

**Электромагнитная совместимость (ЭМС)
в приводной технике**

Издание
12/2002



1	Введение	4
2	Механизмы помех.....	5
2.1	Характеристики линии при высоких частотах	7
2.2	Причины высокочастотных помех.....	11
2.3	Источники помех и их воздействие	12
2.4	Механизмы воздействия.....	27
2.5	Механизмы помех при использовании преобразователей	38
3	Проектирование с учетом ЭМС.....	45
3.1	Влияние места размещения установки.....	46
3.2	Качество сети	48
3.3	Проектирование электрошкафа	49
3.4	Подбор компонентов.....	52
4	Меры по обеспечению электромагнитной совместимости.....	53
4.1	Заземление.....	53
4.2	Кабельное соединение	57
4.3	Подача питания	65
4.4	Передача сигнала.....	66
4.5	Конструкция электрошкафа	67
4.6	Применение фильтров	69
4.7	Использование компонентов для подавления помех при применении преобразователя.....	73
5	Законы и стандарты.....	82
5.1	Важные обозначения	83
5.2	Классификация по областям применения	84
5.3	Обзор законов и стандартов	87
6	Термины ЭМС	89
7	Алфавитный указатель	91

1 Введение

В январе 1996 года в Европейском Сообществе вступила в силу директива по электромагнитной совместимости (директива по ЭМС 89/336/ЕЕС). Эта директива вызвала некоторое сомнение среди поставщиков, производителей оборудования и пользователей.

SEW предлагает в этом томе из серии "Практика приводной техники" дополнительную информацию на тему "Электромагнитная совместимость (ЭМС) в приводной технике".

Основные вопросы перечислены ниже:

- Механизмы помех – как возникают проблемы ЭМС
- Проектирование с учетом ЭМС – что нужно учитывать уже при проектировании
- ЭМС на практике – исполнение и принцип действия мер по ЭМС

Кроме этого мы предлагаем обзор важных директив и стандартов.

Этот том ориентирован на практические условия и опыт, из-за чего допускается некоторое пренебрежение научной точностью, если она без необходимости усложняет изложение. Сведения представляют собой общие рекомендации. Из-за многообразия возможностей монтажа для отдельных случаев не может быть указано точных значений величин.

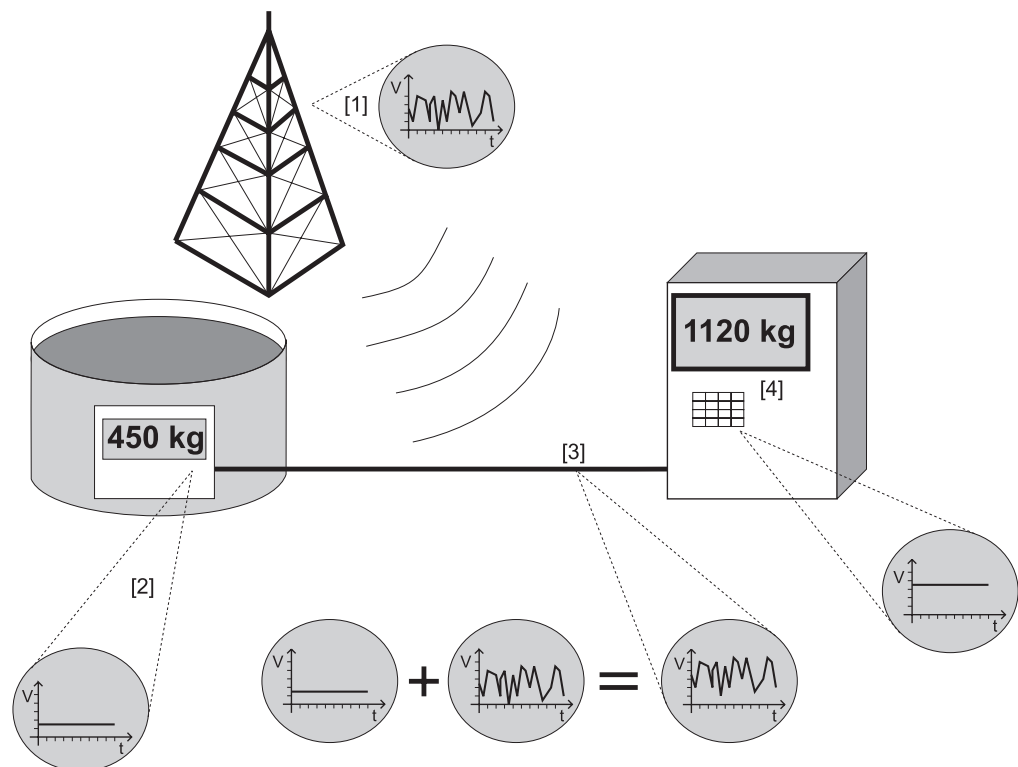
Для правильного проектирования установок с приводами SEW используйте сведения из соответствующих каталогов.



2 Механизмы помех

Электромагнитная совместимость приобретает все большее значение для приводной техники. Технический прогресс приводит все к большей и большей концентрации электрических и электронных компонентов на все меньшей площади. Одновременно увеличиваются тактовые частоты устройств обработки информации и приводной электроники. Вследствие этого все больше увеличивается опасность взаимного воздействия и связанного с этим нарушения функционирования.

На Рис. 1 показан пример воздействия на измерительную линию.



00279AXX

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

Для возникновения помехи принципиально должны быть выполнены три условия:

- должен существовать источник помех
- должен существовать приемник помех
- должна быть возможность взаимодействия между ними

Даже если все приведенные выше условия выполнены, помеха возникнет только тогда, когда воздействие превысит допустимую величину.



Цель этого раздела – перечислить различные источники помех, а также объяснить связь между помехами. Объясняется, от каких влияющих величин зависит уровень помех. Кроме того, приводятся примеры различных источников помех. Сначала, чтобы облегчить понимание этой главы, объясняются некоторые взаимосвязи и термины.

"Электромагнитное воздействие" оказывает влияние, в основном, на высоких частотах. Это значит, что правильное функционирование установки достигается только тогда, когда монтаж, наряду с производственно-техническими требованиями, удовлетворяет также требованиям к высокочастотной технике (например, заземление, экранирование, фильтрация).

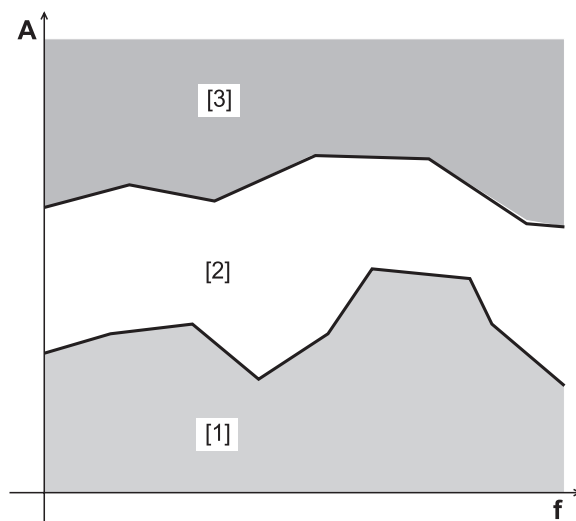
Условиями для бесперебойной эксплуатации установки являются:

- соразмерная минимальная **помехозащищенность** используемых компонентов
- ограниченное **излучение помех** используемых компонентов

Одной из важнейших составляющих ЭМС является способ монтажа.

Самый простой способ добиться ЭМС – это принять ее в расчет при проектировании. Последующие меры, в общем, значительно обширнее. Они часто слишком дорогие из-за недостатка места и требуют дополнительных расходов, связанных с монтажом и простоем оборудования.

Это также относится к модернизации и к техническому обслуживанию имеющегося оборудования. И только соблюдение ЭМС на этапе планирования делает ее экономически выгодной.



00280BXX

Рис. 2. Амплитудно-частотные характеристики зон излучения помех [1], помехоустойчивости [2] и помехозащищенности [3] (амплитуда A , частота f).

Для бесперебойной эксплуатации выбор и монтаж компонентов должны обеспечивать достаточную помехоустойчивость.



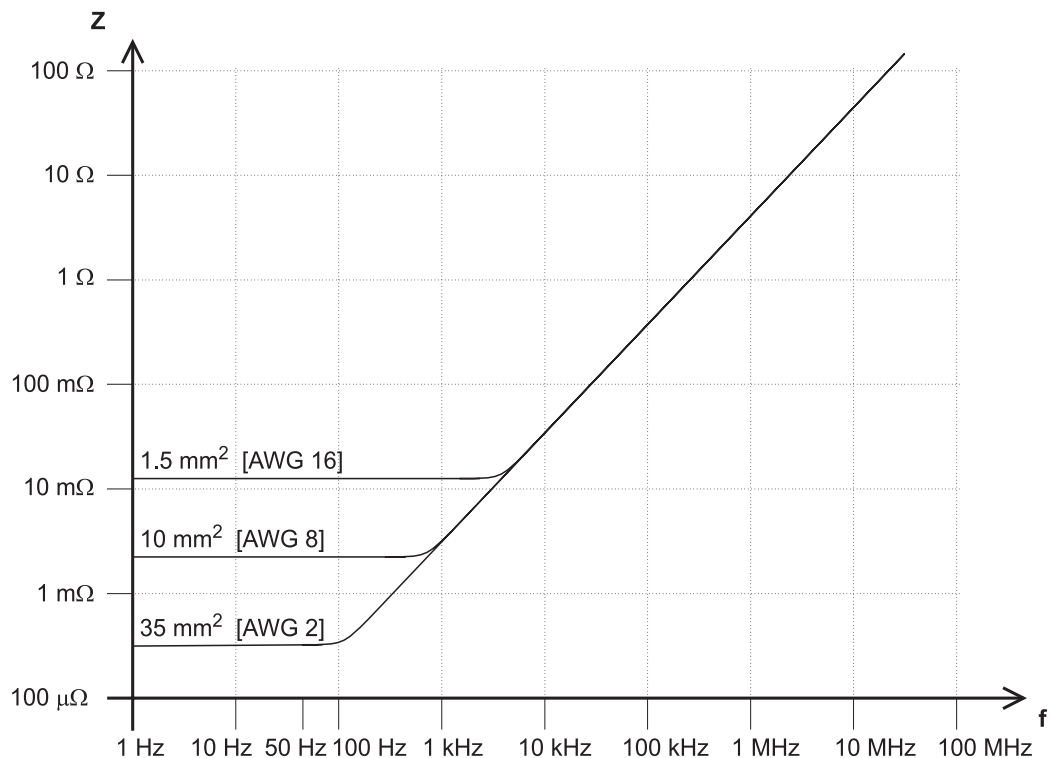
2.1 Характеристики линии при высоких частотах

Чтобы понять причины возникновения помех, очень важно проверить характеристики некоторых компонентов. Эти компоненты могут по-разному вести себя в диапазонах низких и высоких частот.

НЧ-диапазон= Постоянное напряжение и переменное сетевое напряжение

ВЧ-диапазон= Диапазон частот от 1 МГц, не имеет точной границы и может, в зависимости от расстояния, начинаться значительно ниже

Значительные различия диапазонов низких и высоких частот показаны на примере частотной характеристики линии. Рассматривается зависимость от частоты сопротивление, так называемое полное сопротивление линии.



00281AXX

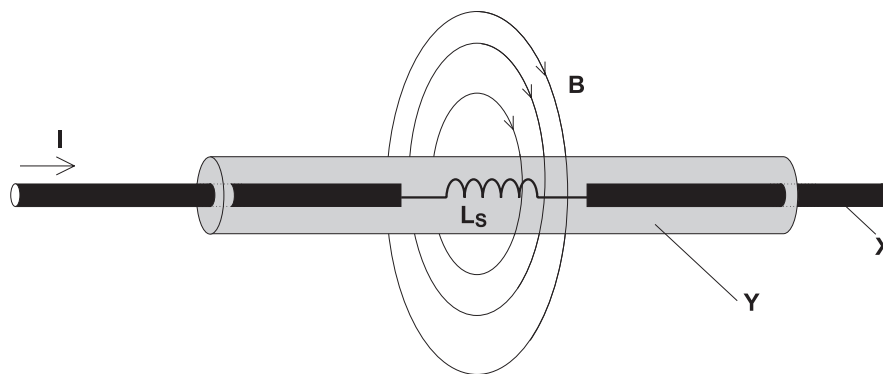
Рис. 3. Полное сопротивление Z медного проводника длиной в 1 м в зависимости от частоты f



Характеристики линии описываются следующими пунктами:

- НЧ-диапазон – основным параметром полного сопротивления является сечение линии
 - полное сопротивление линии имеет значение только с точки зрения нагрева (электропроводность)
- ВЧ-диапазон – основным параметром является длина линии
 - сечение линии почти не оказывает влияния на полное сопротивление
 - полное сопротивление линии – очень важный параметр для рабочих характеристик

Чем можно объяснить свойства линии? На Рис. 4 показан проводник под током.

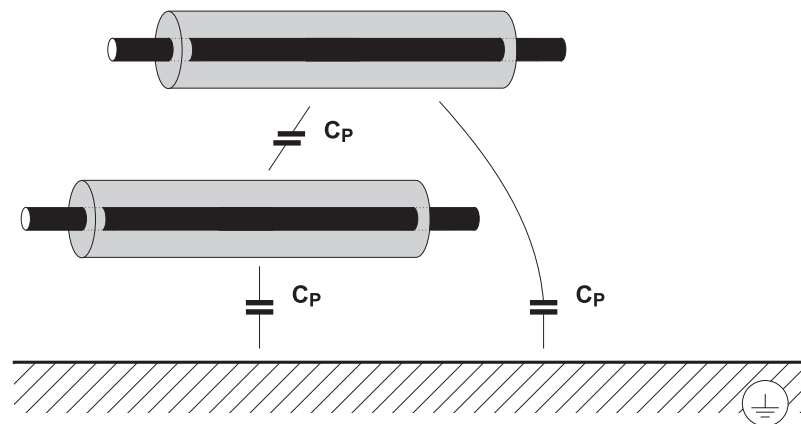
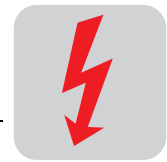


00282AXX

Рис. 4. Проводник под током

- I = ток
- B = магнитное поле
- L_S = паразитная индуктивность
- X = проводник
- Y = изоляция

Вокруг проводника создается магнитное поле B , которое противодействует изменению тока I , проводник действует как индуктивность L_S . Индуктивность прямого, вытянутого проводника составляет около 1 мкГн/м (длина $l \gg$ диаметр D).

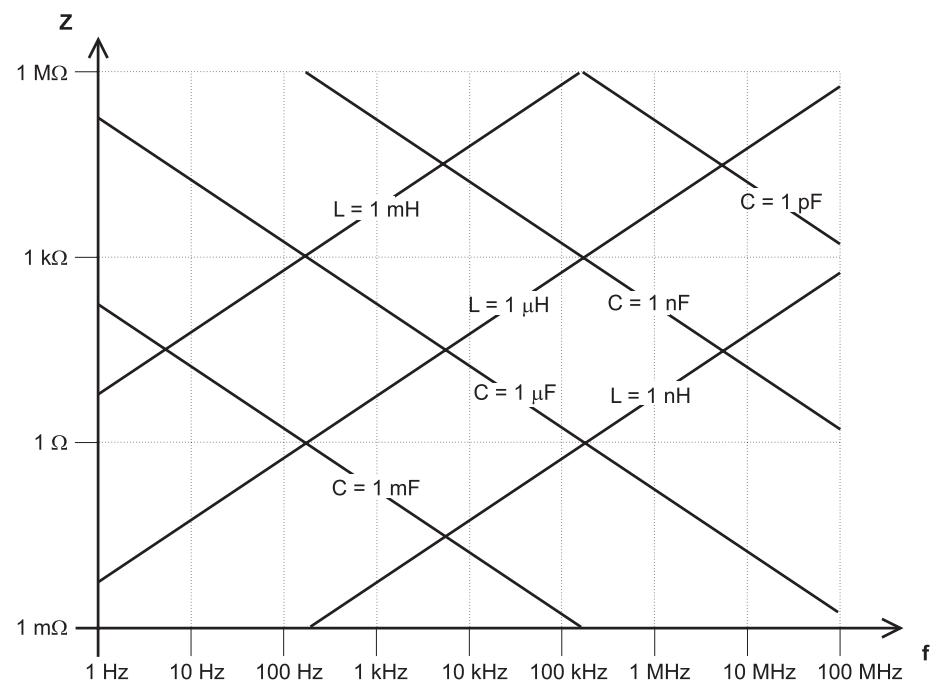


00283AXX

Рис. 5. Два проводника под напряжением

На Рис. 5 показаны два проводника с различными напряжениями. Между проводниками, как и между каждым проводником и землей, образуется электрическое поле, проводники действуют как пластины конденсатора.

Емкость такого нежелательного конденсатора называют **паразитной емкостью C_p** .

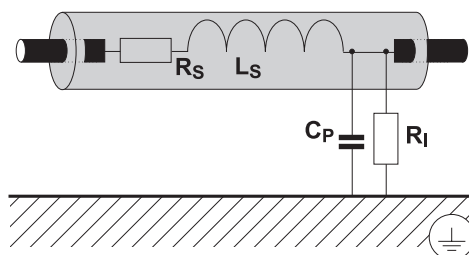


0284AXX

Рис. 6. Зависимость полного сопротивления Z конденсатора и катушки от частоты f



Частотно-зависимые свойства линии показаны на следующих рисунках.



05547AXX

Рис. 7. Эквивалентная схема линии

R_S = последовательное сопротивление
 R_I = сопротивление изоляции
 L_S = паразитная индуктивность
 C_P = паразитная емкость

Свойства линии	
в НЧ-диапазоне	в ВЧ-диапазоне
Z_L = последовательное полное сопротивление Z_Q = параллельное полное сопротивление	Z_L = последовательное полное сопротивление Z_Q = параллельное полное сопротивление

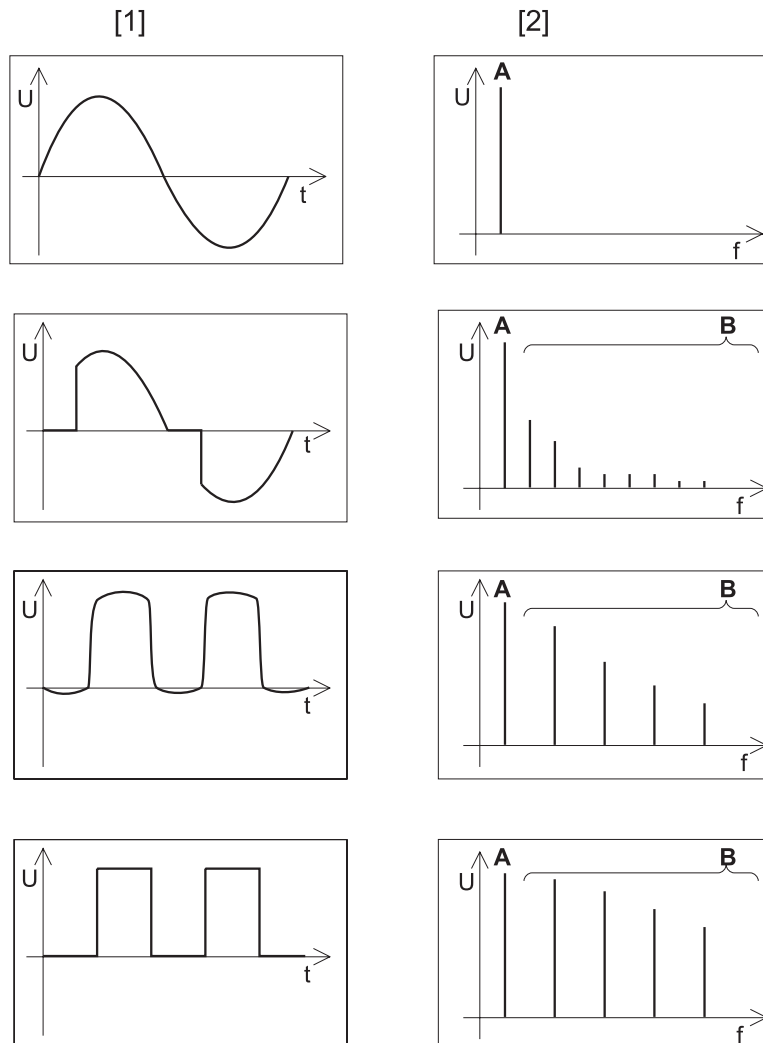
В НЧ-диапазоне последовательное полное сопротивление вытянутого проводника очень маленькое, параллельное полное сопротивление (сопротивление изоляции), напротив, очень большое.

В ВЧ-диапазоне параллельное полное сопротивление (сопротивление изоляции) перекрывается паразитной емкостью. С возрастающей частотой проникновение помехи через изоляцию кабеля становится все проще, если это не подавляется специальными мерами. Последовательное полное сопротивление увеличивается с увеличением частоты. Поэтому при высоких частотах малыми токами вызываются относительно высокие перепады напряжения.



2.2 Причины высокочастотных помех

Откуда возникают высокочастотные помехи в установке, которая, собственно говоря, работает только с постоянным напряжением или с переменным напряжением сети? На Рис. 8 показаны частотные спектры различных форм сигнала. Каждый не синусоидальный сигнал содержит, кроме своей основной частоты, еще и кратные производные основной частоты, так называемые гармоники. В общих чертах, чем быстрее изменяется амплитуда сигнала, тем выше высокочастотные гармоники этого сигнала.



00286BXX

Рис. 8. Формы сигнала [1] и компоненты спектра сигнала [2], разделенные на основную волну **A** и высшие гармоники **B**

Это обозначает, что, например, при каждом процессе коммутации возникают высокочастотные сигналы, которые могут стать причиной помех.



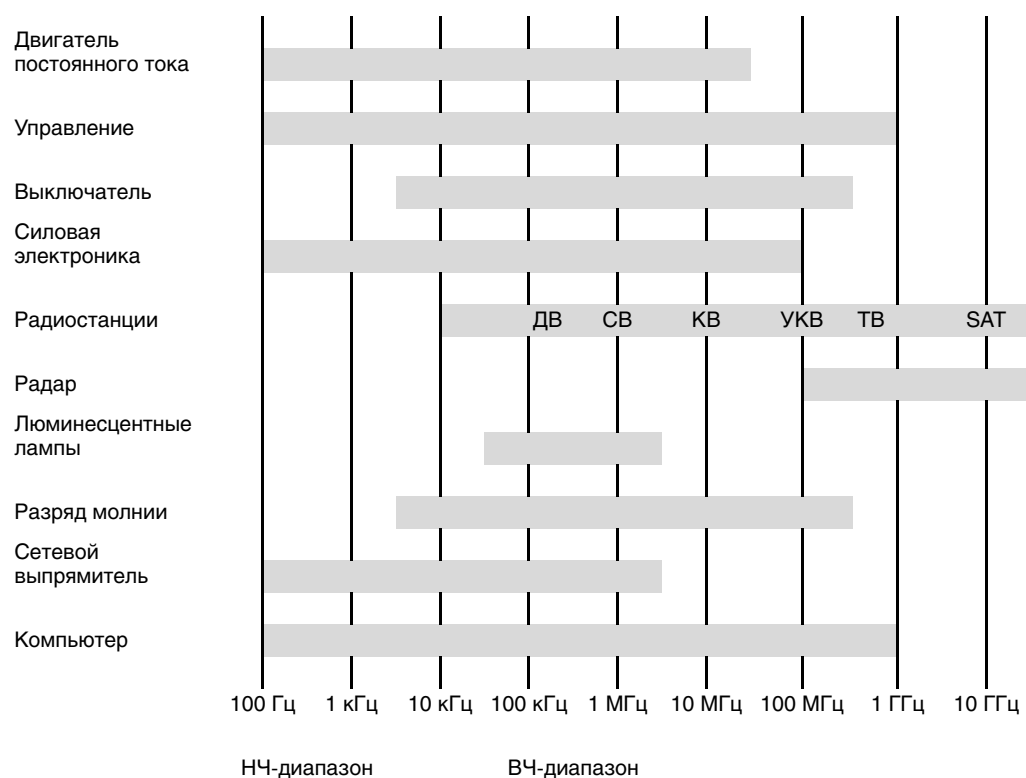
2.3 Источники помех и их воздействие

В этом разделе рассматриваются различные виды источников помех и поясняется на примерах механизм помех и их воздействие. В следующей таблице перечислены различные источники помех.

Табл. 1. Источники помех

Естественные источники помех	Технические источники помех	
	Преднамеренное излучение	Непреднамеренное излучение
Например атмосферные помехи космические шумы разряды молнии электростатические разряды	Например радиостанции радары индукционные электроплиты микроволновые печи высокочастотные сушильные установки	Например выключатели люминесцентные лампы двигатели установки для дуговой сварки силовая электроника сетевые выпрямители цифровые приборы (компьютеры и т. п.)

Дальнейшее подразделение происходит по ширине полосы частот (узкополосные или широкополосные) и характеристикам помехи, и зависит от предъявляемых к обзору требований.



На приведенном выше графике показаны диапазоны частот, в которых активны различные источники помех.

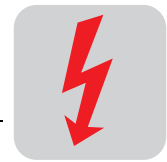
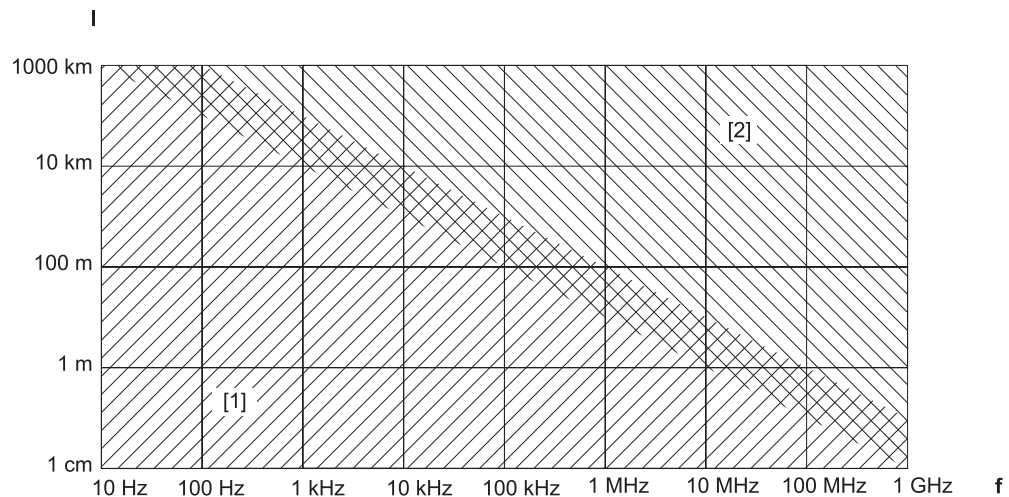


Рис. 9 показывает, на каких расстояниях действуют связанные с линией и излучаемые помехи на разных частотах:

В зоне [1] сигналы помех передаются главным образом через соединительный кабель. Источник и получатель помехи соединены между собой проводами по которым помеха передается. В зоне [2] сигнал помехи дополнительно излучается источником помехи и может передаваться получателю помехи через соединительные провода или через корпус. Прямого соединения между источником и получателем помехи здесь не требуется.



00767AXX

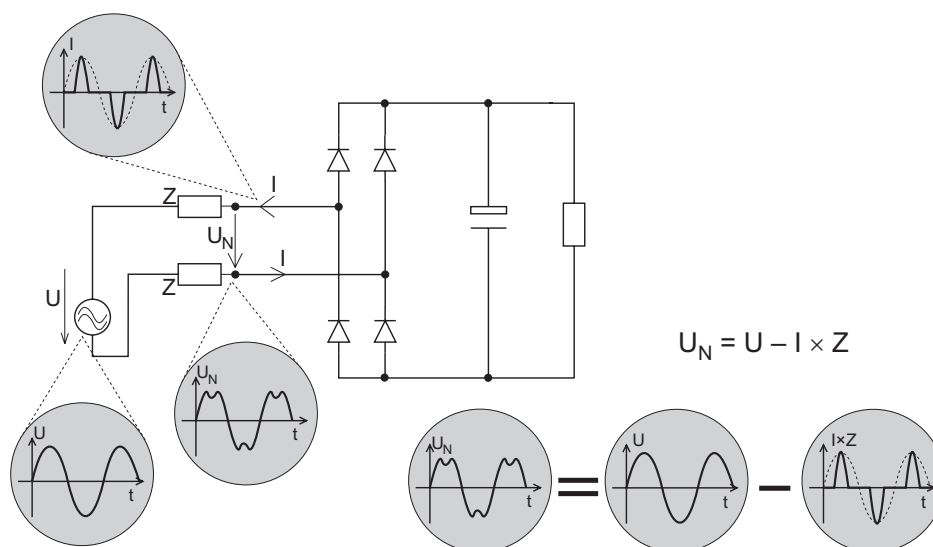
Рис. 9. Зоны помехи, связанной с линией [1], и излученной помехи [2] в зависимости от частоты помехи f и расстояния l (l = длина линии, размер преобразователя, ширина шлица и т. д.)



Сетевые гармоники

Спектр частот: преимущественно в НЧ-диапазоне

Энергоемкость: большая



00288BXX

Рис. 10. Сетевой выпрямитель с конденсатором

На Рис. 10 показаны характеристики сетевого выпрямителя с последовательно подключенным конденсатором. Так как конденсатор заряжается в те промежутки времени, когда напряжение сети выше, чем напряжение на конденсаторе, ток в подводящей линии имеет форму коротких высоких несинусоидальных пиков подзарядки. Они вызывают на полном сопротивлении сети Z падение напряжения. Оно становится ощутимым для других потребителей как искажение напряжения U_N . Напряжение перестает быть синусоидальным, т. е. оно содержит высшие волны, так называемые сетевые гармоники.

Присутствие гармоник в токе или напряжении характеризуется суммарным коэффициентом гармоник THD:

THD

$$THD = \sum_{n=2}^{50} \left(\frac{S_n}{S_1} \right)^2 \quad [1]$$

THD = total harmonic distortion (суммарный коэффициент гармоник)
 S_1 = основная гармоника от тока или напряжения
 S_n = n-я гармоника от тока или напряжения

О сетевых гармониках говорят при сетевых искажениях до частоты в 2,5 кГц. Речь идет о помехах в НЧ-диапазоне.

Чем быстрее происходит изменение тока или напряжения, тем больше в сигнале высших гармоник. Большое содержание высших гармоник может привести к пиковым нагрузкам и просадке напряжения в сети, которые сильно отличаются от нормальных значений. Возникающие пики напряжения имеют из-за своей относительно долгой продолжительности до нескольких мс высокое содержание энергии и в экстремальных случаях могут привести к разрушению подключенных приборов. Сетевые гармоники могут возникать постоянно или случайным образом.



Компенсирующие устройства

Гармонические колебания могут вызывать в сети резонансные контуры, которые в критических случаях приводят к значительным перенапряжениям. Параллельный резонансный контур может образовываться, например, из конденсаторов компенсирующего устройства и основной катушки индуктивности питающего трансформатора. Если частота одной из гармоник близка к резонансной частоте, то при процессе коммутации (обычно при отключении конденсаторов при слабой нагрузке) на напряжение сети может быть наложено опасное колебание напряжения.

Для предотвращения опасности сетевого резонанса изготовители компенсирующих устройств рекомендуют компенсирующие устройства с дросселем, начиная с составляющей мощности преобразователя примерно 20 – 25 % от общей потребляемой мощности.

Иллюстрация резонансной помехи в сети, вызванной гармониками:

Сеть с частотой 50 Гц была возбуждена 11-й гармоникой (= 550 Гц) вследствие процесса коммутации.

Резонансная частота $f_{рез}$ составляет для фазы L1 583 Гц и для фазы L2 592 Гц.

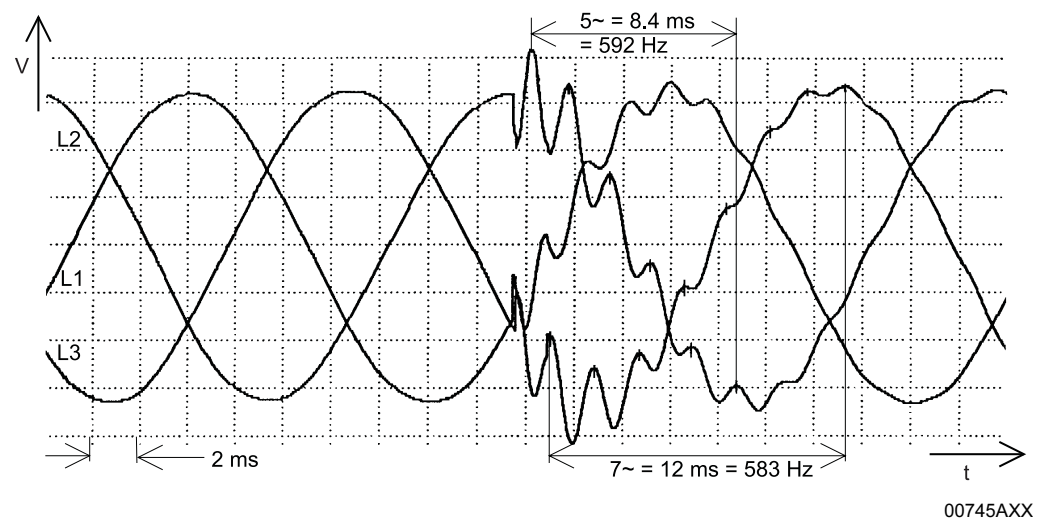


Рис. 11. Иллюстрация резонансной помехи в сети

Примеры генераторов сетевых гармоник

- Устройства плавного запуска, преобразователи частоты, сервопреобразователи, регуляторы частоты вращения
- Дуговые электропечи
- Индукционные электропечи
- Люминесцентные лампы (в том числе компенсированные)
- Насыщенные магнитные цепи (например, трансформатор и дроссель в насыщении)
- Бытовые приборы, такие как радио, телевизор, компьютер



Примеры
воздействия
сетевых
гармоник

Табл. 2. Воздействие сетевых гармоник

Устройство	Воздействие
Трансформатор	Повышенные потери и нагрев, могут возникать явления насыщения
Электродвигатели	Повышенные потери, колебания частоты вращения
Кабели	Повышенные активные и диэлектрические потери
Конденсаторы	Нагрев, старение, резонансные явления
Контрольные и измерительные приборы	Ошибки измерения, ограничение функций, потеря функциональности
Нулевой автомат	Ложные срабатывания

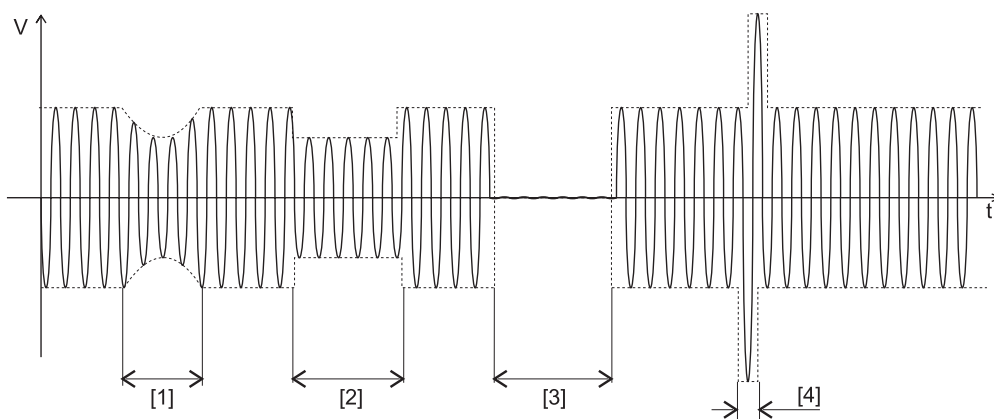
Сетевые гармоники можно уменьшить следующими мерами:

- с помощью подходящего компенсирующего устройства
- с помощью сетевой дроссельной катушки перед источником
- с помощью подключения через разделительный трансформатор

Сетевые
колебания,
прерывание
напряжения
в сети, просадка
напряжения
в сети,
повышенные
напряжения

Спектр частот: главным образом в НЧ-диапазоне

Энергоемкость: большая



00289AXX

Рис. 12. Помехи в низковольтной сети

- [1] = сетевые колебания, фликер
 [2] = просадка напряжения в сети
 [3] = прерывание напряжения в сети
 [4] = перенапряжение в сети

На Рис. 12 показаны различные помехи **НЧ-диапазона**, которые могут возникнуть в низковольтной сети. Для обеспечения бесперебойной эксплуатации приборы, которые подключены к такой сети, должны иметь достаточную помехозащищенность. С другой стороны, низковольтная сеть должна обладать минимально допустимым пределом качества, который должен обеспечить пользователь.



Сетевые помехи могут иметь следующие причины:

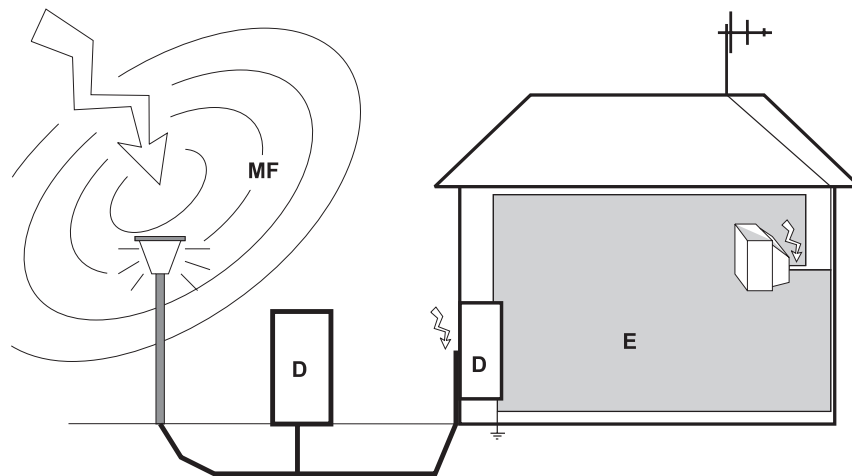
Табл. 3. Причины сетевых помех

Помехи	Возможные причины	Воздействие
Колебания напряжения	Например, дуговые электропечи, сварочные аппараты, сильные колебания нагрузки (например, подъемники, прессы)	Колебания освещения (фликер)
Просадка напряжения	Подключение больших нагрузок (запуск больших двигателей, электрического отопления, электрических печей и т. д.), короткие замыкания в электросети...	Колебания крутящего момента, возможное нарушение производственного процесса
Прерывания напряжения	Подключение больших трансформаторов, двигателей, конденсаторов	Отпускание и дребезг контактов реле, ложное срабатывание тормоза двигателя
Повышенные напряжения	Подключение устройств в электросеть среднего напряжения, гроза, подключение компенсирующих устройств без дросселя	Повреждение электронных приборов, нарушение производственного процесса

Молния

Спектр частот: воздействия в НЧ и ВЧ диапазонах

Энергоемкость: очень большая



00290BXX

Рис. 13. Молния, непосредственное воздействие и магнитное поле **MF**
(распределитель = **D**, заземляющий контур = **E**)

Одним из источников помех с очень большой энергоемкостью является молния. Ее напряжение измеряется в мегавольтах, а ток превышает 100 кА.

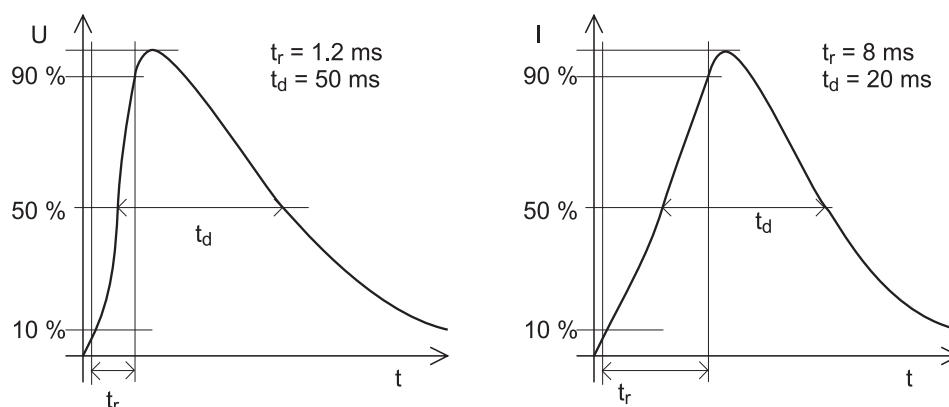
На рис. 14 показаны два основных пути воздействия молнии. В первом случае – это прямой удар тока и возникающее при этом падение напряжения, которое может привести к значительным перенапряжениям в электропроводке. Во втором – высокая сила тока молнии и ее быстрое изменение вызывают сильные изменения магнитного поля.



Точно так же, как в трансформаторе, эти изменения магнитного поля индуцируют в соседствующих петлях проводника высокие токи и напряжения. Это может привести к тому, что даже за встроенной защитой от перенапряжения при неблагоприятных условиях могут возникнуть недопустимые повышенные напряжения.

Возникающие напряжения могут вызвать последствия от нарушения функционирования до невосстановимого повреждения электрических и электронных устройств.

С помощью соответствующего плана при прокладывании линии эти напряжения можно очень сильно уменьшить (например, построение замкнутой сети и подключение по схеме соединения звездой).



00799ARU

Рис. 14. Стандартный импульс перенапряжения по IEC 801-5

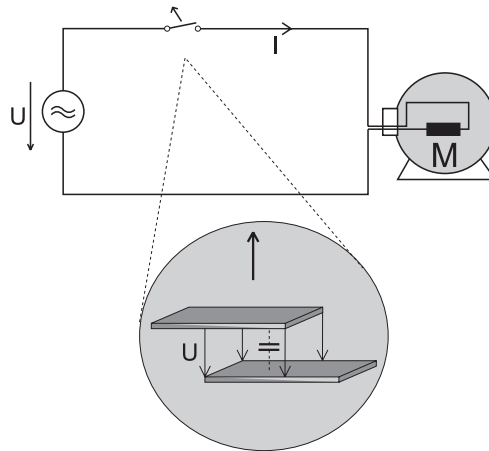
t_r = длительность фронта
 t_d = длительность импульса
 U/I = амплитуда

На Рис. 14 показан стандартный импульс (всплеск напряжения или гибридный импульс), которым тестируется помехозащищенность от воздействия молнии в электросети.

**Всплеск**

Спектр частот: воздействия преимущественно в ВЧ-диапазоне

Энергоемкость: малая



00291AXX

Рис. 15. Возникновение всплеска

Всплеском называется последовательность быстрых переходных помех с крутым фронтом. Эти короткие импульсы возникают, когда электро-механический переключатель открывается под действием магнитного потока. Причиной является наличие в электрической цепи индуктивностей, требующихся для того, чтобы ток не сразу снижался до нуля. Эти индуктивности могут быть как явными (электродвигатель, электрический тормоз, трансформатор, дроссель), так и неявными (индуктивность выводов).

Открывающийся контакт переключателя в этом случае представляет собой емкость C , величина которой уменьшается при увеличении расстояния между открывающимися контактами:

Емкость

$$C = \varepsilon \cdot \frac{A}{d} \quad [2]$$

- C = емкость контактов переключателя
- ε = диэлектрическая проницаемость
- A = площадь контактов
- d = расстояние между контактами

В момент отключения индуктивность сохраняет энергию. После отключения индуктивность продолжает подавать ток. Этот ток заряжает емкость C контакта. При этом существует следующая зависимость:

Энергия

$$\frac{1}{2} C \cdot U^2 = W = \frac{1}{2} L \cdot I^2 \quad [3]$$

- W = сохраненная в электрической цепи энергия
- C = емкость контактов переключателя
- U = напряжение на контактах переключателя
- L = индуктивность разорванной электрической цепи
- I = ток в момент отключения



Образованный благодаря индуктивности ток заряжает емкость переключателя С. Так как емкость контактов переключателя очень мала (несколько пФ), напряжение на переключателе может достигать очень высоких значений. Когда переключатель открывается, воздушный зазор между контактами не может полностью обеспечить изоляцию контактов: возникает пробой. Конденсатор С разряжается.

После того, как вследствие этого напряжение на переключателе снизится до нуля, емкость переключателя снова зарядится. Так как контакты переключателя в этот промежуток времени далеко удалены друг от друга, то при очень высоком напряжении воздушный зазор между контактами пробивается. Это повторяется, пока изоляционные свойства воздушного зазора не будут достаточны, чтобы предотвратить дальнейшие пробои. Сопротивление в электрической цепи (активное сопротивление кабеля, потребители и т. д.) подавляет токи перегрузки: чем больше сопротивление, тем быстрее затухает всплеск.

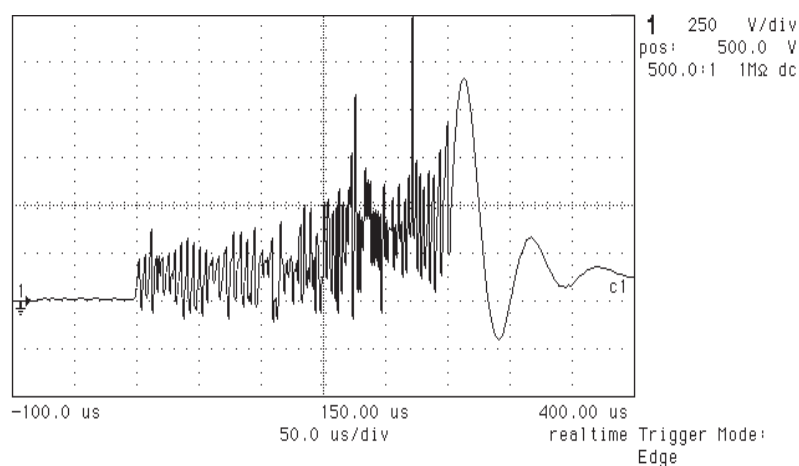
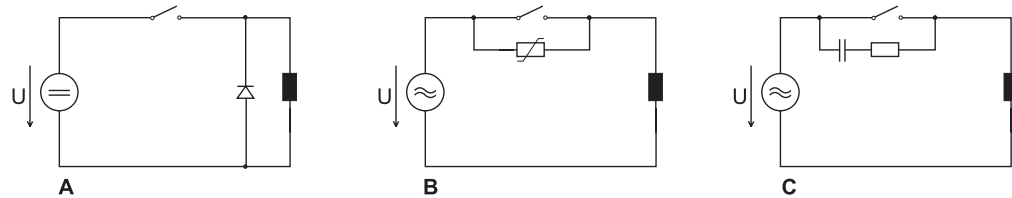


Рис. 16. Измеренный всплеск

00292AXX



На рис. 16 показано, как можно измерить напряжение между контактами переключателя. Напряжение будет тем выше, чем больше в момент отключения ток и индуктивность в разорванной электрической цепи. Напряжение будет тем ниже, чем больше емкость между контактами переключателя. Всплески могут достигать 10 кВ.



00293

Рис. 17. Вспомогательные схемы для защиты от всплеска: **А** схема диодной защиты / **В** схема варисторной защиты / **С** схема резистивно-емкостной защиты

На Рис. 17 показаны различные возможности подавления этого вида помех:

В варианте **А** индуктивность шунтируется с помощью диода: ток может свободно протекать через него, магнитный поток не прерывается и на контактах переключателя не возникает высокого напряжения. Эта вспомогательная схема возможна только при постоянном напряжении.

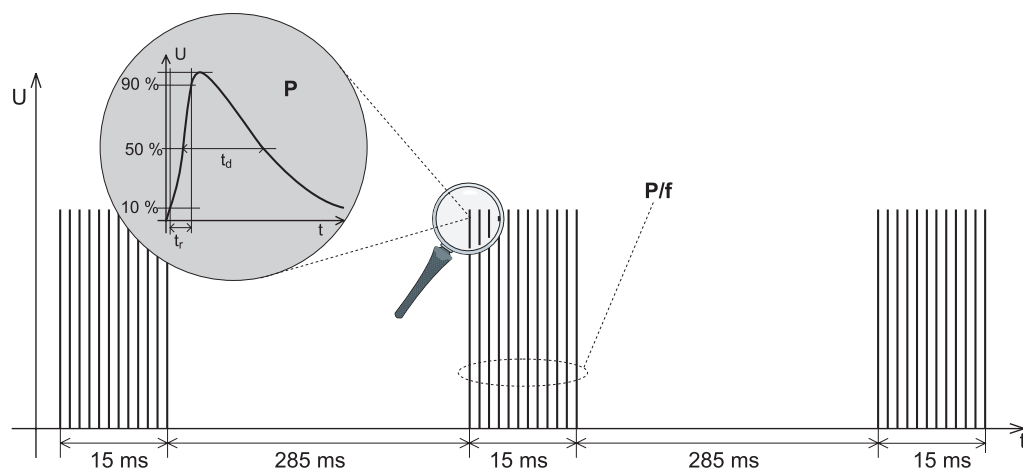
В варианте **В** контакты шунтируются с помощью зависящего от напряжения сопротивления, так называемого варистора. Он ограничивает напряжение на переключателе. При этом нужно подобрать такой варистор, чтобы он мог поглощать возникающую энергию W и выдерживать частоту включений. Энергию можно рассчитать по формуле [3]. Эта схема подключения подходит для постоянного и переменного напряжения.

В варианте **С** контакты шунтируются с помощью резистивно-емкостного звена: напряжение на контактах уменьшается с возрастанием емкости, сопротивление обеспечивает быстрое затухание возникающего импульса переключения.

Вспомогательные схемы В и С могут применяться как на переключателе, так и на индуктивности.



Электрические и электронные приборы должны быть оборудованы защитой от помех, типа всплеска, соответствующей условиям эксплуатации. На Рис. 18 изображен предназначенный для проверки стандартный импульс.



00294BXX

Рис. 18. Стандартный проверочный сигнал всплеска по IEC 801-4

Проверочный сигнал всплеска с единичными импульсами **P** имеет следующие параметры:

- t_r = 5 нс (длительность фронта)
- t_d = 50 нс (длительность импульса)
- f = 2,5 / 5 кГц (частота повторения)
- U = 0,5 / 1 / 2 / 4 кВ (амплитуда)

Принципиально похожие сигналы помехи возникают при применении полупроводниковых ключей. В этом случае необходимо с помощью подходящих мер коммутации обеспечить, чтобы возникающие повышенные напряжения не вызвали повреждения полупроводников. Высокие скорости переключения, возможные при использовании полупроводниковых ключей, могут привести к значительному уровню помех. Очень короткое время переключения вызывает сигналы помехи с очень высокочастотными составляющими.

Примеры возможного воздействия коротких импульсов:

- Аварийный отказ или сбой работы компьютеров
- Ложные аналоговые сигналы
- Ошибочное включение датчиков присутствия и других переключателей
- Повреждение чувствительных полупроводников

При всплеске возникают высокочастотные помехи, которые могут воздействовать на находящиеся поблизости линии.



Электростатический разряд

Спектр частот: воздействие в ВЧ-диапазоне

Энергоемкость: малая

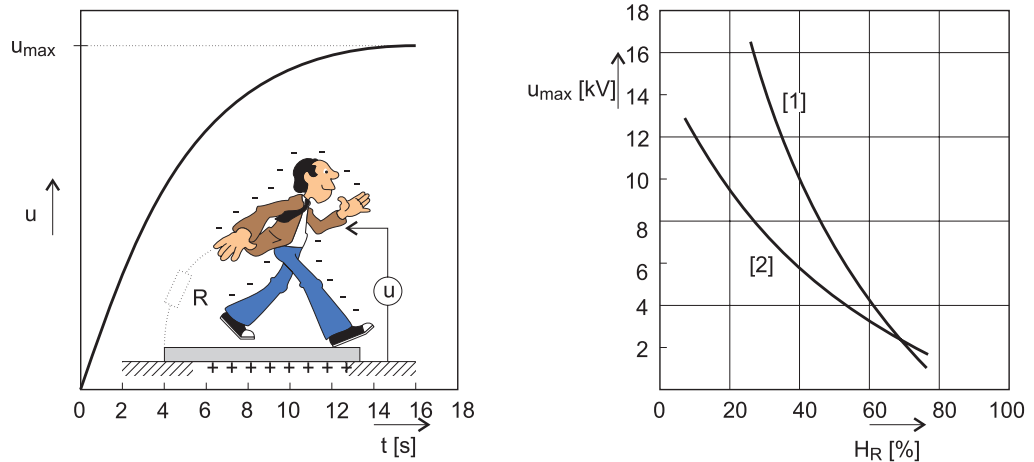


Рис. 19. Электростатический заряд на резиновом покрытии [1] и на покрытии из ПВХ [2] при относительной влажности воздуха H_R 00295BXX

При движении человека в обуви с резиновой подошвой по синтетическому настилу можно наблюдать электростатический заряд. Этот эффект встречается также и при других материалах. Если человек приближается к незаряженному проводящему заземленному предмету, то происходит электростатический разряд (англ. ESD = **e**lectro**s**tatic **d**ischarge).

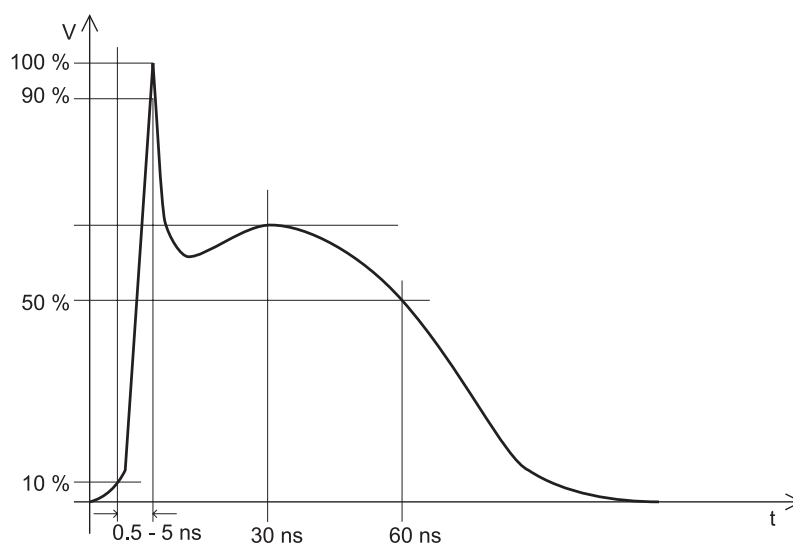
Электростатический заряд возникает при разделении двух соприкасающихся материалов, из которых по крайней мере один должен быть диэлектриком, так как в противном случае заряд сразу стекает.

Электростатический заряд возникает, например, при ходьбе по изоляционным покрытиям, при вставании со стула, при манипуляциях с синтетическими материалами, при разматывании синтетических и бумажных лент с рулонов, при течении неэлектропроводных жидкостей по трубам и т. д. При неблагоприятных сочетаниях материалов и низкой влажности воздуха могут возникать напряжения до 30 кВ.

При разряде возникают очень быстрые импульсные токи, которые могут вызывать помехи.



Электростатические разряды могут возникать и в приборах, если для этого имеются условия.



00296AXX

Рис. 20. Стандартный ESD-импульс по IEC 801-2

Электрические и электронные приборы должны быть оборудованы защитой от помех типа ESD, соответствующей условиям эксплуатации. На Рис. 20 показан стандартный импульс. Разряд происходит за очень короткий промежуток времени, и импульс имеет высокочастотный спектр. Высокочастотный бросок тока, который возникает при разряде, может, прежде всего, повредить или разрушить полупроводниковые слои. Электростатического заряда можно избежать при использовании проводящих покрытий для пола, специальной обуви, заземляющих полос и т. п.

Возможные воздействия:

- Сбои в цифровых системах
- Повреждение полупроводников, скрытые повреждения

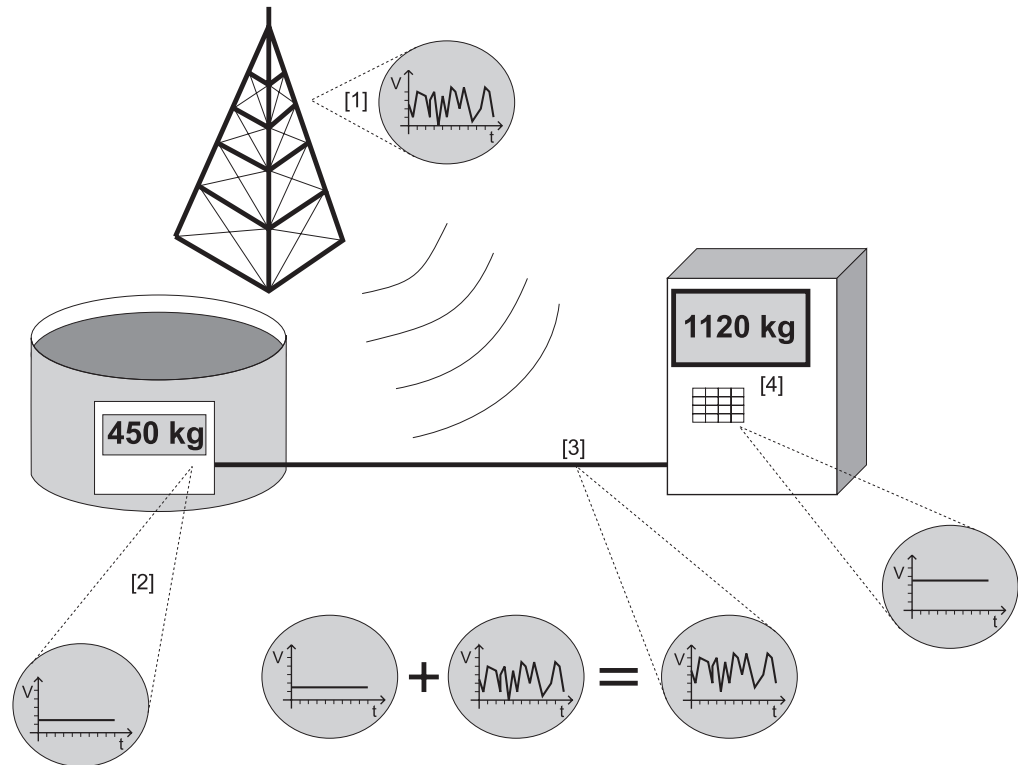
При ESD возникают высокочастотные помехи, которые могут воздействовать на находящиеся поблизости линии.



Излучение

Спектр частот: ВЧ-диапазон

Энергоемкость: обычно малая, однако в особых случаях может быть очень большой (например, в непосредственной близости от теле- и радиопередатчиков)



00279BXX

Рис. 21. Помеха от излучения [1] на указателе уровня [2], линии [3], контрольном блоке [4]

Рис. 21 показывает, как помеха от излучения на линии может попасть на получателя помех. Измерительная линия действует в данном случае как приемная антенна. При этом существенными параметрами степени воздействия являются длина волны излучения λ и длина линии.

Имеется следующая взаимосвязь:

Длина волны

$$\lambda = \frac{c}{f} \quad [4]$$

λ = длина волны излучения в воздухе в метрах, например, 30 м при 10 МГц
 c = скорость света (ок. 300000000 м/с)
 f = частота излучения в Гц



Практически можно исходить из того, что линия начинает принимать значительные составляющие излучения, как только ее длина достигает десятой части длины волны. Линия действует как приемная антенна. Обратно справедливо то, что линия, по которой передается высокочастотный сигнал, имеющая длину более одной десятой длины волны, начинает излучать сигнал. Она действует как передающая антенна.

В качестве противодействия приборы можно вмонтировать в металлический корпус (клетка Фарадея), а линии можно экранировать. При разрывах экрана, щелях и пробоях корпуса, которые достигают 10 % от длины волны, прием или излучение значительных составляющих сигнала не подавляется.

*Возможные
источники помех*

- Радиопередатчики, телепередатчики, мобильные телефоны, радиотелефоны
- ВЧ сушильные установки, микроволновые печи
- Сварочные аппараты дуговой сварки
- Короткие импульсные помехи (ESD, всплеск...)
- Высокочастотные тактируемые системы (компьютер, управляющая ЭВМ и т. п.)

*Возможные
воздействия*

- Ложные аналоговые сигналы
- Ошибки в работе
- Неправильные измерения



2.4 Механизмы воздействия

Различные источники помех описываются в предыдущем разделе. Здесь рассматривается только то, какими способами помехи S достигают получателя помех. Различаются четыре вида воздействия, причем три последних, в принципе, являются различными формами проявления воздействия излучения:

- гальваническое воздействие
- индуктивное воздействие
- емкостное воздействие
- излучение

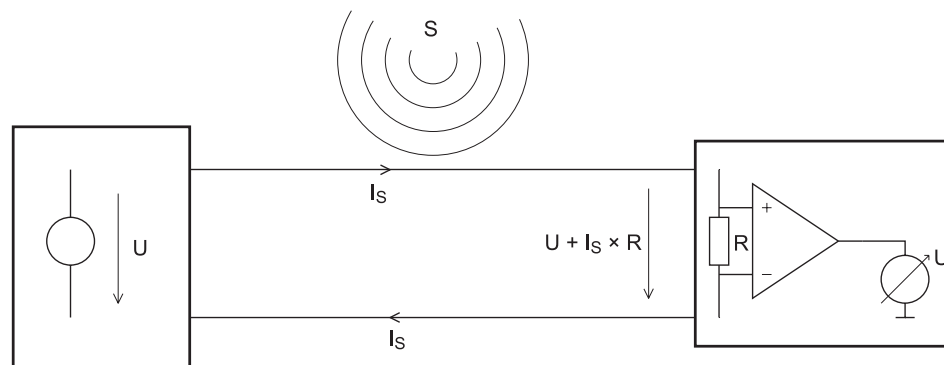
В зависимости от пути распространения помехи различаются два различных вида помех:

- противофазные помехи (Рис. 22)
- синфазные помехи (Рис. 23)

Противофазные помехи

Противофазные помехи также называются симметричными помехами:

Они преобладают при низких частотах; цепь тока помехи замыкается имеющимися линиями. Ток помехи I_S здесь непосредственно вызывает падение напряжения помехи на измерительном сопротивлении R .



00297AXX

Рис. 22. Противофазная помеха

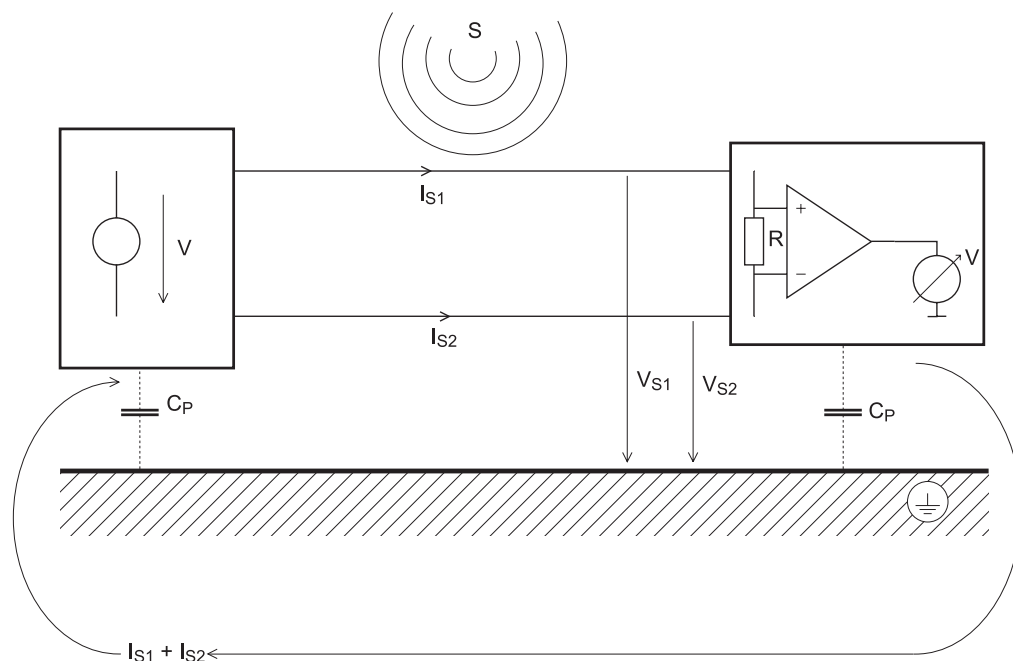
S = помеха
 I_S = ток помехи



Синфазные помехи

Синфазные помехи также называются асимметричными помехами:

Цепь тока помехи здесь замыкается паразитными емкостями C_P . Так как они при низких частотах обладают высоким полным сопротивлением, то синфазными помехами в НЧ-диапазоне можно пренебречь. Значимые токи помех I_{S1} и I_{S2} протекают только при высоких частотах. На измерительном сопротивлении R при этом сказываются различные падения напряжения на выходящем и входящем проводах $V_{S1} - V_{S2}$. В ВЧ-диапазоне синфазные помехи являются главной проблемой. Их часто очень трудно обнаружить, так как не всегда очевидно, где цепь тока помехи замыкается паразитными емкостями.



00298AXX

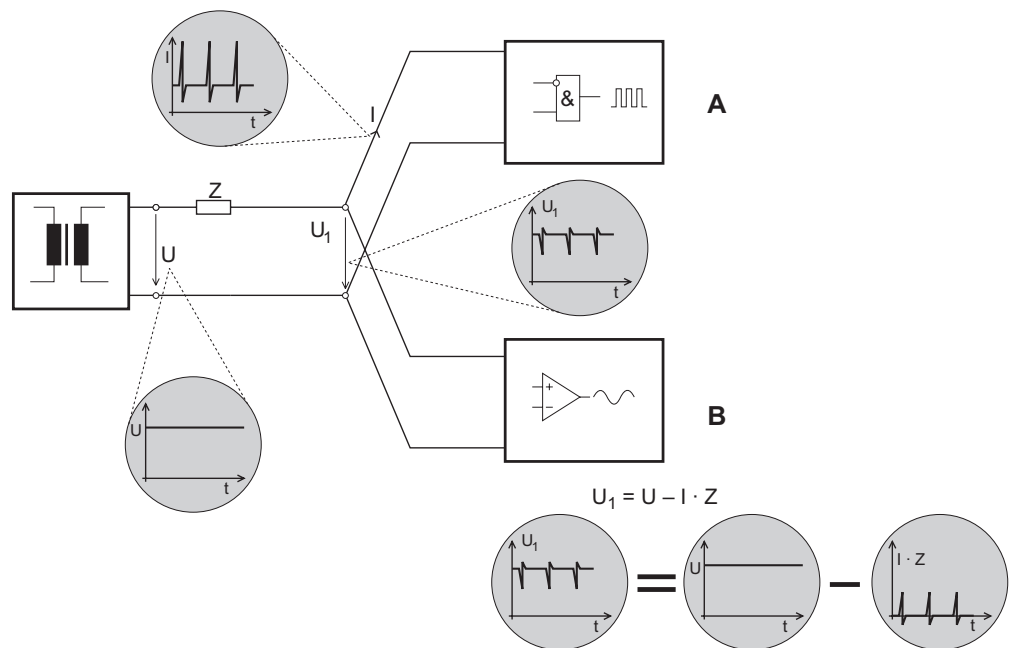
Рис. 23. Синфазная помеха

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



**Гальваническое
воздействие
(линейное
воздействие)**

Спектр частот: активно как в НЧ-, так и в ВЧ-диапазонах



00299AXX

Рис. 24. Пример гальванического воздействия

Гальваническое воздействие возникает, когда несколько электрических цепей делят между собой источники напряжения, токопроводящие дорожки, линии и т. п. На Рис. 24 показан лежащий в основе принцип. Ток в электрической цепи А (цифровая схема) вызывает на общем полном сопротивлении Z падение напряжения. Это падение напряжения дает о себе знать в электрической цепи В (аналоговая схема) просадкой питающего напряжения. Падение напряжения тем больше, чем больше ток и общее полное сопротивление связи Z .

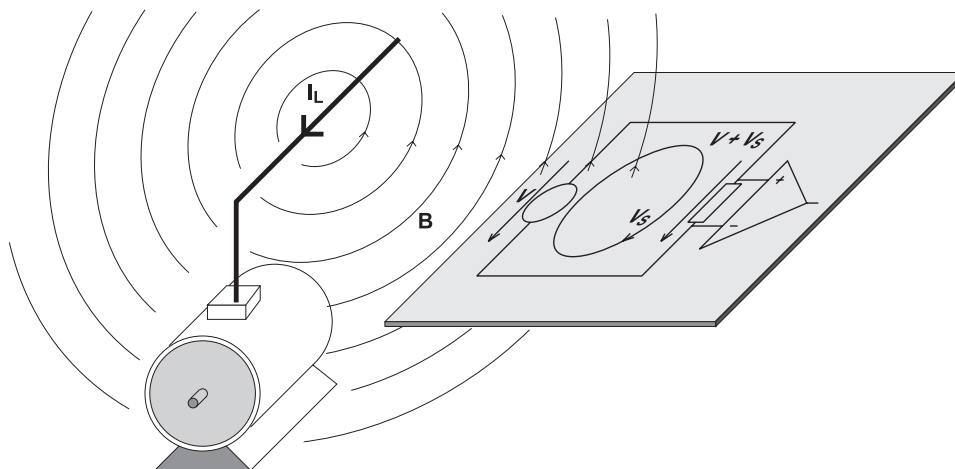
Гальваническое воздействие между двумя электрическими цепями может быть уменьшено с помощью следующих мер:

- раздельное питание цепей силовых и низковольтных токов;
- снижение полного сопротивления связи Z с помощью подключения по схеме соединения звездой; нейтраль должна находиться как можно ближе к источнику питания, так как при высоких частотах полное сопротивление подводящей линии определяется в первую очередь ее длиной.



Индуктивное воздействие

Спектр частот: активно как в НЧ-, так и в ВЧ-диапазонах



00300AXX

Рис. 25. Индуктивное воздействие между подводящей линией двигателя и цепью управляющего тока на печатной плате

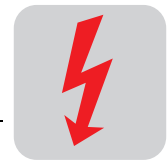
I_L = ток в кабеле питания двигателя
 B = магнитное поле
 V_S = напряжение помехи

Вокруг каждого проводника с током создается магнитное поле B , которое пропорционально току в проводнике I_L . Если это магнитное поле пронизывает перпендикулярно к нему расположенный проводящий контур, то при изменении напряженности магнитного поля там индуцируется напряжение (принцип трансформатора). Напряжение пропорционально площади проводящего контура и изменению напряженности магнитного поля. Это означает, что напряжение помехи индуцируется, только если изменяется сила тока в цепи нагрузки (переменный ток или подключенный постоянный ток). Фиксированный постоянный ток при данных условиях напряжение помехи не вызывает.

Следующие факторы имеют влияние на напряжение помехи:

- Расстояние: напряжение помехи уменьшается с увеличением расстояния между цепью нагрузки и цепью, на которую воздействуют помехи.
- Ориентация: если проводящий контур параллелен магнитным силовым линиям, то напряжение помехи не индуцируется. При перпендикулярности проводящего контура магнитным силовым линиям возникает максимальное напряжение помехи.
- Частота: с возрастанием частоты тока нагрузки увеличивается напряжение помехи.
- Площадь проводящего контура: напряжение помехи пропорционально площади проводящего контура.

Напряжения помехи также могут образовываться, если проводящий контур движется в магнитном поле (принцип динамо-машины), например, при вибрации.

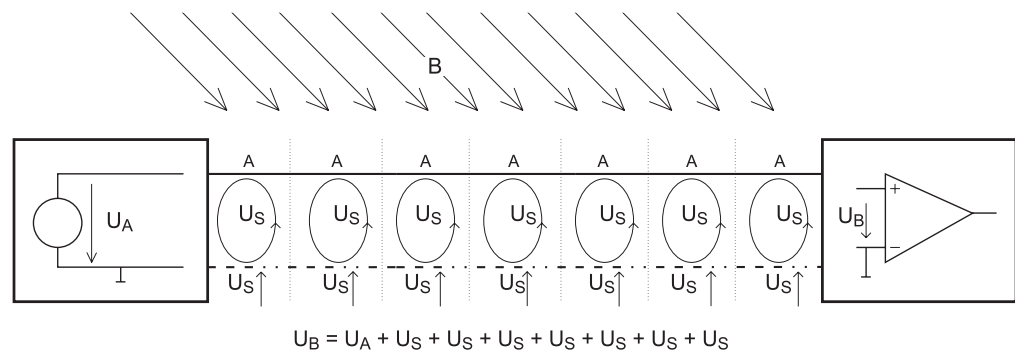


Меры против
индуктивного
воздействия

Скручивание

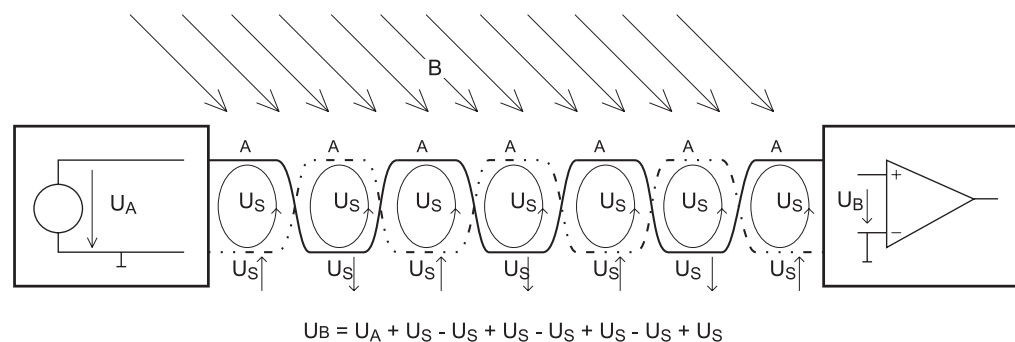
Скручивание выходящих и входящих проводов особенно эффективно для снижения индуктивного воздействия (Рис. 27). При этом образуется много маленьких поверхностей A , на которых индуцируются частичные напряжения помехи с чередующимися знаками. На измерительном сопротивлении присутствует только незначительное напряжение помехи. Общее напряжение помехи не равно нулю, так как поверхности петель A не равны и так как магнитное поле B в петлях различно (например, из-за различного расстояния от источника помехи).

Скручивание тем эффективнее, чем меньше поверхность петель. Это достигается за счет увеличения количества витков.



00696AXX

Рис. 26. Нескрученный подводный кабель с магнитным полем B , поверхностью петель A и частичными напряжениями помехи U_s

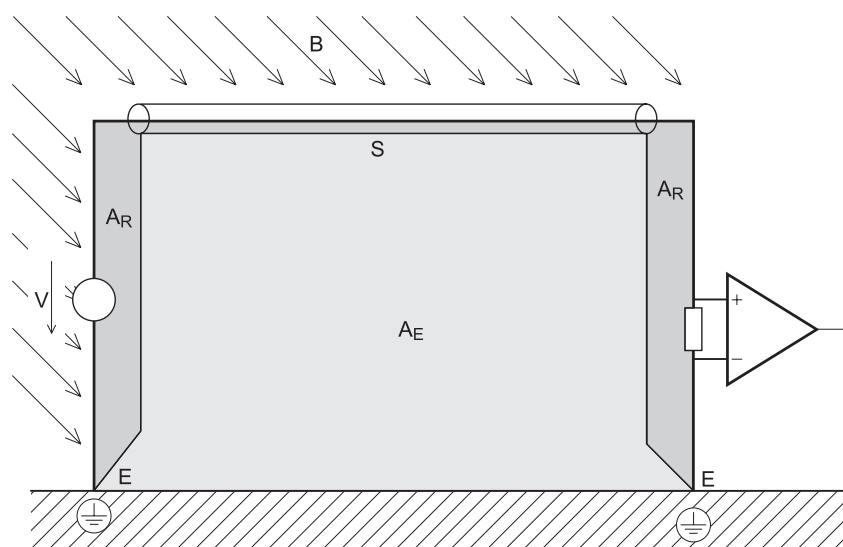


00697AXX

Рис. 27. Скрученный подводный кабель с магнитным полем B , поверхностью петель A и частичными напряжениями помехи U_s



Экранирование



00698AXX

Рис. 28. Экранирование от магнитных полей

- B = магнитное поле
- E = заземление экрана
- A_E = площадь цепей возврата через землю
- A_R = площадь остаточного контура
- S = экран

На Рис. 28 показано, как экран из электропроводного материала противодействует индуктивному воздействию, уменьшая площадь активного воздействия. Это означает также, что экран из немагнитного материала действует только тогда, когда экран заземлен с обоих концов, так как в противном случае он не образует короткозамкнутую петлю для магнитного поля помехи. На измерительном сопротивлении снижается только незначительное напряжение помехи.

Экран закорачивает основную часть напряжения помехи, по экрану течет ток короткого замыкания, который может достигать высоких значений. Для предотвращения слишком больших контурных токов экран можно подключить через конденсатор.



00870AXX

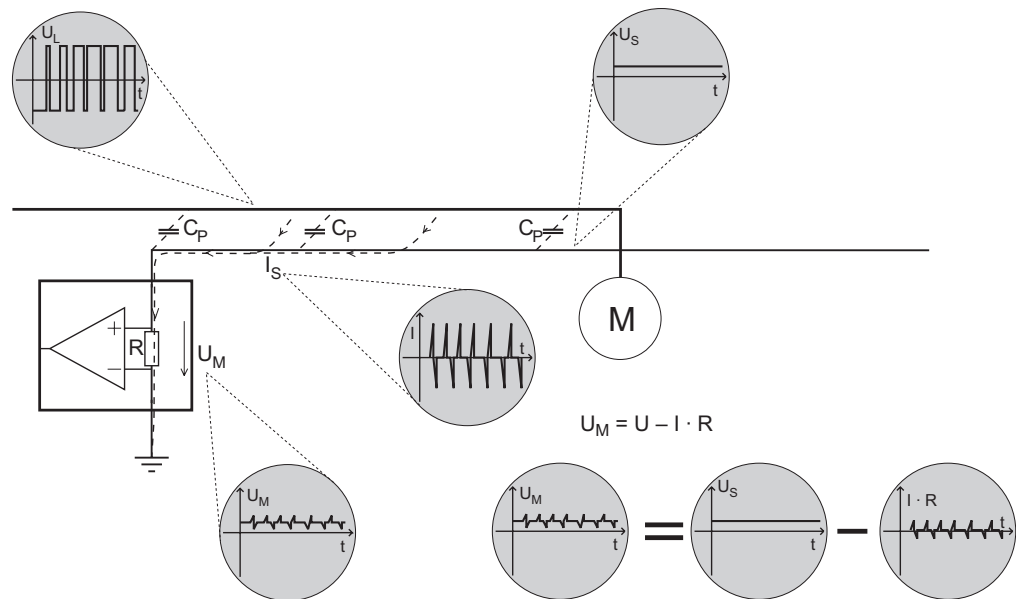
Рис. 29. Оконцовка экрана, заземленная через конденсатор

Чем меньше остаточная площадь петли, тем эффективнее экранирование. Поэтому неэкранированные подключения линий должны быть как можно короче. Также и длина подключений экрана должна быть по возможности короче.



**Емкостное
воздействие**

Спектр частот: ВЧ-диапазон



00699AXX

Рис. 30. Емкостное воздействие между силовой и сигнальной линиями

Две соседние линии обладают паразитной емкостью. Если на одной из линий происходит изменение напряжения, то через паразитную емкость C_P ток помехи I_S течет в соседнюю линию и вызывает на измерительном сопротивлении напряжение помехи. Для тока помехи действует следующая формула:

Ток помехи

$$I_S = C_P \cdot \frac{\Delta U}{\Delta t} \quad [5]$$

I_S = ток помехи
 C_P = паразитная емкость
 ΔU = изменение напряжения на создающей помеху линии
 Δt = длительность изменения напряжения

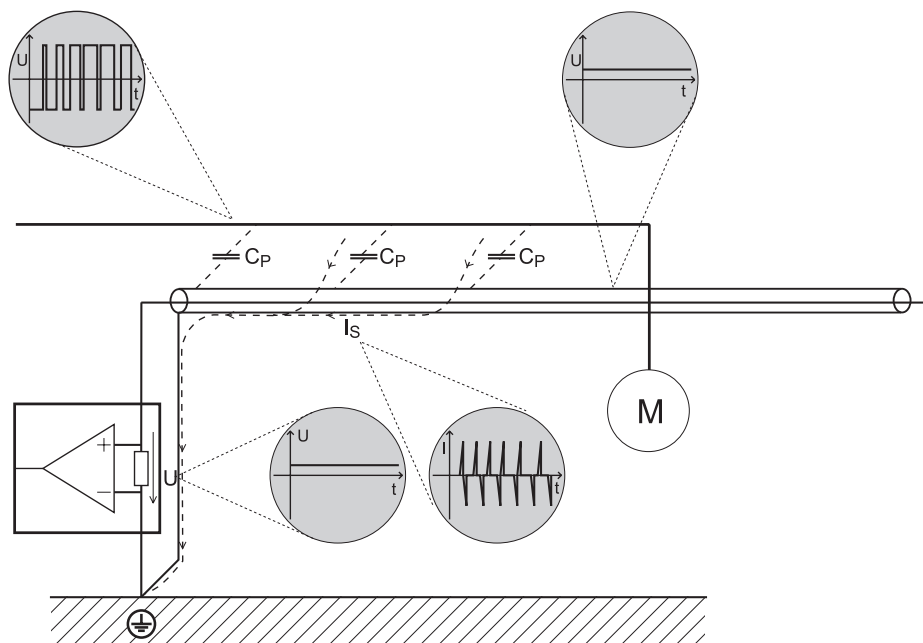
Следующие факторы имеют влияние на ток помехи:

- Входное сопротивление R : чем выше входное сопротивление, тем выше напряжение помехи, вызванное током помехи.
- Расстояние между линиями: чем больше расстояние, тем меньше паразитная емкость и тем самым меньше ток помехи. Паразитная емкость растет с уменьшением расстояния между линиями (это соответствует расстоянию между пластинами конденсатора) и с длиной, на которой провода лежат параллельно (длина, умноженная на диаметр проводника, соответствует площади пластины конденсатора) (формула [2]).
- Амплитуда напряжения помехи: ток помехи растет с увеличением амплитуды напряжения на линии, создающей помеху.
- Крутизна фронта напряжения помехи (скорость изменения): ток помехи увеличивается с увеличением крутизны фронта силового напряжения, создающего помеху.



Меры против
емкостного
воздействия

Экранирование



00700AXX

Рис. 31. Одностороннее заземление экрана

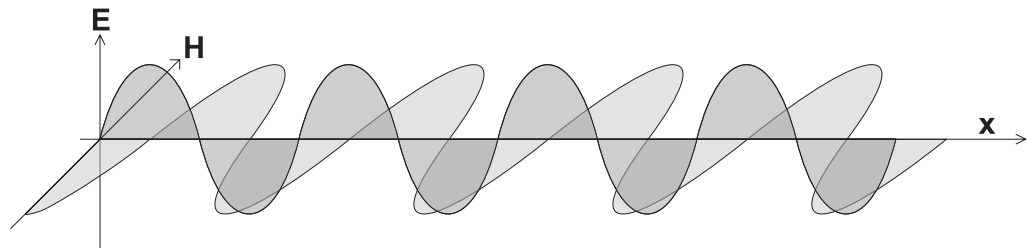
Для экранирования против емкостного воздействия, теоретически, достаточно подключить экран только с одной стороны, так как заземленный экран образует противоположный полюс паразитного конденсатора. Экранированный внутренний провод находится в клетке Фарадея. Ток помехи теперь стекает через экран.

Однако заземленный с одной стороны экран не действует против магнитных полей, поэтому практически всегда рекомендуется двустороннее заземление экрана. Необходимые для возникновения воздействия паразитные конденсаторы становятся низкоомными только при высоких частотах, так что емкостное воздействие встречается только в ВЧ-диапазоне.



Излучение

При излучении помехи в электрической цепи могут передаваться через сигнальную линию (Рис. 1 и Рис. 21). Линии и электрические цепи при этом действуют как приемные и передающие антенны.



00701BXX

Рис. 32. Электромагнитные волны с электрическим полем E , магнитным полем H и направлением распространения x

При высоких частотах сигналы излучаются с возрастанием интенсивности и передвигаются в форме волны (в зависимости от длины линии).

Пример: Частота: $f = 30 \text{ МГц}$ [4]

Длина волны: $\lambda = 10 \text{ м}$

Линия с длиной $\lambda/10 = 1 \text{ м}$ уже излучает и принимает ощутимые составляющие сигнала.

На Рис. 32 показаны магнитная и электрическая составляющие электромагнитной волны. Составляющие прочно связаны между собой, т. е. магнитное ВЧ-поле порождает электрическое ВЧ-поле и наоборот. Энергия волны колеблется между обеими составляющими. Если затухает одна составляющая, то затухает вся волна.

Соотношение обеих составляющих называется волновым сопротивлением Z и зависит от среды распространения и от расстояния до передатчика:

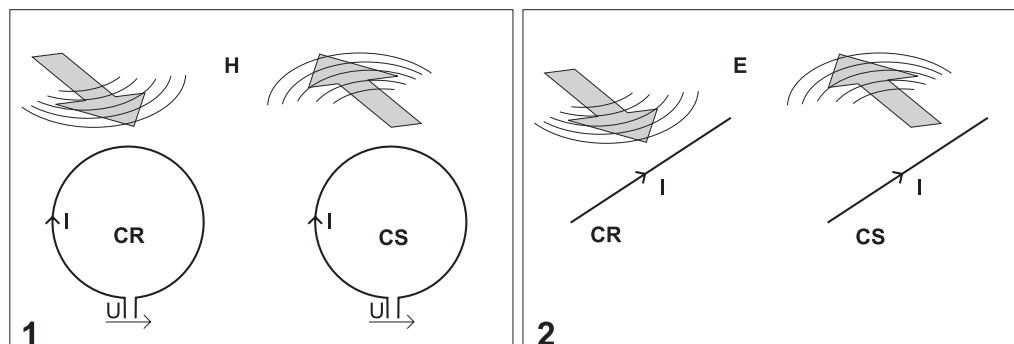
Волновое
сопротивление

$$Z = \frac{E}{H} \quad [6]$$

Z = волновое сопротивление (в воздухе, далеко от передатчика: 377Ω)
 E = напряженность электрического поля
 H = напряженность магнитного поля



По существу имеется две основные формы антенн:



00702BXX

Рис. 33. Магнитный диполь [1] и электрический диполь [2]

H = магнитное поле CR = проводник = приемная антенна
E = электрическое поле CS = проводник = передающая антенна

Магнитный диполь

Каждая петля проводника может действовать как приемная и как передающая антенна. При этом она действует как магнитный диполь, который излучает или принимает магнитное поле. Причиной излучения является ток, который течет по петле проводника. При приеме в петле индуцируется ток. Нижняя предельная частота тем ниже, чем больше площадь петли. Около магнитного диполя магнитное поле является доминирующей составляющей волны. Поэтому меры по подавлению помех около магнитного диполя действуют эффективно, только если они воздействуют на магнитное поле.

Электрический диполь

Каждый проводник может действовать как приемная и как передающая антенна. При этом он действует как электрический диполь, который излучает или принимает электрическое поле. Причиной излучения является падение напряжения, которое возникает вдоль проводника. При приеме в проводнике индуцируется напряжение. Нижняя граничная частота тем ниже, чем длиннее проводник. Около электрического диполя электрическое поле является доминирующей составляющей волны. Поэтому меры по подавлению помех около электрического диполя действуют эффективно, только если они воздействуют на электрическое поле.



Меры против излучения

Экранирование

Самым эффективным средством против электромагнитного излучения является экранирование. В основном экран эффективен потому, что он закорачивает одну составляющую электромагнитной волны. Так как обе составляющие связаны между собой, то тем самым глушится и другая составляющая. С помощью электрического проводящего экрана (обычно медный экран) закорачивается электрическая составляющая поля, а с помощью магнитного проводящего экрана (обычно материалы с высокой магнитной проницаемостью) – магнитная составляющая.

Электрический проводящий экран эффективен везде, где волна содержит существенную электрическую составляющую. Вблизи магнитного диполя его эффективность очень мала, хотя, конечно, она увеличивается с увеличением толщины экрана (магнитное поле компенсируется вихревыми токами, которые образуются в материале). Поэтому тонкие пленки и нанесенные слои металла не годятся для эффективного экранирования. Электрический проводящий экран лучше всего подходит для высокочастотных диапазонов.

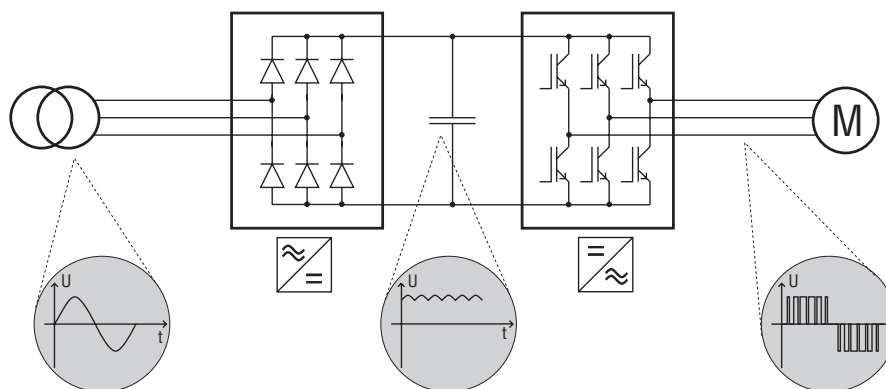
Важным свойством магнитного проводящего экрана является магнитная проницаемость материала. Так как магнитная проницаемость при высоких частотах сильно снижается, то магнитный экран используется преимущественно при низких частотах вблизи от магнитного диполя. Эффект при высоких частотах основывается преимущественно на магнитных потерях в материале экрана, магнитный экран действует на волну как демпфирующее сопротивление. Так как магнитный экран по сравнению с электрическим относительно дорогой, то он применяется только в редких случаях.



2.5 Механизмы помех при использовании преобразователей

При эксплуатации преобразователей с промежуточным звеном постоянного тока возникают некоторые эффекты, которые можно объяснить, только обладая точным знанием принципа действия преобразователей.

Преобразователь образует из синусоидального переменного напряжения сети выходное напряжение, амплитуда и частота которого могут изменяться в широком диапазоне. Для этого напряжение сети выпрямляется до так называемого напряжения промежуточного звена. Из этого напряжения промежуточного звена с помощью инвертора образуется импульсное выходное напряжение. С помощью регулятора ширина импульса выходного напряжения варьируется так, что на индуктивности двигателя устанавливается приближенный к синусоидальному ток (широтно-импульсная модуляция = ШИМ). Коммутация в ключевом режиме выходного напряжения необходима для того, чтобы удерживать малую величину потерь на инверторе и тем самым достичь высокого КПД. На Рис. 34 изображена структурная схема преобразователя с промежуточным звеном постоянного тока.

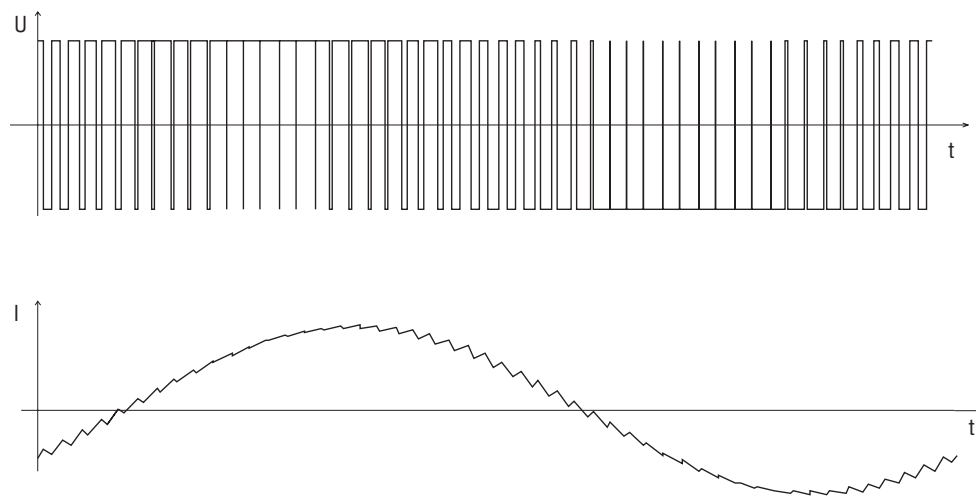


00769AXX

Рис. 34. Структурная схема преобразователя с промежуточным звеном постоянного тока



Тактируемое выходное напряжение и выходной ток изображены на Рис. 35. Крутизна фронта прямоугольного импульса очень большая, могут достигаться значения от нескольких кВ/мкс.

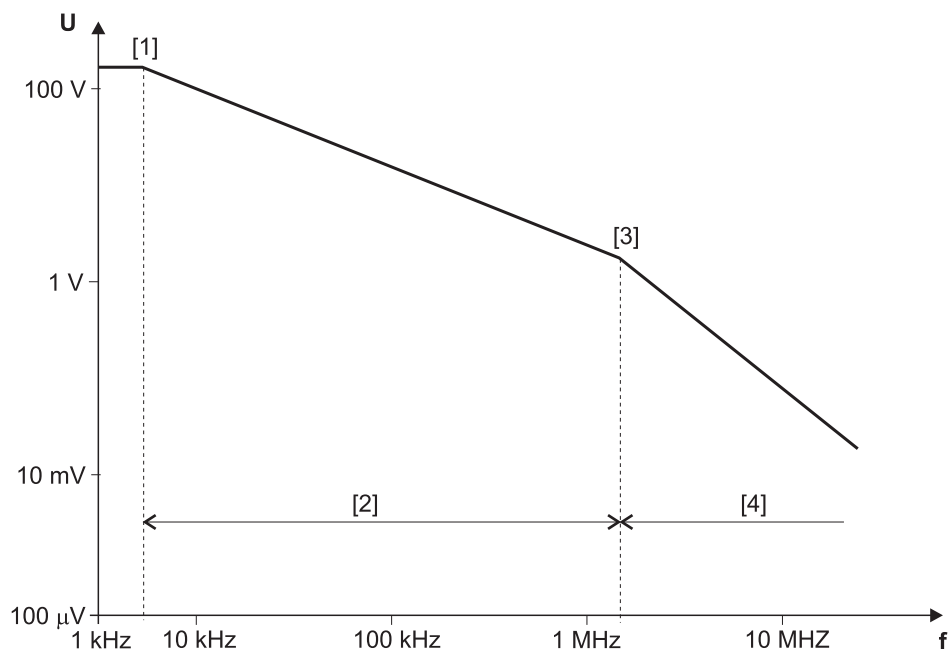


00770AXX

Рис. 35. Выходное напряжение и выходной ток преобразователя



Чем больше напряжение и крутизна фронта сигнала, тем больше высокочастотных составляющих содержит сигнал. Так как при использовании преобразователя частоты обе величины имеют очень большие значения, то соответственно высок уровень помех. На рис. 36 показан типичный спектр частот выходного напряжения.

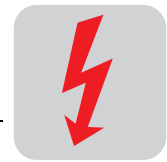


00771BXX

Рис. 36. Огибающая спектра частоты выходного напряжения преобразователя

- [1] = тактовая частота преобразователя
- [2] = спад, пропорциональный $1/f$
- [3] = обратная величина времени нарастания выходного напряжения
- [4] = спад, пропорциональный $1/f^2$

Принцип действия преобразователя вызывает некоторые типичные механизмы помех, которые далее будут рассмотрены более подробно.

**Излучение**

Выходное напряжение преобразователя частоты содержит высокочастотные составляющие, обусловленные функцией назначения. В зависимости от скорости переключения силового полупроводникового прибора в инверторе (обычно IGBT-модули) составляющие напряжения не позволяют пренебречь гармониками вплоть до диапазона частоты в 100 МГц. Итак, уже при коротких длинах линий происходит заметное излучение.

Это может привести к тому, что будут превышены существующие для этой сферы применения предельные значения излучения и помехи смогут оказывать воздействие на соседние линии. Против этого действуют следующие меры:

Экранирование

При правильном экранировании излучение может быть снижено. Экран при этом должен быть подключен с обоих концов. При длинных линиях действие экрана может быть улучшено путем многократного подключения экрана по всей длине. Также заглушает излучение прокладка стального бронированного кабеля в металлической трубке или в металлическом кабельном канале, хотя, конечно, она не так эффективна, как медный экран.

Ферритовые сердечники

Ферритовые сердечники действуют при высоких частотах как последовательное подключение индуктивности и сопротивления. Вместе с емкостью линии ферритовый сердечник образует фильтр низких частот, с помощью которого уменьшаются фронты импульса выходного напряжения. При правильном расчете параметров можно уложиться в существующие нормы по предельным значениям излучения. Также вследствие этого значительно уменьшается возможность излучения помехи выходной линии.

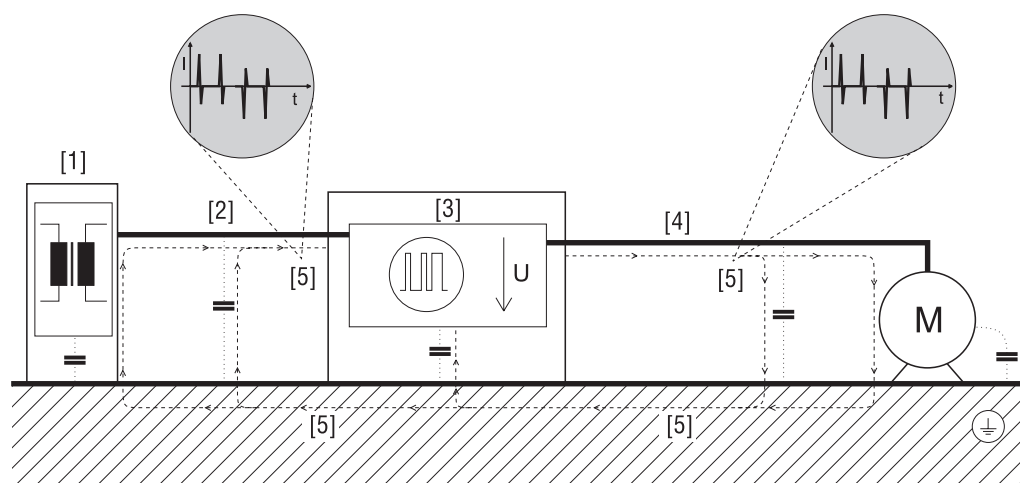
Тот же самый эффект имеет режекторный фильтр; там уже встроены маленькие конденсаторы.

Выходной фильтр (синусоидальный фильтр)

Фильтр генерирует из тактированного выходного напряжения выходное напряжение, приближающееся к синусоидальному. При правильной установке фильтра очень сильно уменьшается уровень помех на линии и, тем самым, излучение.



Ток утечки



00772BXX

Рис. 37. Преобразователь с выходными линиями и двигателем

- | | |
|-----------------------------|------------------------|
| [1] = сетевой трансформатор | [4] = кабель двигателя |
| [2] = сетевой кабель | [5] = ток утечки |
| [3] = преобразователь | |

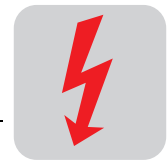
Каждый кабель обладает паразитной емкостью. Через эту емкость на землю стекают высокочастотные токи, вызванные импульсами напряжения с частотой ШИМ, так называемые токи утечки. Эти токи представляют собой короткие остроконечные импульсы.

В установке с недостаточным, не соответствующим высоким частотам уравниванием потенциалов эти пики тока утечки могут вызвать скачки потенциала, которые приведут к помехам. Кроме того, токи утечки порождают высокочастотные магнитные поля, которые могут индуцировать в петлях проводников напряжения помехи.

Паразитная емкость линии значительно увеличивается при экранировании (типичный коэффициент 2–3). Поэтому в неблагоприятных случаях экранирование выходных линий может привести к возникновению помех, так как при повышении паразитной емкости токи утечки возрастают и их высокочастотная составляющая увеличивается. В таких случаях для подавления помех следует применять выходные фильтры или ферритовые сердечники вместо экранированных линий.

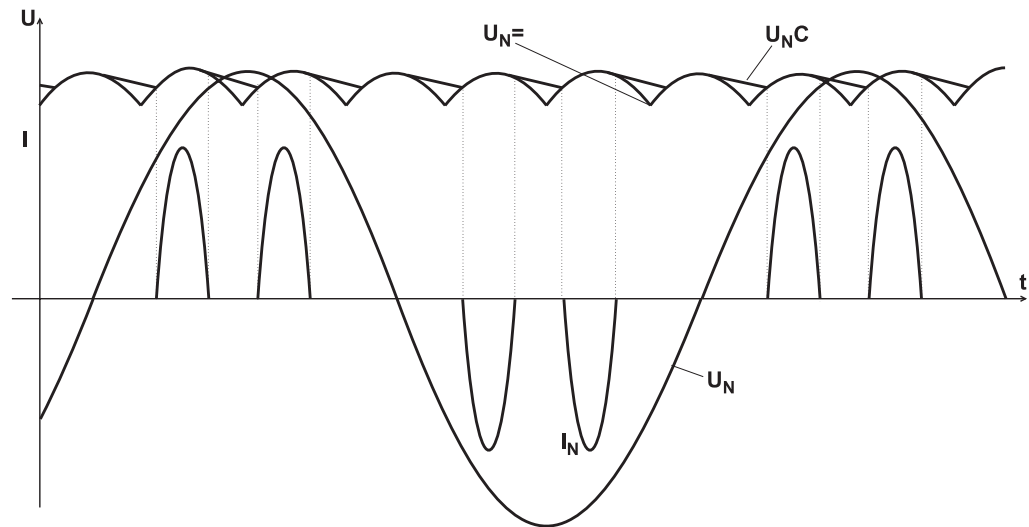
Важнейшим средством подавления помех против действия высокочастотных токов утечки является соответствующая высокочастотным требованиям схема заземления в электрошкафу и установке.

При использовании преобразователей ток утечки обычно выше 3,5 мА. Это предъявляет особые требования к заземлению.



Гармоники тока сети

На Рис. 34 показана структурная схема преобразователя. На сетевом входе работает выпрямитель с конденсатором промежуточного контура для буферизации энергии. Такое расположение позволяет ему подзаряжаться от сети только тогда, когда мгновенное значение напряжения сети выше мгновенного значения напряжения промежуточного звена (Рис. 38).



00773BXX

Рис. 38. Напряжения и токи в преобразователе

I_N = ток сети
 U_N = напряжение сети фаза – фаза
 U_{NC} = выпрямленное напряжение сети
 U_{NC} = напряжение на конденсаторе промежуточного контура

Ток сети не синусоидальный и содержит высокочастотную гармонику, которая приводит к искажению напряжения сети. Вследствие этого увеличиваются потери и происходит ограничение функций оборудования. Кроме того, сетевые гармоники являются причиной более высокого, по сравнению с выходным током, тока, потребляемого из сети. В таблице 4 приведены данные о доле гармоник в токе сети различных преобразователей частоты при полной нагрузке.

Табл. 4. Доля сетевых гармоник относительно основной волны при использовании различных преобразователей на 3 кВт

Гармоника	Обычный прибор	Обычный прибор с сетевым дросселем	Современный прибор с "коротким" промежуточным звеном (например MOVITRAC® 31)
5-я	86 %	42 %	25 %
7-я	72 %	17 %	13 %
11-я	42 %	8 %	9 %
Выходной ток	7,3 А	7,3 А	7,3 А
Ток сети	9,4 А	6,9 А	6,7 А



Значения для современного преобразователя с "коротким" промежуточным звеном близки к теоретическим значениям, которых можно добиться с помощью выпрямления сети; также с помощью сетевого дросселя здесь нельзя добиться большего улучшения.

Лучших значений можно добиться только при применении разделительного трансформатора или с помощью очень дорогой входной схемы с синусоидальным отбором тока.

Содержание высших гармоник может быть уменьшено с помощью компенсирующего устройства. Для предотвращения опасности сетевого резонанса изготовители компенсирующих устройств рекомендуют применять компенсирующие устройства с дросселем, если мощность подключенных преобразователей превышает 20 – 25 % от общей потребляемой мощности.



3 Проектирование с учетом ЭМС

Требующаяся сегодня СЕ-сертификация электрических приборов и машин основывается на различных директивах ЕС. Они разделяются по видам продукции:

- Директива по низкому напряжению 73/23/ЕЕС (касается электрической безопасности)
 - По существу относится к любому электрооборудованию.
- Директива по электрическим машинам 89/392/ЕЕС (касается мер безопасности по профилактике производственного травматизма)
 - Относится ко всем машинам и установкам с подвижными деталями.
- Директива по электромагнитной совместимости 89/336/ЕЕС
 - Относится ко всем электрическим приборам, но не к компонентам, которые поставляются отдельно.

Декларация о соответствии для СЕ-сертификации комплектующих¹ должна также включать в себя, но не в обязательном порядке, директиву по электромагнитной совместимости. Это, как правило, не всегда возможно, так как гарантия эксплуатации с обеспечением ЭМС требует не только подходящих компонентов, но и их профессионального монтажа и подключения.

Насколько важно проектирование с учетом ЭМС для машин и установок, показывают следующие примеры из практики:

- экономически выгодное производство промышленного оборудования, не требуется проводить дополнительных дорогостоящих мер по обеспечению ЭМС
- быстрый ввод в эксплуатацию, так как не требуется выискивать возможные источники помех
- безопасная эксплуатация, так как отсутствуют помехи при работе машин и установок
- высокий срок службы электрических деталей оборудования, так как обеспечивается защита от опасных воздействий ЭМС

При планировании ЭМС следует учитывать условия на месте размещения оборудования. Тем самым затраты на обеспечение ЭМС ограничиваются до необходимых размеров. Поэтому заказчик или конечный пользователь установки должны предоставить информацию, которая позволит проектировщику установки обеспечить требуемые меры по ЭМС в соответствии с условиями на объекте, где будет эксплуатироваться данное оборудование. Также он должен предоставить проектировщику информацию о существующих параметрах и о качестве сети, так как эта информация тоже имеет значение при планировании ЭМС.

1. В новом стандарте продукции по ЭМС (проект 11.95) для электрических приводов говорится о так называемой ограниченной возможности получения, то есть она подразумевает торговый путь, при котором запуск в обращение ограничен продавцами, клиентами или пользователями, которые обладают компетентными знаниями в ЭМС.



3.1 Влияние места размещения установки

Стандарты по ЭМС определяют для различных "сред" различные требования по ЭМС в виде предельных значений. Под средой понимаются типичные ситуации размещения оборудования с точки зрения ЭМС. При этом выдвигаются следующие обязательные требования к электрооборудованию:

Табл. 5. Требования к внешним условиям

Внешние условия	Помехозащищенность	Излучение помех	Пояснение
Бытовые и коммерческие условия = "первая среда" согласно стандарту ЭМС	Относительно низкие требования по защите от электромагнитных помех	Высокие требования, т. е. оборудование должно наилучшим образом подавлять помехи (предельное значение кл. В)	Этот раздел касается главным образом радиоустройств, устройств телевизионного приема и телекоммуникационных устройств, а также устройств обработки данных. Они должны быть защищены от недопустимых электромагнитных помех, т. е. электрооборудование должно иметь высокий уровень подавления излучаемых помех.
Промышленные условия = "вторая среда" согласно стандарту ЭМС	Высокие требования по защите от электромагнитных помех	Относительно низкие требования, т. е. оборудование должно иметь только основные устройства подавления помех (предельное значение кл. А)	Место размещения само имеет высокую электромагнитную нагрузку. Опыт показывает, что электрический прибор с низкими требованиями по защите от электромагнитных помех очень трудно оборудовать для высоких электромагнитных нагрузок с помощью дополнительных мер. Необходимая помехозащищенность должна быть достигнута уже при конструировании электрического прибора.
Промышленные условия Установки, которые собираются на месте эксплуатации (смотри закон по ЭМС § 5 абз. 5)	Высокие требования по защите от электромагнитных помех	Нет предписаний	Нет предельных значений, однако должны соблюдаться меры защиты. Есть предположение, что защитные меры по ЭМС обеспечиваются при профессиональном монтаже и при соблюдении указаний изготовителя. Иногда может случиться, что в спорных ситуациях требуется дооснастка фильтрующими приспособлениями, если приборы, находящиеся вне границ установки, попадают под воздействие помех.

Различные требования к различным внешним условиям требуют мер, обусловленных местом размещения. Изготовители и поставщики электрических компонентов должны приспособлять характеристики продукции под действующие внешние условия. Этого можно достигнуть, если электрические компоненты обладают минимальными характеристиками в соответствии со "второй средой" (промышленные условия), т. е. обладают высокой помехозащищенностью, однако сами оснащены только основными средствами подавления помех. Для применения в "первой среде" (бытовые и коммерческие условия) можно добавочно уменьшить излучение помех с помощью избирательных мер по установке дополнительного оборудования (сетевой фильтр, модуль подавления электромагнитных помех, экранированные провода).



Проектирование с учетом ЭМС на примере преобразователя частоты MOVITRAC® 31C:

Требования к помехозащищенности		
Область применения	Меры	Стандарт
Приборы, предназначенные только для подключения к общественной низковольтной сети в бытовых условиях.	Не требуется дополнительных компонентов/приборов. Соблюдать указания по монтажу и подключению электроустановок.	EN 50 082-1
Приборы, предназначенные для применения в промышленных условиях.	Не требуется дополнительных компонентов/приборов. Соблюдать указания по монтажу и подключению электроустановок.	EN 50 082-2

Требования к излучению помех		
Область применения	Меры	Стандарт
Приборы, подключенные к общественной низковольтной сети, которые снабжают энергией бытовые приборы.	Модуль подавления электромагнитных помех EF... или сетевой фильтр NF... + выходной дроссель HD... или сетевой фильтр NF... + выходной фильтр HF... или вместо выходного фильтра HF... экранирование кабеля двигателя.	EN 50 081-1
Установки, которые подключены к промышленной низковольтной сети и собираются на месте эксплуатации.	Не требуется дополнительных компонентов/приборов. Соблюдать указания по монтажу и подключению электроустановок.	Закон по ЭМС
Приборы, подключенные к промышленной низковольтной сети или к общественным сетям, которые не снабжают энергией бытовые приборы и не собираются на месте эксплуатации.	Модуль подавления электромагнитных помех EF... или сетевой фильтр NF... + выходной дроссель HD... или сетевой фильтр NF... + выходной фильтр HF... или вместо выходного фильтра HF... экранирование кабеля двигателя.	EN 50 081-2



3.2 Качество сети

На качество сети влияют следующие помехи:

Табл. 6. Критерии качества сети

Тип	Причины
Колебания напряжения	Сетевые трансформаторы без резерва мощности. Длинные питающие кабели (частично со слишком малым сечением провода), на которых возникают сильно меняющиеся нагрузки. Агрегат аварийного питания.
Колебания частоты	Возникают только в "изолированных сетях", т. е. в сетях без подсоединения к общественной распределительной сети. Нагрузка генератора вызывает падение частоты вращения = просадка частоты.
Просадка напряжения / фликер	Участки сети, на которых подключаются потребители с очень высокими токами включения или пусковыми токами, частично в комбинации с длинными питающими кабелями. Сетевые трансформаторы без резерва мощности.
Переходные повышенные напряжения	Возникают при подключении индуктивных потребителей (например контактная сварка). Ненастроенные/неисправные компенсирующие устройства (разрядные сопротивления конденсаторов). Атмосферное перенапряжение (удар молнии).
Гармоническая составляющая (гармоника) напряжения сети	Потребитель с несинусоидальным потребляемым током: приборы с выпрямительными схемами и конденсаторной нагрузкой, например: приборы, которые работают с фазовой отсечкой (выпрямитель тока для электропривода постоянного тока, приборы плавного пуска, преобразователь-регулятор напряжения трехфазного тока, регулятор освещения, однофазный преобразователь-регулятор напряжения переменного тока). Преобразователи / приборы с импульсными блоками питания (ПК, телевизоры...). Они вызывают при искажении тока на полных сопротивлениях сети гармонические колебания напряжения сети (гармонику). Ее частота составляет целочисленное кратное частоте сети. Важными составляющими обычно являются все нечетные гармоники до приблизительно 15-й. Гармоники нагружают сетевые кабели, предохранители и трансформаторы. Они могут вызвать сетевой резонанс и привести к нарушению функционирования других потребителей.

Указания по проектированию

Колебания напряжения и частоты можно уменьшить до допустимых пределов с помощью согласования мощности сети с фактическим потреблением, т. е. с помощью большего трансформатора питания; при необходимости вместе с тщательно рассчитанными питающими кабелями.

Просадку напряжения при ее возникновении предотвратить невозможно, но можно ограничить ее воздействие. Потребителей с очень высокими токами включения или пусковыми токами можно разъединить (отдельный питающий кабель или отдельный трансформатор питания).

Переходные повышенные напряжения при их появлении тоже нельзя предотвратить. Им можно противопоставить установку защиты от перенапряжений в питающей сети. Защитные устройства такого типа состоят из варисторов и газоразрядников, иногда в сочетании друг с другом. Они устанавливаются на стороне низкого напряжения перед защищаемым электрическим компонентом. Собственные предохранители с сигнальным контактом обеспечивают немедленное распознавание случившейся неполадки.



Гармонические колебания сети (сетевые гармоники) могут быть при их возникновении ограничены или снижены. Приборы с высоким искажением тока сети включаются через сетевые дроссели. Они "выравнивают" входной ток, приближают его к синусоидальному и этим снижают гармонические колебания. Кроме того, сетевые дроссели обладают из-за своего полного сопротивления разъединяющим воздействием и улучшают защиту приборов от перенапряжений ограничением скорости нарастания тока.

На сегодняшний день доступны приборы, с помощью которых можно легко определить выборочную и суммарную составляющую гармонических колебаний подключенных к сети потребителей.

При их использовании можно планировать направленные контрмеры:

- Включение потребителей через сетевые дроссели с высоким противодействием гармоническим колебаниям ($u_K \geq 4\%$)
- Оборудование компенсирующих устройств дросселями (согласовать с производителем компенсирующего устройства)
- Установка схемы поглощающего контура в низковольтную сеть (короткое замыкание для гармоник)

3.3 Проектирование электрошкафа

Электрошкаф из листового металла – очень хорошее решение с точки зрения ЭМС, так как листовая сталь, в отличие от остальных употребляемых материалов (высококачественная сталь, алюминий, пластмасса), обладает свойствами магнитного экранирования. Электрошкафы из пластмассы не подходят с точки зрения ЭМС, кроме того, они плохо отводят возникающие внутри потери мощности через свою поверхность.

На монтажную панель электрошкафа следует обратить особое внимание. Она служит не только как крепление для встроенных компонентов, но и как заземление с достаточным поверхностным контактом для встроенных устройств с металлическими корпусами. Лучше всего для этого подходят оцинкованные стальные плиты.

Не подходят:

- Лакированные монтажные панели: лак на местах установки следует тщательно удалить, после чего больше не будет обеспечиваться антикоррозионная защита.
- Монтажные панели из чистого алюминия: чистый алюминий покрывается оксидной пленкой с очень высоким сопротивлением.
- Монтажные панели из анодированного алюминия: нанесенный слой обладает очень высоким сопротивлением и плохо удаляется.

Монтажная панель должна иметь достаточный поверхностный контакт с электрошкафом. А он, в свою очередь, – хороший проводящий контакт с машиной.

Шина защитного заземления в электрошкафу является центральной точкой подключения заземляющих проводов каждого отдельного устройства (заземление при схеме соединения звездой). Подключение защитного заземления не заменяет низкочастотного заземления и экранирования, оно предписано из соображений техники безопасности для защитного заземления.



Расположение устройств в электрошкафу

- Элементы ЭМС (сетевой фильтр / выходной фильтр / фильтр ЭМС для входа и выхода) должны быть расположены настолько близко к соответствующему устройству, чтобы провода между элементами ЭМС и устройством были короткими (макс. расстояние: 50 см). Следует учитывать необходимое пространство для вентиляции.
- Устройства с интенсивным обменом сигналов располагать рядом друг с другом, чтобы избегать длинных сигнальных кабелей. Чем короче соединение, тем меньше искажение сигнала.
- Реле связи следует устанавливать вблизи сигнального входа. Он обладает высоким полным сопротивлением, следовательно, более чувствителен к помехам, чем сигнальный выход.
- Разделение проводов с высоким потенциалом помех от сигнальных проводов малого напряжения прокладыванием в отдельных кабельных каналах. В большинстве случаев достаточно расстояния в 20 см. Провода с высоким потенциалом помех – это, например, неэкранированные провода на выходе преобразователя и на выходе тормозного ключа управляющие линии контактора, провода от электромагнитных клапанов и электромагнитных тормозов.
- Экранированные провода провести не через клеммы электрошкафа, а непосредственно на устройство. Экранирующую оплетку этих проводов следует заземлить прямо на корпус устройства или под устройством на монтажной плате электрошкафа с помощью металлической кабельной скобки. Удлинение экрана с помощью припаивания проводов недопустимо.
- Дополнительное указание (не касается ЭМС): не следует располагать теплочувствительные устройства в верхней части электрошкафа. В электрошкафу высотой 200 см, при неблагоприятных условиях вентиляции, перепад температур по высоте может составлять > 30 K.

Целесообразно разделение компонентов по виду обрабатываемых сигналов. Здесь приведено разделение на 4 группы:

Группа I (очень чувствительные)

- Аналоговые датчики (с разрешением в мВ-диапазоне)
- Измерительные линии (зонды, измерительные приборы и т. п.)
- Емкостные датчики присутствия

Группа II (чувствительные)

- Низковольтные линии (сетевые шины и т. п.)
- Низковольтные цепи управления (двоичные входы и выходы и т. п.)
- Низковольтное питание (10 В, 24 В и т. п.)

Группа III (источники помех)

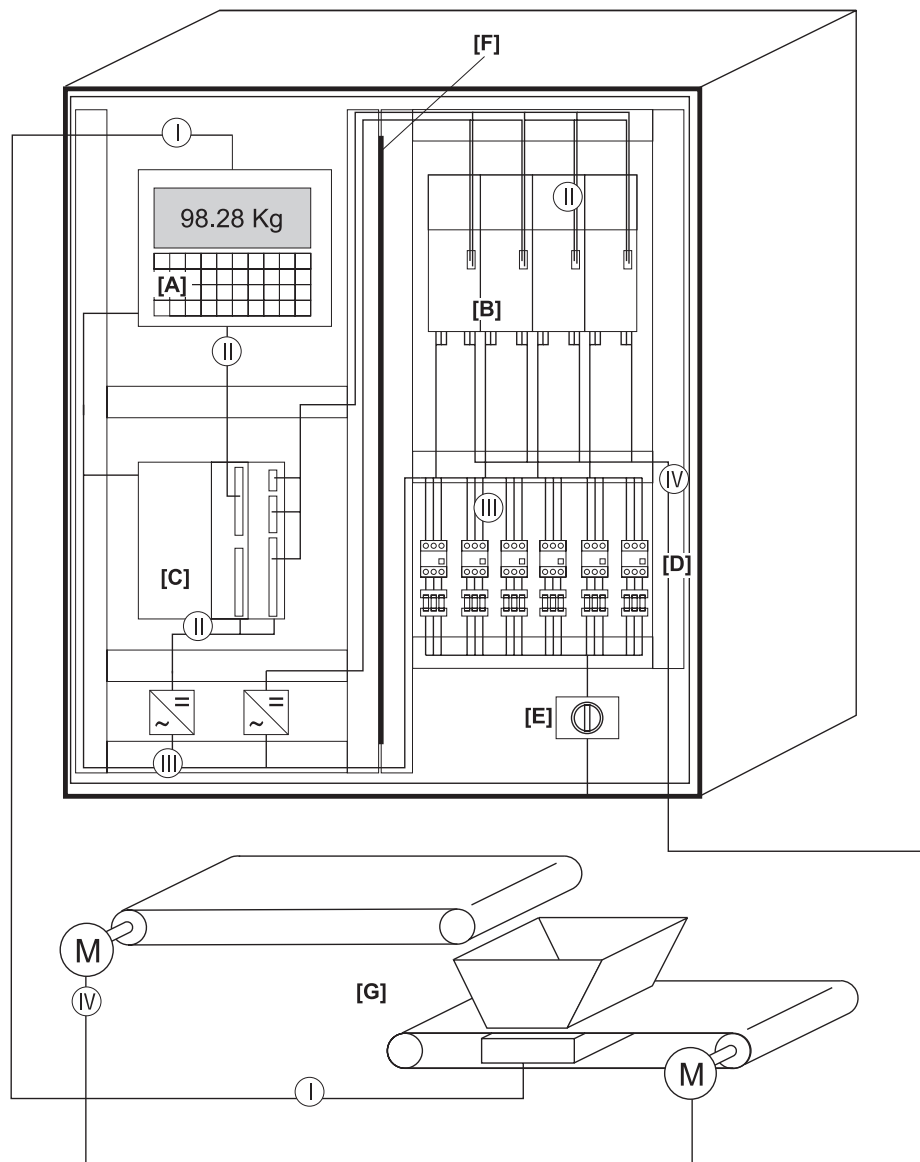
- Линии управляющих сигналов для индуктивной нагрузки (тормоза, контакторы, реле и т. п.)
- Защищенные от помех силовые кабели (например фильтрованные выходные линии преобразователя)
- Сетевые кабели (не подключенные)

Группа IV (мощные источники помех)

- Подводящие линии к сварочным аппаратам
- Силовые цепи
- Подключенные силовые кабели (преобразователь, электронный регулятор частоты вращения и т. п.)



Устройства различных групп должны устанавливаться в различных секциях электрошкафа. Устройства I и II групп и устройства III и IV групп следует размещать в отдельных электрошкафах. Если это невозможно, то секции нужно разделить с помощью заземленной по контуру металлической перегородки.



00778BXX

Рис. 39. Пример прокладки проводов в электрошкафу

I, II, III, IV = провода групп I-IV
 [A] = устройство обработки результатов
 [B] = приводная электроника
 [C] = блок управления

[D] = контакторы и предохранители
 [E] = главный выключатель
 [F] = металлическая перегородка
 [G] = датчик с первичной обработкой сигнала
 [M] = электродвигатели



3.4 Подбор компонентов

Выбор компонентов определяет достижимую помехозащищенность установки. Существенным критерием при выборе является место размещения установки. Компоненты должны соответствовать действительным минимальным требованиям или соответствующему стандарту продукции.

При установке компонентов следует соблюдать указания по монтажу относительно ЭМС, полученные от производителя. Они, в основном, касаются вида проводов, который следует применять (экранированный/неэкранированный, скрученный попарно и т. п.), заземления устройства, а также возможно необходимых фильтров.

При проектировании также необходимо учитывать следующие компоненты:

- Освещение (люминесцентные лампы, например, имеют высокий потенциал помех)
- Контактные реле вблизи от устройств I и II группы должны быть защищены от помех
- Детали, которые служат для уравнивания потенциалов, должны быть соединены в соответствии с высокочастотными требованиями
- Блоки питания (например, незащищенные от помех импульсные блоки питания, имеют очень высокий потенциал помех)

Категории проводов

Выбранные провода должны удовлетворять основным требованиям, обусловленным условиями эксплуатации (сечение, электрическая прочность, условия окружающей среды и т. п.). Исполнение (с экранированием или без, скручивание) должно соответствовать таблице, приведенной в гл. 4.2.1.

Если экранированные провода прокладываются на большие расстояния, то экранирующее действие может быть усилено путем заземления с большим поверхностным контактом экрана кабельными скобами через обычные промежутки. Действие экрана уменьшается пропорционально длине. Следует избегать общего кабеля для проводов различных групп, так как из-за малого расстояния между проводами их взаимное воздействие слишком велико.

Передача сигналов

Следующим важным пунктом при проектировании установки является передача сигналов. Это относится как к силовым, так и к измерительным проводам. В таблице в гл. 4.4 приведен обзор общепринятых способов передачи.

Малые измерительные сигналы должны усиливаться и первично обрабатываться непосредственно на датчике и только потом передаваться на обработку. Слабые аналоговые сигналы не должны передаваться на большие расстояния. Защита таких сигналов от воздействия помех требует больших затрат.

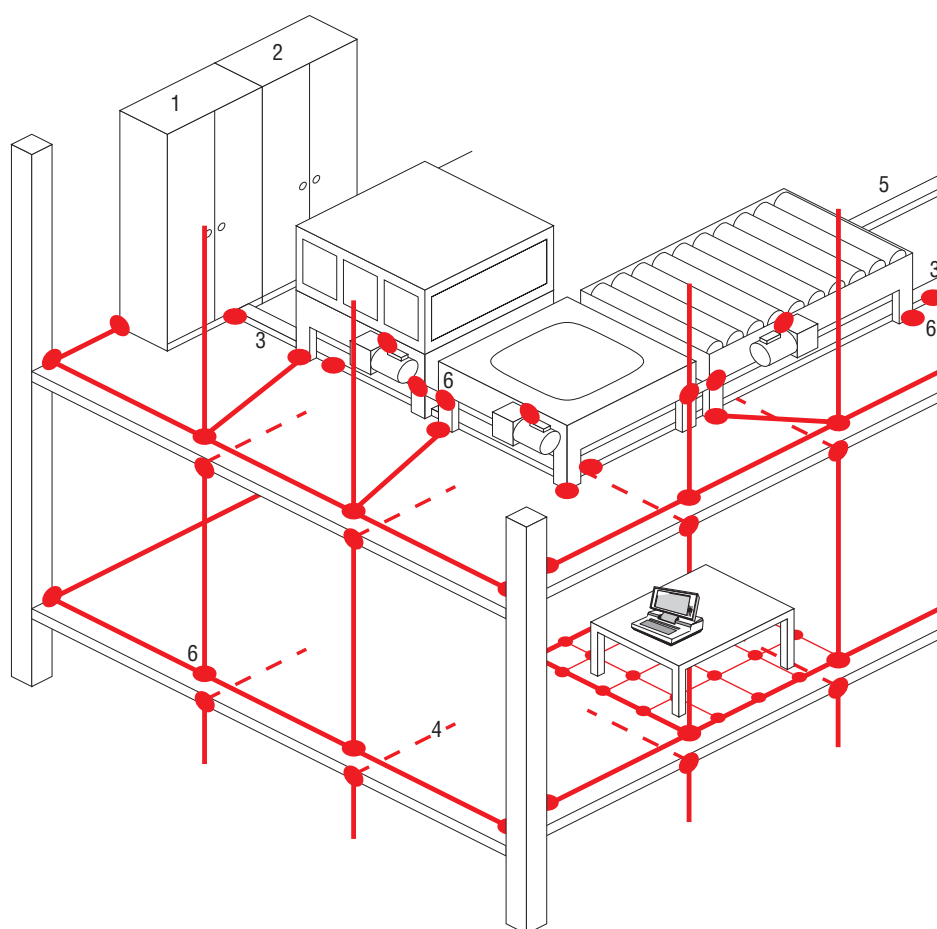
Несимметричная передача сигналов с ненулевым потенциалом (например, RS-232) годится в промышленных условиях только для диагностики и технического обслуживания, а также для связи на малых расстояниях. Ее нельзя использовать для управления на больших расстояниях.



4 Меры по обеспечению электромагнитной совместимости

4.1 Заземление

Заземление играет особенно важную роль для бесперебойного функционирования установки. Очень важно, чтобы компоненты установки, как в низкочастотном, так и в высокочастотном диапазоне, имели одно и то же заземление. Поэтому еще при проектировании установки следует учитывать высокочастотное заземление. Все компоненты установки должны быть заземлены с низким электрическим сопротивлением (как для низких частот (НЧ), так и для высоких частот (ВЧ)). Поэтому в установке должна существовать сеть заземления, которая предоставляла бы и для высоких частот единый общий вывод. На Рис. 40 показан пример такой сети заземления.



00711BXX

Рис. 40. Сеть заземления установки в здании

- | | |
|---------------------------------------|-------------------------------------|
| 1 Силовая часть электрошкафа | 4 Сварная железная арматура |
| 2 Электрошкаф низких напряжений | 5 Кабельный канал низких напряжений |
| 3 Кабельный канал силовых компонентов | 6 Соединение с землей |



Для большинства видов помех защитный провод обладает очень высоким высокочастотным полным сопротивлением. Заземляющие провода эффективны только тогда, когда они объединены в сеть.

На Рис. 41 показано полное сопротивление медного провода в зависимости от частоты. При высоких частотах провод, независимо от сечения, обладает высоким полным сопротивлением. Следовательно, он не подходит и для высокочастотного заземления экрана.

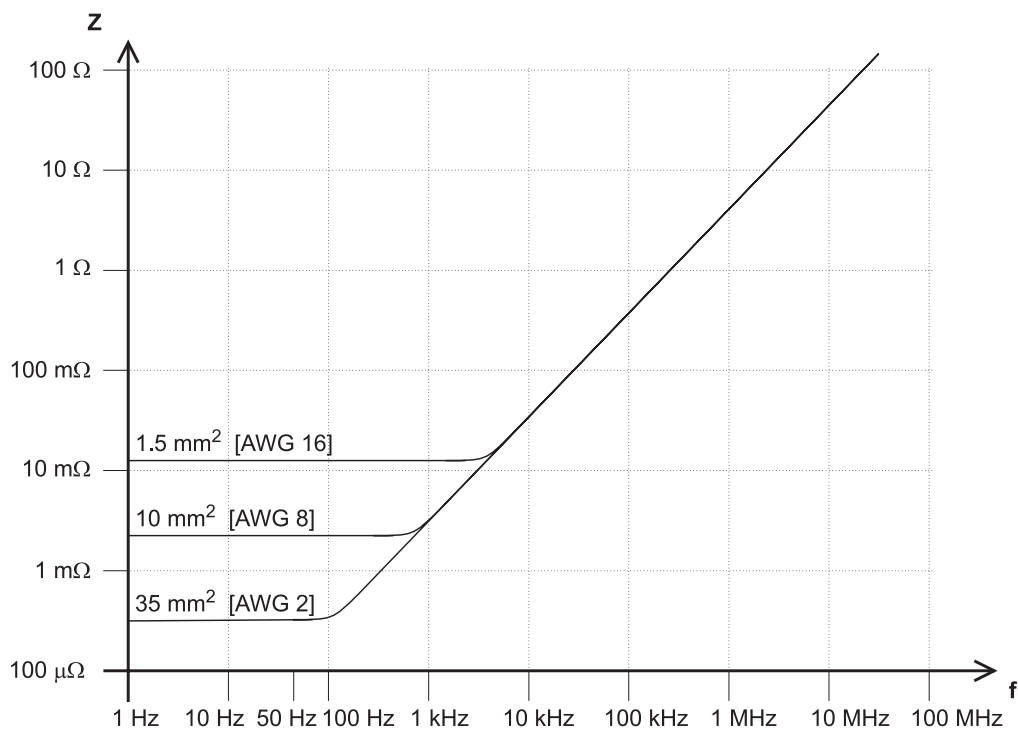
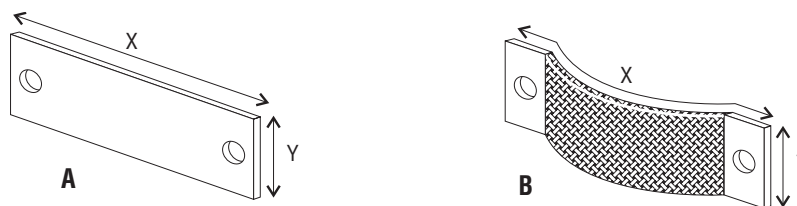


Рис. 41. Полное сопротивление Z медного проводника длиной в 1 м в зависимости от частоты f 00281AXX

Следует убедиться, что повсюду в установке как для НЧ, так и для ВЧ имеется одинаковое заземление. Очень важно, чтобы компоненты были подключены к этой сети с низким электрическим сопротивлением.



00727AXX

Рис. 42. Соединения с землей: А – листовый металл / В – литцендрат

Рис. 42 показывает соединения с землей, которые и для высоких частот обеспечивают соединение с низким электрическим сопротивлением.

Есть различные возможности обеспечить низкоомное заземление:

- соединение с широким поверхностным контактом ($1:3 < X:Y < 3:1$, смотри Рис. 42), которое с двух концов имеет достаточный поверхностный контакт с общим выводом
- соединение из большого количества отдельных, изолированных друг от друга проводов (заземляющая литца)
- экранированный провод: экран является для НЧ очень низкоомным соединением

Все эти варианты имеют малую индуктивность и, следовательно, обладают малым высокочастотным сопротивлением.



Важное влияние на добротность соединения с землей имеет качество контактов. Эффект лучших заземляющих проводов может быть сведен на нет при ненадлежащем или нерациональном подсоединении контактов. На Рис. 43 показано, на что следует обратить внимание при подсоединении контактов.

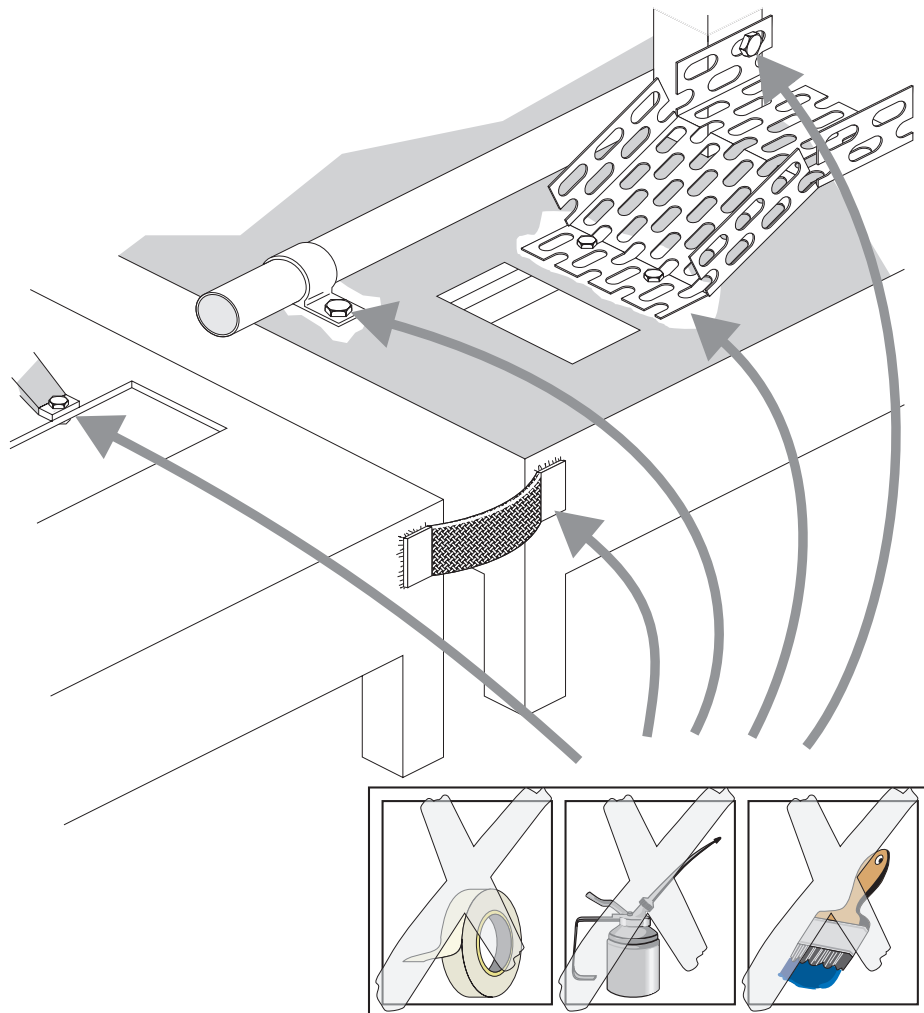


Рис. 43. Подсоединение контактов заземляющих проводов

00729AXX



На Рис. 44 показано, на что следует обратить внимание при соединении кабельных каналов:

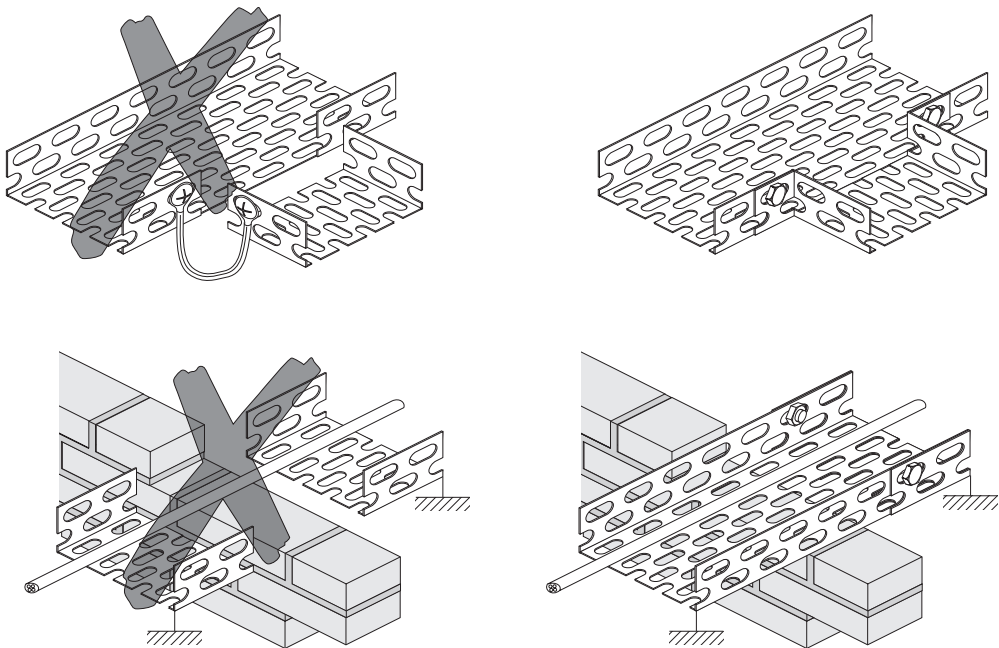


Рис. 44. Соединение кабельных каналов

00730AXX

4.2 Кабельное соединение

Группы проводов и выбор провода

Кабельное соединение имеет большое значение для обеспечения ЭМС установки. Для последующего рассмотрения провода поделены на четыре различные группы:

Табл. 7. Разделение проводов по группам

Группа проводов	Источник помех	Чувствительность	Пример
I (очень чувствительные)	–	++	Низковольтные линии аналоговых сигналов Измерительные линии (зонды, приемники и т. д.)
II (чувствительные)	0	+	Низковольтные линии цифровых сигналов (например шинный кабель) Линии с коммутируемыми низковольтными сигналами (двоичные переключатели 24 В и т. д.) Низковольтное питание (10 В, 24 В и т. д.)
III (Источники помех)	+	0	Линии системы управления для индуктивных нагрузок (защищены от помех) Защищенные от помех силовые линии (контакты, тормоза и т. д.) Сетевые кабели (не подключенные)
IV (мощные источники помех)	++	–	Подводящие линии сварочных аппаратов Силовые цепи Электронный регулятор частоты вращения Выходные линии преобразователей

соответствует ----- не соответствует				
++	+	0	–	--



Для приведенных в таблице групп проводов рекомендуются следующие типы проводов:

Табл. 8. Распределение типов проводов по группам

Группа проводов	Характеристика	Отдельная жила	Скрученная пара жил	Скрученная пара жил, армированная	Экранирование (оплетка)	Экранирование (оплетка и пленка)
I	Очень чувствительные	—	0	+	++	++
II	Чувствительные	0	+	+	++ ¹⁾	++ ¹⁾
III	Источник помех	0	+	+	++ ¹⁾	++ ¹⁾
IV	Мощный источник помех	--	—	0	+	++

1) дорогие, обычно не требуются

хорошо ----- плохо
++ + 0 - --

Пригодность типов проводов с точки зрения ЭМС:

Табл. 9. Пригодность типов проводов с точки зрения ЭМС

Провод	0 – 50 Гц	ВЧ < 5 МГц	ВЧ > 5 МГц	Подавление синфазной составляющей	Подавление противофазной составляющей	Подходит для	Область применения
Отдельная жила	0	— ¹⁾	--	--	--		только до 60 Гц
Параллельная пара жил	0	—	--				только до 60 Гц
Скрученная пара жил	+	+ до 100 кГц	0	--	+	слабый источник помех	промышленные условия с малым количеством помех
Скрученная пара жил, армированная	+	+	0	+	++	слабый источник помех	промышленные условия с малым количеством помех, сигналы до 10 МГц
Экранирующая пленка	—	0	+			слабый источник помех	промышленные условия с большим количеством помех, сигналы до 10 МГц
Экранирующая оплетка	++	++	+			промышленный источник помех	промышленные условия, измерение, управление, регулировка
Экранирование (оплетка и пленка)	++	++	++			мощный источник помех	чувствительные провода при большом количестве помех

1) если подводящие и выводящие линии проложены вместе на малом расстоянии

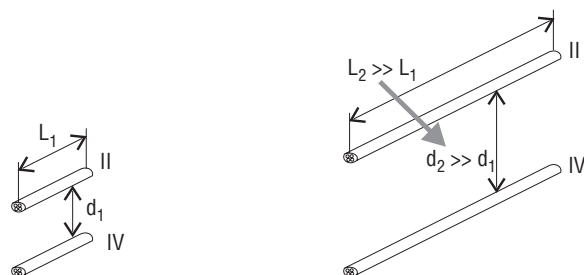
хорошо ----- плохо
++ + 0 - --



Влияние помех на провода различных групп может быть сильно снижено при хорошо спланированной прокладке. При этом во многих случаях возможна эксплуатация с неэкранированными проводами.

При скручивании также может быть сильно снижено воздействие помех. Скручивание становится тем эффективнее, чем больше витков приходится на единицу длины провода.

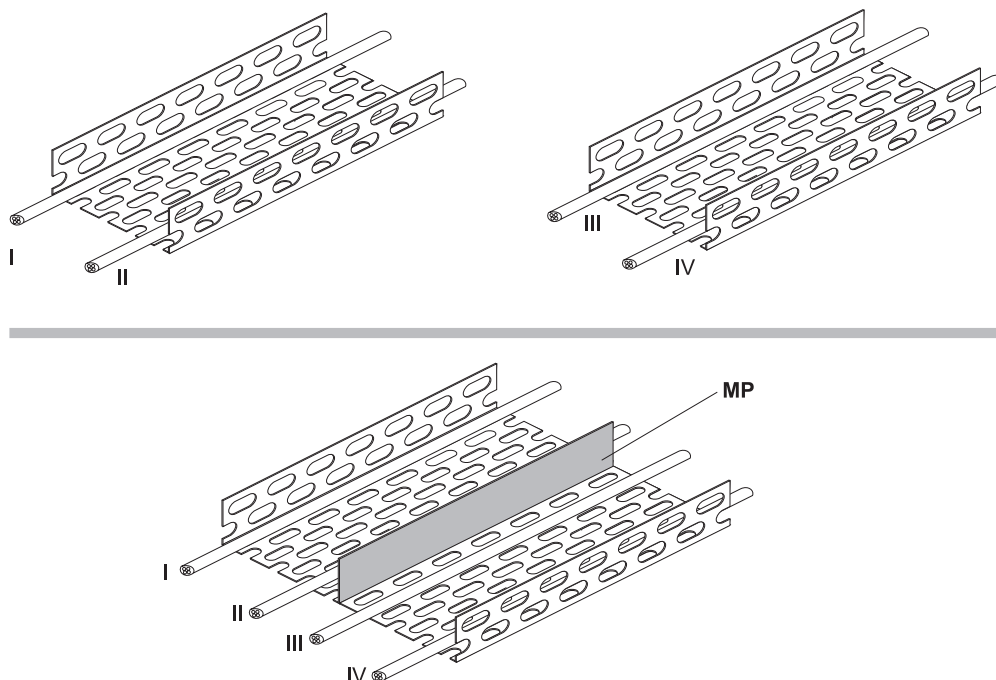
При малом воздействии помех расстояние между проводами должно быть тем больше, чем дольше провода идут параллельно.



00750AXX

Рис. 45. Расстояние между проводами различных групп (здесь II и IV)

Очень эффективно прокладывать провода групп I и II и групп III и IV на как можно большем расстоянии друг от друга. Во многих случаях достаточно расстояния в 10 см между проводами групп I и II, в 20 см между проводами групп II и III и также в 20 см между проводами групп III и IV. При большей длине проводов и/или особых обстоятельствах может понадобиться большее расстояние.

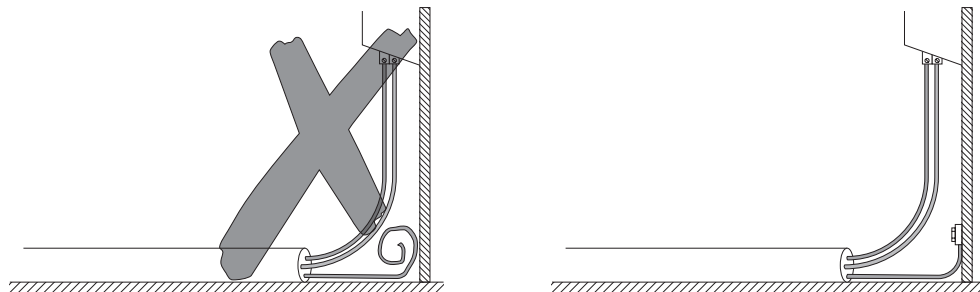


00751CXX

Рис. 46. Различные решения при прокладке групп I, II, III и IV (MP = металлическая перегородка)



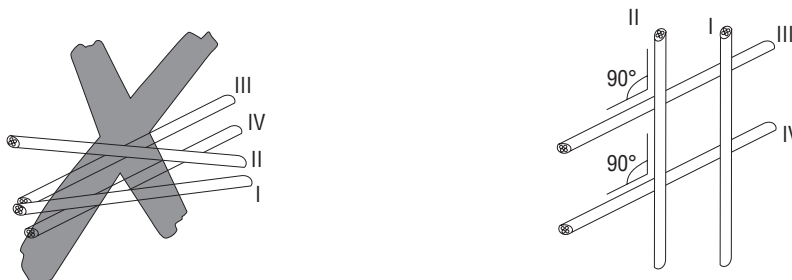
Неиспользуемые провода должны быть заземлены с обоих концов. На проводах группы I в результате соединения с землей, при определенных обстоятельствах, помехи от фона переменного тока ($f_{\text{НЧ}} < 50$ Гц) могут воздействовать на полезный сигнал.



00752AXX

Рис. 47. Заземление неиспользуемого проводника

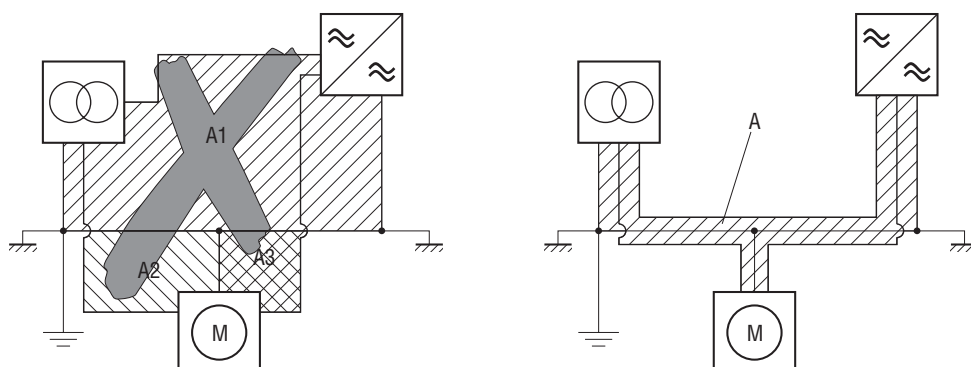
Всегда перпендикулярно скрещивать провода групп I и II и групп III и IV.



00753AXX

Рис. 48. Скрещивание проводов различных групп

Между двумя компонентами установки должна находиться сплошная поверхность общего вывода заземленного корпуса. Все провода следует прокладывать вдоль поверхности общего вывода заземленного корпуса.



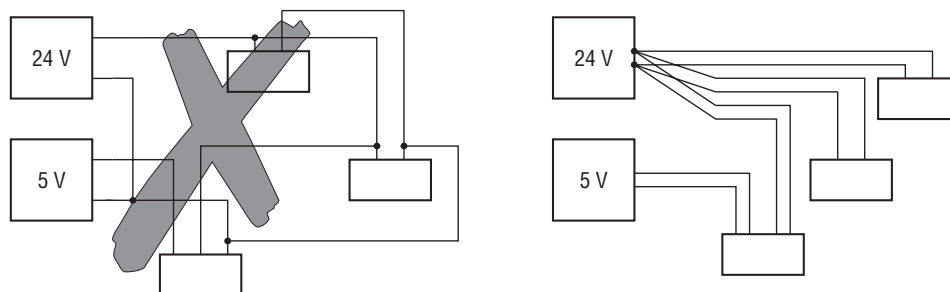
00706AXX

Рис. 49. Прокладка проводов вдоль поверхности общего вывода земли

$A / A1 / A2 / A3$ = Площади заземляющих контуров



Выходящие и входящие провода прокладываются вместе по всей длине. Каждый провод питающего напряжения прокладывается вместе с заземляющим проводом.

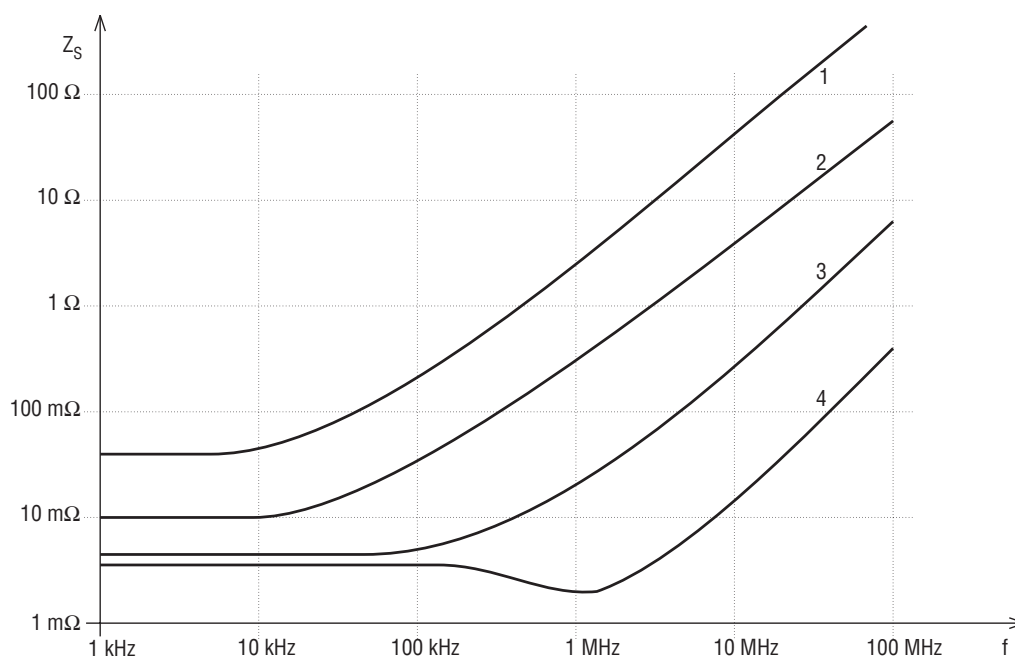


00710AXX

Рис. 50. Совместная прокладка выходящих и входящих проводов

Экранирование

Воздействие помехи на провод может быть сильно снижено при применении экранированных проводов. Важным для затухания помех в экране является подключение экрана. На Рис. 51 показано влияние длины подключения экрана на полное сопротивление экрана.



00754AXX

Рис. 51. Полное сопротивление экрана Z_s в зависимости от длины подключения и частоты f

- | | |
|------------------------------------|--------------------------------------------------------------------|
| 1 Длина подключения экрана 1000 мм | 4 Экран, заземленный по контуру (концентрическая резьбовая пробка) |
| 2 Длина подключения экрана 50 мм | |
| 3 Длина подключения экрана 4 мм | |

Длина подключения экрана = длина провода, подключенного к скрученной оконцовке экрана



Затухание помех в экране

Между затуханием помех и полным сопротивлением экрана существует следующая зависимость:

$$D = \frac{Z_I}{Z_S} \quad [7]$$

D = затухание помех; соответствует коэффициенту, на который ослабляется помеха по сравнению с неэкранированным проводом
 Z_I = полное ВЧ-сопротивление внутреннего провода
 Z_S = полное ВЧ-сопротивление экрана

На основании трех примеров расчета можно увидеть, насколько затухание помех в экране одного и того же кабеля зависит от подключения экрана. Расчеты справедливы только для рассматриваемого провода и не могут быть обобщены.

Пример расчета затухания помех в экране

Пример 1: затухание помех в экране с заземленным по контуру подключением при 1 МГц

Предположение: $Z_I = 3 \, \Omega$ (полное сопротивление внутреннего провода при 1 МГц)
 $Z_S = 3 \, \text{м}\Omega$ (полное сопротивление экрана при 1 МГц с Рис. 51)
 Сигналы помехи затухают при 1 МГц в 1000 раз.

$$D = \frac{Z_I}{Z_S} = 1000$$

Пример 2: затухание помех в экране с длиной подключения 50 мм при 1 МГц

Предположение: $Z_I = 3 \, \Omega$ (полное сопротивление внутреннего провода при 1 МГц)
 $Z_S = 0,3 \, \Omega$ (полное сопротивление экрана при 1 МГц с Рис. 51)
 Сигналы помехи затухают при 1 МГц в 10 раз.

$$D = \frac{Z_I}{Z_S} = 10$$

Пример 3: затухание помех в экране с длиной подключения 1000 мм при 1 МГц

Предположение: $Z_I = 3 \, \Omega$ (полное сопротивление внутреннего провода при 1 МГц)
 $Z_S = 3 \, \Omega$ (полное сопротивление экрана при 1 МГц с Рис. 51)
 Коэффициент затухания сигналов помехи при 1 МГц составляет 1, т. е. помехи совсем не затухают.

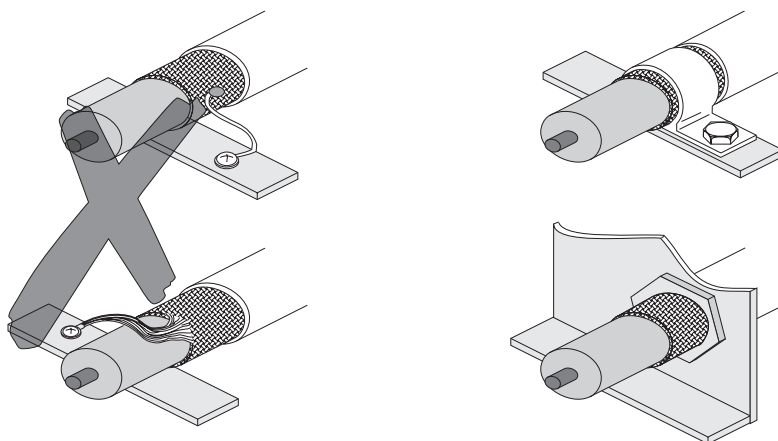
$$D = \frac{Z_I}{Z_S} = 1$$

Как показывают примеры 1 – 3, при плохом подключении действие экрана значительно уменьшается или полностью сводится на нет.

На практике с помощью стандартных экранированных проводов можно достичь значительного коэффициента затухания помех – до 1000.



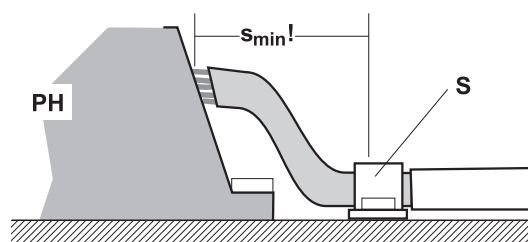
Для подключения экрана важен поверхностный контакт по всему периметру экрана. Экран следует прокладывать по корпусу или по заземленной поверхности (чистый металл). На Рис. 52 показано, как это может быть выполнено.



00755AXX

Рис. 52. Примеры подключения экрана металлической зажимной скобой и металлическим резьбовым отверстием

В случае пластмассового корпуса экран устанавливается как можно ближе к корпусу. Потом он проводится до клеммы в корпусе или на нем.



00816BXX

Рис. 53. Подключение экрана в случае пластмассового корпуса

- PH = пластмассовый корпус
- S = заземленный по контуру экран
- $s_{\text{мин}}$ = кратчайшее расстояние между установленным экраном и корпусом



На Рис. 54 показано, как прокладка в кабельном канале (K) или на угловом профиле (E) может использоваться для уменьшения излучения (S = эффект экрана).



Рис. 54. Уменьшение излучения

00756AXX

Действие экрана улучшается при закрытом кабельном канале.

Общие правила прокладки кабеля

- Убедитесь, что по всей установке проложено одно и то же (НЧ- / ВЧ-согласованное) заземление (Рис. 40).
- Никогда не прокладывайте провода групп I и II в одном кабельном канале или в одном жгуте с проводами групп III и IV.
- Попробуйте уменьшить длину параллельного прохождения проводов групп I и II с проводами групп III и IV до абсолютного минимума. Прокладывайте эти провода на максимальном расстоянии друг от друга.
- Сохраняйте интервал между группами проводов (Рис. 45).
- Минимизируйте площадь поверхности заземления (Рис. 49).
- Прокладывайте выходящие провода как можно ближе к входящим (Рис. 50). Скручивание выходящих и входящих проводов уменьшает наведение помех.
- Применение экранированных кабелей позволяет использовать одни и те же кабельные каналы для проводов различных групп.
- Заземляйте экран с двух сторон, накладывайте оконцовку экрана с достаточным поверхностным контактом. Одностороннее заземление не эффективно. Если экран не наложен, то могут возникать высокие контактные напряжения!
- Заземляйте неиспользуемые провода внутри кабеля с обоих концов (Рис. 47).
- Провода групп I и II и групп III и IV могут скрещиваться только под прямым углом (Рис. 48).

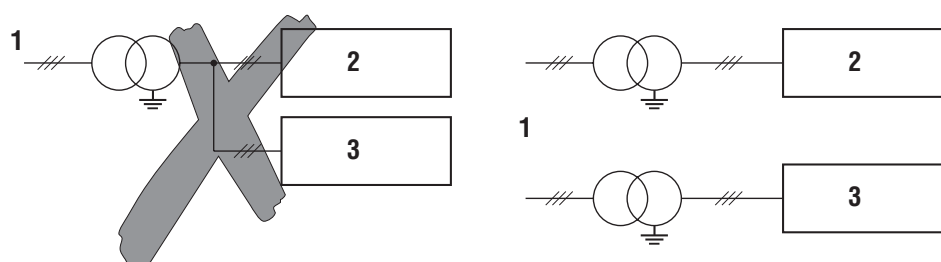


4.3 Подача питания

Напряжение сети

При питании нескольких приборов от одного общего источника на разъеме возникают колебания напряжения, которые могут привести к возникновению помех. Поэтому приборы должны быть упорядочены в соответствии с их мощностью подключения по подходящим ветвям сети снабжения. Если в сети ожидаются большие колебания напряжения, то для чувствительных приборов, таких как блок управления, измерительные приборы и т. п., следует организовать с помощью разделительного трансформатора отдельное питание.

На Рис. 55 показан пример такого питания от сети (1) силовых компонентов (2) и чувствительных приборов (3).



00757AXX

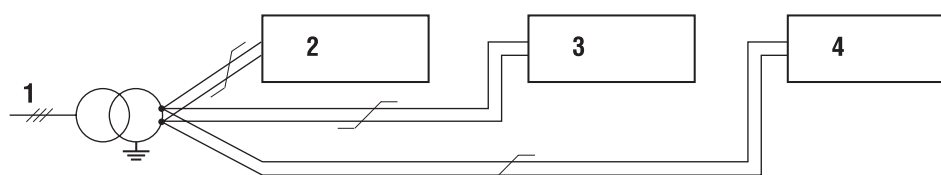
Рис. 55. План энергоснабжения при питании от сети

Приборы должны быть подключены к источнику снабжения по схеме соединения звездой. Если применяются чувствительные приборы или приборы высокой мощности, то необходимо раздельное питание.

Низковольтные напряжения

Для низких напряжений (например 24 В_±) очень важно, чтобы аналоговые потребители (например измерительные зонды, датчики присутствия и др.) и цифровые потребители (реле, контакторы, тормоза и др.) были разделены по разным источникам питания или, по крайней мере, по разным ветвям, подключенным к источнику питания по схеме соединения звездой. Выходящие и входящие провода должны всегда прокладываться вместе.

На Рис. 56 показан план энергоснабжения при низковольтном питании (1) силовых компонентов (2), слабых силовых компонентов (3) и низковольтных компонентов (4).



00758BXX

Рис. 56. План энергоснабжения при низковольтном питании со скрученными жилами



4.4 Передача сигнала

На рабочие характеристики установки решающим образом влияет способ передачи сигнала. Чувствительность сигнала к помехам при одном способе передачи тем меньше, чем выше уровень сигнала. В условиях с высоким уровнем помех применяются только дифференциальные сигналы с разделением потенциалов между передатчиком и приемником. В следующей таблице приведен обзор чувствительности к помехам различных способов передачи сигнала.

Табл. 10. Чувствительность к помехам различных способов передачи сигнала

Способ передачи	Рекомендуемое применение
Аналоговый сигнал	Только в условиях с низким уровнем помех и при высоком уровне сигнала и/или при низких требованиях к качеству сигнала. Каждое напряжение помехи искажает результаты измерения.
Асимметричная передача (например, RS-232)	Только в условиях с низким уровнем помех. Даже маленькая разность потенциалов между приемником и передатчиком может привести к ошибке передачи данных. Используется, прежде всего, для обмена данными при диагностике или при вводе в эксплуатацию.
Симметричная передача (например, RS-485)	Подходит для промышленных условий. Подавляется разность потенциалов до нескольких десятков вольт. Высокие напряжения синфазных помех приводят к ошибке передачи данных или к неисправности.
Гальваническая развязка	Подходит для промышленных условий. Разность потенциалов между передатчиком и приемником не сказывается на передаче сигнала.
Частотно-модулированный	Подходит для промышленных условий с высоким уровнем помех. Помехи оказывают влияние, только когда сигнал передачи полностью деформируется.
Оптическая передача	Подходит для промышленных условий с высоким уровнем помех. Электромагнитные помехи не могут воздействовать на передачу (только непосредственно на передатчик или приемник).

Чувствительные аналоговые сигналы должны обрабатываться прямо на датчике, и после усиления сигнала передаваться дальше с помощью подходящего способа передачи.

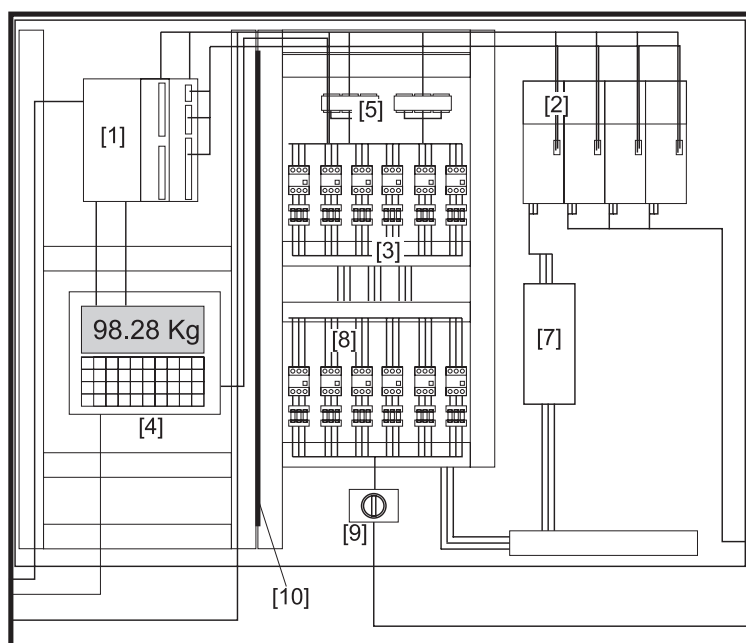
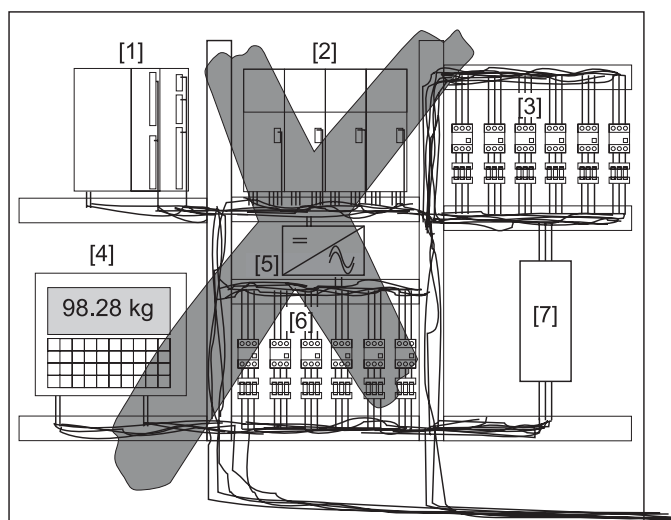
Провода передачи данных, выходящие из электрошкафа, должны использоваться для симметричной изолированной передачи. Частотно-модуляционная и оптическая передачи являются сильно защищенными от помех видами передач, однако они слишком дорогостоящие для повсеместного применения.



4.5 Конструкция электрошкафа

Расположение компонентов

Большое влияние на ЭМС электрошкафа оказывает разделение компонентов по секциям. Следует выбирать такое расположение, чтобы было возможно пространственно разделить провода различных групп. Следует выбирать компоненты, отвечающие требованиям по помехозащищенности и по излучению помех. На Рис. 57 показан пример конструкции электрошкафа с пространственным разделением.



00765BXX

Рис. 57. Электрошкафы с подключенным питанием, силовыми компонентами и т. д.

- | | | |
|-----------------------------|-----------------------------------|----------------------------------|
| [1] = блок управления | [5] = блок питания 24 В | [9] = главный выключатель |
| [2] = силовая электроника | [6] = сетевые контакторы | [10] = металлическая перегородка |
| [3] = реле | [7] = фильтр | |
| [4] = блок обработки данных | [8] = контакторы и предохранители | |



Важно:

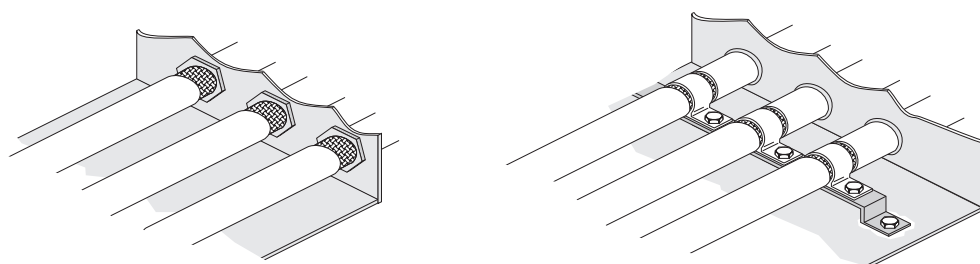
- Короткие провода
- Разделение по группам
- Перпендикулярное скрещивание групп I/II и III/IV
- Перегородка, заземленная по контуру
- Отдельные электрошкафы для силовой и низковольтной электроники
- Установка экранов на входе и выходе электрошкафа и на приборах

Для правильного функционирования установки необходимо общее заземление компонентов электрошкафа. Чтобы добиться этого, в качестве монтажной панели следует использовать оцинкованную нелакированную плату. Соединение с шиной заземления должно иметь низкую индуктивность. Смежные секции электрошкафа с приборами групп I и II и приборами групп III и IV должны быть разделены с помощью заземленной по контуру металлической перегородки. Люминесцентные лампы, как излучатели высокочастотных сигналов, могут вызывать помехи.

Действие экрана

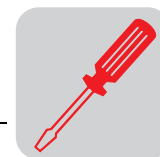
Электрошкаф, как клетка Фарадея, может способствовать уменьшению излучения. Есть специальные исполнения, которые очень эффективно предотвращают излучение помех с помощью пружинных контактов, замыкающихся на дверь. Это дорогостоящее решение необходимо только в редких случаях. Электрошкаф сохраняет свой экранирующий эффект, только когда все входящие и выводятся провода экранированы, так как в противном случае они действуют как антенны. Экран кабеля должен накладываться непосредственно на вывод. На Рис. 58 показаны возможные способы реализации. В качестве альтернативы эти провода можно защитить фильтром. Фильтры следует устанавливать непосредственно на вывод, или провода между фильтром и выводом кабеля должны быть экранированы.

Всего одна незэкранированная или не прошедшая через фильтр линия может свести на нет все остальные меры.



00775AXX

Рис. 58. Правильное исполнение вывода кабеля электрошкафа (металлические соединения)



4.6 Применение фильтров

Важной мерой для соблюдения ЭМС является фильтрация линий. Фильтрация всегда действует в двух направлениях, т. е. она повышает помехозащищенность и уменьшает наведение помех прошедшими через фильтр линиями. Правильное функционирование фильтра во многом зависит от квалифицированного монтажа.

При этом имеют значение, главным образом, три фактора:

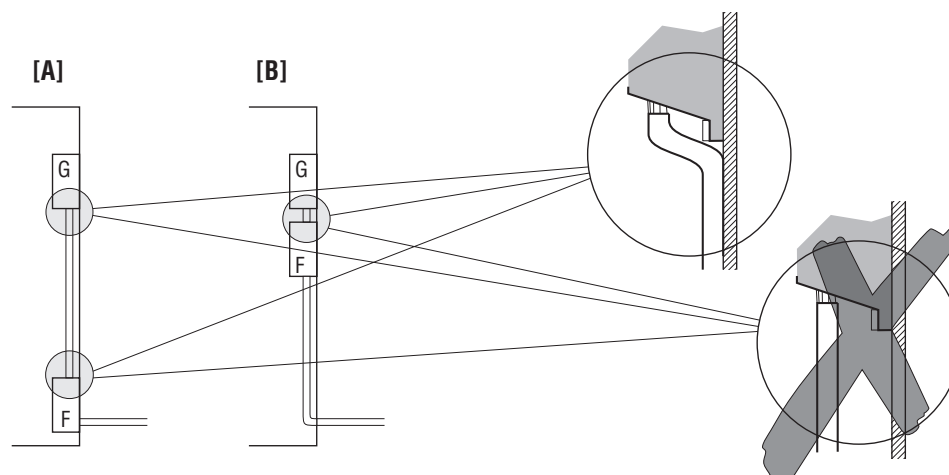
- Место установки
- Заземление
- Прокладка проводов

Если эти факторы не учитываются, то фильтр частично или полностью теряет свою эффективность.

Место установки

Есть два благоприятных места для установки фильтра:

- [A] Хорошим для установки фильтра является место непосредственно на вводе фильтруемых проводов в металлический корпус. В этом случае линия между фильтром и прибором может доставлять проблемы, так как на этот участок линии могут воздействовать помехи. Эта проблема устраняется экранированием данного участка линии.
- [B] Хорошим для установки фильтра является также место непосредственно на приборе. В этом случае может доставлять проблемы линия между фильтром и местом ввода кабеля в корпус, так как теперь на этот участок линии могут воздействовать помехи. Эта проблема устраняется экранированием данного участка линии.



00776AXX

Рис. 59. Варианты установки прибора (G) и фильтра (F)

**Заземление**

Так как почти во всех фильтрах используются конденсаторы утечки заряда на землю, то эффективность фильтра существенно зависит от заземления фильтра. Плохое заземление можно представить с помощью сопротивления R_E и индуктивности L_E (\rightarrow Рис. 60). Плохое заземление препятствует закорачиванию напряжения помехи на конденсаторах утечки при высоких частотах. Это приводит к тому, что фильтр F полностью шунтируется.

Так как, в общих чертах, фильтр закорачивает напряжение помехи, чтобы направить ток помехи I_S на передатчик помехи, то индуктивность соединения между фильтром и передатчиком помехи должна быть как можно ниже. При этом очень эффективны общая чисто металлическая монтажная панель или экранированная линия между фильтром и передатчиком помехи.

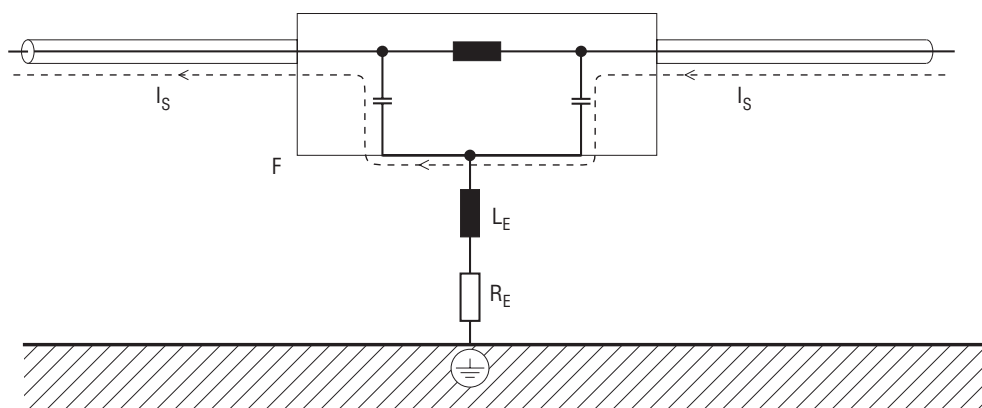


Рис. 60. Эквивалентная схема фильтра с плохим заземлением

00759AXX

F = фильтр
 L_E = индуктивность заземления
 I_S = ток помехи
 R_E = сопротивление заземления

Прокладка проводов

Действие фильтра обеспечивается только тогда, когда прошедшие и не прошедшие через фильтр провода прокладываются на максимальном расстоянии друг от друга. В противном случае помехи от не прошедшего через фильтр провода могут воздействовать на прошедший через фильтр провод. Если отдельная прокладка этих двух проводов невозможна, то не прошедший через фильтр провод должен быть заэкранирован.



Выбор фильтра

Правильный выбор фильтра возможен только после проведения измерений. Хотя все изготовители фильтров публикуют измеряемые кривые подавления помехи, но эти кривые всегда измеряются при полном сопротивлении 50 Ом на входе и выходе фильтра. Поскольку фактически существующие сопротивления нагрузки на установке отличаются от этих значений, то достигаются другие показатели подавления. Это может привести к тому, что показатели подавления у фильтров с одинаковыми параметрами по каталогу на практике сильно различаются.

Следующая таблица показывает, по каким критериям следует выбирать фильтр.

Полное сопротивление на входе	Установка фильтра	Полное сопротивление на выходе
Высокое		Высокое
Низкое		Высокое
Высокое		Низкое
Низкое		Низкое

Для многих случаев применения изготовители предлагают соответствующие фильтры.

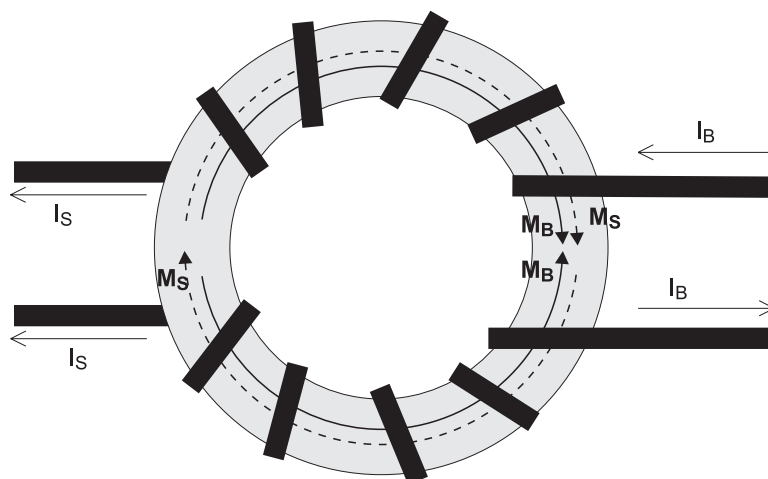
Для подавления помех обычно требуются фильтры низких частот, которые пропускают низкочастотный полезный сигнал и подавляют высокочастотный сигнал помехи.

В качестве простейших фильтров можно использовать конденсаторы и дроссели. Следующая таблица показывает действие этих компонентов. Для низких частот подходят электролитические конденсаторы и дроссели в металлическом корпусе с ферромагнитным сердечником, для высоких частот применяются пленочные и керамические конденсаторы и ферритовые сердечники.

Индуктивное подавление помех	Емкостное подавление помех
<p>НЧ: $R \ll Z_L$ ВЧ: $R \gg Z_L$</p> $Z_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L$	<p>НЧ: $R \ll Z_C$ ВЧ: $R \gg Z_C$</p> $Z_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C}$



Для подавления высокочастотных синфазных помех лучше всего подходит ферритовый кольцевой сердечник, установленный на входящем и выходящем проводах. На рабочий ток I_B не действует практически никакая индуктивность, так как магнитные потоки взаимно компенсируются в сердечнике. Для токов синфазных помех I_S создается очень высокая индуктивность, которая сильно подавляет эти токи. Ферритовый кольцевой сердечник действует как фильтр низких частот.



00762BXX

Рис. 61. Ферритовый кольцевой сердечник

I_S = ток помехи
 I_B = рабочий ток

M_S = магнитный поток тока помехи
 M_B = магнитный поток рабочего тока



4.7 Использование компонентов для подавления помех при применении преобразователя

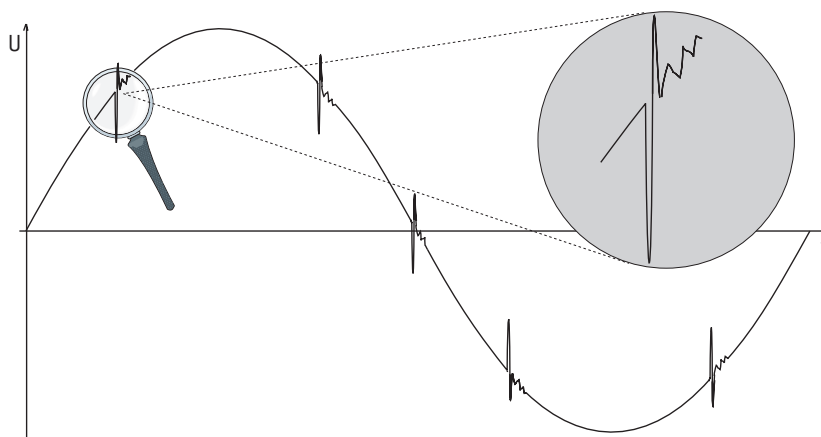
Эта глава содержит рекомендации по проектированию. Для правильного проектирования установок с приводами SEW используйте сведения из соответствующих каталогов.

Сетевой дроссель

Сетевой дроссель может выполнять следующие функции:

Коммутационные прерывания

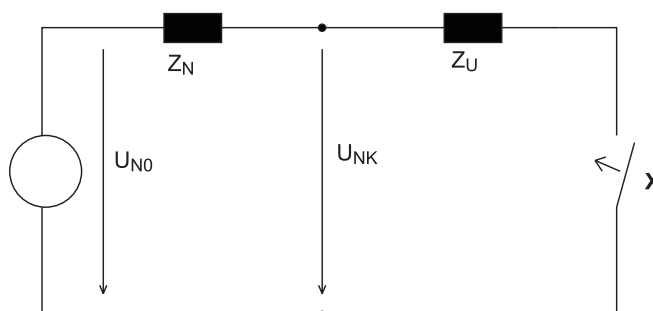
На входе сетевого напряжения преобразователя обычно стоит выпрямитель. Рабочий ток преобразователя течет через два выпрямляющих диода в промежуточный контур постоянного напряжения. Во время эксплуатации ток переключается от первого диода к второму. В момент переключения выпрямитель закорачивает сеть, пока запирающая способность диода, который до этого момента проводил ток, снова не восстановится. На Рис. 62 показаны такие коммутационные прерывания в напряжении сети.



00788AXX

Рис. 62. Коммутационные прерывания в напряжении сети

На Рис. 63 показана однофазная эквивалентная схема коммутационного прерывания.



00789BXX

Рис. 63. Эквивалентная схема коммутационного прерывания

В момент переключения диод создает короткое замыкание X, на подключении к сети просаживается напряжение U_N . Тогда полные сопротивления Z_N и Z_U образуют делитель напряжения, через который подается напряжение сети.



В точке соединения возникают следующие напряжения:

Напряжение сети

$$U_{NK} = \frac{Z_U}{Z_U + Z_N} \cdot U_{N0} \quad [8]$$

U_{NK} = напряжение сети в точке соединения в момент переключения
 U_{N0} = напряжение сети в сетевом трансформаторе в момент переключения
 Z_U = полное сопротивление перед выпрямителем (подводящий кабель, сетевой дроссель и т. п.)
 Z_N = полное сопротивление сети (полное сопротивление сетевого трансформатора)

Чаще всего применяется сетевой дроссель с напряжением короткого замыкания $u_K = 4 \%$; тогда напряжение сети просаживается максимум на 20 %. Это имеет значение прежде всего для приборов с тиристорами в сетевом выпрямителе, так как там коммутационное прерывание может длиться несколько сотен микросекунд.

Для преобразователя с диодами в сетевом выпрямителе эти временные интервалы значительно короче, кроме того, коммутация обычно происходит без тока. Поэтому просадка напряжения сети почти незаметна. Сетевой дроссель здесь применять не следует.

Устойчивость при перенапряжениях

При появлении в сети импульсов повышенного напряжения в первый момент в преобразователе течет очень высокий ток, так как конденсатор промежуточного контура теперь заряжается более высоким напряжением на его выводах. К этому току прибавляется ток, который течет через схему защиты от перенапряжений (если она установлена). При очень сильных импульсах повышенного напряжения может превышаться допустимое напряжение полупроводника. Сетевой выпрямитель может быть поврежден термически при высоком токе.

Сетевой дроссель уменьшает ток, который вызывается импульсами повышенного напряжения. Кроме того, ток на сетевом дросселе вызывает падение напряжения. На клеммах прибора теперь имеется только повышенное напряжение, уменьшенное на величину этого падения напряжения.

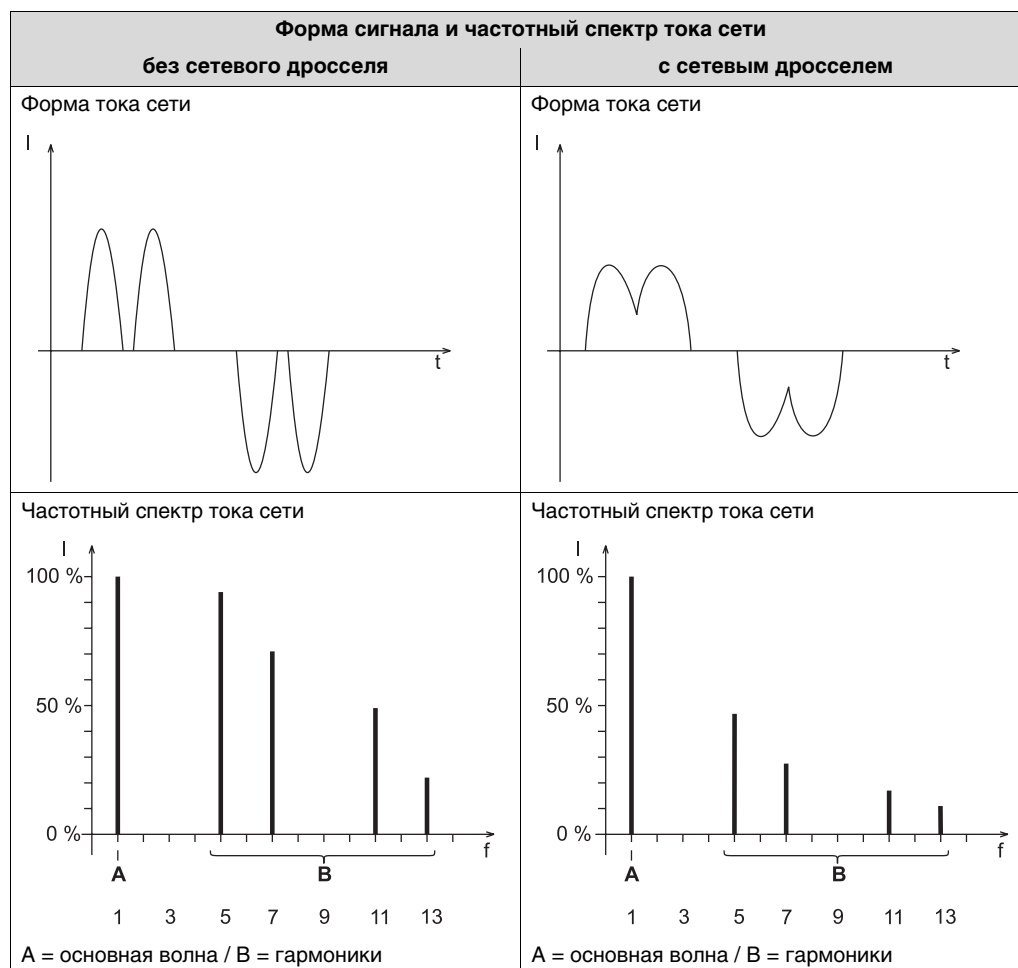
Причиной таких импульсов повышенного напряжения могут быть, например, короткие замыкания и подключения к сети, а также неправильно работающие компенсирующие устройства.

Сетевые гармоники

Ток сети обычных преобразователей содержит высокую составляющую гармоник. Это вызвано несинусоидальным током сети. Значительно выровнять импульсный ток может сетевой дроссель. При этом значительно снижается составляющая гармоник (5-я гармоника – обычно в два раза).



При использовании современных преобразователей с "коротким" звеном постоянного тока, гармоники тока сети снижаются уже настолько, что использование сетевого дросселя не принесет заметных улучшений.



Ток включения

Если одновременно, с помощью одного сетевого контактора, подключаются несколько приборов, то их токи включения складываются. Причиной возникновения импульса тока включения является зарядка конденсаторов промежуточного контура. При маленьких сетевых контакторах слишком большой импульс тока включения может привести, прежде всего, к залипанию или приварке контактов контактора. Сетевой дроссель может значительно уменьшить импульс тока включения.



Выбор сетевого дросселя

Сетевой дроссель выбирается в зависимости от номинального тока преобразователя и напряжения сети, на котором работает преобразователь. Индуктивность определяется по данным изготовителя.

Общий сетевой дроссель для нескольких преобразователей должен быть рассчитан на суммарный ток.

Пример: Преобразователь 1 $I_N = 7 \text{ A}$
 Преобразователь 2 $I_N = 7 \text{ A}$
 Преобразователь 3 $I_N = 12 \text{ A}$
 Преобразователь 4 $I_N = 20 \text{ A}$
 Напряжение сети $U_N = 3 \times 400 \text{ В}_{AC}$

→ Минимальный номинальный ток сетевого дросселя

$$I_{Dr} = 7 \text{ A} + 7 \text{ A} + 12 \text{ A} + 20 \text{ A} = 46 \text{ A}$$

→ Минимальное номинальное напряжение сетевого дросселя

$$U_N = 3 \times 400 \text{ В}_{AC}$$

Минимальный номинальный ток сетевого дросселя может быть снижен, если преобразователи работают с номинальной нагрузкой не одновременно (коэффициент синхронности).

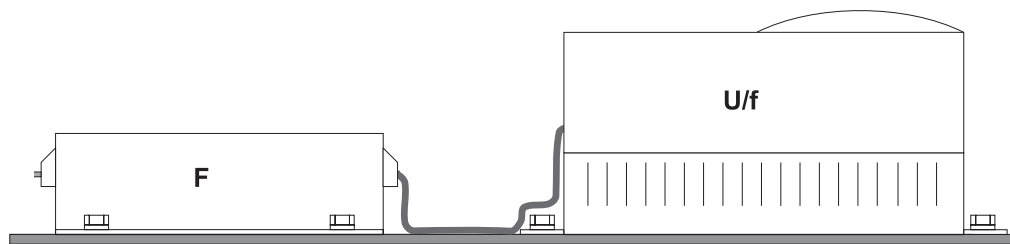
Использование сетевого дросселя

Сетевой дроссель рекомендуется использовать в следующих случаях:

- Эксплуатация в сети, в которой возможны высокие перенапряжения
- Эксплуатация нескольких маленьких преобразователей на одном общем сетевом контакторе
- Высокая доля мощности подключенных преобразователей относительно общей потребляемой мощности

Сетевой фильтр

Сетевой фильтр защищает сеть от возникающих в преобразователе напряжений помехи. Сетевой фильтр должен располагаться как можно ближе к преобразователю, корпуса сетевого фильтра и преобразователя должны иметь низкочастотное заземление и соединяться друг с другом через монтажную панель (например, при монтаже на металлической, нелакированной задней панели электрошкафа).

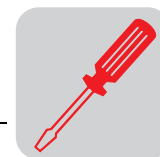


00791BXX

Рис. 64. Монтаж сетевого фильтра **F** и преобразователя **U/f**



Очень важен поверхностный металлический контакт между фильтром и преобразователем!



Вместо одного сетевого фильтра на каждый преобразователь можно использовать общий сетевой фильтр для всего электрошкафа. Для преобразователя обычно достаточно трехфазного сетевого фильтра, рассчитанного на суммарный ток преобразователя. Даже если требуется подключить к фильтру однофазный потребитель, то следует использовать четырехполюсный сетевой фильтр. Сетевой фильтр должен располагаться как можно ближе к вводу сетевого кабеля в электрошкаф. Прошедший через фильтр провод нельзя располагать параллельно не прошедшему через фильтр проводу.

Расчет параметров

Сетевой фильтр выбирается в зависимости от тока преобразователя, а также от напряжения сети, на котором работает преобразователь. Общий сетевой фильтр выбирается точно так же, как и сетевой дроссель, по суммарному току используемых преобразователей. Для обеспечения достаточной фильтрации следует использовать указанный производителем тип фильтра.

Изготовитель фильтров может оказать помощь при выборе четырехполюсного фильтра.

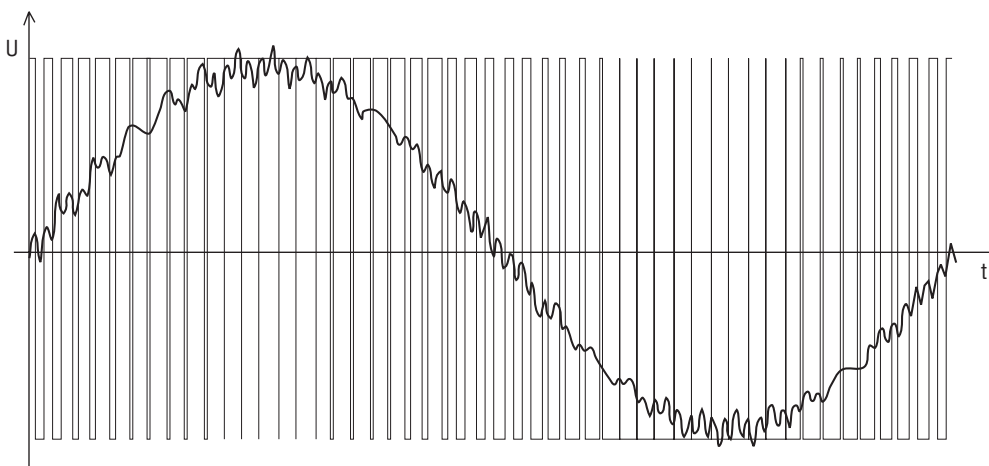
Использование сетевого фильтра

Использование сетевого фильтра рекомендуется при следующих условиях:

- Эксплуатация в бытовых условиях
- Соблюдение предельных значений для промышленных условий
- Эксплуатация чувствительных потребителей в одной ветви сети энергоснабжения
- Оптимизация ЭМС по всей установке

Выходной фильтр (синусоидальный фильтр)

На Рис. 65 показано напряжение на выходе преобразователя с синусоидальным фильтром и без него.



00793AXX

Рис. 65. Выходное напряжение с синусоидальным фильтром и без него



Синусоидальный фильтр преобразует прямоугольное выходное напряжение в синусоидальное. Это эффективно при следующих условиях:

Групповой привод

Иногда, в зависимости от способа применения, несколько двигателей работают вместе от одного преобразователя (групповой привод). Выходное напряжение преобразователя образуется из прямоугольных импульсов. Они вызывают на паразитных емкостях выходного кабеля и обмотки двигателя пики тока утечки. При групповом приводе эти пики тока утечки складываются. Эти пики тока утечки могут достигать недопустимых для преобразователя значений (в зависимости от количества параллельно подключенных двигателей, длины провода, типа провода на выходе преобразователя и размеров двигателей). Кроме того, значительная составляющая тока может теряться на линии. Это возможно даже при эксплуатации двигателя с длинным экранированным проводом.

При эксплуатации с синусоидальным фильтром пики тока утечки не возникают, так как его выходное напряжение – синусоидальное. Малая часть тока двигателя теряется на синусоидальном фильтре, но это не зависит от внешних факторов (количество двигателей, тип и длина провода).

Фильтрация шумов

Прямоугольные импульсы выходного напряжения преобразователя вызывают шумы в двигателе. Эти шумы в диапазоне тактовой частоты преобразователя могут восприниматься как неприятные.

С помощью синусоидального фильтра шумы в двигателе подавляются, однако сам фильтр производит шумы на тактовой частоте преобразователя.

Подавление коммутационных помех

Подавление коммутационных помех уменьшает излучение помех. При соответствующем расчете параметров синусоидального фильтра изготовителем возможно подавление коммутационных помех выходного кабеля. Тогда, при соблюдении предельных значений, становится возможной эксплуатация без экранированных выходных кабелей. При этом следует выполнять указания изготовителя по монтажу. Даже при исполнении с подавлением коммутационных помех на выходном кабеле есть помехи, однако они сильно подавлены по сравнению с нефильтрованным выходным напряжением.

Расчет параметров

Как и сетевой дроссель и сетевой фильтр, синусоидальный фильтр выбирается по номинальному току и номинальному напряжению. Если номинальный ток двигателя меньше, чем номинальный ток используемого преобразователя, то фильтр может быть выбран по току двигателя (при параллельном включении нескольких двигателей – по сумме токов двигателей).

При расчете параметров следует учитывать:

- на фильтре возникает падение напряжения, на которое уменьшается напряжение двигателя
- часть выходного тока теряется на фильтре



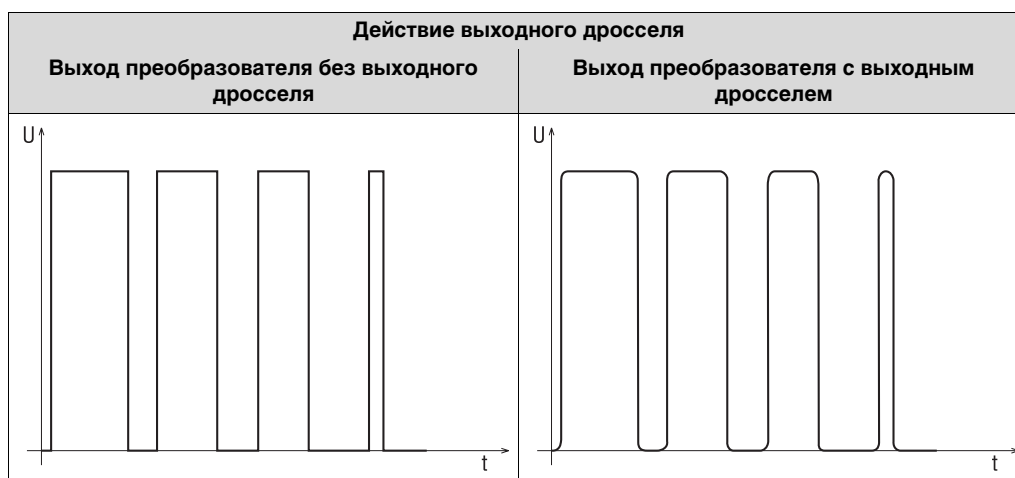
Использование

Синусоидальный фильтр рекомендуется применять в следующих случаях:

- при групповом приводе на одном преобразователе
- как фильтр шумов
- для эксплуатации без коммутационных помех с неэкранированными кабелями двигателя (например шлейфовый или подвесной энергоподвод)
- для снижения потерь тока на длинных проводах

Выходной дроссель

Выходные дроссели образуют вместе с паразитными емкостями (емкость линии, емкость обмотки двигателя, емкость экрана и т. п.) фильтр низких частот на выходе преобразователя. Следующий график показывает форму выходного напряжения преобразователя без выходного дросселя и с ним.



Прямоугольные импульсы выходного напряжения скругляются, однако в целом они сохраняют свою форму. Уровень помех выходного кабеля уменьшается, но полностью они не исчезают. Выходное напряжение после выходного дросселя не синусоидальное. В качестве выходного дросселя обычно устанавливается ферритовый кольцевой сердечник, на который наматывается выходной кабель. Ферритовый кольцевой сердечник действует как тококомпенсирующий дроссель. Преимущество ферритового кольцевого сердечника состоит в том, что на выходе преобразователя дополнительное падение напряжения не возникает. Обычно достаточно 3 – 5 витков вокруг сердечника. Существуют также выходные дроссели в продольном исполнении, но они здесь подробно не рассматриваются.

Расчет параметров

Выходные дроссели с ферритовым сердечником могут устанавливаться независимо от мощности прибора. Если из-за сечения жил кабеля невозможно намотать необходимое количество витков на сердечник, то можно использовать несколько сердечников один за другим. Индуктивность выходного дросселя пропорциональна квадрату количества витков:

Индуктивность

$$L_T = n^2 \cdot L_1 \quad [9]$$

- L_T = общая индуктивность выходного дросселя
 n = количество витков
 L_1 = индуктивность выходного дросселя с одним витком



Пример

- 1) выходной дроссель с 4 витками

$$L_T = 4 \times 4 \times L_1 = 16 \times L_1$$

- 2) 2 выходных дросселя с 3 витками на каждом

$$L_T = 3 \times 3 \times L_1 \times 2 = 18 \times L_1$$

- 3) 4 выходных дросселя с 2 витками на каждом

$$L_T = 2 \times 2 \times L_1 \times 4 = 16 \times L_1$$

Подавление помех в каждом из этих трех случаев примерно одинаковое. На один сердечник не следует наматывать более 5 витков, поскольку при этом подавление помех может снизиться из-за эффекта магнитного насыщения сердечника.

Выходной дроссель может быть обмотан двумя способами:

Обмотка тремя выходными проводами плюс защитное заземление:

Преимущества: – незначительное нагревание
– высокая устойчивость к насыщению

Недостатки: – более низкое подавление помех
– меньшее количество витков

Обмотка тремя выходными проводами без защитного заземления:

Преимущества: – более высокое подавление помех
– большее количество витков

Недостатки – более сильное нагревание
– низкая устойчивость к насыщению

Использование

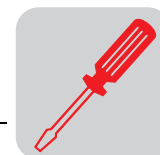
Выходные дроссели рекомендуется применять в следующих случаях:

- для подавления коммутационных помех на выходе преобразователя (возможно с неэкранированными проводами)
- для дополнительного обеспечения ЭМС
- для подавления помех, если не допустимы ни падение напряжения, ни потери тока

Выходной дроссель не может использоваться:

- для снижения шумов двигателя
- для увеличения допустимой длины моторного кабеля при питании группы двигателей от одного преобразователя
- для снижения потерь тока на длинных проводах

Выходной дроссель служит только для подавления помех на выходе преобразователя. При правильном выборе типоразмера достигаются уровни излучения помех, соответствующие стандартам.



**Модуль
подавления
электромагнит-
ных помех**

Модуль подавления электромагнитных помех – это устройство для монтажа между преобразователем и стенкой электрошкафа. Он служит для подавления помех от входа и выхода преобразователя. Он содержит сетевой фильтр для входа преобразователя, а также выходной дроссель для выхода преобразователя. Преимущество заключается в компактном монтаже и в высокочастотном контакте между преобразователем и фильтром, автоматически образуемом благодаря конструкции.

**Расчет
параметров**

По данным изготовителя преобразователя.

Использование

Модуль подавления электромагнитных помех рекомендуется использовать:

- для подавления коммутационных помех преобразователя с неэкранированными проводами
- для дополнительного обеспечения ЭМС

Модуль подавления электромагнитных помех не может использоваться:

- для снижения шумов двигателя
- для увеличения допустимой длины моторного кабеля при питании группы двигателей от одного преобразователя
- для снижения потерь тока на длинных проводах

Экранирование

При правильном экранировании излучение значительно уменьшается. Экран при этом должен быть подключен с обоих концов. Действие экрана улучшается при длинных проводах, если экран накладывается многократно с помощью хомута (важно: заземление по контуру!) на сплошную металлическую конструкцию. Прокладка стального бронированного кабеля в металлической трубке или в кабельном канале также заглушает излучение, хотя, конечно, она менее эффективна, чем медный экран.

Паразитная емкость линии значительно увеличивается при экранировании (типичный коэффициент 2–3). Поэтому на экранированном проводе с увеличением его длины теряется все большая часть тока двигателя в виде тока утечки. Поэтому в неблагоприятных случаях экранирование выходных линий может привести к возникновению помех, так как при повышении паразитной емкости токи утечки возрастают и их высокочастотная составляющая увеличивается. В таких случаях для подавления помех следует применять выходные фильтры или ферритовые сердечники вместо экранированных линий.

Важнейшим средством подавления помех, вызванных действием высокочастотных токов утечки, является соответствующая высокочастотным требованиям схема заземления в электрошкафу и установке.



5 Законы и стандарты

Законодательство и стандарты в области ЭМС в последние годы сильно изменились. Это было вызвано следующими причинами:

- Возникла необходимость согласовать необходимые действия и стандарты по предельным значениям ЭМС с сегодняшними техническими потребностями. Основной тенденцией этого процесса согласования было поэтапное повышение уровня ЭМС до значений, которые обеспечивают достаточную безопасность при сегодняшнем техническом оснащении, "для удовлетворительной работы в электромагнитной среде, без излучения при этом электромагнитных помех, которые могут быть неприемлемы для других имеющихся в этой среде устройств" (цитата из закона по ЭМС).

Этот принцип является основной идеей закона об ЭМС и сегодняшних стандартов ЭМС.

- Следующей задачей стандартизации является объединение всех требований ЭМС, предъявляемых к продукции, в один общий, так называемый стандарт продукции по ЭМС. Преимуществом такого стандарта будет то, что в нем содержатся все аспекты ЭМС (помехозащищенность и излучение помех, пояснения, методы измерения и т. д.). Например, сейчас на стадии подготовки находится стандарт на электрические приводы (DIN IEC 22G/21/CDV). Если существует стандарт продукции, то он должен применяться вместо специальных отраслевых стандартов. Для определения ЭМС устройства пользователь должен лишь проверить, гарантирует ли изготовитель выполнение условий специальных стандартов или стандарта продукции. Специальные стандарты содержат только перечень стандартов по ЭМС, которые должен учитывать изготовитель.
- В процессе создания внутреннего рынка от законодателя требовалось заменить существовавшие тогда федеральные правовые акты (в Германии, например, закон о подавлении радиопомех) федеральным законом, согласованным с ЕС. Совет ЕС выпустил в 1989 году для этой цели директиву по ЭМС 89/336/ЕЕС, в которой страны – члены ЕС среди прочего установили срок согласования до 31.12.1995. Федеративная республика Германия в ноябре 1992 года преобразовала директиву по ЭМС в закон Германии об ЭМС (EMVG). Он находится в переработке с июня 1995 года.

5.1 Важные обозначения

Изготовитель

"С точки зрения этого закона, изготовителем является тот, кто отвечает за проектирование и изготовление продукции, попадающей под директиву по электромагнитной совместимости, или изготавливает из уже готовой конечной продукции новую продукцию, или изменяет, перестраивает или перенастраивает эту продукцию".

Какое это имеет значение для изготовителя машин/установок? Он покупает приводные механизмы, которые устанавливает на свою машину/установку и связывает с другими компонентами.

- При этом он несет ответственность за обеспечение ЭМС при использовании купленных компонентов привода.
- Поставщик компонентов привода помогает изготовителю машин/установок предоставлением технической документации, в которой описываются способы решения и меры по обеспечению ЭМС.

Электромагнитная помеха

"С точки зрения этого закона, электромагнитной помехой является каждое электромагнитное явление, которое может оказать отрицательное влияние на функционирование устройства. Электромагнитной помехой может быть электромагнитный шум, нежелательный сигнал или изменение среды распространения".

Что это значит? Электромагнитными помехами являются все виды помех, например:

- ESD = разряд статического электричества
- Всплеск напряжения = ударное напряжение (вследствие грозы или при подключении к сети)
- ВЧ-излучение (через воздух)
- ВЧ-помеха, связанная с линией
- Всплеск = быстрые переходные помехи (размыкающиеся контакты индуктивной электрической цепи)

Помехозащищенность

"С точки зрения этого закона помехозащищенность – это способность устройства работать без снижения функциональности во время электромагнитной помехи".

Что это значит? Помехозащищенностью называется степень нечувствительности по отношению к действующим извне электромагнитным воздействиям. К этому относятся также понятия:

- ЭМП = электромагнитные помехи
- Пассивный режим
- Режим вредного воздействия

**Соответствие**

Соответствие преобразователей и других устройств силовой электроники понятию изготовитель.

Изготовителем, с точки зрения закона о ЭМС, является тот, кто спроектировал силовое электронное устройство в машине, при этом он соединил различные компоненты (электрошкаф, программируемые контроллеры, контакторы, предохранители, преобразователи частоты, дополнительные устройства, измерительные элементы, датчики, двигатели, механические узлы, гидравлическую систему и т. д.) в функционирующую машину и пустил ее в эксплуатацию.

Он должен обеспечить соответствие машины стандартам по ЭМС, проводя проектирование с пониманием сути ЭМС. При этом он должен знать, какие защитные меры требуются для компонентов, учитывая место размещения машины. Эту задачу он может решить только с помощью поставщика компонентов. Поставщик должен оказать помощь, касающуюся установки его компонентов.

Если изготовитель машины проводил последовательное планирование ЭМС при конструировании и сборке машины, то он может нанести на свою машину знак СЕ. Это подтверждает соответствие всем действующим директивам ЕС (здесь, в частности, директиве по электромагнитной совместимости).

5.2 Классификация по областям применения

Сегодняшние стандарты разделяют условия места размещения установки на промышленные и бытовые условия. Эти условия определяются в так называемых специальных стандартах.

Табл. 11. Распределение специальных стандартов по условиям места размещения установки

Название стандарта	для промышленных условий	для бытовых условий
Специальный стандарт по излучению помех	EN 50 081-2	EN 50 081-1
Специальный стандарт по помехозащищенности	EN 50 082-2	EN 50 082-1

Если применяются соответствующие сфере применения специальные стандарты и стандарты продукции, то все требования ЭМС выполнены.

В таблицах 12 и 13 приведен перечень испытаний ЭМС, которые соответствуют специальным стандартам.

Табл. 12. Специальный стандарт по излучению помех

Специальный стандарт по излучению помех	Требует измерения по	Обозначение
EN 50081-1	EN 55022	Предельные значения и способы измерения радиопомех устройств обработки информации
	EN 55014	Предельные значения и способы измерения радиопомех устройств с электроприводом и бытовых приборов
	EN 61000-3-2 ¹⁾	Предельные значения для токов высших гармоник
	EN 61000-3-3 ¹⁾	Предельные значения для колебаний напряжения и фликера
EN 50081-2	EN 55011	Предельные значения и способы измерения радиопомех промышленных, научных и медицинских устройств

1) должны применяться только для определенных устройств

Табл. 13. Специальный стандарт по помехозащищенности

Специальный стандарт по помехозащищенности	Требует измерения по	Обозначение
EN 50082-1	EN 61000-4-2	Помехозащищенность от разряда статического электричества
	EN 61000-4-3	Помехозащищенность от высокочастотных электромагнитных полей
	EN 61000-4-4	Помехозащищенность от быстрых переходных электрических помех / всплеск
EN 50082-2	EN 61000-4-2	Помехозащищенность от разряда статического электричества
	EN 61000-4-3	Помехозащищенность от высокочастотных электромагнитных полей
	EN 61000-4-4	Помехозащищенность от быстрых переходных электрических помех / всплеск
	EN 61000-4-6	Помехозащищенность от наведенных помех, индуцированных высокочастотными полями
	EN 61000-4-8 ¹⁾	Помехозащищенность от магнитных полей с энергетическими частотами

1) должны применяться только для определенных устройств

Устройство, отвечающее требованиям EN 50081-1, автоматически соответствует EN 50081-2.

Устройство, отвечающее требованиям EN 50082-2, автоматически соответствует EN 50082-1.

**Определение области применения**

Подразделение на две области применения вытекает из следующего определения (смотри EN 50 081-2 и EN 50 082-2, гл. 5). Там это звучит так:

Промышленные условия

EN 50 081-2: Промышленные условия характеризуются наличием следующих одного или нескольких признаков:

- имеются промышленные, научные и медицинские устройства (ISM-устройства);
- часто подключаются большие индуктивные или емкостные нагрузки;
- большие силы электрического тока и вызванные ими магнитные поля.

Эти признаки являются определяющими элементами промышленной электромагнитной среды, и они отличают промышленные условия от других.

Бытовые и коммерческие условия, а также малые предприятия

EN 50 082-1: под действие этого стандарта попадают бытовые и коммерческие площади, малые предприятия, находящиеся как внутри, так и за пределами зданий. Следующий, хотя и не полный, перечень дает представление о том, о каких помещениях и площадках идет речь:

- Жилые здания – дома, квартиры, комнаты и т. д.
- Торговые помещения – магазины, рынки и т. д.
- Служебные помещения – ведомства и учреждения, банки и т. д.
- Развлекательные учреждения – кинотеатры, рестораны, кафе, клубы и т. д.
- Площадки на открытом воздухе – заправочные станции, автостоянки, развлекательные и спортивные учреждения и т. д.
- Помещения малых предприятий – мастерские, лаборатории, сервисные центры и т. д.

Все места применения, обозначенные как подключенные непосредственно к общественной сети низкого напряжения, рассматриваются как относящиеся к бытовым и коммерческим условиям и к малым предприятиям.

5.3 Обзор законов и стандартов

Следующий обзор охватывает общепринятые законы и стандарты по ЭМС на 31.12.1996.

Табл. 14. Обзор законов и стандартов

Законы и стандарты по ЭМС	
89/336/ЕЕС (= 1989)	Директива по ЭМС
Закон по ЭМС от 30.8.1995	Закон по ЭМС (директива по ЭМС, преобразованная в нем. закон)
DIN IEC 22G/21/CDV (проект: ноябрь 1995)	Стандарт продукции ЭМС, включая методы испытания электрических приводов Требования к помехозащищенности: гл. 5 Требования к излучению помех: гл. 6
а) Излучение помех (источник)	
EN 50081-1 = VDE 0839T81-1 EN 50081-2 = VDE 0839 T 81-2 EN 55 011 = VDE 0875 T11 EN 55 014 = VDE 0875 T14	Специальный стандарт (определения/условия измерений): бытовые условия Специальный стандарт (определения/условия измерений): промышленные условия Предельные значения: промышленные устройства (= ISM-устройства → гл. 12) Предельные значения: бытовые приборы
EN 61000-3-2 = VDE 0838 T 2	ЭМС: предельные значения для токов высших гармоник ($I_N \leq 16$ A)
б) Помехозащищенность (получатель)	
EN 50082-1 = VDE 0839 T 82-1 EN 50082-2 = VDE 0839 T 82-2	Специальный стандарт: бытовые условия Специальный стандарт: промышленные условия
EN 61000-4-2 = DIN VDE 0843 T2 = IEC 801-2 = IEC 1000-4-2	Электромагнитная совместимость (ЭМС) Разряд статистического электричества (= ESD)
ENV 50 140 = DIN VDE 0847 T3 = EC 801-3 = IEC 1000-4-3	Электромагнитная совместимость (ЭМС) ВЧ-облучение
EN 61000-4-4 = DIN VDE 0847 T4-4 = IEC 801-4 = IEC 1000-4-4	Электромагнитная совместимость (ЭМС) Быстрые переходные помехи (= всплеск)
EN 61000-4-5 = DIN VDE 0843 T5 = IEC 801-5 = IEC 1000-4-5	Электромагнитная совместимость (ЭМС) Ударное напряжение (= всплеск напряжения)
ENV 50 141 = DIN VDE 0843 T6 = IEC 801-6 = IEC 1000-4-6	Электромагнитная совместимость (ЭМС) ВЧ-помеха, связанная с линией

**Стандарт
продукции**

На стадии разработки находится стандарт продукции по ЭМС для электрических приводов (PDS = Power Drive Systems), который содержит все требования по ЭМС. Он действует как для промышленных, так и для бытовых условий (бытовые условия = "Первая среда"; промышленные условия = "Вторая среда"). Стандарт содержит:

- Термины и определения (1-я и 2-я среда / общая и ограниченная доступность /...) в гл. 3
- Общие требования (испытания / отчет об испытаниях / документация для пользователей) в гл. 4
- Требования к помехозащищенности в гл. 5
- Требования к излучению помех в гл. 6
- Минимальные требования по обеспечению мер безопасности в гл. 7
- Методы ЭМС + низкочастотные явления доп. А + В

Этот стандарт продукции по ЭМС после утверждения будет иметь приоритет над всеми требованиями специальных стандартов! Это означает, что в ближайшем будущем все действующие на сегодняшний день стандарты в области электрических приводов будут заменены этим стандартом.

6 Термины ЭМС

ESD	Electrostatic discharge → Электростатический разряд.
Бытовые условия	Место размещения установки с относительно низкими требованиями к помехозащищенности и высокими требованиями к излучению помех.
Внешние условия	Место размещения установки, смотри область применения.
Воздействие	<ul style="list-style-type: none"> Гальваническое воздействие: возникает, если несколько устройств используют одни и те же источники напряжения, провода и др. Индуктивное воздействие: возникает, если магнитное поле проводника с током индуцирует напряжение помехи на петле проводника. Емкостное воздействие: возникает, если через паразитную емкость соседних проводников передаются сигналы помехи.
Всплеск	Последовательность быстрых переходных помех с крутым фронтом.
Всплеск напряжения	Импульс повышенного напряжения с большим содержанием энергии в НЧ- и ВЧ-диапазонах; возникает, например, при ударе молнии.
Выходной дроссель	Для снижения уровня помех выходного кабеля. Дроссель вместе с паразитными емкостями образует фильтр низких частот, который скругляет прямоугольные импульсы выходного напряжения.
Выходной фильтр	см. Синусоидальный фильтр.
Гармоники	Гармонические составляющие основной волны, возникают при искажении синусоидальной основной волны.
Гармонические колебания	Гармонические колебания основной волны возникают при искажении синусоидальной формы основной волны.
Гибридный импульс	→ Всплеск напряжения
Диполь	Электрический диполь: Проводник образует передающую и приемную антенну для электрических полей. Магнитный диполь: Петля проводника образует передающую и приемную антенну для магнитных полей.
Затухание помех в экране	Затухание помех в экране показывает, в какой мере снизились помехи при применении экрана.
Коммутационные прерывания	Просадка сетевого напряжения при переключении тока с одного выпрямительного диода на входе сетевого напряжения на другой.
Модуль подавления электромагнитных помех	Базовый фильтр с сетевым фильтром и выходным дросселем.
Область применения	Подразделение мест размещения установки на промышленные и бытовые условия.
Паразитная емкость	Емкость, которая имеется, например, между двумя соседними проводами. При этом провода как бы образуют две пластины конденсатора.

Поверхность общего вывода земли	Общий вывод заземленной поверхности корпуса для всех приборов одной установки.
Подавление коммутационных помех	Мера по ослаблению радиопомех до установленных законом предельных значений.
Полное сопротивление	Сопротивление, зависящее от частоты.
Помехоустойчивость	Это соотношение между излучением помех и помехозащищенностью.
Промышленные условия	Место размещения установки с высокими требованиями к помехозащищенности и относительно низкими требованиями к излучению помех.
Противофазная помеха	Симметричная помеха. Преобладает при низких частотах, контур тока помехи замыкается имеющимися проводами.
Сетевой дроссель	Для сокращения коммутационных прерываний и сетевых гармоник; для снижения тока включения в сети; для повышения стойкости преобразователя при перенапряжениях.
Сетевой фильтр	Для защиты сети от напряжений помехи
Синусоидальный фильтр	Для подавления коммутационных помех, фильтрации шумов и снижения пиков тока утечки при групповом приводе. Синусоидальный фильтр образует из прямоугольных импульсов выходного напряжения синусоидальное напряжение.
Синфазная помеха	Несимметричная помеха. Возникает при высоких частотах, контур тока помехи замыкается паразитными емкостями.
Ток утечки	Ток, который стекает с проводов или приборов через паразитные емкости на землю.
Ферритовый сердечник	Для подавления высокочастотных синфазных помех.
Электростатический разряд (ESD)	Помеха с малой энергоемкостью и широким спектром частот, которая возникает при трении различных материалов между собой.
ЭМС	<p>Электромагнитная совместимость. Требования к устройствам:</p> <ul style="list-style-type: none"> • Возникновение электромагнитных помех должно быть ограничено для обеспечения нормального функционирования радио- и телекоммуникационных устройств и других приборов. • Устройства должны обладать достаточной устойчивостью к электромагнитным помехам для обеспечения нормального функционирования (цитата из закона по ЭМС).



7 Алфавитный указатель

А

Аналоговый сигнал 66

В

Взаимодействие 5
Воздействие 6
Воздействие помехи 61
ВЧ-диапазон 7
Выбор провода 57
Вывод кабеля 68
Выходной дроссель 79
Выходной фильтр 77

Г

Групповой привод 78
Группы проводов 57, 59, 60, 64, 67

Д

Действие экрана 64, 68
Диапазон высоких частот 7
Диапазон низких частот 7

З

Заземление 53, 60, 64, 69, 70
Затухание помех в экране 61, 62

И

Излучение помех 6, 78
Источник помех 5, 6

К

Кабельный канал 57, 64
Коммутационное прерывание 73
Компоненты для подавления помех 73
Компоненты установки 60
Конструкция электрошкафа 67

М

Место установки 69
Механизмы помех 5
Модуль подавления электромагнитных помех 81

Н

Напряжение сети 65
Несимметричная передача 66
Низковольтное питание 65
Низковольтные напряжения 65
НЧ-диапазон 7

О

Общий вывод заземления 64

П

Паразитная емкость 9
Передача сигнала 66
Питание от сети 65
План энергоснабжения 65
Пластмассовый корпус 63
Поверхность общего вывода заземленного корпуса 60
Подавление коммутационных помех 78
Подача питания 65
Подключение экрана 61, 63
Полное сопротивление 8
Полное сопротивление экрана 61, 62
Получатель помех 5
Помеха 6
Помехозащищенность 6
Помехоустойчивость 6
Прокладка проводов 61, 69, 70

Р

Разделение потенциалов 66

С

Сетевой дроссель 73, 76
Сетевой фильтр 76, 77
Сетевые гармоники 74
Сечение 8
Симметричная передача 66
Синусоидальный фильтр 77
Скручивание 59
Соединение с землей 55

Т

Типы проводов 58
Ток включения 75

У

Уровень помех 6
Устойчивость при перенапряжениях 74

Ф

Фильтр 69, 70, 71
Фильтрация шумов 78

Ц

Цепь заземления 53

Ч

Частотные характеристики 7
Чувствительность к помехам 66

Э

Экранирование 61, 64, 81
Электромагнитное воздействие 6
ЭМС 6

