

Санкт-Петербургский Государственный Морской Технический Университет

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

ИЗМЕРЕНИЯ И ИСПЫТАНИЯ В ОБЛАСТИ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ СОВМЕСТИМОСТИ В СУДОВЫХ ЭЛЕКТРОЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ СИСТЕМАХ

Учебник пособие

Санкт-Петербург
1989

1. ИЗМЕРЕНИЕ ПОМЕХ НА СУДАХ

1.1. Измерение импульсных токов и напряжений.

Система для измерения параметров импульсных помех (рис.1.1) состоит из датчика импульсных токов или напряжений 1, соединительного кабеля 2 и собственно измерителя 3. Пригодность измерительной системы для измерения параметров ИП оценивают в первую очередь ее полосой пропускания f_n , временем нарастания переходной характеристики τ_n и в ряде случаев, величиной выброса на переходной характеристике.

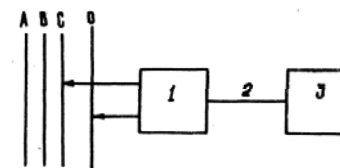


Рис. 1.1. Система измерения параметров импульсных помех (ИП)

Под временем нарастания импульса напряжения или тока понимают время, в течение которого рассматриваемая величина возрастает от 0,1 до 0,9 максимального значения. Полоса пропускания связана с временем нарастания соотношением [1]:

$$\tau_n = 0,35 / f_n.$$

Малая погрешность в измерении амплитуды импульсных токов и напряжений с длительностью τ_n может быть обеспечена при выполнении условий $\tau_n \gg \tau_n$ а в измерении их временных параметров - при выполнении условия $\tau_n \gg \tau_n$, где τ_n - длительность фронта импульса.

При измерениях ИП в цепях переменного тока возникает необходимость отделить собственно импульс от переменного напряжения промышленной частоты. Эта задача решается либо путем введения в датчик напряжения или тока фильтра верхних частот, либо за счет выполнения датчика малочувствительным и низкочастотном диапазоне, либо компенсацией переменной составляющей в измерителе.

1.1.1. Делители напряжения. Датчики тока.

В технике импульсных измерений применяются омические, емкостные делители напряжения и делители смешанного типа.

Омический делитель (рис. 1.2) состоит из последовательно соединенных резисторов R_1 и R_2 , причем обычно $R_1 \ll R_2$. Под коэффициентом деления понимают отношение измеряемого на напряжения $u_1(t)$ к напряжению, снимаемое с R_2 - $u_2(t)$:

$$k = u_1(t) / u_2(t) = (R_1 + R_2) / R_2.$$

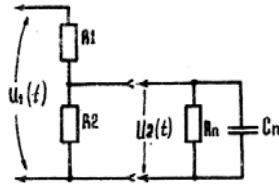


Рис. 1.2. Омический делитель напряжения

Параллельно резистору R_2 омического делителя включено входное сопротивление R_n и входная емкость C_n измерителя и соединительного кабеля. Для осциллографа сопротивление R_n составляет 0,1-1 МОм, емкость C_n - от 1 пф для ламповых пробников до 100 пф. Влиянием входного сопротивления всегда можно пренебречь, входная емкость образует с резистором R_1 интегрирующую цепочку, увеличивающую время нарастания τ_n измерительной системы. Для компенсации влияния входной емкости измерителя включают параллельно R_1 конденсатор C_1 , ускоряющий заряд емкости C_n при нарастании входного напряжения. Образованный элементами R_1 , R_2 , C_1 , C_n , смешанный делитель напряжения (рис.1.3) имеет оптимальные характеристики, если $R_1 R_2 = C_1 C_n$.

При измерениях помех на судах из-за ограниченности места не всегда можно установить измеритель вблизи точки измерения, поэтому датчик и измеритель приходится свмещать многометровым коаксиальным кабелем. Здесь необходимо считаться как с большой собственной емкостью кабеля (30-50пф/м), так и с вероятностью искажения формы измеряемого импульса из-за переходных процессов при несогласовании кабеля. В этом случае целесообразно снабжать датчик усилителем импульсов, имеющим выходное сопротивление, равное водновому сопротивлению соединительного кабеля, а также использовать в усилителе мощный выходной каскад, способный работать на емкостную нагрузку.

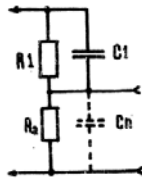


Рис. 1.3. Смешанный делитель напряжения.

Омический делитель напряжения должен иметь малую собственную индуктивность, что предотвращает возникновение выбросов на переходной характеристике. Один из возможных вариантов конструктивного исполнения делителя с малой собственной индуктивностью показан на рис. 1.4. Применение проволочных резисторов в делителе недопустимо, наиболее пригодны малоиндуктивные резисторы типа ТВО.

Для измерения параметров коротких импульсов напряжения используются

емкостные делители напряжения (рис. 1.5). Измеряемое напряжение $u_1(t)$ и выходное напряжение $u_2(t)$ связаны между собой коэффициентом деления k :

$$k = u_1(t) / u_2(t) = (C_1 + C_2) / C_1.$$

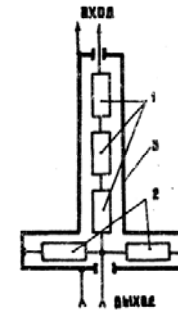


Рис.1.4. Конструкция омического делителя напряжений 1 - последовательно соединенные резисторы; 2 - параллельно соединенные резисторы; 3 - металлический цилиндрический корпус.

Коэффициент деления не зависит от частоты ω , пока можно пренебречь влиянием собственных индуктивностей L_1 и L_2 входных и выходных цепей делителя, т.е. при выполнении условия

$$1/200 \pi \sqrt{L_1 C_1} \gg f_r = \omega_r / 2\pi \gg 1/200 \pi \sqrt{L_2 C_2}.$$

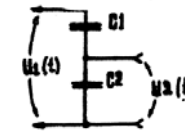


Рис. 1.5. Емкостный делитель напряжения

Наиболее распространенный способ определения тока основан на измерении падения напряжения на измерительном сопротивлении (шунте), включенном в разрыв проводника. Для импульсных токов в схем замещения шунта (рис.1.6,а) необходимо учитывать его собственную индуктивность. Падение напряжения на шунте имеет две составляющие:

$$u_R(t) = i(t)R \quad \text{и} \quad u_L(t) = L di(t)/dt.$$

На рис.1.6,б показаны графики падений напряжений для тока с линейной нарастающими фронтами. Составляющая $u_L(t)$ может многократно превышать $u_R(t)$,

существенно искажая результаты измерений.

Шунт для измерения импульсных токов в цепях с номинальными токами до десятков ампер может быть изготовлен в коаксиальном исполнении с использованием малоиндуктивных резисторов типа ТВО. Для больших номинальных токов применяют коаксиальную конструкцию (рис.1.7) с элементом сопротивления из высокоомной фольги с толщиной, меньшей глубины проникновения поля на частоте, соответствующей фронту импульса. Недостатками шунтов является необходимость включения его в силовую цепь (что не всегда допустимо по условиям эксплуатации судна), а также гальваническая связь измеритель с сетью, снижающая безопасность при измерениях. Поэтому шунты при измерениях помех на судах используются ограниченно.

От указанных недостатков свободны бесконтактные трансформаторные датчики импульсных токов (пояс. Роговского [2]). Если проводник с током $i(t)$ пропустить через тороидальную катушку (рис.1.8), имеющую ω витков, то при изменении этого тока в катушке будет наводиться ЭДС (В), равная

$$e_2 = 0,4 \pi \omega (S/r) di/dt \cdot 10^{-8}, \text{ В},$$

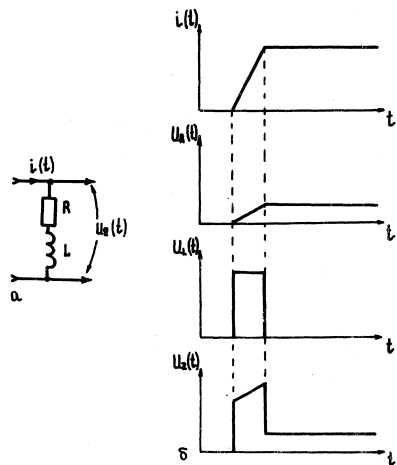


Рис.1.6 Шунт для измерения тока: а-схема замещения; б-кривые напряжений на элементах схемы.

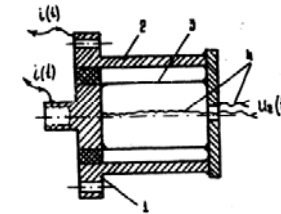


Рис. 1.7. Коаксиальный шунт: 1 - токоподводы 2 - обратный цилиндрический токопровод; 3 -резисторный элемент; 4 - выводы к измерителю.

где μ - относительная магнитная проницаемость, а S, см², и r; см, - площадь сечения и средний радиус сердечника катушки. Если полученную ЭДС проинтегрировать с помощью интегратора, то на его выходе будет напряжение $u_2(t)$, повторяющее по форме входной ток $i(t)$. Интегратор может быть выполнен либо в виде самостоятельного узла, либо им может являться сам пояс Роговского.

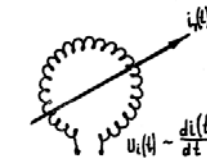


Рис. 1.8. Схема пояса Роговского

Самоинтегрирующий пояс Роговского нагружен на безындуктивный резистор, сопротивление которого R_n выбирают из условий

$$L_n / (R_n + R_n) \gg \tau_n; R_n \gg R_n,$$

где L_n и R_n - собственная индуктивность и активное сопротивление обмотки датчика, а τ_n - длительность измеряемых импульсов тока. Напряжение $u_2(t)$ на нагрузочном резисторе будет связано с измеряемым током $i(t)$ формулой

$$u_2(t) = i(t) R_n / \omega.$$

В конструкции пояса Роговского (рис.1.9), кроме катушки 1 с сердечником 2 и нагрузочных резисторов 3 в коаксиальном исполнении, имеется экран 4 с продольным и поперечным разрезами, который одновременно осуществляет функции обраного витка, уменьшающего погрешности от несоосного расположения проводника с током и датчика, а также демпфирующие собственные колебания пояса резисторы 5. Диапазон частот у лучших конструкций пояса Роговского от 0,01 Гц до 100 МГц. Датчик может быть изготовлен разъемным, что существенно упрощает подготовку к измерениям.

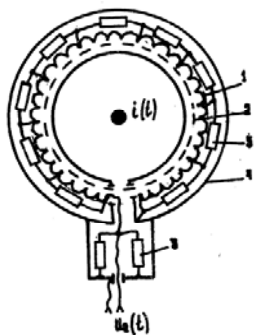


Рис 1.9. Конструкция пояса Роговского

1.1.2. Стандартные средства измерения.

К стандартным средствам измерения параметров импульсов могут быть отнесены вольтметры одиночных импульсов, запоминающие осциллографы, цифровые осциллографы и специальные осциллографы для фоторегистрации одиночных импульсов. Основными техническими характеристиками этих приборов сведены в табл. 1.1.

Стандартные средства измерения параметров ИП отличаются большими массой и габаритами, затрудняющими их использование на судах; у них отсутствует автономное питание, поэтому электропитание приходится производить от общесудовой сети с по мехами. Основным недостатком упомянутых приборов является необходимость присутствия оператора в процессе измерений. Кроме того, ИП носят случайный характер, и нужна многосуточная регистрация для получения требуемого для анализа массива данных. Поэтому необходимы специализированные измерители ИП.

Таблица 1.1
Технические характеристики некоторых типов приборов, пригодных для измерения ИП

Тип прибора	Полоса пропускания, МГц	Время нарастания и перегиб при разряжении, мс	Габаритные размеры, мм	Масса, кг
Вольтметр одиночных импульсов В4-17 (длительность импульсов 0,2...100 мкс)			490x176x475	17
Осциллограф автономный СЗ-14 (двухлучевой)	0-50	7	480x280x475	34
СЗ-18 (однлучевой)	0-10	35	360x194x564	16
Осциллограф светострой с фоторегистратором СЗ-4А	0-100	3,5	486x257x550	40
Осциллограф автономный цифровой СЗ-8	0-20	35	480x200x555	29

1.1.3. Нестандартные средства измерения.

Серийно выпускаемые измерительные приборы не предназначены для проведения длительных измерений параметров ИП в судовых условиях. Для получения статистических данных об ИП в электроэнергетической системе необходимы приборы с накоплением информации (регистраторы) или с первичной статистической обработкой (анализаторы), способные длительное время автоматически фиксировать параметры редко повторяющихся импульсов. Для выявления источников ИП, проверки эффективности подавления помех и средств защиты нужен измеритель амплитуда импульсов напряжения. Приборы должны иметь минимальные габариты, массу и потребляемую мощность, высокое быстродействие и помехозащищенность, превышающую уровни измеряемых помех.

Входное сопротивление приборов должно на порядок превышать сопротивление источника помех, т.е. быть не менее 10^3 Ом при измерении сетевых помех и 10^6 Ом при измерении наводок от электрических полей.

Регистраторы преобразуют значение параметра импульсов в сигнал, удобный для вывода на носитель информации (бумажную или магнитную ленту, магнитный диск и т.п.). Вход регистратора на время вывода информации может блокироваться или оставаться открытым.

Простейшей схемой реализации регистратора амплитуды ИП является схема с расширителем импульсов РИ (рис. 1.10), который увеличивает длительность импульсов до величины, достаточной для записи самописцем или светолучевым осциллографом при сохранении амплитуды, фильтр высоких частот ФВЧ, имеющий конденсатор C_1 , резисторы R_1, R_2 , пропускает импульсы, значительно ослабляя напряжение основной частоты сети. Делитель напряжения Д (резисторы R_1, R_2) уменьшает амплитуду импульсов до величины, удобной для обработки. Расширитель импульсов РИ может быть выполнен в виде пикового детектора (диод V_1 , конденсатор C_2) с постоянной времени заряда $\tau_3 = C_2 R_1 R_2 / (R_1 + R_2)$, много меньшей длительности измеряемых импульсов. Постоянная разряда конденсатора $\tau_p = R_3 C_2$ выбирается исходя из обеспечения длительности расширенного импульса достаточной для фиксации самописцем. Истоковой повторитель на транзисторе имеет высокое сопротивление и устраняет влияние самописца на разряд конденсатора.

Максимальное значение выходного сигнала ограничено напряжением питания повторителя (для КПЗ03-25В). Поэтому коэффициент деления делителя необходимо выбирать таким образом, чтобы импульсы напряжения на детекторе были меньше его величины. Минимальные значения фиксируемых амплитуд определяются падением напряжения на диоде (для Д312-1В). Установка эмиттерного повторителя на входе схемы позволяет снизить фиксируемую амплитуду и постоянную времени заряда конденсатора. Для фиксации импульсов отрицательной полярности может применяться аналогичная схема с противоположным направлением диода и соответствующим повторителем или возможна установка перед детектором инвертора полярности (рис. 1.11, а).

Регистрация длительности импульсов и их фронтов (скорости изменения напряжения) может быть осуществлена с помощью схем с соответственно интегрирующей и дифференцирующей цепью перед детектором (рис. 1.11, б и 1.11, в). Известно, что амплитуда напряжения на выходе интегрирующей цепи при $RC \gg t_n$ пропорциональна длительности импульса t_n , а на выходе дифференцирующей цепи при $RC \ll t_n$ пропорциональна максимальной скорости изменения напряжения на ее входе.

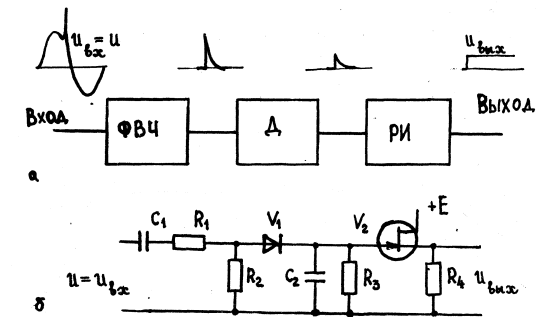


Рис. 1.10 Структурная схема (а) и простейшая схемная реализация (б) регистратора амплитуды ИП напряжения u .

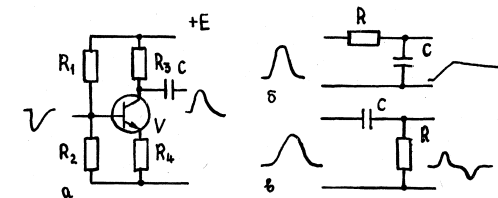


Рис. 1.11. Схемы дополнительных устройств, устанавливаемых перед расширителем импульсов: а - инвертор полярности; б - интегрирующая и в-дифференцирующая цепи

Наиболее точное измерение и регистрацию параметров импульсов обеспечивают приборы на основе микропроцессорной техники, преобразующие параметры импульсов в цифровой код, сохраняющийся в памяти.

Анализаторы подсчитывают количество импульсов, параметры которых имеют значения, превышающие заданные пороги или попадающие между порогами. В результате измерений определяются соответственно гистограммы распределения или плотности распределения параметров ИЛ.

Наиболее эффективны многоканальные анализаторы (рис. 1.12.), содержащие общий фильтр высокой частоты ФВЧ, делитель напряжения Д и N каналов с пороговыми устройствами ПУ и счетчиками С. Каждое пороговое устройство имеет свой заданный порог срабатывания и может быть выполнено на селекторе амплитуды. Селектор больших амплитуд пропускает импульсы, превышающие пороговое значение, и обычно содержит обратно смещенный диод или стабилитрон. Возможно использование предыдущего мультивибратора с определенным порогом переключения по входу.

Схема предыдущего мультивибратора на рис. 1.13, а при $R_1 = 0$ в зависимости от значения R_4 имеет порог срабатывания 1-4 В. Увеличение сопротивления резистора R_1 позволяет получить порог большей величины. Значение порога мало

зависит от длительности фронта импульсов и при использовании высокочастотных транзисторов оказывается практически постоянным для импульсов с длительностью более 0,2 мкс. При срабатывании схемы на резисторе R6 формируется импульс, длительность которого в зависимости от емкости конденсатора может составлять 10^{-5} - 1 с, что достаточно для фиксации импульса счетчиком любого типа. На рис.1.13,а приведена возможная схема подключения электромагнитного счетчика импульсов Y, который обеспечивает фиксацию, суммирование импульсов, хранение и индикацию результата. Такой счетчик применяют при малом числе требуемых каналов (1-2) и необходимости сохранения результатов при прерывании питания. В других случаях предпочтительно использование электронных счетчиков и индикаторов.

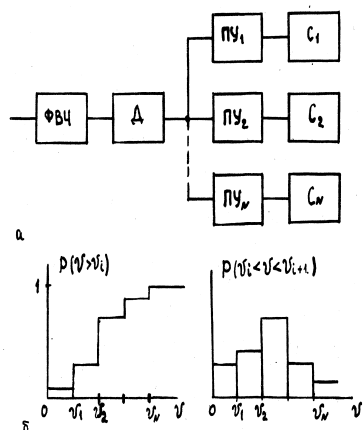


Рис. 1.12. Структурная схема анализатора амплитуды ИП (а) и полученные с его помощью гистограммы амплитуды (б)

Ждущий мультивибратор на рис. 1.13.б способен фиксировать только импульсы с длительностью более 1 мкс. Порог в основном определяется стабилитроном V₁. Резистор R ограничивает ток открытого тиристора ниже тока удержания. Конденсатор C должен обеспечить длительность импульса тока через счетчик Y достаточную для его срабатывания. Для фиксации коротких импульсов на вход схем необходимо установить расширитель импульсов. Элементы схем на рис.1.13,а и 1.13,б потребляют малую мощность в едущем режиме, что важно при автономном питании.

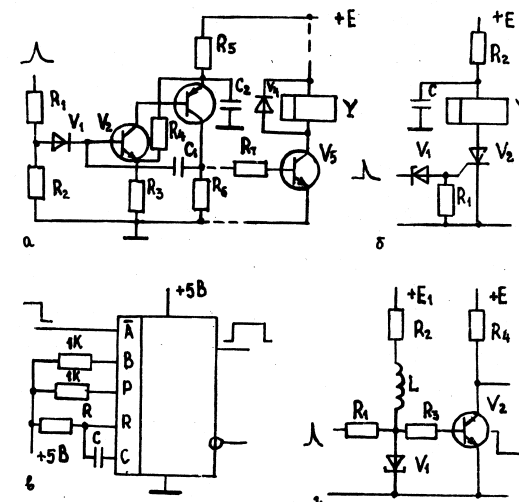


Рис. 1.13. Принципиальные схемы пороговых устройств для фиксации ИП.

Пороговое устройство на микросхеме K155AG3 (рис.1.13.в) позволяет фиксировать перепады напряжения от 1 В. Длительность выходного импульса определяется параметрами R, C внешних элементов.

Для фиксации очень коротких импульсов от 10^{-8} с можно применить схему ждущего мультивибратора на туннельном диоде (рис.1.13,г). Порог определяется резистором R, режимом диода V может быть получен начиная с единиц вольт. Длительность выходного сигнала задается индуктивностью дросселя L. Амплитуда сигнала на выходе не превышает 0,8 В.

Поэтому для согласования с последующими схемами необходим усилитель, например, на транзисторе V.

Анализ длительностей, фронтов импульсов, параметров пачек может быть выполнен только более сложными приборами которые, по сути, должны быть специализированными вычислительными машинами. Прибор должен содержать измерительную часть, схемы вывода информации, схемы выделения пачек из потока импульсов и их анализа (выделения максимальной амплитуды, подсчета импульсов в пачке) и микроЭВМ для окончательной обработки информации.

1.1.4. Порядок проведения измерений.

Измерения импульсных напряжений и токов в судовых электроэнергетических системах (СЭЭС) могут проводиться серийными или нестандартными приборами, рассмотренными выше. В общем случае напряжения на фазе относительно корпуса намеряются в соответствии с рис.1.14,а, а между фазами (симметричные напряжения) - в соответствии с рис.1.14,б. Резисторы R и конденсаторы C

образуют фильтр верхних частот, снижающий на входе измерителя напряжение основной частоты (сети в требуемое число раз k и пропускающий импульсы без существенных искажений. Значения R и C выбираются из условий:

$$k = \sqrt{1 + (1/2\pi f RC)^2}; RC \gg t_n;$$

$$C \gg C_{вх}; 10^3 \text{ Ом} < R << R_{вх},$$

где $C_{вх}$, $R_{вх}$ - входная емкость и сопротивление измерителя; t_n - максимальная длительность измеряемых импульсов.

Например, при $t_n = 10$ мкс, $C_{вх} = 100$ пф, $R_{вх} = 1$ МОм можно взять $R = 1$ кОм, $C = 10t_n/R \approx 0,1$ мкФ. Тогда напряжение на входе измерителя с частотой $f = 50$ Гц будет в $k = \sqrt{1 + (1/2\pi \cdot 50 \cdot 10^{-3} \cdot 10^{-7})^2} \approx 32$ раза меньше сетевого напряжения, а импульсы пройдут через фильтр с незначительными искажениями.

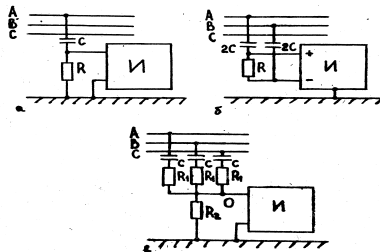


Рис.1.14.Схемы подключения прибора для измерения составляющих напряжения ИП в сети переменного тока: а - фазных; б - симметричных; в - несимметричных общего вида.

При применении приборов со встроенными фильтрами верхних частот вход прибора непосредственно подключается к исследуемой сети без дополнительных RC цепей. Измерения симметричных помех необходимо выполнять, используя дифференциальные входы прибора.

Измерения несимметричных напряжений общего вида (синфазных помех) можно провести в соответствии со схемой на рис.1.14,в. Ветвь с конденсаторами C и резисторами R и ветвь с резистором R имеют общую точку 0 , напряжение в которой по отношению к корпусу пропорционально среднему арифметическому фазных напряжений. Эти элементы являются также фильтром верхних частот. Коэффициент деления определяется отношением $1+R1/3R2$ и при $R2 = 56$ Ом, $R1 = 1500$ Ом составляет 10. Значение емкости C , выбираемое аналогично описанной выше, может быть взято равным 0,1 мкф.

Измерения импульсных токов проводятся в соответствии с рис.1.15 с помощью датчика (токосъемника). При измерениях линейного тока датчик охватывает одну из жил кабеля, при измерениях несимметричных токов - весь кабель.

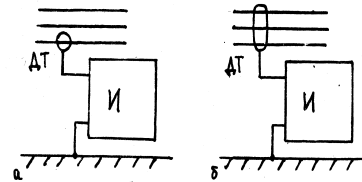


Рис. 1.15. Схемы включения прибора для измерения составляющих тока ИП: а - симметричных; б - несимметричных

Перед выполнением измерений необходимо проверить помехозащищенность измерительного прибора (рис. 1.16) путем подачи на зажимы цепей питания и на закороченную входную цепь прибора относительно корпуса импульса в напряжения (тока). Импульсы создаются имитатором с амплитудой до 1000 В (20 А) при длительности 1-10 мкс. При этом показания прибора должны быть на порядок меньше ожидаемых при измерениях. Для повышения помехозащищенности приборов применяют сетевые фильтры

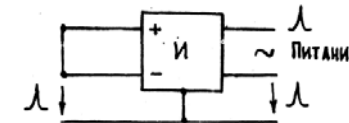


Рис .1.16. Схема проверки помехозащищенности измерителя помех

[14], сигнальные провода осциллографа пропускают через ферритовые кольца. При измерении наведенных напряжений малой амплитуды необходимо располагать прибор на максимальном расстоянии от цепей с высокими уровнями токов и напряжений. Измерения симметричных напряжений должны проводиться только с помощью дифференциальных входов. Корпус прибора при этом заземляется. При соединении входов между собой показания прибора должны быть на порядок меньше ожидаемых при намерениях.

1.2. Измерение периодических искажений напряжения

Напряжение, искаженное периодическими ИП, можно представить в виде суммы отдельных гармоник

$$u = U_0 + \sum_{p=1}^{\infty} U_p \sin(\omega_p t + \psi_p)$$

с амплитудой U_{mv} , угловой частотой ω_p и начальной фазой ψ_p . Обычно в переменном напряжении, отсутствует постоянная составляющая U_0 , и оно симметрично. Типичный пример такого напряжения и его спектральный состав приведены на рис.1.17. Степень искажений формы кривой напряжения характеризуется нормируемым показателем качества

$$K_{нс} = \left[\sum_{p=2}^{\infty} \left(\frac{U_p}{U_1} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100\% / U_1, \quad (1.1)$$

электроэнергии коэффициентом несинусоидальности напряжения или

$$K_{нс} \approx \left[\sum_{p=2}^n \left(\frac{U_p}{U_1} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100\% / U_n, \quad (1.2)$$

где U_n, U_1 , - номинальное действующее значение напряжения и его первой гармоники; n- номер последней из учитываемых гармоник (принимают $n=19$).

Измерение коэффициента несинусоидальности напряжения возможно двумя путями:

- ⊙ через практический гармонический анализ осциллограмм напряжения;
- ⊙ аппаратными методами.

В практике гармонического анализа осциллограмм период напряжения разбивают на интервалы и на каждом интервале измеряются мгновенные значения напряжения, которые вводятся в ЭВМ, работающую по программе разложения эмпирической функции в ряд Фурье. В результате определяются гармоники напряжения U_p и значение $K_{нс}$. Этот путь является очень трудоемким, так как требует большой работы по осциллографированию напряжения и снятию с осциллограмм исходных данных для ввода в ЭВМ. Погрешности определения U_p и $K_{нс}$ здесь зависят от величины интервала разбиения периода напряжения и превышают погрешность аппаратных методов измерения.

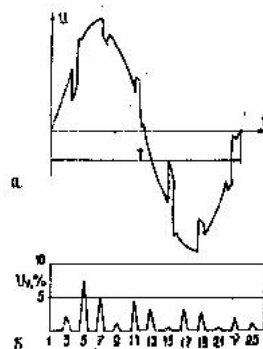


Рис.1,17. Напряжение, искаженное периодической ИП: а - осциллограмма; б - спектральный состав в низкочастотной области

Аппаратурные методы измерения $K_{нс}$ делятся на аналоговые и цифровые. В соответствующих аналоговых приборах измеряемый сигнал непосредственно подвергается обработке (усилению, преобразованию и т.п.) до получения информации на отсчетном устройстве. В цифровых приборах аналоговый сигнал сразу преобразуется в цифровую форму, и все операции, необходимые для получения конечного результата, производятся дискретными методами с помощью специализированного вычислительного устройства, рассчитывающего U_p , а затем и $K_{нс}$.

Аналоговые методы бывают спектральными и квазиспектральными. Спектральные методы основаны на использовании селективных приборов (анализаторов спектра, селективных вольтметров и т.п.) общего применения. С их помощью производятся измерения уровней гармонических составляющих напряжения, а вычисление $K_{нс}$ по полученным данным осуществляется вручную. Достоинства спектральных методов: широкий диапазон частот, в котором можно измерять U_p и возможность измерения очень малых $K_{нс}$ (0,0001-0,01%). Общественными недостатками спектральных методов являются: большая трудоемкость и повышенная погрешность измерений (примерно 10%) [3].

Квазиспектральные методы базируются на выделении или подавлении одной из составляющих напряжения - первой гармоники. - и определении действующих напряжений полного сигнала или высших гармоник. На их основе разработаны все известные приборы для измерения $K_{нс}$.

Технические характеристики серийных приборов, с помощью которых можно определить значение $K_{нс}$ напряжения, представлены в табл.1.2.

Приборы можно разделить на три группы:

- 1) непосредственно измеряющие $K_{нс}$ (типа С6-5);
 - 2) непосредственно измеряющие U_p , по значениям которых $K_{нс}$ но. рассчитываются вручную (типа С4-48, СК4-56, 3580А);
 - 3) непосредственно измеряющие U_p и $K_{нс}$ (типа 43250, 2120).
- Модификацией ранее применявшихся приборов С6-1, С6-1А является измеритель нелинейных искажений С6-5, в котором осуществляется раздельное измерение действующего напряжения высших гармоник сигнала и действующего значения этого же сигнала при нормированной величине напряжения первой гармоники, таким образом, $K_{нс}$ здесь определяется по формуле

$$K_{нс} = \left[\sum_{p=2}^{\infty} \left(\frac{U_p}{U_1} \right)^2 \right]^{1/2} \cdot 100\% / U_1.$$

Это приводит к погрешности по сравнению с точным значением [см. (1.1)], которая, впрочем, незначительна до значений $K_{нс} = 15\%$. Отсчет показаний прибора производится по стрелочному индикатору.

Анализаторы спектра С4-48, СК4-56 позволяют измерять действующие значения гармонических составляющих напряжения U_p . Отсчет производится по стрелочному индикатору С4-48 или по

1.3. Измерение электромагнитных полей

1.3.1. Антенны и датчики поля.

Напряженность электромагнитного поля E измеряется в волнах на метр (В/м) а магнитного H - в амперах на метр (А/м). Для электромагнитного поля в дальней зоне (расстояние от источника больше $D/2\lambda$, где D - размер источника; λ - длина волны) напряженности E и H связаны соотношением $E/H=377\text{ Ом}$. Поэтому для описания электромагнитного поля используют напряженность обычно одной электрической его составляющей и E выражаемой в вольтах на метр или децибеллах, отнесенных к 1 мкВ/м . В ближней зоне (на расстоянии, меньшем $D/2\lambda$ от источника) соотношение между E и H может быть различным в зависимости от вида источника и расстояния до него: если поле вызывается током в цепи, то $E/H < 377 \text{ Ом}$; если причина в разности потенциалов, то $E/H > 377 \text{ Ом}$. По этому в ближней зоне (типичный случай для СЭЭС и электронного оборудования) необходимо отдельно рассматривать магнитное и электрическое поля.

Большинство методов измерения напряженности поля основано на измерении напряжения, наводимого в антенне, и соответствующего пересчета результата с учетом частоты помехи и параметров антенны.

В связи с тем что на разных частотах оптимальные антенны различны, диапазон частот обычно разбивают на поддиапазы; 10-1600 кГц; 1,5-30; 30-300 МГц. На частотах выше 300 МГц полезную информацию об интенсивности излучения обеспечивают измерения плотности потока энергии, а не напряженности поля. В поддиапазоне до 30 МГц чаще применяют рамочную антенну, а на более широких частотах - широкополосные диполи и логоприодические антенны [15].

Напряженность электрического поля может быть измерена с помощью несимметричного вибратора, находящегося над поверхностью земли (рис.1.18,а). Под действием продольной по отношению к оси вибратора составляющей напряженности E в антенне будет наводиться ЭДС, равная $E h_d$, где h_d -действующая высота (длина) антенны. Для рассматриваемого случая можно положить $h_d = h/2$, а емкость антенны

$$C_A = \frac{2\pi\epsilon_0 h}{\ln\left(\frac{2h}{a}\right) - 2}$$

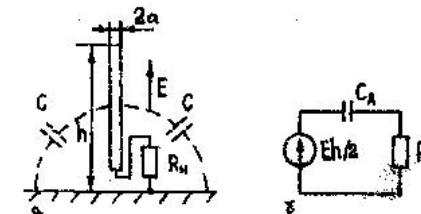


Рис. 1.18. Несимметричный вибратор над землей (а) и эквивалентная схема замещения (б)

Тогда при $R_n \ll 1/\omega C_A$ на основе схемы замещения (рис. 1.18,б) можно записать напряжение на нагрузке антенны в виде

$$U_n = i R_n = C_A \frac{d(E h_A)}{dt} \quad R_n = C_A R_n h_A \frac{dE}{dt}$$

При $R_n \gg 1/\omega C_A$ имеем

$$U_n = h_A E$$

Таким образом, если нагрузочное сопротивление мало по сравнению с емкостным на частоте помехи ω , то напряжение пропорционально производной от напряженности поля, а значит, частоте, и только при обратном соотношении - пропорционально напряженности. При измерении синусоидальных помех обычно $R_n \ll 1/\omega C_A$, и для определения E приходится

Технические характеристики приборов для измерения несимметричности напряжений

Прибор	Тип	Наименование величина	Частотный диапазон, Гц	Погрешность измерения, %	Диапазон входного сигнала, В	Диапазон рабочих температур, °С	Масса, кг	Габаритные размеры, мм
Измеритель нелинейных искажений	С6-5	$K_{нс}$	$20-20 \cdot 10^3$	5-10	$10^{-1}-10^2$	5-40	14	490x135x355
Анализатор спектра	С4-48	U_{ϕ}	$10-20 \cdot 10^3$	10	$10^{-2}-30$	15-35	18	492x175x355
Анализатор спектра	СМ4-66	U_{ϕ}	$10-60 \cdot 10^3$	10	$10^{-9}-10$	5-40	30	160x480x555
Анализатор гармоник	43250	$K_{нс}, U_{\phi}$	$2-2 \cdot 10^3$	4	50-380	5-40	10	368x246x320
Анализатор спектра фирмы "Брюль и Кьер"	2120	$K_{нс}, U_{\phi}$	$2-20 \cdot 10^5$	2	$10^{-5}-3 \cdot 10^2$	5-40	11	250x380x200
Анализатор спектра фирмы "Кьюбит Пакард"	3590А	U_{ϕ}	$5-5 \cdot 10^4$	5	$10^{-7}-20$	5-40	-	-

осциллографическому индикатору СК4-56, которыми определяется спектр напряжения. Осциллографический индикатор может работать в трех режимах: осциллографическом (без памяти); периодическом (запоминания изображения на время прямого хода развертки); длительного запоминания (до 30 мин) с принудительным стиранием изображения. Для увеличения точности измерения U_{ϕ} СК4-56 может комплектоваться вместо осциллографического индикатора ЯЧС-0830 стрелочным ЯЧС-57. По измеренным значениям U_{ϕ} по формуле (1.2) рассчитывается $K_{нс}$.

Из зарубежных и отечественных анализаторов наилучшие характеристики имеет прибор 2120 из комплекта фирмы "Брюль и Кьер" Он позволяет не только проводить гармонический анализ с высокой точностью, определяя U_{ϕ} но и измеряет $K_{нс}$ так как обеспечивает подавления любой гармоника напряжения, в том числе и основной в спектре сигнала.

Все указанные приборы построены по аналоговому принципу. Исключение составляет новый отечественный анализатор типа 43250, который является цифровым. По своим возможностям он приближается к прибору 2120, Анализатор гармоник 43250 позволяет измерять U_{ϕ} , $K_{нс}$ и фазы высших гармоник тока и напряжения в каждой фазе трехфазной электрической сети переменного тока с частотой 50 Гц [12]. В приборе предусмотрен аналоговый вывод информации об измеряемой величине для подачи на внешнее регистрирующее устройство.

Измерения U_{ϕ} и $K_{нс}$, в судовых условиях и на стендах могут проводиться непосредственно с помощью приборов или через промежуточный носитель информации. В последнем случае контролируемое напряжение записывается, например, на магнитную ленту с помощью магнитофона, а затем сигнал расшифровывается приборами. Подключение к точке контроля в любом случае производится через измерительный трансформатор напряжения. Измерения осуществляются в стационарном тепловом режиме работы установки в течение 30 мин в период наибольших нагрузок полупроводниковых преобразователей, являющихся основными источниками периодических ИП напряжения сети.

использовать графики частотной зависимости ин. Чтобы исследовать форму импульсного поля, необходимо обеспечить максимальное значение R_n или предусмотреть интегратор в измерителе. Следует также учитывать, что антенна имеет резонанс на частоте $f_r = c/4h_d$ (с- скорость света), и на этой частоте возможно возникновение колебаний при воздействии импульсов поля с коротким фронтом.

Для измерения сильных импульсных электрических полей применяют индукционный электрометрический преобразователь, представляющий собой плоский круговой конденсатор. Наведенное напряжение обрабатывается интегрирующим устройством, а затем сигнал, пропорциональный E , преобразуется в свет и передается по световоду на измеритель. При этом верхняя граничная частота всего тракта измерений может быть получена более 35 МГц [2].

Напряженность магнитного поля H может быть измерена с помощью рамочной антенны (рис.1.19). Под действием составляющей переменного магнитного поля, направленной перпендикулярно плоскости рамки, в ней наведется ЭДС, пропорциональная dh/dt и площади рамки S_a . Напряжение на нагрузке будет различным в зависимости от соотношения сопротивления R_a и индуктивного сопротивления $L\omega$, где ω – частота измеряемой помехи.

При $R_n \gg \omega L_n$ напряжение U_n зависит от частоты:

$$U_n = \mu_0 S_n \frac{dH}{dt},$$

и для определения H необходимо учесть эту зависимость или использовать в измерителе интегратор.

При $R_n \ll \omega L_n$ значение напряжения равно

$$U_n = \frac{R_n}{L_n} \mu_0 S_n H,$$

и измерение U_n позволяет определять H .

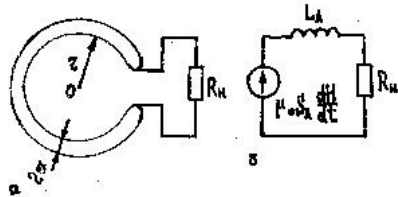


Рис. 1.19. Рамочная антенна (а) и эквивалентная схема замещения (б)

Необходимо учитывать возникновение резонанса в антенне, который может привести к колебаниям напряжения при воздействии импульсов с коротким фронтом. Однако при уменьшении R_n и введении дополнительных демпфирующих резисторов колебания могут быть подавлены.

При измерениях импульсных магнитных полей применяют в качестве магнитометрических преобразователей катушки с различными сердечниками и без сердечников, а также полупроводниковые преобразователи магнитного поля [2], [17].

Принцип действия катушки аналогичен рассмотренному выше. Увеличение числа витков приводит к увеличению наведенной ЭДС и индуктивности L_a . Сердечники из пермаллоя (при измерении низкочастотных слабых полей) или феррита (при измерении высокочастотных слабых полей) концентрируют поле и повышают L_a . Интегрирование ЭДС может быть выполнено в самой катушке при малом сопротивлении нагрузки или с помощью дополнительной интегрирующей цепи.

Полупроводниковые преобразователи магнитного поля действуют на основе эффекта Холла, магниторезисторного, магнитооптического или магнитодиодного эффекта [17]. В преобразователях Холла возникает напряжение, пропорциональное величине магнитной индукции B и величине управляющего тока. Чувствительность $U/I_y B$ преобразователей

резного типа составляет от 0,03 до 103 В/А Тл.

Магниторезисторы изменяют свое сопротивление при изменении внешнего магнитного поля. Зависимость нелинейная и лишь на участке от 0,3 до 10 Тл близка к линейной. Чувствительность может составлять

$$\frac{\Delta R}{R_{00}} = (0,1 - 1) \cdot 1/T_A$$

Магнитодиоды изменяют ток в прямом направлении при изменении поперечного магнитного поля. Чувствительность $\Delta U/V$ для диодов КД301, КД303 составляет 5-50 В/Тл. Гальваномагниторекомбинационные преобразователи представляют собой особый вид полупроводниковых резисторов, на которых при постоянном питающем токе изменяется падение напряжения, чувствительность $\Delta U/V$ наводится в пределах 2-100 В/Тл [17].

1.3.2. Измерители электромагнитных помех.

В качестве измерителей параметров импульсных полей могут быть использованы измерители параметров импульсов напряжения (см. параграф 1.1), оснащенные соответствующими антеннами или преобразователями.

Для измерений периодических полей пригодны стандартные измерители радиопомех, являющиеся, по сути, специализированными радиоприемниками, и анализаторы спектра. Измерители в комплекте с антеннами производства ГДР нашли широкое применение, Измерители радиопомех SMV 11A(0.01-30 МГц) и SMV 8A (25-1000 МГц) поставляются с соответствующими антеннами, пробниками, токосъемником. Измерители напряженности поля FSM 11A и FSM 8A позволяют проводить измерения в тех же частотных диапазонах. Поставляются комплект антенн FMA 11 на диапазон 0,01-30 МГц и антенны ДР на более высокие частоты, пробники напряжения ТК11, ТК12, ТК15 для частот более 0,01 МГц, токосъемники SMZ 11(0,01-30 МГц) для кабелей диаметром до 15 мм и SMZ 13(0,009-30 МГц) для кабелей до 60мм. Малогабаритные переносные искатели BSM 001, BSM 311 пригодны для измерений напряженности полей с частотой выше 150 кГц.

При частотах в диапазоне 10 Гц-10 кГц возможно применение рамочной антенны РА1, токосъемника и анализатора спектра СК4-56 или анализаторов с микропроцессорным управлением СК4-83 (5 Гц-1 МГц), СК4-84 (30 Гц-10 МГц).

Измерители радиопомех и напряженности поля позволяют измерять поля от единиц до 107 мкВ/м при погрешности порядка 1-4 дБ, выходные схемы способны выделять средние, эффективные (среднеквадратические), пиковые и квазипиковые значения помех. При синусоидальном поле вид детектирования не влияет на результат измерений, так как все перечисленные значения пропорциональны. При импульсном характере помех результаты измерений будут различными [4]:

- пиковое детектирование позволяет определить наибольшее значение уровня импульсов в данной частотной полосе;
- квазипиковое детектирование имитирует влияние импульсов на слух при радиовещательном приеме;
- детектирование среднего значения огибающей выделяет средний уровень амплитуды в основной полосе частот;
- детектирование эффективного (среднеквадратического) значения позволяет определить результаты теплового процесса.

1.4. Измерение помех при испытании оборудования

Режимы работы электротехнического и электронного устройств как источников помех характеризуют напряжением или током, создаваемыми на его зажимах, и напряженностью поля помех на заданном расстоянии от него. Для обеспечения ЭМС устанавливаются требования к допустимым уровням помех, что обуславливает необходимость проведения соответствующих измерений. Напряжение помех, создаваемое оборудованием в проводах питания, измеряют с помощью эквивалента сети, устанавливаемого в каждый провод питания (рис.1.20).

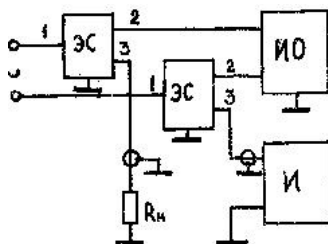


Рис 1.20. Схема измерения напряжения помех в цепях питания однофазного испытываемого оборудования ИО с помощью эквивалента сети ЭС.

Эквивалент сети ЭС обеспечивает подачу питания к испытываемому оборудованию ИО (клемма 2), защищая источник питания от возникающих помех и препятствуя проникновению помех от источника питания (клемма 1) к оборудованию (клемма 2), тем самым устраняется влияние посторонних помех на результат измерения. Эквивалент стабилизирует в определенных пределах сопротивление цепи питания, что необходимо для обеспечения однозначности и сопоставимости результатов испытаний. Измеритель помех И подключается непосредственно к эквиваленту сети (клемма 3) без дополнительных фильтров верхних частот. В большинстве случаев требуется измерение несимметричных напряжений, так как именно они создают поля, проникающие внутрь чувствительного оборудования. При проведении измерений на одной из фаз питания (см.рис.1.20) свободный выход 3 эквивалента сети другой фазы следует подключить к корпусу через резистор R_n с сопротивлением, равным входному сопротивлению измерителя (50, 75 Ом). При испытаниях трехфазного оборудования необходимо включить эквивалент сети в каждую фазу.

Схемы эквивалентов сети различаются для разных частотных диапазонов. При проведении измерений в диапазоне от 150 кГц до 30 МГц используют эквивалент по схеме на рис.1.21,а. Резистор и сопротивление измерителя должны обеспечить стандартное сопротивление эквивалента (50; 75; 150 Ом). Значение эквивалентного сопротивления выбрано исходя из близости к среднему сопротивлению электрических сетей с целью при приближения условий испытаний к реальным условиям возникновения помех в сети. На частотах 10-150 кГц реальная сеть лучше эквивалентируется схемой на рис. 1.21,б [18], а для измерений импульсных напряжений при коммутации испытываемого оборудования можно предложить схему эквивалента на рис.1.21,в.

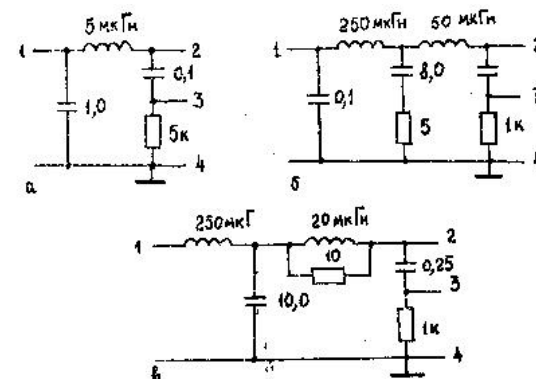


Рис 1.21. Схемы эквивалентов сети для измерений напряжения помех в диапазоне свыше 150 кГц (а), в диапазоне 10-150 кГц (б) и для измерения импульсных переходных напряжений (в)

Стандарт MIL-STD-462в предлагает осуществлять измерения амплитуды переходного процесса при коммутации оборудования путем измерения амплитуды напряжений в проводах питания в соответствии со схемой на рис. 1.22 и амплитуды тока по схеме на рис. 1.23 [4]. Эти схемы позволяют выявить максимально возможные токи и напряжения, однако реальные значения импульсных токов и напряжений ближе к их значениям, измеряемым с помощью эквивалента сети. Количество коммутаций, необходимое для определения максимума амплитуды ИП, выбирается исходя из доверительной вероятности P_n превышения импульсами по амплитуде 0,8 или 0,9 от максимума $U_{им}$ за N коммутацией

$$P_n = 1 - (1 - P_1)^N,$$

где P_1 - вероятность превышения амплитудой $(0,8-0,9)U$ при одной коммутации нагрузки данного вида, которая определяется с помощью графиков вероятностных характеристик, приведенных в [13]. При доверительной вероятности 0,9 обычно достаточно 10-20 коммутаций для выявления амплитуды, отличающейся не более чем на 20% от максимума.

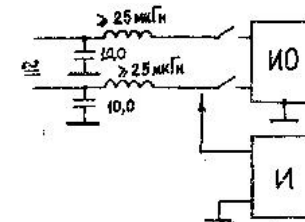


Рис. 1.22. Схема измерения импульсных переходных напряжений методом, холостого хода

Токи помех в проводах питания измеряют с помощью датчика тока (токосъемника) и эквивалента сети. В некоторых случаях вместо эквивалента используют проходные конденсаторы емкостью 10 мкф (см.рис.1.23), через которые замыкается ток создаваемой помехи [4].

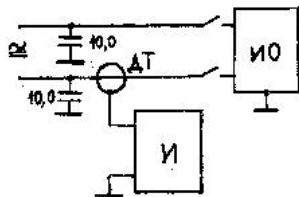


Рис. 1.23. Схема измерения тока помех создаваемых испытываемым оборудованием ИО

Измерения напряженности поля помех оборудования в диапазоне до 30 МГц проводят с использованием рамочной (измерение Н) и штыревой (измерение Е) антенн или с использованием измерительных преобразователей в экранированных помещениях, в которых уровень помех окружающей среды не менее чем на 6 дБ ниже измеряемых излучений. Испытываемое устройство размещается на испытательном стенде, подробно описанном в [4]. Антенна устанавливается на расстоянии 1 м от устройства.

При проведении измерений напряжений, токов и напряженности поля помех необходимо обеспечить максимальную электромагнитную развязку между испытываемым изделием и измерительными приборами, что может быть достигнуто питанием их от отдельных фаз источника электроэнергии, установкой сетевого фильтра, разделительного трансформатора с экраном между обмотками, экранированием измерительных приборов. Сигнальный кабель между датчиком и измерителем желательно экранировать дополнительной оплеткой, заземленной у измерителя, пропустить кабель через трубку, поглощающую высокочастотную энергию.

Чтобы обеспечить повторяемость результатов измерений, испытываемое оборудование располагают строго определенным образом. Следует, по возможности, копировать действительное размещение блоков, соединительных кабелей и питающих проводов. Кабели или жгуты, не являющиеся частью испытываемого оборудования, необходимо экранировать металлической оплеткой, прокладывая ниже металлического покрытия испытательного стенда, уменьшить их длину до 1 м. Заземление выполняется так же, как и в реальных условиях.

2. ИСПЫТАНИЯ ОБОРУДОВАНИЯ НА ПОМЕХОЗАЩИЩЕННОСТЬ.

2.1. Имитаторы импульсных помех.

Имитаторы ИП представляют собой специализированные генераторы импульсов напряжения (тока) или электрических и магнитных полей, к которым предъявляются следующие требования [3]. Выходное сопротивление должно быть возможно меньшим, чтобы низкоомные нагрузки не оказывали заметного шунтирующего воздействия на имитируемые помехи. Должны обеспечиваться широкие динамические диапазоны изменения амплитуд и длительностей имитируемых сигналов. Следует исключить создание помех по собственным цепям питания, заземления, через корпус и т.д. Необходимо обеспечить транспортабельность приборов и безопасность их эксплуатации.

Принцип действия большинства имитаторов помех основан на разряде предварительно заряженного накопителя энергии (обычно - конденсатора) на формирующую цепь и далее через нее в испытываемую цепь. Упрощенные схемы формирующих цепей показаны на рис. 2.1. Имитатор состоит из цепи заряда и коммутации 1 накопительного конденсатора C_n (вместо него в имитаторах прямоугольных импульсов применяют линию), формирующей цепи 2 и разделительной цепи 3. Конденсатор C_n заряжается от источника напряжения через резистор R_z или по иной цепи формирования зарядного тока. Коммутатор S_z подключает с требуемой частотой конденсатор C_n к цепи заряда или формирующей цепи. Коммутатор для большинства имитаторов полупроводниковый, чаще - тиристорный. Разделительная цепь из конденсатора C_p служит для защиты элементов имитатора от сетевого напряжения.

Формирующая цепь имитатора периодически следующих (или одиночных) биэкспоненциальных импульсов (рис.2.1,а) включает цепь формирования фронта импульса R_ϕ , C_ϕ длительности и пика R_g . Параметры элементов формирующей цепи имитатора можно приближенно определить, исходя из выражений:

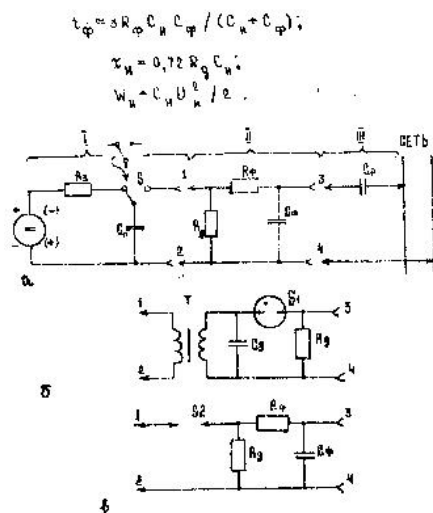


Рис.2.1. Упрощенные схемы формирующих цепей имитаторов

Для имитации высоковольтных, импульсов малой длительности используется формирующая цепь (рис 2.1,б). Конденсатор $C_{\text{г}}$, формирующий длительность импульса, имеет емкость, существенно, меньшую емкости $C_{\text{н}}$. При разряде конденсатора $C_{\text{н}}$ на первичную обмотку импульсного трансформатора Т напряжение на конденсаторе $C_{\text{г}}$ сравнительно медленно повышается до напряжения пробоя разрядника S_1 . Разрядник S_1 срабатывает, формируя наносекундные фронты импульсов. Длительность импульса определяет резистор $R_{\text{г}}$.

Пачки импульсов позволяет имитировать формирующая цепь рис.2.1,в, которая отличается от цепи рис.2.1,а наличием специального разрядника S_2 . Для импульсов наносекундного диапазона разрядник S_2 выполняется в виде полностью управляемого газонаполненного прибора либо - в простейшем случае - в виде механического устройства (возможная конструкция показана на рис.2.2). Искровой разряд возникает между зубцами диска 1 и сектором 2. Изменяя частоту вращения электродвигателей M_1 и M_2 , можно изменить параметры имитируемых пачек импульсов соответственно t_1 и t_2 на рис.2.3. Параметры отдельного импульса из пачки определяются величиной элементов формирующей цепи.

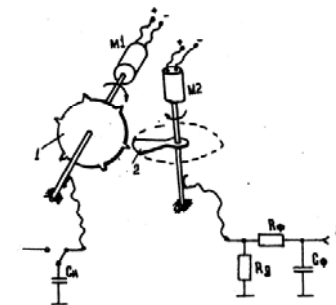


Рис.2.2. Схема механического разрядника для получения пачек импульсов

Регулировка амплитуда имитируемых ИП в имитаторе по схеме на рис.2.1,а осуществляется изменением зарядного напряжения накопительного конденсатора $C_{\text{н}}$.

В имитаторах с формирователями по схемам на рис.2.1,в разрядники S_1 и S_2 выполняются, как правило, нерегулируемыми, с неизменным напряжением пробоя искрового промежутка. Поэтому регулировка выходного напряжения осуществляется дискретно, с помощью резистивного делителя напряжения на выходе формирующей цепи.

Для получения колебательного разряда между выводами 3 и 4 формирующей цепи (см. рис.2.1) включается катушка индуктивности.

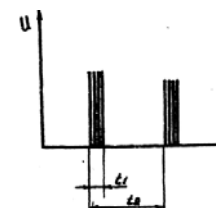


Рис.2.3. Параметры пачек импульсов

Воздействие на оборудование электромагнитных импульсов (ЭМИ) имитируется с помощью излучателей электрического, или магнитного поля, получающих питание соответственно от имитаторов импульсных напряжений или токов. Магнитное поле создается катушкой, образованной несколькими витками кабеля, намотанного на испытываемый объект. Электрическое поле создается в конденсаторе, образованном пластинами линии, возможный вариант исполнения которого показан на рис.2.4. Объект испытаний помещается между пластинами линии. При размерах камеры $a \times b \times c = 3,0 \times 0,6 \times 0,5$ м размеры объекта испытаний не должны быть более $1,0 \times 0,3 \times 0,3$ м. Напряженность электрического поля в зоне испытаний при этом составит $1,35$ кВ/м на 1 кВ выходного напряжения генератора

импульсов напряжения [4]. Известны подобные имитирующие системы [5], имеющие размеры на два порядка больше и предназначенные для натуральных испытаний крупногабаритных объектов под действием ЭМИ.

Судовые изделия вычислительной техники необходимо испытывать на помехозащищенность к разрядам статического электричества. Схема имитатора для таких испытаний показана на рис.2.5,а. Параметры приведены по публикации МЭК 654-5. При испытаниях шар-разрядник подносят к корпусу испытываемого объекта (например, ЭВМ) до появления между ними искрового разряда. Форма тока, генерируемого имитатором в корпусе испытываемого объекта, показана на рис. 2.5,б.

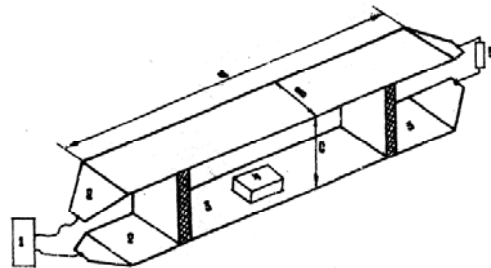


Рис.2.4. Камера для создания импульсного электрического поля помех: 1 - генератор импульсов напряжения, 2 - обкладки конденсатора (пластины линии); 3 - диэлектрические стойки; 4 - объект испытаний; 5 - согласующий резистор ($R = Z$ линии)

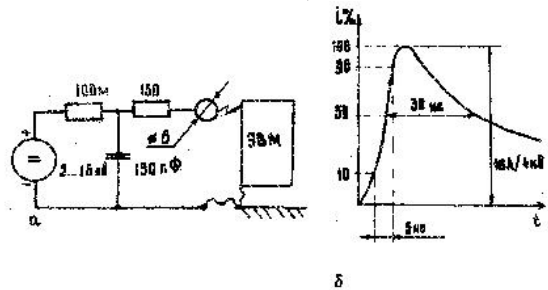


Рис.2.5. Имитатор разрядов статического электричества: а - схема имитатора и испытаний; б - фронт импульса тока помехи

Имитаторами периодических ИП могут быть серийные тиристорные преобразователи, получающие питание от трансформаторов соизмеримой с ними мощности. На фидере, соединяющем трансформатор и преобразователь, будут иметь место ИП с ха рактеристиками, близкими к существующим в СЭС.

Дополнительно между трансформатором и преобразователем могут быть включены реакторы, изменяя параметры которых можно откорректировать параметры помех.

2.2. Методика испытаний на допустимую восприимчивость к внешним помехам

Испытания электронного оборудования на восприимчивость к внешним помехам заключаются в проверке работоспособности оборудования в условиях импульсных и синусоидальных помех, создаваемых специальными генераторами и передаваемых по цепям питания, входным цепям и путем создания внешнего электромагнитного поля (ЭМП). Значения параметров испытательных сигналов (амплитуда, длительность и фронт для импульсов, действующее значение и частота для синусоидальных сигналов), при которых оборудование должно сохранять работоспособность с заданным качеством, устанавливаются соответствующими требованиями к оборудованию. Иногда испытания предусматривают определение уровней помех, при которых возникают сбои в работе оборудования.

Испытания на восприимчивость к импульсам напряжения в питающей сети выполняются в соответствии со схемами на рис.2.6 и 2.7. Импульсы напряжения создаются имитатором импульсных помех Г и подаются на зажимы цепей питания испытываемого оборудования несимметрично (см.рис.2.6) через раз делительные конденсаторы С (в случае трех фаз их должно быть три) и симметрично (см.рис.2.7) через разделительные конденсаторы параллельно сети или через трансформатор Т последовательно. Емкость конденсаторов должна быть достаточной для передачи испытательного импульса с малыми искажениями и обычно составляет 1-10 мкф. Дроссели L препятствуют проникновению испытательных импульсов в сеть и посторонних помех из сети на испытываемое оборудование. Одновременно они уменьшают нагрузку на генератор Г, ограничивая ток, отдаваемый им в сеть. Значение индуктивности дросселей лимитируется допустимым падением на них напряжения рабочей частоты и обычно составляет 250-500 мкГн. Разделительный трансформатор Т, применяемый в схеме на рис.2.7,б, должен обеспечивать одновременное прохождение тока питания и вводимых помех без насыщения сердечника при полосе пропускания 30 Гц-1 МГц. Расчетная мощность 100 Вт при выходном сопротивлении 0,5 Ом [4].

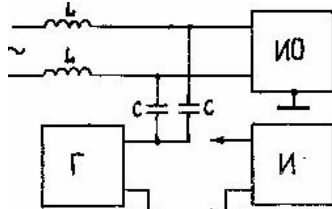


Рис.2.6. Схема измерения восприимчивости испытываемого оборудования к несимметричным помехам в питающей сети

Для цифровой техники более опасны несимметричные помехи, и в большинстве случаев можно ограничиться испытанием по схеме на рис.2.6.

Однозначность результатов испытаний обеспечивается регламентацией условий измерения параметров испытательных импульсов. Наиболее правильно измерять параметры на холостом ходу имитатора при отключенном испытываемом

оборудовании, а после подключения оборудования параметры импульсов не контролируются и могут принимать любые значения в зависимости от соотношения внутреннего (выходного) сопротивления имитатора и сопротивления нагрузки. Внутреннее сопротивление имитатора эквивалентно сопротивлению реальных источников помех и должно быть обязательно задано. Обычно оно реализуется в виде резистора с сопротивлением 50 Ом, включенного последовательно с разделительным конденсатором. Однако к реальному сопротивлению источника импульсов на судах ближе параллельное соединение резистора 10 Ом и катушки индуктивности 10 мкГн. Необходимо также оговорить емкость накопительного конденсатора имитатора, или энергию, запасаемую в накопителе. Однозначность результатов испытаний может быть обеспечена и путем регламентации параметров импульсов напряжения на холостом ходу имитатора и тока при коротком замыкании. Встречающееся в некоторых нормах требование создать при испытаниях на оборудовании импульсы с заданными параметрами независимо от сопротивления оборудования противоречит реальному процессу возникновения и воздействия ИП и может привести к неверному результату.

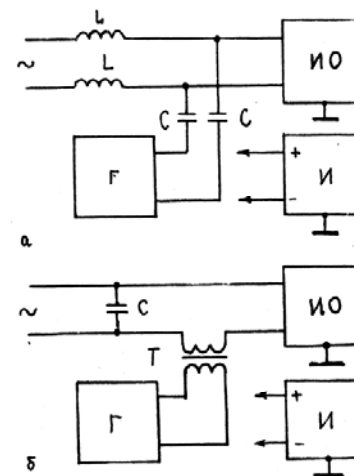


Рис.2.7. Схемы измерения восприимчивости испытываемого оборудования к симметричным помехам в питающей сети: а - параллельная; б - последовательная подача помехи

В качестве испытательных импульсов можно рекомендовать импульсы экспоненциальной формы длительностью 10 мкс, фронтом 0,1 мкс с амплитудой 1000 В - для оборудования с номинальным напряжением 380 В и 100 В - для оборудования с номинальным напряжением 24 В. Испытания проводятся путем подачи импульсов положительной и отрицательной полярности с частотой сетевого

напряжения или кратной ей. Временное положение импульсов должно регулироваться относительно синусоиды сетевого напряжения. Для испытаний некоторых устройств может оказаться целесообразной синхронизация импульсов с процессами в устройствах. Электронное оборудование считается выдержавшим испытания, если, за 10 мин не происходит сбоев в его работе или снижения ее качества. Если обнаруживается восприимчивость к помехе, то уменьшают амплитуду до порога восприимчивости, определяют наиболее подверженный помехе узел и проводят необходимые мероприятия по защите от помех.

Испытания на восприимчивость к синусоидальным помехам в проводах питания также выполняются в соответствии со схемами на рис.2.6 и 2.7. В качестве имитатора помех используется мощный генератор синусоидальных сигналов или генератор с мощным усилителем.

Испытания заключаются в создании на зажимах цепей питания оборудования синусоидального напряжения определенной величины (порядка 1 В) в заданном частотном диапазоне (30 Гц-50 кГц, 50 кГц-400 МГц) и в оценке работоспособности оборудования в этих условиях. Внутреннее сопротивление имитатора регламентировано и обычно равно 50 Ом. Если имитатор мощностью 1 Вт или более не может создать требуемую величину испытательного напряжения на оборудовании из-за его низкого сопротивления и не наблюдается нарушений в работе оборудования, оно также считается выдержавшим испытания. В случае если выявлены ухудшение характеристик, искажения сигналов, сбои в работе оборудования при воздействии испытательного напряжения, то следует определить порог восприимчивости и соответствующую ему частоту, уменьшая величину напряжения до восстановления нормальной работы.

Испытания на восприимчивость к полю помех проводятся путем воздействия на оборудование и его линии связи магнитным и электрическим полем как импульсным, так и синусоидальным, которые создаются с помощью антенны или испытательных камер.

Магнитное поле создается проводом, по которому протекает ток помехи определенной величины, например, 20 А. При испытаниях линий связи прямой помехонесущий провод прокладывается параллельно линии, а обратный - вдоль корпуса (в некоторых случаях роль обратного провода может выполнять корпус). При испытаниях самого оборудования его обматывают помехонесущим проводом тремя витками. Для проверки отдельных узлов оборудования в качестве источника поля может применяться катушка из 10 витков диаметром 12 см, по которой протекает ток заданной величины, например, 2 А. Катушку, помещают на расстоянии 5 см от поверхности испытываемого оборудования, вдоль разъемов, сигнальных цепей [4].

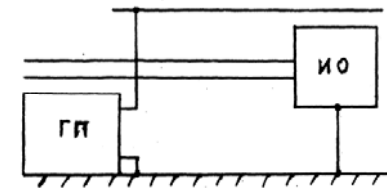


Рис.2.8. Схема измерения восприимчивости испытываемого оборудования и его линий связи к полю помех

Электрическое поле создают с помощью кабеля или пластины, к которым прикладывают относительно корпуса испытательное напряжение заданной величины от генератора помех ГП (рис.2.8). При этом электрическое поле имеет напряженность порядка 10-100 В/м. Для оборудования малых размеров предпочтительно использование испытательных камер, так как для их возбуждения требуются генераторы на порядок меньшей мощности по сравнению с антеннами, проще калибровка и более равномерная частотная характеристика. Испытательные камеры, способ размещения в них оборудования, его заземления описаны в [4].

2.3. Определение параметров электромагнитной связи цепей

Электромагнитная связь силовых и информационных кабелей, цепей внутри кабеля или в кабельном соединителе характеризуется емкостью связи C_{12} , емкостью цепи на корпус C_2 , взаимной индуктивности несимметричных M_{12} и симметричных M_{1122} цепей, а в случае экранированного кабеля - дополнительно активным сопротивлением оплетки и взаимной индуктивностью оплетки и жил M_{02} .

Параметры электрической связи могут быть определены экспериментально по схеме на рис. 2.9.а. На кабеле (цепи) 1 генератор импульсов ГИ создают импульсы напряжения амплитудой U_1 и с помощью осциллографа О измеряют амплитуду напряжения, наведенного на цепи 2 при подключенном и отключенном эталонном конденсаторе C_n (соответственно U_2 и U_2'). Расчет параметров связи производят по формулам;

$$C_{12} = \frac{C_n}{\frac{U_1}{U_2} - \frac{U_1}{U_2'}};$$

$$C_2 = C_{12} \left(\frac{U_1}{U_2'} - 1 \right) - C_{осц},$$

где $C_{осц}$ - емкость щупа осциллографа.

Параметры магнитной связи могут быть определены в соответствии со схемой на рис.2.10. Импульсы тока с коротким фронтом и плавным спадом подаются в цепь 1, и с помощью осциллографа измеряется амплитуда напряжения, наведенного в цепи 2 при нагрузке цепи порядка $10^1 - 10^2 \Omega$.

Взаимные индуктивности рассчитываются по формулам:

$$M_{12} = \frac{U_2}{\left(\frac{di_1}{dt} \right)_m}; \quad M_{1122} = \frac{U_{22}}{\left(\frac{di_1}{dt} \right)_m},$$

где $\left(\frac{di_1}{dt} \right)_m$ - максимальная скорость изменения тока в цепи 1, берется из осциллограммы.

Параметры оплетки определяются при подаче в оплетку импульса тока i_2 по осциллограмме напряжения, наведенного на жилах (рис.2.11):

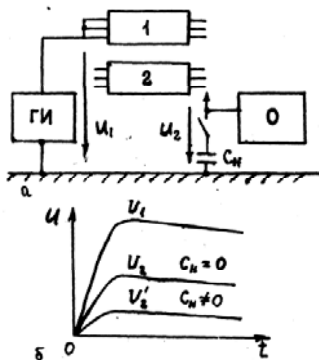


Рис.2.9. Измерение параметров электрической связи: а - схема; б - вид осциллограмм

Для проведения измерений необходим генератор импульсов, способный создавать в кабелях импульсы напряжения до 1000 В и тока до 100 А с длительностью до 100 мкс. Фронт импульсов должен переключаться в пределах 0,1-10 мкс с целью обеспечения возможно более высоких скоростей изменения тока при отсутствии волновых эффектов. Частоту следования импульсов удобно взять синхронизированной и равной частоте тока в силовой сети, а временное положение импульсов должно регулироваться относительно синусоиды сетевого напряжения. Необходимо также предусмотреть встроенный шунт или датчик для контроля формы создаваемых импульсов тока.

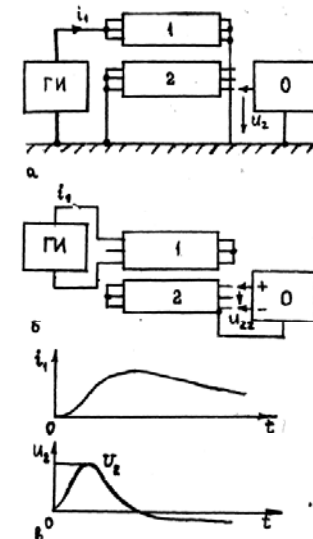


Рис.2.10. Измерение параметров магнитной связи цепей: несимметричных (а); симметричных (б): вид осциллограмм (в)

Использование импульсных сигналов позволяет легко идентифицировать на осциллограмме сигнал-отклик даже в условиях помех, так как он соответствует во времени тестовому импульсу. Генератор импульсов может создавать сигналы значительно больших уровней, чем генератор синусоидальных сигналов, при одинаковых габаритах. Метод позволяет измерять емкости связи от 0,01 пф и взаимные индуктивности от 0,1 нГн.

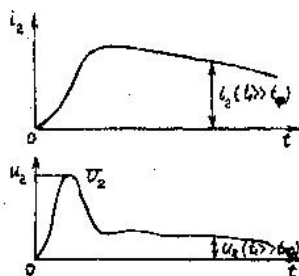


Рис.2.11. Осциллограммы импульса тока i_2 в оплетке кабеля и напряжения u_2 , наведенного на жилах

3. СТАНДАРТЫ НА ЭМС ЭЛЕКТРОННОГО И ЭЛЕКТРОТЕХНИЧЕСКОГО ОБОРУДОВАНИЯ

3.1. Обзор стандартов и норм по ЭМС

Резолюция ИМО А.813(19) устанавливает общий подход к электромагнитной совместимости (ЭМС) судового электронного и электротехнического оборудования, как важной составной части обеспечения безопасности мореплавания. В документе признается необходимость разработки стандартов и их внедрения на правительственном уровне с целью сделать обязательным испытание всего судового оборудования на электромагнитную совместимость. Резолюцией MSC.99(73) от 5 декабря 2000 г. 73 сессии Подкомитета Международной морской организации (ИМО) по безопасности на море приняты поправки к Международной Конвенции по охране человеческой жизни на море 1974 года (Конвенция СОЛАС), определяющие новые требования к обеспечению безопасности мореплавания, изложенные в новой Главе 5 (“Безопасность мореплавания”) Конвенции СОЛАС. Действовавшая ранее Глава 5 “Безопасность мореплавания” Конвенции СОЛАС подверглась значительной переработке. Новая Глава 5 распространяется на все суда, плавающие в море, независимо от типа и назначения, совершающие как международные, так и местные рейсы. Её требования могут касаться не только грузовых судов, но и рыбопромысловых судов. В правиле 18 подчеркнуто, что после 1 июля 2002 г. все навигационное оборудование, устанавливаемое на судах, должно быть типа, одобренного национальной Администрацией, и отвечать технико-эксплуатационным требованиям, принятым ИМО. Особо важным в Главе 5 является Правило 19, содержащее требования по оснащению судов навигационными системами и оборудованием. Состав существующего навигационного оборудования на судах будет дополнен такой принципиально новой навигационной аппаратурой, как приемники ГНСС, АИС, ЭКНИС, ПРД, авторулевые, обеспечивающие управление судном по траектории. Все перечисленное оборудование и системы должны отвечать требованиям электромагнитной совместимости. Ставится задача обеспечения безусловной качественной и надежной совместной работы судовых систем в условиях судовой электромагнитной обстановки.

Международный стандарт МЭК 60533 “Electrical and electronic installations in ships-electromagnetic compatibility” устанавливает требования по электромагнитной совместимости к судовым электронным и электротехническим установкам. Стандарт 60945 «Marine navigational and radiocommunication equipment and systems - General requirements, Methods of testing and required test results» касается электромагнитной совместимости морского навигационного и радиосвязного оборудования и систем. Документ МАКО «Concerning electrical installations» E10, редакция 2001 г. дает требования по ЭМС, гармонизированные с МЭК 60533, МЭК 60945. В таблице 3.1 приведены значения испытательных воздействий, предлагаемых в документах. Содержание требований основных документов сближается. В новой редакции МЭК 60533 параметры испытательных импульсных помех приведены в соответствие с документами МЭК 61000-4-x. Аналогичные изменения произошли в других документах, но сохранились и некоторые отличия. Правила Российского Морского Регистра судоходства выдвигают более жесткие требования по критериям функционирования (А-отсутствие изменений в работе оборудования при воздействии помех) и содержат дополнительные требования по устойчивости к магнитному полю, но не определяют устойчивости к динамическим изменениям напряжения электропитания. Применяется испытательное магнитное поле постоянное напряженностью 100 А/м и переменное с частотой 50 Гц напряженностью 10 А/м для оборудования, размещаемого на расстоянии более 2 м от мощных источников поля (силовых трансформаторов, шинопроводов). Переменное и постоянное магнитное поле напряженностью 400 А/м используется для оборудования, размещаемого на расстоянии от 1 до 2 м от источников поля, и испытательное поле напряженностью 1000 А/м применяется для оборудования, размещаемого на расстоянии менее 1 м от источников.

Табл. 3.1

Требования на устойчивость к помехам

Требования документов и критерии качества функционирования				
Вид испытаний	Правила классификации и постройки морских судов	МАКО Е 10, 2001 г. Электроустановки	МЭК 60945, 2000г. Судовое навигационное и радиокommunikационное оборудование.	МЭК 60533, 1999 г. Судовые электронные и электроустановки
Гармоники питающего напряжения	10% N _{гарм} = 1 - 15 10 - 1 % N=15-100 1% N=100-200 Критерий А	10% N _{гарм} = 1 - 15 10 - 1 % N=15-100 1% N=100-200 Критерий А		10% 50-900 Гц 10 - 1 % 0,9-6 кГц 1% 6-10 кГц Критерий А
Изменения напряжения электропитания		Напряжение $\pm 20\%$, 1,5 с Частота $\pm 10\%$, 5с Критерий В	Напряжение $\pm 20\%$, 1,5 с Частота $\pm 10\%$, 5с Критерий В	Напряжение $\pm 20\%$, 1,5 с Частота $\pm 10\%$, 5с Критерий В
Прерывания электропитания			МЭК 61000-4-11 60 с. Критерий С	МЭК 61000-4-11 60 с. Критерий С
Наносекундные импульсные помехи	Цепи питания: 2 кВ Цепи ввода-вывода: 1 кВ Критерий А	МЭК 61000-4-4 цепи питания: 2 кВ, цепи сигнальные: 1 кВ Критерий А	МЭК 61000-4-4 цепи питания несимметр.: 2 кВ симметрично: 1 кВ Критерий В	МЭК 61000-4-4 цепи питания: 2 кВ, цепи сигнальные: 1 кВ Критерий А
Микросекундные импульсные помехи	Цепи питания: несимметр. 2 кВ симметрично 1 кВ Критерий А	МЭК 61000-4-5 несимметрично 1 кВ симметрично 0,5 кВ. Критерий А	МЭК 61000-4-5 несимметрично 1 кВ симметрично 0,5кВ. Критерий В	МЭК 61000-4-5 несимметрично 1 кВ симметрично -0,5кВ. Критерий В
Радиочастотные напряжения	1 В 0,01 - 50 МГц модуляция 80% 1 кГц. Критерий А	МЭК 61000-4-6 3 В 0,15 - 80 МГц модуляция 80% 1 кГц. Критерий А	МЭК 61000-4-6 3 В 0,15 - 80 МГц 10В на отдельных частотах, модуляция 80% 1 кГц. Критерий А	МЭК 61000-4-6 3 В 0,15 (0,01) - 80 МГц модуляция 80% 1 кГц. Критерий А
Электро-статический разряд	8 кВ Критерий А	МЭК 61000-4-2 контактный 6 кВ воздушный 8 кВ Критерий В	МЭК 61000-4-2 контактный 6 кВ воздушный 8 кВ Критерий В	МЭК 61000-4-2 контактный 6 кВ воздушный 8 кВ Критерий В
Радиочастотное электро-магнитное поле	10 В/м 80-1000 МГц модуляция 80% 1 кГц. Критерий А	МЭК 61000-4-3 10 В/м 80-2000 МГц модуляция 80% 1 кГц. Критерий А	МЭК 61000-4-3 10 В/м 80-2000 МГц модуляция 80% 1 кГц. Критерий А	МЭК 61000-4-3 10 В/м 80-2000 МГц модуляция 80% 1 кГц. Критерий А
Магнитное поле	Постоянное 100-1000 А/м Переменное 50 Гц 10-1000А/м Критерий А			

Критерий А - Сохранение нормальной работы оборудования и всех его характеристик в соответствии с технической спецификацией во время испытаний и после окончания действия помех.

Критерий В - Допускается временное нарушение функционирования во время испытаний с самостоятельным восстановлением после окончания действия помех. Не допускается изменение режима работы, потеря записанной информации и выдача ложных команд.

Критерий С - Допускается временное нарушение функционирования с возможностью его восстановления после окончания действия помех путем выполнения операций с органами управления, оговоренных в технической документации на оборудование.

В перспективе требования по ЭМС к судовому оборудованию всех документов будут гармонизированы.

Уровень электромагнитных помех, создаваемых оборудованием не должен превышать максимально допустимого уровня, измеряемого по СИСНР 16-2. Измерения должны проводиться в режиме работы оборудования, создающем максимальный уровень помех. Измерения проводят приборами с квазипиковым детектором по СИСНР 16-1. Полоса пропускания 200 Гц в диапазоне частот 10 кГц –150 кГц, 9 кГц в диапазоне 150 кГц-30 МГц и 120 кГц в диапазоне 30-2000 МГц за исключением диапазона 156-165 МГц, где следует использовать полосу 9 кГц.

Для оборудования, размещаемого на палубе и мостике, устанавливаются следующие допустимые уровни создаваемых помех .

Электромагнитное поле на расстоянии 3 м в диапазонах частот:

150 -300 кГц - 80 -52 дБ;

300 кГц-30 МГц - 52 -34 дБ;

30 -2000 (было 1000) МГц - 54 дБ за исключением диапазона 156-165 МГц, где устанавливается 24 дБ.

Напряжение помех в цепях питания и ввода-вывода, измеренное с помощью эквивалента сети по СИСНР 16 в диапазонах частот:

10-150 кГц - 96-50 дБ

150-350 кГц - 60-50 дБ

350 кГц - 30 МГц - 50 дБ

Для общего расположения оборудования устанавливаются следующие допустимые уровни создаваемых помех.

Электромагнитное поле на расстоянии 3 м в диапазонах частот: 150 кГц -30 МГц - 80 - 50 дБ; 30 МГц-100 МГц - 60-54 дБ; 100 -2000 (было 1000) МГц - 54 дБ, за исключением диапазона 156-165 МГц, где устанавливается 24 дБ.

Напряжение помех в цепях питания и ввода -вывода, измеренное с помощью эквивалента сети по СИСНР 16 в диапазонах частот: 10-150 кГц - 120-69 дБ; 150-500 кГц - 79 дБ; 500 кГц-30 МГц -73 дБ.

Нормы по МЭК 60945 соответствуют нормам МЭК 60533 для оборудования, размещаемого на палубе и мостике

В табл.3.2 перечислены Российские нормативно-технические документы по ЭМС, распространяющиеся на различные технические средства.

Таблица 3.2

Требования по электромагнитной совместимости к техническим средствам

Виды технических средств	Требования по ЭМС
Судовое навигационное, радио и электрооборудование, автоматика	Правила Российского Морского Регистра судоходства
Технические средства, применяемые в жилых домах, коммерческих зонах	ГОСТ Р 51317.6.1-99 ГОСТ Р 51317.6.3-99
Технические средства, применяемые в промышленных зонах	ГОСТ Р 51317.6.2-99 ГОСТ Р 51317.6.4-99
Оборудование атомных станций	ГОСТ Р 50746-2000
Медицинские электрические изделия	ГОСТ Р 50627.0.2.-95
Оборудование информационных технологий	ГОСТ Р 51318.24-99
Средства вычислительной техники и информатики	ГОСТ Р 50839-2000
Профессиональная аудиовизуальная аппаратура	ГОСТ Р 51408-99
Бытовые электрические приборы, электрические инструменты	ГОСТ Р 51318.14.2-99
Системы бесперебойного питания, устройства защиты от сетевых помех	ГОСТ Р 50745-99
Электрическое оборудование для измерения, управления	ГОСТ Р 51522-99
Оборудование проводной связи	ГОСТ Р 50932-95
Технические средства радиосвязи	ГОСТ Р 50799-95

Персональные ЭВМ	ГОСТ Р 50628-2000
Телевизоры, радиоприемники и другая бытовая аппаратура	ГОСТ Р 51515-99
Контрольно - кассовые машины	ГОСТ Р 50747-2000
Оборудование приемных систем телевидения и радиовещания	ГОСТ Р 51513-99
Охранная сигнализация	ГОСТ Р 50009-2000
Измерительные реле и устройства защиты	ГОСТ Р 51525 99
Системы электрического привода с регулируемой скоростью вращения	ГОСТ Р 51524-99
Устройства и системы телемеханики	ГОСТ Р 51179-98
Устройства защитного отключения	ГОСТ Р 51329-99

В настоящее время в России приняты и вступили в силу практически все базовые стандарты по ЭМС, используемые в Европейском сообществе и соответствующие документам МЭК 61000-4, СИСРП 16. Большинство стандартов имеет следующую схему нумерации: ГОСТ Р 51317.4.x соответствует МЭК IEC 61000-4-x и EN 61000-4-x. Базовые стандарты определяют методику испытаний на электромагнитную совместимость технических средств (оборудования), но не дают норм и жесткости испытаний для конкретного оборудования. Список испытательных воздействий и соответствующие им стандарты приведены в таблице 3.3.

Табл. 3.3.

Испытания технических средств на устойчивость к помехам

Вид воздействий	Стандарт	Параметры
Электростатический разряд	ГОСТ Р 51317.4.2-99	2; 4; 6; 8; 15 кВ
Электромагнитное поле	ГОСТ Р 51317.4.3-99	0,08-1 ГГц, 1; 3; 10 В/м
Наносекундные импульсные помехи	ГОСТ Р 51317.4.4-99	5/50 нс, 0,25; 0,5; 1; 2; 4 кВ
Микросекундные импульсные помехи	ГОСТ Р 51317.4.5-99	1/50 мкс, 0,5; 1; 2; 4 кВ
Радиочастотные напряжения	ГОСТ Р 51317.4.6-99	0,15-80 МГц, 1; 3; 10 В
Магнитное поле промышленной частоты	ГОСТ Р 50648-94	50 Гц, до 1000 А/м
Динамические изменения напряжения	ГОСТ Р 51317.4.11-99	-100; -60; -30; +20%
Магнитное поле импульсное	ГОСТ Р 50649-94	6,4/16 мкс до 1000 А/м
Магнитное поле колебательное	ГОСТ Р 50652-94	0,1; 1 МГц до 100 А/м
Затухающие колебания напряжения	ГОСТ Р 51317.4.12-99	0,1; 1 МГц до 2,5 кВ
Низкочастотные гармоники напряжения	МЭК 61000-4-13	100-10000 Гц до 10%
Изменения напряжения электропитания	ГОСТ Р 51317.4.14-99	до ± 20%
Кондуктивные помехи	ГОСТ Р 51317.4.16-99	0-150 кГц до 300 В
Изменения частоты электропитания	ГОСТ Р 51317.4.28-99	до + 10%
Импульсные помехи с бортовой сети автомобиля	ГОСТ Р 28751-90	7 видов помех до 1 кВ
Синусоидальные токи в цепи заземления	ГОСТ Р 50746-2000	50 Гц до 200 А
Импульсные токи в цепи заземления	ГОСТ Р 50746-2000	300 мкс до 200 А

Требования к приборам, измеряющим эмиссию помех, и методики измерений изложены в ГОСТ Р 51319-99, ГОСТ Р 51320-99, которые по содержанию соответствуют документам СИСРП-16-1, СИСРП-16-2.

Стандарт ГОСТ Р 51317.3.2-99 устанавливает нормы эмиссии гармонических составляющих тока, потребляемого техническими средствами при испытаниях в регламентированных условиях. Значения полного сопротивления сети должно быть достаточно низким, чтобы соответствовать требованиям к проведению испытаний. Нормы для ТС регламентируют нечетные гармонические составляющие, убывающие с ростом номера гармоники от 2,3 А- и четные составляющие, убывающие от 1,08 А. Для ТС различных классов значения норм несколько отличаются.

Стандарт ГОСТ Р 51317.3.3-99 устанавливает нормы создаваемых ТС изменений напряжения и фликера. Нормы основываются на оценках дозы фликера (колебаний яркости) ламп накаливания, питающихся от той же сети, что и ТС. Стандарт распространяется на

электротехнические, электронные изделия и аппаратуру с потребляемым током не более 16 А в одной фазе.

Стандарт устанавливает следующие нормы:

- кратковременная доза фликера P_{st} не должна превышать 1,0;
- длительная доза фликера P_n не должна превышать 0,65;
- установившееся относительное изменение напряжения dU_c не должно превышать 3 %;
- максимальное относительное изменение напряжения dU_{max} не должно превышать 4 %;
- характеристика относительного изменения напряжения $dU(t)$ не должна превышать 3 % для интервала времени изменения напряжения, большего 200 мс.

Наиболее жесткие требования по ЭМС устанавливаются в ГОСТ Р 50746-2000 [19] для оборудования атомных станций. Стандарт распространяется на электротехнические, электронные и радиоэлектронные изделия (оборудование, аппаратуру) (в том числе, электрические приводы различного назначения), а также на изделия, содержащие электрические, электронные и радиоэлектронные компоненты (схемы), поставляемые на ядерно- и радиационно опасные объекты народнохозяйственного назначения, в том числе атомные станции. ГОСТ Р 50746-2000 применяется для конструктивно завершенных технических средств, поставляемых на ядерно- и радиационно опасные объекты народнохозяйственного назначения, в том числе атомные станции. Стандарт включает требования устойчивости к электромагнитным помехам (табл. 3.4) и нормы помехоэмиссии, а также соответствующие методы испытаний.

Табл. 3.4

Сравнение требований по помехоустойчивости

N	Испытания на устойчивость к помехам	МЭК 61000-6-2 Оборудование промышленного применения	Правила Российского Морского Регистра судоходства, МЭК 60945, 60533	ГОСТ Р 50746-2000 Технические средства для атомных станций
1	Гармоники МЭК-61000-4-13 МЭК 60533	-	10% N=1 - 15 10 - 1 % N=15-100 1% N=100-200 Критерий А	До 10% Критерий А
2	Изменения напряжения МЭК-61000-4-11	-30%, 0,5 с Критерий В	±20%, 1,5 с Критерий В	- 30%, 2 с; +20%, 2 с Критерий А
3	Изменения частоты МЭК-60945 МЭК-61000-4-28	-	±10%, 5с Критерий В	±5%
4	Прерывание электропитания МЭК-61000-4-11	60 с. Критерий С 0,1 с. Критерий В	60 с. Критерий С	0,5 с. Критерий А
5	Наносекундные импульсные помехи МЭК-61000-4-4	Электропитание: 2 кВ Ввод-вывод: 1 кВ Критерий В	Электропитание: 2 кВ Ввод-вывод: 1 кВ Критерий В	Электропитание: 4 кВ Ввод-вывод: 2 кВ Критерий В
6	Микросекундные импульсные помехи МЭК-61000-4-5	Несимметрично 2 кВ Симметрично: 1 кВ Критерий А	Несимметрично 2 (1) кВ Симметрично: 1 (0,5) кВ Критерий А	Несимметрично 4 кВ Симметрично: 2 кВ Критерий А
7	Радиочастотное напряжение МЭК-61000-4-6	10 В 0,15 - 80 МГц модуляция 80%, 1 кГц. Критерий А	10 В 0,01 - 80 МГц модуляция 80%, 1 кГц. Критерий А	10 В 0,15 - 80 МГц модуляция 80%, 1 кГц. Критерий А
8	Электростатический разряд МЭК-61000-4-2	8 кВ – воздушный 4 кВ- контактный Критерий В	8 кВ Критерий А	15 кВ – воздушный 8 кВ – контактный Критерий А
9	Электромагнитное поле МЭК-61000-4-3	10 В/м 80-1000 МГц модуляция 80%, 1 кГц. Критерий А	10 В/м 80-1000 МГц модуляция 80%, 1 кГц. Критерий А	10 В/м 80-1000 МГц модуляция 80%, 1 кГц. Критерий А
10	Магнитное поле МЭК-61000-4-8	50 от 60 Гц, 30 А/м, Критерий А	DC: 100-1000 А/м 50 Гц: 10 –1000 А/м Критерий А	50 Гц: до 1000 А/м Критерий А
11	Импульсное магнитное поле МЭК-61000-4-9	-	-	до 1000 А/м
12	Затухающее колебательное магнитное поле МЭК-61000-4-10	-	-	до 100 А/м
13	Колебательное затухающее напряжение МЭК-61000-4-13	-	-	до 2500 В
14	Низкочастотные несимметричные напряжения МЭК-61000-4-16	-	-	до 100 В DC to 150 кГц
15	Импульсный ток в цепи заземления ГОСТ Р 50746-2000	-	-	до 200 А, 300 мкс
16	Синусоидальный ток в цепи заземления ГОСТ Р 50746-2000	-	-	до 200 А, 50 Гц

Требования по эмиссии помех включают испытания на эмиссию индустриальных радиопомех по ГОСТ Р 51318.11-99, ГОСТ Р 51318.14.1-99, ГОСТ Р

51318.22. Методика испытаний по ГОСТ Р 51320-99.

Новым является введение требований по эмиссии гармоник по ГОСТ Р 51317.3.2-99 и требования по эмиссии колебаний напряжения и фликера по ГОСТ Р 51317.3.3-99.

Сравнение требований показывает, что ГОСТ Р 50746 требует среди всех прочирх стандартов наибольшего числа испытаний технических средств, в том числе таких новых испытаний как испытание систем на воздействие токов в цепях заземления.

В приложении «В» стандарта ГОСТ Р 50746-2000 определен порядок проведения испытаний и оценки соответствия технических средств атомных станций (ТС АС), находящихся в эксплуатации, требованиям помехоустойчивости (Оценку соответствия ТС АС, находящихся в эксплуатации, требованиям помехоустойчивости, установленным настоящим стандартом, осуществляют по результатам испытаний ТС АС на помехоустойчивость. Методы испытаний — в соответствии с разделом 5 стандарта.

Испытания проводят не реже одного раза в 3 года в периоды ремонтных работ на АС.

Испытания проводят в соответствии с программами и методиками, согласованными в установленном порядке.

В программах и методиках испытаний устанавливают состав ТС АС, подлежащих испытаниям, объем испытаний, а также порядок проведения испытаний и оценки помехоустойчивости штатных систем АС по результатам испытаний ТС АС, входящих в эти системы.

Для каждого ТС АС, подлежащего испытаниям, в соответствии с таблицей 1 настоящего стандарта определяют необходимую группу исполнения по устойчивости к помехам применительно к категории ТС АС по назначению и влиянию на безопасность и к классу жесткости электромагнитной обстановки по приложению Б.

Испытания ТС АС на помехоустойчивость проводят при воздействии помех видов, установленных в методике испытаний с учетом конкретных условий электромагнитной обстановки в местах размещения ТС АС. Степени жесткости испытаний на помехоустойчивость устанавливают по таблицам стандарта для выбранной группы исполнения. При испытаниях выявляют фактическое соответствие качества функционирования ТС АС критериям по приложению А.

Испытуемое ТС АС, относящееся к элементам (системам) безопасности, к элементам (системам) нормальной эксплуатации, важным для безопасности, и к элементам (системам) нормальной эксплуатации, не влияющим на безопасность, считают соответствующим требованиям устойчивости к помехам в условиях эксплуатации, если фактически установленные в результате испытаний критерии качества функционирования соответствуют установленным в 4.2.2—4.2.3 или (для ТС АС, разработанных и изготовленных до введения настоящего стандарта) соответствуют критериям, установленным в программе и методике испытаний.

В случае несоответствия конкретного образца ТС АС, эксплуатируемого на АС, требованиям устойчивости к помехам решение о дальнейшей эксплуатации указанного ТС АС принимается в установленном порядке.

Стандарт США MIL-STD-461E распространяется на военные технические средства, объединил предыдущие версии MIL-STD-461D и MIL-STD-462D и содержит 142 страницы. Приложение к стандарту является руководством по применению стандарта.

В частности, стандарт содержит перечень испытаний по ЭМС (табл. 3.5).

Таблица 3.5

Требования MIL-STD-461E по устойчивости к помехам и по помехоэмиссии

Требование	Описание
CE101	Кондуктивная эмиссия, цепи питания, 30 Гц-10 кГц
CE102	Кондуктивная эмиссия, цепи питания, 10 кГц-10 МГц
CE106	Кондуктивная эмиссия, антенные вводы, 10 кГц-40 ГГц
CS101	Устойчивость к кондуктивным помехам, цепи питания, 30 Гц-150 кГц
CS103	Устойчивость к кондуктивным помехам, антенна, интермодуляция 15 кГц-10 ГГц
CS104	Устойчивость к кондуктивным помехам, антенна, ввод нежелательных сигналов 30 Гц-20 ГГц
CS105	Устойчивость к кондуктивным помехам, антенна, взаимная модуляция 30 кГц-20 ГГц
CS109	Устойчивость к кондуктивным помехам, корпус, 60 Гц-100 кГц
CS114	Устойчивость к кондуктивным помехам, кабели, 10 кГц-200 МГц
CS115	Устойчивость к кондуктивным помехам, кабели, импульсы
CS116	Устойчивость к кондуктивным помехам, кабели, питание, затухающие колебания 10 кГц –100МГц
RE101	Эмиссия магнитного поля, 30 Гц-100 кГц
RE102	Эмиссия электрического поля, 10 кГц-18 ГГц
RE103	Эмиссия гармоник через антенну, 10 кГц-40ГГц
RS101	Устойчивость к магнитному полю, 30 Гц-100 кГц
RS102	Устойчивость к электрическому полю, 2 МГц-40 ГГц
RS105	Устойчивость к импульсному электромагнитному полю.

Для оборудования надводных судов применяют испытания CE101, CS101, CS114, CS 116, RE101, RE102, RS101,RS103, для отдельного корабельного оборудования добавляют CE106, CS115, RE103, RS105. Испытания CS103, CS104,CS105 используют в случае, если они предусматриваются в сопроводительной документации.

Стандарт MIL-STD-463 содержит основные определения видов помех, термины и сокращения, которые можно встретить в таких стандартах, как MIL-STD-461 и MIL-STD-462. Стандарт позволяет разобраться во многих понятиях и формулировках. В дополнение ко всем этим материалам в стандарте есть раздел, раскрывающий стандартную систему обозначений степеней, а также обозначения системы СИ, которые связаны с терминологией и обозначениями характеристик ЭМС.

Целый ряд положений, о которых идет речь в стандарте, являются предметом заключения договоров и соглашений по стандартизации. В качестве примера может быть - NATO STANAG 3516. Некоторые положения являются предметом национальных стандартов, так то "Руководство по применению методик радиочастотного контроля"

MIL-STD-464A «Эффекты электромагнитного окружения. Требования к системам» содержит требования по ЭМС, критериям проверки систем воздушного, морского и наземного размещения, как новым так и модифицируемым. Содержит следующие основные разделы:

Глава 1. Обзор

Определяет цели и применение.

Глава 2. Используемые документы

Дает перечень правительственных документов, спецификаций, стандартов, справочников и неправительственных публикаций, относящихся к данному стандарту.

Глава 3 Определения

Содержит определения основных понятий, таких как «выше палубы», «ниже палубы» и других терминов, относящихся к ЭМС систем.

Глава 4. Общие требования

Устанавливается, что система должна быть электромагнитно совместима с подсистемами и оборудованием внутри системы и с внешней электромагнитной обстановкой. Функции, связанные с безопасностью, должны быть проверены на ЭМС в системе и при внешних воздействиях до начала эксплуатации. Проверки должны затрагивать весь аспект жизненного цикла систем, включая нормальную работу, контроль, хранение, перевозку и т.д.

Глава 5. Детальные требования

5.1. Уровни

Дается подход к установке уровня, запаса в требованиях по ЭМС. Устанавливается в частности, что критические для безопасности функции системы должны иметь запас не менее 6 дБ.

5.2. Внутрисистемная ЭМС.

5.3. Внешние электромагнитные воздействия.

5.4. Молнии.

5.5. Электромагнитный импульс.

5.6. Подсистемы, оборудование и электромагнитные помехи.

5.7. Контроль электростатического разряда.

5.8. Электромагнитный риск.

5.9. Жизненный цикл.

Указывается, что система во время ее существования должна соответствовать требованиям стандарта, включая эксплуатацию, ремонт, надзор, контроль коррозии. Соответствие должно проверяться испытаниями, анализом, инспекцией или их комбинацией.

5.10. Электрические соединения.

5.11. Внешнее заземление

5.12. Утечка секретной информации.

5.13. Контроль эмиссии.

5.14. Совместимость спектра.

6. Заметки.

Приложение содержит подробное руководство по применению стандарта. Обсуждаются различные аспекты применения каждого параграфа стандарта.

3.2. Нормирование периодических импульсных помех

Вопрос о нормировании периодических ИП еще окончательно не решен, что объясняется сложностью учета требований со стороны потребителей электроэнергии. Подтверждением этого служит табл.3.3, где представлены данные промышленных низковольтных (до 1000 В) сетях в различных странах.

Таблица 3.3

Нормирование периодических ИП в сетях общего назначения с напряжением менее 1000 В

Страна	Документ	Номера гармоник	допустимое искажение напряжения, %	
			U_v/U_1	$K_{нс}$
Швеция Австралия	Рекомендации Проект стандарта	2-25	3	4
		2-40		
		3		
		5		
		7		
		9		
		11		
		13		
		15-39		
		2		
		4-40		
		(четные)		
ЮАР	Руководящие указания	-	1,5	3
Европейские страны, входящие в СЕНЕ- LEC	Стандарт EN 50.006	2-40	0,85	-
		3	0,65	
		5	0,6	
		7	0,4	
		9	0,4	
		11	0,3	
		13	0,25	
		15-39	0,2	
		2-40		
(четные)				
СССР	ГОСТ I3109-67	-	-	5

3.3. Требования МЭК к нормированию ЭМС на судах

В МЭК 60533 дается также общая процедура планирования работ по ЭМС на судах (приложение В), включающая ЭМС анализ, планирование и выполнение мер обеспечения ЭМС, проверка принятых мер для оборудования и для систем, оценка изменения эффективности мер по мере эксплуатации систем.

Приложение В содержит руководство для достижения ЭМС для судов и судового оборудования. С помощью этого стандарта устанавливается порядок рассмотрения ЭМС вопросов на стадии планирования, конструирования и эксплуатации. Это позволяет реализовать ЭМС меры в требуемый момент на всех стадиях проекта с необходимой координацией.

Организация работ по ЭМС для большинства судов может выполняться одним ответственным специалистом, имеющим необходимые знания, обычно из отдела электрооборудования или электроники судостроительного предприятия. Для более сложных судов могут потребоваться более глубокие знания и навыки. В этом случае для принятия решений по ЭМС может понадобиться специальная ЭМС группа. Эта группа образуется на стадии планирования систем и должна возглавляться ЭМС специалистом. В группе эксперты по различным дисциплинам работают вместе, чтобы определить ЭМС требования к системе, рассматривая потенциальные ЭМС проблемы, методы и средства обеспечения ЭМС с учетом их эффективности и экономической целесообразности. В ЭМС группу могут входить представители заказчика, исполнителя, поставщиков оборудования, классификационного общества и независимые ЭМС эксперты. Не все члены группы должны работать постоянно. Исполнитель имеет право приглашать временных членов в зависимости от рассматриваемых вопросов.

Основная последовательность организации ЭМС работ следующая:

- выполнение первоначального ЭМС анализа;
- формирование ЭМС требований к оборудованию;
- определение требуемых условий работы оборудования;
- определение рекомендаций по установке оборудования;
- разработка качественных мер;
- обсуждение выполненных шагов;
- выполнение дополнительных мер.

Первоначальный анализ должен ответить на следующие вопросы:

- На какое оборудование будут воздействовать передающие антенны?
- Какое оборудование может влиять на приемные антенны?
- Какое электронное оборудование может быть подвержено воздействию излучения от цепей питания и оборудования?
- Какое оборудование может быть подвержено влиянию кондуктивных помех и отклонению качества электроэнергии?

Первичные ЭМС требования к оборудованию до его установки на судне определены соответствующим ЭМС стандартом. Оборудование должно быть сертифицировано на соответствие этим требованиям. Каждый случай не соответствия приводит к дополнительному анализу и к необходимости принимать дополнительные ограничения в проекте и к дополнительным мерам обеспечения ЭМС. Поставщики оборудования должны быть проинформированы об ожидаемой помеховой обстановке в месте установки оборудования. В случае, если комбинация оборудования может привести к риску взаимного влияния исполнитель может потребовать от поставщиков оборудования принять дополнительные меры, обеспечивающие нормальную работу оборудования. Договор с поставщиком должен описывать ЭМС меры, ответственность и процедуру проверки мер.

Общие рекомендации по установке оборудования приведены в стандарте МЭК 60533, но в ходе анализа могут быть установлены специальные рекомендации.

Подтверждение соответствия ЭМС требованиям является частью контроля качества и предусматривается на следующих уровнях:

- уровень оборудования - наличие сертификата или проведение соответствующих испытаний;
- уровень надзора за производством – надзор за выполнением ЭМС требований (прокладка кабелей, установка оборудования, фильтрация, заземление и т.п.) в ходе постройки судна;
- системный уровень- проверка взаимных влияний при дополнительных испытаниях, при которых выявляются возможные сбои при различных комбинациях работы оборудования и определяется источник проблем методом включений-выключений систем и оборудования. Для оценки результатов испытаний используются критерии функционирования по МЭК 60533 или специальные критерии для конкретных систем.

Дополнительные меры применяются , если из-за сложности судна не удастся обеспечить ЭМС обычными мерами, описанными в стандарте. При этом становится необходимым проведение полного анализа ЭМС. Анализ может использоваться для оборудования внутри систем и для подсистем и предусматривает построение схемы принятия решений и матрицы электромагнитных помех. В некоторых случаях оказывается достаточным выполнить часть анализа, например, для определенной частоты или уровня.

Матрица взаимных влияний (матрица электромагнитных помех) включает данные о судовом оборудовании, как потенциальных источниках помех (размещаются в столбцах матрицы), так и рецепторах помех (размещаются в рядах). Обычно оборудование представлено в рядах и в столбцах. Каждый образец оборудования получает номер в матрице. Дополнительно данные об электромагнитном окружении приводятся в матрице. В ячейках матрицы выполняется анализ и определяется возможность влияния пар оборудования друг на друга, что отмечается соответствующими символами. После чего матрица анализируется. Формируются выводы на основе анализа уровней помех и ЭМС мер.

Для выполнения анализа необходимо собрать ряд данных:

- уровни излучения помех и уровни помехоустойчивости оборудования;
- размеры оборудования;
- расстояния между образцами оборудования;
- характеристики оборудования, такие как потребляемая мощность, частотный диапазон, чувствительность приемников, мощность передатчиков и т.п.
- особенностях установке оборудования;
- уровни электромагнитной обстановки.

Предпочтительно использование данных из протоколов испытаний. На первом этапе могут использоваться оценочные данные до тех пор пока не будут получены точные результаты испытаний. Важным является знание о размещении оборудования, прокладке кабелей, расстоянии между ними, о планируемых в системах ЭМС мерах. Для сбора данных может быть полезен опросный лист, заполняемый поставщиками оборудования.

Обработка данных включает составление листов электромагнитных помех с данными о каждом образце оборудования, которым присваивается такой же номер как в матрице, рассмотрение частотного диапазона каждого образца оборудования, уровней создаваемых помех и уровней помехоустойчивости. На практике следует рассматривать отдельно кондуктивные и полевые помехи. Сравнение уровней позволяет оценить влияние оборудования. Для оценки воздействия через линии связи необходимо знать данные об электромагнитных связях цепей. В большинстве случаев до формирования выводов необходимо проведение соответствующих расчетов. В ячейках матрицы заносят оценку влияния по следующим градациям:

- отсутствует влияние;
- взаимные помехи возможны или имеются;
- взаимные помехи возможны, но анализ это не подтвердил взаимного влияния;
- взаимные помехи возможны или имеются в соответствии с анализом;

В ячейке должна указываться и количественная оценка анализа при наличии влияния. Например, оцениваются уровни помех в месте установки оборудования для всех режимов работы передатчиков и сравниваются с уровнем устойчивости оборудования.

После заполнения матрицы становится возможным установить какое оборудование не совместимо. На основе этого определяются меры по обеспечению ЭМС. Возможно принятие решения об улучшении отдельных образцов оборудования или о принятии дополнительных ЭМС мер в системе. Могут применяться как меры по подавлению помех, так и меры по помехозащите, дополнительные ограничения эмиссии помех и ограничения влияния помех. Должны приниматься во внимание такие электромагнитные помехи как провалы напряжения в сети, низкочастотные и высокочастотные напряжения, колебания и импульсные напряжения, электростатические разряды, электромагнитные поля. Уровни этих возмущений могут быть уточнены измерениями непосредственно на судне.

Испытания на электромагнитную совместимость включают испытания оборудования, испытания систем и периодические испытания. Все оборудование должно быть испытано в соответствии с МЭК 60533 до интегрирования в систему. Дополнительное испытание оборудования понадобится после принятия дополнительных ЭМС мер. Испытания систем начинаются с визуального осмотра по проверке ЭМС мер, принятых на фазе постройки судна:

- проверка прокладки кабелей;
- проверка заземления экранов кабелей;
- проверка качества и длины цепей заземления оборудования;
- проверка соответствия специальных ЭМС мер проектной документации;
- инспекция коррозионной защиты в соединениях заземления.

Процедура проверки принятых мер начинается инженером, разработавшим улучшения по ЭМС. Проверяются специфические параметры ЭМС, используя матрицу помех в наиболее критических режимах работы оборудования.

Периодические испытания в ходе эксплуатации призваны для устранения ухудшения ЭМС со временем. Документация и инструкция по установке оборудования должна содержать данные о периодических проверках параметров ЭМС , а также данные об испытаниях после ремонта. Должны быть запланированы временные интервалы проверок и инспекции классификационным обществом. Обслуживающий персонал должен записывать любые помехи, сбои, выявленные в ходе работы оборудования, системы. Каждый случай сбоев должен быть расследован и устранен в ходе регламентных работ, а проблема должна быть сообщена проектировщикам судна.

Документ МЭК 60533 включает также рекомендации по выбору, размещению и монтажу оборудования с целью обеспечения ЭМС.

Документ МАКО «Requirements concerning navigation» N1 устанавливает кроме общих требований к навигационному оборудованию и системам необходимость их испытаний после установки на судно. В частности в п.5 документа указывается, что после монтажа на борту необходимо испытать установку для демонстрации ее правильной работы. Некоторые тесты могут быть выполнены при швартовых испытаниях, но некоторые только при ходовых. Преусматривается также периодический надзор для проверки оборудования в ходе эксплуатации.

3.4. Планирование мероприятий по обеспечению ЭМС

В настоящее время общепризнана необходимость включения в проект разрабатываемого устройства или системы специального раздела, в котором должны подробно излагаться пути выполнения требований ЭМС, - плана обеспечения ЭМС. Он составляется на основе действующих технических условий, стандартов, норм, правил и других документов и определяет программу обязательных мероприятий, которые обеспечат в последующем высокую надежность работы данной аппаратуры при допустимом запасе по электромагнитным помехам. Зарубежный опыт показал, что при современной насыщенности систем электронной аппаратурой на выполнение требований у ЭМС расходуется 5...10% стоимости аппаратуры.

В договор на поставку аппаратуры целесообразно включать пункты, определяющие санкции за отсутствие плана обеспечения ЭМС или несоблюдение его требований. Для надзора за его выполнением необходимы специалисты по ЭМС, в обязанности которых должны входить следующие функции:

- формулировка требований к ЭМС в системе;
- проверка выполнения плана обеспечения ЭМС и корректировка его;
- контроль за соблюдением требований к уровню помех при разработке системы, отдельных узлов, элементов;
- участие в заседаниях рабочих групп;
- контроль и утверждение проектно-конструкторской документации с учетом ее соответствия требованиям ЭМС;
- формулировка требований к измерениям, утверждение методики всех измерений помех, руководство измерениями помех;
- анализ и документирование результатов измерений помех и на их основании выработка рекомендаций по изменению проекта для обеспечения ЭМС систем;

- обеспечение взаимодействия с предприятиями-смежниками по вопросам ЭМС;

- контроль за выполнением технических требований у изложенных в плане обеспечения ЭМС» всеми подведомственными организациями и службами;

- учет регистрируемых отклонений параметров помех от допустимых значений и планирование мероприятий по их устранению;

В план обеспечения ЭМС рекомендуется вводить следующие разделы [9]:

- основные сведения (обоснование плана обеспечения ЭМС, его назначение, сфера действия, используемые технические условия, нормы, стандарты, термины, определения, аббревиатуры и т.д.);

- руководство работами и ответственность (схема организации и план-график работ, подразделения и ответственные исполнители по отдельным устройствам; организация контроля ЭМС; возможности и обязанности смежников (поставщиков); план организации учебы исполнителей для повышения квалификации в области ЭМС разрабатываемой системы);

- основные параметры ЭМС (восприимчивость отдельных узлов устройства или системы; характеристики помех, создаваемых элементами системы внутри нее и т.д.)

- монтаж (монтажная схема; прокладка и разносиловых и информационных кабелей и цепей; принципы экранирования кабелей, заземления их экранов);

- данные об отдельных устройствах и узлах (типовые элементы, узлы и блоки; методы заземления; обоснование применяемых элементов защиты от помех и их характеристики; взаимное расположение и разнос блоков с учетом ориентации электромагнитных полей; критичность с точки зрения ЭМС отдельных узлов, их экранировка и изоляция);

- конструкция и ее влияние на уровень помех (выбранные при проектировании металл, тип литья, характер покрытия, габариты, секционность конструкции, методы установки и размещения узлов; устройство вентиляционных проемов и - отверстий; топология силовых токопроводов и элементов силовой схемы);

- дополнительные данные, обусловленные специфичностью устройства (системы);

- методики и программа измерений характеристик ЭМС, которые составляются на основе действующих стандартов и правил,

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие

1. Проблема электромагнитной совместимости судового электротехнического и электронного оборудования

1.1. Общие понятия

1.2. Характеристики электромагнитных помех

1.3. Вопросы обеспечения электромагнитной совместимости

2. Возникновение импульсных помех в судовых электроэнергетических системах

2.1. Импульсные помехи при работе полупроводниковых преобразователей

2.2. Непериодические коммутационные импульсные помехи

2.3. Внешние электромагнитные импульсы

3. Распространение импульсных помех в судовой электроэнергетической системе

3.1. Распространение импульсных помех по судовой кабельной сети

3.2. Распространение импульсных помех из сети через вторичные источники питания

3.3. Импульсные помехи, наведенные в информационных кабелях

4. Влияние импульсных помех на судовое электронное и электротехническое оборудование

4.1. Элементная база.

4.2. Цифровые устройства управления

4.3. Аналоговые устройства управления

4.4. Измерительные устройства

4.5. Энергетическое оборудование

5. Снижение уровней импульсных помех в СЭЭС

5.1. Подавление помех в источнике

5.2. Методы снижения уровней помех при распространении в сети

6. Защита оборудования от импульсных помех

6.1. Сетевые и входные фильтры

6.2. Экранирование и заземление

6.3. Нелинейные элементы

6.4. Особенности проектирования вторичных источников питания

6.5. Рациональное проектирование оборудования

7. Измерение помех на судах

7.1. Измерение импульсных токов и напряжений

7.2. Измерения периодических искажений напряжения

7.3. Измерение электромагнитных полей

7.4. Измерение помех при испытании оборудования

8. Испытание оборудования на помехозащищенность

8.1. Имитаторы импульсных помех

8.2. Методика испытаний оборудования на устойчивость к помехам

8.3. Определение параметров электромагнитной связи

9. Стандарты на ЭМС электронного и электротехнического оборудования

9.1. Обзор стандартов и норм по ЭМС

9.2. Нормирование периодических импульсных помех

9.3. Требования МЭК к нормированию ЭМС на судах

9.4. Планирование мероприятий по обеспечению ЭМС

Литература