

Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет

Д.В. Вилесов, А.А. Воршевский, В.Е. Гальперин, С.А. Сухоруков

**ОБЕСПЕЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ
В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ**

Учебник пособие

Санкт-Петербург
1988

ПРЕДИСЛОВИЕ

Обеспечение электромагнитной совместимости (ЭМС) в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) является важной частью общей проблемы обеспечения ЭМС технических средств на судах. Ее значимость определяется связанностью СЭЭС практически со всеми техническими устройствами, подверженными электромагнитному воздействию.

Обеспечение ЭМС подразумевает прежде всего сопоставление электромагнитной обстановки, в которой происходит работа каждого технического средства, и реакции этих средств на электромагнитные условия их работы». Общим принципом обеспечения ЭМС технических средств (в том числе и на судах) является определение совместимости каждой возможной в этой системе пары источник помех - рецептор [8]. В случаях, когда свойства рассматриваемой пары не допускают нормальной работы рецептора, возникает необходимость обеспечения совместимости в этой паре или ослаблением возмущения в источнике (и при его передаче к рецептору), или защитой самого рецептора от возмущения. Задача в системном плане оказывается сложной не только из-за множественности парных сочетаний в системе, но также из-за возможности воздействия электромагнитных возмущений с различными характеристиками и наложения во времени воздействий нескольких источников помех. Эти обстоятельства определяют вероятностный характер задачи обеспечения ЭМС.

Относительная новизна задач ЭМС в СЭЭС пока предопределяет постановку и решение их главным образом в детерминированном виде.

В условиях принятых определенных электромагнитных воздействий здесь рассматривается реакция типичных элементов электронного и электротехнического оборудования.

От характера реакции зависит допустимость сочетания пары источник помех - рецептор или необходимость в технических мероприятиях по обеспечению их совместимости. Таким образом, проектирование и эксплуатация СЭЭС, каждая из которых является комплексом источников помех, линий их передачи и рецепторов, требует владения не только методами прогнозирования электромагнитной обстановки [2], но и знания свойств элементов как рецепторов помех. Необходимость обеспечения СЭЭС при определенном, заданном составе оборудования СЭЭС и режимах его работы обуславливает использование известных и разработку новых технических мероприятий по ослаблению помех в генерирующих источниках и при кондуктивном и пространственном их распространении.

При необходимости более подробного изучения отдельных частных вопросов проблемы обеспечения ЭМС следует использовать специальные работы, подборка которых, по возможности, применительно к судовым условиям дана в перечне литературы [1]-[26]

1. ВЛИЯНИЕ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ НА СУДОВОЕ ЭЛЕКТРОННОЕ И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОЕ ОБОРУДОВАНИЕ.

1.1. Элементная база

Воздействующие на элементы электросхем импульсы помех (ИП) имеют сложную форму, различную пиковую мощность, длительность импульса и, следовательно, в них наделяется различная энергия. Наиболее часто при анализе устойчивости элементной базы к воздействию импульсных помех определяют минимальную энергию, необходимую для повреждения элементов, деградации их или иных способов нарушения рабочих функций. Кроме того, используют такие параметры, как пиковая мощность, ток, напряжение. Наиболее полно эти параметры для различных элементов приведены в [1].

Полупроводниковые приборы особенно уязвимы к воздействию импульсных помех по питающим и информационным цепям. Основной механизм повреждения этих приборов связан с местным нагревом материалов. Для р-п -переходов, смещенных импульсами в область лавинного пробоя, особенно важен так называемый вторичный пробой, который ведет к деградации прибора.

Диод. Импульс напряжения в прямом направлении может включить диод, если он имеет достаточно высокое напряжение и достаточно большую длительность, для того чтобы нейтрализовать обратную смещенную внутреннюю (паразитную) емкость и зарядить ее. Диод может быть поврежден, если ток, созданный прямым переходным процессом, превышает номинальный импульсный ток. Подобным образом диод может выключаться импульсным напряжением, если его величина и длительность достаточны, чтобы блокировать прямой ток. Диод может быть поврежден если обратное импульсное напряжение вызовет пробой полупроводниковой структуры.

Транзистор. Обратносмещенный транзистор может быть приведен в активную область работы импульсом напряжения между базой и эмиттером при наличии достаточного заряда, чтобы нейтрализовать обратносмещенную емкость база – эмиттер, а затем зарядить ее в прямом направлении. Более мощный импульс может перевести транзистор в зону насыщения. При превышении допустимых номинальных импульсных токов и напряжений транзистор повреждается.

Тиристор. Тиристор может включаться различными методами:

- положительным импульсом между управляющим электродом и катодом;
- скоростью нарастания положительного напряжениями (du/dt) между анодом и катодом, превышающей допустимую;
- прямым напряжением между анодом и катодом, превышающим номинальное.

Тиристоры выключаются с помощью уменьшения их анодао-катодного тока ниже уровня удержания приложением обратного напряжения на клеммы анода и катода. Поскольку тиристор является устройством, управляемым импульсами, требуется минимум энергии импульсной помехи, чтобы ее выключить или включить. Тиристор может быть поврежден импульсной помехой в контуре управляющий электрод - катод или чрезмерным током в прямом направлении или чрезмерным напряжением в обратном на правлении. Если помеха воздействует на цепь анод - катод, то тиристор может быть поврежден в прямом направлении либо чрезмерным

током, либо di/dt , когда тиристор включился, либо чрезмерным напряжением, которое образует в полупроводниковой структуре пробой по поверхности. Разумеется, для повреждения в цепи анод - катод требуется большая энергия по сравнению с цепью управления.

Микросхемы. В состав элементов микросхем входят транзисторы и диоды, поэтому сказанное выше для данных элементов распространяется и на микросхемы.

В табл. 1.1 даны некоторые характерные энергетические уровни повреждения для полупроводниковых приборов при действии на них прямоугольного импульса длительностью 1 мкс.

Энергия деградации	
Тип прибора	Энергия, мкДж
Точечно-контактный диод	0,7-12
Интегральная микросхема	2-600
Маломощный транзистор	20-1000
Мощный транзистор	$10^3-0,8 \cdot 10^6$
Стабилизатор	10^3-10^6
Выпрямительный диод	10^2-10^6
Тиристор	$3 \cdot 10^3-4 \cdot 10^6$

Как видим, для деградации ряда весьма распространенных в современной аппаратуре компонентов достаточно энергии очень малого уровня. При длительности импульса 1 мкс для повреждения интегральных схем различных типов нужны следующие значения энергии: для схем ТТЛ - от 2 до 300 мкДж, для схем РГЛ - от 10 до 500 мкДж, для схем ДТЛ - от 10 до 200 мкДж, для схем ЭСЛ от 100 до 600 мкДж, для схем МОП - от 8 до 150 мкДж и для линейных интегральных схем - от 2 до 120 мкДж.

Высоковольтные полупроводниковые приборы (например, полевые) и полупроводниковые приборы с высоким пробивным напряжением характеризуются наличием критического напряжения для повреждения, которое приводится в технической документации на них. Мощные тиристоры также имеют в технической документации данные по устойчивости к помехам.

Электролитические конденсаторы (в особенности танталовые) с малым номинальным напряжением по постоянному току повреждаются при энергиях, сравнимых с энергией, вызывающей повреждения в полупроводниках. Повреждения в танталовых конденсаторах происходят при энергии импульса от 10^{-2} до 10^6 Дж, характер повреждения - от уменьшения сопротивления утечки до разрушения конденсатора.

Резисторы относительно более стойки к действию импульсных помех, чем

другие элементы. Для коротких импульсов основной механизм повреждения - это возникновение пробоя или дуги вне или внутри прибора, ведущих к уменьшению пробивного напряжения, уменьшению сопротивления и выходу резистора из строя из-за перегорания его токопроводящего по крытия. В табл. 1.2 приведены данные о максимальном безопасном напряжении и пиковой мощности для резисторов различных типов и номиналов.

Таблица 1.2
Результаты испытания резисторов при воздействии на них импульсных напряжений длительностью 20 мкс

Тип резистора	Номинальное сопротивление, Ом	Минимальное безопасное напряжение, кВ	Мощность импульса, Вт
C5-16-5Вт	50	10	2000000
C-5-10Вт	3000	20	100000
МЛТ 0,125	100	0,2	400
МЛТ 0,125	5600	1	160
МЛТ 0,25	100	0,15	220
МЛТ 0,25	15000	0,7	330
МЛТ 0,5	100	0,4	1600
МЛТ 0,5	75000	1,6	300
МЛТ 1,0	100	0,6	4000
МЛТ 1,0	100000	3	1000
МЛТ 2,0	100	0,6	4000
МЛТ 2,0	10000	4	5000

Уровень повреждений других элементов зависит обычно от материала, конструкции, размеров и параметров. Об устойчивости некоторых из них можно судить по данным табл. 1.3.

Таблица 1.2
Результаты испытания резисторов при воздействии на них импульсных напряжений длительностью 20 мкс

Тип резистора	Номинальное сопротивление, Ом	Минимальное безопасное напряжение, кВ	Мощность импульса, Вт
C5-16-5Вт	50	10	2000000
C-5-10Вт	3000	20	100000
МЛТ 0,125	100	0,2	400
МЛТ 0,125	5600	1	160
МЛТ 0,25	100	0,15	220
МЛТ 0,25	15000	0,7	330
МЛТ 0,5	100	0,4	1600
МЛТ 0,5	75000	1,6	300
МЛТ 1,0	100	0,6	4000
МЛТ 1,0	100000	3	1000
МЛТ 2,0	100	0,6	4000
МЛТ 2,0	10000	4	5000

Таблица 1.3
Минимальная энергия, вызывающая наблюдаемые остаточные повреждения

Тип прибора	Минимальная энергия, Дж	Неисправность
Реле	$2 \cdot 10^{-3} - 10^{-1}$	Сваривание контактов
Микроамперметр	$3 \cdot 10^{-3}$	Заедание измерительной системы
Пирозапах	$2 \cdot 10^{-5} - 8 \cdot 10^{-4}$	Зажигание
Генераторная лампа	$10^{-4} - 1$	Нарушение генерации

Необходимо отметить, что при поиске причин повреждения электрооборудования выявление дефектов элементной базы из-за воздействия импульсных помех зачастую затруднительно. Подобные дефекты обыкновенно приводят к вторичным эффектам, маскирующим истинную причину повреждения. Например, сопротивление резистора после воздействия импульсной помехи может значительно снизиться. Это может привести к повреждению других чувствительных элементов схем энергией, прошедшей через такой резистор уже после окончания действия импульсной помехи. К аналогичным последствиям может привести несанкционированное отпирание транзистора или транзистора под влиянием импульсной помехи. В последнем примере сам полупроводниковый прибор может вообще не изменить своих характеристик.

1.2. Цифровые устройства управления

Цифровые устройства находят все более широкое применение в судовой электротехнике, в измерительных, информационных и управляющих системах, в радиоэлектронной аппаратуре различного назначения. Элементная база цифровых устройств включает в себя запоминающие и формирующие цифровые микросхемы, сбой в работе которых может вызвать даже одиночный импульс напряжения. Импульсные помехи в питающей сети имеют энергию на 4-6 порядков больше энергии полезных сигналов и способны нанести в цепях питания, заземления и входных цепях микросхем напряжения, достаточные для их ложного переключения.

Помехоустойчивость цифровых микросхем к помехам на входах оговаривается в технических документах и определяет допустимое напряжение помехи, длительность которой больше времени переходных процессов (статическая помехоустойчивость). Обычно эта величина равна 0,3-0,8 В. Динамическая помехоустойчивость определяет допустимое напряжение кратковременных помех и выше статической из-за влияния инерционных свойств микросхем. При уменьшении длительности импульсов допустимое напряжение возрастает (рис.1.1). Появление наведенных напряжений помехи вдоль общей шины (земли) микросхем и на шинах питания также может привести к их ложному переключению, что характеризуется соответственно помехоустойчивостью схемы по шине "земля" и "питание" (см.рис.1.1). Напряжения разной полярности неодинаково влияют на работу конкретных микросхем. В частности для RS -триггера на ТТЛ схемах наиболее опасным является случай воздействия помехи, приводящей к уменьшению напряжения питания логического элемента, находящегося в состоянии логического нуля. При возрастании нагруженности элементов статическая помехоустойчивость по шине "земля" уменьшается. Экспериментально установлено, что если амплитуда помехи на шинах питания микросхемы ТТЛ не превышает 0,8 В, то, как правило, не наблюдается сбоев в ее работе. Однако импульсная помеха малого уровня способна изменить время задержки распространения сигнала при переключении элемента, что при неблагоприятном сочетании состояний соединенных элементов может также привести к сбою в работе устройства.

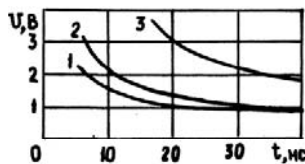


Рис.1.1. Примерный вид графиков помехоустойчивости цифровых микросхем к импульсным напряжениям, действующим вдоль обвязки (земли) (1), на входе (2) и на шинах питания микросхем (3)

Напряжения импульсных помех в цепях цифровых микросхем вызываются импульсными напряжениями (токами) в электрической сети и в основном определяются параметрами сетевых помех, емкостными, индуктивными связями

целей с сетью сопротивлением цепей (рис.1.2). Источник импульсной помехи $u_1(t)$ с внутренним сопротивлением R_B , индуктивностью L_B через паразитную емкость связи C вызывает в цепи с индуктивностью $L_П$ и параметрами заземления L_3, R_3 импульсное напряжение $u_2(t)$, которое может быть рассчитано путем анализа переходного процесса в цепи. Амплитуда импульса в цепи не превышает величины $U_2 = U_1 L_П / (L_B + L_3 + L_П)$ а длительность значения $t_2 = (L_П + L_B + L_3) / (R_B + R_3)$ [9].

Импульс с пологим фронтом вызывает наводки с меньшей амплитудой U_2 . Напряжение в цепи, обусловленное индуктивной связью, пропорционально скорости изменения тока в сети. Для устройств, выполненных на микросхемах ТТЛ, параметры таковы, что длительность t_2 составляет $10^{-8} \dots 10^{-7}$ с и форма напряжений на шинах питания имеет вид, приведенный на рис.1.3. Таким образом, в цепях микросхем наводятся напряжения, соответствующие во времени фронтам сетевых помех. Наибольшая амплитуда наводок наблюдается при воздействии импульсов с коротким фронтом и максимальной амплитудой (максимальной скоростью изменения напряжения и тока). Длитель-

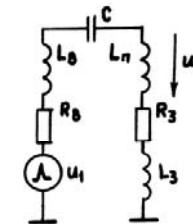


Рис.1.2. Упрощенная схема связи питающей сети и цепей цифровых микросхем

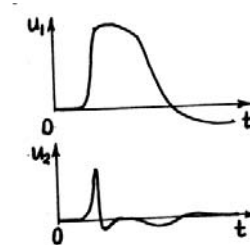


Рис.1.3. Напряжение импульсных помех в электрической сети u_1 и напряжение u_2 , наведенное в цепях цифровых микросхем

ность импульсов имеет существенно меньшую значимость. Помехозащищенность устройства в целом по отношению к импульсным помехам в электрической сети определяется как его способность сохранять качество функционирования при воздействии помех и оценивается как отношение частоты сбоев к средней частоте

следования помех. На практике помехозащищенность оценивают за зависимостью вероятности сбоев от амплитуды сетевых импульсных помех с фиксированными длительностью, фронтом и полярностью. Часто эта характеристика (рис.1.4) близка к пороговой и может быть описана пороговым значением амплитуды, при котором возникают постоянные сбои, и вероятностью сбоев при меньших амплитудах. Значение порога для цифровых устройств, спроектированных без учета ЭМС, может составлять десятки вольт. При правильном применении методов и средств помехозащиты цифровые устройства удовлетворительно работают при воздействии в питающей сети импульсов напряжения с амплитудой до нескольких тысяч вольт.

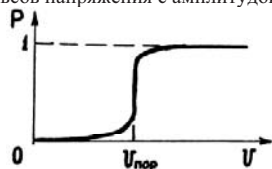


Рис.1.4. Зависимость вероятности сбоя цифрового устройства от амплитуды импульсных помех в питающей сети

1.3. Аналоговые устройства управления

Аналоговые устройства представляют собой совокупность полупроводниковых приборов и пассивных электрических цепей. Из предыдущих параграфов известно, что восприимчивость активных полупроводниковых приборов к импульсным помехам в значительной степени зависит от величины напряжения, силы тока импульсной помехи или от ее энергии. С другой стороны, пассивные элементы RLC цепей намеренно или ненамеренно настроены на определенные частоты. Когда импульс помехи налагается на клеммы электронного устройства, он искажается, ослабляется или усиливается, вызывает резонансы в RLC цепи прежде, чем помеха достигает активных приборов. Две одинаково сконструированные схемы могут иметь различные частотные характеристики из-за непреднамеренной разницы в физическом расположении отдельных узлов. Поэтому импульсная помеха, спектр которой весьма широкий и сплошной, может вызвать в схеме множественные резонансы.

Восприимчивость аналогового контролирующего устройства является функцией его нормальной точности, т.е. отклонения или допустимого отклонения на выходе устройства без каких либо воздействующих импульсных помех. До тех пор, пока выход контролирующего устройства остается в пределах нормального допустимого отклонения в присутствии импульсной помехи, устройство считается невосприимчивым к помехе и ее уровню. Тогда становится очевидным, что электрическая система, содержащая как пассивные элементы RLC, так и активные полупроводниковые приборы, имеет очень сложную восприимчивость к импульсным помехам.

На рис.1.5 в качестве примера аналогового устройства показан ПИ-регулятор - типовой узел аналоговых систем, выполненный на базе операционного усилителя. Если напряжение помехи приложено ко входу регулятора (точки 2, 4), то в кривой выходного напряжения $U_{вых}$ ПИ-регулятора появляется ошибка $\Delta u_{вх}$, как это показано на рис. 1.6. Для интеграторов навигационных систем судна такая ошибка может привести к неточному определению места судна, для интеграторов тайме ров - к временной ошибке.

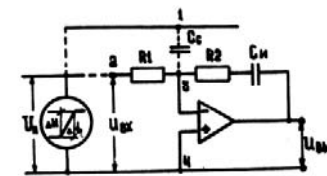


Рис.1.5. Воздействие импульсной помехи на операционный усилитель, реализующий передаточную функцию ПИ-регулятора

ПИ-регулятор может подвергнуться действию емкостных помех из-за наличия конструктивной емкостной связи C_c между входом 3 операционного усилителя и соседним проводником 1, на котором возникают изменения напряжения $\Delta u/\Delta t$. Тогда, учитывая, что комплексные сопротивления в обратной связи и во входной цепи усилителя равны соответственно $Z_{ос} = R_2 + 1/(pC_n)$, а также при $C_n \gg C_c$ и $u_n(p)$

$=(\Delta u_n / \Delta t) \cdot 1/p^2$, получим

$$u_{\text{вых}}(p) = - \left(\frac{\Delta u_n}{\Delta t} \right) \frac{C_n R_2}{p},$$

или во временной области

$$u_{\text{вых}} = - R_2 C_n (\Delta u_n / \Delta t).$$

В связи с этим при крутых фронтах напряжения $\Delta u_n / \Delta t$ на проводнике, подвергающемся действию помех, могут возникать значительные искажения выходного сигнала регулятора. Как показано на рис.1.6 (полярность задана условно), в этом случае выходное напряжение регулятора может кратковременно выходить даже за пределы напряжения насыщения операционного усилителя, так как в соответствии с формулой $u_{\text{вых}}$ не определяется коэффициентом усиления операционного усилителя. При этом перегружаются последующие каскады устройства. Суммарное воздействие импульсной помехи как по входу аналогового устройства, так и через конструктивные RLC-элементы может привести к еще большему искажению полезных сигналов и тем самым нарушить нормальное функционирование устройства.

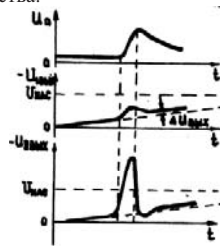


Рис. 1.6. Временные диаграммы напряжения U_n и выходного напряжения $U_{\text{вых}}$ ПИ-регулятора

1.4. Измерительные устройства

Для измерения режимных параметров в СЭС (ток, мощность, напряжение и т.п.) используются различные измерительные приборы и измерительные преобразователи систем автоматического управления и контроля.

Поскольку процесс измерения осуществляется непрерывно и связан с определением величин за некоторый интервал времени (обычно полупериод или период изменения), на точность измерения, являющуюся главным показателем качества работы измерительных устройств, определяющее влияние оказывают периодические ИП. Увеличение погрешности измерений может оказаться недопустимым, в первую очередь, для систем автоматического управления, которые поддерживают требуемое качество электроэнергии в СЭС и обеспечивают, таким образом, работоспособность потребителей.

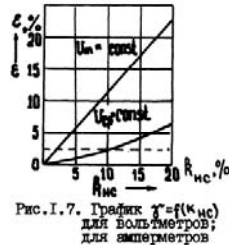
1.4.1. Измерительные приборы.

Измерение электрических величин в СЭС осуществляется, в основном, с помощью непосредственной оценки по кривым токов и напряжений, которые при ИП становятся несинусоидальными и содержат широкий спектр гармонических составляющих повышенной частоты [2]. Это приводит к появлению дополнительной погрешности, которая может носить частотный (приборы содержат элементы с сопротивлениями, зависящими от частоты) и методический характер [12]. Величина дополнительной погрешности оценивается по соотношению $\gamma = [(A_c - A_n)/A_c] 100\%$, где A_c , A_n значение измеряемой величины при синусоидальной и несинусоидальной форме кривой, и зависит от принципа действия прибора, т.е. от его системы, а также от величины, которую измеряет прибор (ток, напряжение и т.п.).

На рис. 1.7 показаны значения γ при типичных периодических ИП, возникающих при работе тиристорного выпрямителя, в функции от коэффициента несинусоидальности $K_{нс}$ для приборов электродинамической системы Д128 и электромагнитной системы Э59, имеющих одинаковый класс точности 0,5 (показан штрихпунктиром)

Многообразие систем и измеряемых величин щитовых и переносных электроизмерительных приборов с СЭС еще требует проведения работ по оценке возможности их использования при периодических ИП. Показано, что в рамках одной системы наименьшую дополнительную погрешность имеют амперметры и частотомеры, большие погрешность вольтметров и ваттметров, а максимальную погрешность дают фазометры, для которых она в значительной степени является методической, поскольку понятие "сдвиг фаз" по отношению к несинусоидальным кривым справедливо только для гармоник с одинаковыми порядковыми номерами, а значение коэффициента мощности не соответствует значению $\cos\phi$ при синусоидальных токах и напряжениях. При прочих равных условиях погрешность у приборов электромагнитной системы меньше, чем у электродинамической и ферродинамической систем, а наибольшая погрешность у приборов выпрямительной системы, которые дают точные показания только при постоянном и равном 1,11 коэффициенте формы кривой измеряемой величины. Дополнительная погрешность в ряде случаев (особенно при $R_{нс} > 10$) может превышать класс точности прибора. Поэтому для решения вопроса о применимости

того или иного прибора в условиях периодических ИП требуется предварительная оценка погрешности измерений. Такая оценка может быть получена расчетным путем, если известны зависимости частотной и методической погрешности [12], либо опытным путем сравнением с показаниями образцового прибора.



1.4.2. Измерительные преобразователи систем автоматического управления и контроля.

Периодические ИП воздействуют на системы автоматического управления и контроля по цепям питания и информационным каналам. При достаточной защищенности цепей питания и информационным каналам. При достаточной защищенности цепей питания и информационным каналам. При достаточной защищенности цепей питания и информационным каналам. При достаточной защищенности цепей питания и информационным каналам. При достаточной защищенности цепей питания и информационным каналам. При достаточной защищенности цепей питания и информационным каналам.

1.4.2.1. Автоматические регуляторы напряжения (АРН) синхронных генераторов (СТ).

Точность АРН определяется в основном погрешностью измерения отклонения напряжения в измерительном органе корректора напряжения (КН). При синусовальном напряжении СТ не имеет значения, отклонения какого параметра напряжения - амплитудного U_m , среднего $U_{ср}$ или действующего U - измеряется в КН, так как эти параметры связаны между собой постоянными коэффициентами формы и амплитуды. Поэтому измерение и последующая стабилизация любого из указанных параметров автоматически обеспечивает стабильность остальных. В связи с этим, исходя при прочих равных условиях из простоты реализации, в измерительных органах, применяемых в КН АРН судовых СГ [13], определяется отклонение $U_{ср}$ (корректор типа КН-2) или U_m (КН-6), в то время, как потребители требуют стабилизации U , причем независимо от того, синусовально напряжение СГ или нет [14]. При появлении периодических ИП коэффициенты формы и амплитуды напряжения СТ становятся переменными величинами, что делает невозможным одновременную стабилизацию U , U_m $U_{ср}$ и приводит к появлению методической погрешности измерения и стабилизации U , $\epsilon = [(U - U_{н}) / U_{н}] \cdot 100\%$, где $U_{н}$ - номинальное значение действующего напряжения. Модули предельных значений ϵ , показанные на рис.1.8 в функции от $R_{НС}$, могут

заметно превышать допустимую величину 2,5%, что делает необходимым измерение в КН отклонения только действующего значения напряжения СТ. Влияние периодических ИП на процессы измерения в АРН приводит и к появлению значительной неравномерности распределения реактивных нагрузок между параллельно работающими СГ. Это объясняется большой методической погрешностью определения реактивного тока СТ блоком параллельной работы (БПР) АРН, который обеспечивает статизм внешней характеристики СГ введением напряжения, пропорционального значению $I \sin \phi$, в напряжение СГ, сумма которых подается на вход измерительного органа КН [13]. Методическая погрешность БПР может достигать значений 20-25% из-за несоответствия действительной реактивной нагрузки СГ при периодических ИП величине $I \sin \phi$, что приводит к превышению допустимой неравномерности реактивной нагрузки 10% на величину 5-7%. В этих условиях необходимо изменение принципа формирования управляющего сигнала в БПР [15].

1.4.2.2. Автоматические синхронизаторы.

Применяемые в СЭЭС для определения момента включения СГ на параллельную работу в основном автоматические точные синхронизаторы (УСГ-1П, УСГ-35) основаны на использовании выпрямленной огибающей U_s напряжения биений $u_s = u_1 - u_2$, где u_1, u_2 - мгновенные значения напряжений сети и подключаемого СГ [16]. Напряжение u_2 чаще всего синусоидально, так как обычно СГ включается на параллельную работу с холостого хода.

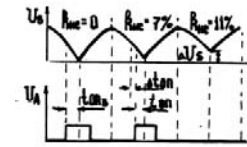


Рис. 1.9. Влияние периодических ИП на работу авто-синхронизатора

Периодические ИП в напряжении u_1 оказывают существенное влияние на работу автосинхронизатора: при $R_{НС} < 5\%$ синхронизатор выполняет свои функции, формируя выходное напряжение U_A на включение генераторного автомата за фиксированное время опережения $t_{опз}$ до момента $U_s = 0$ (рис.1.9); при $R_{НС} = 5...10\%$ время опережения $t_{опз} < t_{опз}$ и СГ включается на параллельную работу при $U_s \neq 0$, с отступлением от идеальных условий синхронизации; при $R_{НС} = 10...15\%$ на всем периоде из менения $U_s \geq \Delta U_s$ (см.рис.1.9) и возникает за прет на синхронизацию, хотя выполняются все ее условия, в том числе $U_1 = U_2$. Эти явления объясняются методической погрешностью блока контроля напряжения и блока времени опережения автосинхронизатора. При $R_{НС} > 15\%$ работа синхронизатора полностью нарушается еще и из-за влияния периодических ИП через цепи питания его блоков.

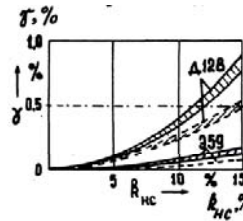


Рис. I.8. Методическая погрешность измерения и стабилизация напряжения

Методическая погрешность блока контроля напряжений, возникающая из-за переменности коэффициента амплитуды напряжения сети и влияния высших гармоник на величину U_s (кривая U_s не имеет нулевых значений при периодических ИП), может быть сведена к допустимой, если кривая U_s будет формироваться по разности первых гармоник напряжений u_1 и u_2 , что легко обеспечивается фильтрацией [17]. Методическая погрешность при формировании $t_{он}$ в блоке времени опережения при периодических ИП в кривой u_1 обусловлена теми же причинами, что и при контроле напряжений, и имеет вид $\Delta t_{он} = t_{онз} - t_{он} = R_{НС} / \omega_s$ где ω_s - разность угловых частот первой гармоники напряжения u_1 и u_2 . Расчет показывает, что уже при $R_{НС} = 5\%$ и $\omega_s < 0,35$ Гц $\Delta t_{он}$ превышает допустимое значение 0,02 с. Таким образом, при периодических ИП в синхронизаторе необходимо отказаться от принципа использования огибающей напряжения биений U_s для определения $t_{он}$, так как фильтрация здесь неприменима из-за фазовых погрешностей.

1.4.2.3. Датчики активного тока судовых устройств автоматики.

Датчики активного тока (ДАТ),использующиеся при определении загрузки СГ активной мощностью в устройствах распределения нагрузки при параллельной работе СГ (системы УРНЧ, УРМ), включения резервного агрегата УВР и разгрузки СГ при перегрузках УРГ, несмотря на различие схемных решений [16], основаны на форсировании выходного сигнала по соотношению

$$V_g = k I \cos \varphi,$$

где R - коэффициент передачи; φ - угол сдвига фаз между синусоидами тока и напряжения СГ. При синусоидальности форм напряжения и тока и постоянстве напряжения эта величина соответствует активной мощности нагрузки. Поскольку при периодических ИП величина φ имеет смысл только для гармоник тока и напряжения с одинаковыми номерами, а понятие "коэффициент мощности" не соответствует значению $\cos \varphi$, величина активной мощности, измеренная ДАТ P_g , будет отличаться от точного значения

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt,$$

где u и i - мгновенные значения напряжения и тока СГ за период изменения T . Существенная величина методической погрешности ДАТ системы УРМ-35, определяемая соотношением

$\delta = [(P_g - P) / P] 100\%$ и показанная на рис.1.10 для различных значений $R_{НС}$, приводит к недопустимой (более 10%) неравномерности распределения активных нагрузок между параллельно работающими СГ при периодических ИП [15]. В этих условиях необходимо пересматривать принципы измерения, положенные в основу построения ДАТ.

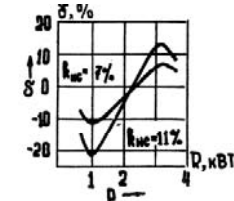


Рис. I.10. Зависимость погрешности ДАТ от измеряемой мощности

Рассмотренные примеры, естественно, неисчерпывают всех особенностей появления методической погрешности измерительных устройств в СЭЭС, которая также существенна для системы фазового управления тиристорами [18] или для систем контроля сопротивления изоляции. Поэтому при решении вопроса о применимости измерительного устройства в условиях ИП необходимо в каждом конкретном случае определять его методическую погрешность.

1.5. Энергетическое оборудование

Определяющее влияние на работу энергетического оборудования в СЭЭС, такого как электрические машины, трансформаторы, полупроводниковые преобразователи, распределительные устройства, кабели, электротермические потребители, батареи конденсаторов и источники света, оказывают периодические ИП. Это проявляется в ускоренном старении изоляции оборудования из-за увеличения диэлектрических потерь, увеличении электрических потерь от токов высших гармоник, росте шума и вибрации и изменении характеристик из-за нестабильности параметров несинусоидального напряжения.

1.5.1 Синхронные генераторы.

Несинусоидальность тока СГ приводит к дополнительным потерям в стали и меди статора и ротора из-за токов высших гармоник, что обуславливает повышение температуры нагрева элементов СГ, которая не должна превышать допустимую. Поскольку элементы различных судовых СГ имеют разный тепловой запас, то исходя из допустимой температуры нагрева наиболее напряженного элемента необходимо снижение нагрузки СГ при периодических ИП $\Delta S = [(S_n - S_g) / S_n] 100\%$, S_n , S_g - полная номинальная и допустимая по тепловому режиму мощности СГ, также оказывается различным [19]. Зона возможных значений для генераторов серии МСК показана на рис. 1.11, где видно, что максимальное значение ΔS при $S_n = S_n$ не превышает 10%.

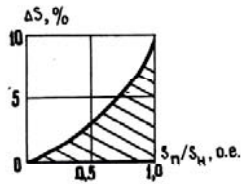


Рис. 1.11. Необходимое снижение нагрузки синхронного генератора

1.5.2 Асинхронные двигатели.

При питании АД несинусоидальным напряжением возрастает его нагрев из-за дополнительных потерь. Поэтому по тем же соображениям, что и для СГ, необходимо снизить его нагрузку на валу на величину мощности $\Delta P = [(P_n - P_g) / P_n] 100\%$ в зависимости от величины R_{nc} питающего напряжения. Как видно из рис. 1.12, требуемое снижение мощности трехфазных короткозамкнутых судовых АД при условии стабильности действующего значения первой гармоники питающего напряжения U_1 (или U , так как разница между U_1 и U для рассматриваемого случая пренебрежимо мала вплоть до значений $R_{nc} = 20\%$) невелика и составляет от 3,5 до 6% при $R_{nc} = 20\%$ в зависимости от конструктивных особенностей АД. Если же стабилизируется U_m или U_{cp} , характеристики АД существенно изменяются, а ΔP , например при $U_m = const$ и $R_{nc} = 20\%$, может достигать значений до 40%.

Периодические ИП при $U_1 = const$ (или $U = const$) пренебрежимо мало влияют

на усредненный номинальный и пусковой вращающие моменты АД, однако из-за взаимодействия полей высших гармоник тока с основным полем в воздушном зазоре АД возникает пульсирующий момент, который приводит к появлению существенной вибрации, особенно в низкочастотной области спектра [20]. Так, при изменении R_{nc} от 1 до 12% (рис. 1.13) увеличение уровней виброускорений на частотах 300 и 600 Гц составляет 10-25 дБ, превышая для ряда АД допустимые значения, что требует принятия специальных мер.

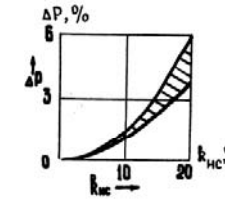


Рис. 1.12. Необходимое снижение нагрузки асинхронного двигателя

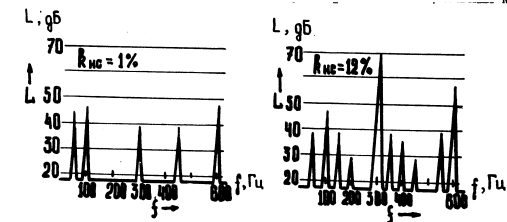


Рис. 1.13. Спектрограммы уровней вибрации по ускорению АД

1.5.3 Полупроводниковые преобразователи (ПП).

Применяемые на судах многочисленные трехфазные и однофазные ПП при ИП изменяют свои выходные параметры (в основном неуправляемые ПП) или допускают сбои в работе (управляемые тиристорные и транзисторные ПП). Устранение сбоев в работе управляемых ПП обеспечивается рациональным построением их систем управления [18], изменение же выходных параметров неуправляемых ПП зависит от величины R_{nc} несинусоидального напряжения на его входе и параметра этого напряжения, стабилизируемого АРН [21]. На рис. 1.14 показаны модули максимально возможных отклонений постоянной составляющей выпрямленного напряжения холостого хода неуправляемых выпрямителей $\Delta U_{d0} = [(U_{d0} - U_{d0n}) / U_{d0n}] 100\%$, где U_{d0n} , U_{d0} - значения при синусоидальном входном напряжении и при искаженном периодическими ИП. Для трехфазных выпрямителей при $U = const$ $\Delta U_{d0} \leq 5\%$, а для однофазных при тех же условиях $\Delta U_{d0} > 5\%$ при $R_{nc} > 12\%$. В этих случаях необходимо либо оговаривать условия работы нагрузки, либо заменять неуправляемые выпрямители на

управляемые. Увеличение пульсаций выходного напряжения ПП при периодических ИП компенсируется фильтрацией.

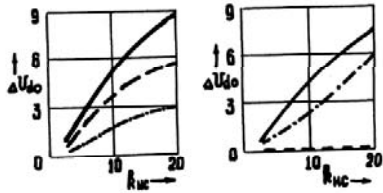


Рис.14. График $\Delta U_{до} = f(R_{нс})$ для выпрямителей:
 α - трехфазные; δ - однофазные

1.5.4 Источники света и нагревательное оборудование.

Эти потребители электроэнергии мало чувствительны к воздействию периодических ИП, за исключением влияния нестабильности параметров питающего напряжения. На рис.1.15 показаны изменения срока службы и светового потока. При выполнении условия $U = \text{const}$ изменение их параметров находится в допустимых пределах. Если же АРН СГ стабилизируется $U_{ср}$, U_m (а для источников света даже U_1), то выходные параметры оборудования существенно зависят от $R_{нс}$. Так, потребляемая нагревательными элементами мощность (а значит, и количество отдаваемой теплоты) при $U_m = \text{const}$ и $R_{нс} = 20\%$ изменяется на 12-25%, что превышает допустимое значение 10%. При $R_{нс} \leq 20\%$ срок службы уменьшается на 30%. При стабилизации U_m и $U_{ср}$ срок службы ламп может уменьшаться еще больше, что требует жесткого выполнения условия $U = \text{const}$. При стабилизации $U_{ср}$ срок службы ламп может уменьшаться еще больше, что требует жесткого выполнения условия $U = \text{const}$.

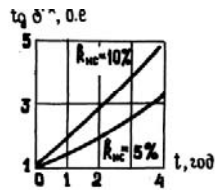


Рис.1.15. Изменение срока службы и светового потока лампы накаливания

1.5.5 Кабели, трансформаторы и токовые распределительные устройства.

Дополнительные потери от токов высших гармоник здесь не оказывают существенного влияния на тепловой режим, а влияние периодических ИП связано в основном с ускоренным старением изоляции токоведущих частей (что происходит и во всем оборудовании в СЭС). Отклонение формы напряжения от синусоидальной при ИП оказывает заметное влияние на возникновение и

протекание ионизационных процессов в изоляции [22], которые, воздействуя на местные дефекты, приводят к снижению электрической прочности и возрастанию диэлектрических потерь. В связи со сложностью физико-химических процессов и небольшим объемом статистического материала, достоверные количественные оценки этого процесса в СЭС пока отсутствуют.

1.5.6. Конденсаторы.

Высшие гармоники в напряжении значительно ускоряют процессы старения диэлектрика, чему способствует и дополнительный нагрев конденсаторов, вызванный протеканием высших гармоник тока. Оценка этих процессов производится по изменению коэффициента диэлектрических потерь во времени $\text{tg}\delta^* = \text{tg}\delta_t / \text{tg}\delta_0$, $\text{tg}\delta_t$ – значения в начале и спустя годы эксплуатации (рис.1.16). Через 2 года эксплуатации, даже при $R_{нс} = 5\%$, $\text{tg}\delta$ увеличивается в 2 раза, что сильно уменьшает срок службы конденсаторов (для различных типов конденсаторов количественные соотношения будут, естественно, различными). Особенно это необходимо учитывать при выборе конденсаторов фильтрокомпенсирующих устройств [19].

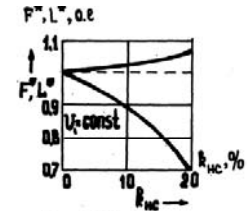


Рис.1.16. Изменение диэлектрических потерь конденсаторов во времени

2. СНИЖЕНИЕ УРОВНЕЙ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ В СЭЭС

2.1. Подавление помех в источнике

2.1.1. Снижение помех при работе полупроводниковых преобразователей.

Периодические ИП, генерируемые ПП в питающую сеть, представляют собой широкий спектр гармонических составляющих, что существенно осложняет задачу их минимизации во всем частотном диапазоне. Применяемые способы уменьшения периодических ИП дают возможность компенсации их гармонических составляющих только в определенной части спектра, не снижая радикальным образом такой интегральный показатель качества напряжения сети при ИП, как $R_{НС}$. Эти способы можно условно разделить на две группы: уменьшение гармоник в низкочастотной и высокочастотной областях спектра периодических ИП.

2.1.1.1. Увеличение пульсности ПП.

Если в СЭЭС необходимо использовать ПП, мощность которых соизмерима с мощностью СГ, то их целесообразно выполнять не по шестипульсовой (трехфазной мостовой), а по двенадцатипульсовой (двухмостовой) схеме [23]. Входной трансформатор ПП в этом случае при первичной обмотке, соединенной звездой, имеет две вторичные обмотки, нагруженные на вентильные мосты, одна из которых соединена звездой, а другая - треугольником. Токи вторичных обмоток (рис.2.1) i и i' имеют одинаковый гармонический состав, т.е. содержат гармоники порядка $\nu=5R\pm 1$ ($R=0, 1, 2, \dots$), однако при одинаковых амплитудах гармоники порядка $\nu=6(2R-1)\pm 1$ находятся в этих токах в противофазе (на рис.2.1 показаны для $\nu=5$ токи i_5' и i_5) и взаимно компенсируются в главном магнитном потоке трансформатора. По этому форма тока i

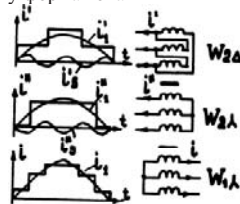


Рис.2.1. Форма токов в обмотках трансформатора двенадцатипульсового ПП

первичной обмотки (тока, потребляемого ПП) более близка к синусоидальной (ток первой гармоники i_1) и в нем присутствуют только гармоники порядка $\nu=12R\pm 1$, т.е. 11-я, 13-я и т.д. Соответственно в выпрямленном напряжении ПП также будут присутствовать только гармоники порядка $\nu=12R$, что ведет к уменьшению пульсаций. Отсутствие в токе, потребляемом ПП, а следовательно, и в напряжении сети, 5-й и 7-й гармоник, имеющих наибольшие амплитуды, приводит к уменьшению $R_{НС}$ в $\sqrt{2}$ раз [12] при прочих равных условиях и заметно улучшает условия работы оборудования в СЭЭС.

Если в СЭЭС используются ПП относительно небольшой мощности (единицы процентов от мощности СГ), выполненные по трехфазной мостовой схеме, то некоторой компенсации гармоник $\nu=6(2R-1)\pm 1$ в напряжении сети можно достичь, создавая условный двенадцатипульсный режим. Для этого необходимо, чтобы имелось примерно равное число трансформаторов ПП, соединенных по схеме Λ/Λ и $\Lambda/\Delta\Lambda$. Тогда будет происходить частичная компенсация 5-й, 7-й и т.п. гармоник, степень которой будет зависеть от того, насколько близки нагрузки ИП и их углы регулирования. При полном совпадении этих факторов эффект будет таким же, как и при использовании двенадцатипульсовых ПП.

2.1.1.2. Применение фильтров.

Параллельно входу ПП включается резонансный фильтр, емкости которого, соединены звездой (рис.2.2). Включение емкостей в треугольник не применяется из опасения, что перекрытие изоляции одной фазы конденсаторов, приводящее к междуфазному замыканию, может вызвать большие повреждения фильтра. Если пренебречь активными сопротивлениями элементов фильтра, то резонансная цепочка с параметрами C_ν и L_ν , для которых

$$\omega L_\nu = 1/\omega C_\nu,$$

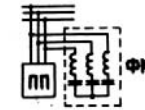


Рис.2.2. Схема включения ФКУ

представляет собой короткое замыкание для ν -й гармоники тока ПП, т.е. осуществляется ее шунтирование и она будет отсутствовать в токе СГ. В результате напряжение сети не будет содержать этой гармоники, что приведет к уменьшению его $R_{НС}$. При необходимости компенсации нескольких гармоник в фильтр добавляется параллельная резонансная цепочка для каждой гармоники. Обычно ограничиваются двумя цепочками для 5-й и 7-й гармоник тока, имеющих наибольшую амплитуду.

С целью повышения техноко-экономической эффективности использования оборудования фильтров на них, кроме шунтирования высших гармоник тока, возлагается задача компенсации реактивной мощности ПП, т.е. они применяются в СЭЭС только как фильрокомпенсирующие устройства (ФКУ) [19]. Недостатком фильтров является разброс параметров их элементов и чувствительность к изменению частоты СГ, следствием чего будет неполная компенсация гармоник тока ПП, на которую настроен фильтр, а также возможность появления резонансных явлений на других гармониках. Для исключения этих явлений требуется тщательный подбор конденсаторов и реакторов фильтра, дополняемый анализом частотных характеристик судовой сети [22].

2.1.1.3. Уменьшение гармонических составляющих ИП в высокочастотной области спектра.

Эти составляющие ИП появляются при включении и отключении каждого вентиля ПП и могут распространяться как по проводам, так и излучением (при частотах свыше 10 кГц) [2]. Ограничение ИП, передаваемых по проводам, до необходимого уровня обеспечивается с помощью RC-цепочек, осуществляющих демпфирование колебаний (рис. 2.3) за счет рассеяния энергии, запасенной в индуктивных элементах ПП. Из двух способов включения демпфирующих RC-цепочек, по указанным на рис. 2.3, более рациональным является способ 1, когда они включаются параллельно вторичным обмоткам трансформатора ПП. При включении цепочек по способу 2, параллельно вентилям, они хуже используются, так как каждая цепочка примерно 1/3 периода оказывается закороченной. Поэтому суммарная мощность конденсаторов и суммарная мощность резисторов здесь оказывается выше [23] при том же демпфирующем эффекте.

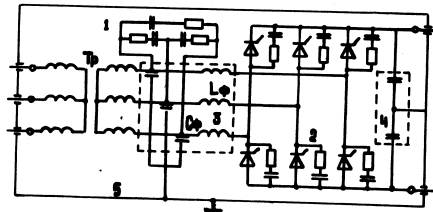


Рис.2.3. Способы ограничения высокочастотных ИП в ПП

Ограничение излучения энергии электромагнитными полями при коммутациях вентилей ПП осуществляется с помощью высоко частотных фильтров и экранирования. Фильтр 3, включающий в себя индуктивности L_{ϕ} и проходные конденсаторы C_{ϕ} , соединенные с корпусом ПП 5, установленный на вторичной стороне трансформатора (см.рис.2.3), препятствует выходу токов высокочастотных колебаний из агрегата в сеть. Аналогичную функцию, но только по отношению к нагрузке, выполняет емкостный фильтр 4, включенный в оба полюса на выходе ПП. Достаточная эффективность электромагнитного экранирования обеспечивается тем, что корпуса судовых ПП изготавливаются литыми и представляют собой сплошной экран.

2.1.2. Подавление коммутационных импульсных помех.

Основными путями снижения импульсных помех в электрической сети при коммутациях можно назвать следующие:

- проектирование СЭС таким образом, чтобы в них отсутствовали источники коммутационных импульсных помех с амплитудой большей удвоенного амплитудного значения фазного напряжения;
- устранение условий коммутации нагрузки, приводящих к появлению

наибольших амплитуд помех, снижение скорости изменения токов и напряжений при коммутации;

- применение внешних помехоподавляющих устройств.

Наибольшие значения амплитуды импульсных напряжений достигаются при включении батареи заряженных конденсаторов при однофазных замыканиях на корпус и отключении индуктивной нагрузки [2].

Для снижения амплитуды ИП при первом виде коммутации могут быть рекомендованы следующие меры:

- устранение батарей конденсаторов с часто коммутируемых участков сети;
- разряд конденсаторов после отключения через дополнительные резисторы, что позволяет снизить максимальную амплитуду импульсов приблизительно в 2 раза;
- сетевые фильтры на входе часто включаемых потребителей должны содержать катушки индуктивности между конденсаторами и сетью, что позволяет снизить амплитуду ИП и скорость изменения напряжения при включении в сеть;
- батареи конденсаторов большой переключаемой емкости должны включаться полупроводниковыми ключами в моменты времени равенства напряжения на конденсаторе и в сети.

Для снижения амплитуды ИП при однофазных дуговых замыканиях на корпус. рекомендуются следующие пути:

- снижение емкости сети относительно корпуса за счет отказа от применения конденсаторов между фазами и корпусом;
- применение устройств автоматического заземления поврежденной фазы, а также компенсирующей LC-цепи между нейтралью синхронного генератора и корпусом,

Для снижения амплитуды ИП при отключении индуктивной нагрузки рекомендуются следующие мероприятия:

- в сети постоянного тока - установка обратного диода параллельно индуктивной нагрузке;
- в сети переменного тока - установка параллельно индуктивной нагрузке цепи встречно-последовательных стабилитронов с напряжением стабилизации, большим амплитуды переменного напряжения, установка варисторов и других разрядников, описанных в параграфе 3.3;
- отключение индуктивной нагрузки полупроводниковыми ключами в момент перехода тока через ноль.

Применение помехоподавляющих устройств в сети менее эффективно, чем подавление помех непосредственно в источнике. Установка конденсаторов в какой-либо точке сети снижает напряжение помех в этой точке, однако увеличивает токи помех в кабеле, что может привести к увеличению напряжений, наведенных в соседних кабелях трассы. Включение самого участка сети с установленными конденсаторами может привести к появлению ИП больших амплитуд. Увеличение емкости сети относительно корпуса приводит к увеличению амплитуды ИП при однофазных замыканиях. Подавление коммутационных импульсных помех в сети возможно также с помощью нелинейных элементов, применяемых для защиты от грозных перенапряжений (п.2.1.3).

2.1.3. Снижение наводок при разряде молнии.

Согласно описанному ранее механизму проникновения импульсных помех разряда молнии во внутренние помещения судна [2] наиболее вероятными путями тока разряда являются кабели, расположенные снаружи корпуса судна, и металлоконструкции малого сечения (трубы, оплетки кабелей и т.п.), соединяющие верхнюю палубу с остальными. Поэтому к основным мероприятиям по защите от разряда молнии электрооборудования, не связанного непосредственно с кабелями, внешними по отношению к корпусу судна, можно отнести следующие:

- исключение наиболее опасных схем прокладки кабелей вдоль мата, труб и т.п.;
- расположение кабелей, проложенных вне корпуса судна, по возможности ближе к металлу корпуса, предпочтительна однородная прокладка, при которой все кабели располагаются в плоскости, параллельной листу металлоконструкции;
- прокладка кабелей во всех возможных случаях вне корпуса судна в металлических толстостенных трубах, как можно чаще соединенных с корпусом судна, при этом прокладка пучка кабелей в одной трубе большого диаметра предпочтительней прокладки пучка кабелей в отдельных трубах малого диаметра (несколько худшим заменителем труб являются металлические короба);

- устранение прокладок силовых и информационных кабелей во внутренних помещениях судна по пиллерсам, вблизи трубопроводов, идущих от палубы к палубе, по подволоку, вблизи мест ввода в помещение кабелей с верхней палубы. Для защиты от разряда молнии электрооборудования, непосредственно связанного с кабелями, расположенными снаружи корпуса судна, а также для снижения уровня излучаемых такими кабелями электромагнитных полей помех во внутренних помещениях судна, следует в непосредственной близости от места ввода кабелей в помещение устанавливать молниезащитные устройства. Если защита осуществляется непосредственно в электрооборудовании, эффективность ее ниже, так как следует считаться о возможностью наводок током разряда помех в других кабелях данного устройства и с большим сопротивлением контура заземления (рис. 2.4). Надлежащая защита электрооборудования от наводок Из помехонесущих кабелей возможна лишь при установке на месте ввода кабелей элементов защиты для каждого кабеля (рис.2.5).

Основными элементами молниезащиты являются газовые разрядники, варисторы, фильтры, стабилитроны, диоды. Защита выполняется многоступенчатой с зонированием по уровням напряжения и энергии. Разрядники обеспечивают малочувствительную защиту при прямых ударах, больших напряжениях и токах.



Рис.2.4. Три возможных варианта электромагнитных связей при некорректной установке элементов защиты

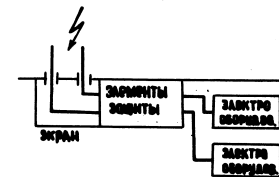


Рис.2.5. Рациональное размещение элементов защиты от наводок, создаваемых помехонесущими кабелями

Следует учитывать, что в цепях постоянного тока необходимо обеспечить условия для гашения дуги в разряднике после его срабатывания. Наиболее просто это реализуется включением последовательно с разрядником предохранителя. Импульс напряжения с амплитудой до нескольких киловольт и длительностью в сотни, наносекунд, пропускаемый разрядником, шунтируется следующей ступенью - варистором, срабатывающим за время меньше 10 нс в диапазоне напряжений до 1,5 кВ. Между разрядником и варистором ставят элемент, задерживающий срабатывание варистора на время, необходимое для срабатывания разрядника. После срабатывания варистор облегчает условия работы разрядника и пропускает к высокочувствительной ступени защиты импульс с малой амплитудой и энергией. Высокочувствительная ступень защиты выполняется для силовых цепей - на основе фильтров, для слаботочных цепей - на основе стабилитронов и диодов. Номинальное напряжение варисторов защиты в 1,3 раза больше сетевого напряжения. Напряжение пробоя газового разрядника составляет 0,7 от напряжения пробоя изоляции. Возможные варианты схем защиты показаны на рис. 2.6. На рис. 2.7 приведен пример компоновки элементов защиты в корпусе устройства.

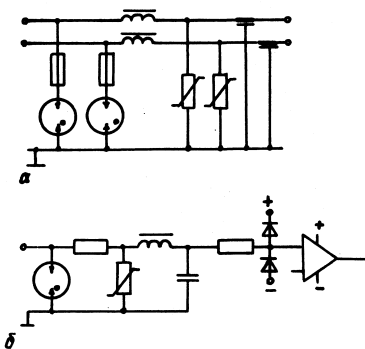


Рис.2.6. Схемы молниезащиты: а - для силовых цепей; б - для слаботочных цепей

Дорогостоящими, но весьма эффективными мерами защиты электрооборудования от разряда молнии являются: для информационных цепей - волоконно-оптические линии связи; для силовых схем - совместное использование трансформаторов с проходной емкостью не более 0,1 пф и искровых (газовых) разрядников, последние защищают изоляцию трансформатора.

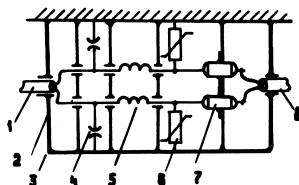


Рис.2.7. Пример компоновки элементов защиты в корпусе: 1 - входной кабель; 2 - экран; 3 - сварка на 360°; 4 - разрядник; 5 - катушка индуктивности; 6 - варистор; 7 - проходной конденсатор; 8 - выходной кабель

2.2. Методы снижения уровней помех при распространении в сети

2.2.1. Разделение питания источников и рецепторов.

Радикальное уменьшение ИП на питающих зажимах рецепторов может быть достигнуто, если они имеют собственные источники питания, электромагнитно не связанные с сетью, к которой подключены источники помех. Однако, учитывая большое число рецепторов (подавляющая часть оборудования), обеспечение каждого из них автономными источниками питания нереально, так как противоречит требованиям технико-экономической эффективности СЭЭС. Можно использовать относительно небольшое число автономных источников, питающих группы наиболее чувствительных к воздействию ИП потребителей ЧП, но в этом случае при выборе состава групп следует иметь в виду, что рецепторы могут

одновременно являться и источниками ИП. Поэтому в каждом конкретном случае необходима предварительная оценка параметров ИП при питании группы ЧП от общего источника. Такая структура питания от электромеханического преобразователя (рис.2.8) параметров электроэнергии (двигатель - генератор) полностью исключает проникновение ИП к ЧП из судовой сети, так как двигатель и генератор электрически не связаны, но при условии, что их клеммные коробки находятся в отдельных экранированных объемах. Для исключения взаимовлияния ЧП (если это не обходимо) здесь должна использоваться индивидуальная защита от ИП. Будучи эффективным средством электромагнитного разделения сетей, электромеханические преобразователи имеют ряд существенных недостатков (например, повышенные уровни шума и вибрации), что приводит к их массовой замене полупроводниковыми преобразователями в структурах вторичного электропитания [24]. ПП не дает возможности электромагнитного разделения ЧП и судовой сети. Поэтому для уменьшения амплитуды ИП, проникающих из судовой сети на его вход, ПП,



Рис.2.8. Применение электромеханического преобразователя

питающей ЧП, целесообразно подключать не к относительно маломощным РЩ, от куда также могут питаться источники помех (структура 2 на рис.2.9), а не посредственно к ГРЩ (структура 1). Тогда, например, амплитуда коммутационных ИП (возникающих при коммутациях потребителей) на его входе будет уменьшена более чем в $(n+1)/2$

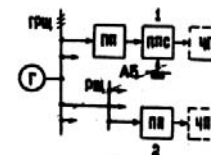


Рис.2.9. Структуры питания ЧП через ГРЩ: 1 - непосредственно от ГРЩ; 2 - от РЩ

раз, где n - число фидеров, подключенных к ГРЩ [2]. Структура 1 питания ЧП (см.рис.2.9) обладает еще и тем преимуществом, что для обеспечения надежной работы наиболее ответственных ЧП при ИП они могут переводиться на режим питания (с помощью переключателя питающей сети - ППС) от автономной аккумуляторной батареи АБ. Это обеспечивает электромагнитную развязку ЧП и судовой сети.

В дополнение к рассмотренным структурам питания ЧП при периодических ИП необходимо учитывать то обстоятельство, что источников значительных периодических ПП в СЭЭС, как правило, немного, это один или несколько ПП большой удельной мощности. Поэтому возможен вариант подключения ПП к отдельной секции шин ГРЩ (рис.2.10) питаемой автономным генератором G_1 , а ЧП

- к другой секции, питающейся от генератора G_2 . Отсутствие электрической связи между секциями ПП и ЧП (автомат А на рис.2.10 разомкнут) исключает появление периодических ИП на питающих зажимах ЧП.

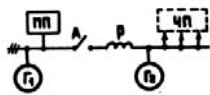


Рис.2.10. Схема питания ЧП при периодических ИП

Недостатком такой структуры питания ЧП может явиться повышение удельных расходов энергоносителя первичных двигателей генераторов из-за их неоптимальной загрузки, что ведет к повышению эксплуатационных расходов. В этом случае более целесообразным является не полное исключение периодических ИП в на пражении питания ЧП, а уменьшение их до допустимых значений при питании ЧП от G_1 через токоограничивающий реактор Р [19] (автомат А на рис.2.10 замкнут, генератор G_2 отсутствует). Включение реактора приводит к ограничению протекающих через него высших гармоник тока (особенно заметному в высокочас тотной области спектра), что обеспечивает снижение $R_{НС}$ питающего напряжения на зажимах ЧП. Эффективность снижения $R_{НС}$ может быть заметно увеличена, если вместо обычного реактора используется сдвоенный реактор (СР), а ЧП подключается к его средней точке (рис.2.11). Обмотки СР ω_1 и ω_2 , расположенные



Рис.2.11. Схема пита- ния ЧП через СР

на общем железном сердечнике, соединены встречно, причем число витков ω_2 вдвое больше, чем ω_1 . Это дает следующее соотношение индуктивностей и ко эффициента взаимной индукции обмоток: $L_2=4L_1$, и $M=2L_1$, а суммарная индуктивность обмотки ω_1 с учетом взаимной индукции обмоток ω_1 и ω_2 равна $L_{1с} = L_1 - M = -L_1$ [25]. Тогда, если выполняется условие $L_1 = L_T$ (L_T - индуктивность генератора), напряжение в средней точке СР оказывается независимым от тока, так как все его изменения компенсируются ЭДС самоиндукции обмотки ω_1 . Физически это соответствует включению в цепь отрицательных индуктивных сопротивлений, играющих роль емкостей, и напряжение питания ЧП будет практически синусоидальным.

Применение СР в СЭЭС с ПП, однако, ограничивают то обстоятельство, что при подключении к генератору дополнительной нагрузки его ток становится больше тока СР (ток этой нагрузки не протекает через СР), что приводит к перекompенсации периодических ИП в средней точке и увеличению $R_{НС}$ питающего напряжения ЧП. Этому явления можно избежать, если сделать СР управляемым в функции тока дополнительной нагрузки генератора [25], но тогда значительно усложняется конструкция СР.

Выбор структуры питания ЧП на стадии проектирования СЭЭС определяется возможными параметрами ИП и сравнением технико-экономической эффективности мероприятий по их подавлению до допустимых значений.

2.2.2. Выбор и прокладка кабелей.

Выбор типов и расположение кабелей в трассе должны проводиться с учетом электромагнитной связи и допустимых взаимных влияний цепей кабелей. Для предлагаемых вариантов трассы необходимо провести расчет возможных наведенных напряжений в соответствии с [2], сравнить их с допустимыми значениями помех в конкретных цепях и принять решение об оптимальном варианте. Следует избегать применения без необходимости дорогостоящих кабелей.

В качестве необходимых для расчета максимальных симметричных и несимметричных импульсов напряжения и тока в жилах могут быть приняты: для силовых кабелей с номинальным напряжением 380 В - импульсы амплитудой 1000 В, фронтом 0,1 мкс, длительностью 100 мкс и скоростью изменения тока 30 А/мкс; для кабелей управления - импульсы с параметрами 100 В, 0,1/10 мкс, 10 А/мкс.

Следует помнить, что на жилах неэкранированного кабеля, проложенного вплотную с неэкранированным силовым, может на вестить до 30% от напряжения, действующего на жилах силового кабеля относительно корпуса, т.е. до 300 В, что из-за несимметрии жил приведет к появлению напряжений между жилами порядка 10-50 В. Применение кабеля с экраном позволяет снизить наведенные напряжения на 2-3 порядка. Эффективность экранирования, способов заземления оплеток, разноса кабелей приведена в [2].

Руководствуясь публикацией 533 МЭК, можно дать ряд общих рекомендаций по выбору и прокладке кабелей на судах.

- Для кабелей радиооборудования необходимо использование хороших экранов, кабельных сальников с надежным заземлением кабельного экрана. Антенные фидеры должны иметь металлические экраны на всем протяжении, а в отдельных случаях - двойной экран или прокладываться в металлических кожухах без щелей.

- Кабели коллекторных электродвигателей и полупроводниковых преобразователей должны быть многожильными с парно окруженными жилами и должны прокладываться как можно ближе к металлическому корпусу судна, за исключением кабелей с током более 250 А. Одножильные кабели не должны применяться. Экранирование рекомендуется на открытой палубе, в силовой установке, в оборудовании с тиристорным управлением. Экран должен быть заземлен возможно чаще и, по крайней мере, в начале и в конце.

- Кабели радиолокационного и гидроакустического оборудов дования должны быть экранированы, а экраны заземлены. Кабели, несущие импульсы в гидроакустическом оборудовании, рекомендуется экранировать с помощью двойных стальных кожухов. Большое внимание должно уделяться отдельной прокладке кабелей, несущих импульсы, от кабелей, связанных с другим оборудованием.

- Кабели оборудования с переключаемыми цепями желатель но прокладывать отдельно от кабелей, чувствительных к воздействию импульсных помех, особенно если уровни сигналов различаются более чем на 40 дБ. Сигнальные кабели оборудования, чувствительного к помехам, должны иметь непроводящую

внешнюю шланговую оболочку поверх оплетки. Экран кабелей должен заземляться только на одном конце. Предпочтение должно отдаваться кабелям со свитыми парами. В сигнальных и контрольных кабелях не должны применяться общие обратные провода.

- Кабельная сеть систем контроля и обработки данных должна проектироваться с применением разнесения, скрутки и экранирования. Сигнальные кабели должны быть отнесены от силовых кабелей и кабелей управления на расстояние не менее 500 мм, и параллельные прокладки должны быть исключены. Пересечения должны выполняться под прямым углом на расстоянии не менее 200 мм. Кабели, несущие аналоговые сигналы, должны быть отнесены от кабелей, несущих дискретные сигналы. В противном случае кабели, несущие аналоговые сигналы с малым уровнем, должны быть плотно свиты и экранированы по всей длине. Экран должен быть заземлен в одной точке (у датчика). В разъемах должны быть предусмотрены приспособления для удерживания экранов. Кабели, несущие дискретные сигналы с большим уровнем, должны экранироваться для снижения уровня помех. При этом может потребоваться заземление экранов на обоих концах.

3. ЗАЩИТА ОБОРУДОВАНИЯ ОТ ИМПУЛЬСНЫХ ПОМЕХ

3.1. Сетевые и входные фильтры

Традиционным средством защиты электронного оборудования от помех являются фильтры, устанавливаемые на зажимах питания и входах оборудования. Фильтрация несимметричных (синфазных) помех осуществляется фильтрами с конденсаторами, связанными с корпусом (рис.3.1,а), симметричных (дифференциальных) помех, приложенных так же как полезный сигнал, осуществляется фильтрами по схеме рис.3.1,б. Установка в каждый внешний провод оборудования фильтра по схеме рис.3.1, а позволяет защищать оборудование от симметричных и несимметричных помех. Схемы фильтров должны быть строго симметрированы, так как неравенство индуктивностей или емкостей их элементов может вызвать даже увеличение симметричной помехи из-за частичного перехода несимметричных помех в симметричные. RC -фильтры применяются только в слаботочных низкочастотных цепях, где допустимо последовательное включение резисторов. LC-фильтры нашли более широкое применение во входных и питающих цепях. Отрицательным их свойством является возникновение колебаний на собственной резонансной частоте при импульсном воздействии, Демпфирование колебаний применено в фильтре, изображенном на рис.3.1, в,

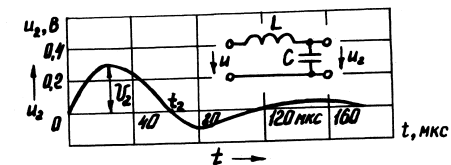
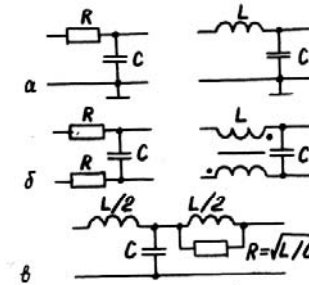


Рис.3.2 Осциллограмма напряжения на выходе LC-фильтра ($L=2$ мГн, $C=0,2$ мкФ) при воздействии на вход прямоугольного микросекундного импульса с амплитудой 10 В.

Расчет элементов фильтров для защиты от синусоидальных помех удобно выполнять по номограммам, приведенным в [7]. При воздействии на вход фильтра импульсного напряжения выходное напряжение u_2 представляет собой колебание на собственной частоте фильтра (рис.3.2), характеризующееся амплитудой U_2 и максимальной скоростью изменения напряжения du_2/dt . Вносимое затухание фильтра в этом случае может быть определено как отношение амплитуды импульса U_1 , источника помех к амплитуде U_2 при стандартном сопротивлении нагрузки. Расчет LC-фильтра по заданному вносимому затуханию K импульсных, помех определенной длительности или допустимой относительной скорости изменения напряжения на его выходе $(du_2/dtU_1)_m$ может быть выполнено с помощью графиков на рис.3.3. При этом рассматривается наихудший случай с точки зрения подавления помех - отсутствие нагрузки на выходе фильтра. Задавая длительностью импульсных помех, величиной K или $(du_2/dtU_1)_m$, можно определить индуктивность и емкость элементов фильтра. Максимальное значение емкости на корпус ограничено требованиями по допустимому току утечки, а индуктивности - допустимым падением напряжения на дросселе фильтра на рабочей частоте. Частота среза фильтра не может быть меньше частоты рабочего тока, что также ограничивает значение вносимого затухания импульсных помех. Для частоты среза 50 Гц максимально возможные значения вносимого затухания импульсных помех длительностью 0,1; 1; 10; 100 мкс соответственно равны 10^5 ; 10^4 ; 10^3 ; 10^2 [6]. Даже идеальный сетевой фильтр не может обеспечить более высоких значений за тухания. Это ограничение не распространяется на фильтр, включенный после выпрямителя на стороне постоянного тока, для которого можно получить большие затухания путем увеличения L, C . Двухзвенный LC-фильтр менее эффективен для защиты от импульсных помех, чем однозвенный с той же суммарной емкостью и индуктивностью элементов. Сложение собственных колебаний звеньев приводит к снижению вносимого затухания.

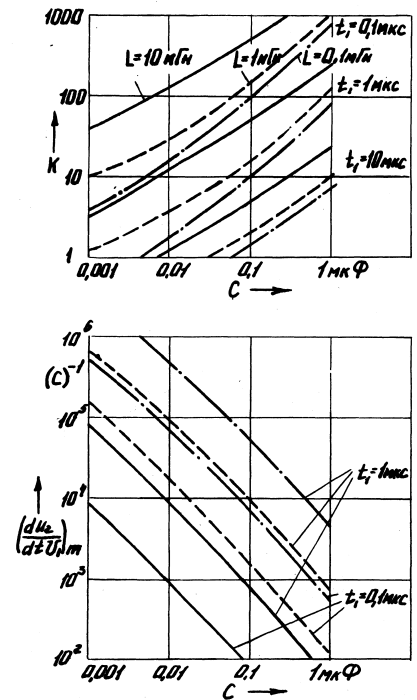


Рис.3.3 Графики для расчета параметров элементов LC-фильтра: _____ L=10мГн; ---- L=1 мГн; - - - - - L=0,1 мГн

Наиболее перспективными являются сетевые фильтры с режекторными дросселями (рис.3.4), обеспечивавшими большую индуктивность для несимметричных напряжений помех, при малом индуктивном сопротивлении рабочему току.

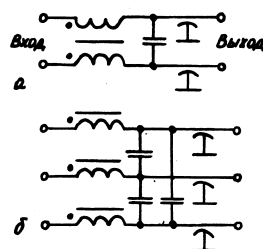


Рис.3.4 Схемы однофазного (а) и трехфазного (б) сетевых фильтров.

В простейшем случае дроссель представляет собой ферритовое кольцо с двумя одинаковыми обмотками. Рабочий ток протекает по одной обмотке и возвращается по другой. Магнитные потоки вычитаются, индуктивность дросселя равна малой индуктивности рассеяния, а магнитопровод не насыщается даже при больших значениях тока. Для несимметричного напряжения и тока индуктивность дросселя может составлять десятки миллигенри, так как магнитные потоки обмоток складываются, а значение магнитной проницаемости магнитопровода может достигать тысяч. Большие значения индуктивности дают возможность снизить емкости конденсаторов, установленных между фазой и корпусом до 0,01-0,1 мкФ и соответственно снизить токи утечки на корпус [7]. Для симметричных помех роль индуктивности играет индуктивность рассеяния дросселя, а емкость, определяемая междуфазным конденсатором, не имеет таких ограничений, как емкость фаза - корпус, и может составлять 1-10 мкФ. Для увеличения индуктивности рассеяния применяют конструкцию дросселя, показанную на рис.3.5.

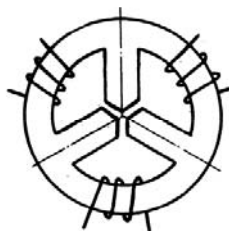


Рис.3.5. Конструкция трехфазного дросселя сетевого фильтра.

Важное значение имеет тип применяемых элементов и их размещение, а также конструкция фильтра. Дроссели должны иметь обмотку с минимальной емкостью, конденсаторы - с минимальной индуктивностью выводов. Необходимо применять специальные типы помехоподавляющих конденсаторов, таких как: проходные

К72П-3, К73-18, К73-21; комбинированные К75-37, К75-41, К75-42, К75-43 и др. [261].

Элементы фильтра размещают в металлическом корпусе, разбитом на экранированные отсеки. Переход цепей из отсека в отсек осуществляется через проходные конденсаторы. Входные и выходные цепи должны быть максимально разнесены и экранированы.

6.2. Экранирование и заземление

Экран -это перегородка из проводящего (металлического) или магнитного материала, используемая для предотвращения распространения электрических и магнитных полей из одной области в другую. Его можно использовать для ограничения электромагнитных полей в пространстве, если экран окружает источник помех, и наоборот - для защиты некоторой области от проникновения внешнего электромагнитного поля.

Плоская электромагнитная волна, встречая на своем пути металлическую поверхность, подвергается двум типам потерь. Часть энергии отражается, а часть проникает в среду и в ней затухает. Совместное воздействие этих двух факторов (отражения и поглощения) в основном определяет эффективность экрана. Поглощение приводит к нагреву металла индукционными токами. По мере распространения электромагнитной волны в среде ее амплитуда уменьшается по экспоненциальному закону. Расстояние, на котором амплитуда волны становится равной $1/e$, или 37% от первоначального значения, называется глубиной скин-слоя δ . Эту величину можно выразить в сантиметрах через частоту, относительную магнитную проницаемость μ и отношение проводимости материала к проводимости меди σ в следующем образом:

$$\delta = 0,5 / \sqrt{f \mu \sigma}$$

Известно, что для того чтобы экран был достаточно эффективным, его толщина должна быть не менее тройной глубины скин-слоя. На рис.6.6 приведены зависимости величины 3δ от частоты для различных материалов.

Потери на отражение связаны с различием характеристических импедансов сред, в которых распространяется волна. Для электрических полей даже тонкий металлический экран, где основное отражение происходит от поверхности, обеспечивает хорошие потери на отражение.

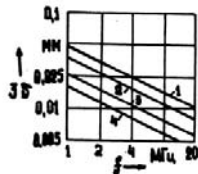


Рис.6.6. Зависимость глубины скин-слоя от частоты.

Судовое электрооборудование размещается в большинстве случаев по прочностным и другим требованиям в толстостенных металлических шкафах, поэтому, исходя из изложенного, следует учитывать не столько собственную эффективность экранирования самого материала, сколько утечки через швы и отверстия в экране [3].

Многие считают, что создание эффективной системы заземления является скорее искусством, чем наукой. Тем не менее, если следовать проверенным на практике инженерным принципам, можно осуществить правильное заземление, что приводит к предсказуемым и полезным результатам. Применяемые совместно заземление и экранировка являются эффективными по затратам способами решения проблемы ЭМС.

Земля - это общая точка отсчета напряжения, потенциал которой не изменяется в зависимости от величины протекающих токов. Землю также можно рассматривать как поверхность, которая идеально служит общей точкой отсчета в любом месте схемы. Проблема помех возникает тогда, когда точка или поверхность, служащие землей и используемые как точки отсчета, в действительности имеют разные электрические потенциалы. В этом случае правильная и надежная работа оборудования нарушается. Для импульсных помех традиционные (низкочастотные) схемы заземления могут оказаться неприемлемыми и начнут сказываться такие факторы, как длина кабеля или проводника, физические и геометрические размеры прибора.

Например, длина заземляющего проводника или экрана кабеля на высоких частотах может превысить четверть длины волны, но в таком случае их можно трактовать скорее как законченные четвертьволновые передающие линии, а не заземляющие проводники, что резко снижает эффективность заземления. Наиболее эффективные схемы заземления упрощенно показаны на рис.6.7, а в табл.6.1 приведены преимущества и недостатки каждой системы заземления [1].

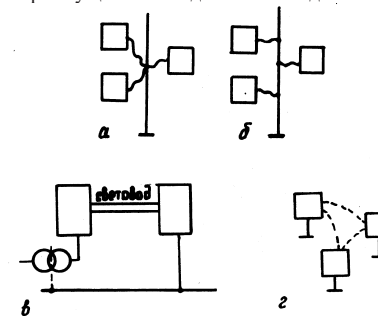


Рис. 6.7. Схемы заземления.

В судовых условиях преимущественно для межблочных связей используется многоточечная система заземления, а для внутриблочных - одноточечная. Дополнительные сведения о рациональном выполнении заземления содержатся в [4], [5].

Системы заземления

Таблица 3.1

Система	Условие применимости	Примечание
Одноточечная	Электрические поля подавлены экраном. Кабели располагаются в направлении заземляющих стержней	Как правило, применяется в экранированных компактных подсистемах. В случае заземления типа "елочка" возвратные токи земли могут приводить к несовместимости аппаратуры
Плавающая	Каждый объем экранирован и имеет собственную систему заземления, обычно одноточечную. Необходимые разделяющие (изолирующие) устройства не должны пропускать импульсы помех	Дорогая, сложная в изготовлении, применяется в маломощных системах измерений. Снижается электробезопасность, если экран находится под высоким плавающим потенциалом
Многоточечная	Каждая подсистема экранирована. Предпочтительнее отдается экранировке соединительных кабелей. Лучше, если поверхность земли, которая должна быть низкоомной, не является частью внешнего экрана. Часто необходима защита вводов	Единственная практически приемлемая форма заземления для многих систем. Дорогостоящая из-за необходимости защиты вводов для каждого соединительного кабеля

6.6. Нелинейные элементы

Для защиты электрооборудования от импульсных помех широко используются нелинейные элементы. Основные функции защитных нелинейных элементов - детектирование импульса и отражение и (или) отвод его энергии для предотвращения повреждения в защищаемом оборудовании. Большинство защитных нелинейных элементов - это приборы с пробоем, работающие по алгоритму: высокое сопротивление - низкое сопротивление - высокое сопротивление. К ним относятся газовые разрядники, стабилитроны, диоды. Наиболее эффективны варисторы - нелинейные сопротивления, зависящие от напряжения. Характеристики импульсного пробоя газовых разрядников зависят от формы приложенного напряжения, а также от импедансов источников и нагрузки. На рис.6.8 показана типичная переходная характеристика высококачественного газонаполненного защитного разрядника. Характерным для разрядников является выброс в начальной части импульса напряжения после разрядника. Выброс возникает в результате падения напряжения на индуктивности выводов и, главным образом, определяется временем задержки между моментом приложения импульса напряжения и началом лавинного пробоя промежутка. Энергия выброса может оказаться достаточной для того, чтобы произвести остаточные повреждения чувствительных полупроводниковых приборов, если не предусмотрена дополнительная защита. После пробоя промежутка напряжение на нем падает до остаточного, которое доходит до сотен вольт, что также снижает эффективность действия разрядника как защитного элемента.

Другой класс нелинейных элементов защиты включает в себя стабилитроны и диоды. Для простых кремниевых диодов с ростом напряжения на р-п-переходе ограничение амплитуды импульсов начинается обычно при напряжении около 1 В. Если диапазон изменения напряжения нормально работающей схемы превышает его значение, то иногда применяют низкоомные цепи смещения, чтобы ограничение происходило при напряжениях, превышающих рабочее напряжение схемы. Можно избежать использования цепей смещения путем применения стабилитронов, имеющих четко выраженную точку пробоя в диапазоне напряжений 3-200 В.

Существуют ограничения при использовании диодов и стабилитронов для защиты. Прибор с простым р-п-переходом обладает конечным временем включения и имеет конечную индуктивность выводов и цепей смещения, поэтому при воздействии на защитные цепи импульсов с крутым фронтом на их выходе

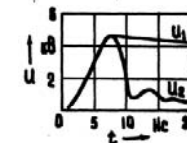


Рис.3.8. Переходная характеристика заземляющего разрядника

возникают выбросы, аналогичные выбросам для разрядников. Стабилитроны имеют малое время включения, однако обладают большой шунтирующей р-п-

переход емкостью, величина которой доходит до 5000 пФ, что не позволяет использовать стабилитроны в высокочастотных схемах. Для уменьшения емкости в схемах можно последовательно со стабилитроном включить быстродействующий диод с малой емкостью р-п-перехода, что, однако, в еще большей степени увеличивает индуктивность выводов цепи защиты.

Для эффективного выполнения защитных функций разработаны специальные нелинейные полупроводниковые элементы - варисторы. Их вольт-амперная характеристика описывается следующим соотношением: $i = u^\lambda \cdot k$, где k - постоянная прибора, λ - показатель нелинейности. Коэффициент λ для металлооксидных варисторов более 25. Вольт-амперные характеристики различных нелинейных элементов приведены на рис.6.9. Видно, что характеристики металлооксидных варисторов близки к идеальной (горизонтальной линии). Варисторы могут иметь маленькую шунтирующую емкость (порядка единиц пикофарад), ток утечки для номинального напряжения 500 В составляет 1-10 мА, при этом уровень повреждения варистора по току превышает 1000 А, а энергия, необходимая для деградации варистора, может доходить до сотен джоулей. Преимущественно варисторы используются при напряжениях более 100 В,



На рис.6.10 приведены различные схемы включения нелинейных защитных элементов, а в табл.6.2 проведено сравнение их характеристик [1].

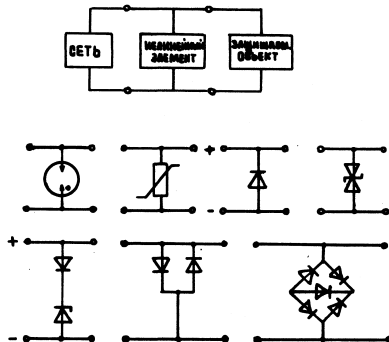


Таблица 3.2

Сравнительные характеристики защитных элементов

Характеристика	Сравнительная оценка характеристик		
	Разрядник	Стабилитрон	Варистор
I	2	3	4
Способность отводить токи > 500 А	I	3	2
Быстродействие	3	I	2
Емкость	I	3	2
Сопротивление в закрытом состоянии	I	2	3

Окончание табл.3.2

I	2	3	4
Работа при напряжении < 50 В	3	I	2
Работа при напряжении > 400 В	I	3	2
Работа в цепях постоянного тока	3	2	I
Работа в цепях переменного тока	I	3	I
Линейность	I	2	3
Термостойкость	I	3	2

Примечание. I - наиболее пригодный; 3 - наименее пригодный.

3.4. Особенности проектирования вторичных источников питания

Через вторичный источник питания (ВИП) электрооборудования импульсные помехи из питающей сети проникают к чувствительным устройствам. Фильтры на входе и выходе ВИП не могут в полной мере обеспечить защиту чувствительного электрооборудования от импульсных помех. Поэтому часть помехозащитных функций целесообразно возложить на ВИП. Помехозащитные свойства ВИП в значительной степени определяются структурой ВИП, конструкцией его трансформатора, а также размещением элементов в объеме ВИП и их монтажными связями.

В настоящее время на судах в основном используются ВИП, построенные по двум классическим схемам: "низкочастотный" и "высокочастотный" (рис.3.11). Структурная схема "низкочастотного" ВИП включает в себя низкочастотный трансформатор, выпрямители и стабилизаторы. "Высокочастотный" ВИП отличается наличием входного сетевого выпрямителя и инвертора. В этом случае трансформатор ВИП - высокочастотный. Последнее обстоятельство с позиции обеспечения помехозащиты является определяющим, так как проходная емкость высокочастотного трансформатора существенно ниже емкости низкочастотного.

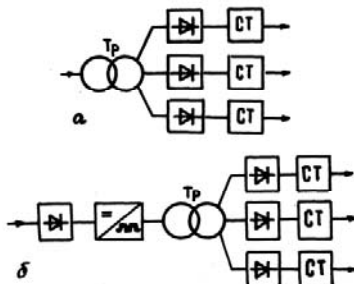


Рис.3.11. Структурные схемы ВИП: а - "низкочастотная"; б - "высокочастотная"

Улучшение помехозащитных свойств трансформаторов ВИП традиционно обеспечивается за счет увеличения индуктивности рассеяния и снижения проходной емкости. Первый путь способствует ослаблению импульсных помех, распространяющихся по симметричному пути, второй - импульсных помех, распространяющихся по несимметричному пути.

Трансформаторы с повышенной индуктивностью рассеяния выполняются на сердечниках типа ПЛ с размещением первичных и вторичных обмоток на разных стержнях (рис. 3.12, а) или на тороидальных сердечниках (рис.3.12,б) с размещением первичных и вторичных обмоток на противоположных сторонах сердечника. Для более полного использования поверхности сердечника применяется деление первичной и вторичной обмоток на части и чередование их (рис.3.12.в). Эффективное подавление высокочастотных составляющих симметричных помех обеспечивается заливкой первичной и вторичной обмоток феррокомпандом (рис.3.12). Одновременно в рассмотренных конструкциях трансформаторов разнесение обмоток снижает проходную емкость между ними.

Однако трансформаторы с повышенной индуктивностью рассеяния имеют низкий КПД, мягкую нагрузочную характеристику, поэтому область применения их ограничивается маломощными ВИП.

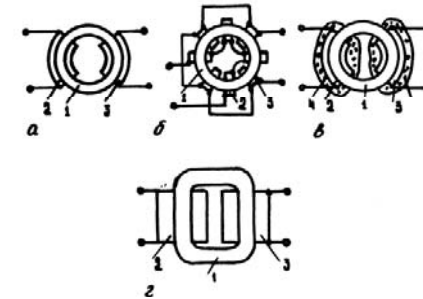


Рис.3.12. Трансформаторы ВИП, ослабляющие симметричные импульсные помехи: а - на сердечнике типа ПЛ; б - на тороидальном сердечнике; в - на тороидальном сердечнике с секционированными обмотками, г - на тороидальном сердечнике с заливкой обмоток феррокомпандом; 1 -сердечник; 2, 3 - первичная и вторичная обмотки; 4 - феррокомпанд.

Ослабление несимметричных импульсных помех при распространении их через трансформатор ВИП обеспечивается введением между первичной и вторичной обмотками электростатического экрана - заземленного проводника между обмотками (рис.3.13). Поскольку токи помех через проходную емкость С1 замыкаются на землю, а через С2 ток не течет, на обмотке 2 трансформатора не наводится напряжения. Эта ситуация является идеальной, и она нетеплична, так как экранировать обмотку полностью затруднительно.

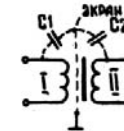


Рис.3.13. Схема замещения трансформатора с межобмоточным экраном

Применение в качестве экрана однослойной обмотки в случае защиты от импульсных помех не дает должного эффекта, так как из-за конечного времени пробега волны от одного конца обмотки (экрана) к другому ее концу участки экранирующей обмотки оказываются неэквипотенциальными.

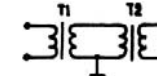


Рис.3.14. Схема помехоразделительного трансформатора

Поэтому экран должен выполняться в виде незамкнутого витка фольги.

Межобмоточным экранированием удается снизить проходную емкость трансформатора до единиц пикофарад. Экранирующим действием обладает схема из двух трансформаторов, показанная на рис.3.14. Для высокочастотных ВИП применяется трансформатор, показанный на рис.3.15. В двух экранированных объемах размещаются тороидальный сердечник с первичной обмоткой 2 и тороидальный сердечник со вторичной обмоткой 3. Связь между сердечниками осуществляется аналогично предыдущей схеме, но обмотка связи выполнена объемным витком 4. При использовании подобной конструкции удается довести проходную емкость до значений 0,1-0,01 пф. Однако реализовать такой трансформатор для ВИП о мощностью более десятков ватт затруднительно из-за ограничений, связанных с нагревом объемного витка.

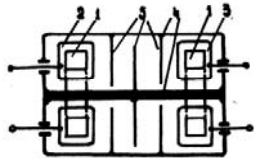


Рис .3.15. Помехоразделительный трансформатор с объемным витком: 1-сердечник. 2, 3 - первичная и вторичная обмотки; 4 - объемный виток; 5 – экран

Для больших мощностей можно рекомендовать трансформатор высокочастотных ВИП, предложенный в [6] (рис. .3.16). В нем два трансформатора соединены по схеме рис.3.14, а размещены в различных экранированных объемах, причем обмотки связи трансформаторов соединены через помехоподавляющие фильтры.

Для важнейших систем следует осуществлять питание ВИП от источников электрической энергии с электромеханическими преобразователями или от аккумуляторной батареи.

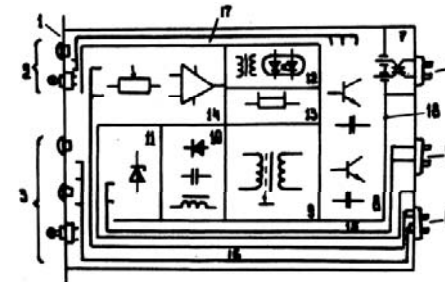


Рис.3.17. Пример расположения узлов монтажных связей и экранов в блоке ВИП: 1 - передняя панель блока; 2 - органы управления и сигнализация силовых цепей; 3 - органы управления и сигнализация слаботоковых цепей; 4-6 - разъемы входной, выходной, управления и сигнализации; 7 - отсек входного фильтра; 8 - отсек силовых элементов высокочастотного преобразователя; 9-отсек трансформатора преобразователя; 10-отсек выпрямителей и выходных фильтров; 11- отсек стабилизаторов напряжения; 12 - отсек узлов гальванической развязки системы управления преобразователем и элементов преобразователя; 13 - отсек измерительных цепей преобразователя; 14 - отсек системы управления преобразователем; 15-17 - экранированные пучки проводов выходных цепей, цепей управления и сигнализации, входных цепей; 18 — экранирующие перегородки.

6.5. Рациональное проектирование оборудования

6.5.1. Технические аспекты.

Разработка оборудования проходит три основные стадии: проектирование, испытание, производство. По мере продвижения от первой стадии продвижения набор доступных разработок способов борьбы с помехами неуклонно уменьшается, в то время как их стоимость, напротив, возрастает (рис.6.18) [5].

Таким образом, решение проблем, связанных с помехами, на стадии проектирования дает лучшие результаты и обходится дешевле.

На начальной стадии разработки оборудования можно прогнозировать степени воздействия помех с помощью анализа условий эксплуатации. Например, если известно, что чувствительное оборудование не связано с заборными кабельными коммуникациями, то его размещение на достаточно большом расстоянии от мест ввода заборных кабелей обеспечит определенное ослабление воздействия разряда молнии. Использование принципов экранирования и зонирования [1] дает существенное снижение степени воздействия импульсных помех. Обязательным при использовании принципа зонирования является размещение кабелей, присоединенных к очень чувствительной аппаратуре, в отдельных кабелепроводах, обособление с помощью экранов и средств гальванического разделения ис точников помех, чувствительных к помехам узлов цифровых и аналоговых схем.

Существует несколько подходов к снижению чувствительности к помехам отдельных элементов разрабатываемого оборудования. Один из них это выбор более высоких уровней рабочего напряжения. Передать по кабелю без искажений от помех сигнал в 10 мВ затруднительно, но при 10 В задача решается просто, с помощью обычных экранированных кабелей. Тип экрана

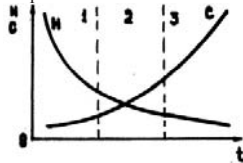


Рис.6.18. Набор (H) возможных методов и относительная стоимость (C) решения проблемы по помехозащите на стадиях проектирования (1), испытания (2) и производства (3)

и зональный подход в окончательной конструкции системы также могут быть связаны с выбором уровней рабочих параметров.

Другим методом уменьшения чувствительности к помехам является применение, в случае необходимости, аналоговых схем вместо цифровых. Хотя аналоговые схемы обладают определенной восприимчивостью к помехам, в особенности, если уровни рабочих напряжений очень низки, но они имеют значительно меньшую полосу пропускания, поэтому интегрируют эффекты кратковременных переходных процессов.

Когда это возможно, осуществляют отключение системы на период времени действия импульсной помехи. Применяют быстродействующие детекторы импульсных помех, связанные скоростными каналами с блокирующими работу системы элементами.

Информационные связи чувствительных к импульсным помехам устройств целесообразно выполнять волоконно-оптическими линиями связи. Очевидно, что

импульсы напряжений и токов, которые распространяются по проводникам, не могут пройти через оптические волокна (неметаллические). Однако при этом особое внимание следует уделять электропитанию оконечных устройств линий связи, так как теперь уже они будут являться наиболее уязвимыми звеньями системы передачи информации.

Наряду с изложенным особое внимание при разработке систем автоматического управления и контроля в условиях периодических ИП следует уделять измерительным преобразователям параметров управления и контроля. Принципы их построения должны обеспечивать инвариантность процесса преобразования к форме входного информационного сигнала (обычно тока или на пружения). При этом там, где это возможно по условиям быстродействия, предпочтение следует отдавать преобразованиям параметра, включающим операцию интегрирования. Так, например, при создании модулей определения активной нагрузки СГ, входящих в различные устройства управления СЭС (см. подпункт 2.4.2.3), наилучший результат дает интегрирование произведения мгновенных значений тока и напряжения за полупериод изменения [15]. По этому же принципу следует строить и измерительные преобразователи активной мощности в системах централизованного контроля параметров в СЭС. Аналогичный подход может быть использован при построении блоков парал лельной работа, входящих в состав АРН СГ (см.подпункт 1.4.2.1). когда для управления выравниванием реактивных нагрузок параллельно работающих СГ информационный сигнал формируется либо по интегралу от квадрата тока СГ [15], либо по интегралу от мгновенной реактивной мощности [10]. Для определения действующего значения напряжения в тех же АРН необходимо, чтобы в измерительном органе интегрировался квадрат мгновенного значения напряжения [11].

В вычислительных системах следует использовать помехозащитные коды для передачи информации, программы с обнаружением и исправлением ошибок, повторное введение данных, проверку на четность-нечетность, запись промежуточных результатов в очень стойкие по отношению к помехам запоминающие устройства (память на ферритах, магнитных дисках), в вы числительных устройствах легко вводить режим прерывания счета при поступлении сигнала с датчика помехи. Быстродействие применяемой ЭВМ должно быть минимально возможным, так как быстродействующие процессоры (в особенности на элементах ЭСЛ) имеют и меньший уровень помехозащищенности. Таким образом, для большинства видов оборудования многие аспекты обеспечения ЭМС могут быть реализованы на этапе разработки оборудования. Поэтому обеспечение ЭМС является частью общей задачи создания оборудования.

6.5.2. Организационный аспект.

Методологически организационные задачи обеспечения ЭМС оборудования на этапах разработки и производства с достаточной полнотой изложены в[1],[4],[8]. Рекомендации последнего источника наиболее приемлемы применительно к задачам разработки судового электрооборудования, они приводятся ниже. Существенной частью общей методологии создания и эксплуатации изделий, обладающих ЭМС, является обязательное включение в техническое задание (ТЗ) на

разработку изделий (в последующем в технические условия на его производство) требований по ЭМС и составление программы, определяющей комплекс организационных и технических мероприятий по обеспечению ЭМС на этапах проектирования, конструирования, производства, испытаний и монтажа (особенно, если изделие предназначено для работы в комплексе средств), а также, по возможности, на этапе эксплуатации изделия. Такая программа, поставленная разработчиком и согласованная с заказчиком, фактически является приложением к ТЗ на разработку и в дальнейшем должна быть реализована так же, как реализуются ТЗ и технические условия на изделия.

Программа должна включать в себя общие и частные особенности обеспечения ЭМС в зависимости от конкретного назначения изделия и уровня, на котором должна обеспечиваться ЭМС, а именно:

- между изделиями (средствами), которые используются в системах, пространственно удаленных друг от друга;

- между изделиями, размещенными в одном комплексе средств;

- между элементами (узлами, блоками) внутри оборудования.

В программе налагаются задачи по обеспечению ЭМС независимо от того, указаны они в ТЗ или нет, включая технические трудности, с которыми встречается разработчик изделия и для преодоления которых может возникнуть необходимость в проведении предварительных исследований. В свою очередь, график должен указывать данные, характеризующие электромагнитную обстановку, в которой должно функционировать разрабатываемое оборудование, и перечислять с возможной полнотой потенциальные источники помех.

В числе исходных материалов для этапа проектирования должно быть (в ТЗ и программе) соответствующие ссылки на нормативно-техническую документацию, относящуюся к способам обеспечения ЭМС разрабатываемого оборудования. Разработчик должен быть знаком с методами расчета параметров и анализом ЭМС, средствами снижения уровня помех, с характеристиками восприимчивости к ним оборудования и т.д. Должны быть известны прототипы изделий и их узлов, систем с близкими требованиями к обеспечению ЭМС, снижения уровня помех и во восприимчивости к ним оборудования и т.д.

В процессе проектирования рассматривают способы выполнения требований ТЗ и программы в части обеспечения ЭМС разрабатываемого оборудования, определяют возможность соответствия параметров ЭМС требованиям стандартов, рассчитывают основные параметры, выявляют дополнительные требования, не предусмотренные в ТЗ, но необходимые для функционирования в условиях реальной помеховой обстановки, и предусматривают основные методы контроля требований ТЗ в части обеспечения ЭМС. Если анализ различных вариантов решений приводит к выводу о нецелесообразности (например, экономической) или не возможности выполнения каких-либо требований к обеспечению ЭМС, то должны быть выявлены не только причины, но и пути решения возникших затруднений. При необходимости проводят исследования факторов, обуславливающих такие затруднения. В тех случаях, когда обеспечение ЭМС изделия зависит от качества комплектующих элементов, следует предусматривать специальную работу по совершенствованию параметров ЭМС этих элементов; такая работа должна быть согласована с поставщиком элементов на основе

требований к изделию в целом.

В результате проектирования должен быть сделан выбор наилучшего из рассмотренных вариантов схемно-конструктивных решений, в наибольшей степени удовлетворяющих заданным требованиям к обеспечению ЭМС разрабатываемого оборудования.

На последнем этапе – конструирования- создаются макеты или образцы изделия. При этом решают практические задачи по реализации заданных параметров ЭМС оборудования, экспериментально подтверждают возможность обеспечения ЭМС в комплексе с другими видами оборудования и возможность выполнения требований стандартов, создают документацию для производства оборудования, включая технические условия на узлы и блоки с требованиями к их помехозащищенности. Существенное внимание в документации уделяют способам реализации требований к обеспечению ЭМС с учетом производственных допусков на параметры оборудования в целом и его узлов, а также методам и планам испытаний по ЭМС. При необходимости проверяют дополнительные требования к обеспечению ЭМС!, которые были выявлены на этапе проектирования.

На этапе производства установочной партии уточняют технические условия на узлы и изделие в целом по ЭМС, а также на методы автономных испытаний оборудования и испытаний с учетом влияния другого оборудования. Особое внимание уделяют монтажу изделия, предназначенного для работы в комплексе с другими средствами, и при необходимости разрабатывают соответствующие технические условия.

Последний этап - испытание оборудования на соответствие требованиям технических условий и составление программы работ по обеспечению ЭМС. Для решения задач обеспечения ЭМС сложного и ответственного электрооборудования в процессе монтажа, наладки, сдачи и эксплуатации на судостроительном предприятии необходимо создавать специальные технические службы ЭМС.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

1. Влияние импульсных помех на судовое электронное и электротехническое оборудование

- 1.1. Элементная база.
- 1.2. Цифровые устройства управления
- 1.3. Аналоговые устройства управления
- 1.4. Измерительные устройства
- 1.5. Энергетическое оборудование

2. Снижение уровней импульсных помех в СЭЭС

- 2.1. Подавление помех в источнике
- 2.2. Методы снижения уровней помех при распространении в сети

3. Защита оборудования от импульсных помех

- 3.1. Сетевые и входные фильтры
- 3.2. Экранирование и заземление
- 3.3. Нелинейные элементы
- 3.4. Особенности проектирования вторичных источников питания
- 3.5. Рациональное проектирование оборудования

Литература