е) все ответы не верны.
3. Предельно допустимым отклонением частоты синхронизированных системах электроснабжения считается:
 - а) $\pm 0,2$ Гц;
 - б) $\pm 0,1$ Гц;
 - в) ± 1 Гц;
 - г) $\pm 0,4$ Гц;
 - д) все ответы верны;
 - е) все ответы не верны.
4. Значения коэффициентов гармонических составляющих усредняются на интервале:
 - а) 10 мин;
 - б) 10 с;

- в) одного полупериода основной частоты;
 - г) 5 с;
 - д) все ответы не верны.
5. Частота возникновения провалов и перенапряжений зависит:
- а) от типа системы электроснабжения;
 - б) от точки наблюдения;
 - в) от времени года;
 - г) все ответы верны;
 - д) все ответы не верны.

Перечень рекомендуемой литературы и Интернет-ресурсов

Основная литература

1. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия совместимость, технических средств, электромагнитная норма качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – Москва : Стандартинформ, 2014.

Дополнительная литература

1. ГОСТ 30804.4.7-2013 «Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств». – Москва : Стандартинформ, 2013.

2. ГОСТ 30804.4.30-2013 «Методы измерений показателей качества электрической энергии». – Москва : Стандартинформ, 2014.

Интернет-ресурсы

1. <http://www.entp.ru/> – Научно-производственное предприятие «Энерготехника». – (дата обращения 09.12.2016).

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данном учебном пособии автором были предприняты попытки осветить только основные вопросы электромагнитной совместимости. Повсеместное внедрение микропроцессорных устройств предъявило к системам электроснабжения дополнительные требования по уровням электромагнитных помех и качества питающей эти устройства электроэнергией. От надежной и эффективной работы функционирования микропроцессорных устройств управления, зависит надежность электроснабжения гражданских и промышленных потребителей.

Перспектива вхождения России в европейскую, а впоследствии и мировую энергетическую систему напрямую зависит от качества электрической энергии, эффективного функционирования систем автоматического и автоматизированного управления. Таким образом, необходимо обеспечить надежную защиту оборудования от помех и низкую помехоэмиссию.

Вопросы итогового контроля по дисциплине

1. Какие источники помех бывают на электрических станциях и подстанциях?
2. Определение источника и приемника помех, классификация помех в зависимости от среды распространения.
3. Какие повреждения и нарушения в работе устройств РЗА могут быть?
4. Какие логарифмические величины применяются для оценки уровня помех, степени передачи и помехоподавления?
5. Какие существуют мероприятия по снижению помех при гальванической связи через общее сопротивление?
6. Какие существуют мероприятия по снижению помех при гальванической связи через общее сопротивление в системе заземления?
7. Какие существуют мероприятия по снижению помех при гальванической связи через общее сопротивление?
8. Какие существуют мероприятия по снижению помех при емкостной связи?
9. Какие существуют мероприятия по снижению помех при емкостной связи контуров с общим проводом системы опорного потенциала?
10. Какие существуют мероприятия по снижению помех при индуктивной связи?
11. Какие существуют мероприятия по снижению помех при связи через электромагнитное поле?
12. Какие пути проникновения существуют у помех?
13. Классификация фильтров.
14. Какие преимущества имеют АРС-фильтры?
15. Для чего используются кварцевые фильтры? Принцип их работы.
16. Какие коэффициенты экранирования характеризуют эффективность экрана?
17. Падение на экран электромагнитной волны.
18. Экранирование электрического поля.
19. Экранирование магнитного поля.
20. Какие показатели качества электроэнергии прописаны в ГОСТ 32144-2013?
21. Какие интервалы усреднения электроэнергии прописаны в ГОСТ 32144-2013?
22. Какие нормы на ПКЭ прописаны в ГОСТ 32144-2013?
23. Разделы верхнего меню и режим работы измерителя «Ресурс UF-2».
24. Разделы меню «ПАРАМЕТРЫ».
25. Разделы меню «ПАРАМЕТРЫ/НАПРЯЖЕНИЯ».
26. Разделы меню «ПАРАМЕТРЫ/ТОК».
27. Разделы меню «ПАРАМЕТРЫ/ИНТЕРФЕЙС».
28. Разделы меню «ПАРАМЕТРЫ/УПРАВЛЕНИЕ».
29. Разделы меню «ДААННЫЕ».
30. Разделы меню «ДААННЫЕ/ПКЭ».
31. Разделы меню «ДААННЫЕ/АРХИВ».
32. Назначение и область применения измерителя «Ресурс UF-2».
33. Расположение и назначение клавиш клавиатуры измерителя «Ресурс UF-2».

БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Аполлонский, С. М. Справочник по расчету электромагнитных экранов / С. М. Аполлонский. – Ленинград : Энергоатомиздат, 1988. – 224 с.
2. Дьяков, А. Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике / А. Ф. Дьяков, Б. К. Максимов, Р. К. Борисов, И. П. Кужекин, А. В. Жуков; под ред. А. Ф. Дьякова. – Москва : Энергоатомиздат, 2003. – 768 с.
3. Овсянников, А. Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / А. Г. Овсянников. – Новосибирск : Изд-во НГТУ, 2011. – 194 с.
4. Хабигер, Э. Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике : пер. с нем. / Э. Хабигер, И. П. Кужекин; под ред. Б. К. Максимова. – Москва : Энергоатомиздат, 1995. – 304 с.
5. Шаталов, А. Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебное пособие / А. Ф. Шаталов, И. Н. Воротников, И. И. Боровлев. – СтГАУ. Ставрополь : АГРУС, 2012. – 200 с.
6. Шаталов, А. Ф. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике / А. Ф. Шаталов [и др.]. – Ставрополь : АГРУС, 2014. – 60 с.
7. Шваб, А. Электромагнитная совместимость : пер. с нем. / А. Шваб ; под ред. М. Кужекина. – 2-е изд., перераб. и доп. – Москва : Энергоатомиздат, 1998. – 480 с.
8. ГОСТ 30804.4.30-2013 «Методы измерений показателей качества электрической энергии». – Москва : Стандартинформ, 2014.
9. ГОСТ 30804.4.7-2013 «Общее руководство по средствам измерений и измерениям гармоник и интергармоник для систем электроснабжения и подключаемых к ним технических средств». – Москва : Стандартинформ, 2013.
10. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия, совместимость технических средств, электромагнитная норма качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения». – Москва : Стандартинформ, 2014.
11. [http:// www.entp.ru/](http://www.entp.ru/) – Научно-производственное предприятие «Энерготехника». – (дата обращения: 09.12.2016).

Учебное электронное издание

Тимиргазин Рустем Фидусович

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ

Учебное пособие

Редактор Н. А. Евдокимова

ЭИ № 915. Объем данных 0,6 Мб.

ЛР № 020640 от 22.10.97.

Печатное издание

Подписано в печать 24.03.2017. Формат 60×90/8.

Усл. печ. л. 6,00. Тираж 50 экз. Заказ № 468.

Ульяновский государственный технический университет,
432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

ИПК «Венец» УлГТУ, 432027, г. Ульяновск, ул. Сев. Венец, д. 32.

Тел.: (8422) 778-113

E-mail: venec@ulstu.ru

<http://www.venec.ulstu.ru>