



# Электромагнитная совместимость. Основы.

Автор:

к.т.н. Плахтий Александр

[a.plakhtiy@owen.ru](mailto:a.plakhtiy@owen.ru)

# Содержание семинара:

- 1. Определение основных понятий и целей электромагнитной совместимости
- 2. Природа и классификация электромагнитных помех
- 3. Стандарты регламентирующие ЭМС
- 4. Методы измерения ЭМС
- 5. Пути улучшения ЭМС

# Определение основных понятий электромагнитной совместимости

- **Электромагнитная совместимость** это способность электрооборудования удовлетворительно функционировать в условиях электромагнитных воздействий со стороны окружающей среды, а также не оказывать недопустимого воздействия на эту окружающую среду, которая включает в себя другое электрооборудование.
- **Электромагнитная обстановка (ЭМО) (*electromagnetic environment*)** — совокупность реальных электромагнитных явлений, существующих в данном месте, в частотном и временном диапазонах.
- **Электромагнитная помеха (ЭМП) (*electromagnetic disturbance*)** — электромагнитные явления, которые ухудшают или могут ухудшить качество функционирования ТС (электрической сети, приборов и устройств потребителей). Уровень ЭМП — значение величины помехи, измеренное в регламентированных условиях.
- **Электромагнитное воздействие** – электромагнитное явление или процесс, которые влияют или могут повлиять на биологические объекты. К электромагнитным воздействиям относятся создаваемые техническими средствами в окружающем пространстве электромагнитные, электрические и магнитные поля.
- **Влияние помехи (*electromagnetic interference — EMI*)** — снижение показателей качества функционирования ТС при воздействии помехи.
- **Помехоустойчивость (Устойчивость к ЭМП, *immunity*)** — способность ТС сохранять заданное качество функционирования при воздействии помех.
- **Помехоэмиссия** — способность ТС оказывать влияние на заданное качество функционирования других ТС путем воздействия кондуктивными и радиопомехами.

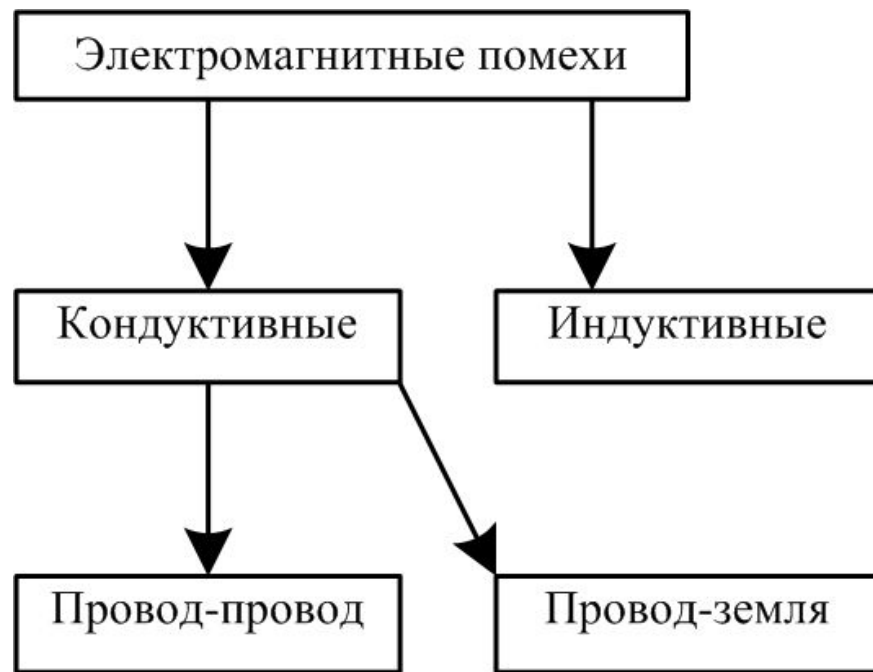
Исходя из определения ЭМС технических средств, основными целями обеспечения ЭМС являются:

- предотвращение нарушений функционирования технических средств при воздействии на них электромагнитных помех;
- исключение или ограничение электромагнитных помех, создаваемых техническими средствами;
- исключение неблагоприятных электромагнитных воздействий на биологические объекты или ограничения уровня таких воздействий;
- обеспечение регламентированного стандартами качества электрической энергии в электрических сетях общего назначения.

# Природа и классификация источников электромагнитных помех



# Природа и классификация источников электромагнитных помех



# Природа и классификация источников электромагнитных помех

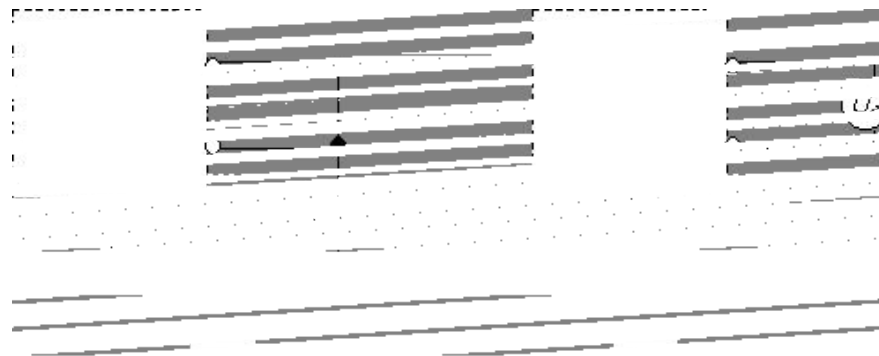
В зависимости от среды распространения электромагнитные помехи разделяют на **индуктивные** и **кондуктивные**.

**Индуктивными** называют помехи, распространяющиеся в виде электромагнитных полей в непроводящих средах.

**Кондуктивные** помехи представляют собой токи, текущие по проводящим конструкциям и земле.

Кондуктивные помехи в цепях, имеющих более одного проводника, принято также делить на помехи "провод - земля" (синонимы - несимметричные, общего вида, Common Mode) и "провод-провод" (симметричные, дифференциального вида, Differential Mode).

В первом случае ("провод-земля") напряжение помехи приложено, как следует из названия, между каждым из проводников цепи и землей (рис. 1 а). Во втором - между различными проводниками одной цепи (рис. 1 б). Обычно самыми опасными для аппаратуры являются помехи "провод-провод", поскольку они оказываются приложенными так же, как и полезный сигнал.



а) – Схема подключения кондуктивной помехи провод-земля

(она же и несимметричная помеха, помеха общего вида, Common mode)

б) – Схема подключения кондуктивной помехи провод-провод (она же симметричная, дифференциальная помеха, Differential Mode)

# На основе спектральных характеристик электромагнитные помехи разделяют на:

- узкополосные и широкополосные;
- низкочастотные и высокочастотные.

К узкополосным относятся помехи от систем связи на несущей частоте, систем питания переменным током и т.п. Их отличительной особенностью является то, что характер изменения помехи во времени является синусоидальным или близок к нему. При этом спектр помехи близок к линейчатому (максимальный уровень – на основной частоте, пики меньшего уровня – на частотах гармоник).

Широкополосные помехи имеют существенно несинусоидальный характер и обычно проявляются в виде либо отдельных импульсов, либо их последовательности. Для периодических широкополосных сигналов спектр состоит из большого набора пиков на частотах, кратных частоте основного сигнала. Для аperiodических помех спектр является непрерывным и описывается спектральной плотностью.

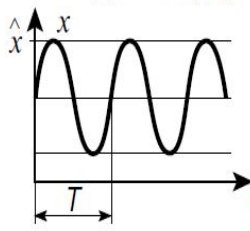
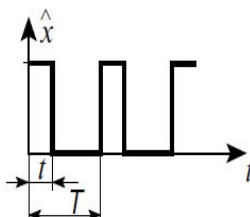
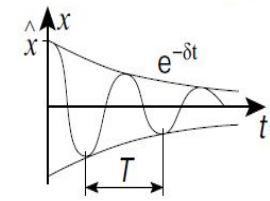
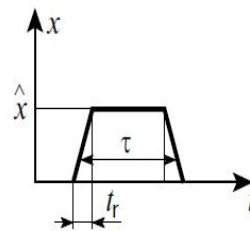
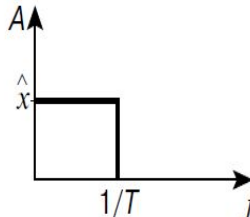
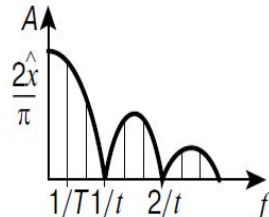
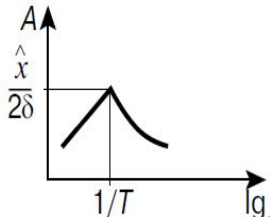
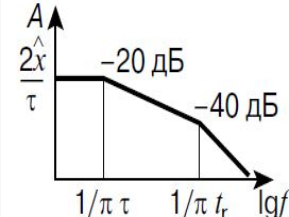
Типичными широкополосными помехами являются:

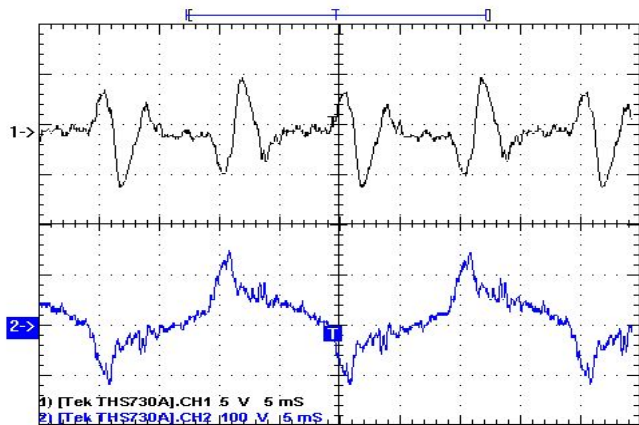
- молниевые импульсы;
- импульсы, создаваемые при коммутационных операциях;
- электростатические разряды;
- шум, создаваемый в сети питания аппаратуры при работе импульсного блока питания;
- преднамеренные электромагнитные помехи, создаваемые в криминальных целях.

К низкочастотным относятся помехи в диапазоне 0 – 9 кГц. В большинстве случаев они создаются силовыми электроустановками и линиями.

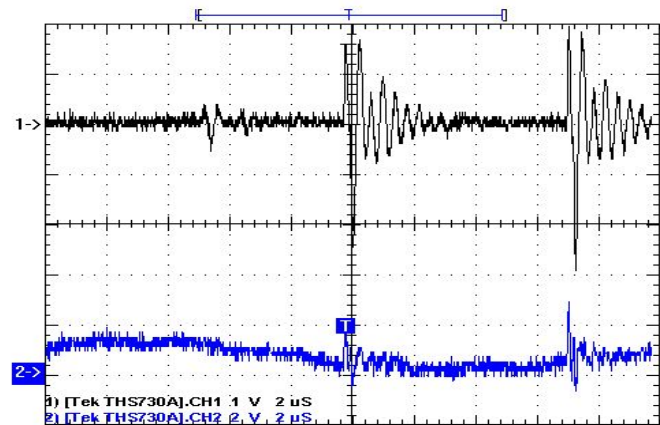
Высокочастотные узкополосные помехи (с частотой выше 9 кГц) обычно создаются различными системами связи. Высокочастотными являются все распространенные типы импульсных помех. Иногда также вводят понятия радиочастотной помехи (диапазон – от 150 кГц до 1–2 ГГц) и СВЧ-помехи (порядка нескольких ГГц).



	Периодические помехи		Аперiodические помехи	
	Узкополосные	Широкополосные	Узкополосные	Широкополосные
Временная область	$x(t) = \hat{x} \sin(\omega t)$ 	$x(t) = \begin{cases} 0 \leq t \leq \tau, x(t) = \hat{x} \\ \tau \leq t \leq T - \tau, x(t) = 0 \end{cases}$ 	$x(t) = \hat{x} e^{-\delta t} \cos(\omega_0 t)$ 	
Частотная область				



Осциллограмма реального узкополосного сигнала помехи



Осциллограмма реального широкополосного сигнала помехи

# В целях решения общих задач помехоустойчивости технических средств стандартами в области ЭМС регламентированы следующие основные виды помех:

- **Микросекундные импульсные помехи большой энергии** (по ГОСТ Р 51317.4.5.), вызываемые перенапряжениями, возникающими в результате коммутационных переходных процессов и молниевых разрядов.
- **Наносекундные импульсные помехи** (по ГОСТ Р 51317.4.4.), возникающие в результате коммутационных процессов (прерывания индуктивных нагрузок, размыкание контактов реле и т. п.) и воздействующие на порты электропитания и сигналов ввода/вывода.
- **Электростатические разряды** (по ГОСТ Р 51317.4.2.), возникающие как при прямом воздействии от оператора, так и непрямом воздействии от оператора на расположенные вблизи технические средства, предметы и оборудование.
- **Радиочастотное электромагнитное поле** в полосе частот от 80 до 1000 МГц (по ГОСТ Р 51317.4.3.), источниками которого являются портативные приемопередатчики, применяемые эксплуатационным персоналом и службами безопасности, стационарные радио и телевизионные передатчики, радиопередатчики подвижных объектов, различные промышленные источники излучений. К числу источников радиочастотного электромагнитного поля также относят радиотелефоны и другие радиопередатчики, действующие на частотах от 0,8 до 3 ГГц. и использующие методы модуляции с непостоянной огибающей.
- **Кондуктивные помехи, наведенные радиочастотными электромагнитными полями** (по ГОСТ Р 51317.4.6.), вызываемые излучениями преимущественно радиопередающих устройств в полосе частот от 50 кГц до 80 МГц.
- **Кондуктивные помехи в полосе частот от 0 до 150 кГц** (по ГОСТ Р 51317.4.16.), представляющие собой общие несимметричные напряжения на входные порты электропитания переменного и постоянного тока, сигнальные порты, порты управления и ввода-вывода.

# В целях решения общих задач помехоустойчивости технических средств стандартами в области ЭМС регламентированы следующие основные виды помех:

- **Колебательные затухающие помехи** (по ГОСТ Р 51317.4.12.) следующих видов:
  - а) одиночные колебательные затухающие помехи, возникающие в низковольтных силовых линиях и в линиях управления и сигнализации технических средств, получающих электропитание от низковольтных распределительных электрических сетей и систем электроснабжения промышленных предприятий;
  - б) повторяющиеся колебательные затухающие помехи, возникающие в основном в силовых линиях и линиях управления и сигнализации на электрических подстанциях высокого (выше 35 кВ) и среднего (6-35 кВ) напряжения. Повторяющиеся колебательные затухающие помехи относят к срабатыванию одного отдельного выключателя.
- **Динамические изменения напряжения электропитания** (по ГОСТ Р 51317.4.11.) следующего вида: провалы, прерывания, выбросы, а также постепенные изменения напряжения электропитания.
- **Колебания напряжения электропитания** (по ГОСТ Р 51317.4.14.), воздействующие на входные порты электропитания переменного тока.
- **Изменения частоты питающего напряжения** (по ГОСТ Р 51317.4.28.) на входных портах электропитания переменного тока.
- **Искажения синусоидальности напряжения электропитания** (по ГОСТ Р 50746.) при воздействии гармоник и интергармоник питающего напряжения
- **Магнитное поле промышленной частоты** (по ГОСТ Р 50648).
- **Импульсное магнитное поле** (по ГОСТ 30336 / ГОСТ Р 50649).
- **Затухающее колебательное магнитное поле** ( по ГОСТ Р 50652.).
- **Токи кратковременных синусоидальных помех частотой 50 Гц в цепях защитного и сигнального заземления** (по ГОСТ Р 50746.).
- **Токи микросекундных импульсных помех в цепях защитного и сигнального заземления** (по ГОСТ Р 50746.).

# Стандарты регламентирующие помехозащищенность

ГОСТ Р 51317.4.2 – Устойчивость к электростатическим разрядам

ГОСТ Р 51317.4.3 – Устойчивость к радиочастотному электромагнитному полю

ГОСТ Р 51317.4.4. - Устойчивость к наносекундным импульсным помехам

ГОСТ Р 51317.4.5. - Устойчивость к микросекундным импульсным помехам

ГОСТ Р 51317.4.6 – Устойчивость к кондуктивным помехам наведенных электромагнитным полем

ГОСТ Р 51317.4.11 – Устойчивость к динамическим изменениям напряжения питания

# Стандарты регламентирующие помехоэмиссию

ГОСТ Р 51317.6.4 – Помехоэмиссия от  
технических средств в промышленных зонах

ГОСТ Р 51317.3.2-2006 – Эмиссия  
гармонических составляющих тока  
потребляемого техническими средствами с  
потребляемым током не более 16 В (в одной  
фазе)

# Устойчивость к наносекундным импульсным помехам ГОСТ Р 51317.4.4.

**Наносекундные импульсные помехи, НИП** - импульсные помехи, длительность которых лежит в пределах от одной наносекунды до одной микросекунды.

В реальных условиях нано-импульсные помехи возникают в результате коммутационных процессов (размыкание индуктивных нагрузок, размыкание контактов реле) и действуют на порты питания и сигналов ввода/вывода.

Стандарт устанавливает ряд правил оценки качества функционирования ТС при воздействии на него нано-импульсной помехи (далее НИП).

Стандарт устанавливает:

- степени жесткости испытаний;
- форму испытательного импульсов;
- требования к испытательному оборудованию;
- схемы рабочих мест испытаний;
- методы испытаний;

# Степени жесткости испытаний

Степень жесткости испытаний	Выходное напряжение ИГ в режиме холостого хода и частота повторения импульсов			
	Порты электропитания, защитного заземления		Порты ввода/вывода сигналов, передачи данных, управления	
	Амплитуда импульсов, кВ	Частота повторения импульсов, кГц	Амплитуда импульсов, кВ	Частота повторения импульсов, кГц
1	0,5	5	0,25	5
2	1	5	0,5	5
3	2	5	1	5
4	4	2,5	2	5
X <sup>1)</sup>	Специальная	Специальная	Специальная	Специальная

Форму импульсов испытательного напряжения

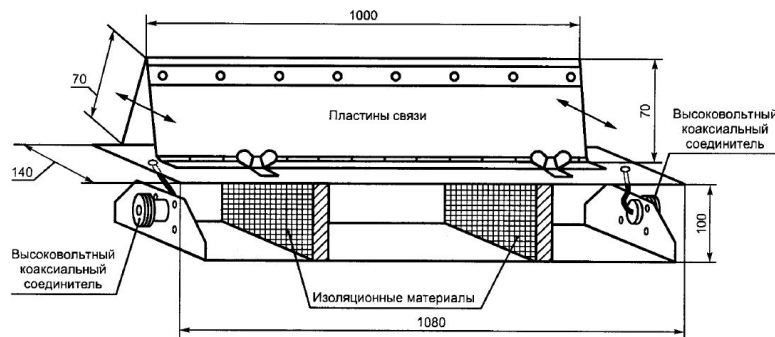
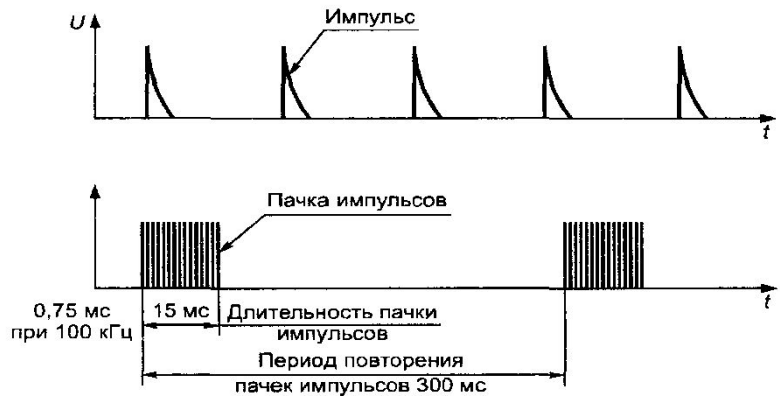
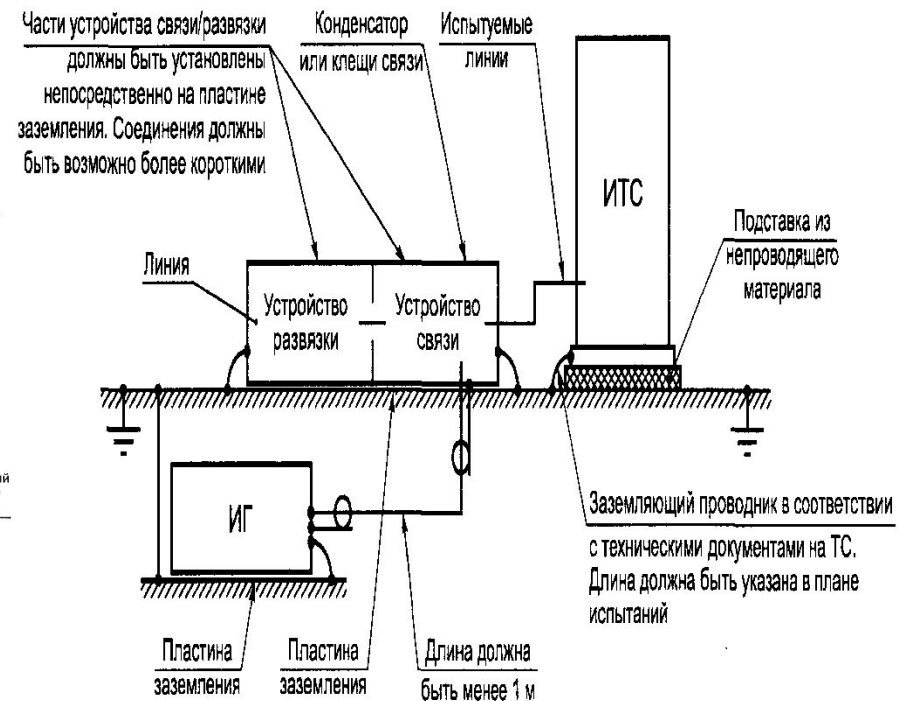


Схема испытаний ТС на устойчивость к НИП



# Результаты испытаний

Результаты испытаний классифицируются на основе приведенных критериев функционирования.

**Критерий А.** Нормальное функционирование в соответствии с установленными требованиями.

**Критерий В.** Временное ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции с последующим восстановлением нормального функционирования, осуществляемым без вмешательства оператора.

**Критерий С.** Временное ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции, которые требуют вмешательства оператора или перезапуска системы.

**Критерий D.** Ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции, которые не подлежат восстановлению оператором из-за повреждения оборудования (компонентов), нарушения программного обеспечения или потери данных.



# Устойчивость к микросекундным импульсным помехам ГОСТ Р 51317.4.4.

**Микросекундные импульсные помехи, МИП** - импульсные помехи, длительность которых порядка микросекунды.

В реальных условиях микро-импульсные помехи возникают в результате коммутационных процессов (размыкание индуктивных нагрузок, размыкание контактов реле) и молниевых разрядов.

Стандарт устанавливает ряд правил оценки качества функционирования ТС при воздействии на него нано-импульсной помехи (далее МИП).

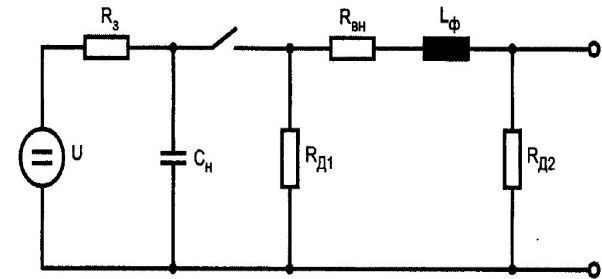
Стандарт устанавливает:

- степени жесткости испытаний;
- форму импульсов испытательного напряжения;
- требования к испытательному оборудованию;
- схемы рабочих мест испытаний;
- методы испытаний;

## Степени жесткости испытаний

Степень жесткости испытаний	Значение импульса напряжения на ненагруженном выходе ИГ, кВ $\pm 10\%$
1	0,5
2	1
3	2
4	4
X <sup>1)</sup>	Специальная

## Схема источника МИП



$U$  — источник высокого напряжения;  $R_3$  — зарядный резистор;  $C_n$  — зарядный конденсатор;  $R_{д1}$ ,  $R_{д2}$  — резисторы, определяющие длительность импульса;  $R_{вн}$  — резистор, определяющий выходное полное сопротивление ИГ;  $L_{\phi}$  — индуктивность, определяющая время нарастания импульса

## Параметры МИП импульса 1/50-6,4/16

Параметр импульса	При измерениях в соответствии с [2]	
	Длительность фронта (время нарастания), мкс	Длительность импульса, мкс
Напряжение в режиме холостого хода	1	50
Ток в режиме короткого замыкания	6,4	16

## Параметры МИП импульса 6,5/700-4/300

Параметр импульса	В соответствии с [2]	
	Длительность фронта (время нарастания), мкс	Длительность импульса, мкс
Напряжение в режиме холостого хода	6,5	700
Ток в режиме короткого замыкания	4	300

## Форма МИП импульса



# Результаты испытаний

Результаты испытаний классифицируются на основе приведенных критериев функционирования.

**Критерий А.** Нормальное функционирование в соответствии с установленными требованиями.

**Критерий В.** Временное ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции с последующим восстановлением нормального функционирования, осуществляемым без вмешательства оператора.

**Критерий С.** Временное ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции, которые требуют вмешательства оператора или перезапуска системы.

**Критерий D.** Ухудшение качества функционирования или прекращение выполнения установленной функции, которые не подлежат восстановлению оператором из-за повреждения оборудования (компонентов), нарушения программного обеспечения или потери данных.

# Основные способы улучшения ЭМС

Пути улучшения кондуктивной помехозащищенности:

- применение пассивных фильтров
- Применение помехоподавляющих элементов;
- применение силовых активных фильтров;

Пути улучшения снижения кондуктивной помехоэмиссии:

- применение корректоров коэффициента мощности;
- применение силовых активных фильтров

Наиболее распространенными путями улучшения индуктивной (наведенной) электромагнитной совместимости являются:

- экранирование

# Моделирование ЭМС

Для оценки ЭМС технического устройства еще на стадии проектирования наиболее целесообразным является его схемотехническое моделирование.

Наиболее распространенные программные пакеты для моделирования кондуктивных ЭМС : Matlab, MicroCap, Multisim и пр.

Данные программы позволяют:

- оценить уровень эмиссии высших гармоник потребляемого тока технического устройства.
- оценить кондуктивную помехоустойчивость при ЭМ импульсе
- выполнить анализ и синтез аналоговых и цифровых фильтров

Software для моделирования индуктивных наведенных помех ЭМС :

- microwave office
- ELCUT

# Анализ АЧХ фильтра Multisim

The image displays the Multisim software interface for a filter analysis. The main workspace shows a circuit diagram with the following components:

- 750Ω rsource
- 0 V vin
- 12.31mH L1
- 13.09mH L2
- 3.886mH L3
- 5.714μF C1
- 3.936μF C2
- 50000Ω rload
- XBP1 (Bode Plotter)

The Bode Plotter window (XBP1) shows the magnitude response of the filter. The plot displays a sharp resonance peak at the pass frequency, followed by a roll-off in the stop band. The plot settings are:

- Mode: Magnitude
- Horizontal: Log
- Vertical: Log
- F 1: 1 GHz
- F 100: 100 dB
- I 1: 1 mHz
- I -200: -200 dB

The Filter Wizard window shows the configuration for a Low pass filter:

- Type: Low pass filter
- Pass frequency: 1 kHz
- Stop frequency: 1.5 kHz
- Pass band gain: -1 dB
- Stop band gain: -25 dB
- Filter load: 50 Ω

The Filter Wizard also includes a graph of Gain (dB) vs. Freq. (Hz) showing the pass band gain and stop band gain. The graph shows a flat pass band gain of -1 dB up to the pass frequency, followed by a sharp drop to the stop band gain of -25 dB at the stop frequency. The calculation was successfully completed.

Additional settings in the Filter Wizard:

- Type: Chebyshev
- Topology: Passive
- Source impedance: 10 times > Load
- Pass band ripple: 0.01

The bottom status bar shows the date and time: Multisim - 1 октября 2014 г., 17:56:36.

# Анализ помехоэмиссии Matlab

