



**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Буканин Владимир Анатольевич, кафедра БЖД, ЭСЭАО

## **ДОМАШНЕЕ ЗАДАНИЕ: РАЗДЕЛ ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ, ПОСВЯЩЁННЫЙ ВОПРОСАМ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ И БЕЗОПАСНОСТИ**

ГОСТ 28934-91 МЕЖГОСУДАРСТВЕННЫЙ СТАНДАРТ Совместимость технических средств электромагнитная СОДЕРЖАНИЕ РАЗДЕЛА ТЕХНИЧЕСКОГО ЗАДАНИЯ В ЧАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ

ГОСТ 15.016-2016 СИСТЕМА РАЗРАБОТКИ И ПОСТАНОВКИ ПРОДУКЦИИ НА ПРОИЗВОДСТВО (СРПП). ТЕХНИЧЕСКОЕ ЗАДАНИЕ. ТРЕБОВАНИЯ К СОДЕРЖАНИЮ И ОФОРМЛЕНИЮ (ПЕРЕИЗДАНИЕ ИЮЛЬ 2020 Г.)

**Техническое задание;** ТЗ: Исходный технический документ для проведения работы, устанавливающий требования к создаваемому изделию (его составным частям или комплектующим) и технической документации на него, а также требования к объему, срокам проведения работы и форме представления результатов.

# СТАДИИ ЖИЗНЕННОГО ЦИКЛА

Согласно ГОСТ Р 15.000–2016 Система разработки и постановки продукции на производство (СРПП).

**Основные положения** ЖЦП включает следующие стадии: - исследование и проектирование;

- разработка; - изготовление (производство); - поставка; - эксплуатация (потребление, хранение); - ликвидация.

- стадия исследование и проектирование - работы, направленные на разработку ТЗ на выполнение исследований и т.д.;
- - стадия разработка - работы, направленные на разработку соответствующей конструкторской и технологической документации, изготовление, предварительные и приемочные испытания образцов, на доработку конструкторской документации опытных образцов;
- - стадия изготовление (производство) - работы, направленные на обеспечение выпуска новой (модернизированной, модифицированной) продукции, соответствующей требованиям ТЗ, конструкторской и технологической документации;
- стадия поставка - работы, направленные на сохранение качества готовой продукции при ее поставке потребителям в заданные сроки;
- стадия эксплуатация (потребление, хранение) - работы, направленные на получение максимального полезного эффекта от использования продукции, на снятие с эксплуатации
- на стадии ликвидации продукции относят работы, направленные на обеспечение утилизации, уничтожения и/или захоронения продукции, ее отходов и удаления опасных отходов.

## **НЕКОТОРЫЕ ОПРЕДЕЛЕНИЯ**

**Программа испытаний:** Документ, предназначенный для организации и выполнения работ, обеспечивающих проведение испытаний конкретного объекта.

**Декларирование соответствия:** форма обязательного подтверждения качества продукции на соответствие всем установленным нормам и требованиям безопасности.

**Сертификация:** Форма осуществляемого органом по сертификации подтверждения соответствия медицинского изделия требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

**Сертификат соответствия:** Документ, выданный органом по сертификации, удостоверяющий соответствие объекта требованиям технических регламентов, положениям стандартов или условиям договоров.

**Инструкция (руководство) по эксплуатации:** Документ, содержащий сведения о конструкции, принципе действия, характеристиках (свойствах) изделия, его составных частях и указания, необходимые для правильной и безопасной эксплуатации изделия (использования по назначению, технического обслуживания, текущего ремонта, хранения и транспортирования) и оценок его технического состояния, а также сведения по утилизации изделия и его составных частей.

## ТЕХНИЧЕСКИЕ ТРЕБОВАНИЯ

В разделе "Технические требования к изделию" указывают требования, характеристики, нормы, показатели и другие параметры, определяющие назначение, эксплуатационные характеристики, условия эксплуатации и применения изделия. Раздел может состоять из следующих подразделов:

- состав изделия;
- требования назначения;
- требования электромагнитной совместимости;
- требования безопасности;
- конструктивные требования.

## ТРЕБОВАНИЯ К ЭМС

- Требования электромагнитной совместимости (В подразделе "Требования электромагнитной совместимости" устанавливают требования, обеспечивающие их электромагнитную совместимость, помехоустойчивость, а также требования, обеспечивающие защиту от электромагнитных излучений естественного и искусственного происхождения, в том числе устойчивость функционирования радиоэлектронных средств в условиях изменения среды распространения таких излучений. ГОСТ 28934-91 Совместимость технических средств электромагнитная. Содержание раздела технического задания в части электромагнитной совместимости);

## ТРЕБОВАНИЯ К БЕЗОПАСНОСТИ

- *Требования безопасности* (В подразделе "Требования безопасности" устанавливают требования, характеризующие конструктивно-технические особенности создаваемого изделия, обеспечивающие безопасность персонала, местного населения, сопрягаемых и других близко расположенных объектов, а также ОС на всех стадиях жизненного цикла изделия:
  - безопасности персонала и населения от воздействия высокочастотных электромагнитных полей;
  - защиты изделия от самосрабатывания и повреждений при воздействии статического электричества;
  - критерии опасного состояния изделия



## СОДЕРЖАНИЕ ИСПЫТАНИЙ (ПРОВЕРОК, ОЦЕНОК)

1. Перечень экспериментальных проверок или экспертных оценок всех параметров, которые для данного изделия были заданы в технических требованиях, проноормированы в проекте ТУ или установлены в общих нормативных документах, действие которых распространяется на данное изделие, в том числе проверка:

- устойчивости к колебаниям напряжения питания;
- уровня радиопомех



## СТАНДАРТЫ

ГОСТ Р 51318.11-2006 "Совместимость технических средств электромагнитная. Промышленные, научные, медицинские и бытовые (ПНМБ) высокочастотные устройства. Радиопомехи индустриальные. Нормы и методы измерений"





**СПбГЭТУ «ЛЭТИ»**  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Кафедра БЖД.

Буканин Владимир Анатольевич

# **ЭМС электрооборудования автономных объектов**

## **ВВЕДЕНИЕ. ОБЩИЕ ВОПРОСЫ**

**Цели и задачи дисциплины. Методика и критерии оценивания знаний студентов.**

**1.1 Основные понятия и определения.**

**1.2 Негативные последствия, аварийные и чрезвычайные ситуации, вызванные воздействием электромагнитных помех.**

# ЭМС электрооборудования автономных объектов

Виды занятий	
Лабораторные занятия (академ. часов)	17
Практические занятия (академ. часов)	17
Все аудиторные занятия (академ. часов)	34
Иная контактная работа (академ. часов)	2
Все контактные часы (академ. часов)	36
Самостоятельная работа, включая часы на контроль (академ. часов)	36
Всего (академ. часов)	72
Вид промежуточной аттестации	
Дифференцированный зачет (семестр)	2

## Цели и задачи дисциплины

1. Изучение и приобретение знаний по основным проблемам электромагнитной совместимости (ЭМС), методам и средствам их решения; объёмам и методам обязательных испытаний при разработке и эксплуатации электрооборудования и систем автономных объектов; нормативным документам по обеспечению ЭМС.

## ЦЕЛИ И ЗАДАЧИ

2 Формирование навыков и умений решения научно-исследовательских, проектных и технологических задач с использованием информационных технологий; оценки соответствия разрабатываемых технических систем и технической документации государственным стандартам и другим нормативным документам в части требований обеспечения электромагнитной безопасности; выбора средств и методов защиты технических систем от индуктивных и кондуктивных помех на этапе их проектирования; проведения испытаний образцов систем на соответствие ЭМС на этапах разработки, производства и эксплуатации

3 Освоение принципов нормирования ЭМС, связанных с эксплуатацией технических систем, и защиты от их воздействия, методов испытаний на устойчивость к электромагнитным помехам.

## В РЕЗУЛЬТАТЕ ИЗУЧЕНИЯ ДИСЦИПЛИНЫ СТУДЕНТЫ ДОЛЖНЫ ПОЛУЧИТЬ:

- знания по источникам электромагнитных помех, их воздействию на технические системы и их последствиям, требований стандартов по ЭМС;
- умения прогнозировать и проводить анализ уровней электромагнитных помех, выбирать средства и методы защиты от них, оценивать эффективность систем защиты;
- навыки проведения испытаний на воздействия электромагнитных помех различных видов, проведения расчетов параметров помех, создаваемых на электрооборудовании и в системах автономных объектов.

## КРИТЕРИИ ОЦЕНИВАНИЯ ЗНАНИЙ

В течение семестра:

практические занятия: задачи, презентации (20max),

2 контрольные (20max),

домашнее задание (20max),

лабораторные работы: (40max).

$\geq 85$  – отлично;  $\geq 75$  – хорошо;  $\geq 60$  – удовлетворительно;  
 $< 60$  – неудовлетворительно.



# ЛИТЕРАТУРА



№	Название, библиографическое описание	Се- местр	К-во экз. в библ.
Основная литература			
1	Специальные вопросы проектирования безопасной приборной техники: Методические указания к лабораторным работам / сост.: В. А. Буканин, В. Н. Павлов, А. О. Трусов. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2010. – 80 с.	2	58
2	Испытания приборов, устройств и систем: Методические указания к лабораторным работам / сост.: В. А. Буканин, В. Н. Павлов, А. О. Трусов, А. Н. Иванов, Н. В. Блажко, А. О. Чвыров – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2011. – 80 с.	2	101
3	В. А. Буканин, А. Н. Иванов, В. Н. Павлов, Н. В. Смирнова, А. О. Трусов. Специальные вопросы проектирования безопасной приборной техники и систем управления: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2016. 96 с.	2	96
4	В. А. Буканин, А. Н. Иванов, В. Н. Павлов, А. О. Трусов. Электромагнитная совместимость приборов и систем: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2019. 96 с.	2	80
5	В. А. Буканин, А. Н. Иванов, В. Н. Павлов, А. О. Трусов. Вопросы безопасности программного обеспечения приборов и систем: учеб. пособие. СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2020. 112 с.	2	60
6	В. А. Буканин, А. Н. Иванов, В. Н. Павлов, А. О. Трусов. Испытания электрических и электронных приборов и систем на электромагнитную совместимость [Текст] : учеб. пособие / [В. А. Буканин [и др.], 2021. 111 с.	2	60
7	Специальные вопросы проектирования безопасной техники: метод. указ. к практ. занятиям / сост.: Н. В. Блажко, В. А. Буканин, О. В. Демидович и др. – СПб.: Изд-во СПбГЭТУ «ЛЭТИ», 2012. – 80 с.	2	60



## Электромагнитная совместимость является сложной технической проблемой из-за:

- Широкого частотного диапазона сигналов(от DC до КВЧ)
  - Широкий диапазон амплитуд сигналов (от **мкА** да **кА**, от **мкВ** до **МВ**)
  - Несколько подходов к заданию требований по ЭМС и различные методики измерений
  - Большое количество стандартов (национальных и международных)
-

## Нормативные документы

- Технический регламент Таможенного союза ТР ТС 020/2011 «Электромагнитная совместимость технических средств»
- **ГОСТы 30804, Р 50648, Р 51317, Р 51318, Р МЭК 60601, IEC 61000, др. (всего около 300 стандартов от ТК 30)**

## История вопроса ЭМС

□ Техническим комитетом по стандартизации ТК 30 «Электромагнитная совместимость технических средств» с момента его создания были подготовлены, приняты, пересмотрены или исключены около 300 стандартов, посвященных проблемам ЭМС.

1 этап (1990–1993) – подготовка группой специалистов межгосударственных стандартов ЭМС с учетом требований международных стандартов до даты утверждения приказа о создании ТК 30.

5 этап (2013–2018) – подготовка межгосударственных стандартов ЭМС, идентичных по отношению к последним редакциям стандартов ЭМС IEC, CISPR, ISO, CENELEC, ETSI. С 2013 г. в соответствии с Программами национальной стандартизации была предусмотрена разработка межгосударственных стандартов на основе международных и европейских стандартов ЭМС только в качестве идентичных этим стандартам.

## Требование Технического регламента

Основными требованиями ТР ТС 020/2011 по ЭМС являются следующие: техническое средство должно быть разработано и изготовлено таким образом, чтобы при применении его по назначению и выполнении требований к монтажу, эксплуатации (использованию), хранению, перевозке (транспортированию) и техническому обслуживанию:

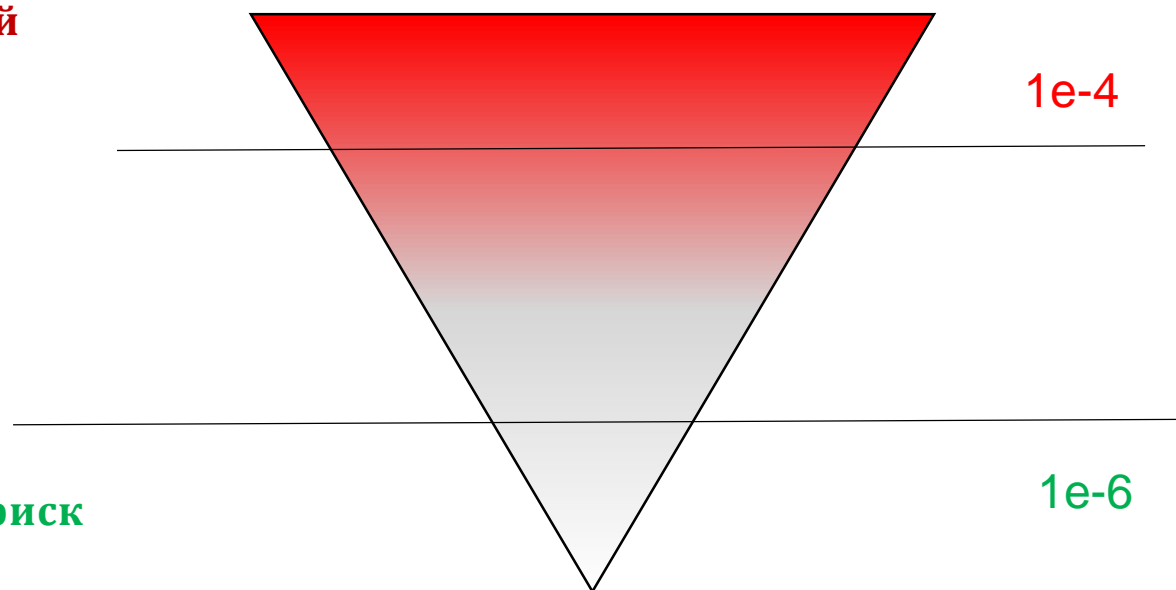
- электромагнитные помехи, создаваемые техническим средством, не превышали уровень, обеспечивающий функционирование средств связи и других технических средств в соответствии с их назначением;
- техническое средство имело уровень устойчивости к электромагнитным помехам (помехоустойчивости), обеспечивающий его функционирование в электромагнитной обстановке, для применения в которой оно предназначено.

# ПРИЕМЛЕМЫЙ РИСК И ПРИНЦИП ALARP «AS LOW AS REASONABLY PRACTICABLE» ПО IEC 61508-5

Неприемлемый  
риск

**ALARP**

Приемлемый риск



## 1.1 Основные понятия и определения

**Электромагнитная совместимость (EMC)** способность технического средства функционировать с заданным качеством в заданной электромагнитной обстановке и не создавать недопустимых электромагнитных помех другим техническим средствам

**Помехоэмиссия (EME)** Явление, при котором электромагнитная энергия исходит от источника

**Помехустойчивость (EMI)** способность технического средства сохранять заданное качество функционирования при воздействии на него внешних помех с регламентируемыми значениями параметров



## Основные понятия и определения

*Техническое средство* – любое электротехническое, электронное и радиоэлектронное изделие, а также любое изделие, содержащее электрические и (или) электронные составные части, которое может быть отнесено к категориям: “компонент”, “аппарат” и “установка”.

## 2 модифицированных определения ЭМС

*Внутрисистемная ЭМС* – способность составных элементов системы удовлетворительно функционировать в электромагнитной обстановке, созданной системой, не создавая недопустимых ЭМ помех другим компонентам этой системы.

*Внесистемная ЭМС* – способность системы в целом удовлетворительно функционировать в электромагнитной обстановке, созданной внешними источниками, не создавая недопустимых ЭМ помех чему-либо во внешней среде.

## Электромагнитная помеха

*Электромагнитная помеха* (electromagnetic disturbance) – любое электромагнитное явление, которое может ухудшить работу устройства, оборудования или системы или неблагоприятно повлиять на живую или неживую материю. Электромагнитная помеха может быть электромагнитным шумом, нежелательным сигналом или изменением в самой среде распространения [IEV 161-01-05]

## Электромагнитная помеха

*Электромагнитная помеха* – это электромагнитное явление, процесс, которые снижают или могут снизить качество функционирования технического средства (ГОСТ 30372–95/ГОСТ Р 50397–92 “Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения”).

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

Различают помехи излучаемые (т. е. распространяющиеся в пространстве, в том числе импульсные в виде одиночного импульса, последовательности или пачки импульсов) и кондуктивные (распространяющиеся по проводникам), а также два вида явления или процесса – электромагнитное излучение и электромагнитную кондукцию (от источника помехи).



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

*Электромагнитная кондукция* – явление, процесс, при которых помеха распространяется от источника кондуктивным путём в проводящей среде. Проводящей средой могут быть сигнальные цепи ввода-вывода, цепи электропитания, экраны, заземлители.

*Электростатический разряд* – импульсный перенос электрического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами.

ГОСТ Р 51317.2.5–2000 (МЭК 61000-2-5–95) устанавливает классификацию электромагнитных помех (вызываемых электромагнитными явлениями и процессами, определяющими электромагнитную обстановку) применительно к различным местам размещения электротехнических, электронных и радиоэлектронных изделий, оборудования и систем.

*Электромагнитная обстановка* – совокупность электромагнитных явлений, процессов в заданной области пространства, в частотном и во временном диапазонах. Для количественного описания электромагнитной обстановки используется термин «*степень интенсивности электромагнитной помехи*».



## СИСТЕМЫ, СВЯЗАННЫЕ С БЕЗОПАСНОСТЬЮ

- для предотвращения опасного события (т. е. если система, связанная с безопасностью, выполняет свои функции безопасности, то опасного события не происходит);
- для смягчения последствий опасного события.

ГОСТ Р МЭК 61508-1–2012 “Функциональная безопасность систем электрических, электронных, программируемых электронных, связанных с безопасностью. Часть 1. Общие требования”.

## Важность проблемы ЭМС

Проблемы исторически связаны с обеспечением нормальной работы совокупности электрических и электронных аппаратов (аппарат согласно Директиве ЭМС – любой электрический и электронный прибор), находящихся в непосредственной близости друг к другу.

Первоначально проблема начала решаться (и решается в настоящее время) в радиосистемах и телевидении.

Нарушение приёма радиосигналов, создаваемых третьей стороной (двигатели внутреннего сгорания с искровым зажиганием, коллекторные двигатели, силовые переключающие устройства, светильники с люминесцентными лампами, цифровые устройства) являются объектами регулирования радиочастотной помехоэмиссии.

## Важность проблемы ЭМС

ГОСТ Р 51318.11–2006 (СИСПР 11–2004) “Совместимость технических средств электромагнитная. Промышленные, научные, медицинские и бытовые (ПНМБ) высокочастотные устройства. Радиопомехи индустриальные. Нормы и методы измерений” для исключения влияния её на другие электронные и радиоэлектронные устройства в качестве основных частот тока для них, в которых не требуется получение специального разрешения комиссии по радиочастотам выделены следующие основные частоты (диапазоны частот):

18 кГц (16,7...19,4 кГц);	2,64 МГц (2,61...2,67 МГц);	40,680 МГц (40,3...41,1 МГц);	24,125 ГГц (24...24,25 ГГц);
22 кГц (20,4...23,7 кГц);	5,28 МГц (5,15...5,41 МГц);	40,680 МГц (40,66...40,71 МГц);	42,300 ГГц (41,3...43,4 ГГц);
44 кГц (40,0...48,0 кГц);	6,780 МГц (6,767...6,794 МГц);	81,36 МГц (80,6...82,2 МГц);	46,200 ГГц (45...47,4 ГГц);
66 кГц (59,0...74,0 кГц);	13,560 МГц (13,424...13,696 МГц);	433,92 МГц (433,05...434,79 МГц);	48,400 ГГц (47,2...49,6 ГГц);
440 кГц (429...451 кГц);	13,560 МГц (13,5532...13,5668 МГц);	915 МГц (902...928 МГц);	61,250 ГГц (61...61,5 ГГц);
880 кГц (871...889 кГц);	27,12 МГц (26,85...27,39 МГц);	2,450 ГГц (2,400...2,500 ГГц);	122,500 ГГц (122...123 ГГц);
1,76 МГц (1,72...1,80 МГц);	27,120 МГц (26,957...27,283 МГц);	5,800 ГГц (5,725...5,875 ГГц);	245,000 ГГц (244...246 ГГц)

CISPR (СИСПР) – Comité International Spécial des Perturbations Radiélectriques – Международный специальный комитет по радиопомехам

## Важность проблемы ЭМС

Обычно создатели систем ранее не задумывались о проблемах ЭМС при установке и внедрении, обеспечивая только их функциональные требования. Знание вопросов ЭМС не только для разработчиков, но и для инженеров, устанавливающих и эксплуатирующих системы, обычно ЯВЛЯЕТСЯ РЕДКИМ. Нет и инструкции по эксплуатации, относящейся к ЭМС. Интеграция электрических и электронных систем привела к необходимости решать задачи ЭМС в отраслях военной промышленности (оборудование, устанавливаемое на «платформах» (корабли, самолёты, подвижные наземные объекты), в отраслях аэрокосмической техники, железнодорожного, морского транспорта, автотранспортных средств, в отраслях, связанных с системами управления.

## Важность проблемы ЭМС

Применение положений стандартов по электромагнитной эмиссии от источников помех очень важно для защиты служб безопасности, электрических изделий и систем, электрического оборудования, медицинских изделий, компьютеров, средств связи (радио, телевидения, телефонии, радионавигации) и т. д.

Еще более важным является применение стандартов по устойчивости к электромагнитным помехам (помехоустойчивости), существенных для обеспечения безопасности различных электрических изделий и электрических систем.

---



Актуальность ЭМС на современном этапе развития электроники обусловлена следующими основными причинами: повышением быстродействия полупроводниковых приборов и электронных схем; снижением амплитуд рабочих сигналов цифровых элементов, с одной стороны, и повышением уровня внешних помех – с другой; возрастанием влияния межсоединений и компоновки узлов на помехоустойчивость и быстродействие электронных устройств; трудоёмкостью и большими материальными и временными затратами, связанными с поиском и устранением причин низкой помехоустойчивости электронных устройств.





Обеспечение качества продукции по параметрам ЭМС непосредственно связано с безопасностью продукции, а значит, жизни, здоровья, имущества потребителей и с охраной окружающей среды.

# ПОСЛЕДСТВИЯ

## «Оборудование на оборудование»

- Потеря данных в цифровых системах или при передаче данных
- Помехи для телевидения и радиоприема
- Отказ медицинского электронного оборудования
- Отказ автомобильных микропроцессорных систем управления (торможения) и навигационного оборудования
- Отказ АСУТП (например, нефтегазовая промышленность, химическая промышленность, авиация, железные дороги...).
- ....

## «Оборудование на человека»

- Принимаются во внимание в области Био-ЕМС
-

## 1.2 Негативные последствия, аварийные и чрезвычайные ситуации, вызванные воздействием электромагнитных помех

*Сбои* в медицинской аппаратуре диагностики и жизнеобеспечения из-за недостаточной помехозащищённости или под воздействием недопустимо высокого уровня электромагнитных помех; в электронных сердечных стимуляторах из-за воздействия электромагнитных помех от бытовых приборов, в устройствах дистанционного управления или в средствах радиосвязи индивидуального пользования;

## Примеры негативных последствий, аварийных и чрезвычайных ситуаций, вызванных ЭМ помехами

Некоторые из недопустимых проблем ЭМС медицинских ЭС:

- отказ элемента системы;
- изменение программируемых параметров;
- изменение рабочего режима;
- ложные тревоги;
- прекращение (отключение) или приостановка выполнения любой выполняемой функции, даже сопровождаемые сигналом тревоги;
- достаточно большое значение погрешности отображаемых числовых значений, которое может влиять на процесс диагностики или лечения;

- инициирование выполнения любой непредусмотренной функции, включая непредусмотренные и неконтролируемые перемещения, даже сопровождаемое сигналом тревоги;
- наложение шума на физиологический сигнал, при котором нельзя отличить сигнал от шума, или нарушение процесса интерпретации физиологического сигнала;
- нарушение работы монитора, при котором изображение, вызванное физиологическим сигналом, маскируется помехой или невозможно распознавание физиологического сигнала;
- нарушение процессов автоматической диагностики или выполнения процедур в медицинских электрических изделиях или системах.

Примеры нарушений, соответствующих с критериями качества функционирования:

- изображение в МЭ системе визуализации искажено, но это искажение распознается как не связанное с физиологическим процессом и не влияющее на диагностику или лечение;
- монитор отображает сердечный ритм с погрешностью, которая в сумме является клинически несущественной;
- на мониторе, подключенном к пациенту, наблюдаются незначительные помехи в виде шума или переходных процессов, не связанные с физиологическим сигналом и не влияющие на диагностику и лечение.



## Примеры проблем ЭМС

- нарушения функционирования электронных медицинских изделий, связанных с воздействием электромагнитных полей (например, необъяснимые отказы мониторов лёгочной деятельности в подаче сигнала тревоги, когда дыхание больного прекращалось; прекращение функционирования мониторов анестезирующего газа при проведении хирургических операций; самопроизвольный выезд кресел-колясок с электрическим приводом за край тротуаров вблизи работающих радиостанций у полицейских, пожарных машин и патрульных катеров; отказ электрических тормозов колясок, отключение дефибриллятора в машине скорой помощи, которые причиняют вред здоровью людей и даже вызывают смертельные случаи);
- самопроизвольное срабатывание речевых детских игрушек вблизи работающей микроволновой печи (кряканье электронной утки);
- нарушение показаний электронных электроизмерительных приборов;
- низкочастотное дрожание мониторов на базе электронно-лучевой трубки и др.

Нарушение ЭМС приводит к низкочастотному фону у бытовых стереосистем; самовозбуждению в усилителях; к генерации паразитных колебаний в цифровых системах; к электромагнитному излучению печатных плат, превышающему допустимые пределы; к переключению логических уровней под действием электростатических разрядов; к перемежающимся отказам при считывании информации с запоминающего устройства; к отказам счётчиков; к потере данных в сдвиговых регистрах; к нарушениям стабилизации выходного напряжения в источниках электропитания; к генерации паразитных колебаний в источниках питания; к логическим ошибкам в тестерах и т. д.

---

## Примеры аварийных и чрезвычайных ситуаций, вызванных ЭМ помехами

*Отказы* в системах контроля и управления атомными электростанциями из-за недостаточной помехозащищённости; в системах контроля и управления технологическими процессами производства (в том числе и химического); в бортовых системах самолетов, вызванные как воздействием внешних источников излучения, так и различной собственной аппаратуры из-за их внутрисистемной несовместимости; в аэродромных системах наведения самолетов по тем же причинам; в автомобильных системах, влияющих на безопасность движения, из-за низкой помехоустойчивости;

## Важность проблемы био-ЭМС

*Негативное влияние* на здоровье человека электромагнитных излучений от различного рода радиоэлектронного оборудования, особенно высокой частоты (сотовые телефоны, радиостанции, СВЧ-печи, ВЧ-установки, станции космической, радиорелейной, тропосферной связи, радиолокационные станции), а также от высоковольтных линий передач.

## КЛАССИФИКАЦИЯ ОТКАЗНЫХ СИТУАЦИЙ

Категория *A* – катастрофическая: отказная ситуация, которая препятствует безопасному функционированию объекта

Категория *B* – опасная/критическая: отказная ситуация, которая приводит к уменьшению возможностей объекта или способности персонала справиться с неблагоприятными эксплуатационными режимами.

Категория *C* – существенная: отказная ситуация, которая приводит к снижению возможностей объекта или способности персонала справиться с неблагоприятными эксплуатационными режимами.

Категория *D* – несущественная: отказная ситуация, незначительно уменьшающая безопасность объекта и требующая действий персонала, которые осуществимы в пределах их возможностей.

Категория *E* – невлиющая: отказная ситуация, которая не воздействует на эксплуатационные возможности объекта или не увеличивает рабочую нагрузку персонала.

---



## Примеры проблем ЭМС

непредусмотренная остановка автомобилей определённых моделей на участке автостреды напротив радиовещательного передатчика в Германии;

самопроизвольное срабатывание дверных замков автомобилей от работающего внутреннего радиопередатчика;

нарушение работы кнопочных телефонов под воздействием радиопередатчиков определённых телевизионных и радиопрограмм;

помехи в системах авиационной связи от электронных контрольно-кассовых машин;

неконтролируемые запираения и открывания выдвижных ящиков и регистрация ложных сведений электронными устройствами в торговых терминалах с синтетическими товарами и одеждой персонала;

самопроизвольное открытие заграждающего барьера парковки автомобилей в автопарке при прикуривании сигарет от пьезоэлектрического прикуривателя;

появление сигналов “возможная опасность” и появление на светофоре красного света во время опускания пантографов электровозов;



## Примеры проблем ЭМС

- гибель эсминца “Шеффилд” во время войны за Фолклендские острова от ракеты «Экзосет», вовремя не обнаруженной корабельным радиолокатором обнаружения ракет в результате его вынужденного отведения в другую сторону и отключения из-за помех, наводимых корабельной спутниковой системой связи;
- несанкционированный выстрел с военного самолёта, садящегося на американский авианосец “Форрестол”, поразивший полностью оснащённый и заправленный самолёт, находившийся на палубе (взрыв и пожар, 134 погибших), из-за излучения локатора авианосца на системы самолёта через бортовой кабель с повреждённым заземлением экрана;
- многочисленные воздействия помех на системы управления полётом самолётов от мобильных телефонов, компьютеров, проигрывателей компакт-дисков, видеокамер, стереоаппаратуры, приводящие иногда к изменению направления полёта, в то время как приборы в кабине показывали направление правильного курса;
- сбой в пульте управления клапанами подачи хлора на заводе полупроводников и др.

## Примеры проблем ЭМС

В воскресенье 24 июля 1994 г. взрыв на заводе нефтепродуктов Техасо Refinery Милфорд Хевен и пожар в течение 2 суток. На расстоянии 3 км были выбиты стёкла в зданиях.

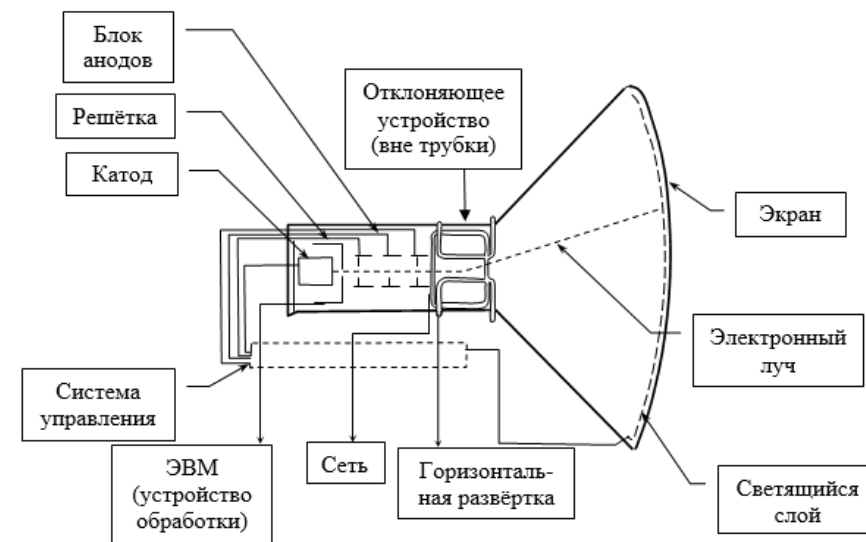
Пострадали 26 человек. Ущерб 48 мл. фунтов стерлингов.

Причина – электрические возмущения с 7.49 до 8.30, вызвавшие скачки перенапряжений в силовых электросетях, приведшие к электрическим и другим помехам на всём предприятии. Выключились большое число насосов. Персонал не заметил в спешке, что загоревшиеся огнеопасные вещества сконцентрировались в трубах и хранилищах. После 5 час частичных возгораний произошёл большой взрыв, эквивалентный взрыву 4 тонн взрывчатого вещества.

## Примеры проблем ЭМС

Помехи компьютерного оборудования с дисплеями на ЭЛТ. Объект - прокатный стан на одном из заводов Великобритании с мониторингом на ЭВМ в отдельном помещении. После монтажа оборудования электропривода с токами до  $\pm 8000$  А возникла проблема сильного влияния движения привода «вперёд-назад» на сдвиг изображения из-за полной невозможности получения необходимой информации и не только напряжения на глаза.

Замеренное магнитное поле соответствовало более 200 мкТл. Проблемы наступают при индукции более 1 мкТл. По оценкам помещение должно быть на расстоянии более 30 м.



## Примеры проблем ЭМС

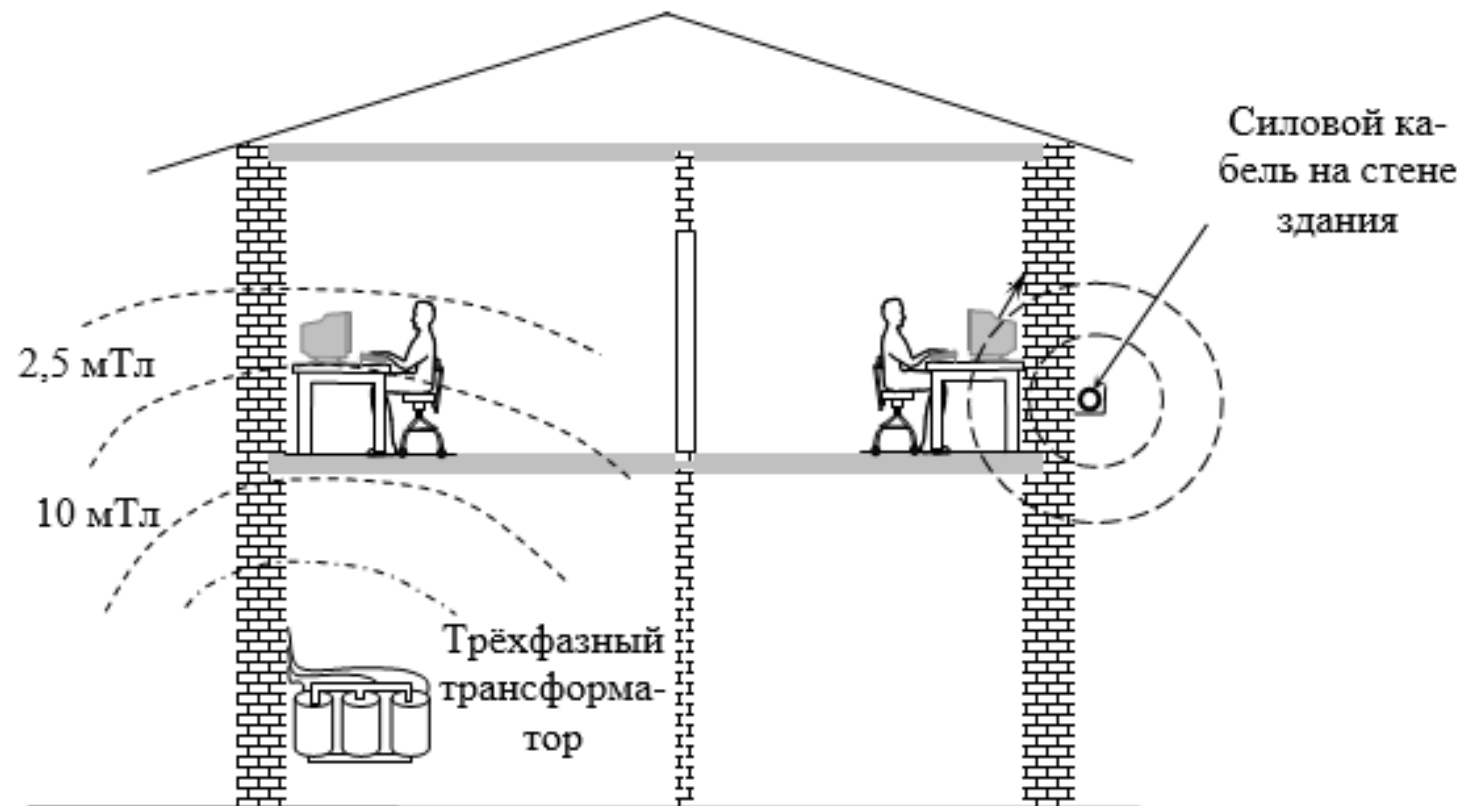
Помехи на дисплеях с ЭЛТ от уравнительных токов и трансформаторов промышленной частоты 50 Гц. Объект – криминальное управление, заводское помещение, кафедра РАПС и др. Замеренное магнитное поле соответствовало более 10 А/м. Уравнительные токи 40 – 55 А от трёхфазного кабеля, расположенного на стене.





# Примеры проблем ЭМС

Расчёт напряжённости магнитного поля  $H$  – достаточно простой, зная ток  $I$  и расстояние до кабеля  $l$ .  $H=I/(2\pi)$ .



## Примеры проблем ЭМС

Электрические приводы с регулируемой скоростью вращения с инверторами большой мощности (6 МВт) в Шотландии на перекачивающих станциях в Северном море. Воздушная линия электропередачи 33 кВ. Жалобы на плохую работу таксофонов, телевизоров, люминесцентных ламп. Проблемы гармоник на расстоянии до 12,5 миль на оборудование (таксофоны на расстоянии 4 мили от ВЛ полностью заглушались помехами, потеря синхронизации телевизионных приёмников (бегущее изображение), периодические колебания напряжения, подаваемого на светильники с люминесцентными лампами.

Гармоники высшего порядка вплоть до 100-й гармоники (5 кГц).



## Примеры проблем ЭМС

Утечка хлора на заводе полупроводников в Великобритании. Компьютерный пульт управления клапанами, используемыми для регулирования потока хлора и азота на заводе полупроводников. Устройство было восприимчивым к кондуктивным переходным помехам в сети электропитания. Сторожевая система компьютера не обеспечила перевод оборудования в безопасное состояние после выявления нарушений в работе. Утечка хлора произошла оттого, что все клапаны в контролируемом помещении были установлены в открытое положение.

---

## Примеры проблем ЭМС

Токи электрической тяги создавали помехи системам, связанным с безопасностью.

Системы слежения за присутствием поезда нарушалась из-за работы трёхфазного инвертора, питающий двигатель локомотива. Причина – возвратный ток частоты 50 Гц, проходящий через рельсы.

Решение – применение в локомотивах устройств обнаружения помехового тока частотой 50 Гц, превышающего определённое значение в течение времени более 450 мс, с отключением инвертора.

Дуги при пересечении токовых зазоров генерируют помехи на всех частотах, что приводило к срабатыванию устройств обнаружения помехового тока.

## Примеры проблем ЭМС

Что может дать провал напряжения? Особо чувствительные электронные приборы при низких напряжениях, как правило, отключаются. К примеру, системный блок ПЭВМ может отключиться или перезагрузиться, а вводимая информация на нем не сохранится. Возможны и более серьезные проблемы, особенно для электро медицинского оборудования. В результате кратковременного или длительного увеличения напряжения сети питания, называемого броском напряжения, превышающего предельно допустимое, достаточно часто выходят из строя электронные приборы и системы, к примеру домашние такие как телевизоры, музыкальные центры, радиоприемники и др.

# ЗАДАНИЯ НА ПРАКТИЧЕСКИЕ ЗАНЯТИЯ

**Домашнее задание. Выберите не менее двух из предложенных тем и сделайте презентации на 6 слайдов каждую.**

1. Особенности электрических и электронных изделий с точки зрения электромагнитной совместимости. Основные проблемы ЭМС. 2. Виды и показатели электромагнитной совместимости, соотношение по показателям совместимости технических средств и биоэлектромагнитной совместимости. 3. Классификация и характеристики электромагнитного окружения, в котором потенциально может работать электрическое или электронное изделие. Помехоустойчивость и помехозащита. 4. Механизмы проникновения электромагнитных помех в изделие. 5. Проблемы ЭМС при работе изделий в условиях плавания судов. 6. Возможные источники индуктивных и кондуктивных помех в изделиях. 7. Характеристика электромагнитных помех по показателям частоты, интенсивности, времени воздействия и последствиям. 8. Объекты в изделиях, являющиеся критичными на электромагнитную совместимость. Уровни несовместимости. 9. Эмиссия помех в системах питания. 10. Нормативные требования по электромагнитной совместимости применительно к проектируемым техническим системам. 11. Основные проблемы, возникающие при работе электротехнических и электронных изделий в электромагнитном окружении других устройств и систем, генерирующих индуктивные помехи. 12. Основные проблемы, возникающие при работе электротехнических и электронных изделий в электромагнитном окружении других устройств и систем, генерирующих кондуктивные помехи. 13. Элементы в изделиях, являющиеся критичными на электромагнитную совместимость. 14. Электромагнитный код (ЭМ-код) изделий. Методы испытаний по показателю ЭМ-код. 15. Фильтрация помех, способы обеспечения. 16. Экранирование помех, способы обеспечения. 17. Подавление помех, способы обеспечения. 18. Защита от статического электричества в изделиях с электронными компонентами. 19. Испытания электронных изделий на устойчивость к магнитному полю промышленной частоты. 20. Испытания электронных изделий на устойчивость к кондуктивным помехам по сети питания. 21. Испытания электронных изделий на устойчивость к высокочастотному электромагнитному полю. 22. Требования к датчикам информации изделий с точки зрения ЭМС и линиям связи физического интерфейса между отдельными элементами. 23. Основные требования к АЦП и ЦАП изделий с точки зрения ЭМС. 24. Требования по электромагнитной совместимости Российского морского регистра судоходства.



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Кафедра БЖД

## Раздел 2 ХАРАКТЕРИСТИКА ОСНОВНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИИ, ПРИБОРАХ И СИСТЕМАХ

2.1 Классификация и источники электромагнитных помех в ТС

2.2 Кондуктивные помехи

2.3 Изменение напряжения питания

2.4 Помехи, возникающие при коммутации электрических систем

2.5 Помехи в системах питания двойного (тройного) рода тока

2.6 Излучаемые электромагнитные помехи от электрооборудования

2.7 Источники электростатического разряда



# ПРОБЛЕМЫ



Рис. 1.2. ЭМС электроэнергетики с окружающей средой (ЭКО-ЭМС)



Рис. 1.3. ЭМС электроэнергетики с биосферой (БИО-ЭМС)



# ПРОБЛЕМЫ



Рис.1.4. ЭМС электроэнергетики с протяженными металлическими сооружениями (ТЕХНО-ЭМС)

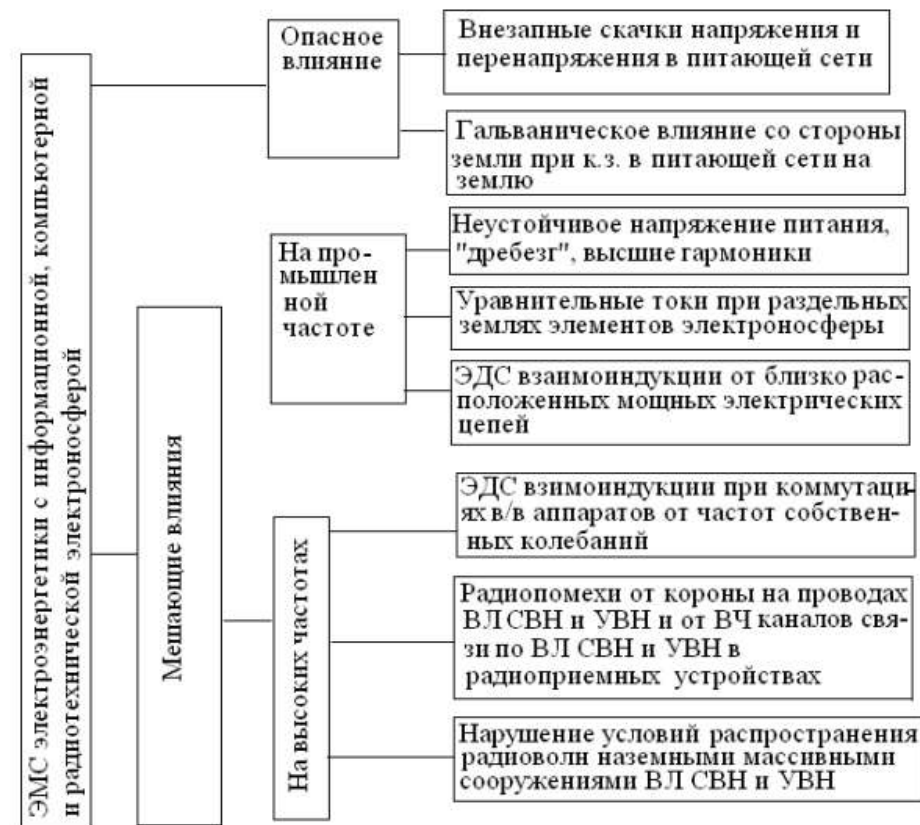
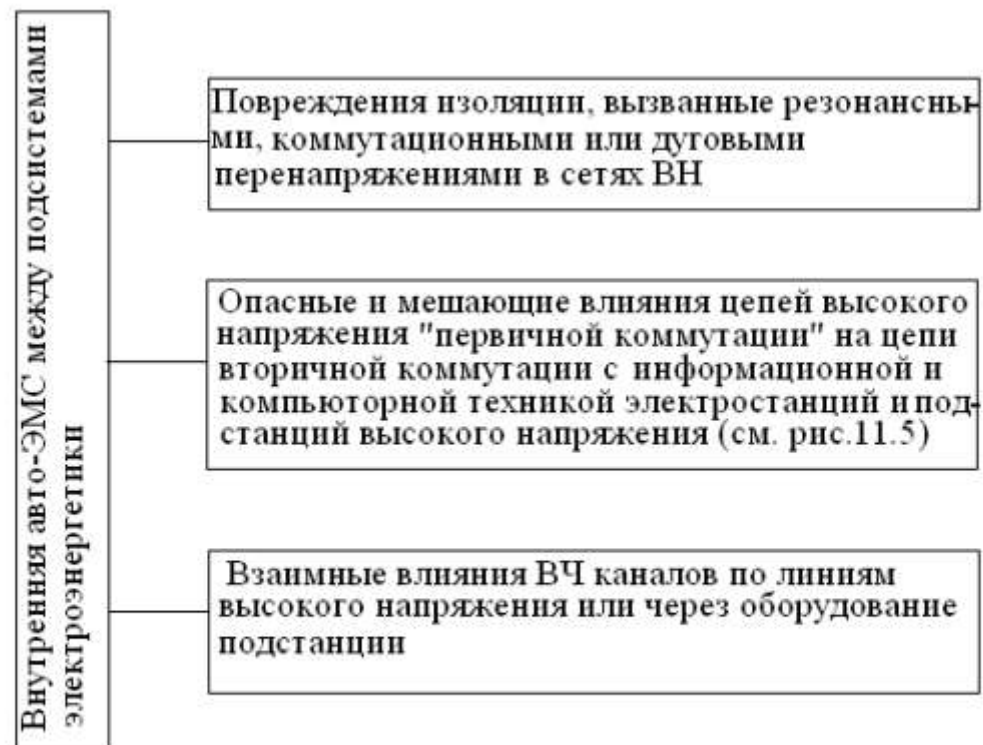


Рис.1.5. ЭМС электроэнергетики с информационной, компьютерной и радиотехнической электроносферой (ЭЛЕКТРОНО-ЭМС)

# ПРОБЛЕМЫ



Халилов Ф.Х. Электромагнитная совместимость электроэнергетики, техносферы и биосферы. Учебное пособие. СПб.: Издание НОУ «Центр подготовки кадров энергетики», 2014 - 190 с

Рис.1.6. Внутренняя ЭМС между подсистемами электроэнергетики (ИНТЕР-ЭМС)



2.1 Классификация и возможные источники электромагнитных помех в технических средствах. Характеристика помех по показателям частоты, интенсивности, времени воздействия и последствиям. Объекты, являющиеся чувствительными и пассивными к воздействию электромагнитных помех. Уровни совместимости.

---



# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

## С точки зрения устройства

- **кондуктивные помехи** - электромагнитные помехи, для которых энергия передается через один или более проводников
  - **излучаемые помехи** - электромагнитные помехи, для которых энергия передается через пространство в виде электромагнитных волн
-



# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

## По частотным и амплитудным характеристикам

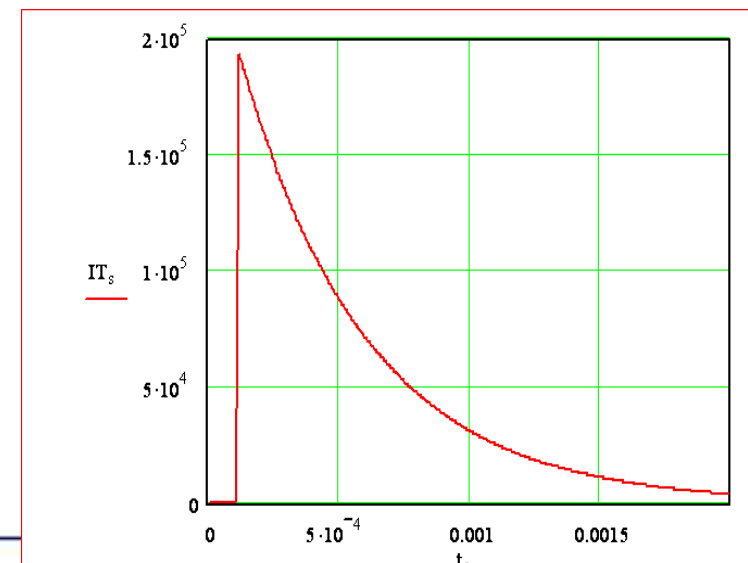
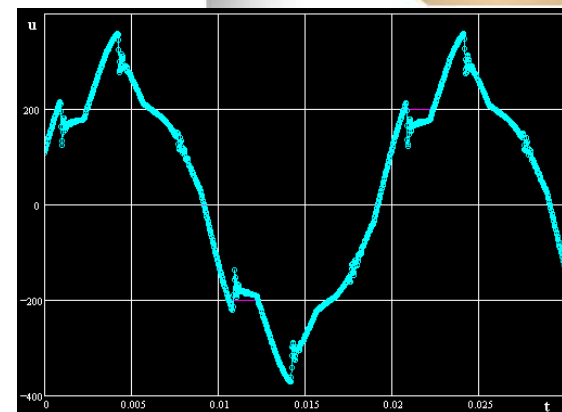
- Провалы напряжения, короткие перерывы и изменения напряжения;
  - Осцилляции, быстрые переходные процессы, микросекундные импульсы высоких энергий;
  - Радиочастотные электромагнитные поля;
  - Электростатические разряды (ЭСР) от заряженных предметов человека
  - Низкочастотные электрические и магнитные поля
-



# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

## С точки зрения устройства: внешние

- Помехи от системы электроснабжения;
- Помехи от внешних щеточных моторов, тиристорных, транзисторных преобразователей частоты, сварочных систем и др.;
- Помехи от грозовых разрядов  
Pulse-rise time:  $10\text{ }\mu\text{s}$ ; Pulse-width time:  $350\text{ }\mu\text{s}$ . Frequency:  $>10\text{ kHz}$ . Average current value: **300 kA**





# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ

## С точки зрения устройства: внутренние

- Встроенные источники питания (AC/DC, DC/DC преобразователи)
- Трансформаторы и реакторы
- Реле, контакторы, электрические моторы
- Помехи в цепях заземления



## УРОВЕНЬ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ:

Регламентированный уровень электромагнитной помехи, используемый в качестве опорного в целях координации при установлении уровней электромагнитной эмиссии и устойчивости к электромагнитной помехе.

### Примечания

1 Обычно уровень электромагнитной совместимости выбирается так, чтобы уровень реальной электромагнитной помехи мог превысить его лишь с малой вероятностью. Однако электромагнитная совместимость достигается только в случае, если уровни электромагнитной эмиссии и устойчивости к электромагнитной помехе контролируются таким образом, чтобы для каждого места уровень электромагнитной помехи, возникший в результате совместной эмиссии всех источников, был ниже, чем уровень помехоустойчивости каждого технического средства, расположенного в том же месте.

2 Уровень электромагнитной совместимости может зависеть от электромагнитного явления, времени или места размещения.

# ВИДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ:

## 1. *Кондуктивные низкочастотные электромагнитные помехи:*

гармоники, интергармоники напряжения электропитания; напряжения сигналов, передаваемых в системах электропитания; колебания напряжения электропитания; провалы, кратковременные прерывания и выбросы напряжения;

отклонения напряжения; несимметрия напряжений в трехфазных системах электроснабжения; изменения частоты питающего напряжения; наведенные низкочастотные напряжения; постоянные составляющие в электросетях переменного тока.

## 2. *Излучаемые низкочастотные электромагнитные помехи:*

магнитные поля; электрические поля.

## ВИДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ:

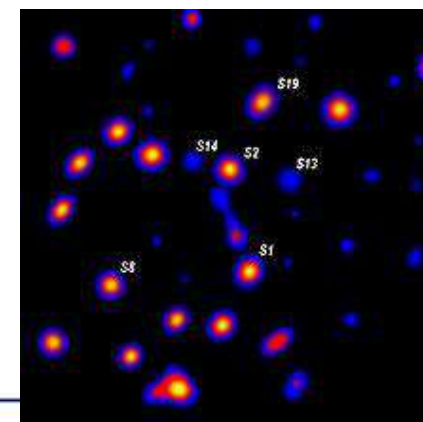
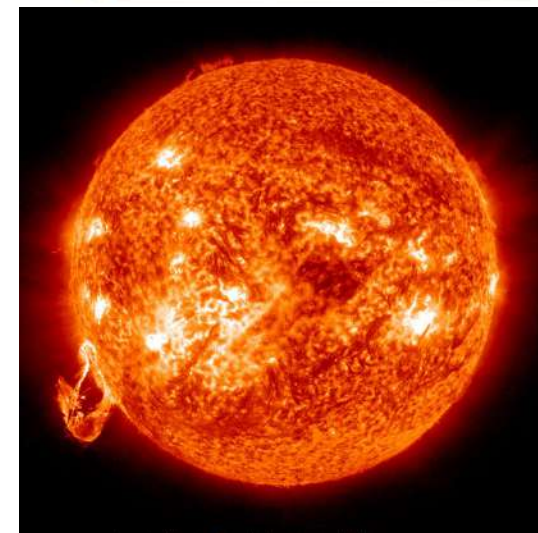
3. *Кондуктивные высокочастотные электромагнитные помехи:*  
наведенные напряжения или токи непрерывных колебаний; апериодические переходные процессы; колебательные переходные процессы.
4. *Излучаемые высокочастотные электромагнитные помехи:*  
магнитные поля; электрические поля; электромагнитные поля, в том числе вызываемые непрерывными колебаниями и переходными процессами.
5. *Электростатические разряды.*
6. *Электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и другие электромагнитные явления и процессы большой энергии, которые могут представлять угрозу для ТС гражданского назначения (дополнительно к классификации помех, указанных в стандарте).*



# ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ

## Естественный шум

- Космическое микроволновое фоновое излучение. Фоновое излучение является изотропным и имеет термальный спектр черного тела при температуре 2,725 Кельвина. Его спектр достигает максимума на частоте 160,2 ГГц
- Солнечный радиошум: пропорционален солнечной активности и генерации солнечных выступов и вспышек. Спутниковые наблюдения показали, что рентгеновское и ультрафиолетовое излучение особенно интенсивно в центре солнечных вспышек.
- Галактический шум. Этот сложный радиоисточник в центре нашей Галактики идентифицирован как Стрелец А, и он мог бы в равной степени быть правдоподобным местом для сверхмассивной черной дыры, которая, как считают астрофизики, находится в центре нашей Галактики.



# ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ

## Техногенные источники помех

- Системы зажигания ДВС
- Линии электропередач высоких и сверхвысоких напряжений
- СВЧ-печи и промышленные источники СВЧ-излучения
- Электроприводы
- Функциональные радиопередатчики

...

Широкий частотный диапазон, варьирующийся от нескольких десятков Гц (обычно 50–60 Гц, в зависимости от частоты энергосистемы) до десятков ГГц (полосы частот современных систем связи).





# ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ

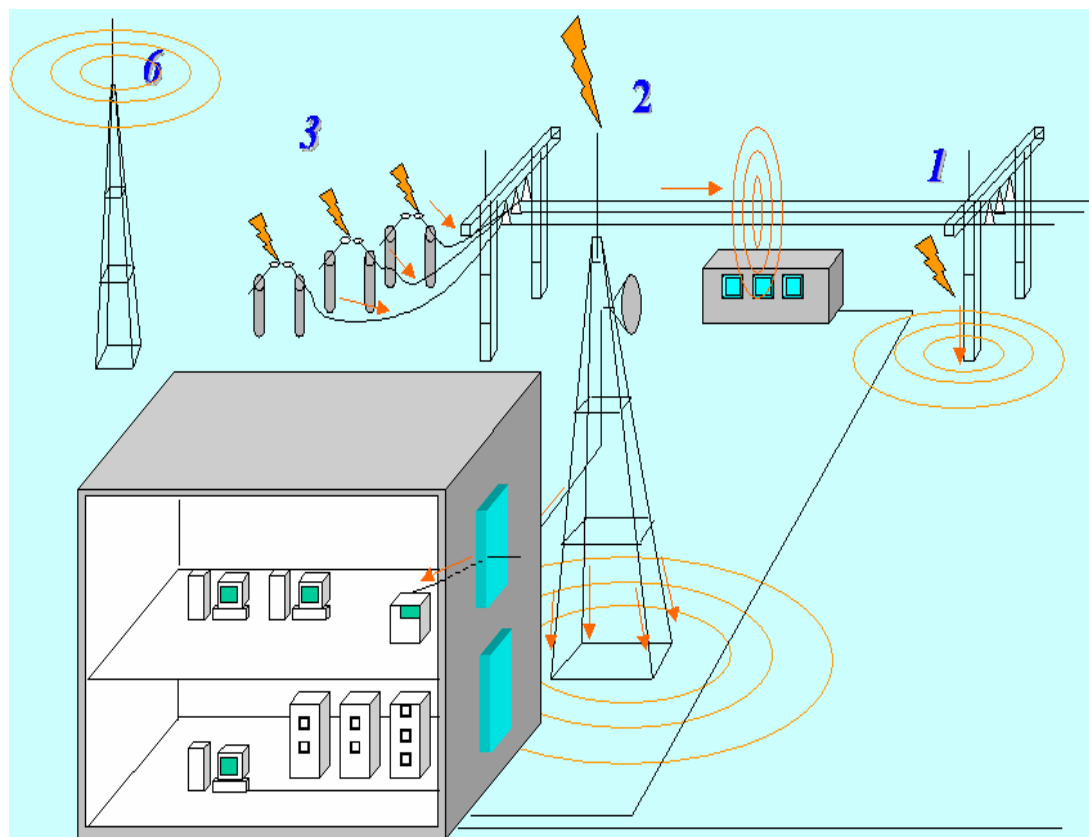
## Техногенные источники помех на судне

- Коммутация асинхронного двигателя, создающая импульсные напряжения
- ЭВМ, генерирующие помехи широкого диапазона частот
- Двигатели постоянного тока с широкополосными помехами
- Полупроводниковые преобразователи частоты, искажающие синусоидальное напряжение
- Радиооборудование и излучающие антенны
- Молнии

...

---

# ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ



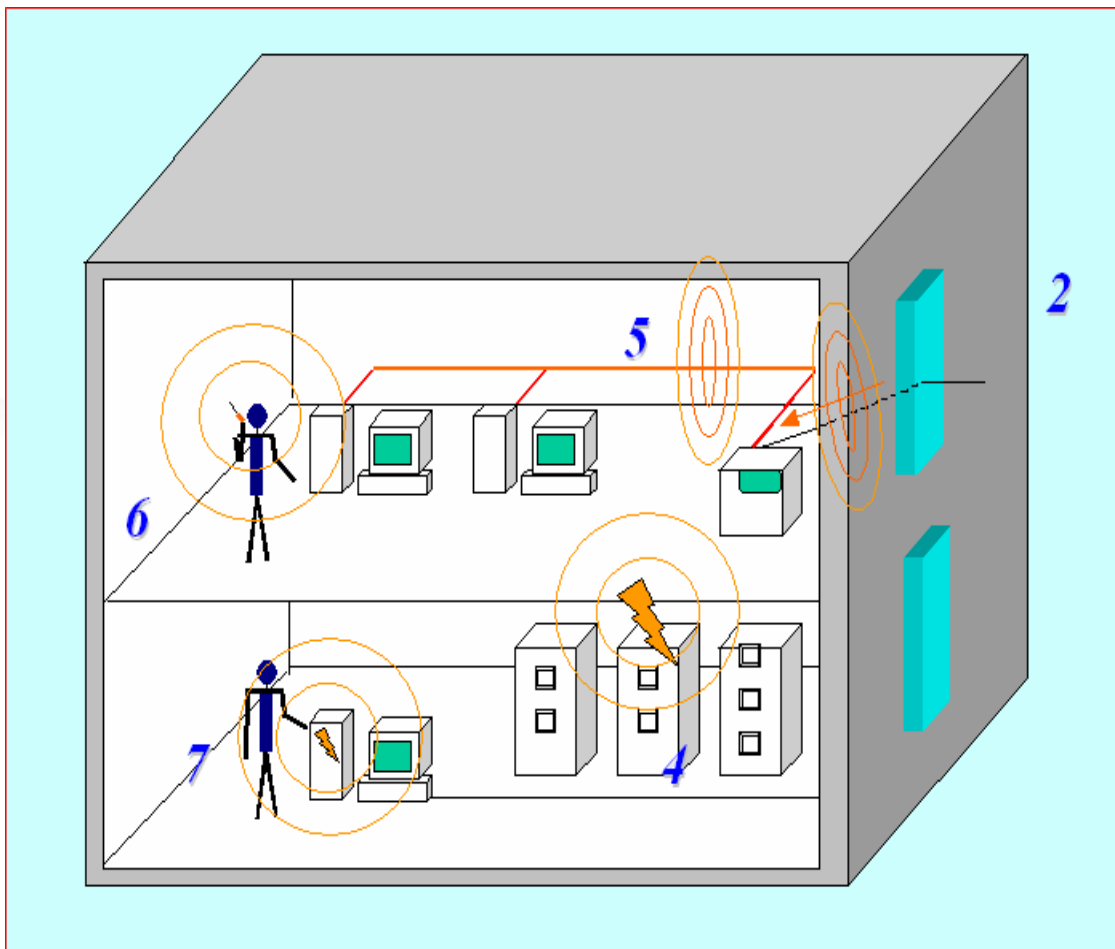
- 1- Короткие замыкания;
- 2- Молниевые разряды;
- 3 – Переходные процессы в высоковольтном оборудовании (коммутационные процессы)
- 4, 5, 7 – внутренние источники помех в зданиях и оборудовании
- 6 – Функциональные радиопередатчики

Системы, установленные снаружи сооружения, могут подвергаться риску воздействия незатухающего магнитного поля и, если они расположены в незащищенном месте, воздействию перенапряжений, создаваемых полным током молнии при прямом ударе молнии

# ИСТОЧНИКИ ПОМЕХ

- 5 – Переключение электромеханических реле, контакторов...;
- 6 – Работа ППЭЭ: тиристорные выпрямители, транзисторные инверторы, шаговые электроприводы..;
- 7 – Электростатические разряды (ESD);

Внутренние системы, установленные внутри или на сооружении, имеющие ограниченный уровень стойкости к перенапряжениям и к магнитным полям, могут быть повреждены или могут работать неправильно при воздействии молнии и возникающих вследствие этого магнитных полей



Электромагнитные воздействия не затрагивают только технические средства, пассивные в отношении ЭМС:

- провода, шнуры, кабели и кабельные сборки;
- технические средства, содержащие только резистивную нагрузку и не имеющие автоматических переключающих устройств, например бытовые электрические обогреватели без термостатов или вентиляторов;
- электрические батареи и аккумуляторы и питаемое от них световое оборудование без активных электронных цепей;
- наушники и громкоговорители без функций усиления;
- защитное оборудование, создающее переходные электромагнитные помехи малой длительности (значительно менее 1 с) в результате срабатывания при коротком замыкании или ненормальной ситуации в электрической цепи, не содержащее предохранителей (устройств аварийного отключения) с активными электронными частями;

- конденсаторы, например конденсаторы для коррекции коэффициента мощности;
- высоковольтное оборудование, в котором источники электромагнитных помех обусловлены только локализованными дефектами изоляции (например, высоковольтные индукторы, высоковольтные трансформаторы), при условии, что указанное оборудование не содержит активных электронных частей;
- индукционные электродвигатели;
- лампы накаливания;
- кварцевые часы (без дополнительных функций, например, радиоприема);
- штепсели, розетки, плавкие предохранители, выключатели и автоматические выключатели без активных электронных цепей;
- пассивные антенны для приема радио- и телевидения.



## 2.2 КОНДУКТИВНЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ ПОМЕХИ



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

### 2.2.1 ГАРМОНИКИ, ИНТЕРГАРМОНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Гармоники являются синусоидальными изменениями напряжения электропитания, имеющими частоту, кратную основной частоте сети.

Гармоники напряжения являются результатом протекания токов, возникающих в нелинейных нагрузках. Указанные токи вызывают падение напряжения на полном сопротивлении сети электропитания. Токи и напряжения гармоник от различных источников складываются геометрически так, что результирующее напряжение меньше или равно арифметической сумме всех составляющих.

Данные, касающиеся интергармоник, находятся на рассмотрении. Полного понимания природы электромагнитных возмущений, ассоциирующихся с интергармониками, еще нет.

---

## ГАРМОНИКИ

Различают источники гармоник напряжения двух видов:

- электрические приборы, подключаемые в значительном количестве к низковольтным распределительным электрическим сетям (в том числе ТС, питающиеся выпрямленным током, включая бытовые приборы, телевизоры, персональные компьютеры, а также электроприборы, имеющие тиристорное управление, и т. д.);
- промышленное оборудование, подключаемое к электрическим сетям низкого, среднего или высокого напряжения (регулируемые электроприводы, тяговые выпрямители, силовые преобразователи, дуговые печи, сварочные установки и т.д.).

Первичной причиной гармоник в низковольтных распределительных электрических сетях являются многочисленные небольшие источники. Источники значительных помех существенны в промышленных зонах.

ЭМС рассматривается как «совместимость с системами электроснабжения», в основном сетями питания переменного тока, реже постоянного тока.

---

## ИНТЕРГАРМОНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

**Интергармоники** - это гармонические колебания с частотами, не кратными частоте питающей сети. В амплитудно-частотном спектре они находятся между каноническими гармониками либо каноническими и неканоническими. Для интергармоник с частотой более 50 Гц иногда используется термин «дробные ультрагармоники».

Таблица Спектральные составляющие волны (частоты $f$ )	
Гармоника	$f = nf_1$ , где $n$ является числом кратности больше нуля
Компонент постоянного тока	$f = nf_1$ для $n = 0$
Интергармоника	$f \neq nf_1$ , где $n$ является числом кратности больше нуля
Субгармоника	$f > 0$ Гц и $f < f_1$
* $f_1$ – основная частота по напряжению	

## ИНТЕРГАРМОНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Интергармоники могут появляться при любых значениях напряжения и перетекать из одних систем в другие. Так, интергармоники, образовавшиеся в сетях высокого и среднего напряжения, переходят в сети низкого напряжения и наоборот. Амплитуда интергармоник редко превышает 0,5 % значения амплитуды основной частоты, но в условиях резонанса могут возникнуть и большие значения.

Основные источники возмущений включают:

- дуговые нагрузки;
- электроприводы с переменной нагрузкой;
- статические преобразователи, в частности преобразователи частот с прямым и косвенным управлением;
- устройства управления фазами.

Интергармоники могут также вызываться колебательными явлениями, возникающими, например, в системах с сериями или параллельно установленными конденсаторами или специфическими режимами работы силовых трансформаторов.

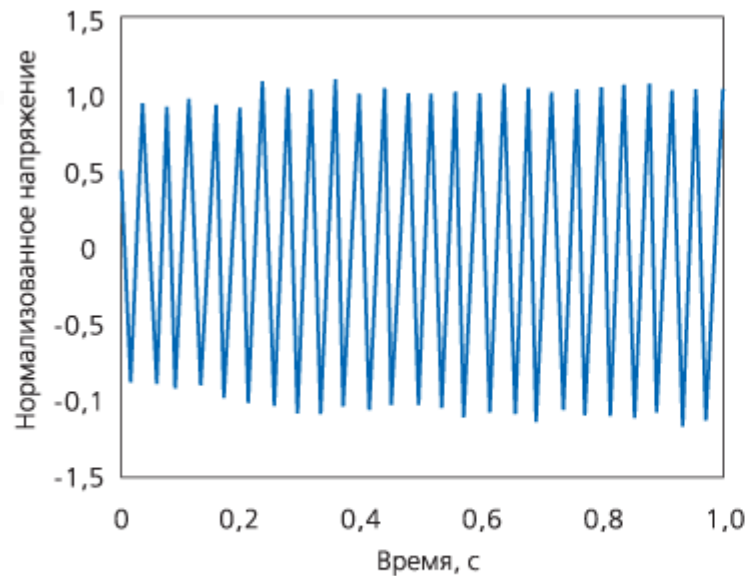
В системе питания всегда присутствует фоновый гауссов шум во всем спектре частот. Типичные возмущения составляют (МЭК 1000-2-1):

- 40–50 мВ (около 0,02 %  $U_n$ ) при измерении в полосе частот 10 Гц;
  - 20–25 мВ (около 0,01 %  $U_n$ ) при измерении в полосе частот 3 Гц, где  $U_n$  соответствует номинальному напряжению (230 В).
-

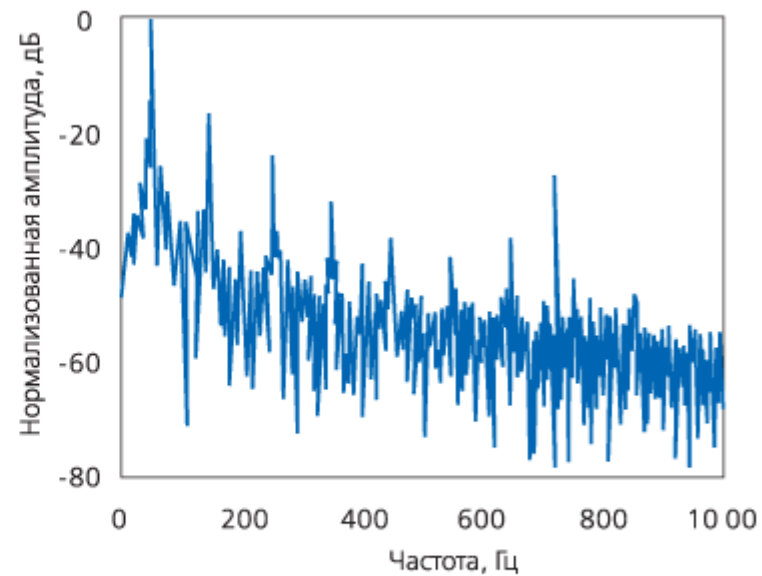
## ИНТЕРГАРМОНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

- дуговые нагрузки;

Эта группа включает дуговые печи и сварочные аппараты. Дуговые печи обычно не производят значительные интергармоники, кроме тех случаев, когда в результате резонанса происходит их усиление. Переходные процессы – источник интергармоник – практически всегда возникают в начале режима плавления (рисунок).



а) колебания напряжения

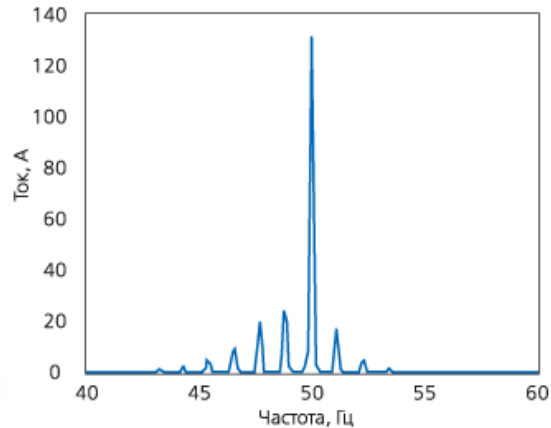


б) спектр с гармониками (пики) и интергармониками  
(Power system quality assessment, Wiley, 2000)

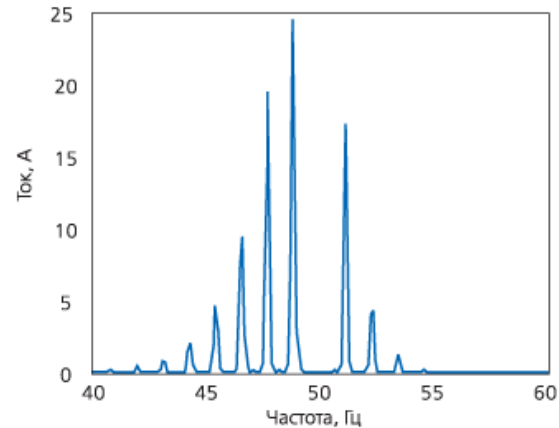
Издание Европейского института  
меди «Прикладные аспекты  
качества электроэнергии»



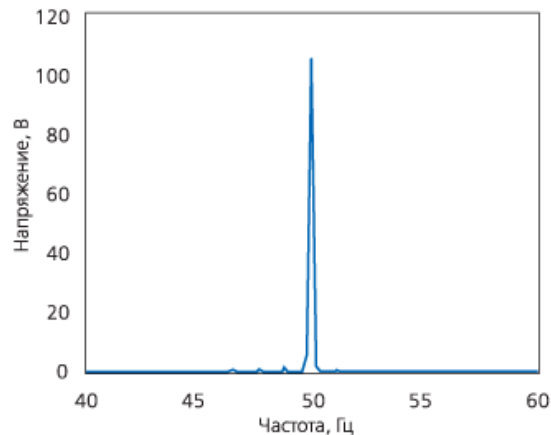
## ИНТЕРГАРМОНИКИ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ



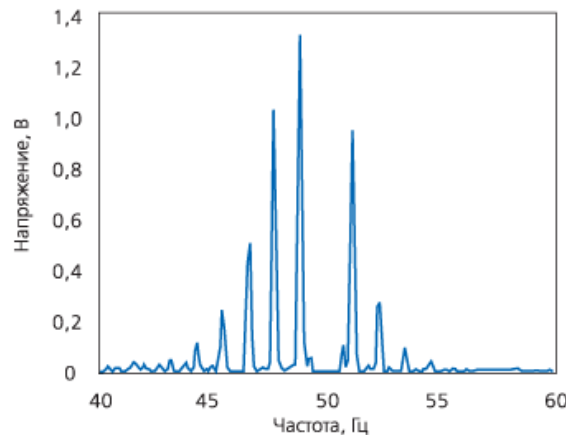
а) частотный спектр тока



б) частотный спектр тока



с) частотный спектр напряжения



д) частотный спектр напряжения

Индуктивные электродвигатели могут быть источником интергармоник из-за щелей между металлом в роторе и статоре, особенно при насыщении магнитного контура (так называемые щелевые гармоники). При постоянной скорости вращения частоты возмущающих компонентов обычно находятся в пределах 500–2 000 Гц, но в период пуска и разгона двигателя их значения могут быть шире. Естественные элементы асимметрии конструкции электропривода (отклонения от детальных чертежных геометрических размеров, несоосность, например) могут также являться причиной возникновения интергармоник (рисунок).

Результаты спектроизмерения фаз тока и напряжения электродвигателя на его разъемах; а), с) – полный спектр; б), д) – спектр с исключенной основной частотой

# КОНДУКТИВНЫЕ ПОМЕХИ

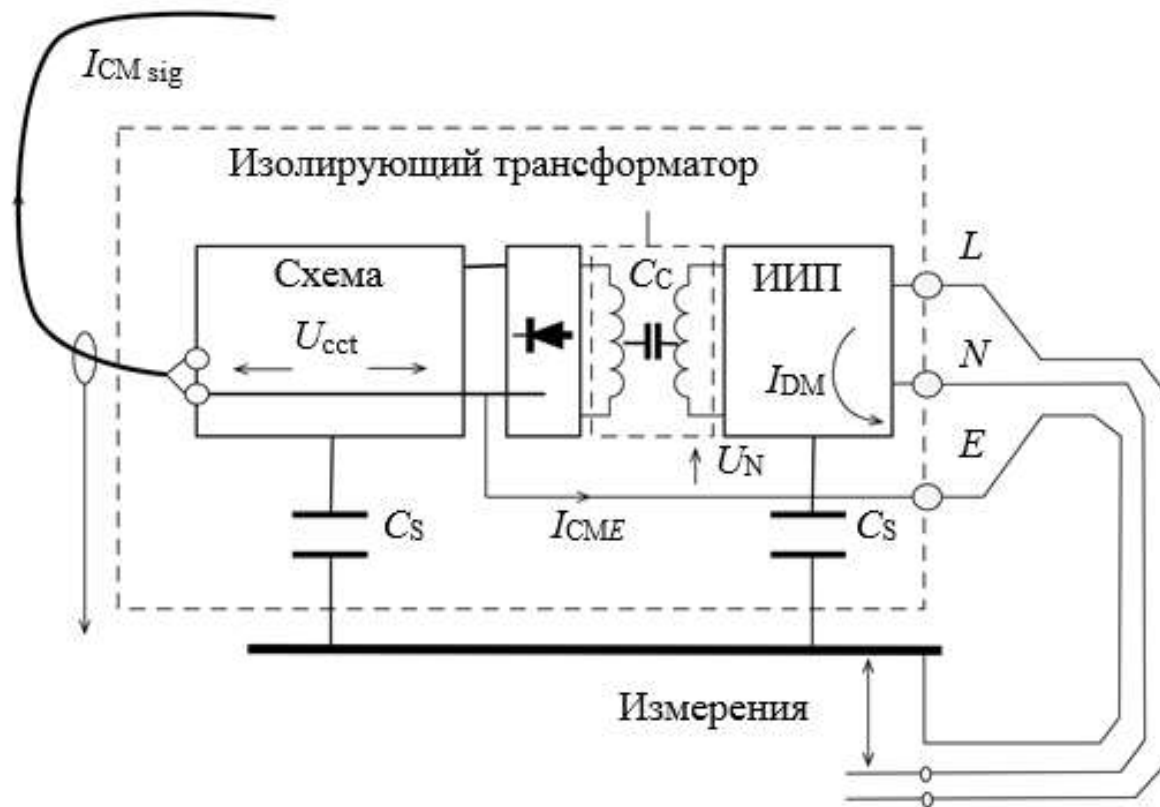


Рис. 2.7. Пути паразитной связи для эмиссии кондуктивных помех

Источники помех внутри оборудования или его источника питания связаны с силовым кабелем, в частности индуктивно или ёмкостно через другой кабель. Сигнальные кабели и кабели управления могут также действовать как пути связи. Результирующая помеха может проявляться или как дифференциальный сигнал (между фазным и нейтральным либо между сигнальными проводниками), или как синфазный сигнал (между фазным/нейтральным/сигнальным и заземляющим проводниками), или как совокупность обоих видов.



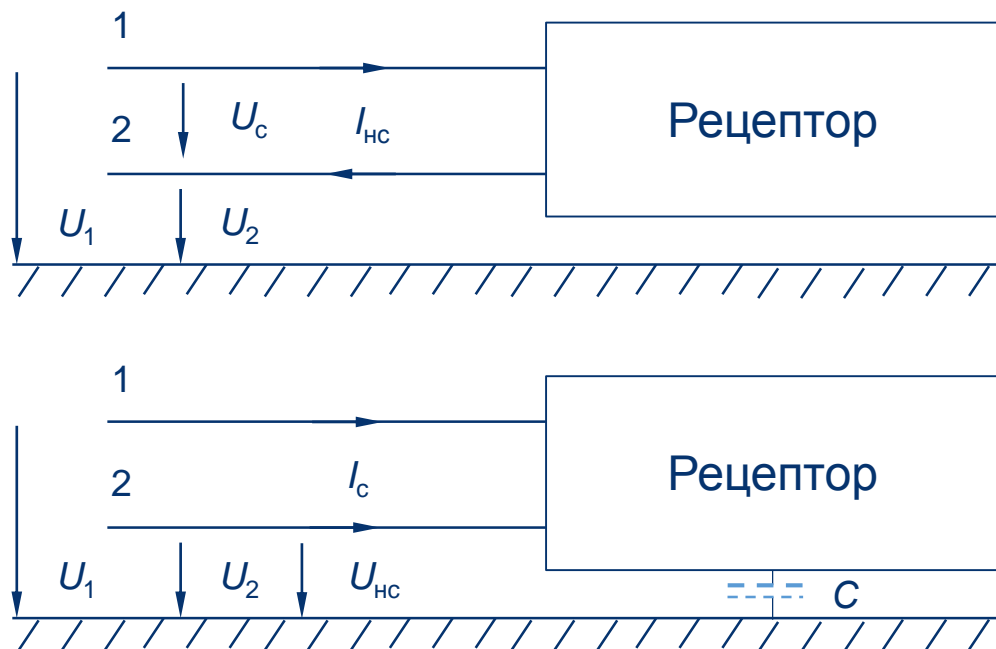
# КОНДУКТИВНЫЕ ПОМЕХИ

**Симметричный ток:** Половина векторной разности токов, протекающих в двухпроводниковом кабеле или в любых двух проводниках многопроводникового кабеля.

**Общий несимметричный ток:** Векторная сумма токов, протекающих в двух проводниках, включая экран кабеля (при наличии), или в большем числе проводников.

---

## СИММЕТРИЧНЫЕ И НЕСИММЕТРИЧНЫЕ КОНДУКТИВНЫЕ ПОМЕХИ



Симметричные, нормального вида, дифференциальные, поперечные (напряжения помех  $U_1$  и  $U_2$  содержат симметричную  $U_c$  и  $I_c$  составляющую, определяемые как  $U_c = U_1 - U_2$  и  $I_c = (I_1 - I_2)/2$ ). Несимметричные, общего вида, синфазные, продольные (напряжения помех  $U_1$  и  $U_2$  содержат несимметричную  $U_{hc}$  и  $I_{hc}$  составляющую, определяемые как  $U_{hc} = (U_1 + U_2)/2$  и  $I_{hc} = (I_1 + I_2)/2$ ).

Кондуктивные помехи могут быть приложены к рецептору между проводами, как прикладывается рабочее напряжение, и между проводами и землёй (корпусом судна, самолёта)

# ПРИМЕР КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ

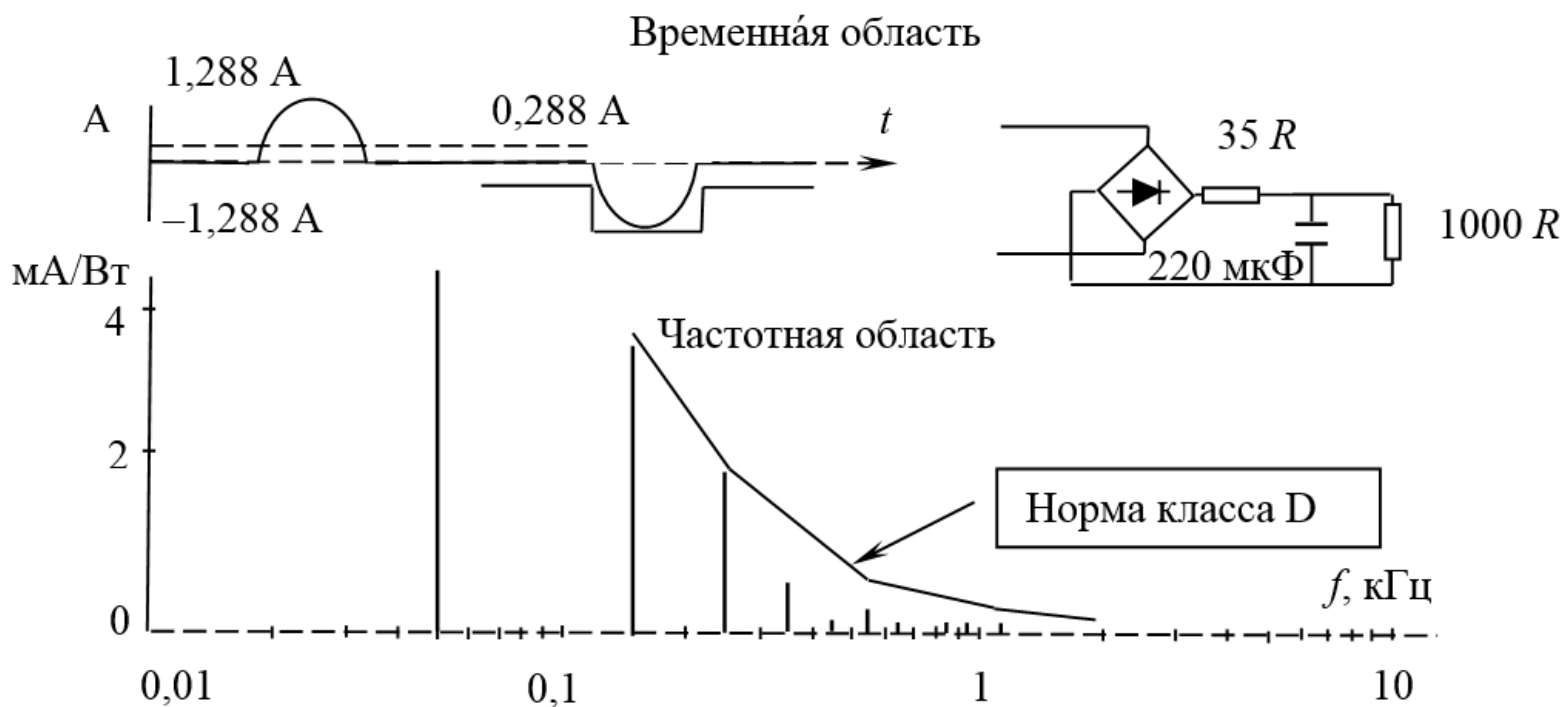
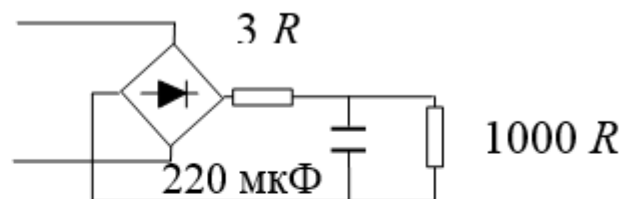
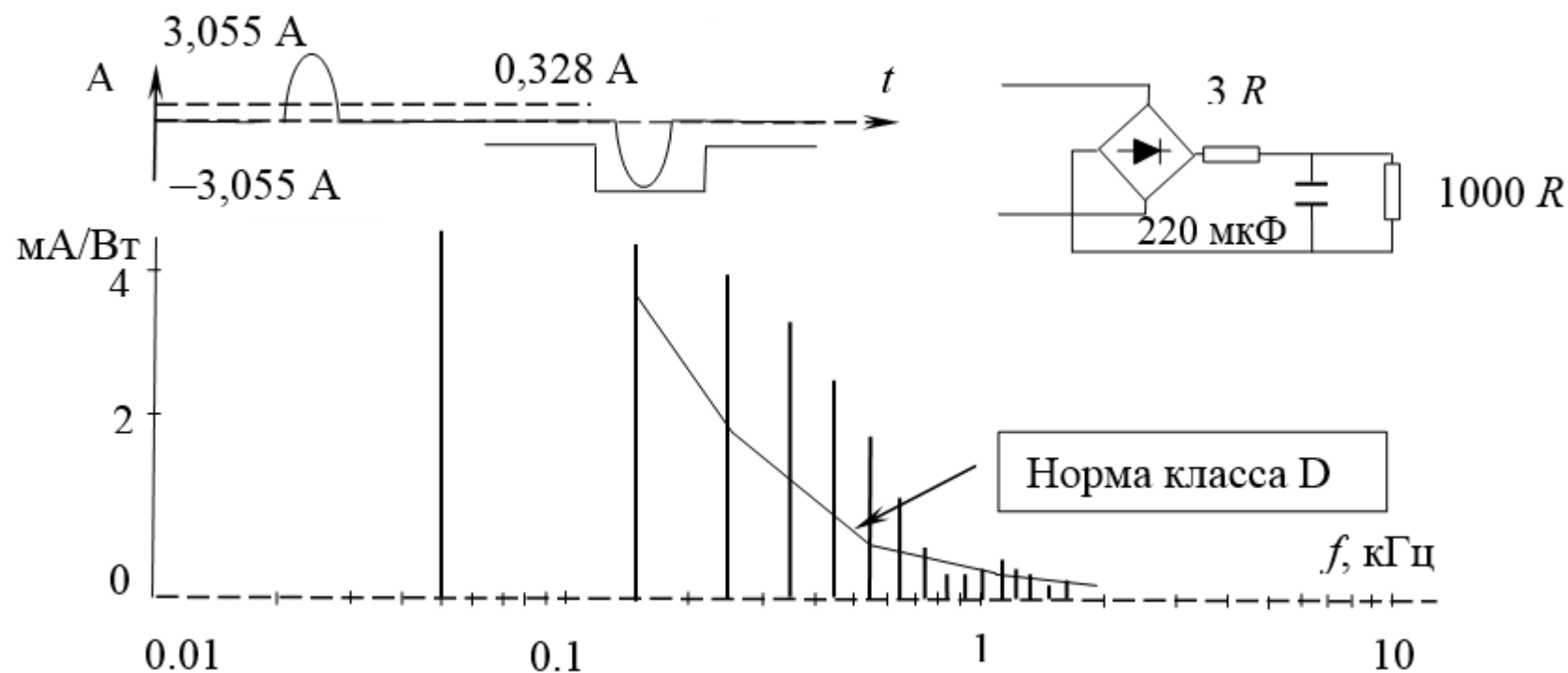


Рис. 4.1. Гармоники тока на входе сети электропитания

На рисунке, который является Фурье-анализом текущей формы волны, рассчитанной во временной области, показано содержание гармоник входного тока для схемы выпрямителя с довольно большим последовательным сопротивлением перед емкостным накопителем. Это значение последовательного сопротивления обычно не применяется за исключением неэффективных трансформаторных источников. Уровень пятой гармоники соответствует требованиям к оборудованию класса D (ТС с потребляемым током, характеризующимся "специальной формой кривой" и активной мощностью, не превышающей  $600 \text{ Вт}$ ).



# ПРИМЕР КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ



Рассматриваются гармоники (чётные и нечётные). При менее детальном подходе часто используется суммарный коэффициент гармонических искажений THD (Total Harmonic Distortion) или коэффициент искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_{нс}$

$$THD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} \left( \frac{H_n}{H_1} \right)^2} \cdot 100\%$$

Иллюстрирует различие в спектре гармоник входного тока в результате десятикратного уменьшения входного сопротивления. Это значение входного сопротивления является типичным для импульсных бестрансформаторных источников питания, а многие высокоэффективные источники питания могут обладать более низкими значениями сопротивления  $R$ . Пиковый ток на входе увеличился заметно, в то время как его рабочий цикл сжался, приведя к более высоким уровням гармоник.

## КОНДУКТИВНЫЕ ПОМЕХИ

Несинусоидальность напряжения. Характеризуется следующими показателями:

коэффициентом искажения синусоидальности кривой напряжения;

коэффициентом  $n$ -й гармонической составляющей напряжения.

Вычисляют значение коэффициента  $n$ -й гармонической составляющей напряжения  $K_{U(n)i}$  в процентах (как результат  $i$ -го наблюдения) по формуле

$$K_{U(n)i} = \frac{U_{(n)i}}{U_{(1)i}}$$

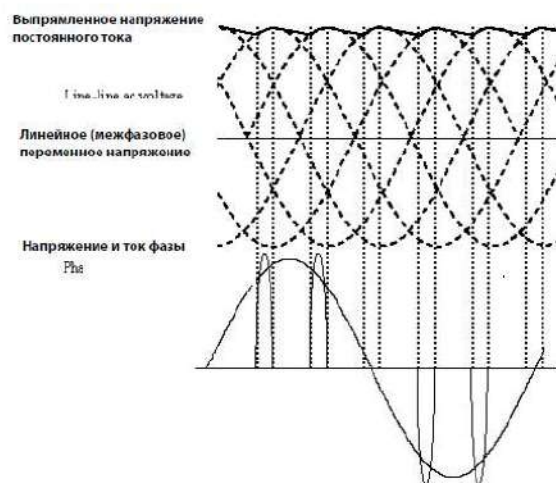
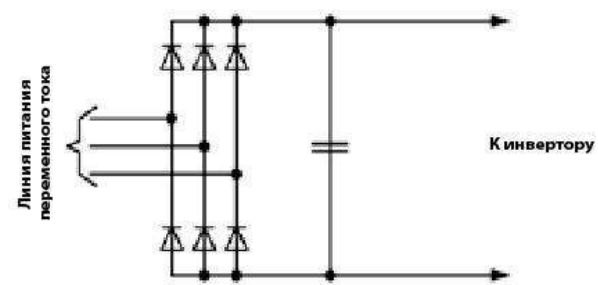
где  $U_{(1)i}$  — действующее значение напряжения основной частоты на  $i$ -м наблюдении, В.

Значение коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_{Ui}$  в процентах (как результат  $i$ -го наблюдения) вычисляют по формуле

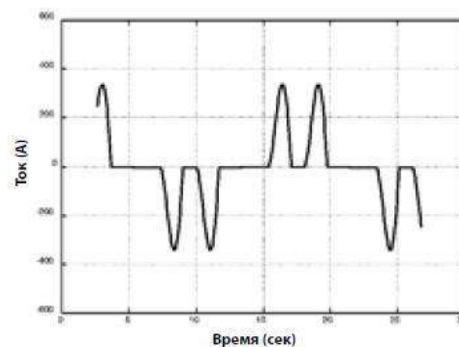
$$K_{Ui} = \frac{\sum_{n=2}^{40} U_{n(i)}^2}{U_{(1)i}} \cdot 100$$

где  $U_{(1)i}$  — действующее значение междуфазного (фазного) напряжения основной частоты для  $i$ -го наблюдения, В.

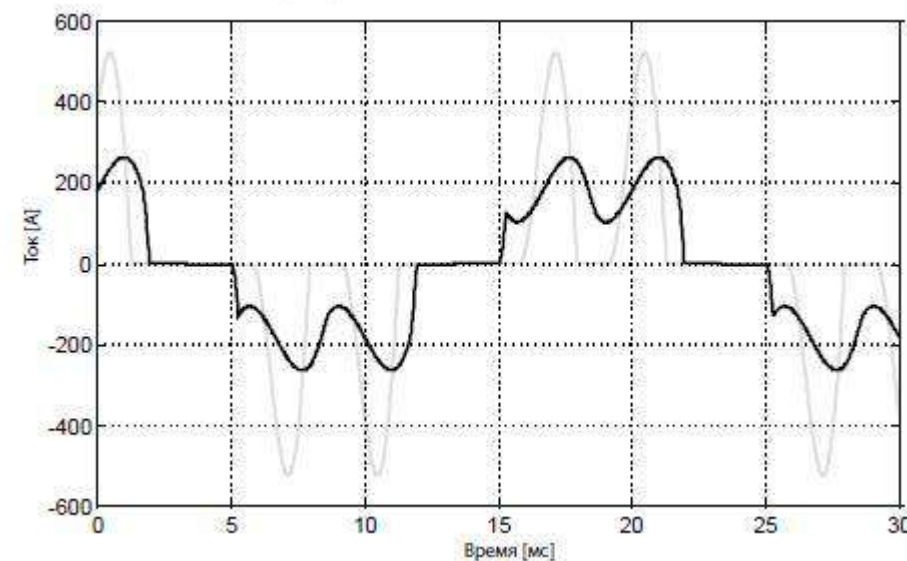
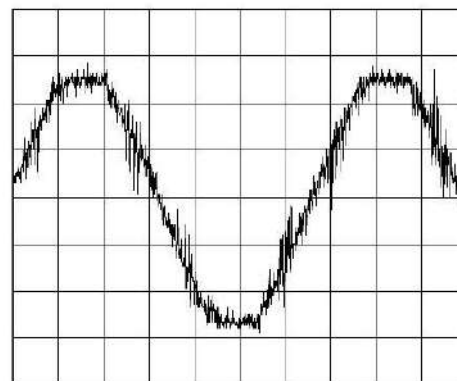
# ИСКАЖЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ И ТОКА



Кривая линейного напряжения  
Вход с большим пиковым током



Ток на входе в базовый  
преобразователь частоты



Ток на входе в преобразователь  
частоты с входными реакторами

Кривая линейного напряжения

# КОНДУКТИВНЫЕ ПОМЕХИ

Уровни электромагнитных помех в части гармоник напряжения в низковольтных системах электроснабжения (в процентах от напряжения основной частоты), а также значения коэффициента искажения синусоидальности кривой напряжения  $K_{нс}$ .

Степень интенсивности помехи	Порядок гармоник																	
	K <sub>нс</sub> , %	Нечетные гармоники (не кратные 3)								Нечетные гармоники (кратные 3)					Четные гармоники			
		5	7	11	13	17	19	23, 25	>25	3	9	15	21	>21	2	4	6, 8, 10	>10
A	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида																	
1	8	6	5	3,5	3	2	1,5	1,5	— <sup>1</sup>	5	1,5	0,3	0,2	0,2	2	1	0,5	0,2
2	10	8	7	5	4,5	4	4	3,5	— <sup>2</sup>	6	2,5	2	1,7	1	3	1,5	1	1
X	В соответствии с характеристиками места размещения ТС																	

Степень интенсивности A применяется для систем электроснабжения, защищенных от электромагнитных помех, и для ТС, которые могут быть восприимчивы к гармоникам напряжений в питающей сети (контрольно-измерительное лабораторное оборудование, средства управления технологическими процессами и вычислительной техникой). 1 (2) – общая (промышленная) сеть

## 2.2.2 НАВЕДЕННЫЕ НИЗКОЧАСТОТНЫЕ НАПРЯЖЕНИЯ

Низкочастотные токи, протекающие в силовых кабелях, могут (в зависимости от их силы, условий размещения и типа кабелей, а также других параметров) наводить низкочастотные электромагнитные помехи в сигнальных кабелях и кабелях управления, подключенных к ТС. Помехи, наводимые в результате протекания токов в подводящих питание кабелях на частоте сети и частотах гармоник, в нормальных условиях эксплуатации составляют для частот от 50 Гц до 1 кГц 0,05...20 В; от 1 до 20 кГц – 0,05...1 В; а в аварийных условиях для частот от 50 Гц до 1 кГц – 100...3000 В.

Степень интенсивности помех	Помехи, наводимые в результате протекания токов в подводящих питание кабелях на частоте сети и частотах гармоник		
	Номинальные условия эксплуатации		Аварийные условия
	От 50 Гц до 1 кГц <sup>1</sup>	От 1 до 20 кГц	От 50 Гц до 1 кГц
A	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида		
1	0,05...1	0,05	100
2	0,15...3	0,15	300
3	0,5...10	0,5	1000
4	1...20	1	3000 <sup>2</sup>
X	В соответствии с характеристиками места размещения ТС		



## 2.3 ИЗМЕНЕНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ:

В системах электроснабжения переменного тока частотой 50 Гц возникают изменения напряжения различного вида:

- непрерывные или случайно повторяющиеся и относительно быстрые колебания в пределах допустимых установившихся отклонений напряжения электрической сети с частотой изменения напряжения от 25 раз в секунду до одного в минуту. Наиболее мешающий эффект колебаний напряжения – это мерцание световых приборов (главным образом, ламп накаливания малой мощности) – фликер, создающее физиологический дискомфорт. Источниками указанных колебаний являются обычно такие промышленные нагрузки, как дуговые печи (в сетях высокого напряжения), сварочное оборудование (в сетях низкого напряжения), а также переключение значительных нагрузок и батарей конденсаторов. Указанные колебания напряжения должны быть дифференцированы от медленных изменений установившегося напряжения в системах электроснабжения;
- отклонения напряжения, представляющие собой медленные изменения установившегося напряжения из-за плавного изменения нагрузки в сети;
- провалы напряжения (в пределах от 10 до 99 %  $U_{\text{ном}}$ ) и кратковременные перерывы питания (100 %  $U_{\text{ном}}$ ) продолжительностью в пределах от одного полупериода до нескольких секунд.

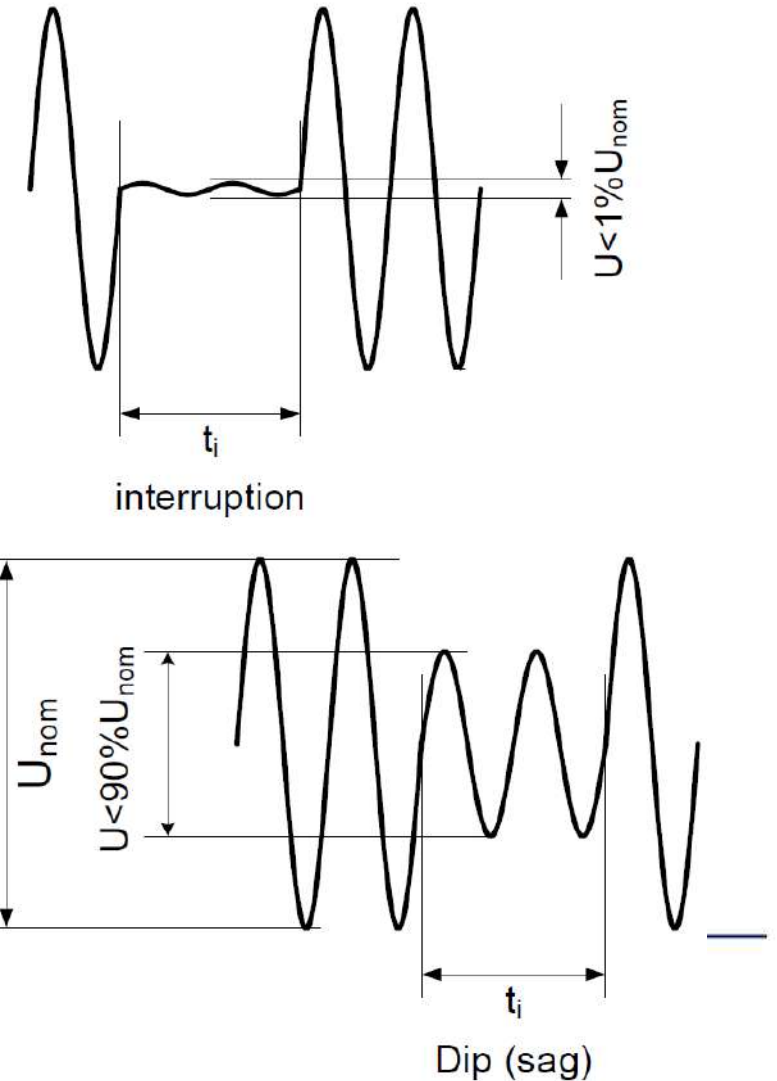
Перерывы питания, продолжающиеся более 1 мин, не рассматриваются в качестве низкочастотных электромагнитных помех, а считаются выключением источника электропитания.

- несимметрия напряжений в трехфазных системах электроснабжения, возникающая при неравенстве фазных напряжений или изменении нормального фазового соотношения.

## 2.3.1 КОЛЕБАНИЯ НАПРЯЖЕНИЯ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ; ПРОВАЛЫ, КРАТКОВРЕМЕННЫЕ ПРЕРЫВАНИЯ И ВЫБРОСЫ НАПРЯЖЕНИЯ :

### Прерывания, провалы и выбросы напряжений

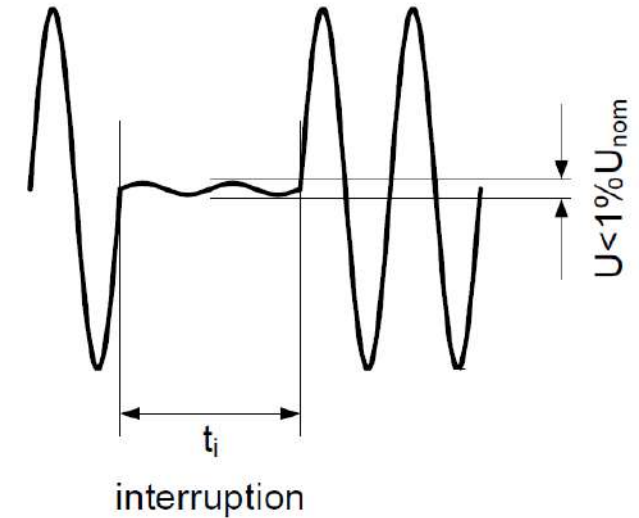
Провалы и кратковременные прерывания напряжения возникают из-за неисправностей в электрических сетях, вызываемых, прежде всего, короткими замыканиями, неисправностей в электрических установках, а также из-за внезапного резкого изменения нагрузки. В определенных случаях могут возникать два или более последовательных провала или прерывания напряжения.



## Прерывания напряжения

Прерывания напряжения по ГОСТ 32144-2013 подразделяют на длительные (более 3 мин) и кратковременные (не более 3 мин).

Кратковременные прерывания напряжения наиболее вероятны при их длительности менее нескольких секунд. В трехфазных системах электроснабжения к прерываниям напряжения относят ситуацию, при которой напряжение меньше 5 % опорного напряжения во всех фазах. Если напряжение меньше 5 % опорного напряжения не во всех фазах, ситуацию рассматривают, как провал напряжения.



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

## Прерывания, провалы и выбросы напряжений ГОСТ Р 50397-2011

**Изменение напряжения:** Изменение среднеквадратического или пикового значения напряжения между двумя последовательными уровнями, удерживающимися в течение определенных, но нерегламентированных интервалов времени.

**Колебание напряжения:** Серия изменений напряжения или продолжительное изменение среднеквадратического или пикового значения напряжения.

**Провал напряжения:** Внезапное снижение напряжения в точке электрической системы, за которым следует восстановление напряжения после короткого интервала от нескольких циклов до нескольких секунд.

**Кратковременное прерывание напряжения электропитания:** Исчезновение напряжения электропитания в течение интервала времени длительностью между двумя установленными предельными значениями.

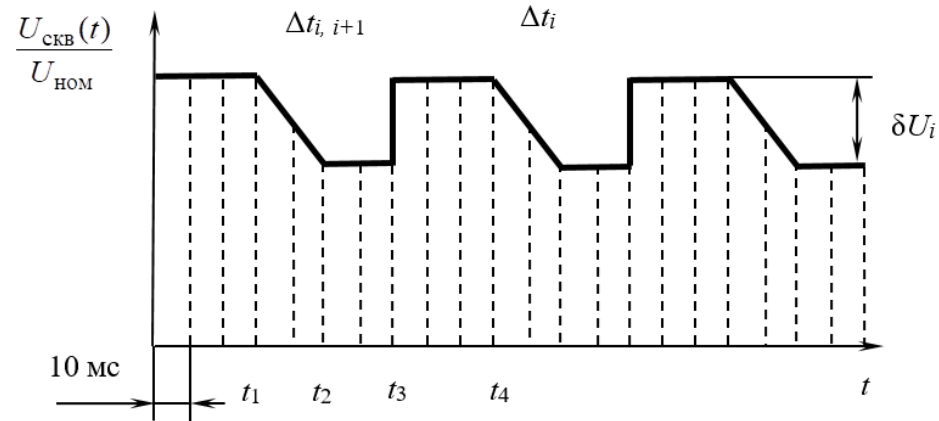
Примечание - кратковременными прерываниями считаются уменьшения напряжения до значения менее 1 % номинального напряжения длительностью в пределах от нескольких десятых секунды до значений порядка 1 мин (в некоторых случаях 3 мин).

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

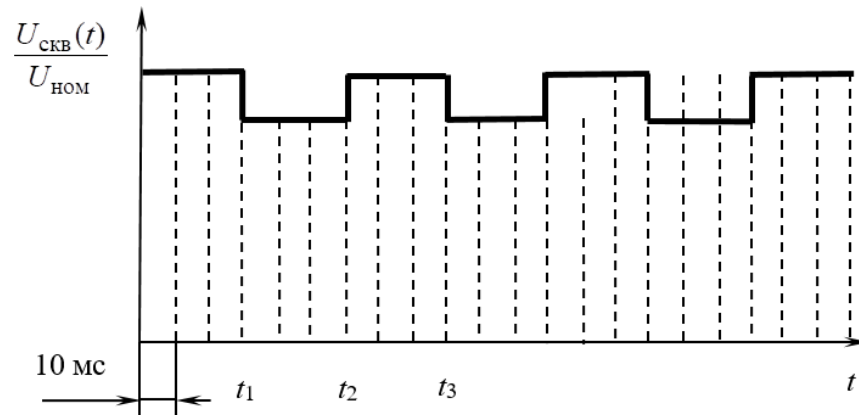


СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

## Прерывания, провалы и выбросы напряжений ГОСТ Р 50397-2011



*a*



*б*

**Колебание напряжения:** Серия изменений напряжения или продолжительное изменение среднеквадратического или пикового значения напряжения.

*a* – произвольной формы;

*б* – имеющие форму меандра

Положительные и отрицательные отклонения напряжения в точке передачи электрической энергии не должны превышать 10 % номинального или согласованного значения напряжения в течение 100 % времени интервала в одну неделю.



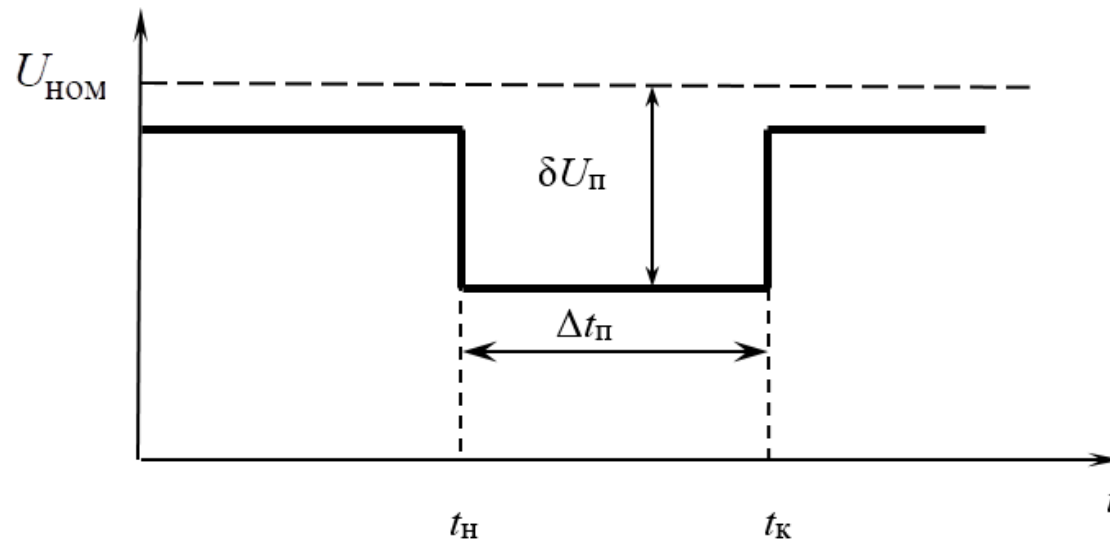
# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

## Прерывания, провалы и выбросы напряжений ГОСТ Р 50397-2011

**Провал напряжения:** Внезапное снижение напряжения в точке электрической системы, за которым следует восстановление напряжения после короткого интервала от нескольких циклов до нескольких секунд. Глубина провала, %.



$$\delta U_{\text{П}} = \frac{U_{\text{НОМ}} - U_{\text{min}}}{U_{\text{НОМ}}} \cdot 100$$

Провал напряжения

## Прерывания, провалы и выбросы напряжений

Провалы и кратковременные перерывы питания напряжения могут быть вызваны:

- короткими замыканиями в низковольтных распределительных электрических сетях, устраняемыми при функционировании плавких предохранителей (длительностью до нескольких десятков миллисекунд);
- авариями на линиях среднего и высокого напряжения или другом сетевом оборудовании, сопровождаемыми или не сопровождаемыми автоматическим повторным включением (длительностью от 100 до 600 мс);
- коммутациями мощных нагрузок, особенно двигателей и батарей конденсаторов.

***Несимметрия создаётся несимметричными трёхфазными или мощными однофазными нагрузками, такими, например, как тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта или однофазные электропечи.***

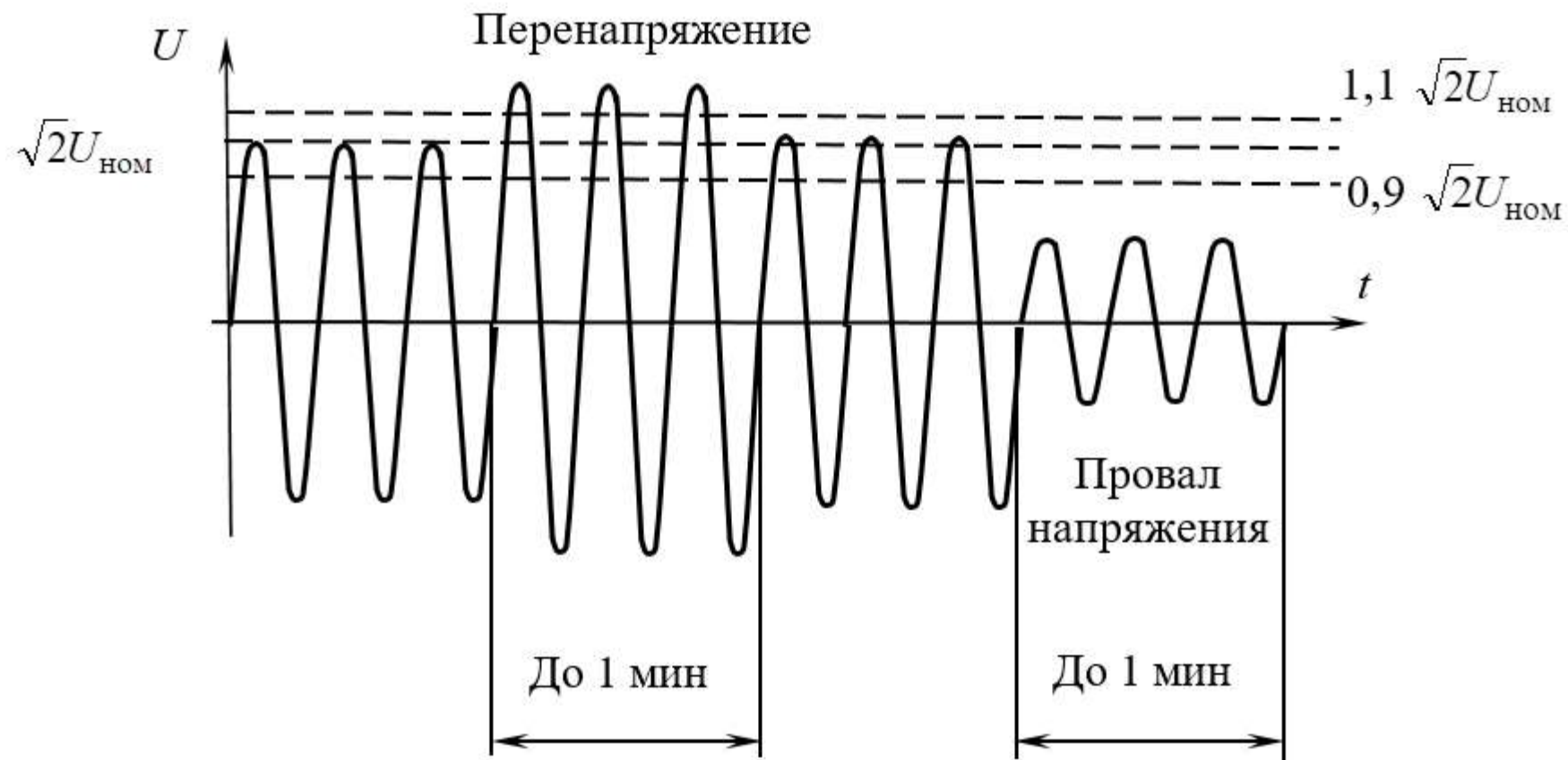
---

## Прерывания, провалы и выбросы напряжений

Коммутационные переходные процессы в системе электропитания могут быть разделены на переходные процессы, связанные:

- а) с переключениями в мощных системах электроснабжения, например с коммутацией конденсаторных батарей;
  - б) незначительными локальными переключениями или изменениями нагрузки в электрических распределительных системах;
  - в) резонирующими цепями, связанными с переключающими приборами, например тиристорами, транзисторами;
  - г) различными повреждениями в системах, такими как короткие замыкания цепей на землю и дуговые разряды на систему заземления электрических установок.
-

## Провалы напряжений и перенапряжения

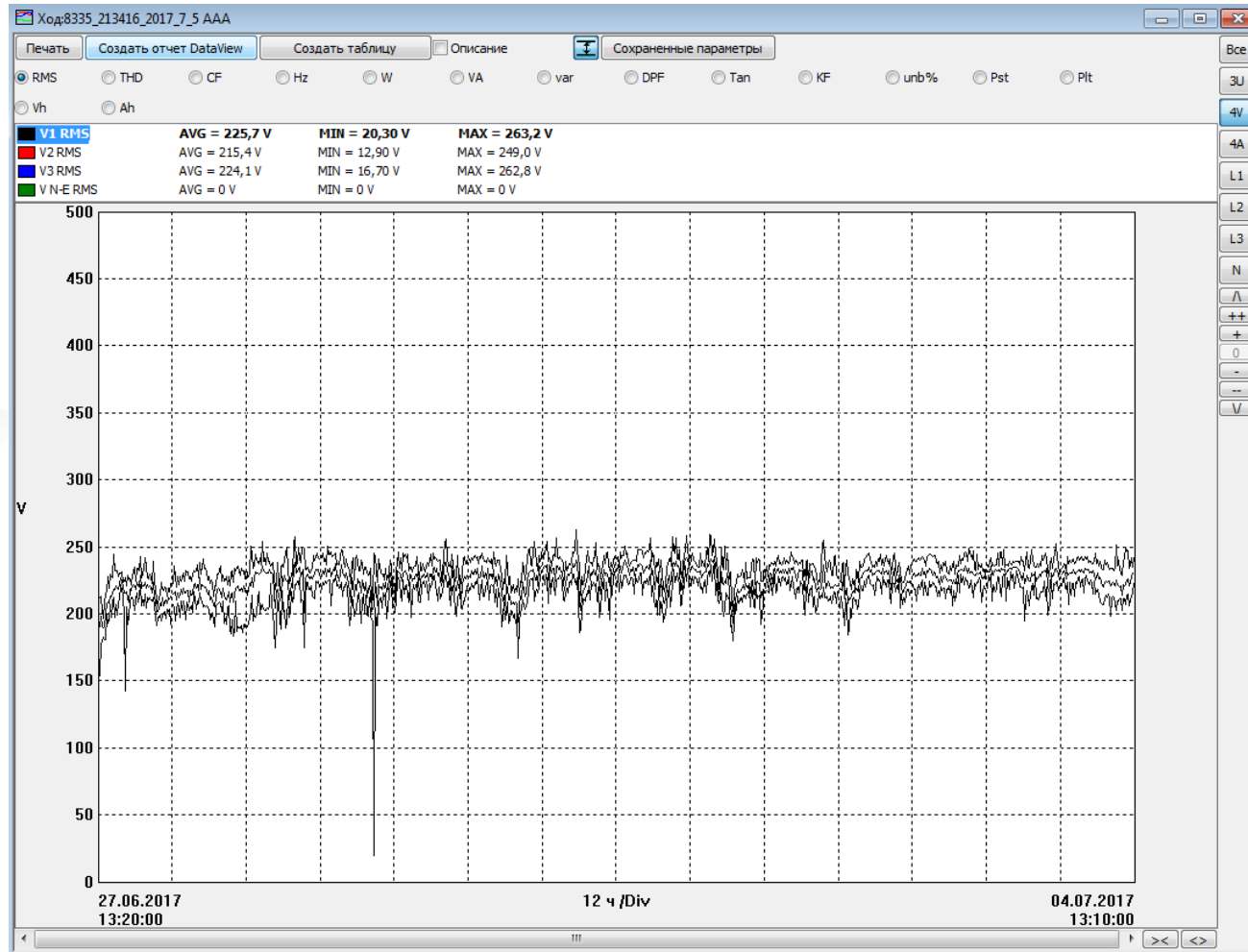


# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## Пример изменения напряжений за недельный цикл



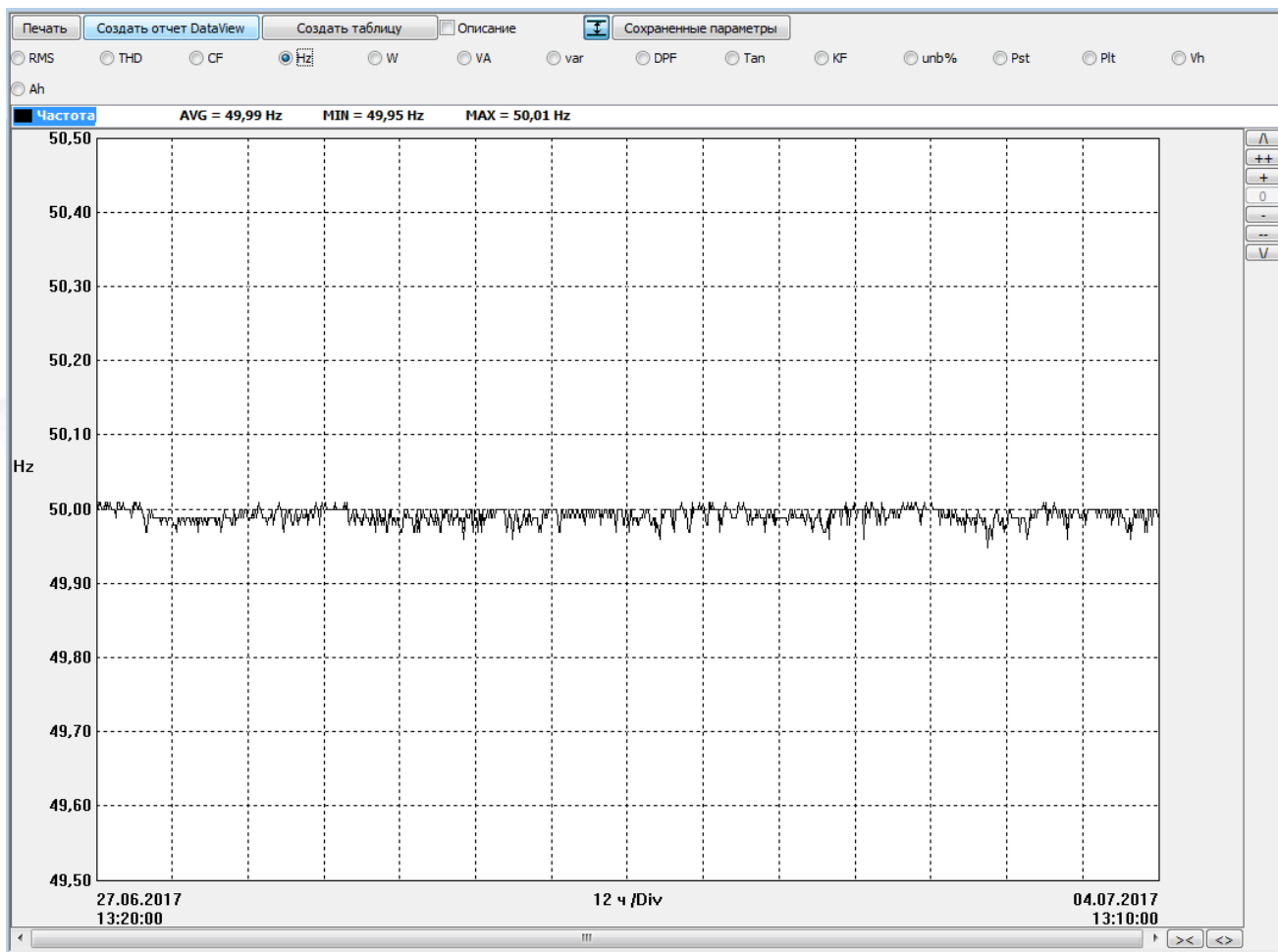
СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ





# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## Изменение частоты источников питания 50 Гц



**Частота в системах электроснабжения** обычно достаточно устойчива и изменяется, как правило, менее чем на 0,1 Гц. В автономных системах электроснабжения частота, однако, может изменяться в более широком диапазоне, вплоть до 4 %. Значительное снижение частоты может являться следствием аварии или реконфигурации в системе электроснабжения. **Отклонение частоты**  $\Delta f = f_T - f_{\text{ном}} > 0$ , Гц, где  $f_T$  – значение основной частоты напряжения электропитания, измеренное в интервале времени 10 с,  $f_{\text{ном}}$  – номинальная частота.

## Фликер

**Фликер:** Ощущение неустойчивости зрительного восприятия, вызванное световым источником, яркость или спектральный состав которого изменяются во времени.

**Порог восприятия фликера:** Минимальная величина флуктуации освещенности или спектрального распределения, которая приводит к ощутимости мерцаний заданной группой населения.

**Кратковременная доза фликера:** Мера фликера, оцениваемая в течение установленного интервала времени относительно малой длительности. Типичная длительность равна 10 мин.

**Длительная доза фликера:** Мера фликера, оцениваемая в течение установленного интервала времени относительно большой длительности с использованием последовательных значений кратковременной дозы фликера.

---

## 2.3.2 НЕСИММЕТРИЯ НАПРЯЖЕНИЯ :

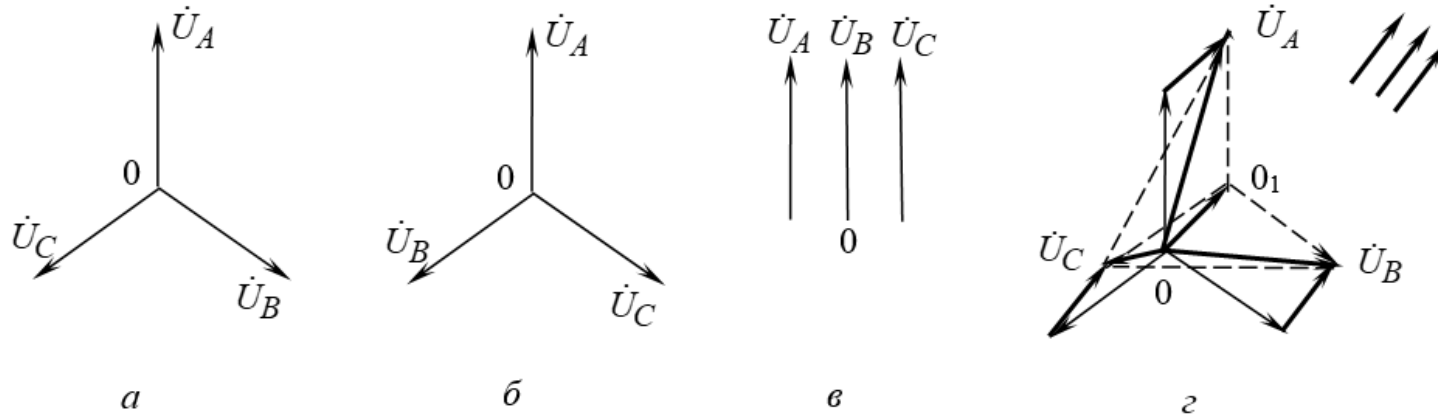


Рис. 1.2. Векторные диаграммы напряжений (*а* – прямая последовательность, *б* – обратная последовательность, *в* – нулевая последовательность, *г* – пример несимметрии напряжений и появления напряжений нулевой последовательности)

При прямой последовательности напряжение фазы *A* опережает напряжение фазы *B* на  $120^\circ$ , напряжение фазы *C* на  $240^\circ$ , при обратной последовательности напряжение фазы *A* опережает напряжение фазы *B* на  $240^\circ$ , а напряжение фазы *C* на  $120^\circ$ , и при нулевой последовательности все напряжения совпадают по фазе. Несимметрия создаётся несимметричными трехфазными или мощными однофазными нагрузками, такими, например, как тяговые подстанции электрифицированного железнодорожного транспорта или однофазные электропечи, однофазном или двухфазном коротком замыкании, обрыве фазы, вызывая появление составляющих обратной последовательности. Составляющие нулевой последовательности появляются при замыканиях фаз на землю (одно- и двухфазных) или при обрыве одной или двух фаз. Возможные последствия несоблюдения требований симметрии – увеличение потерь в трансформаторах и линиях электропередач, небаланс реактивных токов и существенное снижение коэффициента полезного действия силового оборудования.

**Несимметрия напряжений:** Условия в многофазной системе, при которых среднеквадратические значения фазовых напряжений или углы сдвига между фазами не равны.

Степень несимметрии напряжений определяется в соответствии с методом симметричных составляющих как отношение напряжения составляющих обратной (нулевой) последовательности к напряжению составляющих прямой последовательности. Система трехфазных напряжений в нормальном режиме работы является симметричной. Иногда в аварийных или других режимах эта симметрия нарушается.

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## Уровни электромагнитных помех



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Степень интенсивности электромагнитной помехи	Вид электромагнитной помехи					
	Отклонения напряжения, % $U_{ном}$	Колебания напряжения, % $U_{ном}$	Провалы напряжения (от 10 до 99 % $U_{ном}$ ), длительность, с	Кратковременные перерывы питания (>99 % $U_{ном}$ ), длительность, с	Несимметрия напряжений $U_{обр}/U_{пр}$ , %	Изменения частоты питающего напряжения, %
A	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида					
1	$\pm 10$	3	$< 0,8$	$< 0,6$	2	2
2	$\pm 10$	10	$< 3$	$< 60$	3	2
X	В соответствии с характеристиками места размещения ТС					

1. Уровни электромагнитной совместимости в системах электроснабжения промышленных предприятий установлены в ГОСТ Р 51317.2.4–2000.
2. Предельно допустимые значения размаха изменения напряжения, установившегося отклонения напряжения, коэффициентов несимметрии напряжений обратной и нулевой последовательности, отклонения частоты в системах электроснабжения общего назначения установлены в ГОСТ 32144–2013



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## 2.4. Помехи, возникающие при коммутации электрических систем

Коммутация разъединителем на подстанции с элегазовым распределительным устройством с отключением линии 110 кВ.

Коммутация выключателем 10 кВ на подстанции с элегазовым распределительным устройством с отключением линии 110 кВ.

Реле и выключатели

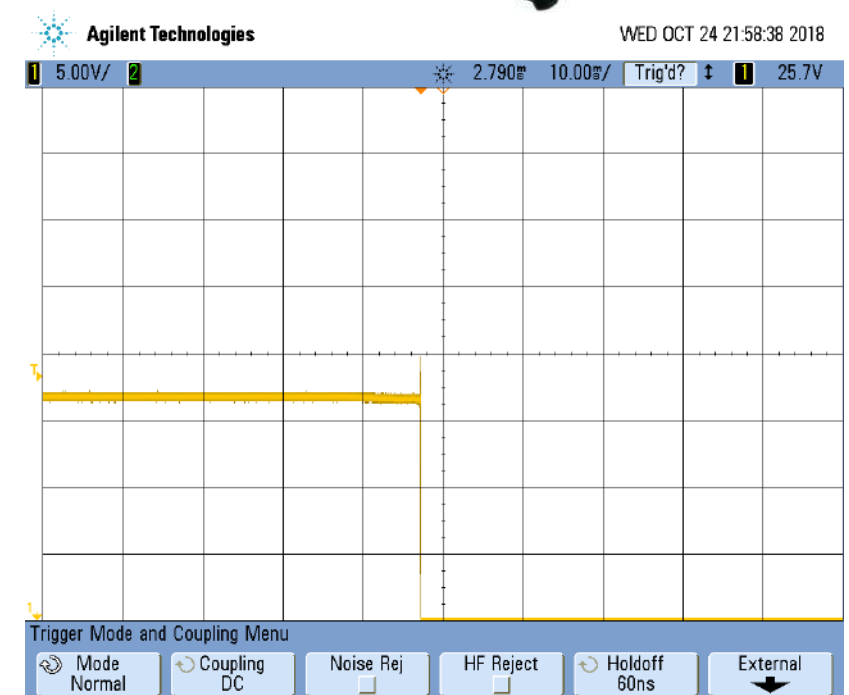
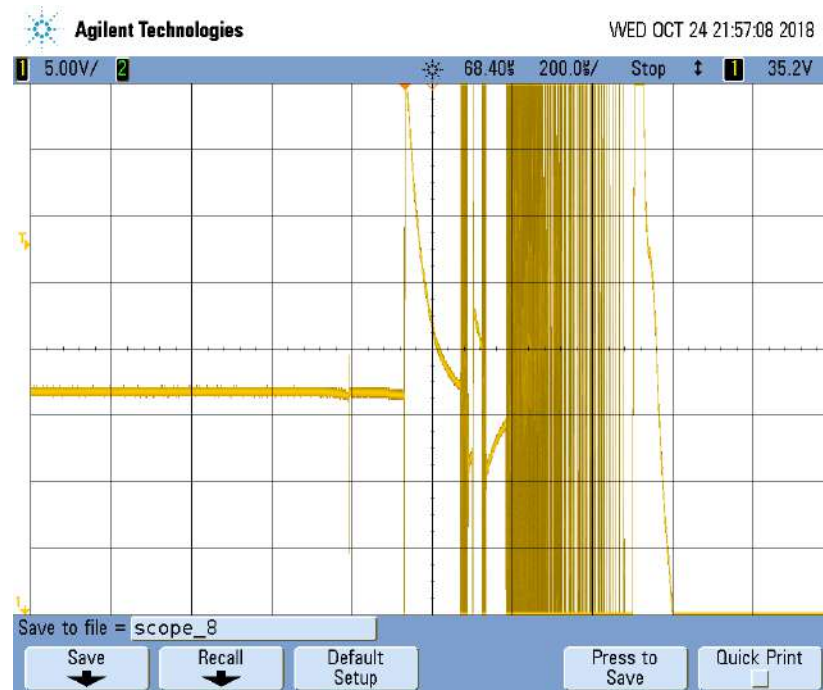
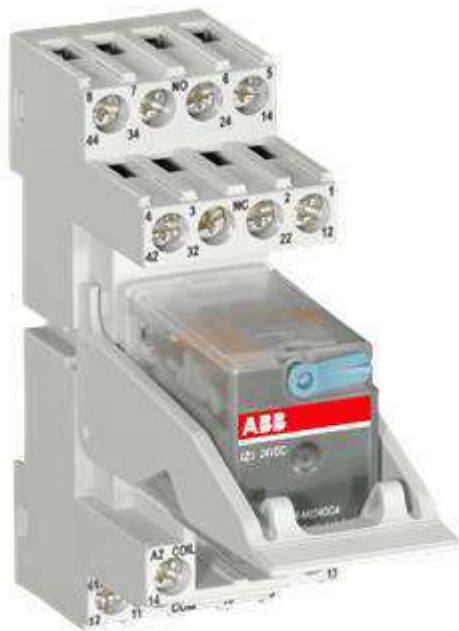


# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:



## Наносекундные импульсные помехи: пример

### Реле ABB CR-M (24 В)



В электрической системе могут возникать различные коммутационные процессы: прерывания индуктивных нагрузок, размыкание контактов реле и т.д.

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## Наносекундные импульсные помехи: пример

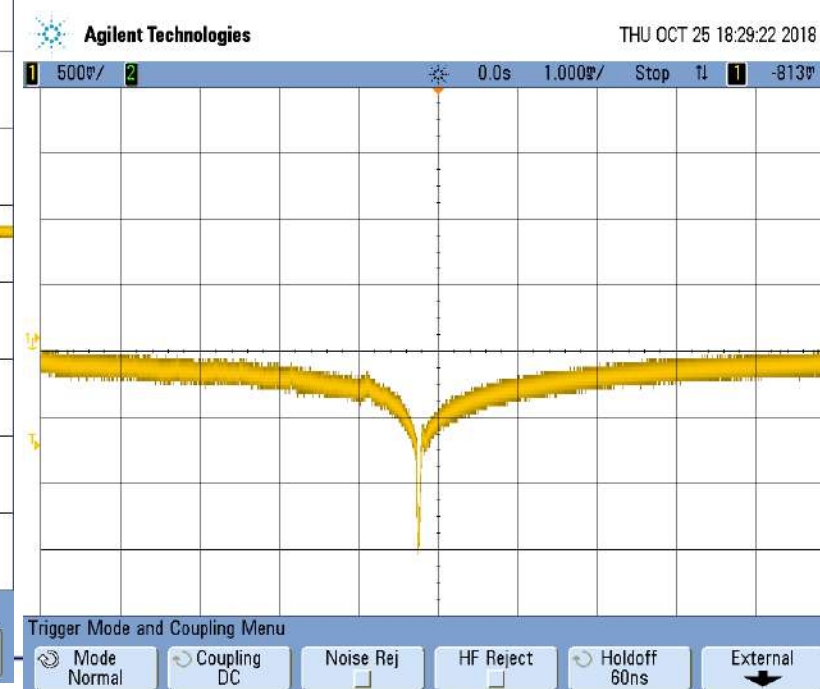
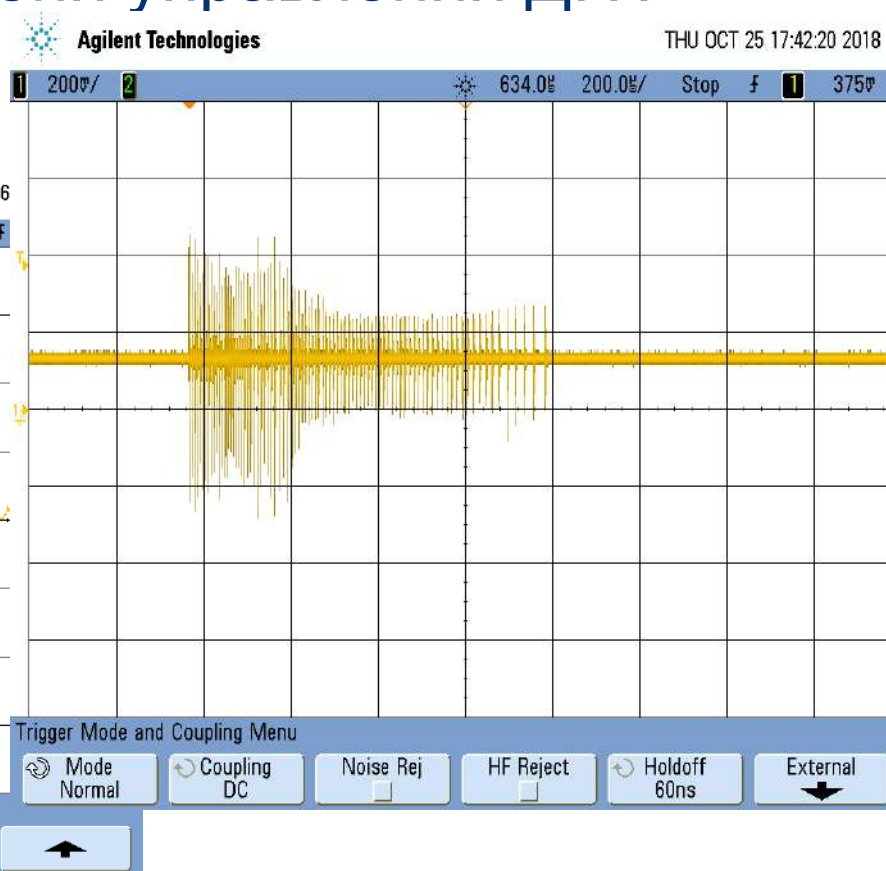
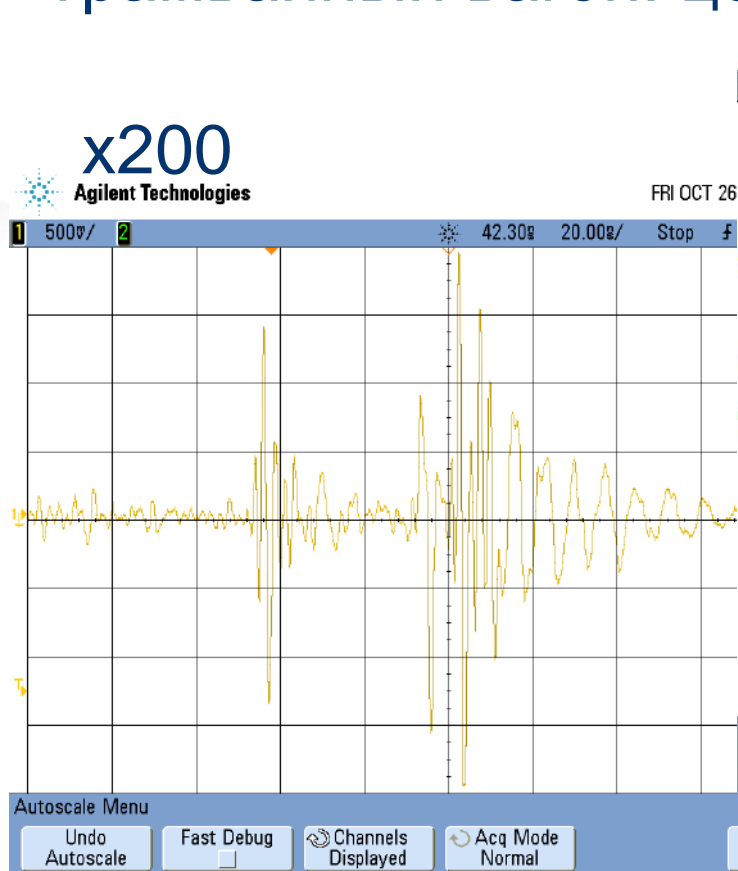
Трамвайный вагон: цепи управления ДПТ



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## Наносекундные импульсные помехи: пример

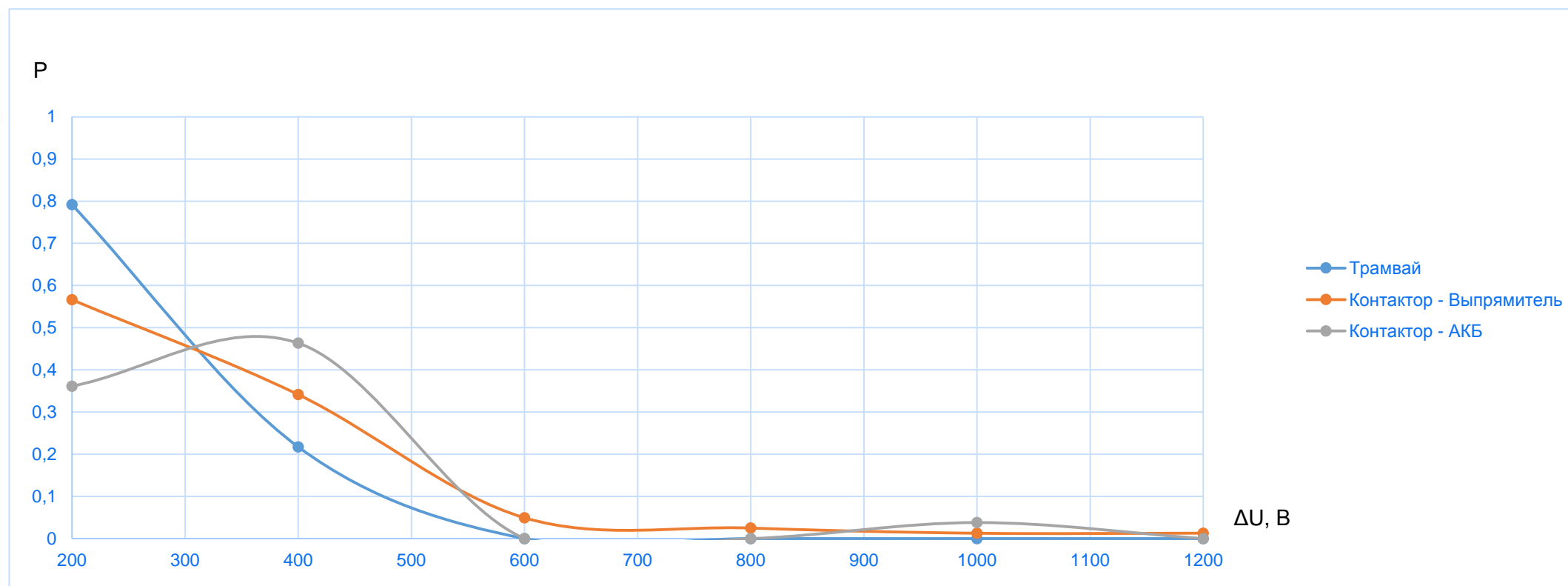
Трамвайный вагон: цепи управления ДПТ



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

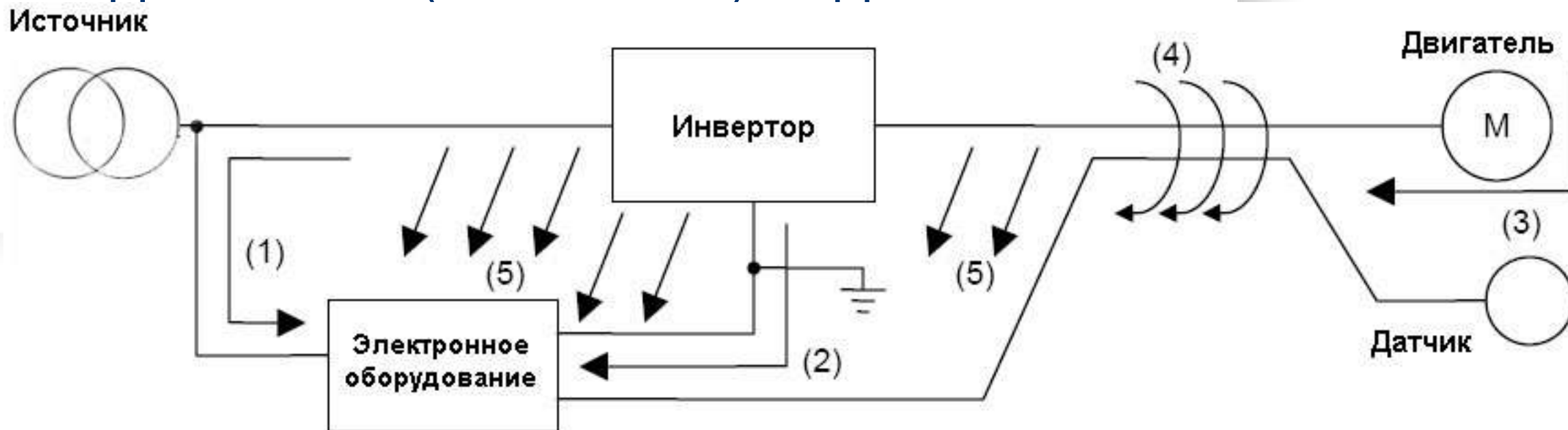
## Наносекундные импульсные помехи: пример

Трамвайный вагон: цепи управления ДПТ





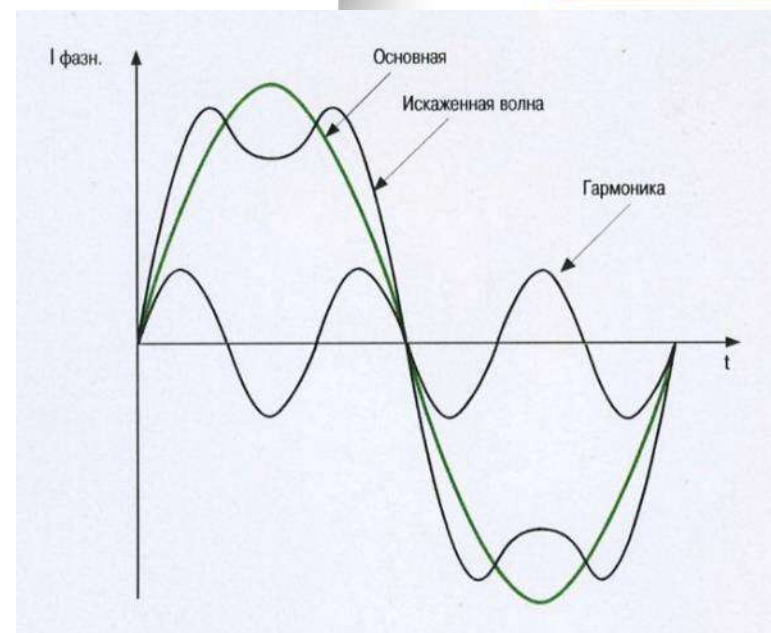
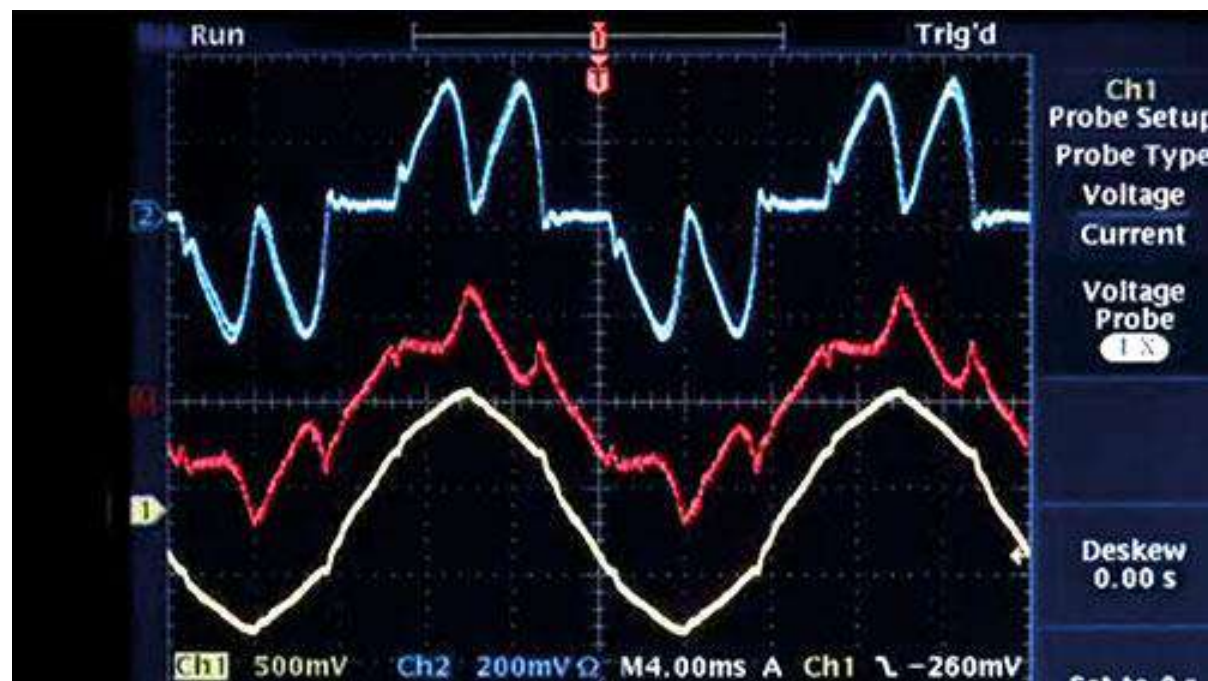
## 2.5. ПОМЕХИ В СИСТЕМАХ ПИТАНИЯ ДВОЙНОГО (ТРОЙНОГО) РОДА ТОКА.



Основным источником ЭМП инвертора, является ШИМ-модуляция IGBT-транзисторами выходного напряжения, создающие большие скачки перетока энергии в звене постоянного тока инвертора и как следствие во входных цепях, а также на выходе преобразователя частоты. Кондуктивные помехи идут по проводам (1), заземлению (2), экрану или сигнальному проводу (3), излучаемые помехи по путям (5).



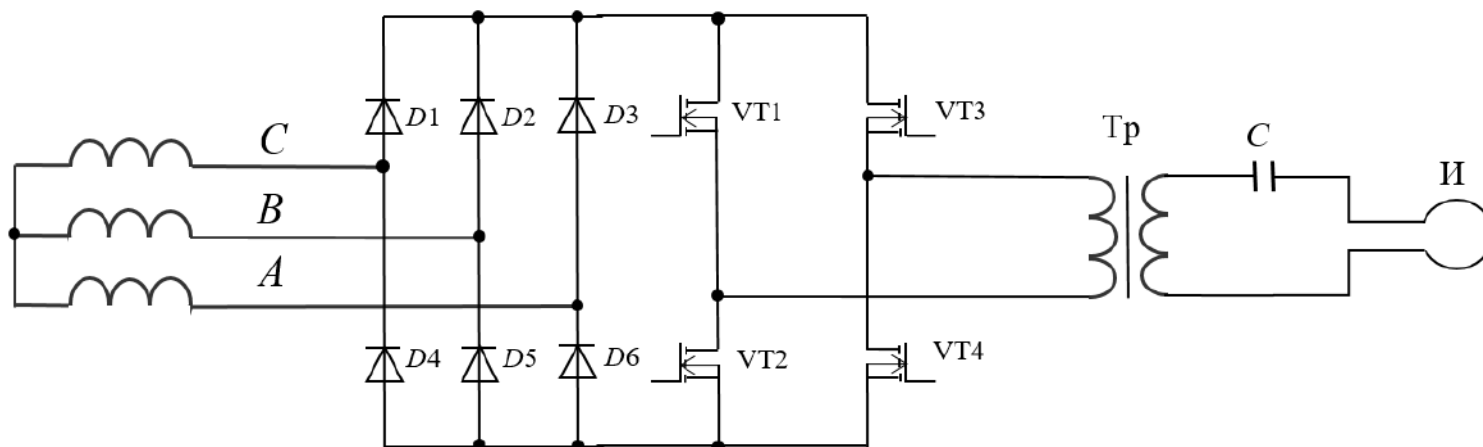
# КРИВЫЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ



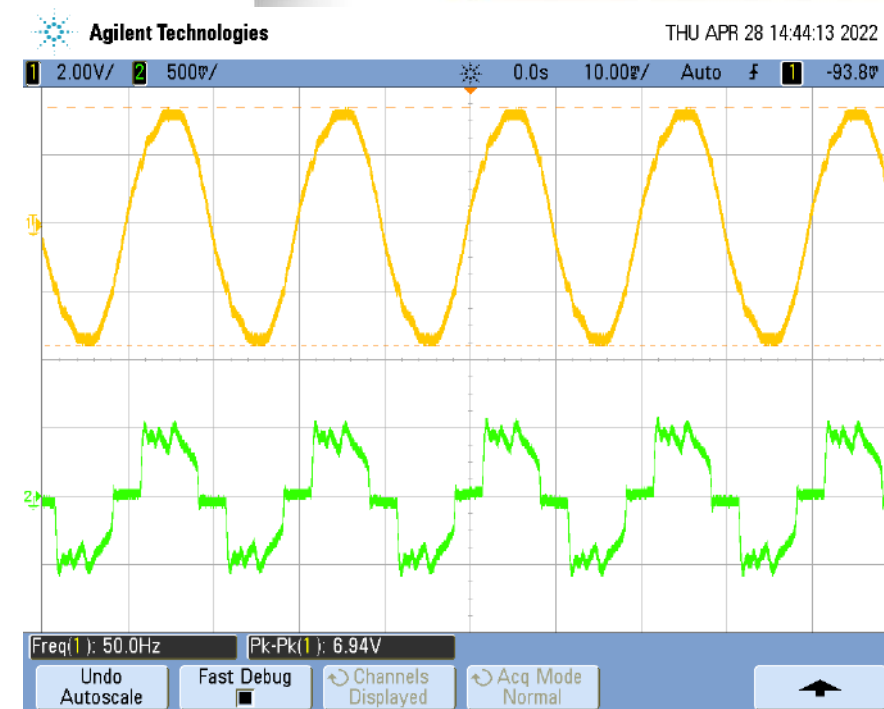
При работе привода основной вклад в искажения вносит 6-пульсный диодный выпрямитель. Он создает несинусоидальный ток, который взаимодействует с питанием от сети переменного тока и влияет на напряжение в большей или меньшей степени в зависимости от величины питающего напряжения.

Искажения в сети питания переменного тока приводят к тому, что вместо частоты 50 Гц появляются гармоники с неприемлемыми частотными составляющими

# КРИВЫЕ ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ



Электрическая силовая схема индукционной установки с генератором ВГТ 8-50/10. При работе высокочастотного генератора основной вклад в искажения вносит диодный выпрямитель.



Осциллограммы напряжения (сверху) и тока (снизу) в точке присоединения генератора к сети (коэффициент делителя канала 1:100)

## 2.6. ИЗЛУЧАЕМЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ ОТ ЭЛЕКТРООБОРУДОВАНИЯ.

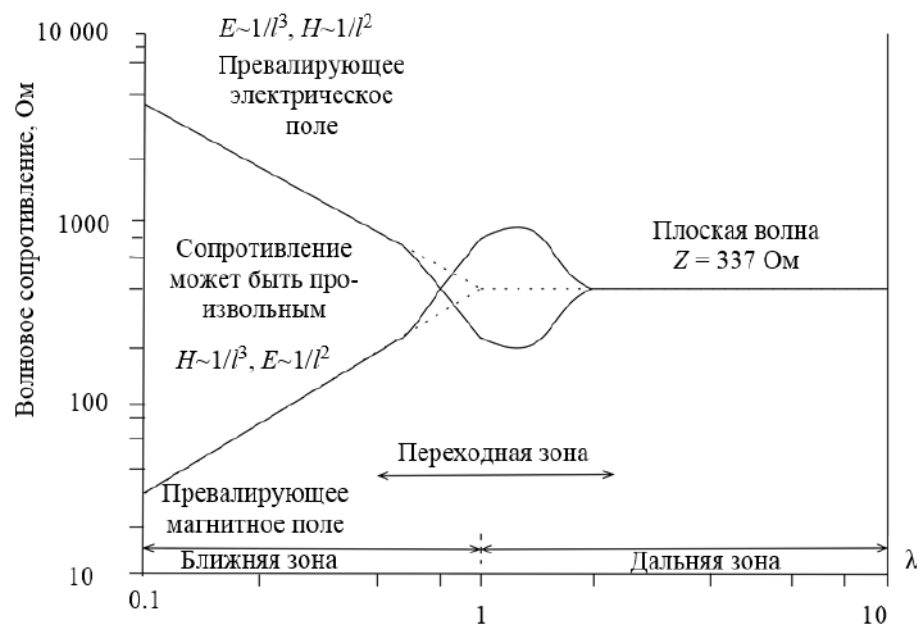


Рис. 1.1. Зоны электромагнитного поля

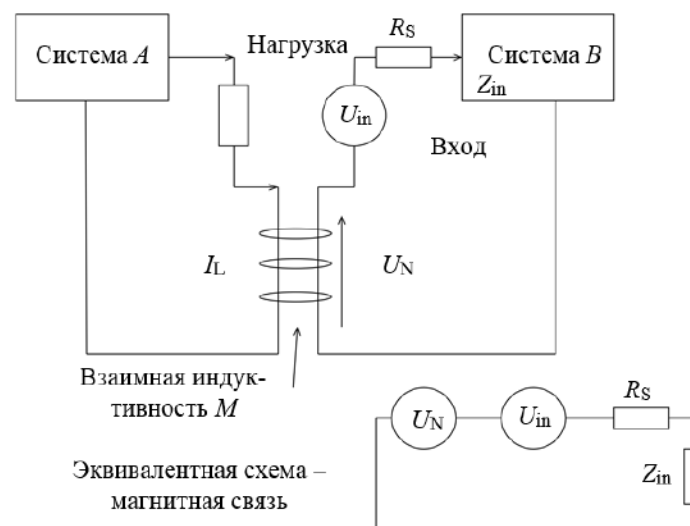


Рис. 1.3. Пример магнитной индукции

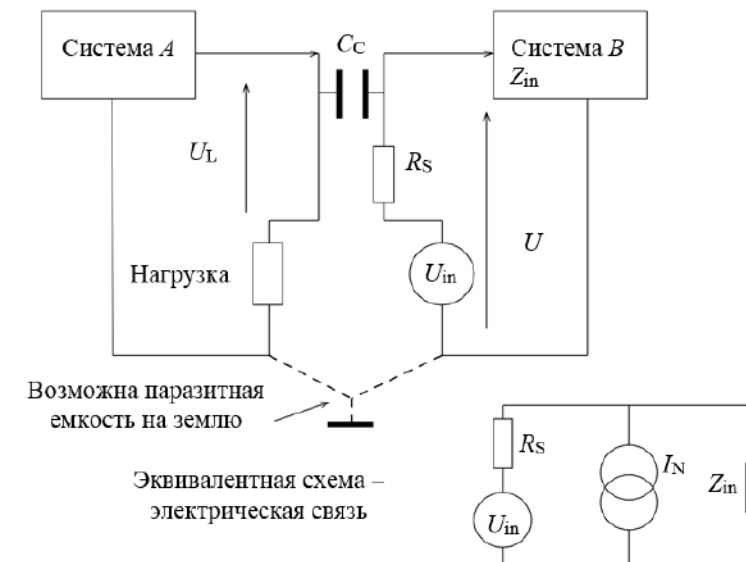


Рис. 1.4. Пример электрической индукции

**Электромагнитное излучение** – явление, процесс, при которых энергия излучается источником в пространство в виде электромагнитных волн. Физические причины существования переменного электромагнитного поля связаны с тем, что изменяющееся во времени электрическое поле напряженностью  $E$  порождает магнитное поле напряженностью  $H$ , а изменяющееся магнитное поле – вихревое электрическое поле.



## ИСТОЧНИКИ ЭМП

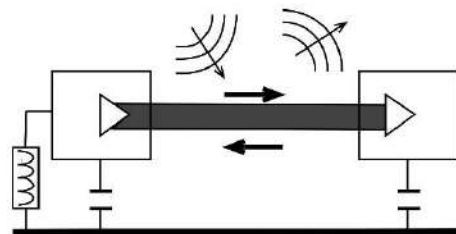
Источниками этих излучений часто являются портативные приемопередатчики, применяемые эксплуатационным персоналом и службами безопасности, стационарные радио- и телевизионные передатчики, радиопередатчики подвижных объектов, а также различные промышленные источники излучений. В последние годы значительно увеличилось использование радиотелефонов и других радиопередатчиков, действующих на частотах от 0,8 до 3 ГГц. Указанные устройства во многих случаях используют методы модуляции с непостоянной огибающей. Кроме электромагнитной энергии, генерируемой намеренно, на ТС также воздействуют побочные излучения, создаваемые такими источниками, как сварочное оборудование, тиристорные регуляторы, люминисцентные источники света, переключатели, коммутирующие индуктивные нагрузки и т. д.

Источниками преднамеренного электромагнитного излучения являются устройства, которые специально излучают электромагнитную энергию в окружающее пространство (в частности, радио и телевизионные антенны, радиолокационные станции, радиотелефоны, радары и т. д.). Источниками непреднамеренного электромагнитного излучения являются любые устройства, содержащие электрические цепи, так как всякий электрический контур, в котором протекает электрический ток, создает электромагнитное поле.

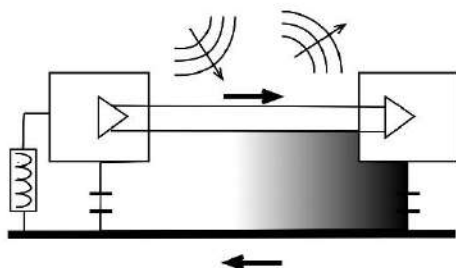
---



# ЭМП

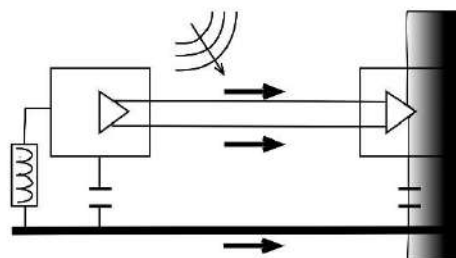


Дифференциальный режим



Общий режим

Затемнённые области  
показывают часть цепи,  
связанную с внешними  
полями



Антенный режим

Рассмотрим два изделия, соединенных кабелем. Кабель несет токи (прямой и обратный) сигнала в дифференциальном режиме по двум проводам, расположенным в непосредственной близости. Излучаемое поле может влиять на данную систему и наводить между двумя проводниками помеху симметричного типа. Точно так же ток, протекающий по проводникам, будет создавать собственное поле.

*Синфазный (общий) тип связи.* В кабеле протекает ток общего вида, т. е. протекающий в одном направлении по каждому проводнику. Эти токи очень часто не имеют ничего общего с полезным сигналом.

*Паразитная связь в режиме антенны.* Токи в режиме антенны, как в кабеле, так и в плоскости заземления, текут в одном направлении. Они не возникают в результате внутренне созданных помех, однако они будут появляться, когда вся система, включая плоскость заземления, подвергается воздействию внешнего поля.



# ЭМП

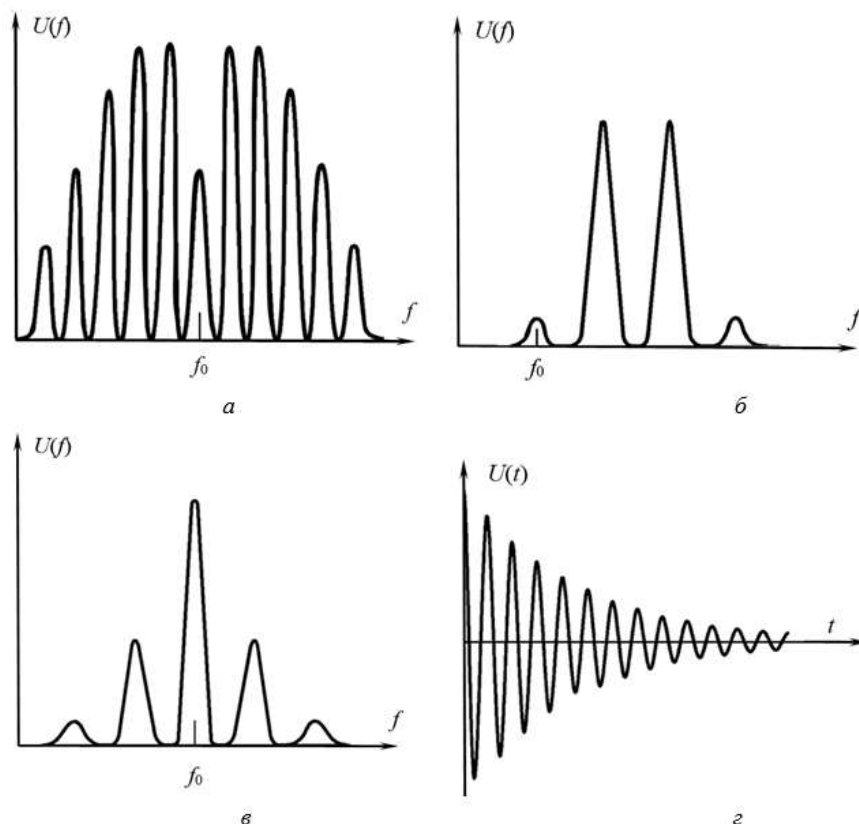


Рис. 1.5. Типичные характеристики излучаемых колебательных электромагнитных полей (*а* – спектр сигнала с частотной или фазовой модуляцией, *б* – спектр амплитудно-модулированного сигнала с двумя боковыми полосами и подавленной несущей, *в* – спектр сигнала с амплитудной модуляцией одной тональной частотой, *г* – форма затухающего синусоидального колебания)

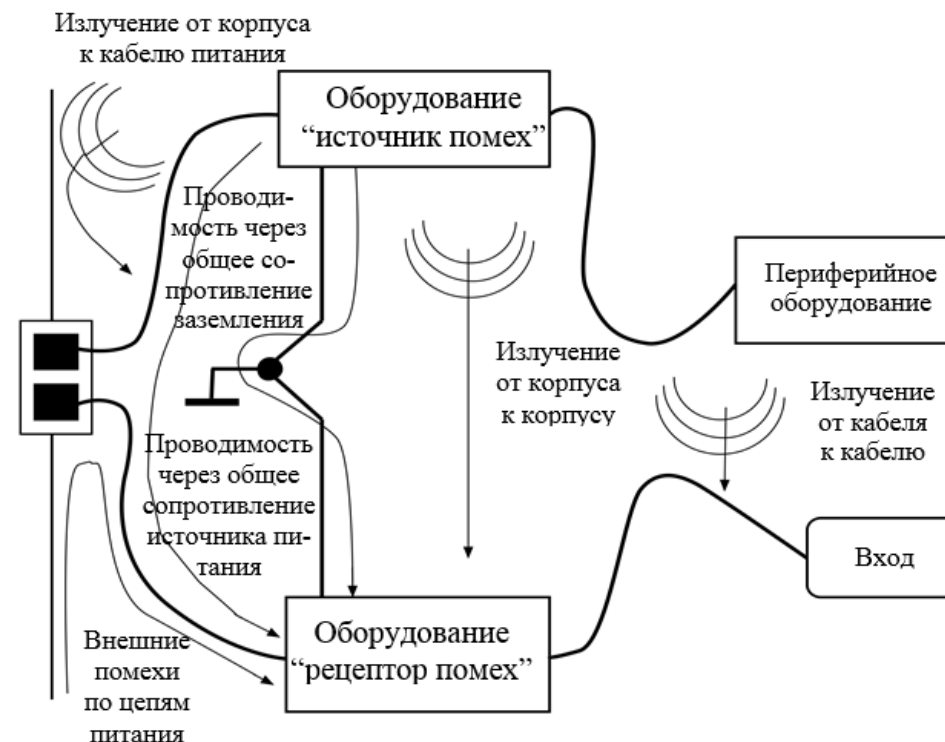


Рис. 2.2. Пути электромагнитных связей

Согласно ГОСТ Р 51317.2.5-2000, излучаемые колебательные электромагнитные поля представляют собой главным образом излучения радиопередающих устройств с модулированными несущими

# ЭМП

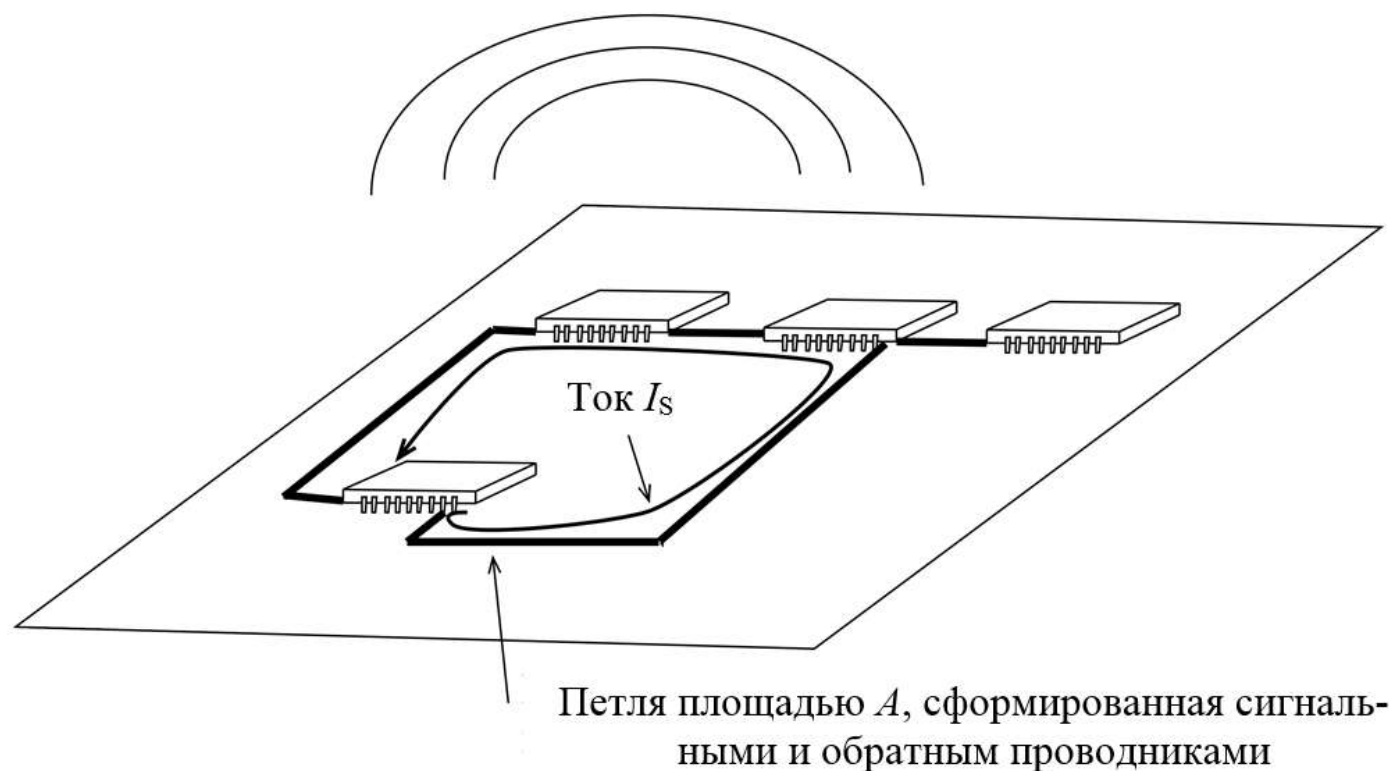


Рис. 2.5. Эмиссия излучаемых помех

В большинстве изделий, включающих печатные платы, первичными источниками являются токи, протекающие в схемах (цепи синхронизации и данных, усилители видео, другие генераторы), которые установлены на печатных платах. Часть энергии излучается непосредственно от печатной платы, как рамочной антенны

## ЭМП

Паразитная связь через излучение при очень высоких частотах доминирующая за счет эмиссии кабелей по сравнению с прямым излучением от печатной платы. Это происходит из-за того, что типичные кабели имеют резонанс в области 30...100 МГц и их эффективность излучения выше, чем печатной платы на этих частотах. Ток помехи создается в синфазном режиме от мешающих сигналов земли, проходящих через печатную плату, или в других местах в оборудовании, и может протекать по проводникам либо по экрану экранированного кабеля

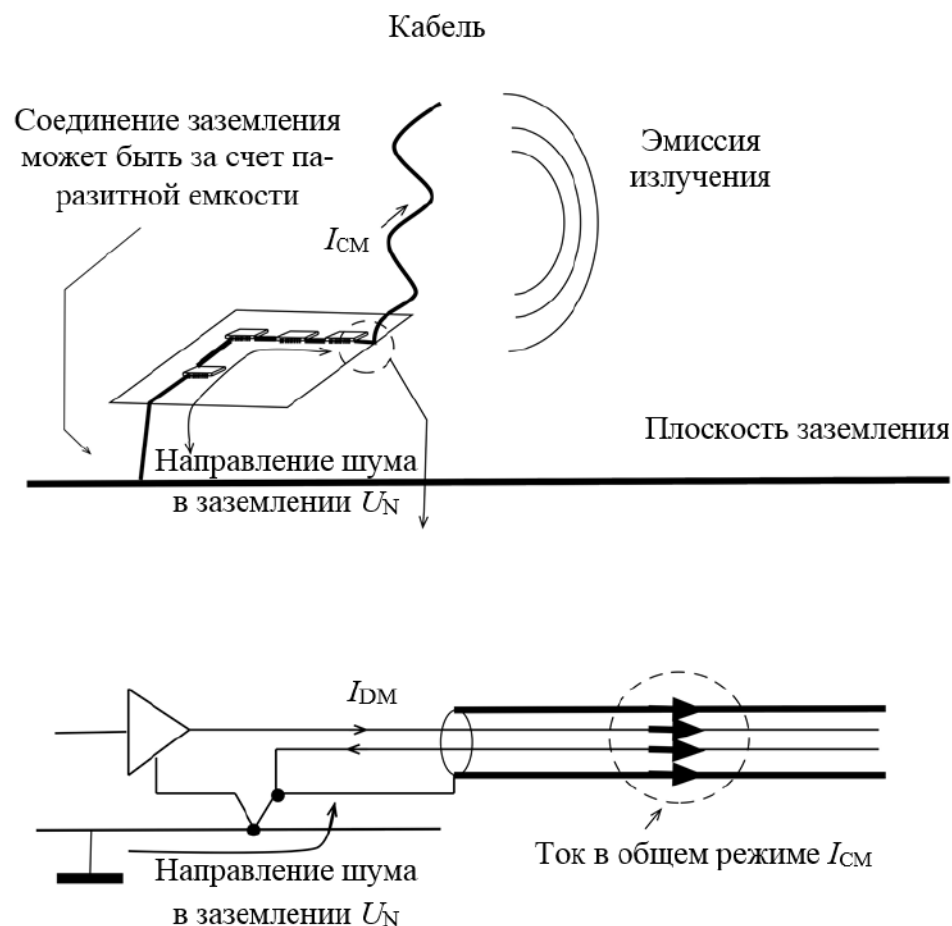


Рис. 2.6. Эмиссия излучения от кабеля

## ЭМП

Внешнее излучаемое поле может влиять или непосредственно на внутренние схемы и проводные соединения в режиме дифференциального сигнала, или на кабели, вызывая ток синфазного вида. Паразитная связь с внутренними проводными соединениями и проводниками на печатных платах наиболее сильна на частотах выше нескольких сотен мегагерц, так как при длине проводных соединений в несколько сантиметров на этих частотах возникает резонанс

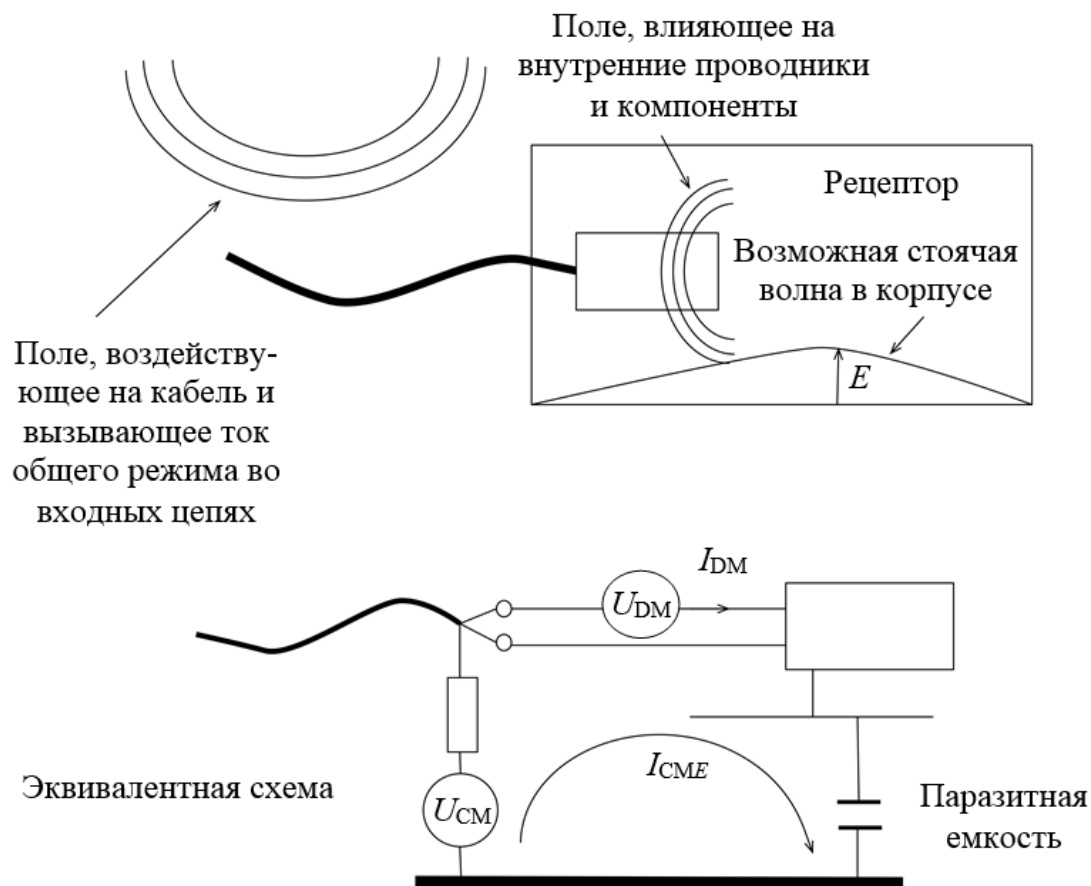


Рис. 2.8. Паразитная связь через излучаемое поле

## ИСТОЧНИКИ ЭМП

**Магнитные поля** промышленной частоты 50 Гц создаются различными источниками:

близлежащими линиями электропитания, в особенности воздушными линиями; трансформаторами и другим оборудованием систем электроснабжения, имеющими большие токи;

электрическими приборами промышленного и бытового назначения

При использовании электрифицированных железных дорог создаются магнитные поля с частотой, характерной для электрифицированного железнодорожного транспорта.

Значительные магнитные поля на частотах гармоник основной частоты электропитания возникают только в отдельных случаях (например, при использовании мощного выпрямительного оборудования).

---

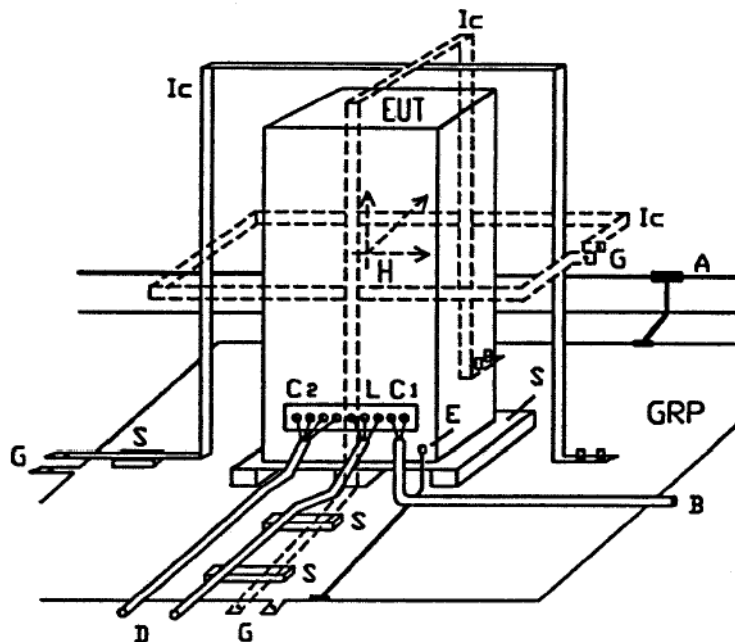


# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## Магнитное поле промышленной частоты (PFMF)

Источники: линии электропередач, электропроводка, трансформаторы и бытовая техника;

Электростанции, ПС высоких напряжений, ЛЭП, железные дороги....



Документы по испытаниям:  
**IEC 61000-4-8:2009**  
Electromagnetic compatibility (EMC)  
- Part 4-8: Testing and  
measurement techniques - Power  
frequency magnetic field immunity  
test  
(ГОСТ Р 50648-94)



## УРОВНИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЧАСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ

Уровни электромагнитных помех в части низкочастотных магнитных полей без учета аварийных условий в системах электроснабжения:

- постоянный ток –  $3...100$  А/м дополнительно к магнитному полю Земли напряженностью приблизительно от 20 до 60 А/м, в зависимости от места размещения, в 1 м над землей;
- ток на частоте электрической тяги –  $1...30$  А/м в 20 м от колеи. Напряженность магнитного поля существенно увеличивается при приближении к колее железной дороги. Напряженность 1 А/м в 20 м от колеи и 1 м над землей соответствует применению локомотива мощностью приблизительно 3000 кВт. Некоторые системы железнодорожной автоматики и телемеханики могут создавать магнитные поля напряженностью большей 1 А/м;
- ток промышленной частоты 50 Гц –  $3...100$  А/м для воздушных линий при измерениях в 1 м над поверхностью земли. Для жилых и коммерческих зон при измерениях на расстоянии 0,3 м от электрических приборов магнитное поле имеет напряженность от 1 до 10 А/м;
- для частот, не связанных с основной частотой сети –  $0,015...0,5$  А/м. При использовании систем связи с индуктивными рамками среднее значение напряженности поля в полосе частот от 100 Гц до 5 кГц может составлять до 0,1 А/м.

## УРОВНИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ В ЧАСТИ НИЗКОЧАСТОТНЫХ МАГНИТНЫХ ПОЛЕЙ (В АМПЕРАХ НА МЕТР)

Степень интенсивности электромагнитной помехи	Частота помехи				
	Постоянный ток <sup>1</sup>	Частота электрической тяги <sup>2</sup>	Промышленная частота (50 Гц) <sup>3</sup>	Гармоники основной частоты сети (0,1...3 кГц)	Частоты, не связанные с основной частотой сети <sup>4</sup>
<b>A</b>	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида				
<b>1</b>	3	1	3	3/n	0,015
<b>2</b>	10	3	10	10/n	0,05
<b>3</b>	30	10	30	30/n	0,15
<b>4</b>	100	30	100	100/n	0,5
<b>X</b>	В соответствии с характеристиками места размещения ТС				

## ИСТОЧНИКИ ЭМП

**Электрические поля** значительной напряженности возникают вблизи воздушных электрических линий высокого напряжения и на электрических подстанциях. Здания, расположенные под воздушными электрическими линиями, ослабляют напряженность электрического поля в 10–20 раз. Электрические поля, создаваемые бытовыми электрическими приборами, обычно очень малы. Уровни в кВ/м приведены в таблице

Степень интенсивности электромагнитной помехи	Источник электромагнитной помехи		
	Силовые линии постоянного тока	Силовые линии при частоте $16\frac{2}{3}$ Гц	Силовые линии при частоте 50 Гц
A	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида		
1	0,1	0,1	$<0,1^1$
2	1	0,3	$<1^2$
3	10	1,0	$<10^3$
4	20	3,0	$<20^4$
X	В соответствии с характеристиками мест размещения ТС		



# ПЕРЕХОДНЫЕ ПРОЦЕССЫ

2 группы: апериодические и колебательные. В каждой из них можно выделить несколько источников, определяющих формирование помех данной группы:

- 1) импульсные помехи большой мощности. Обычно принимается, что различные формы этих импульсных помех обусловлены молниевыми разрядами или функционированием плавких предохранителей. При этом рассматривают:  
импульсы, вызываемые молниевыми разрядами в воздушных распределительных системах;  
импульсы, вызываемые молниевыми разрядами и распространяющиеся в подземных кабелях;  
импульсы, возникающие при функционировании плавких предохранителей за счет запасенной энергии в индуктивности отключаемого оборудования и системы электропитания;
- 2) сверхкороткие импульсные помехи. Эти импульсные помехи обычно ассоциируются с помехами искрения при переключении нагрузок в электрических сетях и могут включать последовательности событий (пачки импульсов). Импульсные помехи указанного вида обладают небольшой энергией, но способны приводить к нарушению функционирования технических средств;
- 3) колебательные переходные помехи. Частота колебаний для помех этого вида лежит в пределах от 1 кГц (преимущественно в результате переключения конденсаторов) до нескольких мегагерц (локальные колебания при разьединении цепей при коммутациях). Помехи указанного вида в более высокой части частотного диапазона имеют небольшую энергию, но могут иметь высокие пиковые напряжения. В более низкой части частотного диапазона указанные помехи могут обладать большей энергией, но при более низких пиковых напряжениях.

Опыт эксплуатации показывает, что в каждые 100 км линии электропередачи (ВЛ) в среднем в течение "грозового сезона" (с мая по октябрь) ударяет несколько десятков и несколько повторных разрядов молний, по большей части - отрицательной полярности.





## **КОНДУКТИВНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ**

Возникают в электрических соединениях ТС или линиях электропитания (переменного или постоянного тока), или в сигнальных линиях и линиях управления. Они могут быть разделены на 2 основных вида – непрерывные колебания и апериодические или колебательные переходные процессы. Каждый из видов кондуктивных высокочастотных электромагнитных помех характеризуется определенным набором параметров:

непрерывные помехи (наведенные непрерывные колебания) – амплитудой, частотой и видом модуляции наведенного напряжения (тока), а также внутренним сопротивлением источника помех;

апериодические и колебательные переходные процессы – длительностью фронта (скоростью нарастания), длительностью, пиковым значением, спектром, частотой возникновения, частотой колебаний (для колебательного переходного процесса) наведенного напряжения (тока), а также внутренним сопротивлением источника помех.

---



# ***КОНДУКТИВНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ***

Помехи относятся к «кондуктивным», если механизмы связи приводят к их воздействию, главным образом как симметричных либо общих несимметричных напряжений на кабели (силовые и сигнальные), подключаемые к оборудованию, подвергаемые воздействию помех или создающему помехи.

---



# КОНДУКТИВНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ

## *Наведенные напряжения или токи (незатухающие колебания)*

При расположении проводника в электромагнитном поле напряжение электромагнитной помехи наводится относительно опорного заземления. Амплитуда наведенного напряжения (тока) зависит от длины проводника, его высоты над землей, а также от других факторов. Связь между напряженностью поля и наведенным напряжением номинально является линейной при длинах проводников больших, чем одна шестая длины волны. Если размеры проводников приближаются к четверти длины волны или кратны ей, могут возникать резонансные эффекты.

Уровни электромагнитных помех в части наведенных напряжений и токов непрерывных колебаний:

- от 10 до 150 кГц – напряжения 0,1...30 В и токи 0,7...210 мА;
- от 0,15 до 27 МГц – напряжения 0,3...30 В и токи 2...210 мА;
- от 27 до 150 МГц – напряжения 0,3...30 В и токи 2...210 мА.

Напряжения помех, наводимых отдельными радиопередатчиками, работающими на сверхнизких частотах до 150 кГц, могут превышать приведенные значения.

---

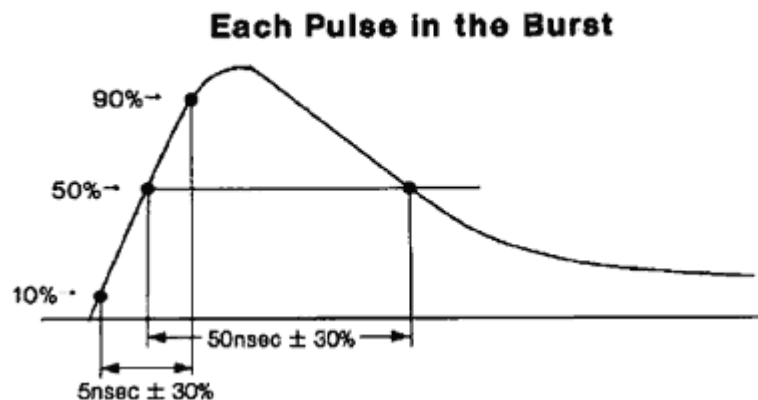
# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## Наносекундные импульсные помехи (EFT/B)

Быстрые электрические переходные процессы вызвали искру в воздухе или другом газе в момент разрыва цепи тока, характерна значительная  $di/dt$ .

Искрение между контактами; сначала при низком напряжении и высокой частоте; позже при более высоком напряжении и более низкой частоте.

### STANDARD EFT WAVEFORM

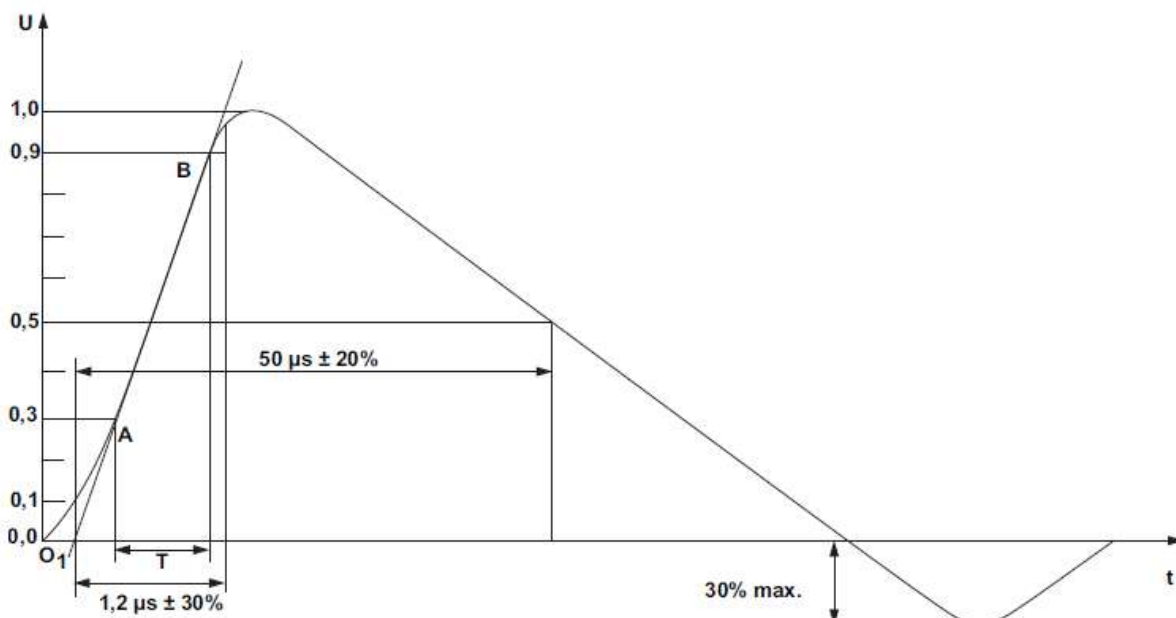


Документы по испытаниям:  
**IEC 61000-4-4:2012 RLV**  
Electromagnetic compatibility (EMC)  
– Part 4-4: Testing and  
measurement techniques –  
Electrical fast transient/burst  
immunity test. (**ГОСТ Р 51317.4.4-  
2007**)

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## Микросекундные импульсные помехи (Surge)

Линии электропередачи могут быть поражены скачками напряжения от выключателей питания и молнии, и стандарт определяет настройку и процедуры испытаний, а также уровни классификации



Документы по испытаниям:

**IEC 61000-4-5:2014**

Electromagnetic compatibility (EMC)  
- Part 4-5: Testing and  
measurement techniques - Surge  
immunity test. (**ГОСТ Р 51317.4.5-  
2007**)





# КОНДУКТИВНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ

а) импульсные помехи большой мощности. Обычно принимается, что различные формы этих импульсных помех обусловлены молниевыми разрядами или функционированием плавких предохранителей. При этом рассматривают:

- импульсы, вызываемые молниевыми разрядами в воздушных распределительных системах;
- импульсы, вызываемые молниевыми разрядами и распространяющиеся в подземных кабелях;
- импульсы, возникающие при функционировании плавких предохранителей за счет запасенной энергии в индуктивности отключаемого оборудования и системы электропитания;

б) сверхкороткие импульсные помехи. Эти импульсные помехи обычно ассоциируются с помехами «искрения» при переключении нагрузок в электрических сетях и могут включать последовательности событий (пачки). Импульсные помехи указанного вида обладают небольшой энергией, но способны приводить к нарушению функционирования ТС;

в) колебательные переходные помехи. Частота колебаний для помех этого вида лежит в пределах от 1 кГц (преимущественно в результате переключения конденсаторов) до нескольких мегагерц (локальные колебания при разъединении цепей при коммутациях). Помехи указанного вида в более высокой части частотного диапазона имеют небольшую энергию, но могут иметь высокие пиковые напряжения. В более низкой части частотного диапазона указанные помехи могут обладать большей энергией, но при более низких пиковых напряжениях.



# КОНДУКТИВНЫЕ АПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПОМЕХИ



Уровни электромагнитных помех в низковольтных системах электроснабжения:

500...4000 В наносекундной длительности. Типовой источник – контактное искрение (Для систем электроснабжения с номинальным напряжением 120...690 В.

Длительность фронта для переходных процессов, возникающих при максимальном значении синусоиды основной частоты электропитания – 5 нс. Длительность переднего фронта переходного процесса – 50 нс. Частота появления – пачки импульсов. Полная длительность события с учетом многократного появления импульсных помех – миллисекунды.



# КОНДУКТИВНЫЕ АПЕРИОДИЧЕСКИЕ ИМПУЛЬСНЫЕ ПОМЕХИ

Уровни электромагнитных помех в низковольтных системах электроснабжения:

1000...4000 В микросекундной длительности. Типовой источник – молниевый разряд на расстоянии менее 1 км (Для систем электроснабжения с номинальным напряжением 120...690 В. Длительность фронта для переходных процессов, возникающих при максимальном значении синусоиды основной частоты электропитания – 1 мкс. Длительность переднего фронта переходного процесса – 50 мкс. Частота появления – многократные импульсы. Полная длительность события с учетом многократного появления импульсных помех – миллисекунды.

500...2000 В микросекундной длительности. Типовым источником является молниевый разряд на расстоянии более 1 км. Длительность фронта для переходных процессов, возникающих при максимальном значении синусоиды основной частоты электропитания, – 10 мкс. Длительность переднего фронта переходного процесса – 1000 мкс. Также наблюдаются многократные импульсы. Полная длительность события с учетом многократного появления импульсных помех – секунды.

0,5...2,0 от максимального напряжения  $U_{\max}$  миллисекундной длительности. Типовой источник – плавкий предохранитель (для переходных процессов, возникающих при максимальном значении синусоиды основной частоты электропитания). Длительность фронта для переходных процессов, возникающих при максимальном значении синусоиды основной частоты электропитания – 0,1 мс. Длительность переднего фронта переходного процесса – 1 мс. Частота появления – редкие импульсы. Полная длительность события с учетом многократного появления импульсных помех – одиночное событие.

---





# КОНДУКТИВНЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ И ИМПУЛЬСНЫЕ ПОМЕХИ

Уровни электромагнитных помех в части колебательных импульсных помех в низковольтных системах электроснабжения:

500...4000 В с высокой частотой колебаний 0,5...5 МГц. Типовой источник – реакция локальной электрической системы на импульсную помеху (Для систем электроснабжения с номинальным напряжением 120...690 В. Приведенные данные не зависят от напряжения системы электроснабжения). Длительность фронта для переходных процессов, возникающих при максимальном значении синусоиды основной частоты электропитания – 50 нс. Длительность переднего фронта переходного процесса – 5 мкс. Частота появления – частые помехи.

500...4000 В со средней частотой колебаний 5...500 кГц. Типовой источник – реакция локальной электрической системы на импульсную помеху (Для систем электроснабжения с номинальным напряжением 120...690 В. Приведенные данные не зависят от напряжения системы электроснабжения). Длительность фронта для переходных процессов, возникающих при максимальном значении синусоиды основной частоты электропитания – 0,5 мкс. Длительность переднего фронта переходного процесса – 20 мкс. Частота появления – случайные помехи.

0,5...3,0  $U_{\max}$  с низкой частотой колебаний 0,2...5 кГц. Типовой источник – переключение сетевых конденсаторов (для переходных процессов, возникающих при максимальном значении синусоиды основной частоты электропитания). Длительность фронта для переходных процессов, возникающих при максимальном значении синусоиды основной частоты электропитания, – 1,5 мкс. Длительность переднего фронта переходного процесса составляет 3 мс. Частота появления – редкие помехи.

---

# КОНДУКТИВНЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ

## Уровни электромагнитных помех в части наведенных напряжений и токов непрерывных колебаний

Степень интенсивно сти помехи	Полоса частот					
	От 10 до 150 кГц <sup>1</sup>		От 0,15 до 27 МГц		От 27 до 150 МГц	
	Напряжение, В	Ток, мА	Напряжение, В	Ток, мА	Напряжение, В	Ток, мА
А	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида					
1	0,1	0,7	0,3	2	0,3	2
2	1	7	1	7	1	7
3	3	21	3	21	3	21
4	10	70	10	70	10	70
5	30	210	30	210	30	210
Х	В соответствии с характеристиками мест размещения ТС					



## Уровни электромагнитных помех в части кондуктивных апериодических импульсных помех в низковольтных системах электроснабжения

Параметр и степень интенсивности помехи	Вид апериодической импульсной помехи			
	Наносекундной длительности	Микросекундной длительности		Миллисекундной длительности
Типовой источник	Контактное искрение <sup>1</sup>	Молниевый разряд на расстоянии менее 1 км <sup>1</sup>	Молниевый разряд на расстоянии более 1 км <sup>1</sup>	Плавкий предохранитель <sup>2</sup>
Длительность фронта <sup>3</sup>	5 нс	1 мкс	10 мкс	0,1 мс
Длительность <sup>4</sup>	50 нс	50 мкс	1000 мкс	1 мс
Частота появления	Пачки импульсов	Многократные импульсы		Редкие импульсы
Полная длительность события <sup>5</sup>	Миллисекунды		Секунды	Одинокое событие
Внутреннее сопротивление источника	50 Ом	1...10 Ом	20...300 Ом	0,2...2 Ом
А	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида			
1	0,5 кВ	1 кВ	0,5 кВ	Помехи отсутствуют
2	1 кВ	2 кВ	1 кВ	$0,5 U_{\max}$
3	2 кВ	4 кВ	1,5 кВ	$1,0 U_{\max}$
4	4 кВ	8 кВ	2 кВ	$2,0 U_{\max}$

## Уровни электромагнитных помех в части колебательных импульсных помех в низковольтных системах электроснабжения

Параметр и степень интенсивности электромагнитной помехи	Вид колебательной импульсной помехи		
	С высокой частотой колебаний (0,5...5 МГц)	Со средней частотой колебаний (5...500 кГц)	С низкой частотой колебаний (0,2...5 кГц)
Типовой источник	Реакция локальной электрической системы на импульсную помеху <sup>1</sup>	Реакция электрической сети здания на импульсную помеху <sup>1</sup>	Переключение сетевых конденсаторов <sup>2</sup>
Длительность фронта <sup>3</sup>	50 нс	0,5 мкс	1,5 мкс
Длительность <sup>4</sup>	5 мкс	20 мкс	3 мс
Частота появления	Частые помехи	Случайные помехи	Редкие помехи
Внутреннее сопротивление источника	50...300 Ом	10...50 Ом	10...50 Ом
A	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида		
1	0,5 кВ	1 кВ	0,5 U <sub>max</sub>
2	1 кВ	2 кВ	1,0 U <sub>max</sub>
3	2 кВ	4 кВ	2,0 U <sub>max</sub>
4	4 кВ	6 кВ	3,0 U <sub>max</sub>
X	В соответствии с характеристиками мест размещения ТС		



# ИЗЛУЧАЕМЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ

Эти электромагнитные помехи, действующие как на отдельной частоте, так и одновременно на нескольких частотах, могут оказывать существенное влияние на функционирование ТС из-за селективности указанных ТС или из-за возможных механизмов возникновения резонансов.

Излучаемые колебательные электромагнитные поля представляют собой главным образом излучения радиопередающих устройств с модулированными несущими.

Источниками излучаемых колебательных электромагнитных полей могут быть:

телевизионные и радиовещательные передатчики;

портативные и мобильные радиостанции;

промышленные, научные, медицинские и бытовые (ПНМБ) высокочастотные устройства.

Многие импульсные электромагнитные поля, такие как излучения радиолокационных станций, являются пачками незатухающих электромагнитных волн. Источники, создающие значительные кондуктивные помехи на гармониках основной частоты электрической сети, также могут рассматриваться как эмитирующие излучаемые незатухающие электромагнитные поля, например, импульсные источники питания с широтно-фазовой модуляцией

---



# ИЗЛУЧАЕМЫЕ КОЛЕБАТЕЛЬНЫЕ ЭМП

Источниками непрерывных или колебательных ЭМП являются:

электрические системы передач электроэнергии;

электрическое оборудование, применяемое в различных промышленных технологиях;

электротермическое и электротехнологическое оборудование;

радио- и телевизионные системы (включая радиолокационные станции), системы переносной и стационарной радиосвязи, сотовые телефоны и т. д.;

персональные ЭВМ;

микроволновые печи и др.

По частотам, или частотному диапазону их можно условно разделить на источники:

постоянного электрического или магнитного поля;

электрического и магнитного полей:

- промышленной частоты (50 или 60 Гц),

- средней частоты (от 200 до 10 000 Гц),

- высокой частоты (от 10 кГц до нескольких мегагерц и от нескольких мегагерц до 300 ГГц).

По характеру излучаемого ЭМП источники можно подразделить на источники:

*преднамеренного и непреднамеренного излучения ЭМП в окружающее пространство.*

---

# ИЗЛУЧАЕМЫЕ ВЫСОКОЧАСТОТНЫЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ (В/М)

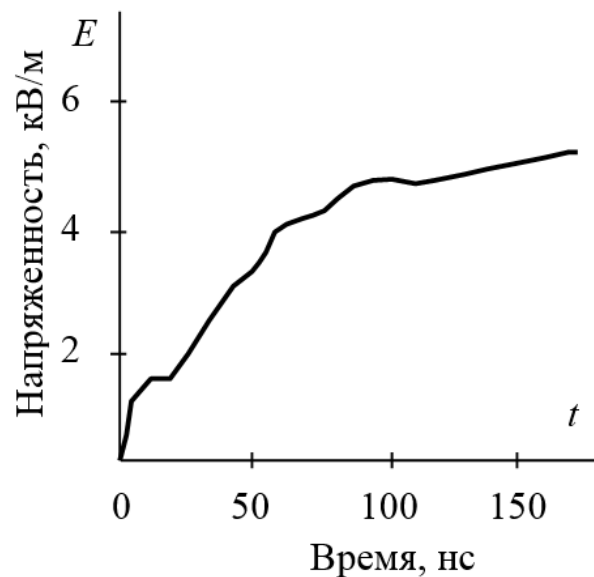
Вид и степень интенсивности помехи	Полоса частот						
	9 кГц...27 МГц	26...28 МГц	Диапазоны любительской радиосвязи	27...1000 МГц			1...40 ГГц
	Источники						
	Все источники	Радиостанции личного пользования гражданского диапазона	Передатчики любительской радиосвязи	Портативные радиотелефоны (кроме гражданского диапазона)	Мобильные радиотелефоны, применяемые на автотранспортных средствах (кроме гражданского диапазона)	Все источники (кроме гражданского диапазона, портативных и мобильных радиотелефонов)	Все источники
A	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида						
1	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3	0,3
2	1	1	1	1	1	1	1
3	3	3	3	3	3	3	3
4	10	10	10	10	10	10	10
5	30	30	30	30	30	30	30
X	В соответствии с характеристиками мест размещения ТС						

Описание электромагнитной обстановки в части источников высокочастотного электромагнитного излучения основано на оценке помех двух видов: излучаемых колебательных электромагнитных полей; излучаемых импульсных (переходных) электромагнитных полей.

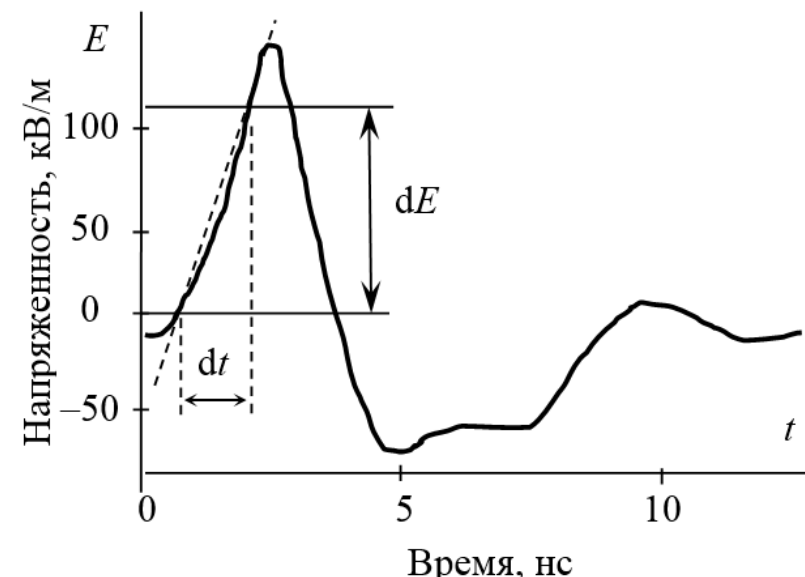


# ИЗЛУЧАЕМЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ (ПЕРЕХОДНЫЕ) ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Представляют собой помехи, которые, несмотря на малую длительность, могут оказывать существенное влияние на функционирование ТС из-за значительной скорости нарастания импульса. Фактически реальные импульсы имеют сложную форму, которая может быть известна только частично вследствие ограниченной полосы пропускания средств измерения.



а



б

Рис. 4.4. Типичные формы излучаемых импульсных полей

а представляет электрическое поле разряда молнии на расстоянии 1 км;  
б – электрическое поле на расстоянии 1 м от места разряда статического электричества

# ИЗЛУЧАЕМЫЕ ИМПУЛЬСНЫЕ (ПЕРЕХОДНЫЕ) ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ

Общими причинами возникновения излучаемых импульсных электромагнитных полей являются: молниевые разряды; разряды статического электричества; включения/выключения нагрузок в низковольтных и высоковольтных электрических сетях. Уровни в В/м/нс в таблице

Параметр и степень интенсивности помехи	Источник электромагнитной помехи			
	Молниевые разряды на землю <sup>1</sup>	Выключатели с газовой изоляцией на электрических подстанциях <sup>2</sup>	Выключатели на открытых электрических подстанциях	Перенапряжения от молниевых разрядов и коммутационной деятельности в воздушных линиях электропередач
Длительность фронта	100...500 нс <sup>2</sup>	10 нс <sup>3</sup>	100 нс <sup>3</sup>	1 мкс <sup>3</sup>
A	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида			
1	30	100	30	3
2	100	300	100	10
3	300	1000	300	30
4	1000	3000	1000	100
5	3000	10000	3000	300
X	В соответствии с характеристиками мест размещения ТС			



## 2.7 ИСТОЧНИКИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО РАЗРЯДА

*Электростатический разряд* – импульсный перенос электрического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами. Он происходит в результате приближения заряженного человека (объекта) к другому человеку (объекту)

При трении пары материалов из трибоэлектрического ряда, материал, расположенный ближе к положительному концу ряда, зарядится положительно, а другой – отрицательно. Воздух, кожа и волосы человека, стекло, шерсть, мех и бумага заряжены положительно, тогда как древесина, твердый каучук, ацетатный шелк, полиэстер, полиуретан и поливинилхлорид заряжены отрицательно.

Материалы, проявляющие трибоэлектрический эффект, принято располагать в трибоэлектрический ряд, один конец которого является положительным, а другой – отрицательным.

---

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## Электростатические разряды (ESD)

ESD - передача электрического заряда между телами с разным электрическим потенциалом в непосредственной близости или через прямой контакт

Тяжелые последствия (необратимые)

- Выгорания соединений
- Повреждение интегральных микросхем
- Пробой диэлектрика

«Легкие» последствия(цифровая электроника)

- Помехи в эфире
- Логические ошибки, перезагрузка устройств, потеря данных, сбои выполнения программ

Документы по испытаниям:

**IEC 61000-4-2:2008**

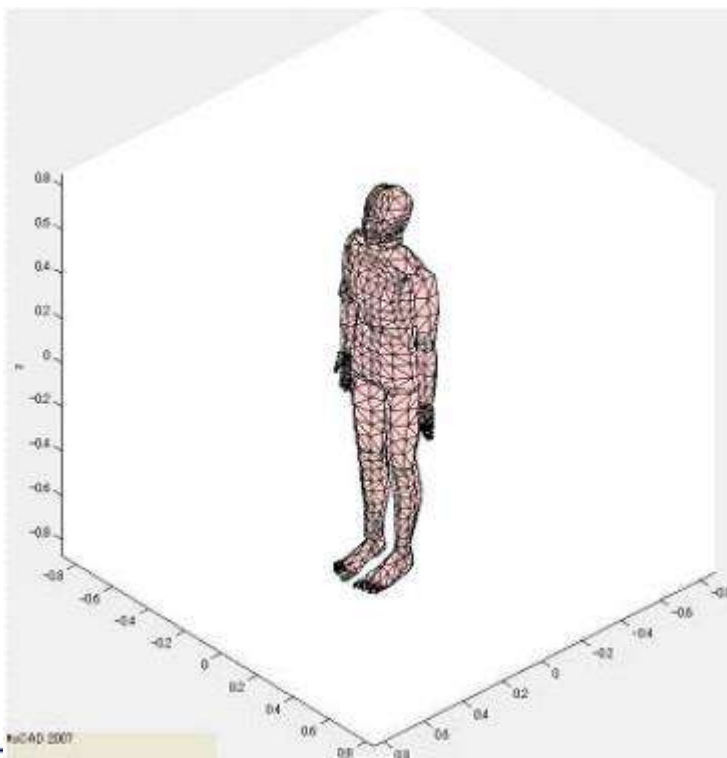
Electromagnetic compatibility (EMC)

- Part 4-2: Testing and  
measurement techniques -

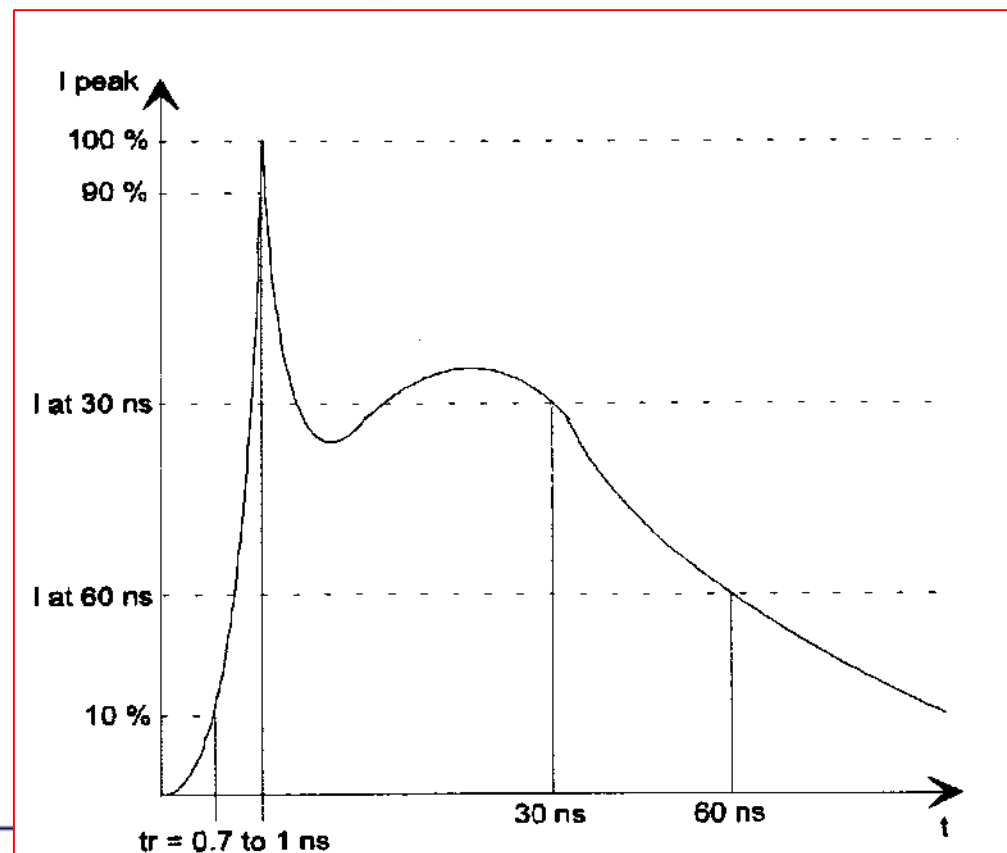
Electrostatic discharge immunity  
test. (**ГОСТ Р 51317.4.2-2010**)

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ЯВЛЕНИЯ:

## Электростатические разряды (ESD): Источники



Человек:  
 $C=50-250 \text{ pF}$   
 $R=500 \text{ Ohm}-10 \text{ kOhm}$   
 $L=50-200 \text{ nH}$   
 $U=0-30 \text{ kV}$





# ЭСР

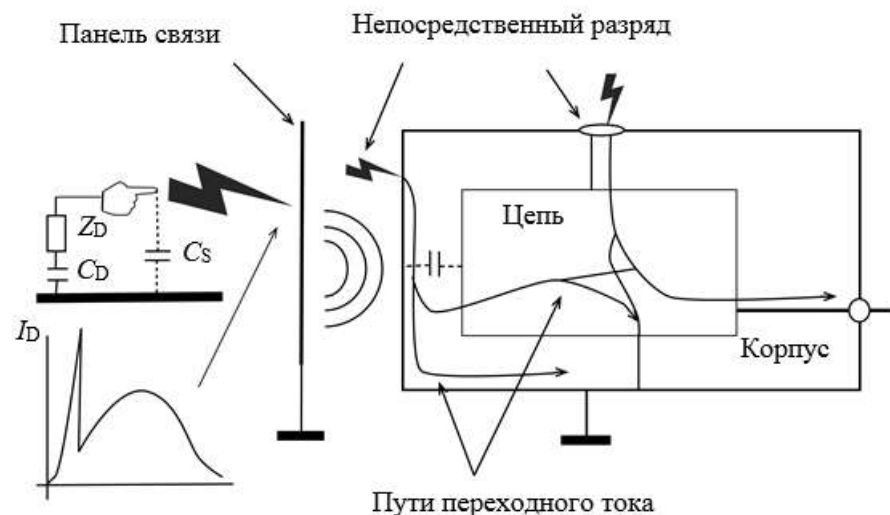


Рис. 1.7. Схема воздействия на изделие электростатического разряда

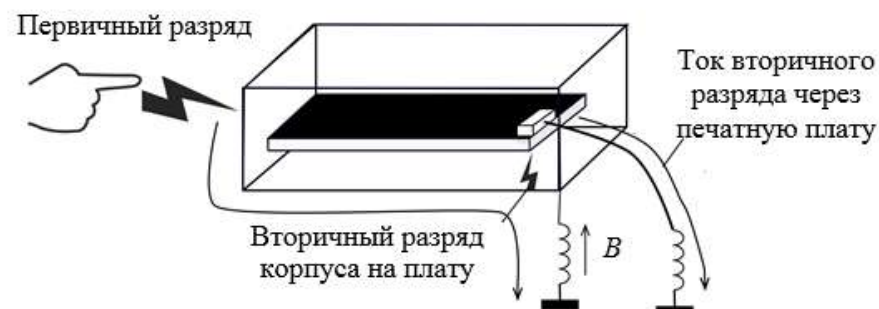


Рис. 1.8. Схема воздействия первичного и вторичного разрядов

1. *Токи электростатических разрядов.* Скорости изменения тока разряда и зарядное напряжение перед разрядом являются важными параметрами, определяющими интенсивность электромагнитного воздействия, которые могут составлять, соответственно:

- от 25 до 100 А/нс и от 8 до 30 кВ при медленном разряде, времени нарастания тока разряда 5 нс, длительности разряда 15 нс и частоте появления, зависящем от числа людей, находящихся в помещении;
- от 25 до 80 А/нс и от менее 1 до 8 кВ при быстром разряде, времени нарастания тока разряда 0,5 нс, длительности разряда 2 нс и частоте появления, зависящем от числа людей, находящихся в помещении.

2. *Электромагнитные поля, создаваемые электростатическими разрядами,* характеризуются скоростью изменения импульсных электрических и магнитных полей, внешних по отношению к рецептору, измеренных на расстоянии 0,2 м от места электростатического разряда. Уровни электромагнитных помех в части электромагнитных полей, вызванных электростатическими разрядами, следующие: скорость изменения напряженности электрического поля – 250...2000 В/(м·нс) и скорость изменения напряженности магнитного поля – 2...8 А/(м·нс).

# НАПРЯЖЕНИЕ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКОГО ЗАРЯДА



Рис. 2.11. Значения статических напряжений

Напряжение, до которого предмет может быть заряжен, зависит от его ёмкости и подчиняется закону  $Q = CU$ . Человеческое тело может заряжаться благодаря электростатической индукции до нескольких киловольт. Скорость, с которой заряд будет стекать с тела во внешнюю среду и таким образом нейтрализоваться, зависит от поверхностного сопротивления тела и сопротивления внешней среды. Это, в свою очередь, является функцией относительной влажности: чем больше влажность воздуха, тем более низкое поверхностное сопротивление изолятора и, следовательно, более быстрое стекание зарядов.

# ЭСР

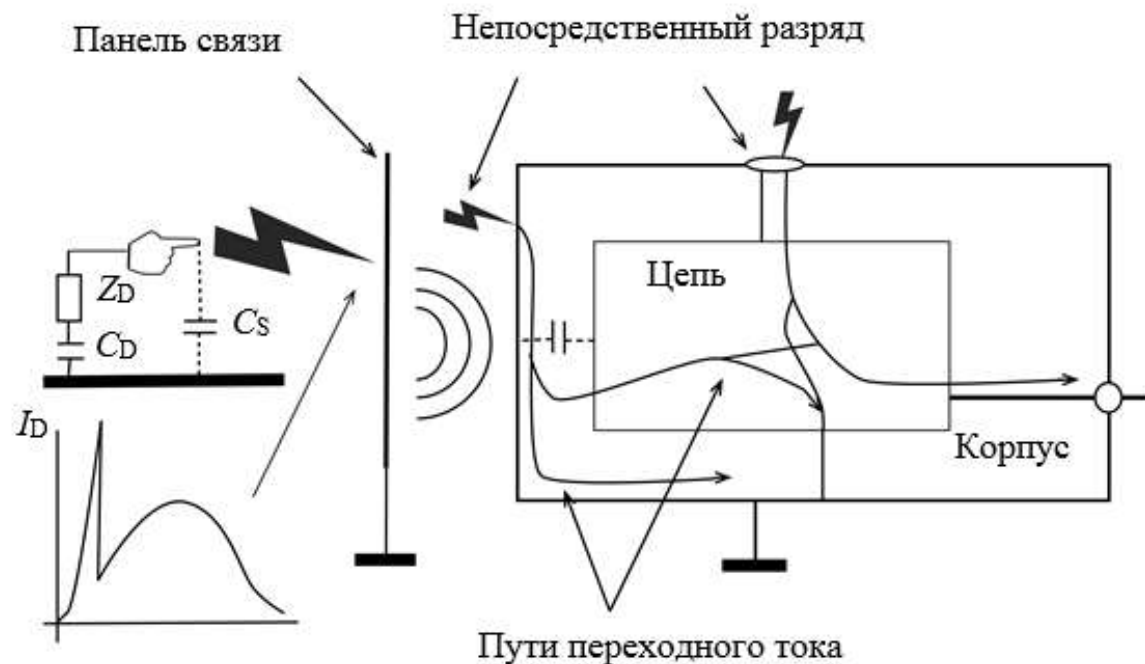


Рис. 1.7. Схема воздействия на изделие электростатического разряда  
Электростатический разряд может проникать в устройство через кабели или через его корпус. В непосредственной близости от устройства он может создавать локальное поле, которое непосредственно влияет на оборудование.

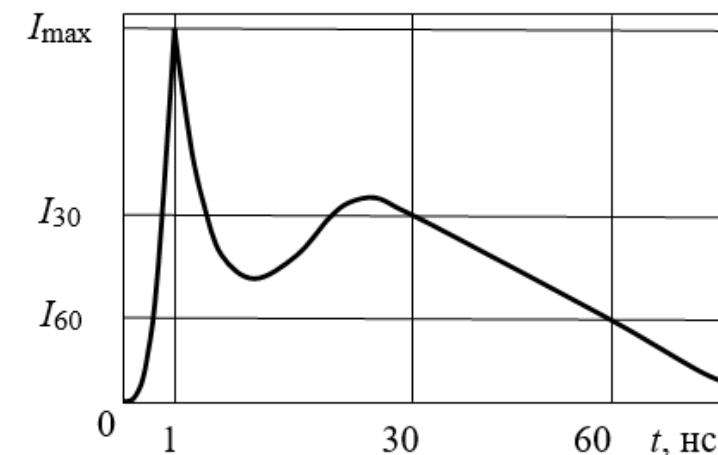


Рис. 4.5. Импульс разрядного тока

Градиент напряжения пробоя в сухом воздухе – приблизительно 30 кВ/см, но он значительно уменьшается по поверхности, особенно если поверхность покрыта грязью или другими веществами.

# ТОКИ ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИХ РАЗРЯДОВ

В таблице приведены сведения о скорости изменения тока разряда в амперах на наносекунду и о зарядном напряжении перед разрядом в киловольтах, которые являются важными параметрами, определяющими интенсивность электромагнитного воздействия на технические средства.

Параметр и степень интенсивности электромагнитной помехи	Вид разряда			
	Медленный		Быстрый	
Время нарастания тока разряда	5 нс		0,3 нс	
Длительность разряда	15 нс		2 нс	
Частота появления	Зависит от числа людей в помещении			
Внутреннее сопротивление источника	100...500 Ом <sup>2</sup> (Зависит от источника образования и передачи статического напряжения (электрический инструмент, руки человека, предметы мебели))			
Емкость источника	100...500 пФ			
Параметр и степень интенсивности электромагнитной помехи	Скорость изменения тока разряда, А/нс	Зарядное напряжение, кВ	Скорость изменения тока разряда, А/нс	Зарядное напряжение, кВ
А	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида			
1	—	—	—	<1
2	25	—	25	2
3	40	—	40	4
4	80	8	80	8
5	100	15	—	—
6	—	30	—	—
Х	В соответствии с характеристиками мест размещения ТС			

## ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОЛЯ, СОЗДАВАЕМЫЕ ЭСР

В таблице приведены сведения о скорости изменения импульсных электрических и магнитных полей, внешних по отношению к рецептору, измеренных на расстоянии 0,2 м от места электростатического разряда.

Степень интенсивности электромагнитной помехи	Скорость изменения напряженности электрического поля, В/м·нс	Скорость изменения напряженности магнитного поля, А/м·нс
A	В соответствии с требованиями к ТС конкретного вида	
1	250	2
2	500	4
3	1000	8
4	2000	16
X	В соответствии с характеристиками мест размещения ТС	





## REFERENCE

1. **EMC of Analog Integrated Circuits.** J-M Redouté, M. Steyaert. Springer Dordrecht Heidelberg London New York 2010.
  2. IEC TR 61000-2-5:2011 **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-5: Environment - Description and classification of electromagnetic environments.** International Electrotechnical Commission 2011
  3. IEC 61000-4-2:2008 **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test.** International Electrotechnical Commission 2008
  4. IEC 61000-4-4:2012 RLV **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test.** International Electrotechnical Commission 2015
  5. IEC 61000-4-8:2009 **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-8: Testing and measurement techniques - Power frequency magnetic field immunity test.** International Electrotechnical Commission 2009
  6. IEC 61000-4-11:2004 **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests.** International Electrotechnical Commission 2004
  7. **Elektromagnetische Schirmung. Theorie und Praxisbeispiele.** Hans A. Wolfsperger. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008
-



СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ

Кафедра БЖД

## Раздел 3. Пути распространения и проникновения электромагнитных помех

- 3.1. Электромагнитная обстановка.
- 3.2. Пути распространения и проникновения помех в технические системы.
- 3.3. Воздействие помех на цифровую и аналоговую аппаратуру.
- 3.4. Высокоинтенсивные помехи, создаваемых молниевыми разрядами или другими источниками преднамеренно, к примеру высотным ядерным взрывом.

## 3.1 ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА

Совокупность электромагнитных явлений, существующих в данном месте.

Примечание - В общем, электромагнитная обстановка зависит от времени, и для ее описания может требоваться статистический подход.

---



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА

Для электростанций и подстанций электромагнитную обстановку принято характеризовать как легкую (класс 1), средней жесткости (класс 2), жесткую (класс 3) и крайне жесткую (класс 4).

В корреляции с электромагнитной обстановкой устанавливают степени жесткости испытаний технических средств на электромагнитную совместимость.

## **Класс 1. Легкая электромагнитная обстановка:**

- осуществлены оптимизированные и скоординированные мероприятия по подавлению помех, защите от перенапряжений во всех цепях;
- электропитание отдельных элементов устройства резервировано, силовые и сигнальные цепи выполнены отдельно;
- выполнение заземлений, прокладка кабелей, экранирование произведено в соответствии с требованиями электромагнитной совместимости;
- климатические условия контролируются и приняты специальные меры по предотвращению разрядов статического электричества.

## **Класс 2. Электромагнитная обстановка средней жесткости:**

- цепи питания и управления частично оборудованы помехозащитными устройствами и устройствами для защиты от перенапряжений;
- отсутствуют силовые выключатели, устройства для отключения конденсаторов, катушек индуктивностей;
- электропитание устройств осуществляется от сетевых стабилизаторов;
- имеется тщательно выполненное заземляющее устройство;
- токовые контуры разделены гальванически;
- предусмотрено регулирование влажности воздуха, материалы, способные электризоваться трением, отсутствуют;
- применение радиопереговорных устройств, передатчиков, запрещено.

Эта обстановка типична для диспетчерских помещений промышленных предприятий, электростанций и подстанций.



# ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ОБСТАНОВКА

## **Класс 3. Жесткая электромагнитная обстановка:**

- защита от перенапряжений в силовых цепях и цепях управления не предусмотрена;
- повторного зажигания дуги в коммутационных аппаратах не происходит;
- имеется контур заземления;
- провода электропитания, управления и коммутационных цепей недостаточно разделены;
- кабели линий передачи данных, сигнализации, управления разделены;
- относительная влажность воздуха поддерживается в определенных пределах, нет материалов, электризуемых трением;
- использование переносных радиопереговорных устройств ограничено (установлены ограничения приближения к приборам на определенное расстояние).

Эта обстановка характерна для промышленных цехов, электростанций, релейных помещений подстанций.

## **Класс 4. Крайне жесткая электромагнитная обстановка:**

- защита в цепях управления и силовых контурах от перенапряжений отсутствует;
- имеются коммутационные устройства, в аппаратах которых возможно повторное зажигание дуги;
- существует неопределенность в выполнении заземляющего устройства;
- нет пространственного разделения проводов электропитания, управления и коммутационных цепей;
- управление и сигнализация осуществляются по общим кабелям;
- допустимы любая влажность воздуха и наличие электризуемых трением материалов;
- возможно неограниченное использование переносных переговорных устройств;
- в непосредственной близости могут находиться мощные радиопередатчики;
- вблизи могут находиться дуговые технологические устройства (электропечи, сварочные машины и т.п.).

Типичными для этого класса являются территории вблизи промышленных предприятий, электростанций, открытых распределительных устройств среднего и высокого напряжений, где не предусматриваются специальные меры по обеспечению электромагнитной совместимости.





# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

По ГОСТ Р 51317.2.4 «Уровни электромагнитной  
совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в  
системах электроснабжения промышленных предприятий»

**Класс 1.** Применяется для электромагнитной обстановки в защищенных системах электроснабжения и характеризуется уровнями электромагнитной совместимости более низкими, чем уровни электромагнитной совместимости в системах электроснабжения общего назначения. Он соответствует применению ТС, восприимчивых к помехам в питающей сети, например, контрольно-измерительного лабораторного оборудования, отдельных средств управления технологическими процессами и защиты, образцов вычислительной техники некоторых видов и т.д.

---



# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

По ГОСТ Р 51317.2.4 «Уровни электромагнитной  
совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в  
системах электроснабжения промышленных предприятий»

**Класс 2.** Данный класс обычно применяется для электромагнитной обстановки в точке общего присоединения (ТОП) и в точке внутрипроизводственного присоединения (ТВП) для промышленных условий эксплуатации ТС. Уровни электромагнитной совместимости данного класса идентичны таковым для систем электроснабжения общего назначения. Поэтому ТС, предназначенные для подключения к электрическим сетям общего назначения, могут применяться в условиях данного класса промышленной электромагнитной обстановки.

---



# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

По ГОСТ Р 51317.2.4 «Уровни электромагнитной  
совместимости для низкочастотных кондуктивных помех в  
системах электроснабжения промышленных предприятий»

**Класс 3.** Применяется только для ТВП в промышленных условиях эксплуатации ТС. Он имеет более высокие уровни электромагнитной совместимости, чем таковые для класса 2 в отношении некоторых электромагнитных явлений, вызывающих помехи. Электромагнитная обстановка должна быть отнесена к классу 3 в случае, если имеет место любое из следующих условий:

- питание большей части нагрузки осуществляется через преобразователи;
  - используется электросварочное оборудование;
  - имеют место частые пуски электродвигателей большой мощности;
  - имеют место резкие изменения нагрузок в электрических сетях.
-

# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

## По ГОСТ Р 51317.2.5 «Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств»

**Класс 1 мест размещения ТС** может быть типичным для применения ТС в жилых помещениях сельской местности.

Порты электропитания переменного тока:

- могут быть подключены к воздушным силовым линиям малонаселенных районов;
- подвергаются значительному воздействию молниевых разрядов; - ....

Порты ввода-вывода сигналов:

- подключаемые линии связи проходят в малонаселенных районах;
- подключаемые кабели управления имеют обычно длину не более 10 м; ...





# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

## По ГОСТ Р 51317.2.5 «Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств»

### Класс 2 мест размещения ТС

может быть типичным для применения ТС в  
жилых городских помещениях.

Порты электропитания переменного тока:

- подключают к силовым кабелям;
- возможно применение коротких отрезков  
воздушных силовых линий.
- ....

Порты ввода-вывода сигналов:

- возможно применение коротких отрезков  
воздушных линий связи

...





# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

## По ГОСТ Р 51317.2.5 «Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств»

### Класс 3 мест размещения ТС

может быть типичным для применения ТС в  
коммерческих зонах.

Порты электропитания переменного тока:

- подключают к силовым кабелям;
- применение оборудования с установкой на крышах  
зданий (возможность воздействия молниевых разрядов  
на ТС)
- ....

Порты ввода-вывода сигналов:

- в системах передачи сигналов возможны помехи при  
коммутационных процессах в сетях электропитания.

...



# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

## По ГОСТ Р 51317.2.5 «Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств»

**Класс 4 мест размещения ТС** может быть типичным для применения ТС в производственных зонах с малым энергопотреблением.

Порты электропитания переменного тока:

- подключают к силовым кабелям;
- применение оборудования с установкой на крышах зданий (возможность воздействия молниевых разрядов на ТС)
- ....

Порты ввода-вывода сигналов:

- в системах передачи сигналов возможны помехи при коммутационных процессах в сетях электропитания.

...



# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

## По ГОСТ Р 51317.2.5 «Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств»

**Класс 5 мест размещения ТС** может быть типичным для применения ТС на предприятиях тяжелой промышленности, электростанциях и электрических подстанциях.

Порты электропитания переменного тока:

- наличие отдельных электрических подстанций высокого напряжения для силовых установок большой мощности;
- возможность применения автономных силовых фидеров;
- возможность собственной генерации питающего напряжения
- ....

Порты ввода-вывода сигналов:

- силовые и сигнальные кабели могут быть не разнесены;
- токи, вызванные операциями переключения в системе электропитания, могут создавать значительные помехи в системах связи;







# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

По ГОСТ Р 51317.2.5 «Классификация электромагнитных помех в местах  
размещения технических средств»

## Класс 6 мест размещения ТС

может быть типичным для применения ТС вблизи оживленных  
автомагистралей и на улицах с интенсивным движением

Порты электропитания переменного тока:

- могут быть подключены к силовым линиям, проходящим на открытом воздухе;
- подвергаются значительным воздействиям молниевых разрядов.
- ....

Порты ввода-вывода сигналов:

- подвергаются значительным воздействиям молниевых разрядов.

...



# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

## По ГОСТ Р 51317.2.5 «Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств»

### Класс 7 мест размещения ТС

может быть типичным для применения ТС в помещениях центра передачи данных.

Порты электропитания переменного тока:

- применение (нахождение в резерве) систем бесперебойного питания;
- возможно использование резервного электрического генератора..
- ....

Порты ввода-вывода сигналов:

- использование устройств защиты от перенапряжений на линиях связи;
- применяются мероприятия для уменьшения воздействия электростатических разрядов.

...



# КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ОБСТАНОВКИ

По ГОСТ Р 51317.2.5 «Классификация электромагнитных помех в местах размещения технических средств»

## Класс 8 мест размещения ТС

может быть типичным для применения ТС в помещениях клиник, больниц, госпиталей

Порты электропитания переменного тока:

- подключение медицинского оборудования жизнеобеспечения;
- использование изолирующих трансформаторов;
- ....

Порты ввода-вывода сигналов:

- помехи в результате процессов коммутации в силовых сетях могут оказывать влияние на аппаратуру передачи данных;
- применение низкоуровневых систем регистрации данных.

...



## 3.2 ПУТИ ПРОНИКНОВЕНИЯ ЭМ ПОМЕХ В ТС

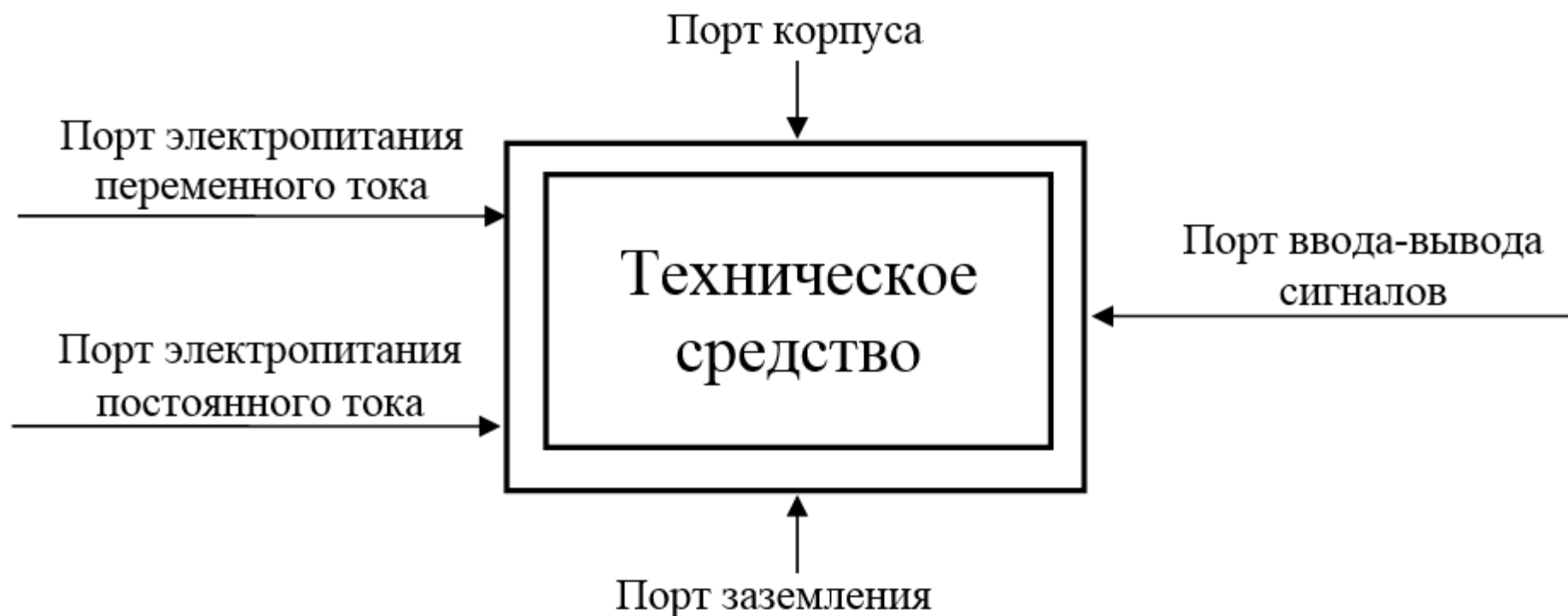


Рис. 3.1. Воздействие электромагнитных помех на порты ТС

# ПУТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ СВЯЗЕЙ

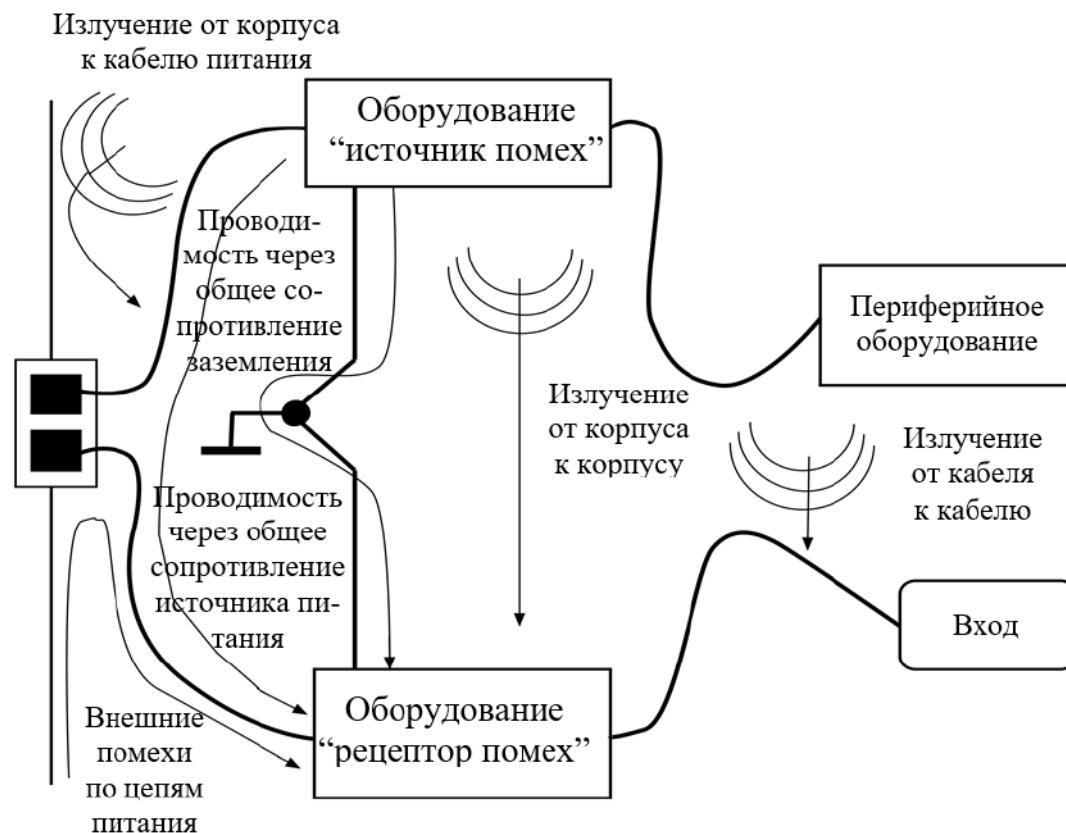


Рис. 2.2. Пути электромагнитных связей

Большинство электронных средств содержат элементы, которые способны принимать сигналы через компоненты, которые ведут себя как антенны (кабели, проводники печатных плат, внутренние проводные и механические конструкции). Они могут неумышленно передавать энергию через электрическое, магнитное или электромагнитное поля в цепи, с которыми они имеют связь. Заземляющие и экранирующие плоскости либо усиливают мешающий сигнал за счет отражения, либо уменьшают его за счет поглощения. Связь "провод-провод" может быть емкостной или индуктивной и зависит от направления проводов, их длины и взаимного расположения.



## УРОВЕНЬ СВЯЗИ

**Коэффициент связи:** Отношение значения величины, обычно напряжения или тока, возникающих в установленном месте данной цепи, к соответствующему значению величины в установленном месте в цепи, из которой энергия передается за счет электромагнитной связи.

**Путь связи, путь распространения электромагнитной энергии:** Путь, по которому электромагнитная энергия или ее часть передается от определенного источника к другой цепи или устройству.

---

# Механизм связи источник-путь-рецептор



Рис. 4.1. Три составляющие проблемы ЭМС

Любая ситуация несовместимости должна иметь источник и рецептор (приёмник) электромагнитной помехи. Связь непосредственная при их близости или посредством энергии излучения.



## Непосредственная связь



Рис. 4.2. Связь через линии электропитания

Связь через контакт между источником и рецептором. Помехи имеются на выходе порта питания. Распространяются по проводнику до порта питания рецептора. Режим либо дифференциальный (т.е. между проводниками), либо общий (т.е. вдоль проводников к земле).

# Связь через общее сопротивление

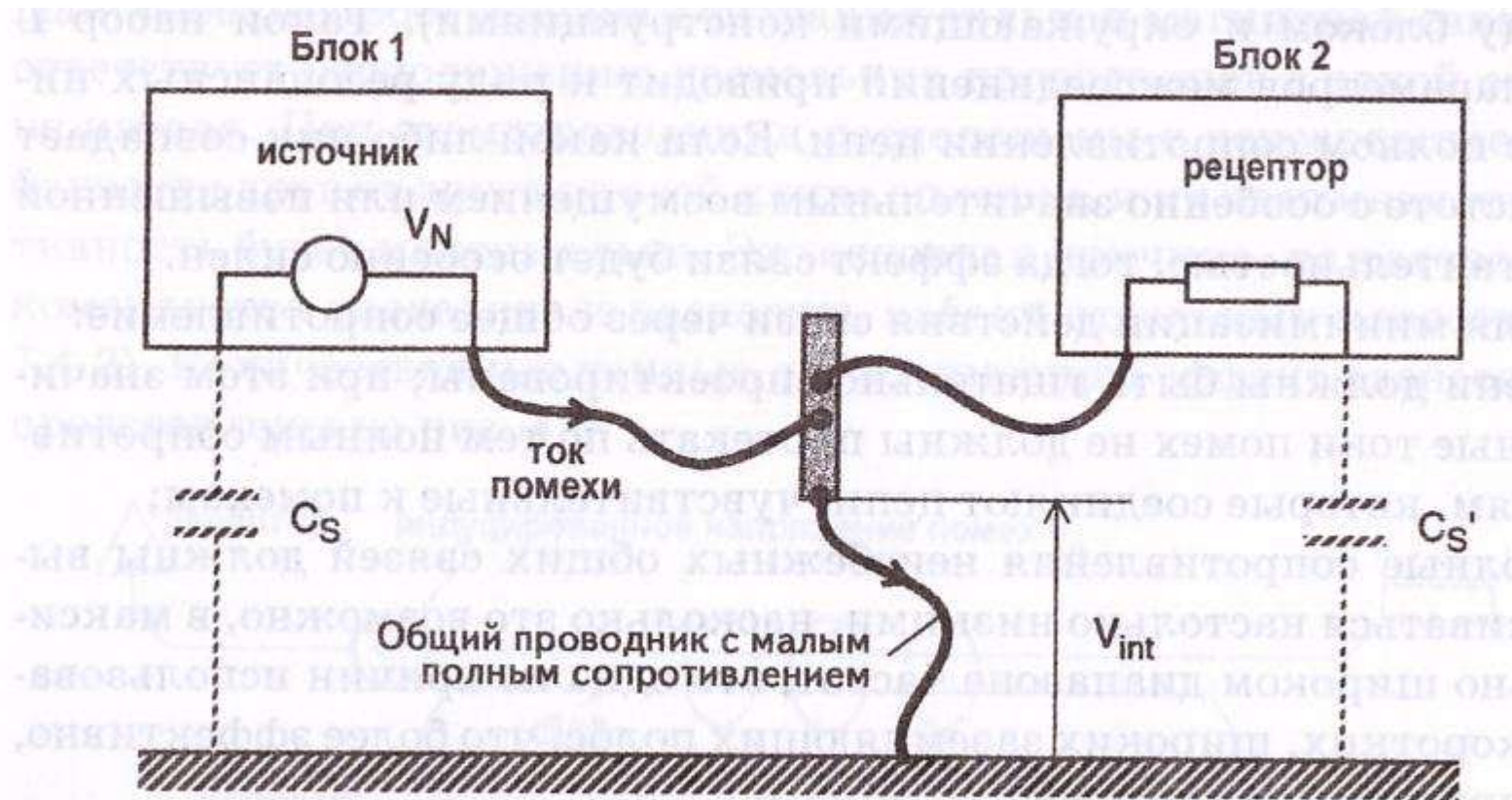
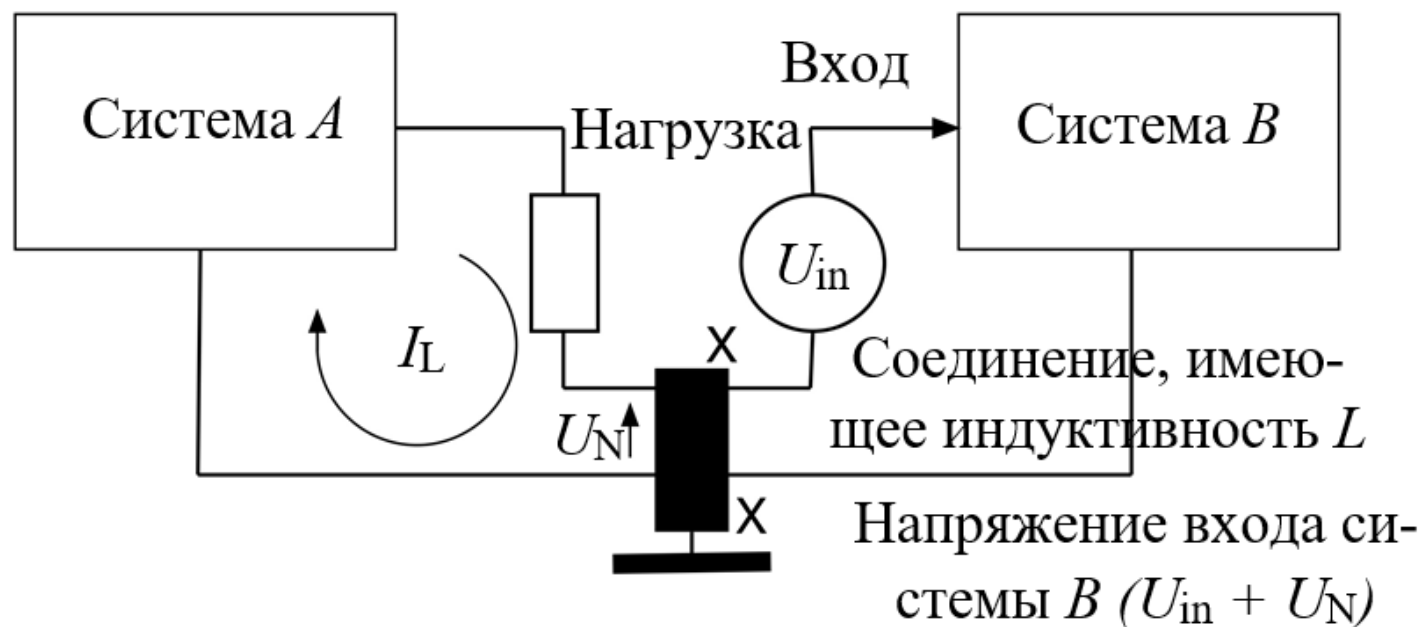


Рис. 4.3. Связь через общее сопротивление

Общий типичный пример – наличие общего заземления. Имеется общая шина заземления, подключённая к заземлителю. Внутренний шум  $V_N$  попадает через ток помехи на заземление, вызывая напряжение шума  $V_{int}$ , которое воздействует на рецептор. Задача ЭМС – в правильном проектировании системы заземления (сопротивление должно быть очень низким).

## Связь через общее сопротивление



В случае, когда источник помехи использует общее с рецептором соединение с землёй, любой ток, протекающий через общее полное сопротивление секции X–X, создаёт напряжение последовательно с входным напряжением системы  $B$ .

Существует паразитная обратная связь через общее полное сопротивление, которое вызывает колебательный процесс.



## Связь в ближней зоне



**Рис. 4.4.** Связь посредством магнитного поля

При протекании электрического тока появляется магнитное поле. При появлении напряжения появляется электрическое поле.

Кабели взаимодействуют между собой посредством взаимной индуктивности, создавая напряжение  $V_n = -M di/dt$ , которое прикладывается последовательно с полезным сигналом в цепи рецептора. Задача ЭМС – в правильном проектировании кабельных систем (разнесении силовых и сигнальных кабелей, близкое расположение прямого и обратного проводников, экранирование от внешних полей, коаксиальный экран, витая пара и т.д.).

## Коаксиальный экран

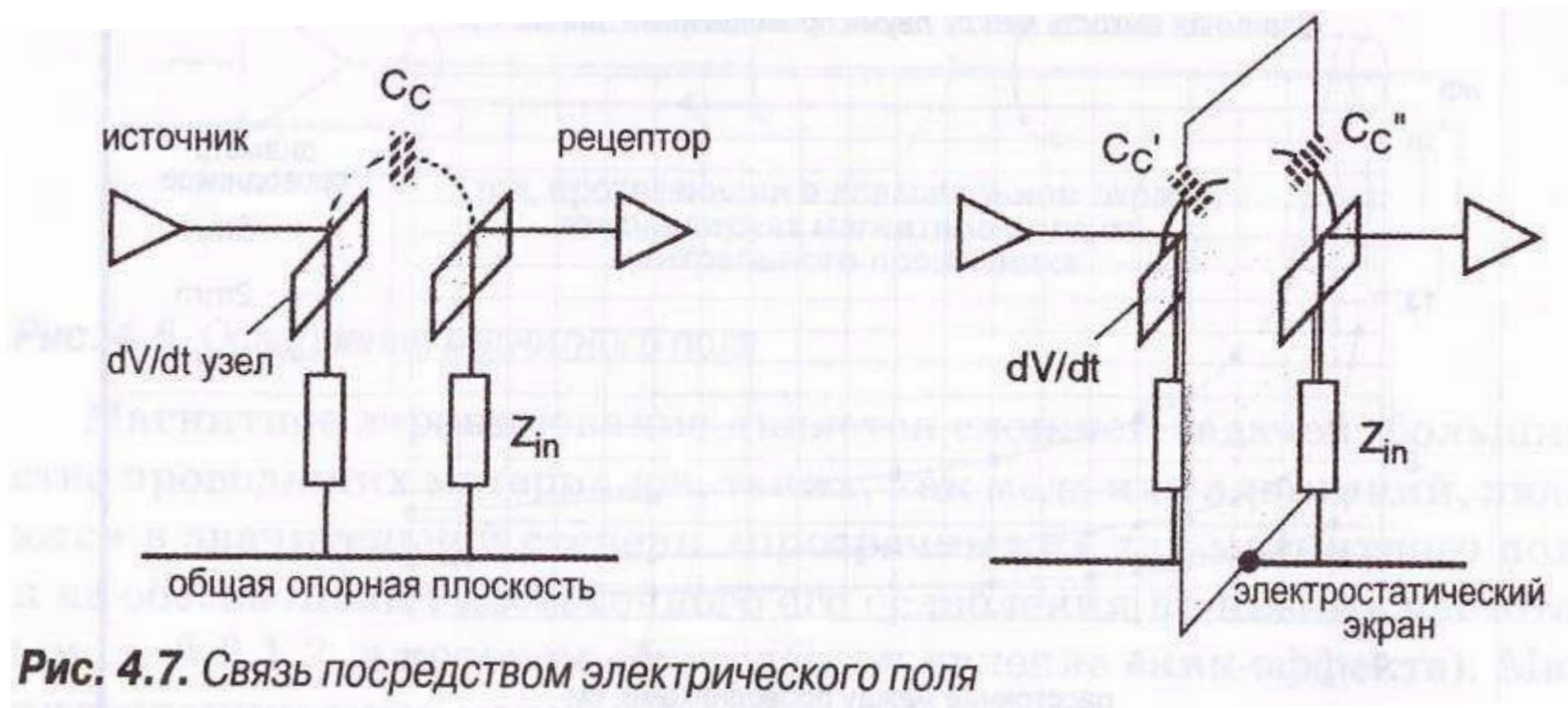


**Рис. 4.5.** Ослабление магнитного поля

Решением многих проблем, связанных с экранированием магнитного поля, является коаксиальный экран с противоположными одинаковыми по силе токами, при котором магнитная связь полностью отсутствует. Это основная причина заземления экрана кабеля на каждом конце. Так экранируют высокочастотные кабели.



# Электрическая или емкостная связь



Между двумя проводниками, имеющими разность потенциалов, существует электрическое поле, которое индуцирует напряжение на проводнике-рецепторе  $V_{in} = C_c Z_{in} dV/dt$

Проблема решается экранированием с заземлением (имеющий низкий помеховый потенциал).

# ПРОНИКНОВЕНИЕ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ

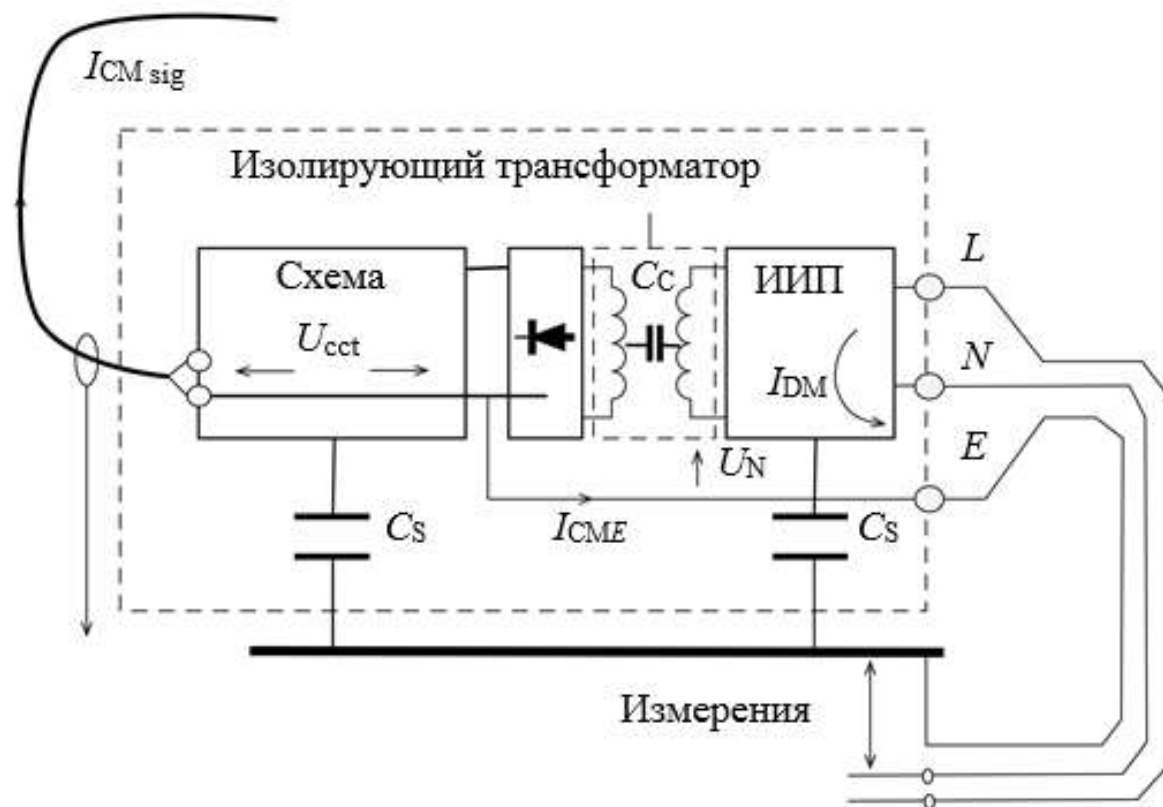


Рис. 2.7. Пути паразитной связи для эмиссии кондуктивных помех

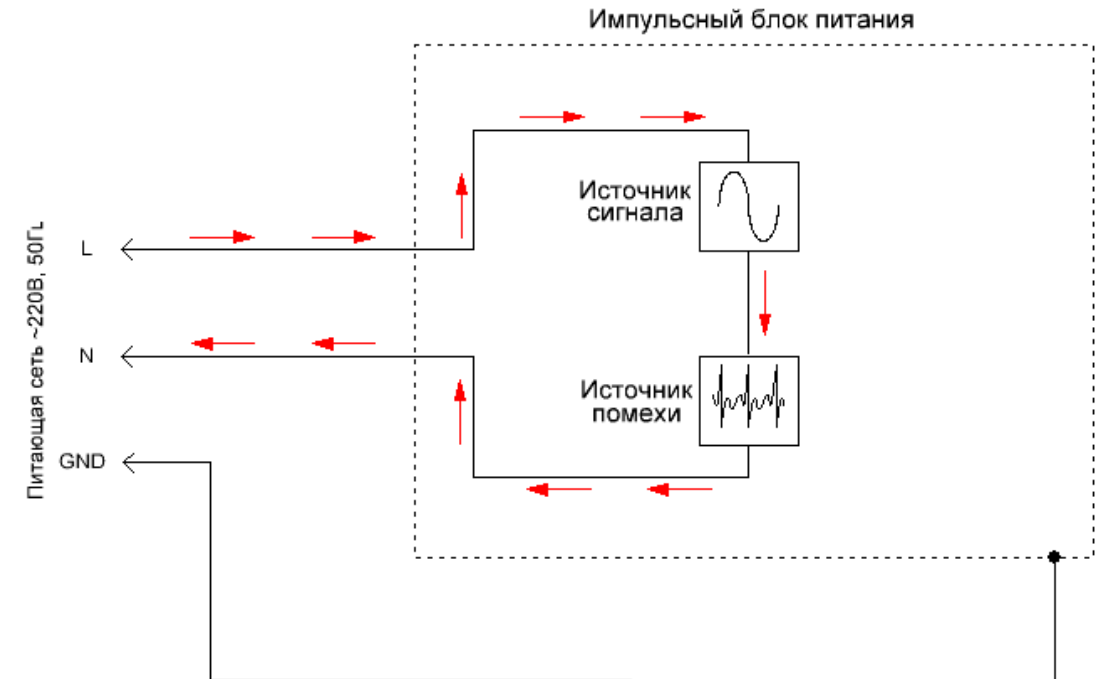
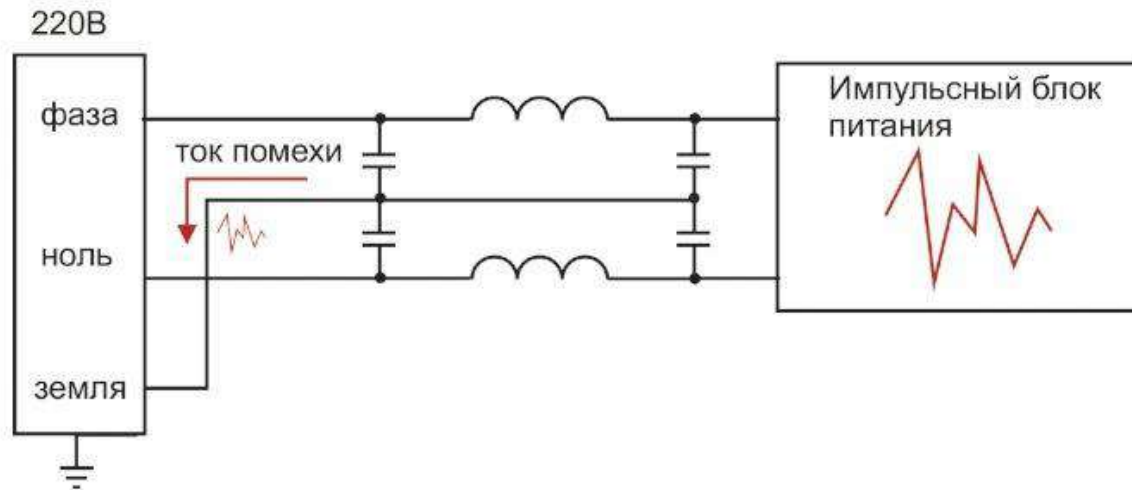


**Рис. 4.11.** Гармоники тока питания

# ПРОНИКНОВЕНИЕ КОНДУКТИВНЫХ ПОМЕХ

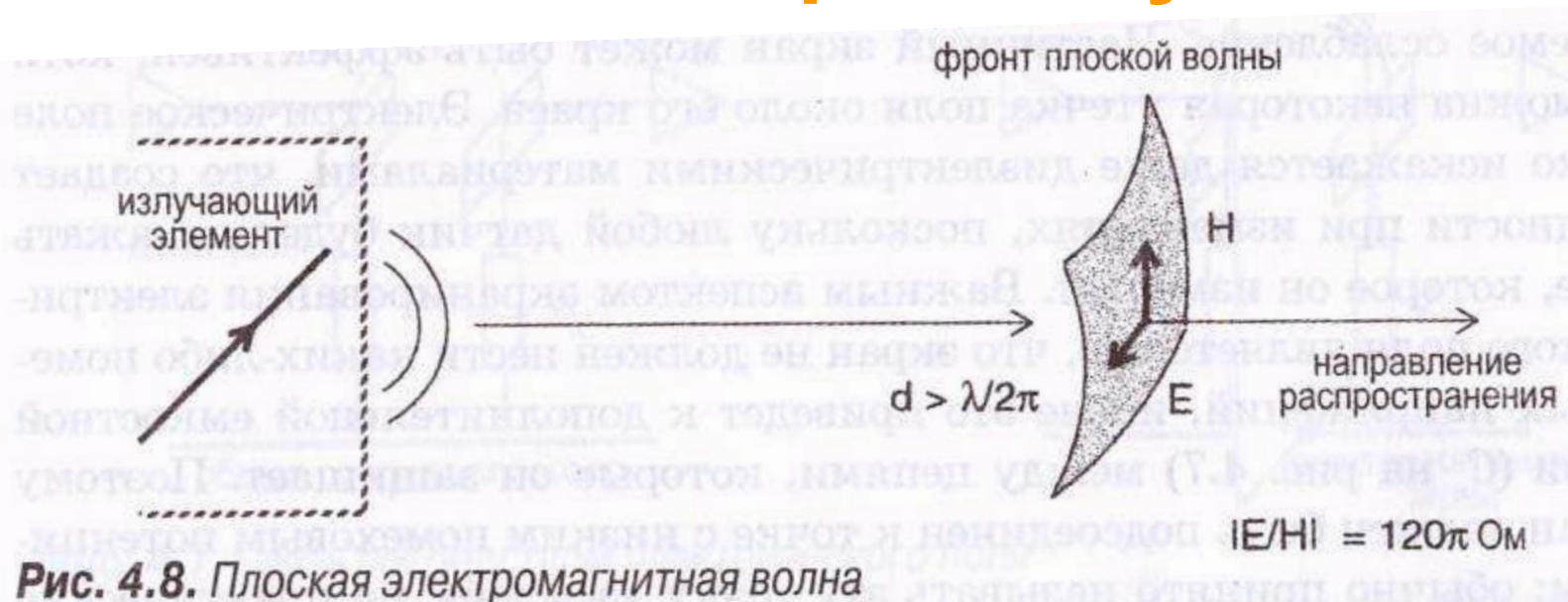


СПбГЭТУ «ЛЭТИ»  
ПЕРВЫЙ ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКИЙ





## Связь через излучение



Частота, МГц	$0,5\lambda$ , м	Типичная структура
10	15	Длинный кабель
50	3	Кабель средней длины, большая стойка
100	1,5	Кабель средней длины, стойка средних размеров
300	0,5	Корпус средних размеров, внутренние межсоединения
600	0,25	Малый корпус, печатные платы

При повышении частоты трудно трактовать отдельно электрическое и магнитное поле. Расстояние до источника ЭМП, являющееся «достаточно большим», где волновое сопротивление постоянно, определяется  $1/6$  длиной волны. 1 МГц – 48 м, 1 кГц – 48 км. Рецептор становится антенной с появлением индуцированных напряжений и токов. Уровень помехи оценивается ППМ. Резонансы возникают при кратности  $\frac{1}{2}$  или  $\frac{1}{4}$  длины волны.

## Пример связей от кабелей

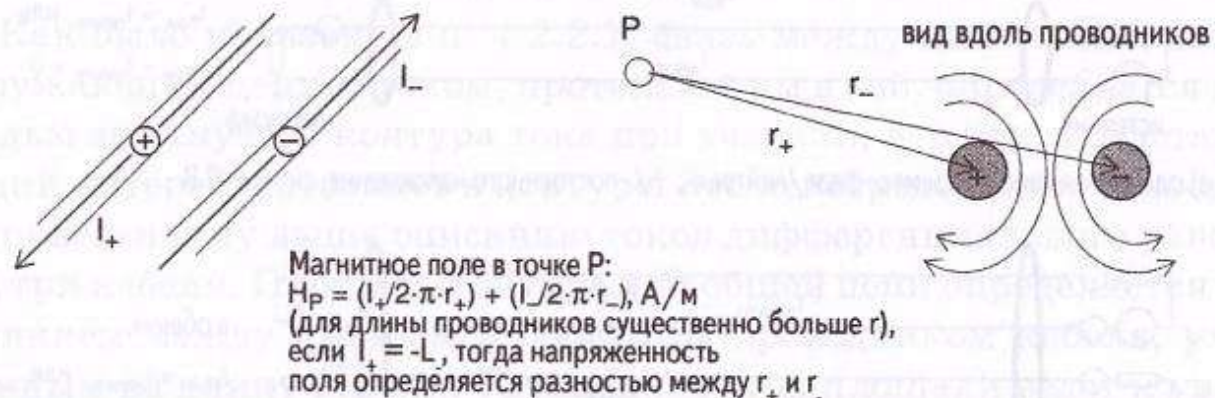
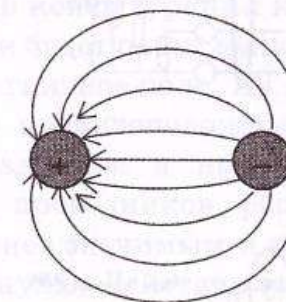


Рис. 7.2. Магнитное поле на расстоянии от пары проводников



излучение от кабеля

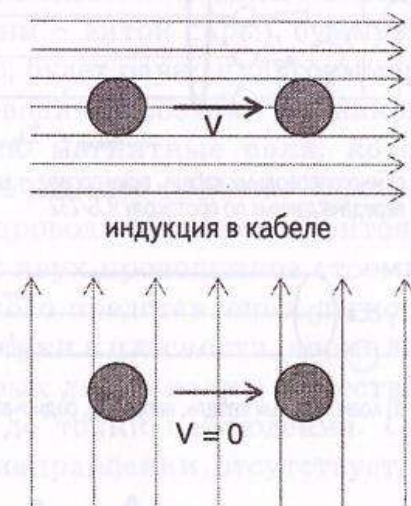


Рис. 7.3. Связь кабелей посредством электрического поля

Кабели являются основным маршрутом для помех, возникающих в ТС или исходящих от них. Сами по себе – это пассивные элементы и не подпадают под требования ЭМС. При дифференциальном режиме есть магнитная связь и электрическая связь.

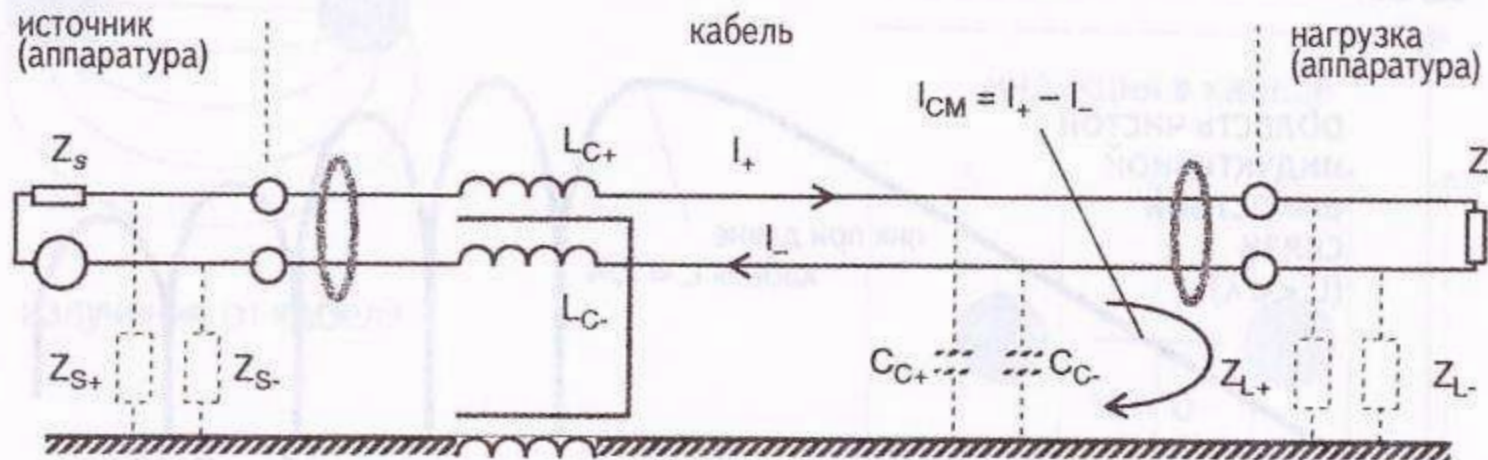


# Зависимость связи от частоты



Когда длина кабеля становится равной или больше длины волны (высокие частоты), существенное значение начинают иметь фазовые изменения поля при положении точки наблюдения. Происходит изменение фаз токов и напряжений вдоль кабеля. На концах кабеля значения параметра может изменяться от нуля до максимума с определёнными периодами.

# Преобразование режимов

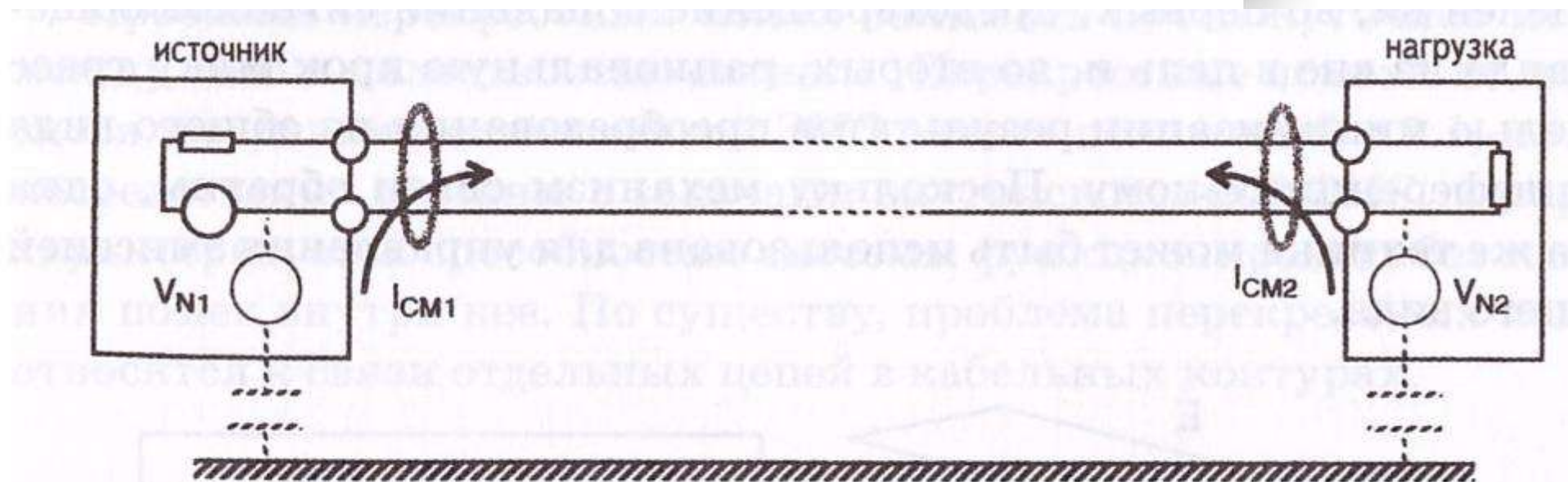


**Рис. 7.5.** Паразитные полные сопротивления, конвертирующие дифференциальный режим в режим общего вида

Дисбаланс между сопротивлениями, индуктивностями и ёмкостями всегда существует, вызывая токи в общем режиме, проходящие через «заземлённую» плоскость.

Частичным решением является РЕС (параллельный проводник заземления), позволяющий создать низкое полное сопротивление для токов общего вида, а также экранирование и свивки проводов.

## Эмиссия токов общего вида

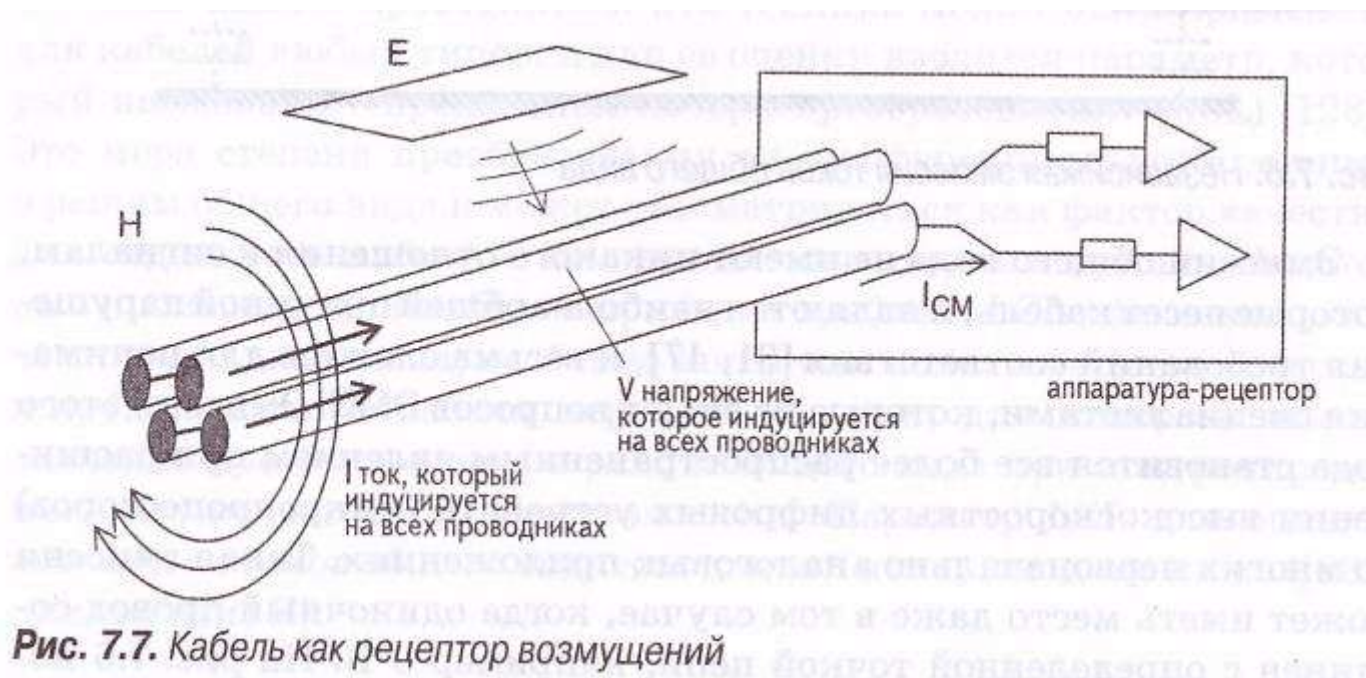


**Рис. 7.6.** Независимая эмиссия токов общего вида

Токи общего вида могут генерироваться аппаратурой на каждом из концов кабеля, а затем излучаться от работающего кабеля в виде помехоэмиссии.



## Помехи в кабеле



Индукцированные токи при работе кабеля кондуктивно поступают на аппаратуру, подключённую к кабелю. Напряжения и токи общего вида в соединительных проводах могут преобразовываться к дифференциальному режиму, которые нарушают работоспособность.

Это наиболее общий случай для восприимчивой аппаратуры. Преобразование в дифференциальный режим является результатом действия дифференциальной цепи и паразитных полных сопротивлений.

## Перекрёстные помехи

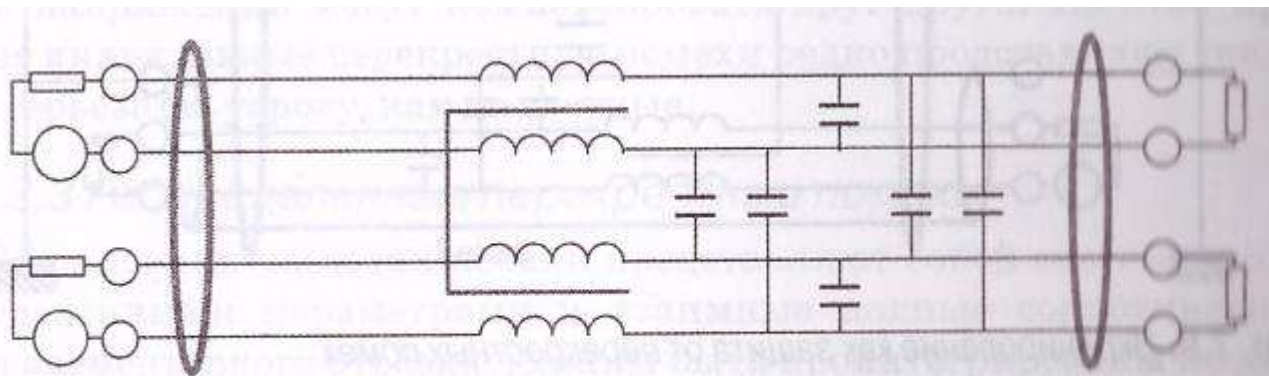


Рис. 7.8. Перекрестные помехи внутри кабеля

Эти помехи занимают промежуточное место между ЭМС и целостностью сигнала.

Перекрёстные помехи не относятся к задачам межсистемной ЭМС, но непосредственно связаны с внутрисистемной ЭМС, по сути к связи отдельных цепей в кабельных контурах.

Две пары проводников связаны через нежелательные ёмкости и индуктивности, определяющие поперёкные помехи между двумя путями.

2 кабеля. Между проводами распределены ёмкости и взаимные индуктивности, связывая их между собой. Взаимные полные сопротивления между парами являются нежелательными, определяя уровни поперёкных помех между двумя цепями.



## Виды связей

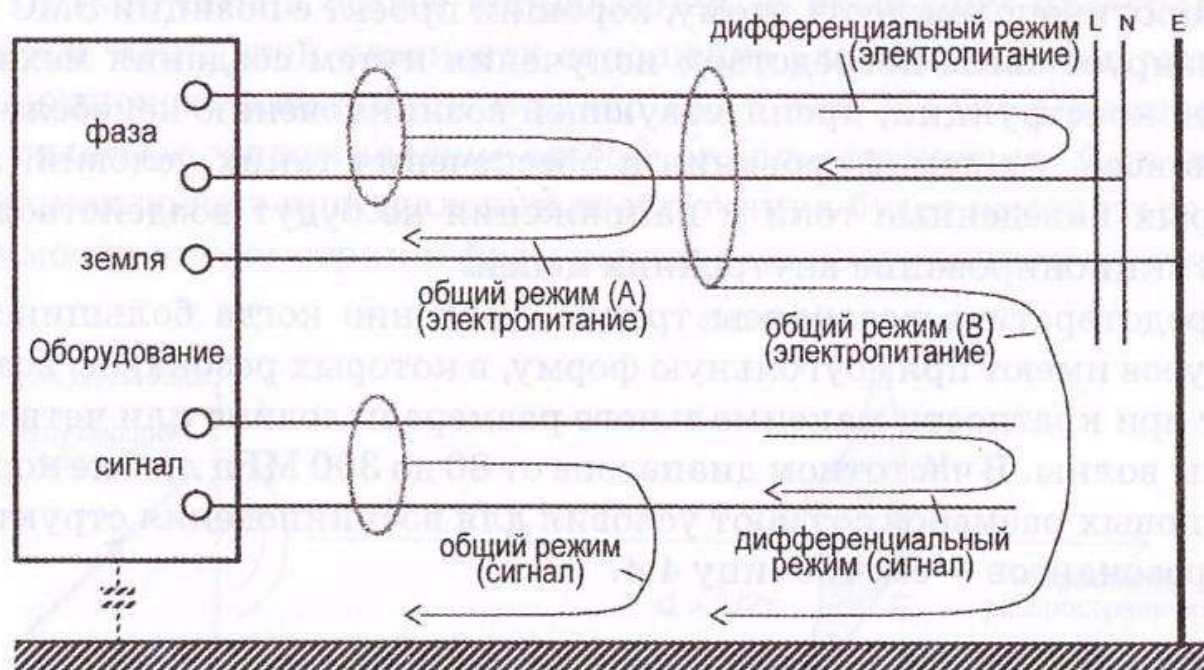


Рис. 4.9. К понятию дифференциального и общего режима

В дифференциальном режиме при кондуктивной связи помеха появляется между фазами источника питания и переносится в оборудование или из него только фазными проводниками. Решение – фильтр.

В общем режиме при кондуктивной связи помеха не появляется между фазными проводниками. Она появляется на каждом проводнике и третьей точкой, к примеру землём.

Общий режим при кондуктивной связи по помехе представляет большую проблему, чем дифференциальный, поскольку пути связи через элементы конструкции и землю заранее не известны. Эффекты трудно прогнозировать и управлять, меняются во времени, токи протекают внутри больших неуправляемых контуров.

# Излучение дифференциального вида

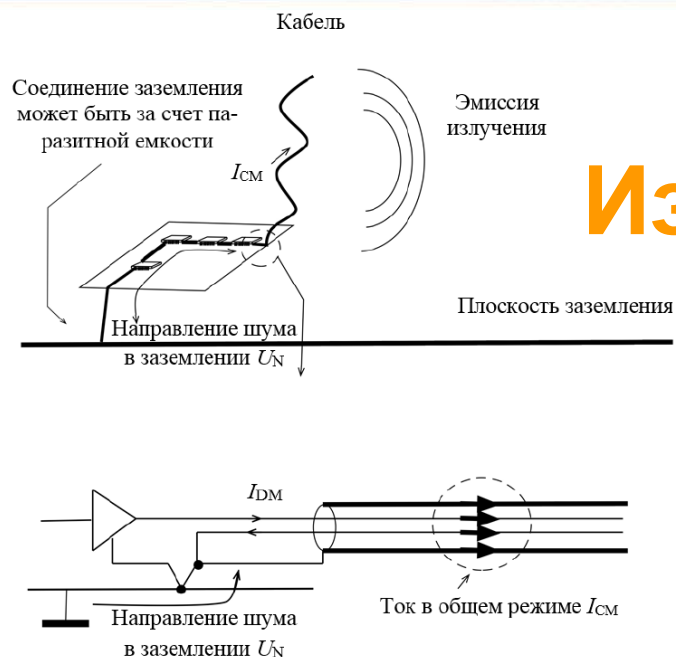


Рис. 2.6. Эмиссия излучения от кабеля



Рис. 2.5. Эмиссия излучаемых помех

В дифференциальном режиме при излучении помеха появляется от кабелей, имеющих наибольшие из всех размеров ТС значений. При расстояниях между источником и рецептором в  $\frac{1}{2}$  или  $\frac{1}{4}$  длины волны – пиковые значения. Корпуса больше излучают при частотах более 100 МГц, а длинные кабели – при частотах менее 30 МГц. Решение – кабель в оплётке или витая пара.

Внутри оборудования сложно обеспечить оптимальную геометрию всех цепей, часто площадь замкнутого контура сделать не удаётся. Решение – корпус.

# Излучение общего вида

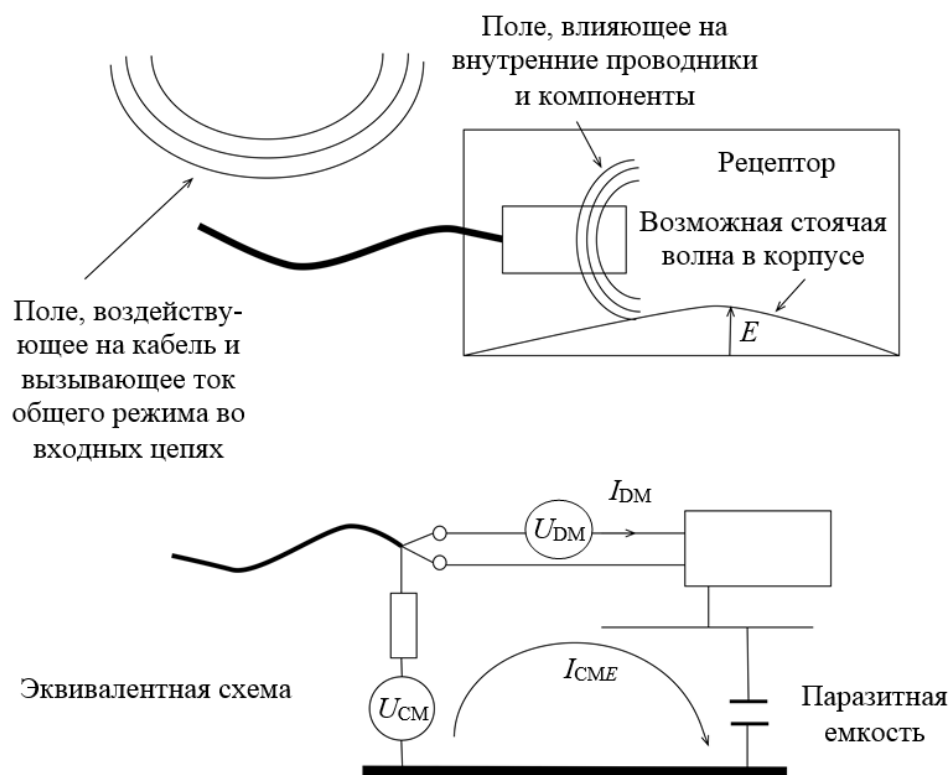


Рис. 2.8. Паразитная связь через излучаемое поле

Путь тока общего вида, благодаря своей природе, не соответствует требованиям оптимальности в части близости сигнального и возвратного проводника. Площадь контура не поддается контролю и может быть очень большой. Во многих случаях (за исключением специальных кабелепроводов) кабель действует как эффективная резонансная антенна. Хуже – когда ток общего вида протекает в экране экранированного кабеля, сгенерированного внутренними токами. Решение – выбор экрана и способа его подключения на каждом конце. Важный параметр помехоустойчивости – ограничение преобразования между дифференциальным и общим режимом.



### 3.3. ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОМЕХ НА ЦИФРОВУЮ И АНАЛОГОВУЮ АППАРАТУРУ

Электронное оборудование может быть восприимчиво к электромагнитным полям окружающей среды и/или к помехам, проникающим через его порты благодаря подсоединенным кабелям. Электростатический разряд может проникать в устройство через кабели или через его корпус. В непосредственной близости от устройства он может создавать локальное поле, которое непосредственно влияет на оборудование. Проблемы: сбои в работе высокоскоростных цифровых узлов, а также цифровых интерфейсных элементов; при подаче на разъемы, клавиатуры, элементы индикации и т. п. возможно физическое повреждение интерфейсных элементов.

Внешнее излучаемое поле может влиять или непосредственно на внутренние схемы и проводные соединения в режиме дифференциального сигнала, или на кабели, вызывая ток синфазного вида. Паразитная связь с внутренними проводными соединениями и проводниками на печатных платах наиболее сильна на частотах выше нескольких сотен мегагерц, так как при длине проводных соединений в несколько сантиметров на этих частотах возникает резонанс (рис. 2.8).

---





## ВОЗДЕЙСТВИЕ ПОМЕХ НА ЦИФРОВУЮ И АНАЛОГОВУЮ АППАРАТУРУ

Радиочастотные напряжения или токи в аналоговых схемах могут возникать за счет нелинейности, перегрузки или смещения по постоянному току, а в цифровых схемах – исказить передачу данных. Модулированные поля могут иметь бóльший эффект, чем немодулированные. Вероятные источники излучаемых полей – портативные радиостанции, сотовые телефоны, мощные вещательные передатчики и радары. Напряженности поля между 1 и 10 В/м являются типичными в диапазоне частот от 20 МГц до 1 ГГц, а более высокие напряженности поля могут наблюдаться в непосредственной близости от таких источников.

Аналоговые схемы практически невосприимчивы к отдельным коротким переходным помехам, в то время как цифровые схемы легко сбиваются ими.

---





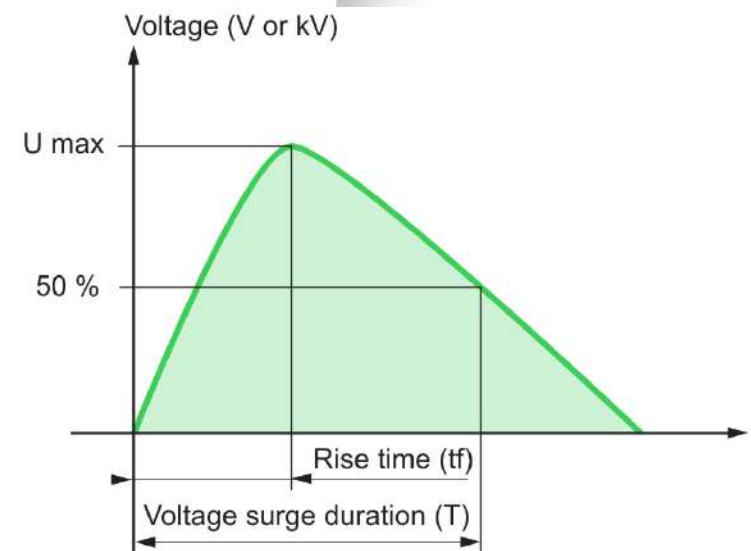
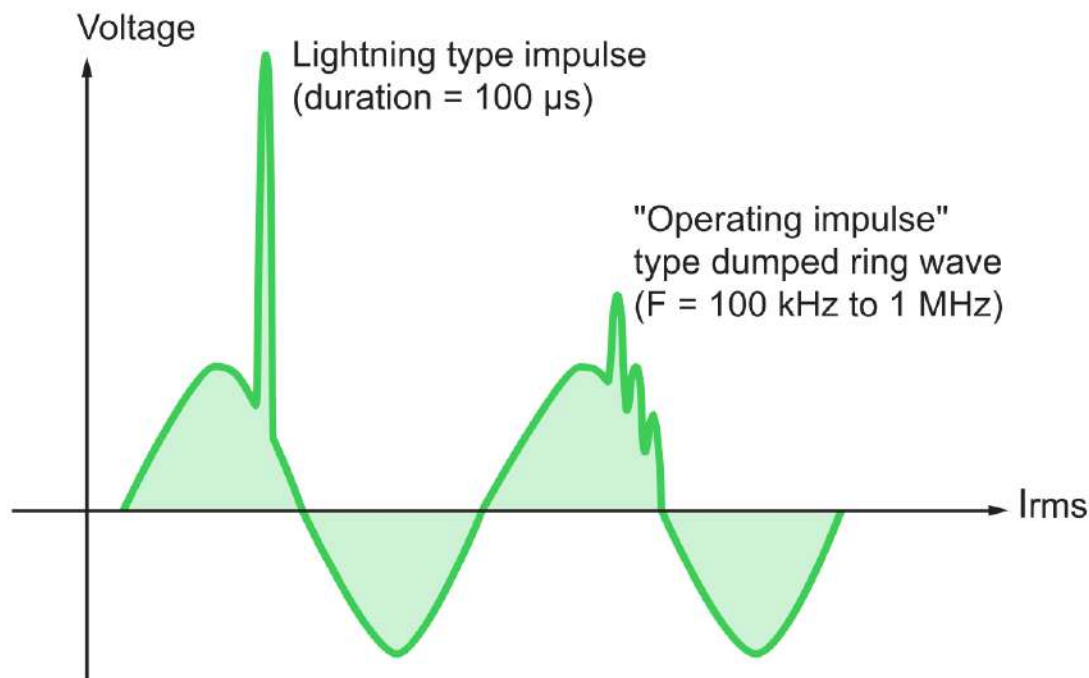
### 3.4. ВЫСОКОИНТЕНСИВНЫЕ ПОМЕХИ, СОЗДАВАЕМЫЕ МОЛНИЕВЫМИ РАЗРЯДАМИ ИЛИ ДРУГИМИ ИСТОЧНИКАМИ ПРЕДНАМЕРЕННО, К ПРИМЕРУ ВЫСОТНЫМ ЯДЕРНЫМ ВЗРЫВОМ

Продолжительный выход из строя и отказы электрических и электронных систем может быть вызван воздействием электромагнитного импульса молнии (lightning electromagnetic impulse *LEMP*), вызывающего импульсы перенапряжения и сверхтока и электромагнитные поля посредством резистивных, индуктивных и емкостных связей, в результате:

- а) кондуктивных (проводных) и индуктивных (наведенных) перенапряжений, переданных на оборудование по присоединенным к нему проводникам электропроводки;
- б) воздействия электромагнитных полей, наведенных непосредственно на оборудование.

---

# ИМПУЛЬС МОЛНИЕВОВОГО РАЗРЯДА



Перенапряжение - это импульс или волна напряжения, которые накладываются на номинальное напряжение сети. Этот тип перенапряжения характеризуется: временем нарастания  $t_f$  (в мкс); градиентом  $S$  (в кВ/мкс).

# ИМПУЛЬС МОЛНИЕВОГО РАЗРЯДА

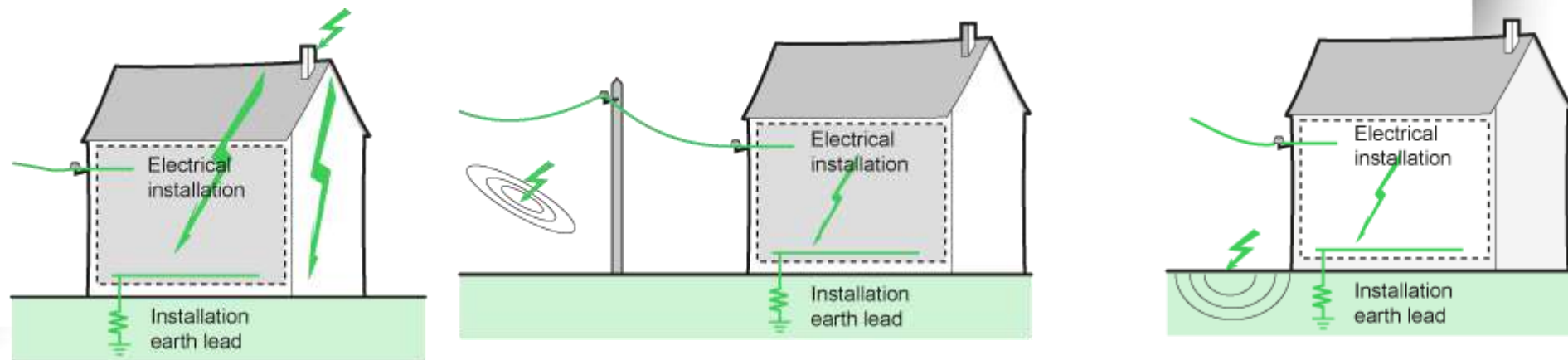
Электрические и электронные системы являются объектом повреждения электромагнитным импульсом молнии *LEMP*.

Между токоведущими проводниками и землей возникают синфазные перенапряжения: фаза-земля или нейтраль-земля. Они особенно опасны для приборов, корпус которых заземлен из-за опасности пробоя диэлектрика.

Между токоведущими проводами возникают дифференциальные перенапряжения: фаза-фаза или фаза-нейтраль. Они особенно опасны для электронного оборудования, чувствительного оборудования, такого как компьютерные системы и т. д.

---

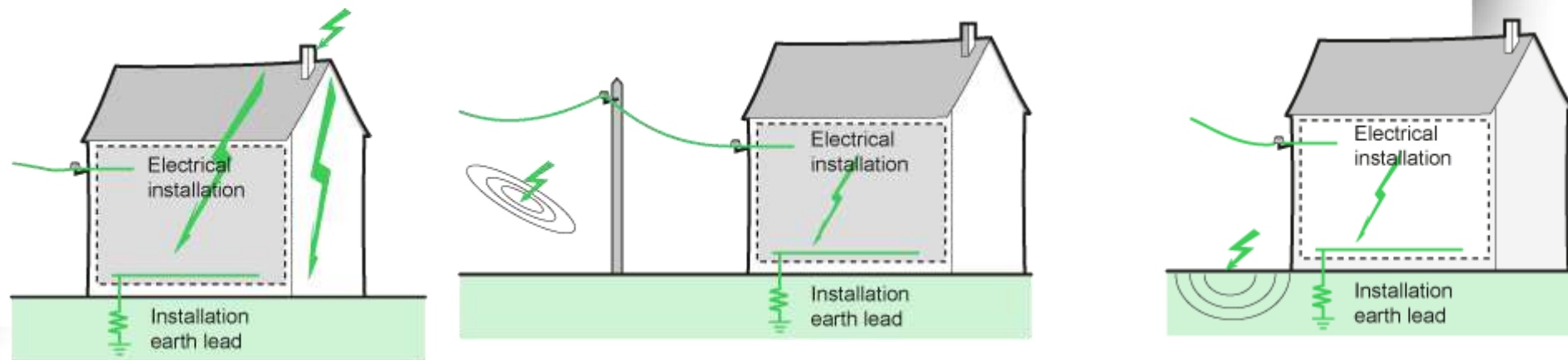
# ИМПУЛЬС МОЛНИЕВОВОГО РАЗРЯДА



Перенапряжения в здании или сооружении могут возникать из источников, внешних по отношению к сооружению, или из источников внутри самого сооружения:

- перенапряжения, которые возникают вне сооружения, могут создаваться ударами молнии в кабельные линии, входящие в здание извне, или в землю вблизи сооружения и могут передаваться электрическим и электронным системам по этим линиям;
- перенапряжения, которые возникают внутри сооружения, могут создаваться ударами молнии непосредственно в само сооружение или в землю поблизости.

# ИМПУЛЬС МОЛНИЕВОВОГО РАЗРЯДА



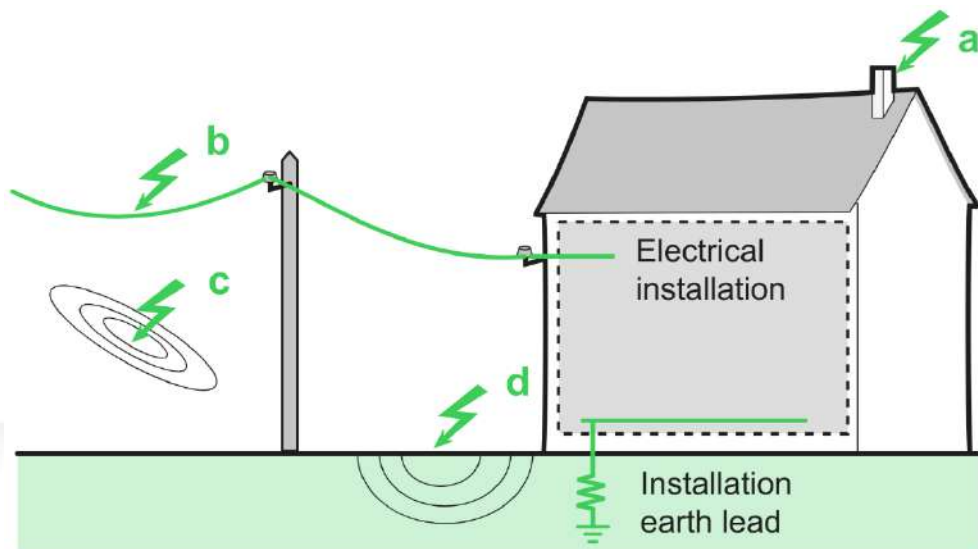
Основными механизмами, при помощи которых молнии порождают выбросы напряжения, являются следующие:

- а) непосредственный удар молнии в наружную (вне здания) цепь инжектирует значительные токи, которые создают напряжения, протекающие через сопротивление цепи заземления или полное сопротивление наружной цепи;
- б) не прямой удар молнии (то есть удар между облаками, внутри облака или в находящиеся вблизи объекты, который создает электромагнитные поля) индуцирует напряжения/токи в проводниках снаружи и/или внутри здания;
- с) протекающий ток от молнии к земле в результате близких разрядов непосредственно в землю взаимодействует с общим контуром заземления системы заземления электрической установки.

Быстрое изменение напряжения или протекания тока, которое может возникнуть в результате срабатывания устройства молниезащиты, может приводить к образованию электромагнитных помех в расположенном рядом оборудовании.



# ИМПУЛЬС МОЛНИЕВОВОГО РАЗРЯДА

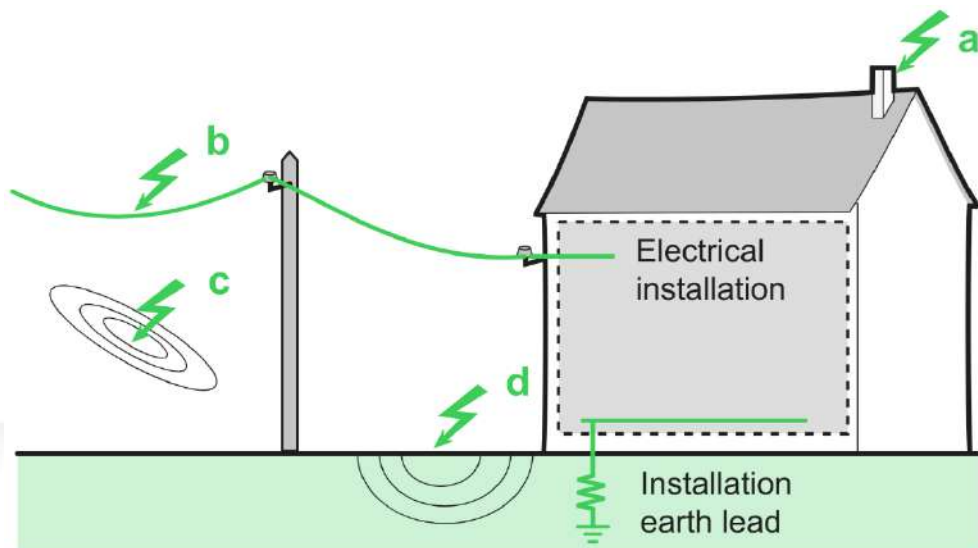


Внутри сооружения могут также возникать коммутационные перенапряжения, например при переключении индуктивных нагрузок. Механизм электромагнитного воздействия может быть различным:

- резистивное воздействие (например, в зависимости от импеданса заземляющего устройства относительно земли или сопротивления экрана кабеля);
- воздействие магнитного поля (например, в зависимости от наличия контуров в цепях электрического и электронного оборудования или индуктивности проводников уравнивания потенциалов);
- воздействие электрического поля (например, воспринятое молниеприемником).

Импульсные магнитные поля образуются под воздействием молний на здания и другие металлические конструкции, включая антенные мачты, заземляющие проводники и системы заземления, а также в результате начальных переходных процессов при коротком замыкании в электрических сетях и установках низкого, среднего и высокого напряжения.

# ИМПУЛЬС МОЛНИЕВОВОГО РАЗРЯДА



Влияние воздействия электрического поля в сравнении с воздействием магнитного поля обычно очень мало, и им можно пренебречь. Наведенные электромагнитные поля могут быть созданы:

- непосредственным протеканием тока молнии в канале молнии;
- протеканием частичных токов молнии по проводникам (например, по проводникам токоотводов системы внешней защиты от молнии (lightning protection system) *LPS* в соответствии с МЭК 62305-3 или по внешнему пространственному экрану в соответствии с данным стандартом).



# ИМПУЛЬС ВЫСОТНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА

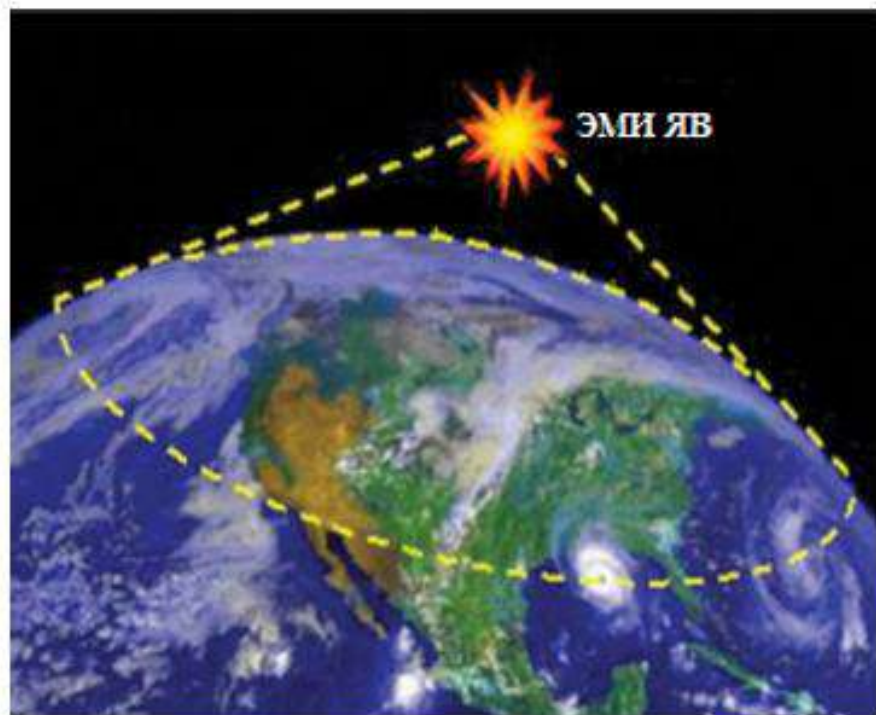


При воздействии на технические устройства ЭМ импульс ядерного взрыва приводит к нарушению работы их высокочувствительных элементов. Сам импульс представляет собой спектр широкополосных переходных помех.

Особенно опасны воздействия импульса на протяженные системы (сети электроснабжения, телефонные сети) в которых вследствие распределенного наведения и образования волн может аккумулироваться значительная энергия.

Между токоведущими проводами возникают дифференциальные перенапряжения: фаза-фаза или фаза-нейтраль. Они особенно опасны для электронного оборудования, чувствительного оборудования, такого как компьютерные системы и т. д.

# ИМПУЛЬС ВЫСОТНОГО ЯДЕРНОГО ВЗРЫВА



Типовые времена нарастания фронта импульса могут составлять от 2 до 10 нс, а длительности ЭМИ от 100 нс до 20 мкс. Эти времена показывают, что энергия рассеивается в широком спектре, однако, большая часть энергии импульса находится в частотном спектре 10 ... 100 МГц, который считается наиболее критичным для большинства микропроцессорных устройств, поскольку является их рабочим диапазоном. Наводимое напряжение при этом может достигать 100 кВ.





## REFERENCE

1. **EMC of Analog Integrated Circuits.** J-M Redouté, M. Steyaert. Springer Dordrecht Heidelberg London New York 2010.
  2. IEC TR 61000-2-5:2011 **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 2-5: Environment - Description and classification of electromagnetic environments.** International Electrotechnical Commission 2011
  3. IEC 61000-4-2:2008 **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-2: Testing and measurement techniques - Electrostatic discharge immunity test.** International Electrotechnical Commission 2008
  4. IEC 61000-4-4:2012 RLV **Electromagnetic compatibility (EMC) – Part 4-4: Testing and measurement techniques – Electrical fast transient/burst immunity test.** International Electrotechnical Commission 2015
  5. IEC 61000-4-8:2009 **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-8: Testing and measurement techniques - Power frequency magnetic field immunity test.** International Electrotechnical Commission 2009
  6. IEC 61000-4-11:2004 **Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-11: Testing and measurement techniques - Voltage dips, short interruptions and voltage variations immunity tests.** International Electrotechnical Commission 2004
  7. **Elektromagnetische Schirmung. Theorie und Praxisbeispiele.** Hans A. Wolfsperger. Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2008
-