

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЭЭ



ОБЩИЕ ВОПРОСЫ ЭМС

Рекомендуемая литература

1. Овсянников, А. Г. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебник / А. Г. Овсянников, Р. К. Борисов. — Новосибирск : НГТУ, 2017. — 196 с. — ISBN 978-5-7782-3367-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/118157> (дата обращения: 31.08.2020).
2. Кузнецов, В. Н. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике : учебное пособие / В. Н. Кузнецов. — Тольятти : ТГУ, 2014. — 69 с. — ISBN 978-5-8259-0830-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/140216> (дата обращения: 31.08.2020).
3. Ольховский, В. Я. Кондуктивные электромагнитные помехи в системах электроснабжения : учебное пособие / В. Я. Ольховский, Т. В. Мятаж. — Новосибирск : НГТУ, 2018. — 43 с. — ISBN 978-5-7782-3473-4. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/118164> (дата обращения: 31.08.2020).
4. Титков, В. В. Перенапряжения и молниезащита : учебное пособие / В. В. Титков, Ф. Х. Халилов. — 3-е изд., стер. — Санкт-Петербург : Лань, 2020. — 224 с. — ISBN 978-5-8114-5819-6. — Текст : электронный // Лань : электронно-библиотечная система. — URL: <https://e.lanbook.com/book/145845> (дата обращения: 31.08.2020).

Рекомендуемая литература

1. Э. Хабигер Электромагнитная совместимость. Основы ее обеспечения в технике: Пер. с нем./ И.П. Кужекин; Под ред. Б.К. Максимова.-М.: Энергоатомиздат, 1995.-304 с.: ил.
2. А. Шваб Электромагнитная совместимость. Пер. с нем. В.Д. Мазина и С.А. Спектора 2-е изд., перераб. и доп./ Под ред. Кужекина. М.: Энергоатомиздат, 1998. 480 с., ил.
3. Дьяков А.Ф., Максимов Б.К., Борисов Р.К., Кужекин И.П., Жуков А.В. Электромагнитная совместимость в электроэнергетике и электротехнике./ Под ред. А.Ф. Дьякова.-М.: Энергоатомиздат, 2003.-768 с.
4. Гармоники в электрических системах: Пер. с англ./Дж. Аррилага, Д. Брэдли, П. Боджер.- М.: Энергоатомиздат, 1990. – 320 с., ил.
5. Кармашев В.С. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник. – М.; 2001.
6. Жежеленко И.В. Высшие гармоники в системах электроснабжения промпредприятий. – 3-е изд. М.: Энергоатомиздат, 1994. и др.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ В ЭЭ

Введение. Основные термины и определения.

Глава 1. Общие вопросы ЭМС.

Глава 2. Источники ЭМП.

Глава 3. Механизмы появления помех и мероприятия по их снижению.

Глава 4. Пассивные помехоподавляющие и защитные компоненты.

Глава 5. Определение ЭМО на объектах электроэнергетики.

Глава 6. ЭМС ТС в узлах нагрузки электрических сетях.

Глава 7. Экологическое и техногенное влияние.

◀ Лекция 1 ▶

Глава I. Общие вопросы электромагнитной совместимости

- 1.1. Электромагнитная совместимость. Электромагнитные влияния.**
- 1.2. Уровень помех. Помехоподавление.**
 - 1.2.1. Логарифмические параметры и характеристики полезных сигналов и помех. Уровень помех.
 - 1.2.2. Степень передачи. Помехоподавление.
 - 1.2.3. Последствия нарушения электромагнитной совместимости.
- 1.3. Основные типы и возможные диапазоны значений электромагнитных помех.**
 - 1.3.1. Узкополосные и широкополосные процессы.
 - 1.3.2. Противофазные и синфазные помехи.
- 1.4. Земля и масса.**
- 1.5. Способы описания и основные параметры помех.**
 - 1.5.1. Описание электромагнитных влияний в частотной и временной областях.
 - 1.5.2. Представление периодических функций времени в частотной области.
Ряд Фурье.
 - 1.5.3. Представление непериодических функций времени в частотной области.
Интеграл Фурье.
 - 1.5.4. Возможные диапазоны значений электромагнитных помех.
 - 1.5.5. Спектры некоторых периодических и импульсных процессов.
 - 1.5.6. Учет путей передачи и приемников электромагнитных помех.

Основной целью изучения дисциплины «ЭМС в системах электроснабжения» - получение будущими инженерами-электриками знаний в области влияния **индустриальных и природных помех на надежную, безопасную и экономическую работу системы электроснабжения.**

Поэтому в «ЭМС»:

- осваиваем физических основ происхождения ЭМП и их характеристик,
- рассмотрим механизмов передачи помех,
- измеряем интенсивности помех и
- анализируем способов защиты оборудования от влияния помех.

1.1. Электромагнитная совместимость. Электромагнитные влияния

ЭМС объединяют следующие известные
электромагнитные явления:

- радиопомехи,
- влияние на сеть,
- перенапряжения,
- колебания напряжения сети,
- электромагнитные влияния,
- паразитные связи,
- фон промышленной частоты 50 Гц,
- воздействия заземления и т.д.

Впервые **термин ЭМС** был введен в **1964** году, когда группа американского **комитета электрической и электронной промышленности (IEEE)** по **радиопомехам** изменила свое название на группу IEEE по **ЭМС** и отразила это в названиях своих периодических изданий.

Актуальность проблемы

Проблема ЭМС является одной из трудноразрешимых задач.

Статистика по различным отраслям (собранные страховыми компаниями), подтверждает **актуальность проблем ЭМС и защиты от перенапряжений**.

Особую **актуальность проблема ЭМС** приобретает для **систем управления ответственными технологическими процессами (ОТП)**, связанными с жизнью людей, сохранностью материальных ценностей и окружающей среды.

США:

- За период с 1990 по 2019 года было зафиксировано 346 инцидентов на атомных объектах, вызванных **молнией** – DOE Occurrence Reporting and Processing System Database
 - Ежегодный **прямой ущерб** вследствие повреждения аппаратуры **импульсными перенапряжениями** составляет \$1,8 млрд. (ERICO corp.)

Россия и СНГ:

- Подстанция 500 кВ в центре России – повреждение аппаратуры связи при **молниевом разряде**.
- Одна из АЭС – сбои в работе системы регулирования **выходной мощности генератора** под действием **коммутационных помех**, повреждение вторичных цепей перенапряжениями.
- Крупная ГРЭС в центре России – **повреждение воздушных линий электропередачи и оболочек кабелей** при протекании **токов однофазных КЗ**.
- ГЭС (Казахстан) – нарушение работы **электронного оборудования в помещениях ГЭС** под действием **магнитного поля** от силовых цепей и цепей возбуждения.

◀ Лекция 1(продолжение – 1.4) ▶

- Диспетчерских пункт ряда энергосистем – **повреждение электронной аппаратуры** при **молниевом разряде**.
- Комплектные трансформаторные подстанции (КТП), крупного металлургического комбината – **ложная работа микропроцессорной (МП) защиты** под действием **помех при коммутациях элегазового оборудования**.
- Крупная ТЭЦ в Европейской части России – нарушение нормальной работы аппаратуры автоматизированная система коммерческого учёта электроэнергии (АСКУЭ) при **переключениях в сети** собственникам недвижимости.
- Современная ТЭЦ с новыми агрегатами – **ложная работа защиты** при **коммутации разъединителя 330 кВ**.

Реликтовое излучение (остаточное излучение **Большого Взрыва**) – это **фотоны**, которые были излучены первичной плазмой ранней Вселенной в сторону будущего расположения Земли.

Вы сами можете «увидеть» это излучение (**помехи**, которые возникают на пустом канале телевизора, если вы используете простую антенну, на **1% вызваны именно им**).

Новый этап осмысления проблемы **обеспечения безопасности начался после крупных катастроф на химическом комбинате в Бхопале, на АЭС в Три-Майл-Айланде и Чернобыле, на космическом корабле многоразового использования Челленджер, приведших к **человеческим жертвам, потере огромных материальных ценностей и экологическим бедствиям.****

К нарушениям **условий безопасности** могут привести не только отказы **элементов микроэлектронных систем управления** ответственных технологическим процессам, но и **сбои**, вызванные действием **электромагнитных помех (ЭМП).**

Например: гибель английского эсминца «Шеффилд» от управляемой ракеты из-за недостаточной ЭМС радиоэлектронные системы (РЭС) корабля (англо-аргентинский конфликт), гибель 10 человек обслуживающего персонала из-за сбоев в работе роботизированных комплексов в Японии.

Известны также случаи, когда из-за сбоев в работе **компьютеров ракеты с ядерными боеголовками** приведены в состояние 30-ти секундной готовности.

В процессе эксплуатации системы управления и защиты (СУЗ) АЭС с реакторами большой мощности канальный (РБМК) в период с 1988 по 2019 год **41% от общего числа их отказов составили сбои в работе из-за низкой ЭМС.**

С 01.01.96 г. согласно принятых законов, на рынок не допускается ни одно электронное или электрическое изделие не отвечающее требованиям по ЭМС.

Подробные статистические данные по отечественной электроэнергетике, к сожалению, отсутствуют. Однако в процессе выполнения работ по обеспечению ЭМС неоднократно приходилось сталкиваться со случаями сбоев и отказов микропроцессорной (МП) аппаратуры под действием **электромагнитных помех (ЭМП).**

Развитие микроэлектроники и микропроцессорной техники привело к снижению уровней полезных сигналов.

ЭМС технических приборов обязательно изучается в рамках **электротехнического курса** и предполагает исследование вопроса возникновения ЭМП и необходимости автоматизации, исправления отрицательного влияния.

На сегодняшний день **ЭМС** считается **серьезной проблемой**, в пределах которой возникает множество частных проблемных задач.

Устройства релейной защиты и автоматики (УРЗиА) являются основным элементом энергообъекта, обеспечивающим его надёжную работу.

В работе УРЗиА можно выделить следующие причины сбоев:

- **неправильные действия персонала,**
- **неисправность УРЗиА ,**
- **недостаточная ЭМС.**

Согласно статистическим данным неправильная работа УРЗиА по причине **недостаточной ЭМС составляет до 10 % от всех случаев **ложной работы** и касается в основном только **УРЗиА на микроэлектронной (МЭ) и микропроцессорной (МП) элементной базе.****

Причина этого заключается в том, что чувствительность к **электромагнитным помехам УРЗиА** на МЭ и МП элементной базе на несколько порядков выше, чем у их традиционных **электромеханических аналогов**

Для нарушения работы электромеханического реле требуется энергия 10^{-3} Дж (1 мДж), а для нарушения работы интегральных микросхем требуется 10^{-7} Дж (10^{-4} мДж).

Разница составляет 4 порядка или 10 000 раз.

Для разрушения электромеханического реле требуется энергия в 1 Дж, а для разрушения интегральных микросхем требуется энергия в 10^{-2} Дж.

Это свидетельствует о том, что **электронные средства релейной защиты (МП аппаратуры)** могут быть на 4 порядка чувствительнее к помехам, чем **электромеханические**.

Этим обусловлен рост актуальности проблемы ЭМС на объектах электроэнергетики.

Мировая и отечественная практика свидетельствует, что будущее за **УРЗиА на МП элементной базе**.

Процесс замены **электромеханических УРЗиА на МП необратим**, и если не уделять внимание **проблеме ЭМС**, то такая замена со столь высоким процентом неправильной работы грозит **обернуться катастрофой**.

Следует отметить, что **помехоустойчивость УРЗиА на МЭ и МП базе** является *одной из технических характеристик этих устройств, такой же, как и все остальные её характеристики*.

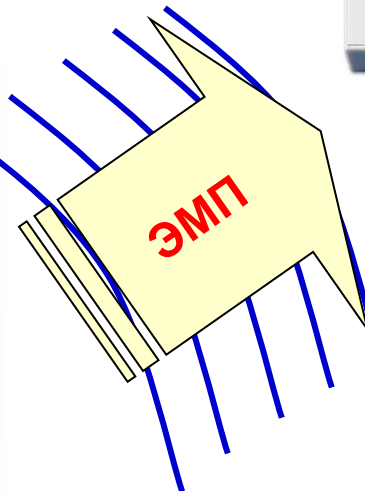
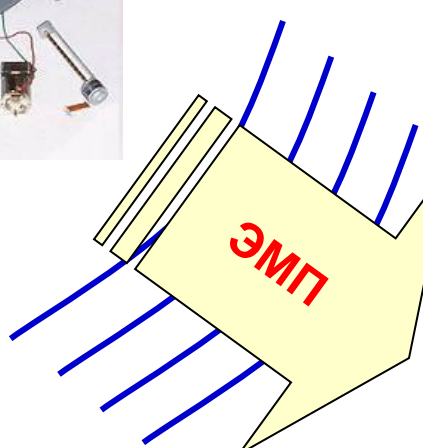
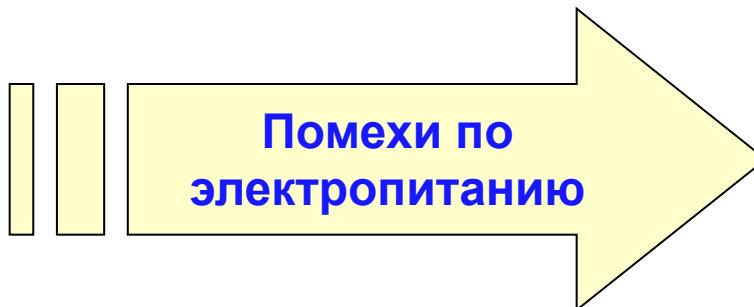
Понятие совместимости предполагает наличие как минимум двух субъектов, один из которых воздействует на другой.

Воздействие характеризуется действующим фактором, для которого должны быть определены:

- значение величины действующего фактора для одного субъекта;
- значение величины, характеризующей устойчивость к действующему фактору другого субъекта.

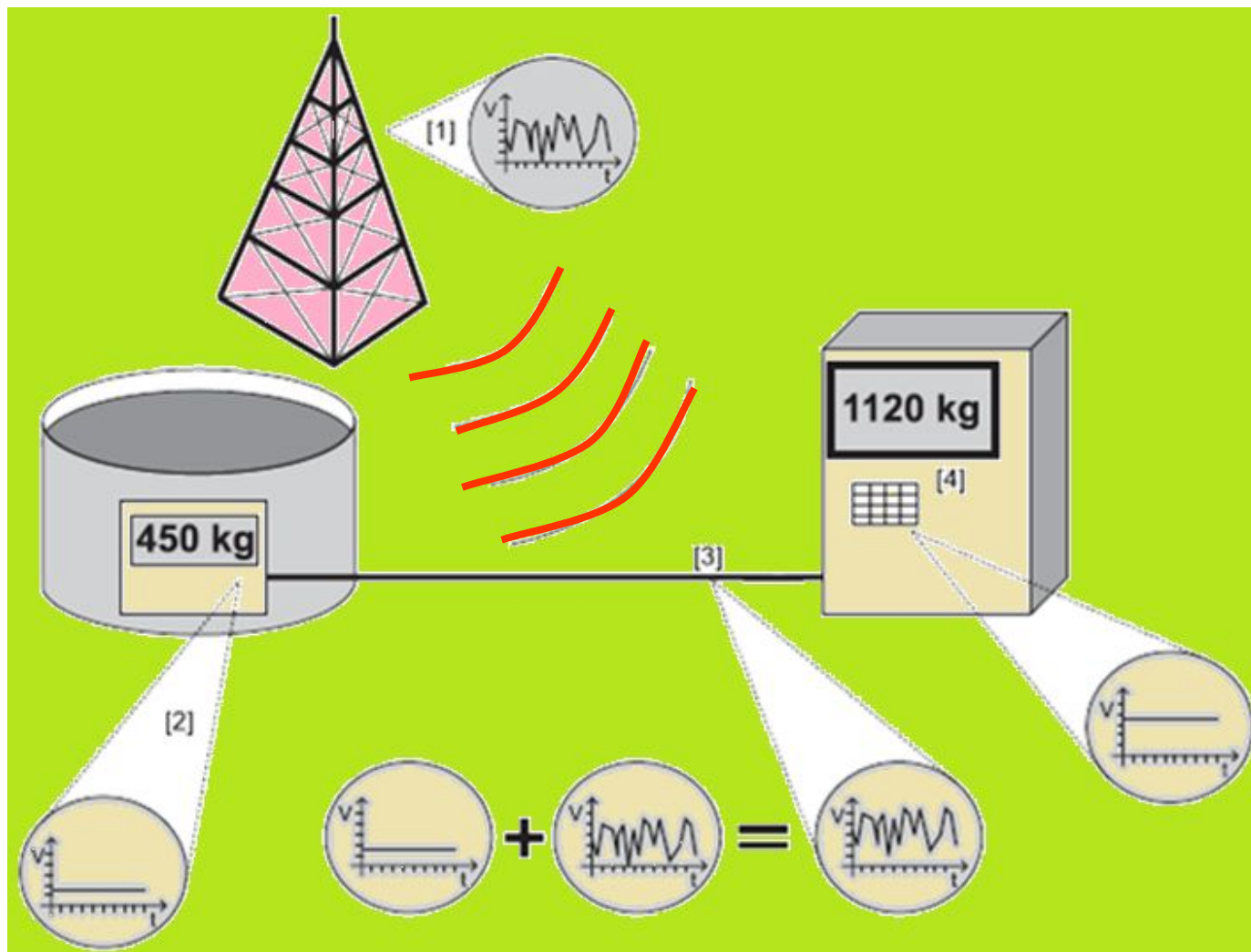
Понятие электромагнитной совместимости появилось из проблемы несовместимости радиотехнических устройств.

Лекция 1 (продолжение – 1.11)



Взаимодействие технических средств

Пример воздействия на измерительную линию



*Помеха из-за излучения [1] на указателе уровня [2],
линии [3], контрольном блоке [4]*

Любые **электрические** и **электронные изделия**, включая **аппараты, системы** и **стационарные** и **подвижные установки**, способные создавать ЭМП и (или) **восприимчивые к их воздействию**, должны быть изготовлены т.о, чтобы:

- **создаваемые** ими **ЭМП** не превышали уровня, обеспечивающего функционирование радио- и телекоммуникационного оборудования и других изделий в соответствии с их назначением;
- **изделия имели** достаточный уровень собственной устойчивости к **электромагнитным помехам**, обеспечивающий их функционирование в соответствии с назначением.

**ГОСТ 30372-95 (ГОСТ Р 50397-92)
Межгосударственный стандарт
«СОВМЕСТИМОСТЬ ТЕХНИЧЕСКИХ СРЕДСТВ
ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ.
ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ»**

**Этот ГОСТ определяет электромагнитную
совместимость (ЭМС) как**
***«способность технического средства
функционировать с заданным качеством в
заданной электромагнитной обстановке (ЭМО) и
не создавать недопустимых электромагнитных
помех (ЭМП) другим техническим средствам в
этой обстановке».***

Уровень совместимости - допустимая вероятность сбоев, при которой обеспечивается заданный уровень надежности и безопасности функционирования системы, устройства.

ЭМС – способность приборов нормально работать в условиях конкретной ЭМО и ЭМП.

ФЕДЕРАЛЬНЫЙ ЗАКОН

О государственном регулировании в области обеспечения электромагнитной совместимости технических средств

Электромагнитная совместимость технических средств (ЭМС ТС) – способность ТС функционировать с заданным качеством в определенной ЭМО, не создавая при этом недопустимых ЭМП другим ТС и недопустимых электромагнитных воздействий на биологические объекты.

1.1. Источники и рецепторы электромагнитных помех

В более **широком смысле** используются понятия **источники помех (ИП)** и **рецепторы помех (РП)**.

Источники ЭМП - *класс любых устройств, которые могут создавать электромагнитное излучение.*

Сюда включают устройства, не предназначенные для **излучения электромагнитных волн** (например, двигатели, системы зажигания и т. д.).

Рецепторы ЭМП - *все устройства, которые изменяют (обратимо или необратимо) значения своих параметров под влиянием ЭМП.*

**Источники электромагнитных
помех** разделяют на две группы:

- 1) **естественные,**
- 2) **искусственные.**


Лекция 2 (продолжение – 3.73)




Рис. 1. Источники помех.

Источники **естественных помех** делятся на:

- 1) **земные;**
- 2) **внеземные.**

1. **Земные источники** - *связаны с атмосферой, как средой распространения электромагнитных радиоволн.*

Это **атмосферные помехи** и **статические разряды**.

Источниками атмосферных помех являются **электрические разряды во время гроз**, которые обладают **широким спектром частот** и распространяются на **большие расстояния**.

В северных широтах **источниками помех** – **полярные сияния**.
Накопление **электрических зарядов в осадках** и последующий их разряд на **элементах антенны, заземления** или **вблизи антенны** также приводят к **электромагнитным помехам**.

К **естественным источникам помех** следует отнести также **искажения сигналов** в среде распространения.

2. К **внеземным источникам помех** относятся помехи, обусловленные **электромагнитными излучениями Солнца, планет, звезд и других небесных тел.**

Эти излучения являются **источниками дополнительных космических помех** и их следует учитывать при определении характеристик приемников, особенно работающих в диапазонах **УВЧ, СВЧ** и на более высоких частотах.

Источниками искусственных ЭМП являются **электротехнические и радиоэлектронные устройств, принцип работы которых связан с излучением электромагнитной энергии.**

Некоторые из них указаны на рис. 1.

ЭМП электротехническим и радиоэлектронным средствам создают также устройства, не предназначенные для излучения электромагнитной энергии:

- ✓ источники электрической энергии,
- ✓ оборудование и машины,
- ✓ системы зажигания двигателей,
- ✓ аппаратура промышленного и широкого потребления.

Помехи, создаваемые этими объектами, образуют широкий класс индустриальных помех (несколько сотен мегагерц).

Интенсивность и ширина спектра индустриальных помех различны для разных источников.

Расстояния от источника, на которых радиоприемники ощущают воздействие ЭМП, могут достигать нескольких километров.

По **спектральным** и **временным** характеристикам выделяют:

- 1)сосредоточенные помехи,
- 2)импульсные помехи,
- 3)флуктуационные помехи.

Сосредоточенная помеха – узкополосное колебание.

Импульсная и **флуктуационная** помехи – широкополосные.

Флуктуационную помеху можно рассматривать как предельный случай импульсной помехи, когда происходит **наложение во времени случайного числа импульсов со случайными амплитудами.**

Следовательно, **флуктуационная помеха** – случайный процесс.

Такой помехой могут быть **космические шумы** и **внутренние шумы радиоаппаратуры.**

На рис. 2 представлены **рецепторы ЭМП** (рецепторы это ТС, которые реагируют на ЭМ сигналов или ЭМП).

Их так же, как и **источники помех**, делят на:

- 1) естественные,
- 2) искусственные.

Учитывать **восприимчивость естественных рецепторов к ЭМП** важно как с точки зрения **сохранения здоровья человека**, так и для **защиты окружающей среды**.

В этих целях **устанавливаются допустимые санитарные нормы для уровней радио- и СВЧ-облучения**.


Лекция 2 (продолжение – 3.73)




Рис. 2. Рецепторы помех

Искусственные рецепторы можно разбить на две группы:

- 1) рецепторы, работающие на принципах извлечения полезной информации из окружающего электромагнитного поля,
- 2) рецепторы, которые по принципу своей работы не должны реагировать на внешние электромагнитные поля.

Первую группу составляют радиоэлектронные приемные устройства и радиовзрыватели. Для них наиболее трудно защитимым от **помех** является **антенный тракт**, поскольку поля всех работающих передатчиков создают в антенне приемника **токи своих сигналов**.

Однако **антенна** и **приемное устройство** обладают избирательными свойствами: реагируют на сигналы, занимающие определенную полосу частот.

Сигналы, лежащие вне полосы пропускания, сильно подавляются.

Уровень помех ЭМВ, воздействующих на рецептор, зависит:

- ✓ от мощности ИП,
- ✓ от расстояния до рецептора,
- ✓ от длины волны помехи λ ,
- ✓ от среды и от ряда других факторов.

ЭМП могут проникать не только через **антенный тракт**, но и вследствие **наводок на элементы устройства**, а также по цепям **питания и управления**.

Снижение уровня таких помех осуществляется **экранированием**, а также **фильтрацией цепей питания**.

ОСНОВНЫЕ ТЕРМИНЫ И ОПРЕДЕЛЕНИЯ (ГОСТ Р 50397-92)

**□ Электромагнитная обстановка (ЭМО) (поле помех) –
совокупность электромагнитных явлений,
процессов в заданной области пространства,
частотном и временном диапазонах;**

ЭМО – должна описываться:

- характеристиками источников помех и параметрами их воздействия;
- особенностями установленного оборудования;
- реализованными и нереализованными мероприятиями по повышению ЭМС;
- неэлектрическими характеристиками окружающей среды, влияющими на ЭМС (влажность и т.д).

□ Электромагнитная помеха (ЭМП) – электромагнитное явление или процесс естественного или искусственного происхождения, которые ухудшают или могут ухудшить качество функционирования ТС. ЭМП может излучаться в пространство или распространяться в проводящей среде;

◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.18) ▶▶

Т.о, **ЭМП** – это любое внешнее электромагнитное явление, способное негативно влиять на работу электронной аппаратуры.

ЭМП способна вызвать в электрическом устройстве **нежелательный эффект** (нарушение функционирования, старение, разрушение и т. д.).

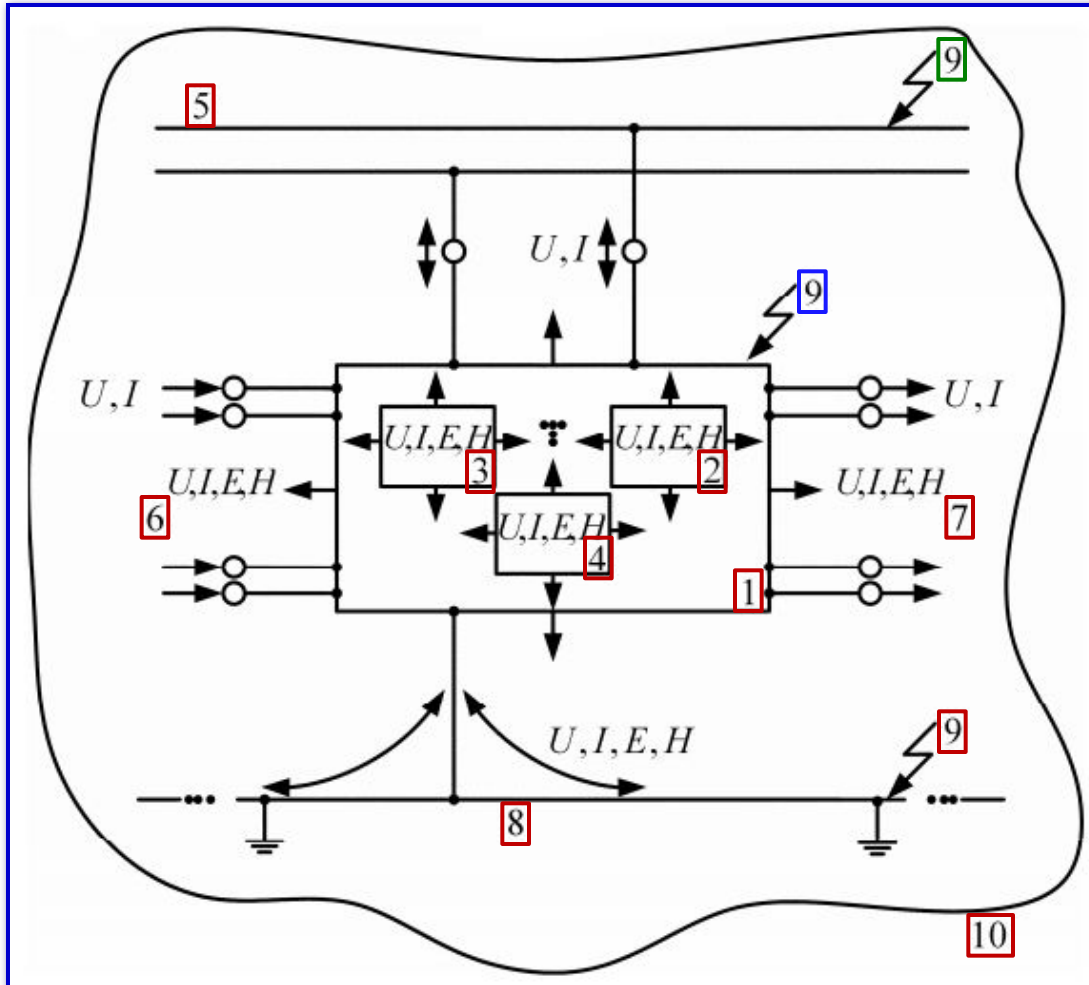
ПОМЕХОЙ может быть – напряжение, ток, напряжённость и частота поля, и др.

В зависимости от **источника**, помехи появляются *периодически* или *нерегулярно* в форме **случайно распределённых импульсов**, поступающих по проводам или **полевым путём**.

При превышении определённого граничного значения **уровень вредного сигнала** может оказаться **опасным** не только для **технических средств** но и для **жизни человека**.

◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.18) ▶▶

Внешние и внутренние источники помех, виды помех, поступающих в устройство и исходящих из него помех:



- 1 – прибор автоматизации;
- 2, 3, 4 – элементы прибора автоматизации, внутренние источники **ЭМП**;
- 5 – сеть электропитания;
- 6 – информационные входы;
- 7 – информационные выходы;
- 8 – заземление;
- 9 – ЭМП, передающиеся по контуру заземления;
- 9 – разряды статического электричества;
- 9 – короткие замыкания в питающей сети;
- 10 – электромагнитная обстановка (**ЭМО**).

- **электромагнитное воздействие (возмущение) (ЭМВ)** – любое электромагнитное явление или процесс, которые может ухудшить работу прибора, оборудования или системы или неблагоприятно влиять на срок службы, а также могут повлиять на биологические объекты. К **ЭМВ** относятся создаваемые ТС в окружающем пространстве электромагнитные, электрические и магнитные поля;
- **биологические объекты** – люди (персонал, обслуживающий технические средства, и население), животные и растения;

- **Класс (степень) жесткости** - соответствующий уровень испытательного электромагнитного воздействия;
- **Излучаемая электромагнитная помеха** - электромагнитная помеха, распространяющаяся в пространстве;
- **Кондуктивная электромагнитная помеха** - электромагнитная помеха, от источника распространяющаяся в проводящей среде;

- **Устойчивость к электромагнитной помехе, помехоустойчивость** - способность ТС **сохранять заданное качество функционирования** при **воздействии на него внешних помех в отсутствии дополнительных средств защиты от помех**, не относящихся к принципу действия или построения ТС;
- **Уровень устойчивости к электромагнитной помехе, уровень помехоустойчивости** - **максимальный уровень электромагнитной помехи конкретного вида, воздействующей на определенное ТС, при котором ТС сохраняет заданное качество функционирования**;

- **Разряд статического электричества - импульсный перенос электрического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами при непосредственном контакте или при сближении их на некоторое, достаточно малое расстояние;**
- **Пульсации напряжения постоянного тока - процесс периодического или случайного изменения постоянного напряжения относительно его среднего уровня в установившемся режиме работы источника, преобразователя электрической энергии или системы электроснабжения;**

- **Показатель качества электрической энергии - величина, характеризующая качество электрической энергии по одному или нескольким ее параметрам;**
- **Влияние помехи - снижение показателей качества функционирования технического средства, вызванного электромагнитной помехой;**
- **Допустимая помеха - помеха, значения параметров которой не выходят за пределы, установленные в нормативно-технической документации (НТД);**

- **Недопустимая помеха** - электромагнитная помеха, воздействие которой снижает качество функционирования технического средства до недопустимого уровня;
- **Приемлемая помеха** - электромагнитная помеха, превышающая допустимую и устанавливаемая путем соглашения;
- **Уровень помехи** - значение величины электромагнитной помехи, измеренное в регламентированных условиях;
- **Норма на помеху** - регламентированный максимальный уровень помехи;

- **Источник помехи** - источник **искусственного** или **естественного происхождения**, которые создают или могут создать электромагнитную помеху;
- **Приемлемая помеха** - ЭМП, превышающая допустимую и устанавливаемая путем соглашения;
- **Рецептор** - ТС, реагирующее на ЭМС и (или) ЭМП. Одно и то же устройство может быть и **рецептором** и **источником помех** одновременно. Устройство **идеально совместимо** с внешней средой, если оно невосприимчиво к помехам и не создает их;

**Основные характеристики рецептора помех -
восприимчивость, помехоустойчивость,
помехозащищенность;**

- **Восприимчивость** - мера реакции рецептора на влияние помехи как при наличии, так и при отсутствии полезного сигнала;
- **Помехоустойчивость** - свойство рецептора **противостоять помехам**, которое реализуется за счет выбранной структуры сигнала и принципа построения рецептора;
- **Помехозащищенность** - свойство рецептора **противостоять помехам**, реализуемое за счет схемно-конструкторских решений, которое не нарушает выбранную структуру сигнала и принципа построения рецептора.

- **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;

- **Уровень излучения** - уровень электрического и (или) магнитного поля и (или) плотности потока мощности, излучаемые техническим средством, измеренные в регламентированных условиях;
- **Норма на уровень излучения** - регламентированный максимальный уровень излучения;
- **Максимальную амплитуду ЭМП**, при которой еще не возникает недопустимого ухудшения функциональных свойств аппаратуры, будем называть **уровнем устойчивости этой аппаратуры к действию данной помехи.**

Федеральный закон, принятый Государственной Думой 01.12 1999 г. направлен на создание условий для обеспечения ЭМС ТС в целях:

- ✓ предотвращения **причинения вреда** личности или имуществу **физических лиц**,
- ✓ предотвращения **причинения вреда** имуществу **юридических лиц**,
- ✓ предотвращения **окружающей природной среде** в результате **нарушения функционирования ТС** при воздействии **ЭМП**,
- ✓ обеспечения **безопасности жизни и здоровья населения** в условиях **ЭМВ**,
- ✓ повышения **конкурентоспособности отечественной продукции**,
- ✓ укрепления **национальной безопасности государства**.

Техническое средство (ТС) - изделие, оборудование, аппаратура или их составные части, функционирование которых основано на законах электротехники, радиотехники и электроники, содержащие электронные компоненты и схемы, которые выполняют одну или несколько следующих функций: **усиление, генерирование, преобразование, переключение и запоминание.**

Примечание. ТС может быть радиоэлектронным средством (РЭС), средством вычислительной техники (СВТ), средством электронной автоматики (СЭА), электротехническим средством (ЭТС), а также изделием промышленного, научного и медицинского назначения (ПНМ-установки).

При испытаниях ТС на **помехоустойчивость**
применяют **критерии качества**
функционирования ТС, указанные в таблице.

Критерии качества функционирования ТС при испытаниях	Качество функционирования ТС при испытаниях
A	<p>воздействие ЭМП никак <u>не отражается</u> на функциональных характеристиках аппаратуры, работа которой <u>до, во время и после воздействия помехи</u> происходит в полном соответствии с техническими условиями или стандартами.</p>
B	<p>допускается <u>временное ухудшение</u> функциональных характеристик аппаратуры в момент воздействия помехи. После прекращения воздействия ЭМП функционирование полностью <u>восстанавливается без вмешательства оператора</u>.</p>
C	<p>аналогичен B, но, в отличие от него, <u>допускает вмешательство оператора для восстановления работоспособности аппаратуры</u>.</p>
D	<p>физическое повреждение аппаратуры под <u>действием помехи</u>. Восстановление работоспособности возможно только <u>путем ремонта</u>.</p>

Основными понятиями в теории ЭМС являются понятия **передатчиков** и **приемников ЭМЭ (ЭМП)** в их **расширенном** понимании.

- **передатчиками ЭМЭ** являются телевизионные и радиовещательные устройства, электрические цепи и системы, непреднамеренно излучающие в окружающую среду ЭМЭ и др.;
- **электроприемники**, являющиеся **источниками ЭМП**, распространяющихся по цепям питания.

На объектах электроэнергетики передатчиками электромагнитных воздействий (ЭМВ), 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 (50 Гц), 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;
- **Переходные процессы** в цепях различных классов напряжения при ударах молнии непосредственно в объект или вблизи него;
- **Разряды статического электричества;**
- **Электромагнитные возмущения** в цепях оперативного тока.

В качестве примеров **передатчиков электромагнитных воздействий (ЭМВ)** можно также перечислить:

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

В **особых ситуациях** рассматриваются такие виды **ЭМВ**, как:

- ✓ Электромагнитные импульсы ядерных взрывов;
- ✓ Магнитное поле Земли при аномальных явлениях на поверхности Солнца.

◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.37) ▶▶

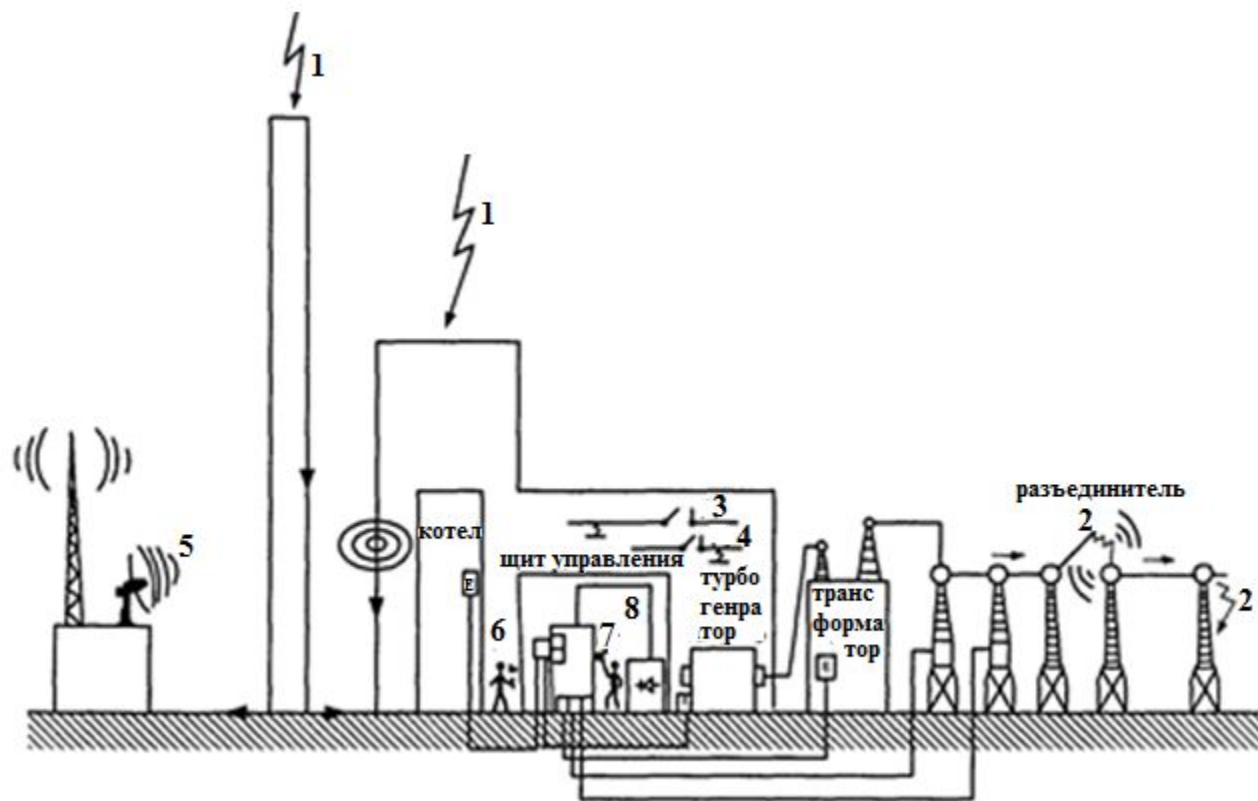


Рис. 1. **Источники электромагнитных воздействий на электрических станциях и подстанциях:**

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 ЭМВ 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 ЭМП **не выше допустимых**, а в качестве **приемника** обладает **допустимой чувствительностью к посторонним влияниям**, т.е. **достаточной помехоустойчивостью**.

Электромагнитные влияния могут проявляться в виде:

- **обратимых** нарушений,
- **необратимых** нарушений.

В качестве **обратимого нарушения** можно назвать **шум при телефонном разговоре**.

К **необратимому нарушению** относится **сбой** в работе системы **релейной защиты**, приведший к отключению нагрузки.

◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.41) ▶▶

Примеры повреждений и неправильной работы устройств РЗА из-за воздействия ЭМП

№ п.п.	Событие	Последствия	Причины
<i>Коммутации в первичных цепях</i>			
1.	Коммутация разъединителем на ПС с элегазовым РУ	Ложная работа РЗА. Отключилась линия 110 кВ	Неисправно ЗУ. Высокий уровень импульсных помех
2.	Коммутация выключателем 10 кВ на ПС с закрытым РУ	Ложная работа РЗА. Отключилась линия 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. Заблокировано управление выключателями 110 кВ	Низкая помехоустойчивость аппаратуры
5.	Коммутация выключателем 110 кВ на ПС с элегазовым РУ	Ложное отключение выключателя 220 кВ	Импульсные помехи в цепях оперативного управления

№ п.п.	Событие	Последствия	Причины
<i>Короткие замыкания на землю в цепях высокого напряжения</i>			
6а	КЗ на землю на шинах 110 кВ ПС с открытым РУ (ОРУ)	Повреждение аппаратуры РЗА, коммутационных аппаратов в сети постоянного тока. Отключились 6 линий 110 кВ	Неисправно ЗУ.
6б	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 500кВ	Неисправно ЗУ.
8.	КЗ на шинах ПС с закрытым РУ (ЗРУ)	Ложная работа РЗА. Отключилась линия 110 кВ	Неисправно ЗУ.
9.	КЗ на шинах ОРУ-110кВ открытой ПС с открытым РУ	Ложно отключается блок генераторов на ТЭЦ	Неисправно ЗУ.

№ п.п.	Событие	Последствия	Причины
<i>Удары молнии в территорию подстанции</i>			
10.	Удар молнии в молниеприемник на ОРУ ПС	Повреждение устройств системы автоматического управления. Загорелось реле на распределительном щите	Неправильно выполнена молниезащита
11.	Удар молнии в молниеприемник ОРУ ПС	Отключение 8 выключателей на РУ 110 кВ, 2 на РУ 220 кВ	Неправильно выполнена молниезащита
<i>Стационарные режимы</i>			
12.	Нормальный режим на ТЭЦ	Ложно работает микропроцессорная защита генератора. Отключился блок генератора	Помехи в цепях дискретных сигналов. Неэкранированный кабель

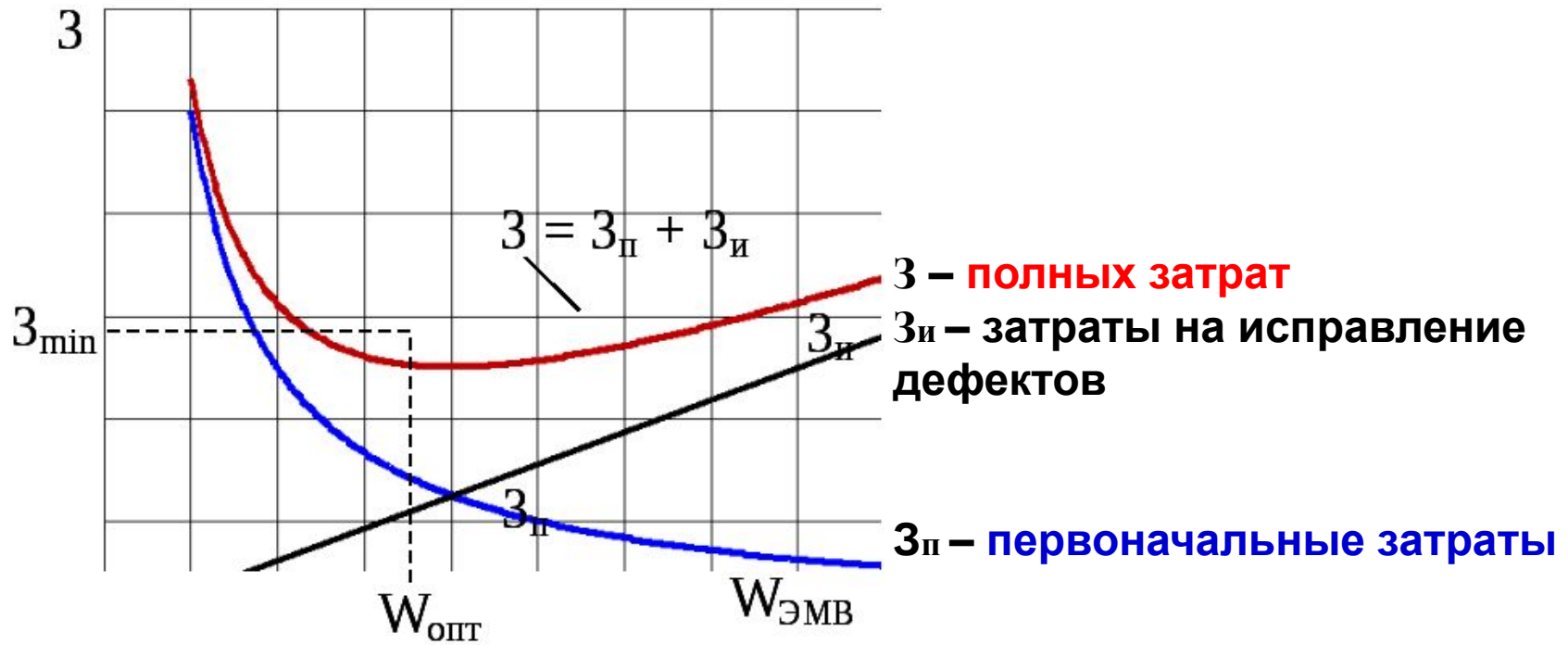
Экономические аспекты ЭМС

Финансовые затраты на техническое обеспечение ЭМС можно разделить на **две составляющие**:

1. **первоначальные затраты** Z_p , (затраты на стадии планирования, проектирования, технологической подготовки производства и изготовления устройства или системы),
2. **расходы на исправление дефектов** $Z_{и}$, вызывающих **несовместимость** на этапе **ввода в эксплуатацию**.

Кривая **полных затрат** на ЭМС в зависимости от **вероятности появления электромагнитных влияний** $W_{ЭМВ}$ имеет **минимум** (Z_{min}).


 Лекция 1 (продолжение – 1.45)



Зависимости **стоимости затрат Z** от **вероятности нарушений $W_{\text{ЭМВ}}$** (от **вероятности появления электромагнитных влияний**) вследствие недостаточной ЭМС

При изготовлении изделия добиваются минимизации **общей стоимости Z** , обусловленной стоимостью потерь Z_i вследствие работы системы (ввода в эксплуатацию) с учетом влияния ЭМС, и стоимостью дополнительных мероприятий (планирования) Z_p по **повышению ЭМС**.

Это означает, что процесс повышения **надежности** в отношении **ЭМС** требует все больших **затрат**.

Практически достаточно трудно определить зависимости Z_i ($W_{ЭМВ}$) и Z_p ($W_{ЭМВ}$) для **каждого конкретного объекта**. Однако известны **затраты на обеспечение ЭМС** при производстве **различных изделий**.

Они составляют от 2 до 10 % **стоимости разработки** и могут быть приняты в качестве первого приближения к оптимальной стоимости Z_{\min} ($W_{\text{опт}}$)

Электрическое устройство считается **совместимым** с **другими устройствами**,

а) если оно в качестве **передатчика** является **источником помех не выше**

допустимых,

б) а в качестве **приемника** обладает **достаточной**

помехоустойчивостью, т.е. **допустимой чувствительностью к** **посторонним влияниям.**

Перечень продукции, связанной с электромагнитной совместимостью

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

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

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

1.2. Уровень помех. Помехоподавление.

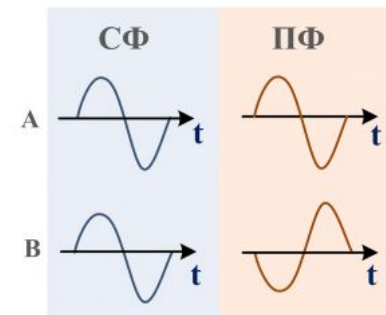
Некоторые **ЭМП** могут изменяться на **несколько порядков**, поэтому для количественной оценки ЭМС широко используется **логарифмические масштабы** (используется десятичный или натуральный логарифм), позволяющие наглядно представлять соотношения двух величин, отличающихся на несколько порядков.

Различают **два вида логарифмических отношений**:

- 1.уровень передачи,**
- 2.степень передачи.**

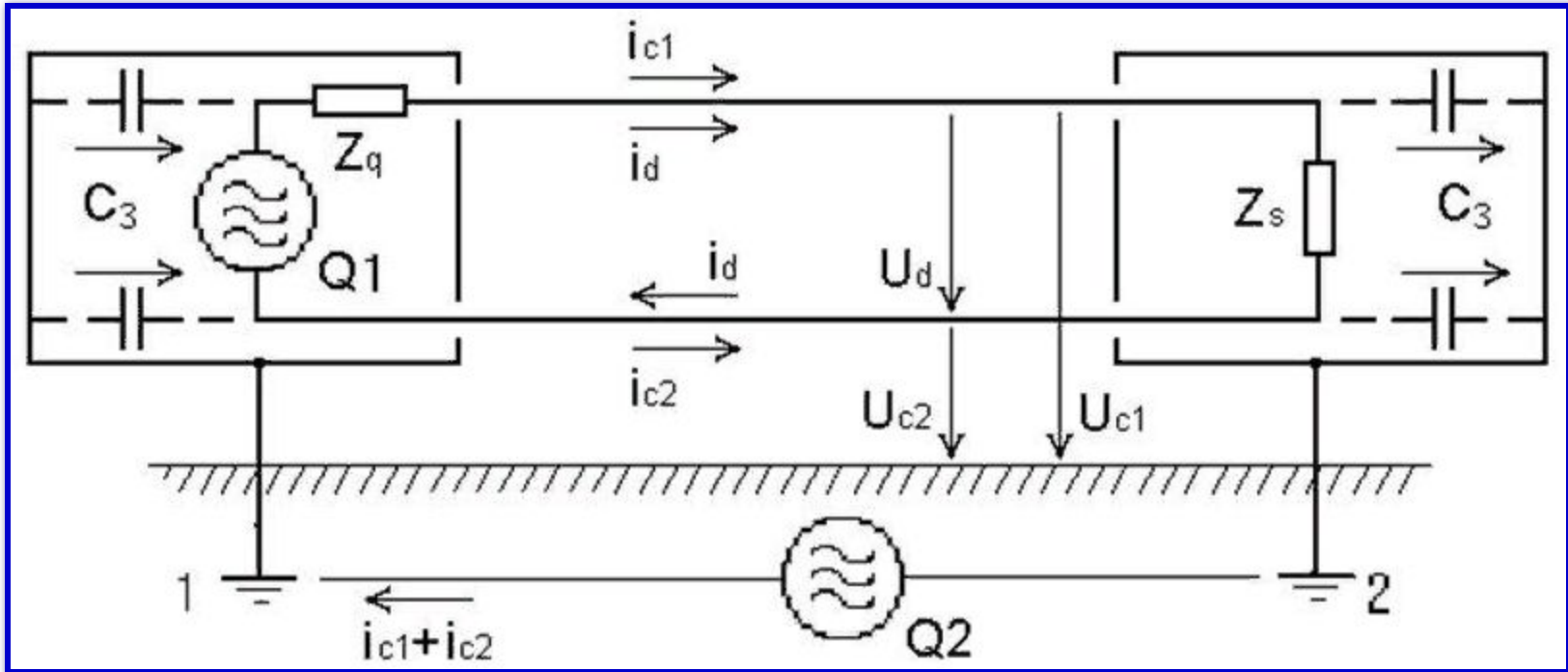
1. Уровень передачи помехи определяет отношение измеряемой величины, например, напряжения u_x к постоянному базовому ее значению (часто базового значения принимают $u_0 = 1\text{мкВ}$)

2. Степень передачи помехи определяется отношением входных и выходных величин системы и служит характеристикой коэффициентом затухания мощности помех, например, ослабления помех за счет экранирования и фильтров, снижения противофазной помехи по отношению к синфазной.



◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.47) ▶▶

В цепях различают синфазные и противофазные помехи



C_3 - паразитные емкости относительно заземленного корпуса;

Q_1 - источник противофазных помех;

Q_2 - источник синфазных помех;

Z_q, Z_s - полные сопротивления источника и приемника помех;

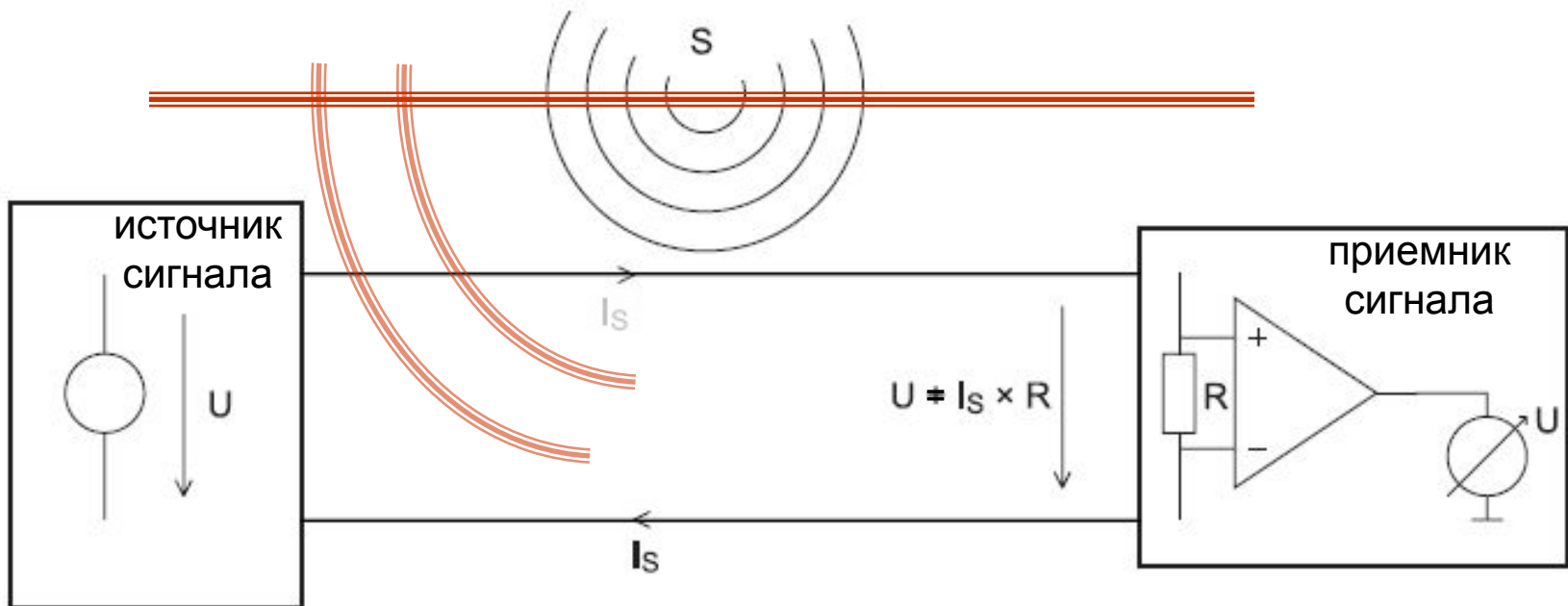
i_{c1}, i_{c2} - синфазные токи; i_d - противофазный ток;

U_{c1}, U_{c2} - синфазные напряжения помех;

U_d - противофазное напряжение помех.

◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.47) ▶▶

$$U = I_s \cdot R$$

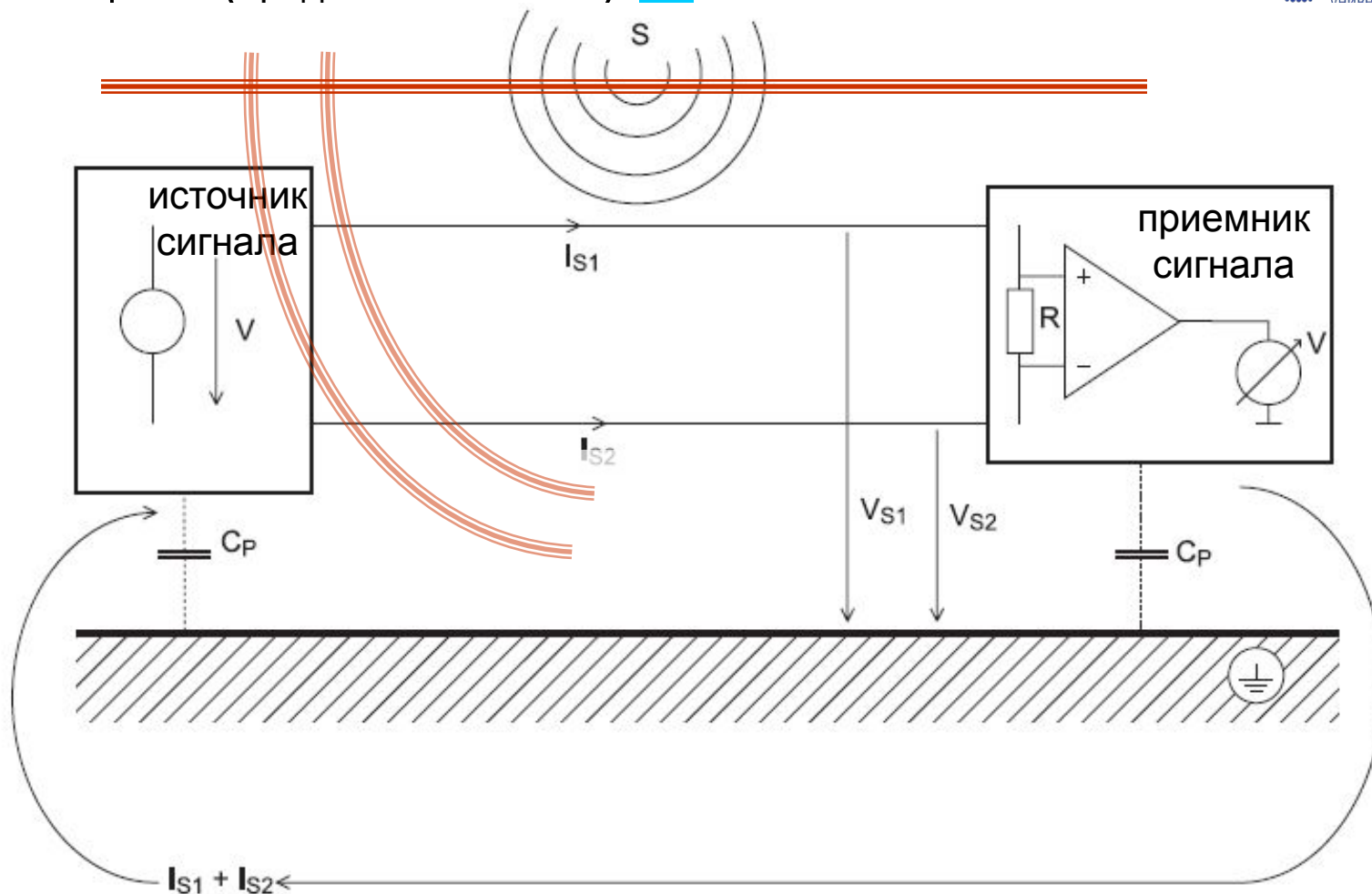


Противофазная помеха

S = помеха
I_S = ток помехи

**Пример образования
противофазной помехи**


 Лекция 1 (продолжение – 1.47)



Синфазная помеха

- S = помеха
- I_{S1} = ток помехи 1
- C_p = паразитная емкость
- I_{S2} = ток помехи 2

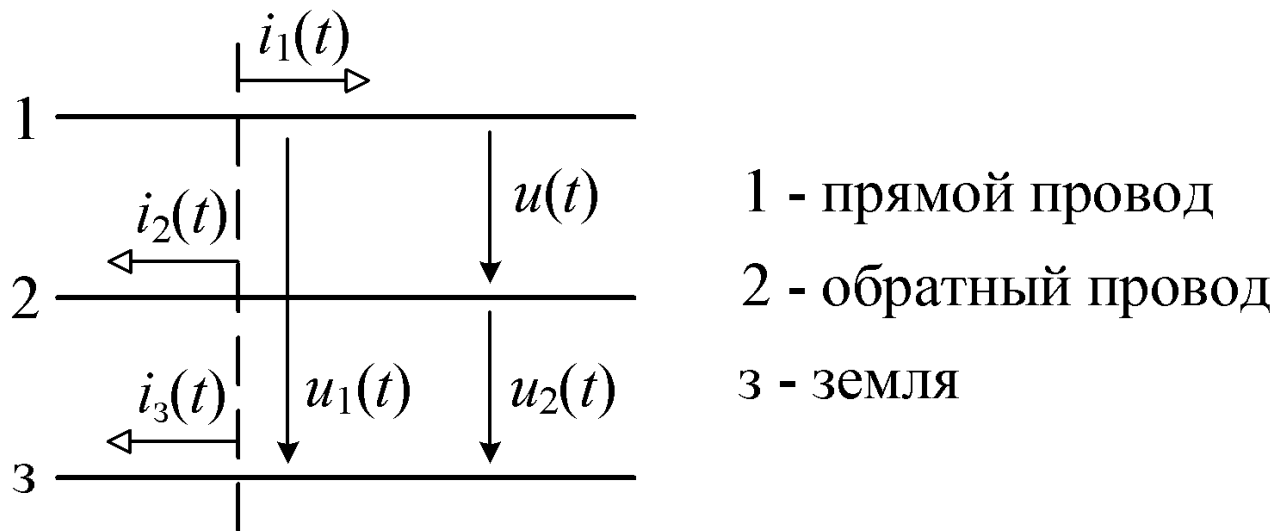
Пример образования синфазной помехи

Существуют следующие системы для **передачи данных**:

Несимметричные двухпроводные системы;

Симметричные двухпроводные системы.

Имеется **двухпроводная система** с учётом влияния **земли**, также предназначенная для **передачи информации**.



Фактически такая система состоит из **трёх проводников**.

Децибелы - универсальная мера

Универсальные логарифмические единицы **децибелы** широко используются при количественных оценках параметров.

Децибел – специфическая единица измерений, не схожая ни с одной из тех, с которыми приходится встречаться в повседневной практике.

«Децибел – не физическая величина, а математическое понятие»

В этом отношении у **децибел** есть некоторое сходство с процентами. Как и проценты, **децибелы безразмерны и служат для сравнения двух одноименных величин.**

«Децибел» всегда связывают только с энергетическими величинами, чаще всего с **мощностью, напряжением и током.**

◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.48) ▶▶

1.2.1. Логарифмические параметры и характеристики полезных сигналов и помех. Уровень помех.

Действующее значение **полезного сигнала** или **помехи** можно выразить в **логарифмическом масштабе**. С применением десятичного логарифма определяются следующие **уровни помех**, измеряемые в **децибелах** ($\log_{10} = \lg$):

Для **напряжения** $U_{\text{дБ}} = 20 \lg(U_x / U_0)$, где $U_{\text{дБ}}$ – уровень напряжения в дБ, U_x – действующее значение напряжения, U_0 – базовое значение напряжения, относительно которого определяются уровни.

В ЭМС базовое значение U_0 принимается равным $U_0 = 1$ мкВ.

Для **тока** $I_{\text{дБ}} = 20 \lg(I_x / I_0)$; $I_0 = 1$ мкА.

Напряженность электрического поля: $E_{\text{дБ}} = 20 \lg(E_x / E_0)$ $E_0 = 1$ мкВ/м.

Мощность: $P_{\text{дБ}} = 10 \lg(P_x / P_0)$; $P_0 = 1$ пкВт.

Напряженность магнитного поля: $H_{\text{дБ}} = 20 \lg(H_x / H_0)$; $H_0 = 1$ мкА/м.

В данных соотношениях введен множитель 20, обеспечивающий простое выражение в относительных логарифмических единицах.

Найдем выражение $P_{\text{дБ}}$ через $U_{\text{дБ}}$ и $I_{\text{дБ}}$:

$$U_{\text{дБ}} = 20 \lg(U_x / U_0) \text{ откуда } U_x = U_0 \times 10^{\frac{U_{\text{дБ}}}{20}}$$

Аналогично $I_x = I_0 \times 10^{\frac{I_{\text{дБ}}}{20}}$

Следовательно $P_x = U_x \times I_x = U_0 I_0 \times 10^{\frac{U_{\text{дБ}} + I_{\text{дБ}}}{20}} = P_0 \times 10^{\frac{U_{\text{дБ}} + I_{\text{дБ}}}{20}}$ откуда

$$P_x / P_0 = 10^{\frac{U_{\text{дБ}} + I_{\text{дБ}}}{20}}$$

Но по определению $P_{\text{дБ}} = 10 \lg(P_x / P_0) = 10 \lg(10^{\frac{U_{\text{дБ}} + I_{\text{дБ}}}{20}}) = (U_{\text{дБ}} + I_{\text{дБ}}) / 2$

В качестве единицы логарифмического отношения двух одноимённых физических величин применяется также

непер (Нп) – 1 Нп $\sim 0,8686 \text{ Б} = 8,686 \text{ дБ}$. В основе лежит не десятичный (\lg), а натуральный (\ln) логарифм отношений.

В настоящее время используется редко.

Напряжение: $U_{Hn} = \ln(U_x / U_0)$ где $U_0 = 1 \text{ мкВ}$;

Ток: $I_{Hn} = \ln(I_x / I_0)$ где $I_0 = 1 \text{ мкА}$;

Напряженность

электрического поля: $E_{Hn} = \ln(E_x / E_0)$ где $E_0 = 1 \text{ мкВ/м}$;

Напряженность

магнитного поля: $H_{Hn} = \ln(H_x / H_0)$ где $H_0 = 1 \text{ мкА/м}$;

Мощность: $P_{Hn} = 0,5 \ln(P_x / P_0)$ где $P_0 = 1 \text{ пкВт}$.

Между **децибелом** и **непером** существуют соотношения:
 $1Hn = 8,686 \text{ дБ}$ или $1дБ = 0,115 Hn$.

Значения **Бел**, **децибел** могут быть со знаком «**плюс**», если $P_x > P_0$ (**усиление сигнала**) и со знаком «**минус**», если $P_x < P_0$ (**ослабление сигнала**).

Например: приведены основные отношения напряжений и соответствующее число дБ.

дБ	U_2/U_1	дБ	U_2/U_1
3	1,41	-3	0,707
6	2	-6	0,5
20	10	-20	0,1
40	100	-40	0,01
60	1000	-60	0,001

Приведем наиболее часто используемые характерные значения **дБ** и соответствующие им отношения стоящие под знаком логарифма:

$$2:1 - 6 \text{ дБ};$$

$$10:1 - 20 \text{ дБ} = 2,3 \text{ Нп};$$

$$100:1 - 40 \text{ дБ} = 4,6 \text{ Нп};$$

$$1000:1 - 60 \text{ дБ} = 6,9 \text{ Нп};$$

$$10\ 000:1 - 80 \text{ дБ} = 9,2 \text{ Нп};$$

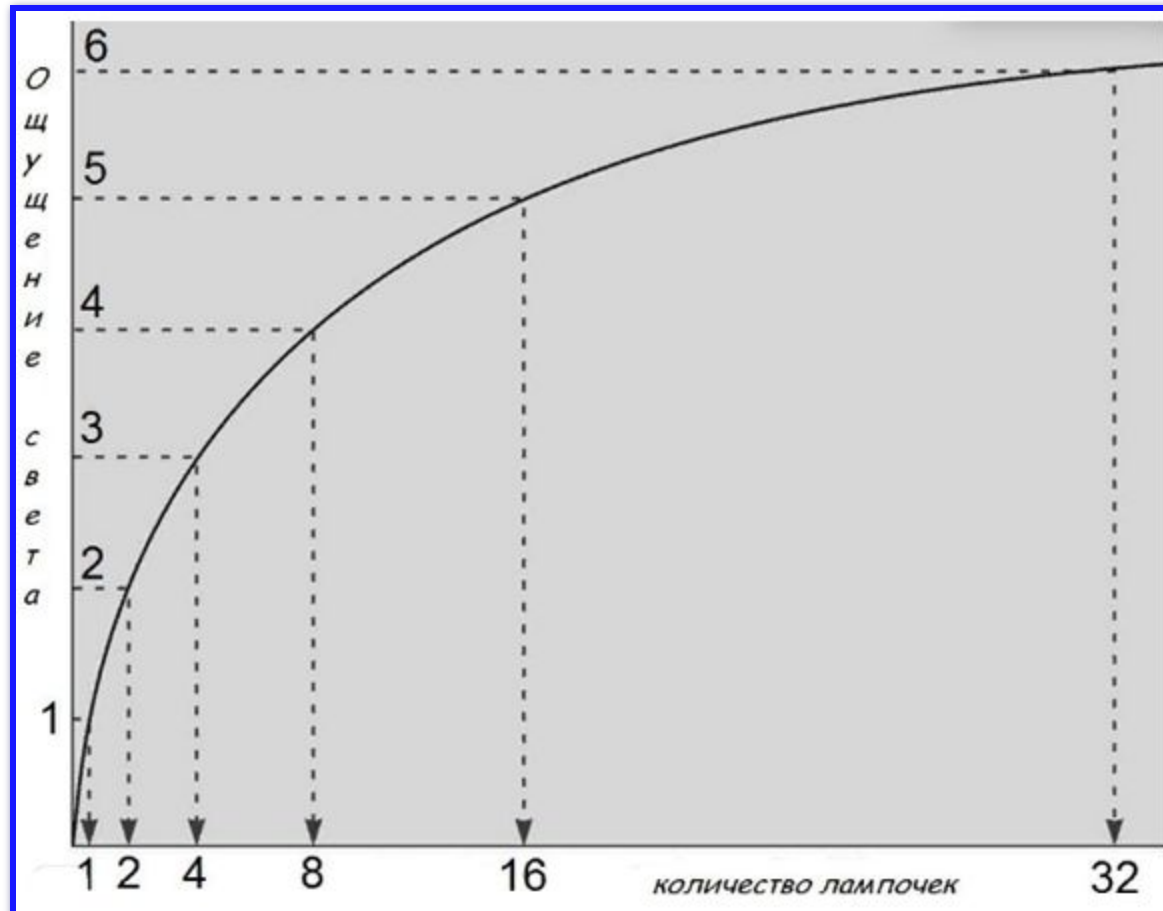
$$100\ 000:1 - 100 \text{ дБ} = 11,5 \text{ Нп};$$

$$1000\ 000:1 - 120 \text{ дБ} = 13,8 \text{ Нп}.$$

Почему именно децибелы?

Закон Вебера-Фехнера

Все исходит от **закона Вебера-Фехнера**, который говорит нам, что **интенсивность ощущения человеческих чувств** прямо пропорциональна **логарифму интенсивности какого-либо раздражителя (помеха)**.



◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.51) ▶▶

**$\lg 1 = 0$; $\lg 10 = 1$; $\lg 100 = 2$; $\lg 1000000 = 6$;
 $\lg 0,1 = -1$; $\lg 0,001 = -3$.**

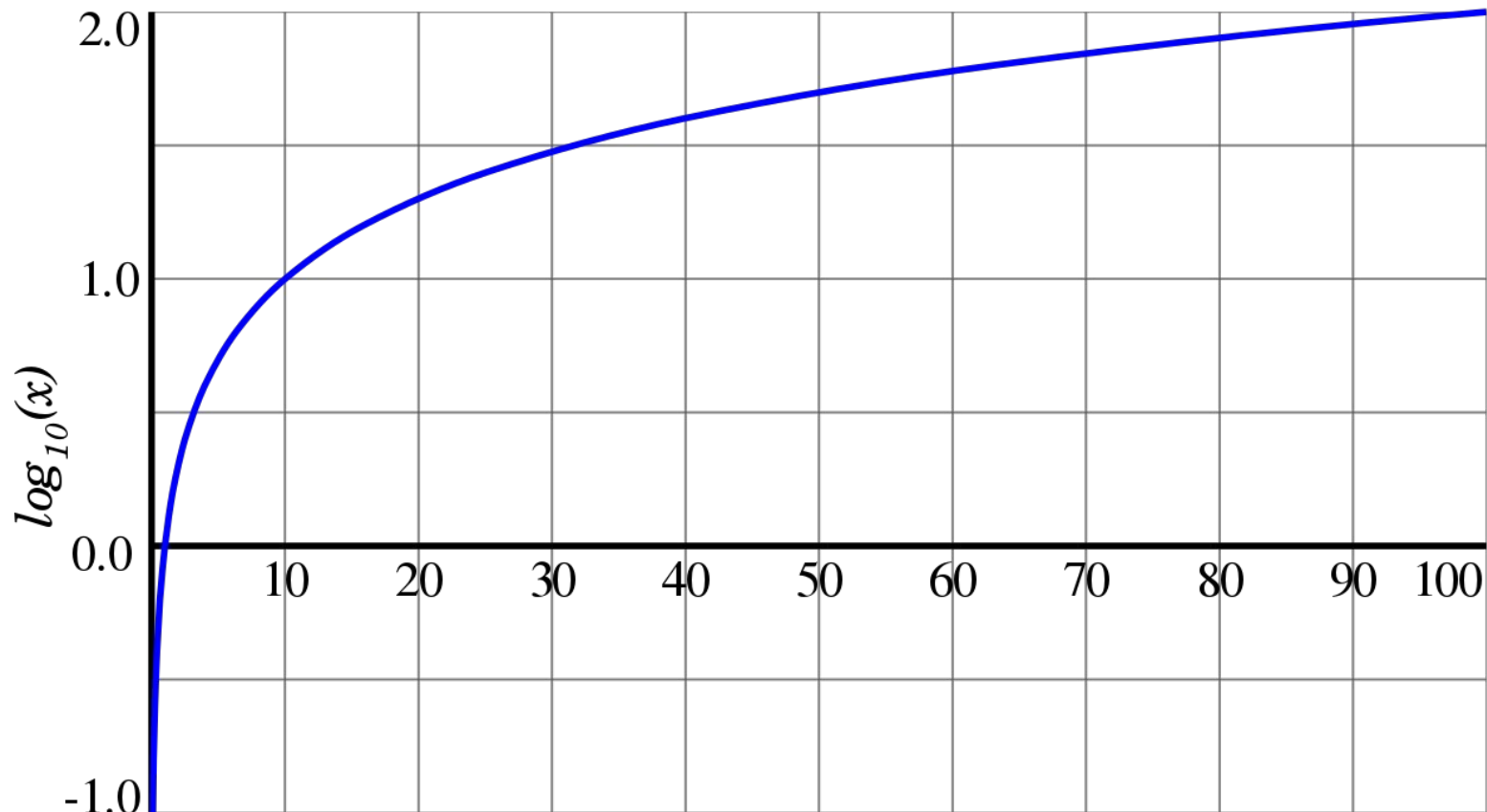


График десятичного логарифма

◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.51) ▶▶

Светильник, в котором **восемь лампочек**, кажется нам настолько же **ярче** светильника из **четырёх лампочек**, насколько светильник из **четырёх лампочек** **ярче** светильника из **двух лампочек**.

Т.о., **количество лампочек** должно **увеличиваться** каждый раз **вдвое**, чтобы нам казалось, что **прирост яркости постоянен**.

То есть если добавить к нашим **32 лампочкам** на графике еще **одну лампочку**, то мы даже и не заметим разницы. Для того, чтобы для нашего глаза была заметна разница, мы должны к **32 лампочкам** добавить еще **32 лампочки**, и т.д.

Иными словами, для того, чтобы нам казалось, что наш **светильник** **плавно набирает яркость**, нам надо **зажигать** **вдвое больше лампочек каждый раз**, чем было предыдущее значение.

Поэтому **децибел** действительно **удобнее** в некоторых случаях, так как **сравнивать** две величины **намного проще** **в маленьких цифрах**, чем в **миллионах** и **миллиардах**.

А так как **электроника** – это чисто **физическое явление**, то и **децибелы** не обошли ее стороной.

1.2.2. Степень передачи. Помехоподавление

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 **степень помехоподавления**:

1) коэффициент затухания фильтра a_{ϕ} ;

2) коэффициент экранирования a_{ε} .

Коэффициент затухания (или ослабления) помеха с помощью фильтра – есть десятичный логарифм отношения **напряжения** на входе фильтра U_1 и выходе U_2 фильтра: $a_{\phi} = 20 \lg(U_1 / U_2)$;

Коэффициент экранирования напряженности электрического (магнитного) поля – определяется отношением **напряженности поля** перед экраном H_0 и за ним H_{ε} : $a_{\varepsilon} = 20 \lg(H_0 / H_{\varepsilon})$.

1.2.3. Последствия нарушения электромагнитной совместимости

Нарушение ЭМС может вызвать следующие последствия:

- функциональной нарушение или нарушение безопасности эксплуатации;
- повреждение или нарушение отдельных элементов и приборов, ухудшение показателей качества электроэнергии;
- обострение электромагнитной обстановки в окружающем пространстве;
- поражение обслуживающего персонала.

Т.о., не обеспечение ЭМС в любом случае приводит к **непосредственным** или **косвенным экономическим потерям**.

Предпосылкой для этого являются **неучтенные помехи** или **помехи, защита от КЗ не предусмотрена**.

Наиболее характерными примерами проявлений **проблемы ЭМС** могут быть такие явления, как:

- отказы систем контроля и управления АЭС;
- отказы систем контроля и управления на производстве, в том числе и химическом;
- отказы бортовых систем самолетов и аэродромных систем наведения;
- сбои медицинской аппаратуры диагностики и жизнеобеспечения;
- непосредственное влияние на здоровье человека электромагнитных излучений от различного рода **радиоэлектронного оборудования**, особенно **высокочастотного** (сотовых телефонов, компьютеров, радиостанций, СВЧ печей, ВЧ установок, линий высоковольтной передачи и т.д.).

Кроме непосредственного влияния на **безопасность человека** существует так же **масса явлений**, причиняющих значительный **материальный ущерб** в результате невыполнения требований ЭМС:

- сбои линий связи;
- потери информации в компьютерах (особенно ощутимы **потери в электронных системах платежей**) и др.

Практически во всех **электрических** и **электронных средствах** протекают **нормальные** и **аварийные ЭМ процессы**, являющиеся **потенциальными источниками помех.**

Все эти **ЭМ процессы** делятся на 2 класса:

- 1) помехи в области **низких, средних** или **высоких частот.** Они создаются **всеми устройствами переменного напряжения, выпрямительными приборами, кабелями и воздушными линиями (ВЛ).**
- 2) охватывает процессы, создающие **апериодические, случайно возникающие во времени помехи**, как правило с **широким частотным спектром.**

Причинами появления таких **помех** являются:

- коммутационные участки сборных шин, разъединителей;
- отключение или сброс большой нагрузки;
- возникающие КЗ;
- повторное включение.

Внутренние источники помех электронной аппаратуры

Внутренние помехи - это помехи, распространяющиеся по проводам или в виде поля внутри системы.

Причинами их появления являются:

- напряжение питания с $f = 50$ Гц, изменение потенциалов в проводах питания электрических устройств,
- изменение сигналов,
- коммутационные процессы в индуктивностях,
- искровые разряды при замыканиях контактов.

1.3. Основные типы и возможные диапазоны значений электромагнитных помех

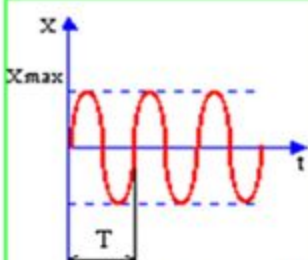
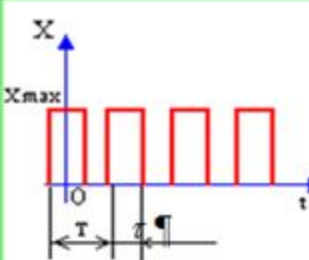
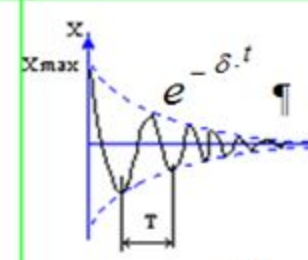
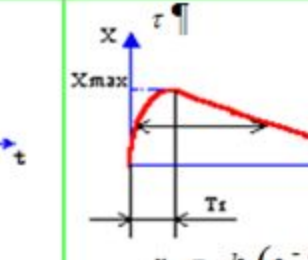

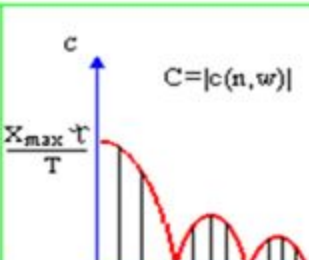
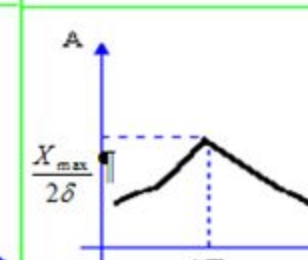
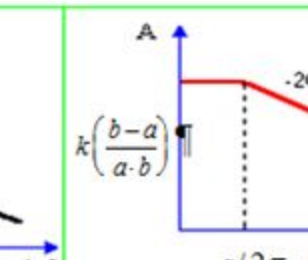
1.3.1. Узкополосные и широкополосные процессы

Помехи, создаваемые источниками (напряжения, токи, электрические и магнитные поля), могут возникать как в виде:

- **периодически повторяющихся,**
- **случайно (не периодически) распределенных во времени величин.**

В обоих случаях речь может идти как об узкополосных, так и о широкополосных процессах.

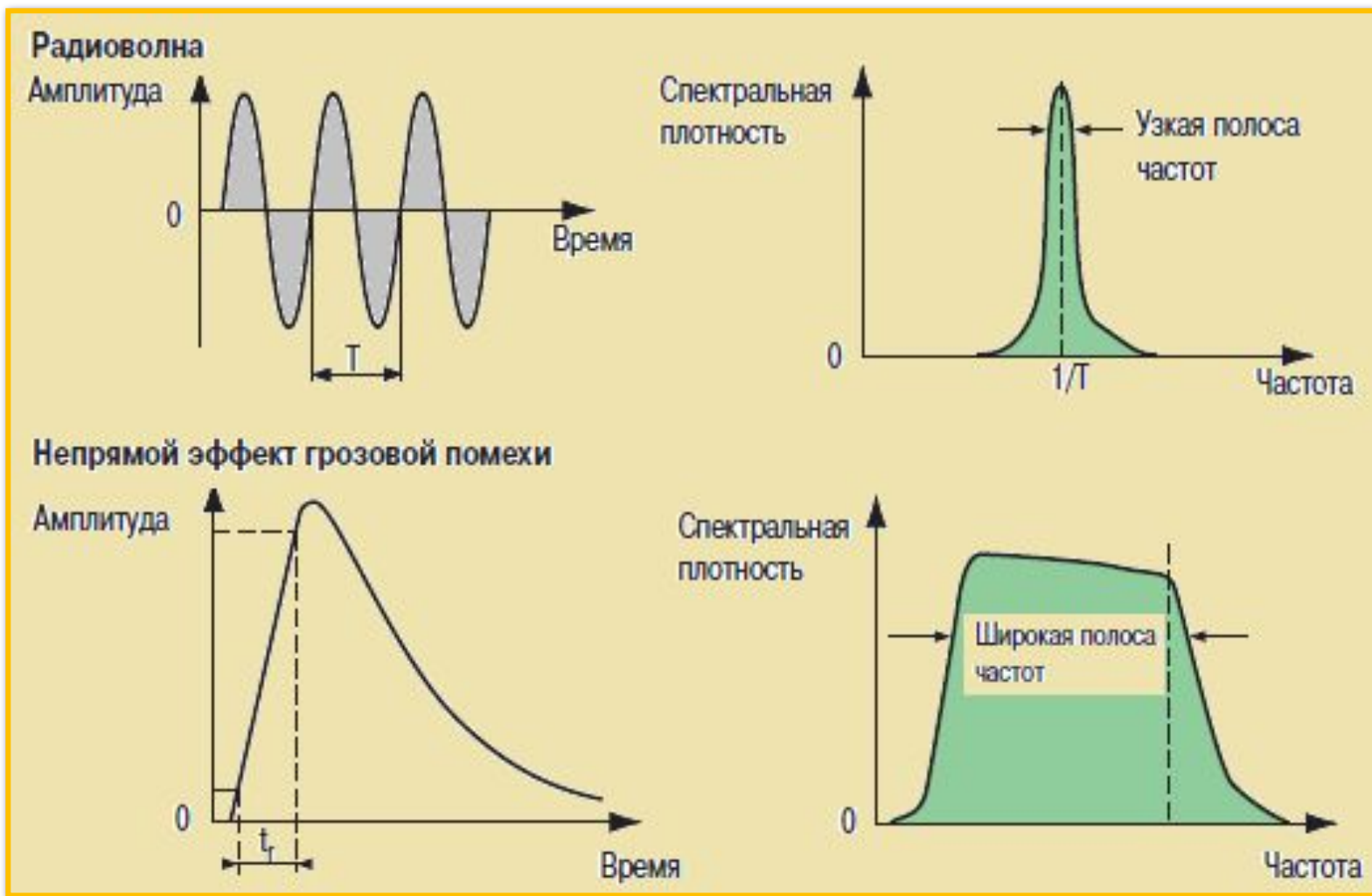
Лекция 2 (продолжение – 2.10)

ПЕРИОДИЧЕСКИЕ		НЕПЕРИОДИЧЕСКИЕ, СЛУЧАЙНЫЕ	
УЗКОПОЛОСНЫЕ	ШИРОКОПОЛОСНЫЕ	УЗКОПОЛОСНЫЕ	ШИРОКОПОЛОСНЫЕ
ВРЕМЕННАЯ ОБЛАСТЬ		ВРЕМЕННАЯ ОБЛАСТЬ	
 <p>$x = X_{\max} \sin$ $\omega_0 = 2\pi/T$</p>	 <p>$x = \frac{X_{\max} \tau}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} c(n, \omega) \cos(n\omega t)$ $\omega_0 = 2\pi/T$</p>	 <p>$x = X_{\max} e^{-\delta \cdot t} \cos \omega_0 t$ $\omega_0 = 2\pi/T$</p>	 <p>$x = k (e^{-a \cdot t} - e^{-b \cdot t})$ $k = f_1(x_{\max}, T_a, T_b)$ $a = f_2(T_a, T_b)$ $b = f_3(T_a, T_b)$</p>
ЧАСТОТНАЯ ОБЛАСТЬ		ЧАСТОТНАЯ ОБЛАСТЬ	
	 <p>$C = c(n, \omega)$</p>	 <p>$\frac{X_{\max}}{2\delta}$</p>	 <p>$k \left(\frac{b-a}{a-b} \right)$ -20 дБ -40 дБ $a/2\pi$ $b/2\pi$</p>
АМПЛИТУДНЫЕ СПЕКТРЫ		АМПЛИТУДНЫЕ СПЕКТРЫ $A = A_{sp} $	

Процесс называется **узкополосным**, когда энергия спектра сосредоточена в основном в относительно узкой полосе частот около некоторой фиксированной частоты ω_0 или **широкополосным**, если указанное условие не выполняется

ИЛИ

Широкополосные – это помехи, обладающие широким частотным спектром, а **узкополосные – узким.**



Примеры спектральных характеристик волн

Источники **узкополосных помех**

К ним относятся передатчики связи:

- ✓ **коммерческие (радио с АМ и ЧМ (FM), телевидение);**
- ✓ **радиотелефоны;**
- ✓ **спутник радиосвязи и наземная релейная радиостанция;**
- ✓ **средства связи для навигации, локаторы;**
- ✓ **генераторы высокой частоты для технологических и медицинских нужд;**
- ✓ **сети электроснабжения.**

Источники широкополосных помех

К ним относятся:

✓ **автомобильные устройства зажигания.**

Эти устройства предназначены для **формирования импульсов высокого напряжения**, чтобы вызывать пробой воздуха и тем самым поджигать горючую смесь в двигателе внутреннего сгорания. Эти **импульсы высокого напряжения** формируются за счет коммутационных процессов в **индуктивной катушке**.

Частота помехи достигает гигагерцового диапазона.

✓ газоразрядные лампы.

При включении в стартере в лампе возникает тлеющий разряд, за счет чего выделяется тепло, деформируется биметаллический электрод, который замыкает цепь тока спирали накала обоих главных электродов люминесцентной лампы. Одновременно замкнутый контакт гасит тлеющий разряд в стартере. После охлаждения биметаллического электрода ключ стартера вновь размыкается. Разрыв приводит к возникновению на катушке индуктивности напряжения самоиндукции. Оно составляет несколько киловольт. Это напряжение зажигает между предварительно нагретыми главными электродами лампы газовый разряд.

Люминесцентные лампы низкого напряжения создают помехи не только при включении вследствие появления импульсов напряжения сравнительно большой амплитуды, но также при работе в результате периодических затуханий и новых зажиганияй разряда, или после каждого прохождения тока через ноль при амплитуде напряжения в несколько сотен вольт. Помехи появляются вдоль проводов питания ламп.

✓ **воздействие линий высокого напряжения.**

На поверхности проводов фаз **ВЛ высоких** и **сверхвысоких напряжений напряженность электрического поля** в отдельных местах превышает значение **электрической прочности воздуха.**

В результате этого происходят **частичные разряды** (импульсный ток). Следовательно, возникает импульсное поле.

✓ искровые разряды.

Еще одним **источником помех** являются **искровые разряды** между неплотно соединенными металлическими частями или между **металлическими частями и поверхностями изоляторов**. **Спектры таких помех** простираются до очень больших частот (ОВЧ → УВЧ) и вызывают **помехи телевизионному вещанию**. **Помехи от ВЛ** сильно зависят от **погоды** и **формы верхней части опор**.

К источникам **широкополосных переходных помех** также относятся:

- ✓ разряды статического электричества,
- ✓ коммутационные процессы в индуктивных цепях,
- ✓ переходные процессы в сетях низкого и высокого напряжения.

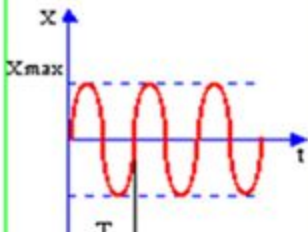
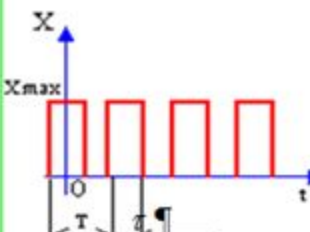
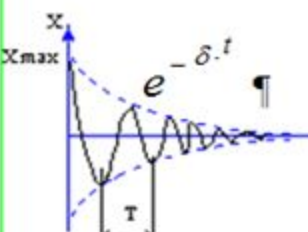
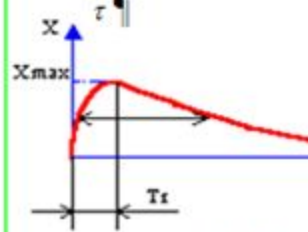

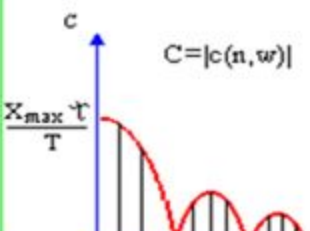
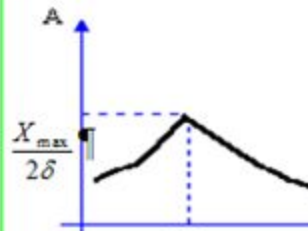
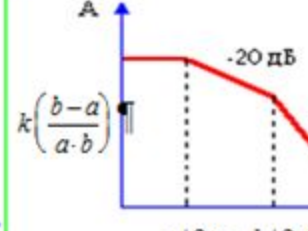
К этому же **классу помех** также относятся:

- ✓ электромагнитный импульс молнии,
- ✓ электромагнитный импульс ядерного взрыва.

При **систематизации** (не смотря на бесконечное разнообразие вариантов) выделяют **четыре типа помех.**

Лекция 2 (продолжение – 2.10)

Систематизация разновидностей **электромагнитных помех**

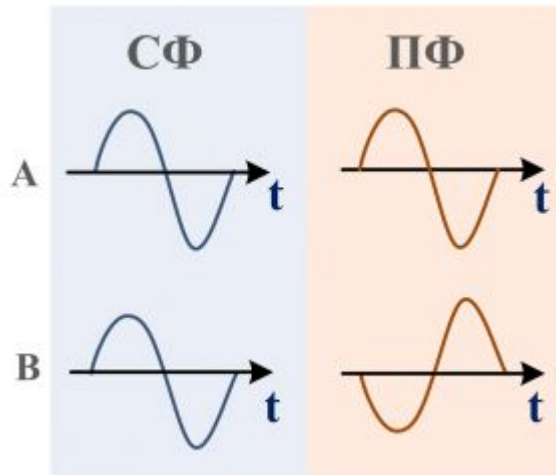
ПЕРИОДИЧЕСКИЕ		НЕПЕРИОДИЧЕСКИЕ, СЛУЧАЙНЫЕ	
УЗКОПОЛОСНЫЕ	ШИРОКОПОЛОСНЫЕ	УЗКОПОЛОСНЫЕ	ШИРОКОПОЛОСНЫЕ
ВРЕМЕННАЯ ОБЛАСТЬ		ВРЕМЕННАЯ ОБЛАСТЬ	
 <p>$x = X_{\max} \sin$ $\omega_0 = 2\pi/T$</p>	 <p>$x = \frac{X_{\max} \tau}{T} + \sum_{n=1}^{\infty} c(n, \omega) \cos(n\omega t)$ $\omega_0 = 2\pi/T$</p>	 <p>$x = X_{\max} e^{-\delta \cdot t} \cos \omega_0 t$ $\omega_0 = 2\pi/T$</p>	 <p>$x = k (e^{-at} - e^{-bt})$ $k = f_1(x_{\max}, T, \tau)$ $a = f_2(T, \tau)$ $b = f_3(T, \tau)$</p>
ЧАСТОТНАЯ ОБЛАСТЬ		ЧАСТОТНАЯ ОБЛАСТЬ	
	 <p>$C = c(n, \omega)$</p>		 <p>$k \left(\frac{b-a}{a-b} \right)$</p>
АМПЛИТУДНЫЕ СПЕКТРЫ		АМПЛИТУДНЫЕ СПЕКТРЫ $A = A_{sp} $	

C – амплитудный спектр, A – спектр амплитудный плотности.

**На данном рисунке
приведены следующие
ТИПЫ **ПОМЕХ:****

- **синусоидальная**, постоянно действующая **периодическая помеха** частотой 50 Гц, проникающая из **системы питания** или **высокочастотная несущая волна**. Данная помеха имеет **спектральную плотность**, представляемую двумя линиями вида $X(\omega) = X_{\max} (\delta(\omega - \omega_0) + \delta(\omega + \omega_0))$ и является **узкополосный процесс**;
- последовательность **прямоугольных импульсов**. Данная бесконечная последовательность может быть представлена в форме ряда Фурье и является примером **широкополосного процесса с дискретным спектром**.
- **периодические затухающие однократные импульсы**, случайно возникающие, напр., в системе электроснабжения и является **узкополосный процесс**;
- **одиночные импульсы**, образованные двумя экспонентами (напр., разряды **атмосферного** и **статического** электричества) и является **широкополосный процесс**.

ТЕРМИНОЛОГИЯ: СИГНАЛЫ **СИНФАЗНЫЕ** И **ПРОТИВОФАЗНЫЕ**



При описании **распространения сигнала** или **помехи** в электропроводной среде часто употребляются термины **синфазный** (СФ) и **противофазный** (ПФ). Эти термины употребляются тогда, когда в рассматриваемой системе есть **две точки** (**два полюса**) приложения **сигнала** (**помехи**): условно А и В, как показано на рисунке.

СФ сигнал действует с **одной и той же фазой** на точки **А** и **В** приложения сигнала относительно условного нуля или некой третьей опорной или общей точки.

ПФ сигнал действует с **противоположной фазой** (**противоположным знаком**) на точки **А** и **В** приложения сигнала относительно внешней среды.

Например, при рассмотрении **напряжений** в рассматриваемых точках электропроводной среды **помеха приложена синфазно**, а **полезный сигнал – противофазно**, как это бывает в случае **дифференциальных** или **симметричных** цепей (**синфазная** – это помеха, **противофазная** – это полезный сигнал).

1.3.2. Противофазные и синфазные помехи

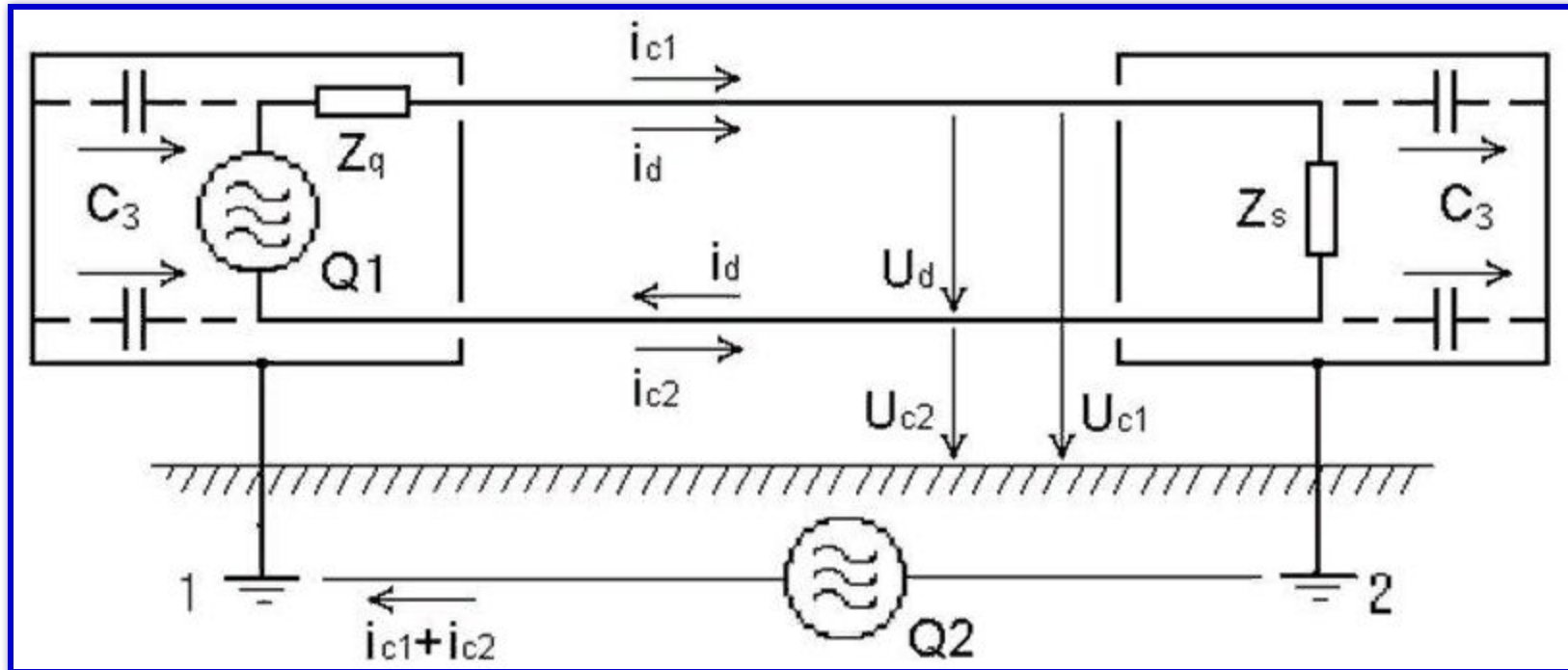
Помехи, возникающие в проводах, бывают как **противофазные** или **синфазные напряжения** и **токи**.

Противофазные напряжения помех (поперечные, симметричные) возникают между **проводами двухпроводной линии** (на рис. u_d).

Противофазные помехи возникают через **гальванические** или **полевые связи** или преобразуются из **синфазных помех в системах, несимметричных относительно земли**.

◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.47) ▶▶

Помехи, связанные с передачей сигналов по линии:



C_3 - паразитные емкости относительно заземленного корпуса;

Q_1 - источник противофазных помех;

Q_2 - источник синфазных помех;

Z_q, Z_s - полные сопротивления источника и приемника помех;

i_{c1}, i_{c2} - синфазные токи; i_d - противофазный ток;

U_{c1}, U_{c2} - синфазные напряжения помех;

U_d - противофазное напряжение помех.

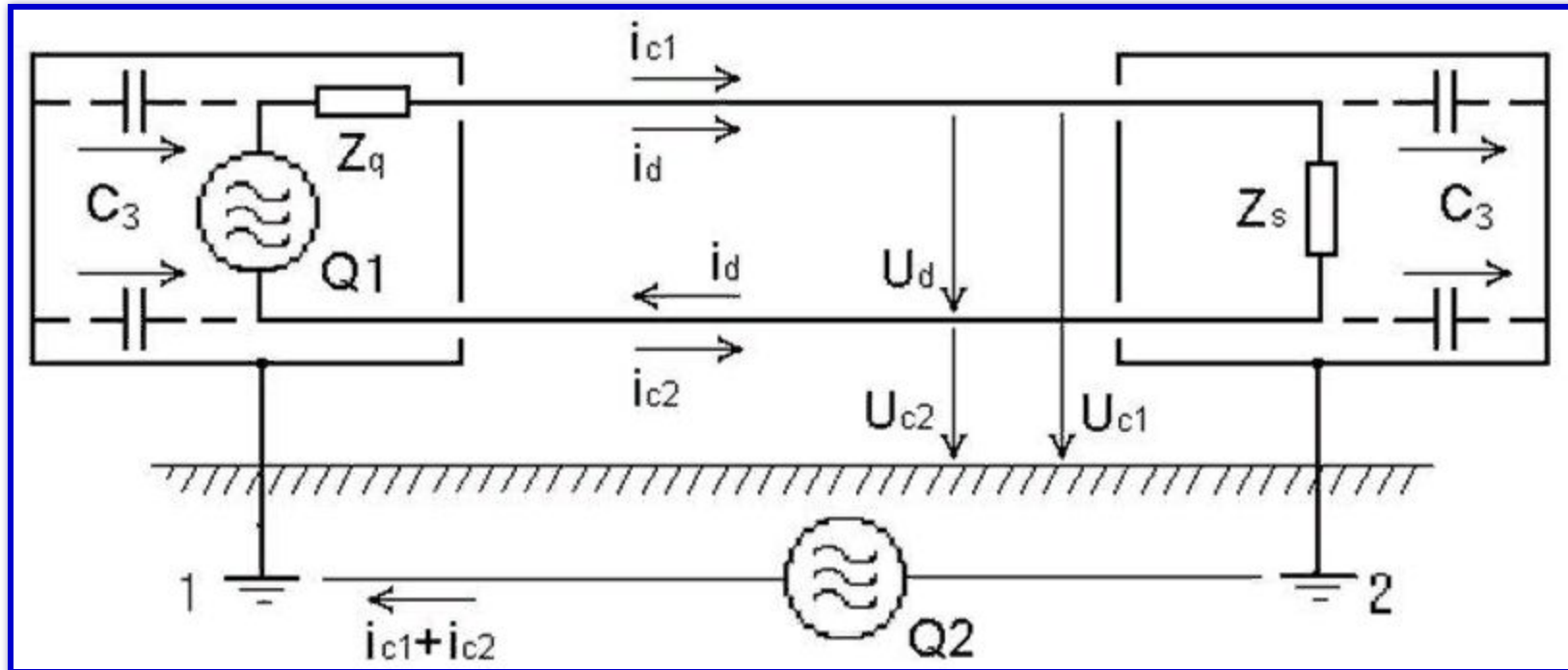
Противофазные напряжения помех непосредственно накладываются на **полезные сигналы** в сигнальных цепях или на **напряжение питания** в цепях электроснабжения, воздействуют на линейную изоляцию между проводами и могут быть восприняты как полезные сигналы в устройствах автоматизации и тем самым вызывать **ошибочное функционирование.**

Синфазные напряжения помех возникают между каждым проводом и землей (см. рис. U_{C1} и U_{C2}) и воздействуют на изоляцию проводов относительно земли.

Синфазные помехи обусловлены главным образом разностью потенциалов в цепях заземления устройства, напр. между точками 1 и 2 (см. рис.), вызванной токами в земле (аварийными, при замыканиях высоковольтных линий на землю, рабочими или токами молнии) или **магнитными полями.**

◀◀ Лекция 1 (продолжение – 1.47) ▶▶

Помехи, связанные с передачей сигналов по линии:



C_3 - паразитные емкости относительно заземленного корпуса;

Q_1 - источник противофазных помех;

Q_2 - источник синфазных помех;

Z_q, Z_s - полные сопротивления источника и приемника помех;

i_{c1}, i_{c2} - синфазные токи; i_d - противофазный ток;

U_{c1}, U_{c2} - синфазные напряжения помех;

U_d - противофазное напряжение помех.

1.4. Земля и масса

Земля и масса тоже являются **важными** **понятиями ЭМС.**

С понятием «**заземление**» связаны вопросы **техники безопасности** и **грозозащиты**, например, **устранение недопустимо высоких напряжений прикосновения.**

В области **электроники** - **ЭМС их схем**, напр. устранение контуров заземления, влияние частоты 50 Гц, обращение с экранами кабелей и т. д.

Термины и определения

- **Внешние устройства молниезащиты** - комплекс, состоящий из **молниеприемников, токоотводов и заземлителей**.
- **Внешний контур заземления (здания)** - **замкнутый горизонтальный заземлитель**, вокруг здания.
- **Внутреннее устройство заземления (здания)** – **совокупность заземляющих проводников**, расположенных **внутри здания**.
- **Выносной заземлитель** - **заземлитель**, выполненный за пределами территории энергообъекта.

- **Заземляющее устройство (ЗУ)** - совокупность заземлителя и заземляющих проводников.
- **Заземлитель** - проводящая часть или совокупность соединенных между собой проводящих частей, находящихся в электрическом контакте с землей непосредственно или через промежуточную проводящую среду.
- **Заземляющий проводник** - проводник, соединяющий заземляемую часть (точку) с заземлителем.
- **Защитный проводник (РЕ-проводник)** - проводник, предназначенный для целей электробезопасности.

- **Зона нулевого потенциала (относительная земля) - часть земли, находящаяся вне зоны влияния какого-либо заземлителя, электрический потенциал которой принимается равным нулю.**
- **Молниеприемник - часть молниеотвода, предназначенная для перехвата молнии.**
- **Магистраль заземления - заземляющий проводник с двумя или более ответвлениями.**
- **Напряжение прикосновения - напряжение между двумя точками цепи тока замыкания на землю (на корпус) при одновременном прикосновении к ним человека.**

- **Разность потенциалов на заземляющем устройстве** - разность потенциалов, возникающая между различными точками заземляющего устройства при коротком замыкании на подстанции, вызванная токами и сопротивлением проводников заземляющей системы.
- **Сопротивление заземляющего устройства** - отношение напряжения на заземляющем устройстве к току, стекающему с заземлителя в землю
- **Ток замыкания на землю** - ток, стекающий в землю в месте замыкания.
- **Токоотвод** - часть молниеотвода, предназначенная для отвода тока молнии от молниеприемника к заземлителю.

◀◀ Лекция 2 (продолжение – 2.23) ▶▶

□ **Вторичное оборудование:**

- ✓ аппаратура релейной защиты и электроавтоматики, противоаварийной автоматики;
- ✓ автоматизированной системы управления технологическим процессом;
- ✓ автоматизированной системы диспетчерского управления;
- ✓ системы сбора и передачи информации;
- ✓ автоматизированной информационно-измерительной системы коммерческого учета электроэнергии;
- ✓ противопожарной системы;
- ✓ охранной сигнализации;
- ✓ видеонаблюдения;
- ✓ система оперативного постоянного тока;
- ✓ система собственных нужд напряжением 0,4кВ переменного тока;
- ✓ системы управления и сигнализации вспомогательного оборудования;
- ✓ система диагностики силового оборудования, контрольные кабели и т.п.

Следует строго различать два понятия - **защитное заземление** (защитный провод) **для защиты людей, животных** и т. д. и **массу, систему опорного потенциала электрических контуров** (это справедливо как для **сильноточных**, так и для **слаботочных** цепей).

Земля и масса, как правило, в одном месте гальванически связаны друг с другом, но между ними существует большое различие:

- **провода заземления** проводят **ток** только в аварийной ситуации (**КЗ**),
- **нулевые провода** проводят **ток** в нормальной рабочей ситуации и часто представляют **общий обратный** провод нескольких **сигнальных контуров**, ведущий к **источнику**.

Слаботочная система (система слабых токов) — техническая система, выполняющая функции сбора, обработки и передачи информации, функционирование элементов которой в ее границах обеспечивается **слабыми электрическими токами**.

Под **проводной системой слабых токов** понимается совокупность каналов, трасс, кабелей, кроссов, элементов коммутации и технических помещений в здании или комплексе зданий на общей территории, предназначенных преимущественно для передачи информации.

Телеграф, телефон, радиосвязь, измерительные приборы часто объединяются общим термином – **слаботочная техника**.

Сильные же токи – генераторы, электродвигатели, лампы, печи.

Различие **сильноточной** и **слаботочной** техники не в силе тока или мощности устройства, а в **целевом назначении**.

Радиовещательный передатчик может быть в тысячи раз мощнее электропривода токарного станка.

Сильный ток работает,
слабый – командует.

Задача слаботочной техники – точнее воспроизвести на приемном конце **форму сигнала**, посланного в начале цепи связи. **Потери энергии** при этом **интересуют во вторую очередь**. Он часто мирится с такими **условиями передачи**, когда на **приемном конце** получается **меньше одной миллионной от посланной вначале энергии**.

Сильноточника же обычно **мало беспокоят** возможные **искажения формы токов и напряжений** в процессе их **передачи**. В **сильноточной технике** в первую очередь ставится **задача** уменьшения потери энергии при передаче. Редко мирится он с КПД передачи, **меньшим 50%**, а во многих **сильноточных** устройствах КПД передачи бывает **выше 99%**.

Особое внимание уделяется вопросу **надёжности слаботочных систем.**

В первую очередь это определяется:

- типом используемых кабелей,
- сечением проводников,
- фактором ЭМС.

Имеется лампочка подключенная к сети напряжения 220в. По определениям **электротехники** в **прямом** и **обратном проводе** токи одинаковы.

Пробую индикаторной отверткой **прямой провод** - **неонка горит** (показывает фазу), а на **обратном проводе неонка уже не горит**, хотя ток по определению должен течь такой же как и в прямом.

Разьясните этот момент пожалуйста!

Действительно, **ток** по обоим проводам **будет одинаков**.

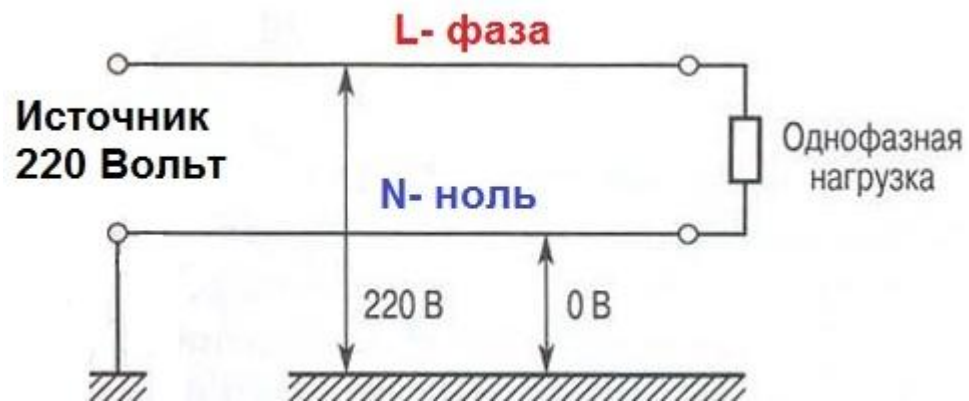
Однако **индикатор** показывает не эту физическую величину, а лишь наличие переменного напряжения относительно какого-либо другого потенциала, в нашем случае «земли».

Т.е. прикасаясь индикатором к фазному проводу, мы создаём цепь «**фаза - индикатор - тело человека – земля**» и видим при этом **свечение самого индикатора**, показывающего **прохождение тока**.

Его величина минимальна - ограничена встроенным в **индикатор высокоомным сопротивлением**, и достаточна лишь для свечения лампочки.

Затем, прикоснувшись к **нулевому проводу**, образуем цепь «**нуль - индикатор - тело человека – земля**». Но т.к. «**нуль**» - это и есть «**земля**», **разности потенциалов не будет => не будет и свечения**.

◀◀ Лекция 2 (продолжение – 2.24) ▶▶



Это различие существенно и характеризуется следующими понятиями:

Земля

Защитный провод

Заземление

Защитное заземление

Нулевой провод заземления

Провод заземленной
системы опорного
потенциала

Заземленный корпус

Масса

Нейтральный провод

Масса схемы

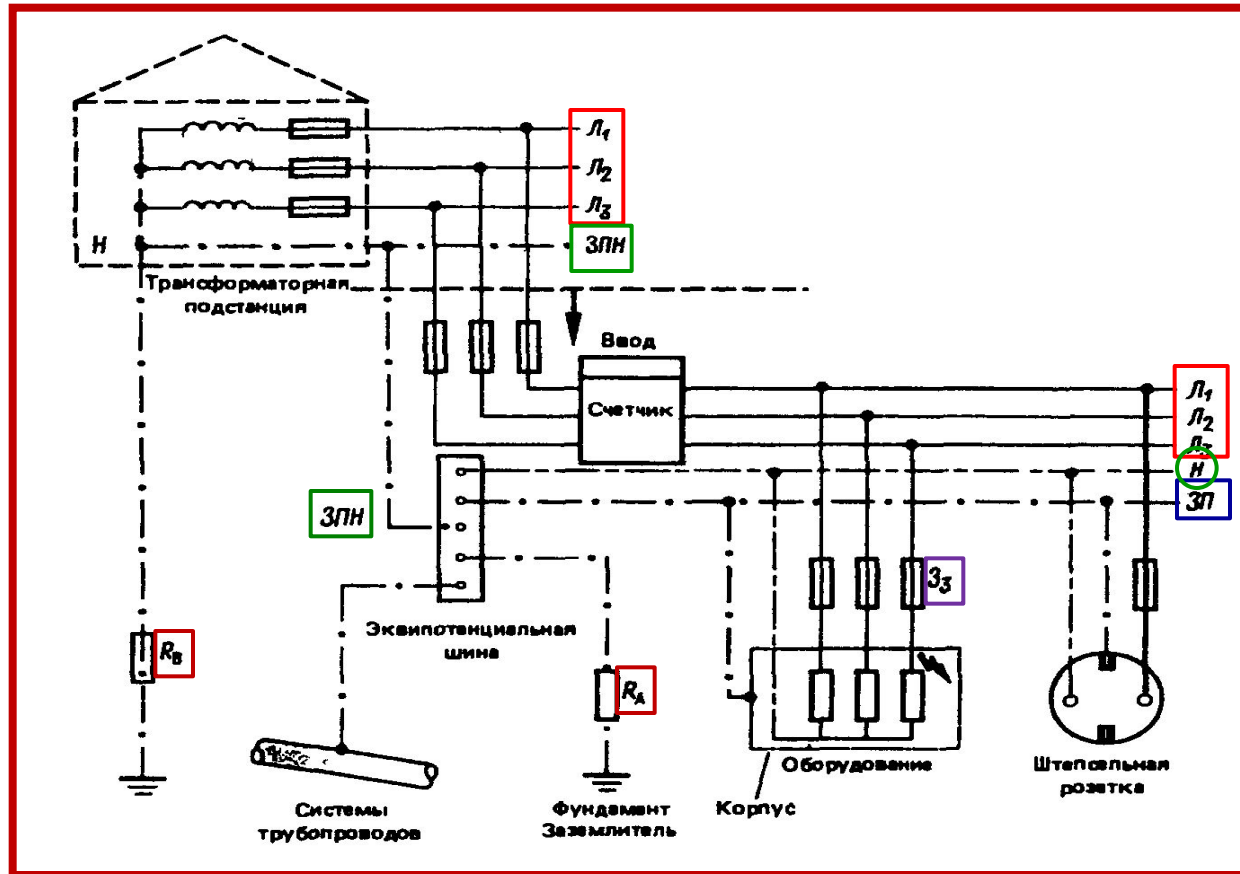
Нулевая точка

Сигнальная масса

Измерительная земля

Нулевое напряжение (0 В)

Понятие «земля» поясняем на схеме.



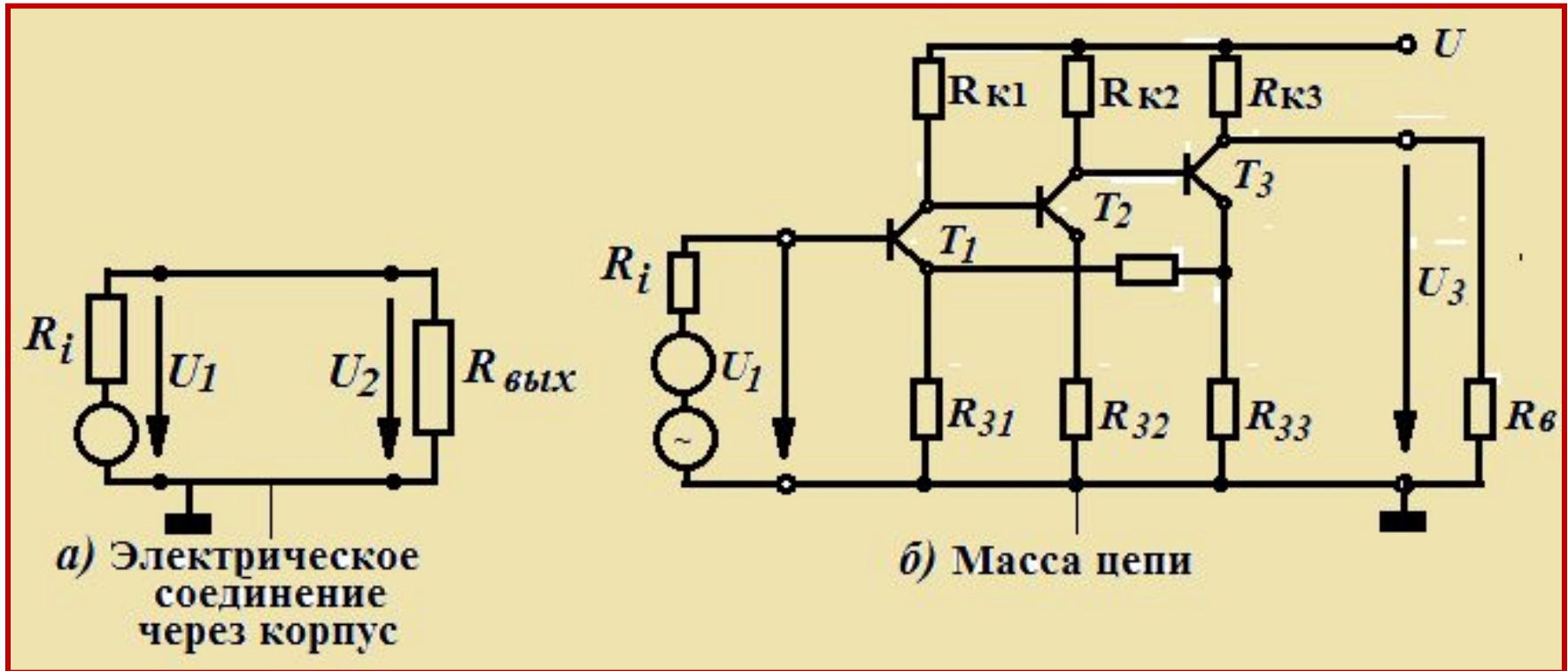
Заземление в низковольтной сети:

L_1, L_2, L_3 – фазные провода сети; ЗПН – защитный провод нейтралы;
ЗП – защитный провод; Н – нейтральный провод; З_з – защитный автомат;
 R_A, R_B – сопротивление заземлителя подстанции и потребителя.

Защитный провод ЗП в нормальном режиме **тока не проводит** и его потенциал равен **потенциалу земли**. Поскольку **корпус оборудования** присоединен к защитному проводу **ЗП**, то и его потенциал также равен потенциалу земли и **не создает угрозы для людей и животных**.

При замыкании одного из **фазных проводов** (на рис. провода L_3) на **корпус оборудования** в **фазном проводе возникает** большой ток КЗ и **оборудование отключается** пред включённым защитным автоматом Z_3 .

К понятию «масса»



Под **массой** в схемотехнике понимают **общую систему опорного потенциала, по отношению к которой измеряются практически все напряжения.**

Это может быть общая шина, специальный провод опорного потенциала, корпус, нулевая точка.

- В **двухпроводной системе** это может быть **обратный провод** (несимметричная система).
- В **трехфазных цепях** это обычно **нейтральный провод**.
- В **электронных схемах** роль **массы** выполняют **общие шины на печатных платах**.

Масса может, но не должна иметь **потенциал земли**. Однако, как правило, **массу** в одной точке соединяют с **землей**, при помощи **защитного провода**.

Масса выполняет те же функции, что и **нейтральный провод**.

Существуют две топологически разные реализации массы:

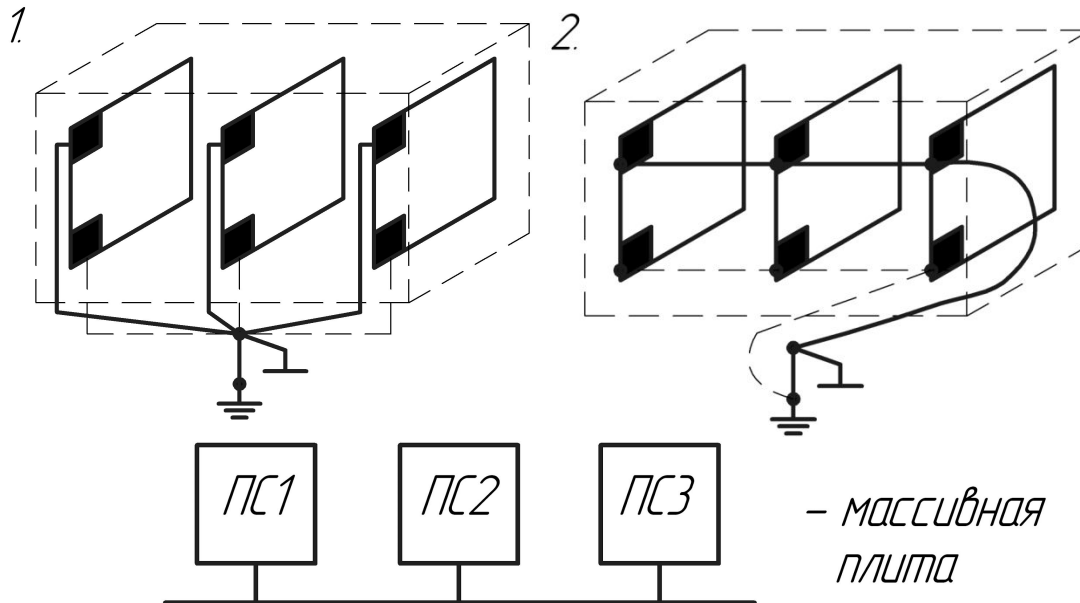
1. Центральная точка массы со звездообразным проводом

или без него.

2. Распределенная или поверхностная масса.
Центральная масса может быть реализована двумя способами:

1. С помощью звездообразного провода.

2. В виде сборной схемы.



Если длина волны ($\lambda = c/f$) сравнима с геометрическими размерами устройства или системы, то применяется **распределённая** или **поверхностная масса**.

1.5. Способы описания и основные параметры помех

Помехи можно представить и описать как **во временной**, так и в **частотной области**.

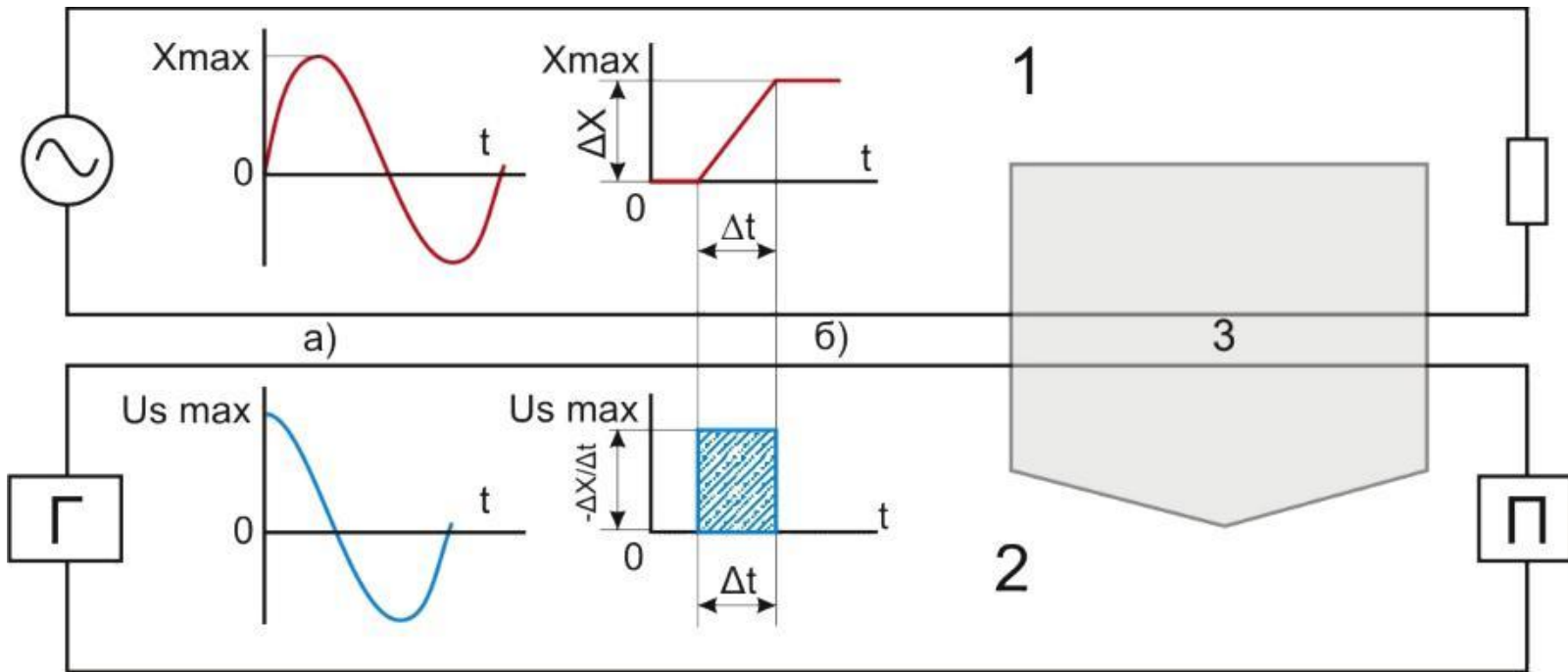
Для **периодических помех** такими важнейшими параметрами являются: **частота f** и **амплитуда X_{max}** .

Эти параметры определяют **амплитуду** **напряжения помехи** во вторичных контурах **U_{max}** .

Для непериодических помех важнейшими параметрами являются следующие:

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

Пояснение параметров **периодических** (а) и **непериодических** (б) переходных помех:



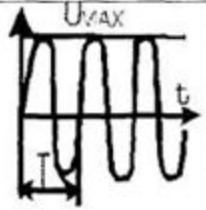
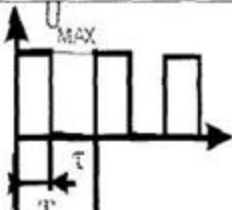
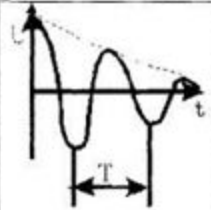
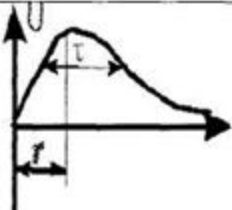
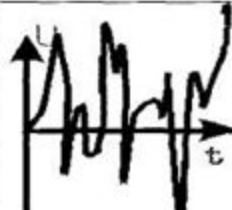
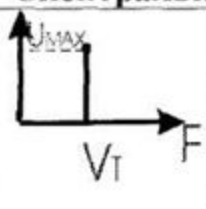
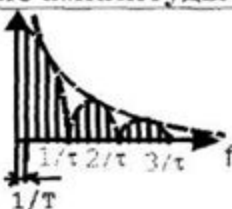
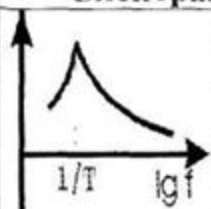
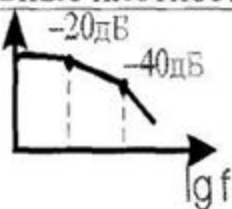

П – приемник сигналов; **Г** – источник сигналов; **X** – помеха (напряжение или ток); **U_s** – напряжение помехи, обусловленное связью; **1** – влияющий контур; **2** – контур, подверженный влиянию, **3** – гальваническая, емкостная или индуктивная связь (канал передачи помехи).

В ЭМС используют при **периодических помехах** **амплитудный спектр**, а для **импульсных помех** – **спектр амплитудной плотности** (см. след. слайд).

Оба этих представления обеспечивают:

- **оценку воздействия помехи** на систему;
- **расчет воздействий**, обусловленных заданной связью;
- **выбор параметров средств подавления помех**, например фильтров;
- **определение граничных областей**, например, максимального возможного или допустимого излучения помех или охарактеризовать границы помехоустойчивости;
- получение представлений **о воздействии при испытаниях согласно нормам ЭМС**, т.е. о параметрах генераторов, применяемых при испытаниях.

Лекция 2 (продолжение – 2.35)

Периодические		Непериодические		Шумы
Узкополосные	Широкополосные	Узкополосные	Широкополосные	Широкополосные
Временная область				
				
Частотная область				
Спектральные амплитуды		Спектральные плотности амплитуд		
				
Радиопередатчики, высокочастотные генераторы, сеть частотой 50 Гц	Тактовые импульсы ПК, тиристорные выпрямители, искра зажигания автомобиля	Коммутации в сетях электропитания, разряды статического электричества, короткие замыкания	Грозовые разряды, разряды статического электричества, электромагнитный импульс ядерного взрыва	Космический шум, совместное действие искр зажигания автомобилей на перекрестке, корона воздушных линий

Систематизация разновидностей помехи

1.5.1. Описание электромагнитных влияний в частотной и временной областях

Электромагнитные влияния могут рассматриваться как во временной, так и в частотной области.

Передаточные свойства путей связи и средств помехоподавления удобнее представлять в частотной области, такое представление чаще всего предпочитают и для помех.

Пересчет периодических процессов из временной области в частотную выполняют при помощи **ряда Фурье**, пересчет однократных импульсных процессов – при помощи **интеграла Фурье**.

1.5.2. Представление периодических функций времени в частотной области. Ряд Фурье.

Синусоидальные или косинусоидальные помехи могут быть представлены как **во временной**, так и **в частотной областях** (рис. 1). В **частотной области помеха** характеризуется угловой частотой ω и частотой колебаний f .

$$f = \omega / 2\pi$$

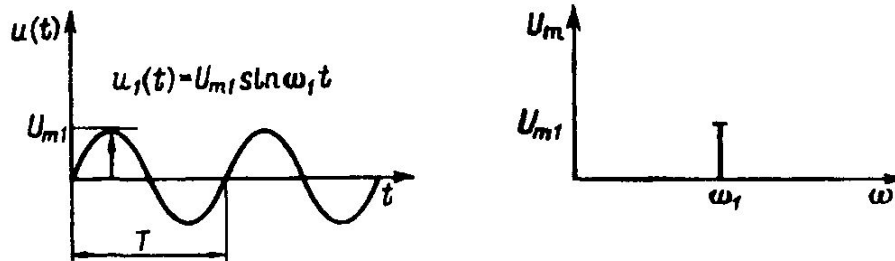


Рис 1. Представление синусоидальной помехи во временной и частотной областях

Несинусоидальные периодические функции (пилообразной или прямоугольной формы импульсы напряжения или тока) в некоторых случаях, возможно описать **аналитически**, - могут быть представлены в **частотной области** как **бесконечная сумма синусоидальных и косинусоидальных колебаний**, т. е. **рядом Фурье**. (кратко рассмотрим физический смысл ряда Фурье)

Ряд Фурье

Сложный входной сигнал раскладывают на сумму гармонических волн (синусоид или косинусоид) или **единичных функций, единичных импульсов, либо на другие простые функции.**

Представление **сложных сигналов** в виде суммы гармонических колебаний с различными амплитудами, фазами и частотами называется **разложением (преобразованием) Фурье.**

Поэтому **рядом Фурье** любое периодическое колебание можно разложить на сумму гармонических колебаний.

Физическое истолкование разложения периодического колебания $F(t)$ в **ряд Фурье** следующее - *любое периодическое колебание $F(t)$ можно представить бесконечной суммой синусоид или косинусоид с амплитудами c_k , частотами $f_k = kf_1$ и начальными фазами φ_k .*

РАЗЛОЖЕНИЕ СЛОЖНЫХ КОЛЕБАНИЙ В РЯД ФУРЬЕ.

Теорема Фурье

Любое сложное периодическое движение $x(t) = x(t+T)$ с периодом T (частотой $\nu = 1/T$) можно представить в виде суммы гармонических колебаний, частоты которых кратны частоте ν рассматриваемого периодического процесса: $\nu_k = k \cdot \nu$.

Это утверждение можно записать в виде формулы, представляющей **ряд Фурье**:

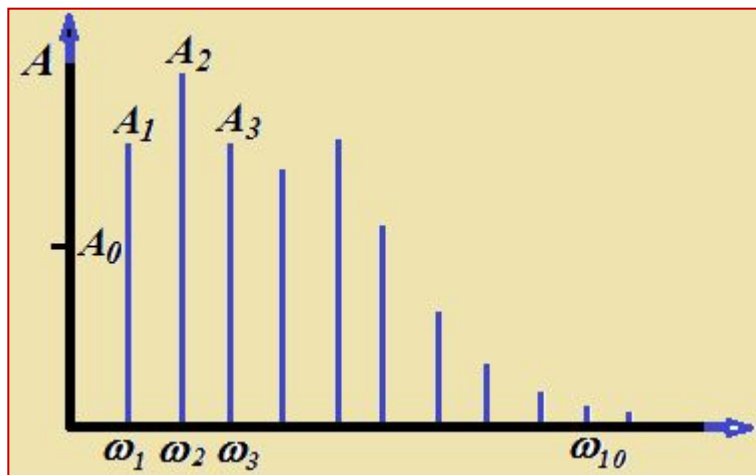
$$x(t) = A_0 + \sum_{k=1}^{\infty} A_k \sin(k\omega t + \phi_k) .$$

Здесь A_k – амплитуды складываемых гармоник, а ϕ_k – их начальные фазы. Первая гармоника имеет циклическую частоту $\omega_1 = \omega = 2\pi\nu = 2\pi/T$, вторая – 2ω , третья – 3ω и т.д.

A_0 - постоянная составляющая сложного периодического процесса.

Количество гармоник, входящих в состав сложного колебания, определяется сложностью исходного колебания $x(t)$!

На рис. представлен **гармонический спектр** сложного колебания.



Гармонический спектр сложного колебания

Ряд Фурье для этого случая содержит **10 слагаемых** ($k = 1, 2, 3, \dots, 10$), и вся информация о **сложном колебательном процессе** заключена в **полосе частот** от ω_1 (основная частота) до ω_{10} .

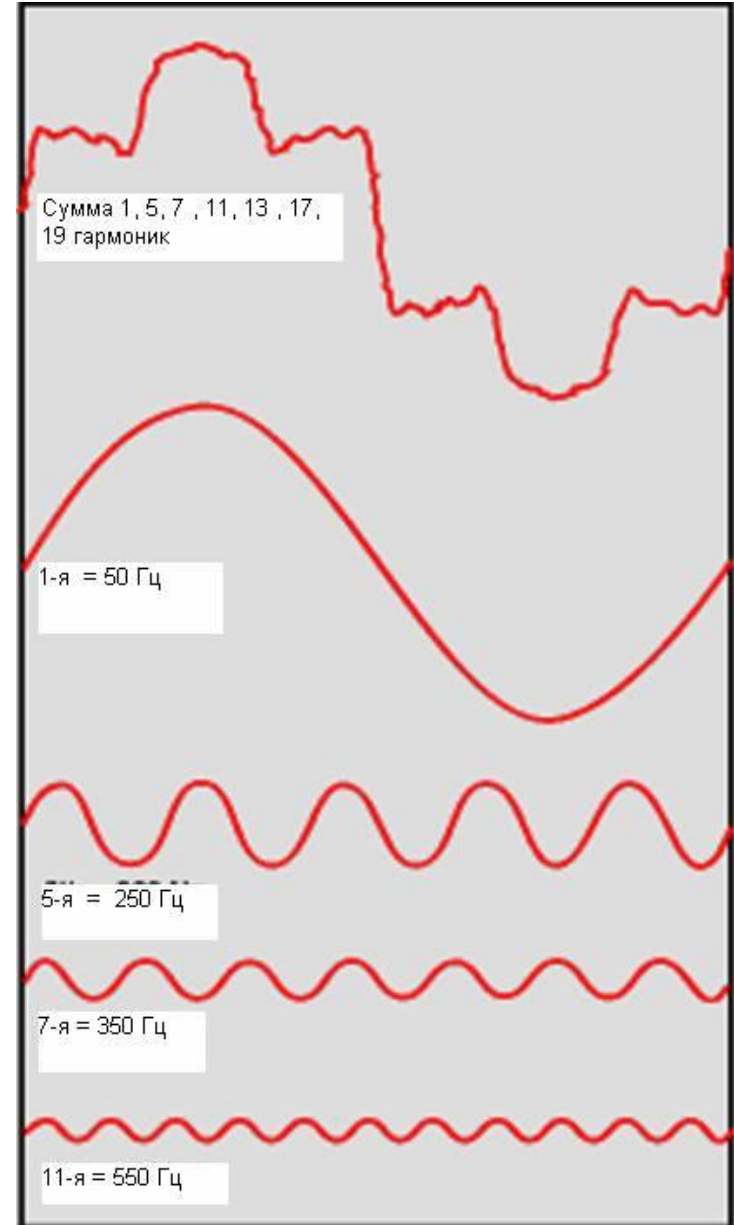
◀◀ Лекция 2 ▶▶

Гармоники – это синусоидальные волны суммирующиеся с фундаментальной (основной) частотой 50 Гц (т.е 1-я гармоника=50 Гц, 5-я гармоника = 250 Гц).



Типичные значения содержания высших гармоник тока питания:

Разложение формы кривой тока на гармонические составляющие



ПРИНЦИПЫ ПРИМЕНЕНИЯ ФУРЬЕ-АНАЛИЗА ДЛЯ ОБРАБОТКИ ДИАГНОСТИЧЕСКИХ ДАННЫХ.

Многие медицинские процессы (сердечные сокращения, дыхание, кровенаполнение сосудов и т.д.), носят периодический характер.

ЭКГ (рис.) представляет собой сложную периодическую зависимость биопотенциалов ϕ сердца от времени t .

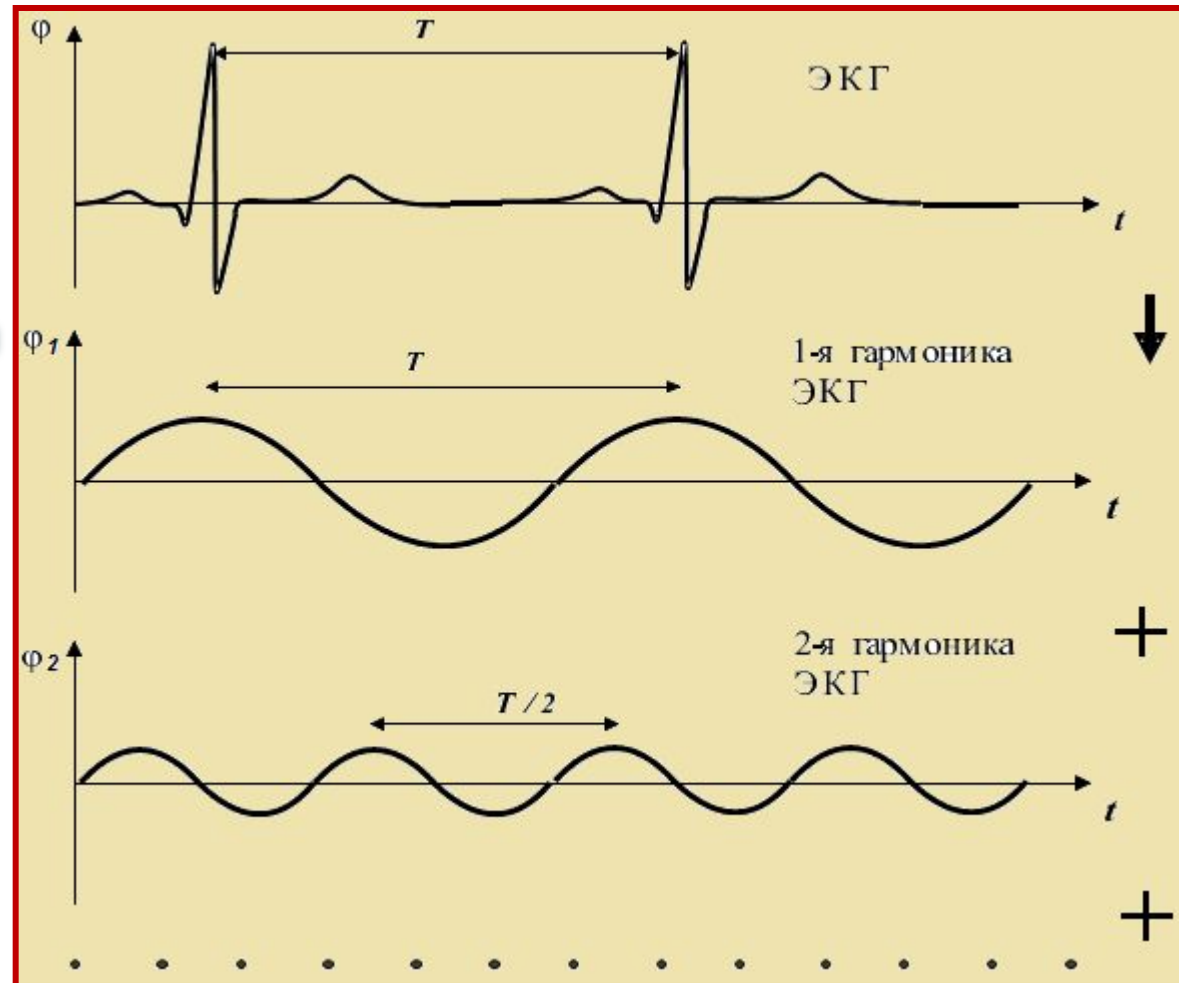


Рис. Разложение ЭКГ на отдельные гармонические составляющие.

◀◀ Лекция 2 (продолжение – 2.42) ▶▶

продолжение темы 1.5.2.

Напр., **несимметричное напряжение прямоугольной формы** возникшим как **наложение** **основного колебания** u и **основной частоты** $f_1 = 1/T$ и **бесконечно многих гармонических колебаний** u_ν с частотами νf_1 . Зависимость **амплитуды** отдельных колебаний от **частоты** представляет собой **дискретный линейчатый спектр** (рис. 2). Наименьшая встречающаяся в линейчатом спектре частота - **основная частота**.

Частоты высших гармоник являются значениями, **кратными** этой основной частоте, напр. $f_3 = 3f_1$.

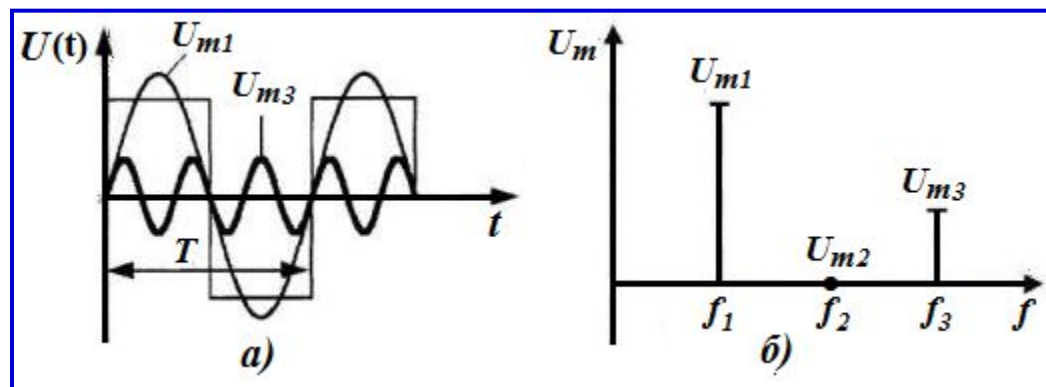


Рис 2. Напряжение прямоугольный **периодической помехи** и ее первые две составляющие во **временной** (а) и в **частотной** (б) областях.

Аналитически **ряд Фурье любой функции времени** может быть представлен в различных формах:

Нормальная:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (U_n' \cos n\omega t + U_n'' \sin n\omega t)$$

$$U_n' = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \cos(n\omega_1 t) dt, \quad U_n'' = \frac{2}{T} \int_0^T u(t) \sin(n\omega_1 t) dt, \quad U_0 = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) dt.$$

Коэффициенты U_n' и U_n'' - **амплитуды отдельных колебаний**. Составляющая U_0 соответствует **среднему арифметическому значению функции времени** (постоянная составляющая).

Амплитудно-фазовая:

Синусоидальные колебания с соответствующим фазовым сдвигом могут быть представлены и как **косинусоидальные, например, $\sin(90^\circ \pm \alpha) = \cos \alpha$**
вместо нормальной формы часто применяют амплитудно-фазовую форму:

$$u(t) = U_0 + \sum_{n=1}^{\infty} U_n \cos(n\omega_1 t + \varphi_n),$$

где $U_n = \sqrt{U_n'^2 + U_n''^2}$, $\varphi_n = -\text{arctg}(U_n'' / U_n')$.

Комплексная:

Если дополнять вышеприведенные уравнения **мнимой частью** и заменить **тригонометрические функции по формуле Эйлера** $\cos x + j \sin x = e^{jx}$ экспоненциальными функциями, получаем **уравнение в комплексной форме:**

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (C_{+n} e^{jn\omega_1 t} + C_{-n} e^{-jn\omega_1 t}),$$

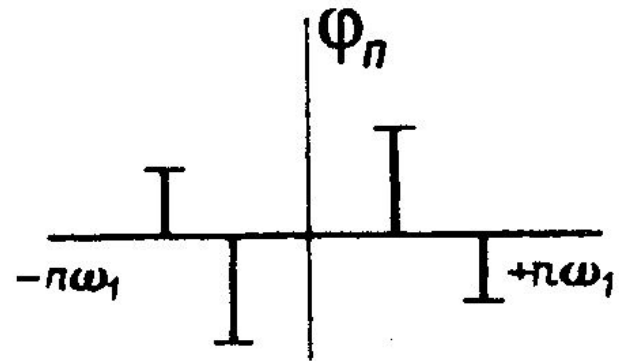
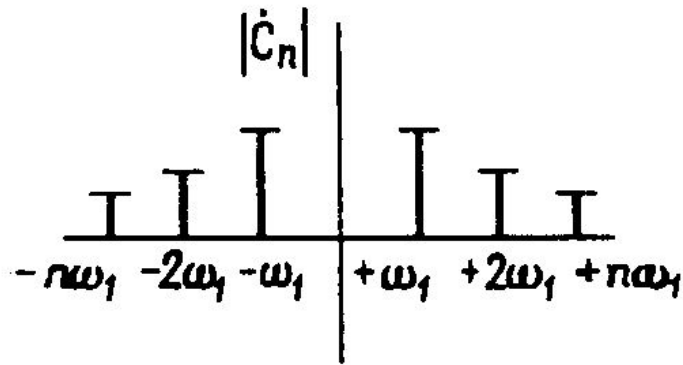
где
$$C_n(\pm n\omega_1) = \frac{1}{T} \int_0^T u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt = |C_n| e^{j\varphi_n} = C_n e^{j\varphi_n},$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

◀◀ Лекция 2 (продолжение – 2.46) ▶▶

Функция $u(t)$ представленная **комплексным рядом Фурье** остается действительной, то в правой части вводятся отрицательные частоты (чтобы мнимые части сократились).

Учет отрицательных частот приводит к двустороннему спектру



Амплитудный и фазовый спектры комплексного ряда Фурье

◀◀ Лекция 2 (продолжение – 2.47) ▶▶

Идентичные вещественные части обоих слагаемых в

$$u(t) = \sum_{n=-\infty}^{\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (C_{+n} e^{jn\omega_1 t} + C_{-n} e^{-jn\omega_1 t})$$

за знаком суммы (для положительных и отрицательных частот) образуют физически измеримую амплитуду U_n , причем.

$$|C_{+n}| + |C_{-n}| = U_n, \quad C_0 = U_0$$

При анализе ЭМС вместо двустороннего математического спектра $C_n = f(\pm n\omega_1)$ чаще всего рассчитывают односторонний «физический» спектр $2|C_n| = f(\pm n\omega_1)$ только для положительных n амплитуды которого отличаются на коэффициент 2 от амплитуд двустороннего спектра.

На рис. 3 показаны **импульсы прямоугольной формы** двух периодически изменяющихся напряжений одной и той же **основной частоты**, однако различной **скважности**, и относящиеся к ним линейчатые спектры. Из вышесказанного можно установить следующее: **наименьшая частота является основной частотой**. Ее значение связано со значением периода T : $f_1 = 1/T$

Амплитуды высших гармоник появляются с **одинаковым интервалом** $\Delta f = f_1 = 1/T$ их **частоты кратны основной частоте** $f_n = nf_1$


 Лекция 2 (продолжение – 2.49)

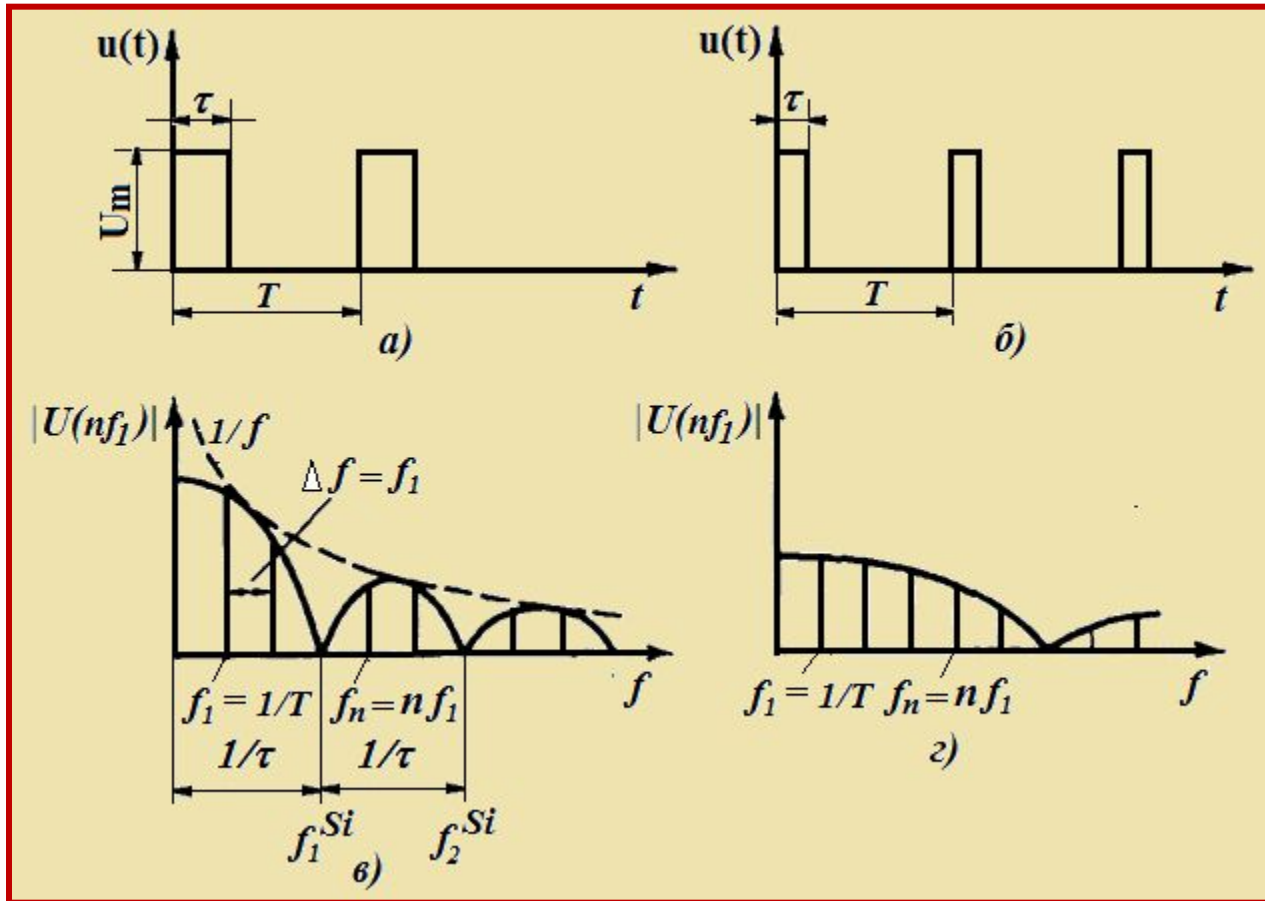


Рис. 3. Линейчатые спектры двух периодических последовательностей прямоугольных импульсов напряжений с личной скважностью (1:2):
 функция $Si(x)$ - огибающая спектральных амплитуд (сплошная кривая);
 функция $1/f$ - огибающая функции $Si(x)$ (пунктирная кривая).

Ряд Фурье для прямоугольных импульсов имеет вид:

$$u(t) = U_m \frac{\tau}{T} \left[1 + 2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{T}{2n\pi\tau} \left(\sin \frac{2n\pi\tau}{T} \cos n\omega_1 t + \left(1 - \cos \frac{2n\pi\tau}{T} \right) \sin n\omega_1 t \right) \right]$$

Коэффициенты (спектральные амплитуды) определяются формулой:

$$U_n = 2U_m \frac{\tau}{T} \frac{\sin(n\pi\tau / T)}{(n\pi\tau / T)}$$

Огибающая спектральных амплитуд следует функции $Si(x) = \sin(x)/x$. Первое значение нуля этой функции соответствует обратной величине длительности импульса

$$f_1^{Si=0} = 1/\tau$$

Другие нулевые значения следуют с интервалом $nf_1^{Si=0}$.

На практике нулевые значения появляются не столь явно выраженными, как на рис. 3, так как из-за неизбежных асимметрий (напр., экспоненциальных нарастаний и спада прямоугольных импульсов) они сглаживаются.

Постоянный коэффициент при функции $S_i(x)$ равный $2U_m\tau / T$ при неизменном периоде пропорционален **площади импульса** $U_m\tau$.

Т.о., **высокие узкие импульсы** при **низких частотах** могут иметь такой же спектр, как **низкие широкие**.

Огибающая амплитуд функции $S_i(x)$ есть функция $1/x$. Для **прямоугольных импульсов** с бесконечно большой длительностью периода T **спектральные линии** и **максимумы функции** $S_i(x)$ бесконечно сближаются. Получается известный спектр $1/f$ ступенчатой функции.

Подобным образом можно рассмотреть и другие формы импульсов с другими огибающими, напр., **треугольные импульсы**, огибающая которых выражается функцией $S_i^2(x)$

1.5.3. Представление непериодических функций времени в частотной области. Интеграл Фурье.

Ряд Фурье допускает представление в частотной области только **периодических функций времени**. Однако часто имеют дело с **непериодическими функциями**, характерными, например, для **коммутационных процессов, молнии или разрядов статического электричества и т. д.**

При определении **спектра непериодической импульсной функции** выполним предельный переход, воспользовавшись комплексной формой записи **ряда Фурье для периодических функций** (пределы интегрирования $-T/2$ и $+T/2$):

$$u(t)_{nep} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} C_n e^{jn\omega_1 t} = \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\frac{1}{T} \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}$$

Так как в **линейчатом спектре ряда Фурье** расстояние между спектральными линиями соответствует

$$\Delta f = \Delta \omega / 2\pi = f_1 = 1 / T$$

Можно также записать

$$u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \sum_{n=-\infty}^{n=+\infty} \left[\Delta \omega \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-jn\omega_1 t} dt \right] e^{jn\omega_1 t}$$

Далее выполняется предельный переход при $T \rightarrow \infty$ и $\Delta \omega \rightarrow 0$. При этом конечное расстояние между спектральными линиями $\Delta \omega$ за знаком суммы переходит в бесконечно малое расстояние $d\omega$, дискретная переменная $n\Delta \omega$ в непрерывную переменную ω , а сумма – в интеграл.

Т.о., получают интеграл Фурье для **непериодической функции**:

$$u(t)_{\text{непер.}} = \lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta\omega \rightarrow 0}} u(t)_{\text{пер}} = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} \left(\int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt \right) e^{j\omega t} d\omega$$

$\underbrace{\hspace{10em}}_{X(\omega)}$

где $X(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{-j\omega t} dt$ - представляет собой **преобразование Фурье функции $u(t)$** называемое **спектральной плотностью функции $u(t)$** ; $|X(\omega)|$ - называется **плотности распределения амплитуд**.

Для **непериодической функции $u(t)$** обратное преобразование Фурье имеет вид:

$$u(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} X(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Следовательно, **преобразование Фурье** и его обращение взаимобратны с точностью до множителя $1 / 2\pi$.

Название «**спектральная плотность**» происходит от того, что **спектральная функция** $X(\omega)$ **идентична линейчатому спектру** C_n , отнесенному к расстоянию между соседними частотами. Так как $T = 1 / \Delta f = 2\pi / \Delta\omega$, получаем

$$C_n = \Delta f \int_{-T/2}^{+T/2} u(t) e^{-j\omega_1 t} dt$$

Если отнести амплитуды C_n к Δf и образовать предельное значение для $T \rightarrow \infty$ (соответственно $\Delta f \rightarrow 0$), получим

$$\lim_{\substack{T \rightarrow \infty \\ \Delta f \rightarrow 0}} \frac{C_n}{\Delta\omega} = \int_{-\infty}^{+\infty} u(t) e^{j\omega t} dt = X(\omega)$$

иначе говоря,
спектральную плотность.

Если, например, **линейчатый спектр** C_n измеряется в вольтах, то **спектральная плотность** $X(\omega)$ сравнимого однократного процесса имеет размерность В/Гц.

Очевидно, **непериодические процессы** тоже могут быть представлены как наложение **синусоидальных** или **косинусоидальных** колебаний.

Однако в отличие от **периодических процессов** здесь участвуют **все частоты** от $-\infty$ до $+\infty$ с **амплитудами** $X(\omega)df$.

1.5.4. Возможные диапазоны значений электромагнитных помех

Параметры помех, в зависимости от **электромагнитной обстановки (ЭМО)** на энергообъекте могут изменяться в *очень широком диапазоне*.

Возможные диапазоны значений параметров **электромагнитных помех** приведены в *таблице*.

Возможные диапазоны значений параметров помех

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

1.5.5. Спектры некоторых периодических и импульсных процессов


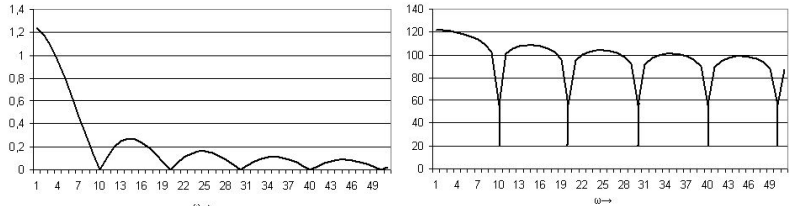

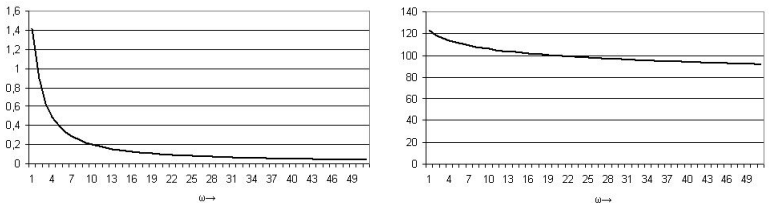
Приведем в таблице **«физические» спектральные плотности** некоторых импульсных процессов.

В этой же таблице приведены графики **«физических» спектральных плотностей** в **линейной** и **логарифмической** системе координат.

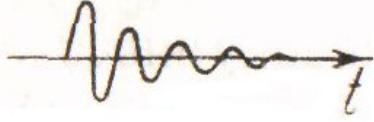
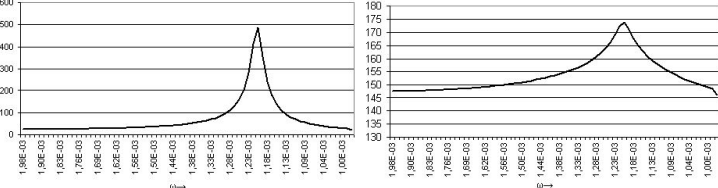
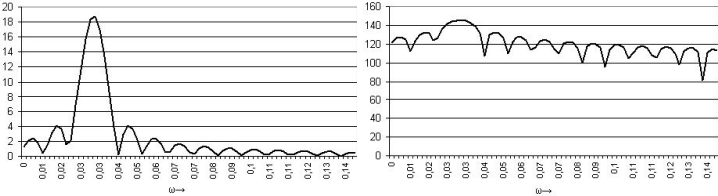
Спектры некоторых импульсных процессов

№	Форма импульса $f(t)$	Спектр импульса $2 X(\omega) $
1	<p>Единичная функция</p> $\sigma(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ 1/2 & t = 0 \\ 1 & t > 0 \end{cases}$ 	$X(\omega) = \frac{1}{j\omega} \quad 2 X(\omega) = \frac{2}{\omega}$ <p>Уровень (В/Гц) Уровень (Дб)</p> 
2	<p>Единичная импульсная функция</p> $\delta(t) = \begin{cases} 0 & t < 0 \\ \infty & t = 0 \\ 0 & t > 0 \end{cases}$ $\int_{0_-}^{0_+} \delta(t) dt = 1$	$X(\omega) = 1 \quad 2 X(\omega) = 2$ <p>Уровень (В/Гц) Уровень (Дб)</p> 

◀◀ Лекция 2 (продолжение – 2.61) ▶▶

№	Форма импульса	Спектр импульса
3	<p>Прямоугольный импульс</p> $u(t) = h(\sigma(t + \tau / 2) - \sigma(t - \tau / 2))$  <p>$h = 1;$ $\tau = 0,628$</p>	$X(\omega) = 2h \frac{\sin(\omega\tau / 2)}{\omega}$ $2 X(\omega) = 4h \left \frac{\sin(\omega\tau / 2)}{\omega} \right $ <p>Уровень (В/Гц) Уровень (Дб)</p> 
4	<p>Экспоненциальный импульс</p> $u(t) = e^{\beta t} \sigma(t)$ <p>$\beta = -1$</p> 	$X(\omega) = \frac{1}{\beta + j\omega}$ $2 X(\omega) = 2 \sqrt{\frac{1}{\beta^2 + \omega^2}}$ <p>Уровень (В/Гц) Уровень (Дб)</p> 

◀◀ Лекция 2 (продолжение – 2.62) ▶▶

№	Форма импульса	Спектр импульса
5	<p>Затухающая синусоида</p> $u(t) = e^{-\alpha t} \sin(\omega_1 t) \sigma(t)$ $\alpha = 0,04; \quad \omega_1 = 0,0314.$ 	$\tilde{X}(\omega) = \frac{\omega_1}{\alpha^2 - \omega^2 + \omega_1^2 + 2j\alpha\omega}$ $2 \tilde{X}(\omega) = 2\omega_1 \sqrt{\frac{1}{(\alpha^2 - \omega^2 + \omega_1^2)^2 + 4\alpha^2\omega^2}}$ <p>Уровень (В/Гц) Уровень (ДБ)</p> 
6	<p>Импульс в форме отрезка синусоиды, состоящего из целого числа периодов n</p> $u(t) = (\sigma(t + nT/2) - \sigma(t - nT/2)) \sin \omega_0 t$ $n = 3; \quad \omega_0 = 0,0314$ 	$\tilde{X}(\omega) = (-1)^n \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0}$ $2 \tilde{X}(\omega) = 2 \left (-1)^n \frac{2j\omega_0}{\omega_0^2 - \omega^2} \sin n\pi \frac{\omega}{\omega_0} \right $ <p>Уровень (В/Гц) Уровень (ДБ)</p> 

1.5.6. Учет путей передачи и приемников электромагнитных помех

Очень многие задачи электротехники сводятся к изучению **результатов воздействия некоторых процессов на устройство той или иной степени сложности. Схемы замещения этих устройств,** используемые при анализе электрических процессов, включают **схемы замещения как составляющих эти устройства элементов, так и различные паразитные связи (активные, индуктивные и емкостные).**

Элементы устройств принято подразделять на две основные группы:

- 1) *нелинейные неинерционные;*
- 2) *линейные инерционные (или динамические).*

Принципиально любой элемент электротехнического устройства необходимо рассматривать как *нелинейный инерционный*.

Однако решение задач при столь общих предположениях связано со **значительными математическими трудностями**. Поэтому указанное выше разделение элементов на **линейные** и **нелинейные** (неинерционные) является целесообразным.

Системы, содержащие в своем составе **линейные инерционные элементы** будут соответственно классифицироваться как **линейные инерционные**, а системы, содержащие в своем составе **нелинейные неинерционные элементы** соответственно **нелинейными неинерционными**.

Рассмотрим линейную инерционную систему.

В линейной **инерционной системе** значения процесса $y(t)$ на ее **выходе** зависят не только от значения процесса $x(t)$, действующего на **входе** в тот же момент времени t , но и от его значений в **другие моменты времени**.

Линейная инерционная система характеризуется тем, что величина $y(t)$ получается **суперпозицией** (сложением) всех значений $x(t)$, каждое из которых умножается на **весовой коэффициент** $h(t, \tau)$, зависящий как от момента приложения τ процесса ко **входу**, так и от момента наблюдения t процесса на **выходе** системы.

Если в процессе наблюдения **параметры системы остаются неизменными**, то значение весового коэффициента $h(t, \tau)$ зависит только от разности $t - \tau$: $h(t, \tau) = h(t - \tau)$. В этом случае значение процесса на **выходе** системы $y(t)$ связано с процессом на **входе** системы $x(t)$ следующим соотношением:

$$y(t) = \int_0^{+\infty} h(t - \tau)x(\tau)d\tau$$

Функция $h(t, \tau)$ получила название **импульсной переходной функции**. Данная функция является реакцией системы на ее выходе при воздействии на **вход** единичной импульсной функции $\delta(t)$.

Вместо **импульсной переходной функции** в качестве характеристики **линейной инерционной системы** при анализе в **частотной области** используют так называемую **передаточную функцию** представляющую собой преобразование Фурье от $h(t, \tau)$:

$$K(\omega) = \int_{-\infty}^{+\infty} h(u) e^{-j\omega u} du$$

где $u = t - \tau$

Импульсная переходная функция линейной системы с постоянными параметрами связана с передаточной функцией обратным преобразованиями Фурье:

$$h(t) = \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} k(\omega) e^{j\omega t} d\omega$$

Модуль и аргумент передаточной функции $k(j\omega)$ называют частотной $C(\omega)$ и фазовой $\varphi(\omega)$ характеристиками линейной системы:

$$\tilde{k}(\omega) = C(\omega) e^{j\varphi(\omega)}$$

Шириной полосы пропускания частотной характеристики называют **ширину основания прямоугольника**, **высота** которого равна максимальной ординате $C^2(\omega_0)$, а **площадь** – площади под кривой квадрата частотной характеристики:

$$\Delta_c = \frac{\int_0^{\infty} C^2(\omega) d\omega}{C^2(\omega_0)}$$

Если частотная характеристика имеет резко выраженную область резонанса в окрестности частоты ω_0 , и если $\omega_0 \gg \Delta_c$, то линейная система с такой характеристикой называется **узкополосной**.

Передаточная функция линейной инерционной системы позволяет достаточно просто определить спектральную плотность процесса на выходе системы при известной **спектральной плотности процесса** на входе системы:

$$X_2(\omega) = K(\omega) * X_1(\omega)$$


Поэтому, если перемножить **спектральную плотность процесса** на **выходе** источника помехи (и соответственно на **входе** канала передачи помехи) $X_{И}(\omega)$ с передаточной функцией канала передачи помехи $K_{св}(\omega)$, и далее с передаточной функцией приемника, подверженного помехе $K_{пр}(\omega)$, то получим спектральную плотность помехи в приемнике $X_{П}(\omega)$:


$$X_{П}(\omega) = X_{И}(\omega) K_{св}(\omega) K_{пр}(\omega)$$


Т.о, с помощью измеренных **спектров помех** могут быть рассчитаны требуемые *помехозащитные фильтры, экраны, испытательные импульсы для моделирования и т.д.*

Вопросы для самопроверки

1. Что понимается под электромагнитной совместимостью технических средств?
2. Что понимается под организационным обеспечением электромагнитной совместимости?
3. Что понимается под техническим обеспечением электромагнитной совместимости?
4. Перечислите виды электромагнитных помех.
5. Поясните понятия узкополосных и широкополосных электромагнитных помех.
6. Поясните понятия синфазных и противофазных электромагнитных помех.
7. Поясните понятия «земля» и «масса».
8. Поясните термины «уровень помехи» и «помехоподавление». Как для их характеристики используются относительные логарифмические масштабы?
9. Что такое децибел и непер? Как они соотносятся?
10. Как осуществляется переход представления электромагнитных помех из временной области в частотную область и наоборот?
11. Что такое спектр периодической помехи. Какой математический аппарат применяется для его получения?
12. Что такое спектральная плотность распределения амплитуд импульсной помехи?



Лекция 2 (продолжение – 3.73) 



Лекция 2 (продолжение – 3.73) 