

## **ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ СОВМЕСТИМОСТЬ ОБОРУДОВАНИЯ ДЛЯ АЭС. НЕКОТОРЫЕ РЕЗУЛЬТАТЫ ИСПЫТАНИЙ**

Под электромагнитной совместимостью (ЭМС) понимается способность технических средств (ТС) функционировать в конкретной электромагнитной обстановке (помехоустойчивость), не создавая при этом недопустимых помех другим ТС (помехоэмиссия). Это свойство является системным в отличие от функционального свойства, которое определяется характеристиками функционирования ТС по своему назначению.

Обеспечение электромагнитной совместимости является одним из важнейших признаков качества, так как, если какое-либо ТС несовместимо с внешними условиями и с другими ТС, с которыми должно работать совместно и одновременно, то качество такого ТС (следовательно и всей системы) неудовлетворительно. Нарушение работы ТС может привести к различным негативным последствиям: от неудобства работы обслуживающего персонала до отказов, критичных для безопасности различных объектов. Особенно это важно для таких потенциально опасных объектов, как АЭС.

Знание электромагнитной обстановки в месте установки ТС позволяет обоснованно устанавливать предельные уровни помехоустойчивости и помехоэмиссии конкретных ТС. Однако полное описание электромагнитной обстановки затруднительно. В связи с этим, в международных и российских стандартах приводятся методы оценки электромагнитной обстановки и ее классификации на основе ограниченного набора наиболее значимых параметров. В частности методы оценки электромагнитной обстановки в сооружениях АЭС приведены в ГОСТ Р 50746-2000.

Электромагнитная обстановка в местах установки выпускаемого в настоящее время НПП ВНИИЭМ оборудования АЭС классифицируется, в основном, как легкая и средней жесткости. Это, а также классы безопасности выпускаемого оборудования (в основном, 2-й и 3-й классы), определяют группы его исполнения (IV, III и II), т.е. уровни помехоустойчивости.

Система классификации электромагнитных помех (международная и отечественная) устанавливает категории и виды электромагнитных помех, приведенные в таблице.

№	Категория электромагнитных помех	Вид электромагнитных помех
1	Низкочастотные кондуктивные электромагнитные помехи	Гармоники, интергармоники напряжения электропитания
2		Напряжения сигналов, передаваемых в системах электроснабжения
3		Колебания напряжения электропитания
4		Отклонения напряжения электропитания
5		Провалы, перерывы и перенапряжения напряжения электропитания
6		Изменения частоты в системах электроснабжения
7		Наведенные низкочастотные напряжения
8		Постоянные составляющие в сетях электропитания переменного тока
9		Несимметрия напряжений в трехфазных системах электроснабжения
10	Низкочастотные излучаемые электромагнитные помехи	Магнитные поля
11		Электрические поля
12	Высокочастотные кондуктивные электромагнитные помехи	Наведенные напряжения или токи непрерывных колебаний
13		Апериодические и колебательные переходные процессы
14	Высокочастотные излучаемые электромагнитные помехи	Магнитные поля
15		Электрические поля
16		Электромагнитные поля, вызываемые непрерывными колебаниями и переходными процессами
17	Электростатические разряды	

Примечание 1. Излучаемые помехи распространяются в пространстве, окружающем ТС (поля), кондуктивные помехи – в проводящих средах.

2. Деление на низкие и высокие частоты достаточно условно, за границу между ними принимается частота около 9 кГц.

3. В отдельную категорию выделены электромагнитный импульс высотного ядерного взрыва и преднамеренные помехи большой мощности (здесь не рассматриваются).

Для целей ЭМС классифицируются также места размещения технических средств (зоны и классы мест применения ТС). В соответствии с этой классификацией ТС АЭС относятся к оборудованию промышленных зон, которые характеризуются повышенным уровнем электромагнитных помех (значительными токами в силовых сетях и связанными с ними уровнями магнитных полей, переключением значительных индуктивных и емкостных нагрузок и т.п.). В этой связи необходимо отметить, что для ТС, применяемых в жилых и коммерческих зонах с малым энергопотреблением, устанавливаются, как правило, более жесткие требования по помехоэмиссии и более низкие требования по помехоустойчивости, чем для оборудования промышленных зон. Поэтому к применению в ТС АЭС устройств, сертифицированных для жилых и коммерческих зон, надо подходить осторожно.

Объем и уровень требований, предъявляемых к помехоустойчивости ТС АЭС с электронными компонентами, в общем виде задается ГОСТ Р 50746-2000. Однако для конкретных ТС объем требований зависит от характера оборудования, его схемы электроснабжения, применяемых компонентов.

Требованиям устойчивости к электростатическим разрядам, радиочастотным полям, кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными полями, наносекундным и микросекундным импульсным помехам, одиночным колебательным затухающим помехам должны удовлетворять все ТС и все их порты (питания, ввода/вывода, корпуса). Под портом здесь понимается граница между ТС и внешней средой (клемма, разъём, корпус и т.д.)

Практически все ТС (только порт корпуса) должны удовлетворять требованиям устойчивости к магнитным полям промышленной частоты и импульсным магнитным полям. Исключением являются ТС, предназначенные для использования в условиях воздействия слабых магнитных полей (измерительные приборы и т.п.).

Кроме того, все ТС (только порт питания), подключаемые к низковольтным сетям переменного тока, должны удовлетворять требованиям устойчивости к изменениям (колебаниям) напряжения и частоты электропитания, гармоникам и интергармоникам напряжения.

И наконец, требованиям устойчивости к токам кратковременных синусоидальных и микросекундных импульсных помех в цепях заземления должны удовлетворять все ТС (только порт корпуса), имеющие контур специального заземления.

Остальные требования на устойчивость оборудования НПП ВНИИЭМ для АЭС могут не устанавливаться, так как они относятся к оборудованию силовых подстанций и установок большой мощности.

В настоящее время проводится рассмотрение ряда дополнительных требований по помехоустойчивости оборудования АЭС (динамические изменения и пульсации напряжения постоянного тока, несимметрия напряжения электропитания и др.). В результате объем требований к ТС АЭС может возрасти.

Как уже отмечалось, электромагнитная обстановка включает помехи, создаваемые самими техническими средствами. Поэтому они подлежат ограничению. Требования по ограничению помехоэмиссии предъявляются ко всем ТС АЭС, содержащим активные компоненты (электронные, радиоэлектронные, электротехнические).

Предельные уровни помех определяются зоной размещения ТС. Для ТС АЭС – это промышленная зона. Виды помехоэмиссии, уровни которых нормируются в настоящее время для ТС АЭС следующие:

- напряжение и напряженность поля промышленных радиопомех;
- гармонические составляющие потребляемого тока;
- колебания напряжения, вызываемые в сети.

Порты ТС, применительно к которым установлены предельные уровни помехоэмиссии, следующие:

- промышленные радиопомехи - корпус, электропитание;
- остальные виды помех – входной порт электропитания переменного тока.

Кроме ограничений перечисленных видов помех в ближайшем будущем возможно введение ограничений на помехоэмиссию других видов (в частности пусковых токов), разработка нормативной документации на которые проводится в настоящее время.

Общие принципы обеспечения требований по помехоустойчивости и помехоэмиссии достаточно подробно изложены в [1-4]. Тем не менее, при разработке и испытаниях оборудования для АЭС проблемы обеспечения ЭМС продолжают оставаться актуальными, что можно объяснить усложнением аппаратуры, появлением новой элементной базы и постоянным увеличением объема и уровня требований по ЭМС.

В последние несколько лет проведено значительное количество испытаний оборудования для АЭС выпускаемого как НПП ВНИИ-ЭМ, так и другими предприятиями. Испытаниям подвергалось, в основном, вновь разрабатываемое оборудование в процессе приемочных испытаний. Проводились также испытания исследовательского характера отдельных устройств с целью определения их ЭМС характеристик и запасов по помехоустойчивости и помехоэмиссии. По результатам испытаний проводилась, в случае необходимости, доработка оборудования и проверка ее эффективности. Это позволяло решать возникающие проблемы и успешно завершать испытания на ЭМС.

Ниже приводятся некоторые выводы по результатам испытаний, учет которых на этапе конструирования следующих моделей оборудования может свести к минимуму доработки на этапе испытаний и, следовательно, снизить затраты на создание аппаратуры.

Объем испытаний, которым подвергались ТС АЭС, соответствовал отечественным и международным стандартам и, как правило, включал следующие виды:

*устойчивость к:*

- электростатическим разрядам (ЭСР);
- радиочастотному электромагнитному полю (РЧП);
- наносекундным импульсным помехам (НИП);
- микросекундным импульсным помехам большой энергии (МИП);
- кондуктивным помехам, наведенным радиочастотными электромагнитными полями (КРЧП);
- динамическим изменениям напряжения электропитания (ДИН);
- одиночным колебательным затухающим помехам (КЗП);
- колебаниям напряжения электропитания (УН);
- изменению частоты сети электропитания (УЧ);
- магнитному полю промышленной частоты (МППЧ);
- импульсному магнитному полю (ИМП);
- искажению синусоидальности напряжения электропитания (УГ);
- токам кратковременных синусоидальных помех частотой 50 Гц в цепях защитного и сигнального заземления;
- к токам микросекундных импульсных помех в цепях защитного и сигнального заземления;

*измерение помех следующих видов:*

- напряжения (ДРП) и напряженности поля (ЭМП) промышленных радиопомех;
- эмиссии гармонических составляющих потребляемого тока (ИГ);
- колебаний напряжения, вызываемых в сети, (ИКН).

Практически не было проблем при проведении испытаний на устойчивость к магнитным полям, изменениям (колебаниям) напряжения и частоты электропитания, гармоникам и интергармоникам напряжения (искажению синусоидальности напряжения электропитания), а также при измерении колебаний напряжения. Объясняется это отсутствием в испытываемом оборудовании магнито-чувствительных элементов (кроме ЭЛТ-мониторов, замена их на ЖК-мониторы решает проблему), а также применением импульсных блоков питания, которые работоспособны в более широком, чем требуется, диапазоне колебаний напряжения, частоты и гармонического состава сети электропитания. Однако здесь присутствует одна проблема, суть которой заключается в следующем.

При работе от сети, в которой имеются колебания напряжения и частоты и искажения синусоидальности напряжения, падает КПД блока питания. Следствием этого является увеличение потребляемого тока и тепловых потерь, что в свою очередь приводит к ускоренному старению элементов. Расчеты показывают, что снижение эффективного значения напряжения на 10% вследствие любой из перечисленных причин вызывает увеличение тепловых потерь более чем на 20%. Обнаружить результаты данного эффекта в процессе достаточно коротких (несколько часов) испытаний на ЭМС невозможно, но учитывать его при расчетах срока службы необходимо.

Решение проблемы – применение полупроводниковых корректоров коэффициента мощности, получивших в настоящее время широкое распространение. Их применение также поможет решить недавно возникшую проблему, связанную с введением требований к гармоническому составу потребляемого ТС тока (искажение синусоидальности напряжения сети). При испытаниях установлено, что наличие в ТС нескольких параллельно работающих импульсных источников может приводить к превышению норм по искажению синусоидальности напряжения сети.

При проведении остальных видов испытаний достаточно часто возникали проблемы, причины которых, в основном, были связаны с компоновкой, металлизацией, заземлением, экранированием и фильтрацией.

Согласно общей методологии анализа и практического обеспечения ЭМС выделяются три объекта рассмотрения:

- элементы и устройства – источники помех;
- элементы и устройства, чувствительные к воздействию помех, – рецепторы;
- элементы и пространство, составляющие среду распространения помех от источников к рецепторам.

Любой элемент или устройство принципиально могут рассматриваться одновременно и как источник помех, и как рецептор. Однако при решении практических задач обеспечения ЭМС к категории источников помех необходимо относить только элементы, создающие относительно большие уровни помех, а к категории рецепторов – только элементы с достаточно высокой чувствительностью. Обеспечение ЭМС этих элементов приведет одновременно к обеспечению ЭМС менее чувствительных и менее шумящих элементов.

Имеющийся опыт показывает, что к источникам помех в первую очередь относятся (радиоизлучающие системы для ТС АЭС исключаются):

- генераторы различного вида напряжений (в т. ч. тактовые вычислительных средств);
- источники электропитания (создают постоянные и переменные магнитные поля, пульсации, провалы напряжения и перенапряжение в сети питания);
- коммутационная аппаратура (создает броски тока, провалы напряжения, импульсные помехи);
- электронные приборы, генерирующие или усиливающие энергию импульсного характера (создают импульсные помехи, затухающие гармонические колебания – «звон»);
- катушки индуктивности (обмотки трансформаторов, реле, электродвигателей, электроклапанов – создают броски напряжения при снятии питания за счет ЭДС самоиндукции);
- несогласованные с нагрузкой линии связи (неоднородные линии с переменным волновым сопротивлением, линии, нагруженные на сопротивления, отличающиеся от волнового сопротивления и т.д. – создают помехи за счет отражения энергии сигнала от нагрузки).

Элементами, способствующими распространению и излучению электромагнитных помех, являются:

- соединительные провода и кабели;
- катушки реле и трансформаторов;
- паразитные индуктивности и емкости (взаимоиндукция и емкости связи в кабелях и т.д. – создают условия для образования перекрестных помех);
- некачественная металлизация и экранирование (плохой контакт, большое активное и реактивное сопротивление металлизации) создают условия для возникновения помех за счет электромагнитного влияния растекающихся уравнивающих токов, разности потенциалов (особенно при электростатических разрядах);
- элементы конструкции ТС.

К рецепторам помех относятся:

- усилители аналоговые, особенно с большим коэффициентом усиления;
- аналоговые и цифровые схемы в блоках электроники с относительно небольшими уровнями сигналов (АЦП, ЦАП, различного вида память и др.).

В соответствии с этой классификацией на первом этапе конструирования необходимо проведение схемного анализа и определение источников и рецепторов помех. На основании данного анализа на этапе конструирования вырабатываются требования к:

- компоновке;
- экранировке узлов и элементов;
- фильтрации помех.

Разбиение и компоновка решают задачу, что и где должно быть размещено. На этом этапе проблемы возникновения помех и наводок можно свести к минимуму, изолировав рецепторы от источников помех, устранив паразитные индуктивные и емкостные связи.

Для этого необходимо:

- располагать маломощные схемы (рецепторы) поблизости от источников сигналов;
- располагать мощные схемы (источники) поблизости от нагрузок;
- располагать мощные и маломощные схемы подальше друг от друга;
- применять как можно более короткие линии связи и проводники;
- использовать максимально короткие цепи прохождения тока.

При проектировании межблочных соединений и внешних кабелей необходимо разделение всех соединительных линий связи в соответствии с электрическими характеристиками проходящих по ним сигналов на группы:

- цепи первичного питания;
- цепи вторичного питания постоянным током;
- цепи вторичного питания переменным током;
- цепи сигнальные (аналоговые и цифровые) низковольтные с  $f < 1$  МГц;
- высоковольтные цепи;
- цепи управления;
- высокочастотные цепи с  $f > 1$  МГц.

При формировании разъемов блоков для каждой указанной выше группы необходимо выделять отдельные разъемы и жгуты.

Когда применение отдельных соединителей невозможно, кон-

такты цепей разных групп должны быть размещены в удаленных друг от друга зонах соединителя, а сами цепи экранированы.

При разработке жгутов необходимо руководствоваться следующим:

- цепи первичного и вторичного питания постоянного и переменного тока выполняются витой парой и помещаются в экран, который изолируется от корпуса и других экранов по всей длине и соединяется с корпусом с двух сторон (источника и приемника);
- сигнальные цепи, как правило, выполняются витыми парами; цепи однотипных сигналов помещаются в общий экран, изолируемый по всей длине от корпуса и других экранов; слаботочные и цифровые цепи помещаются в индивидуальные экраны; экран необходимо заземлять в одной точке при  $f < 2$  МГц и с двух сторон при  $f > 2$  МГц; при этом, если имеется опасность повышенного излучения помех самой цепью, то заземлять экран необходимо у источника, а если имеется опасность влияния на сигнал внешних помех, то заземлять экран необходимо у приемника;
- цепи управления допускается не экранировать;
- использование экрана в качестве обратного провода не допускается;
- для сигналов с  $f > 1$  МГц рекомендуется применять коаксиальный кабель или витую пару в экране, для  $f < 50$  кГц коаксиальный кабель нежелателен;
- при монтаже разъемов экранирующие оплетки соединяются с корпусом разъема или конструкцией «корпус» снаружи блока; цепи «корпус» в разьеме (и жгуте) не допускаются, кроме специального «сигнального» заземления;
- соединение (металлизация) блоков с корпусом производится изолированными проводниками минимально возможной длины.

Важность применения экранированных цепей и их корректное соединение с корпусом была подтверждена в процессе испытаний. Например при испытаниях ПЭВМ в промышленном исполнении ККСН ЭКСПРО на помехоустойчивость количество ошибок передачи с неэкранированной витой парой ETHERNET составило около 10%, а с экранированной 0%.

При разработке монтажной схемы и монтаже, а также в требованиях к внешним кабелям необходимо учитывать следующее:

- жгуты должны располагаться по возможности ближе к поверхности элементов конструкции (по возможности вплотную);
- длины жгутов должны быть минимально возможными;
- параллельная прокладка жгутов с разнотипными сигналами

нежелательна, а жгутов с цепями первичного питания и жгутов с цепями остальных типов – недопустима;

- пересечение жгутов желательно проводить под прямым углом.

Приведенные рекомендации достаточно хорошо известны, подробно изложены в литературе и являются результатом как теоретических, так и экспериментальных работ. Важность их выполнения можно проиллюстрировать небольшим примером.

Если длина двух соседствующих линий питания (неэкранированная) и связи (экранированная) около 10 м, ток в линии питания 10 А, время его коммутации  $\sim 10$  мкс, то амплитуда импульса наводки в линии связи может составить несколько вольт. При увеличении длины линий и тока в линии питания и уменьшении времени коммутации амплитуда импульса наводки в линии связи может доходить до сотен вольт, а иногда и до киловольт. Разнесение этих линий уменьшает наводку пропорционально расстоянию между линиями. Однако, если они находятся в жгуте вместе с другими проводниками, расстояние между линиями никак не сказывается на величине наводки.

Основным средством борьбы с кондуктивными помехами как для целей помехоустойчивости, так и для обеспечения требований по помехоэмиссии является их фильтрация при помощи помехоподавляющих фильтров. Действие фильтров основано на отражении и частичном поглощении помех в индуктивности и емкости. Предпочтительнее фильтры, обеспечивающие подавление помех, в основном, за счет поглощения.

Как правило, обеспечение требований по помехоэмиссии невозможно обеспечить без применения фильтров в цепях первичного питания, особенно при наличии в составе аппаратуры импульсных источников питания и вычислительных средств. Так для некоторых шкафов требуемый уровень создаваемых радиопомех был обеспечен при установке в цепи питания помехоподавляющих фильтров.

При выборе фильтров прежде всего необходимо определить их частотный диапазон и затухание. Помимо этого необходимо учесть (особенно при установке фильтров в цепях питания) их устойчивость к импульсным помехам (МИП, НИП), амплитуда которых может составлять несколько кВ.

Выполнение фильтрами своих функций зависит от соблюдения приведенных выше рекомендаций по размещению, заземлению и выполнению монтажа: минимальные линии связи, обязательное их экранирование, надежное заземление, разделение цепей по типам сигналов. Несоблюдение этих требований может существенно снизить (иногда свести к нулю) эффективность фильтров, что и на-

блюдалось в ряде случаев при испытаниях некоторых шкафов. Применение приведенных выше рекомендаций при изменении монтажа жгутов питания до и после фильтров шкафов снизило уровень радиопомех этих шкафов до необходимого уровня.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Барнс Дж.. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. М.: Мир. 1990.
2. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и систем // Под ред. Н.М. Царькова. М.: Радио и связь. 1985.
3. Бадалов А.Л., Михайлов А.С. Нормы и параметры электромагнитной совместимости РЭС. М.: Радио и связь. 1990.
4. Уилльямс Т.. ЭМС для разработчиков продукции. М.: Издательский дом «Технологии». 2003.