

Электромагнитная совместимость импульсных источников питания:

проблемы и пути их решения. Часть I

В данной статье приводятся необходимые сведения и практические рекомендации по обеспечению электромагнитной совместимости для импульсных источников вторичного электропитания. Рассмотрены виды электромагнитных помех и допустимые нормы на них на основе международных и отечественных стандартов по ЭМС. В следующих частях статьи будут приведены практические рекомендации схемотехнического, компонентного, конструктивно-технологического характера по эффективному подавлению помех на уровне современных требований и накопленного практического опыта.

Владимир Ланцов

vvlantsov@list.ru

**Саркис Эраносян,
к. т. н.**

sergera840@mail.ru

В настоящее время к качеству электрической энергии в широком смысле этого понятия предъявляются более высокие требования, чем ранее. Источники вторичного электропитания (ИВЭ или источники питания), входящие в состав любых радиоэлектронных средств, систем автоматизации, различного оборудования, являются связующим звеном между потребителями (нагрузкой) и системой электроснабжения. Бурное развитие импульсных ИВЭ, работающих на высоких частотах преобразования и обладающих высокой экономичностью и улучшенными массо-габаритными показателями, обострило проблему электромагнитной совместимости между приборами, то есть различными техническими средствами (ТС).

Уже в 1980-х годах в международном сообществе специалисты пришли к выводу, что необходимо ужесточить требования по ЭМС в связи с широким развитием компьютерной техники, высококачественной аудио-, теле- и видеоаппаратуры, мобильных средств связи. Так, федеральные комиссии электросвязи в ФРГ (FTZ) и США (FCC) первыми признали серьезность этой проблемы и ввели соответствующие нормы в этой области. Введенные нормативы относились ко всем ТС — промышленным и коммерческим. Директива Евросоюза № 89/336 от 3 мая 1989 года установила правовое регулирование в области ЭМС ТС. В частности, предлагалось установить:

- обязанности физических и юридических лиц по обеспечению ЭМС при разработке, изготовлении и реализации, импорте, установке и применении ТС;
- придание обязательного характера требованиям к ТС по помехоустойчивости и помехоэмиссии;
- введение обязательного подтверждения соответствия ТС требованиям по ЭМС;
- осуществление государственного контроля и надзора за соблюдением требований ЭМС.

При соответствии ТС требованиям ЭМС согласно директиве ЕС № 89/336 (приложение 1) на ТС должен наноситься символ «**CE**» и год, в который была нанесена маркировка.

В 1990–1996 годах современные законодательные акты в указанной области были приняты государствами — членами ЕС. После 1990 года Международной электротехнической комиссией (МЭК или IEC), ее Специальным комитетом по радиопомехам (СИСРП или CISPR) и Европейским комитетом по электротехнической стандартизации (CENELEC) стали проводиться мероприятия, направленные на обеспечение необходимой устойчивости («иммунитета») ТС к воздействию электромагнитных помех (ЭМП или помехи) в окружающей электромагнитной обстановке. Вместе с тем, необходимо было ограничить уровни генерации и излучения («эмиссии») различных видов ЭМП, способных нарушить нормальное функционирование других ТС [1, 2]. В декабре 1999 года и в России был принят закон «О государственном регулировании в области обеспечения электромагнитной совместимости технических средств». В этой связи в нашей стране появилось множество государственных стандартов в области ЭМС, разработанных в соответствии («гармонизированных») с международными и европейскими стандартами, а также ряд других нормативных документов. Одновременно отработывались методики измерений помех и совершенствовались оборудование по контролю параметров ЭМС [1].

Несмотря на многочисленные публикации по различным аспектам проблематики ЭМС аппаратуры, в том числе по импульсным источникам питания, интерес к этой теме не ослабевает. Это связано с индивидуальным характером разработки некоторых систем и средств электропитания, с развитием электронной компонентной базы, особенно интегрированных силовых модулей, и, наконец, со специфическими условиями эксплуатации аппаратуры в ряде случаев, например «плохая» электросеть, помехочувствительная нагрузка и т. д.

Поэтому в настоящей работе авторы попытались в сжатом, но достаточно информативном изложении привести необходимые сведения и практические рекомендации по обеспечению ЭМС для импульсных ИВЭ. В статье будут приведены практические реко-

мендации схемотехнического, компонентного, конструктивно-технологического характера по эффективному подавлению помех на уровне современных требований и накопленного практического опыта.

Основные термины и определения

Основным государственным стандартом в области терминологии ЭМС технических средств является ГОСТ Р 50397-92 [3]. Международная терминология ЭМС представлена в стандарте МЭК-50-161-90, в котором содержится официальный перевод терминов в области ЭМС на русский язык. Основные термины и понятия применительно к источникам питания изложим на основании [1].

Электромагнитная обстановка (ЭМО) — совокупность реальных электромагнитных явлений, существующих в данном месте, в частотном и временном диапазонах.

Электромагнитная совместимость (ЭМС) (ElectroMagnetic Compatibility — EMC) — это способность источника питания, как технического средства, эффективно функционировать с заданным качеством в определенной ЭМО, не создавая при этом недопустимых электромагнитных помех другим ТС и питающей электросети.

Электромагнитная помеха (ЭМП) (ElectroMagnetic Influence — EMI) — электромагнитные явления, которые ухудшают или могут ухудшить качество функционирования ТС (электрической сети, приборов и устройств потребителей). Уровень ЭМП — значение величины помехи, измеренное в регламентированных условиях.

Электромагнитная эмиссия от источника питания, помехоэмиссия — генерирование источником питания электромагнитной энергии, которая излучается в пространство в виде электромагнитных волн.

Уровень электромагнитной эмиссии от источника помехи (источника питания), уровень помехоэмиссии — уровень помехи конкретного вида, которая генерируется источником питания. Этот уровень измеряется в регламентированных условиях.

Устойчивость к ЭМП, помехоустойчивость — способность источника питания сохранять заданное качество функционирования при воздействии внутренних (в самом источнике) и внешних (со стороны питающей сети) помех.

Уровень устойчивости к ЭМП, уровень помехоустойчивости источника питания — максимальный уровень помехи конкретного вида, воздействующей на источник питания, при котором источник питания сохраняет заданное качество функционирования.

Рассмотрим некоторые показатели и характеристики средств электропитания в части ЭМС [1, 4, 5]. **Качество электрической энергии** — совокупность свойств электрической энергии в электрической сети, которые определяют электромагнитную совместимость ТС, подключенных к этой сети. Качество электрической энергии — обобщенное понятие, характеризующее уровень низкочастотных кондуктивных электромагнитных помех опреде-

ленных видов в электрической сети, которые вызывают отклонение напряжения, частоты и формы синусоидальности кривой напряжения в сети от установленных значений. Иными словами, низкочастотной помехе дано более широкое толкование.

Установившееся отклонение напряжения — отклонение напряжения в установившемся режиме работы системы электроснабжения (ГОСТ 23875-88) [4].

Колебания напряжения — серии единичных изменений напряжения во времени. Провал напряжения в сети электроснабжения — внезапное значительное снижение напряжения в сети электроснабжения с последующим его восстановлением. Временное перенапряжение в системе электроснабжения — временное повышение напряжения в точке электрической сети выше уровня $1,1 U_{ном}$ продолжительностью более 10 мс, возникающее в сетях электроснабжения при коммутациях или коротких замыканиях (ГОСТ 13109-97) [5]. Импульс напряжения в системе электроснабжения — резкое изменение напряжения в точке электрической сети, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня за промежуток времени до нескольких миллисекунд.

Электромагнитные аномалии в сетях электроснабжения

Еще в 1970–1980 годах некоторыми отечественными специалистами были проведены экспериментальные исследования по установлению реального функционирования электрической сети общепромышленного назначения ~220 В/ ~380 В с частотой 50 Гц [6]. В документации на многие виды аппаратуры и некоторые источники питания указывалось (и в ряде случаев указывается и в наши дни), что напряжение электрической сети общего назначения на зажимах у потребителя не должно выходить за границы $\pm 10\%$ от номинального значения. В действительности, в отдельные моменты времени напряжение сети значительно выходит за указанные значения. Было отмечено, что кратковременные перенапряжения и импульсные помехи имеют амплитуду 5–500 В и длительность от долей до десятков микросекунд. В отдельных случаях импульсные помехи могут достигать величины 1000 В и более с фронтами нарастания до 10 нс. Провалы напряжения могут составлять 15–30% и более от номинального напряжения при длительности от полупериода до 15–30 периодов промышленной частоты. Число сетевых импульсных помех зависит от характера произ-

водства. В частности, на одном из машиностроительных предприятий за сутки были зафиксированы следующие данные по помехам. Зафиксировано импульсных помех с амплитудой более 5 В около 6400, из которых примерно 1000 имели амплитуду выше 100 В, причем средний период следования импульсов был порядка 25–27 с [6].

В настоящее время сети электропитания (электроснабжения) постоянно подвергаются воздействию дестабилизирующих факторов и поэтому не обеспечивают должного качества электроэнергии. Исследования, проведенные мировыми производителями электронной техники (по данным Bell Laboratory, США) [2], показали, что, например, компьютер в среднем сталкивается с аномалиями электропитания более 120 раз в месяц. В 75% случаев эти аномалии становятся причинами сбоев, а в 25% случаев они могут привести и приводят к более серьезным отказам и повреждениям техники. Указанные аномалии являются следствием таких явлений, как включения-выключения или работа в повторно-кратковременных режимах мощных потребителей типа станочного и штамповочного оборудования, лифтов, транспортеров, сварочного оборудования, срабатывания устройств аварийной защиты и т. д. Свою лепту вносят сами импульсные источники питания, если не приняты должные меры по обеспечению их ЭМС. В этом контексте можно упомянуть коммерческие (бытовые) электронные и электротехнические устройства: персональные компьютеры, аудио-, теле- и видеотехнику, стиральные машины, кондиционеры, СВЧ-печи и т. п.

Типовые аномалии электропитания за рубежом (данные Bell Laboratory):

- а) пониженное напряжение — до 87%;
- б) повышенное напряжение — около 0,7%;
- в) импульсные перенапряжения — 7,4%;
- г) несанкционированные отключения электропитания — 4,7%.

Эти отклонения в сети электропитания считаются НЧ-помехами. В соответствии с ГОСТ Р 51317.2.5-2000 установлены категории и виды ЭМП, по которому все перечисленные выше аномалии в сетях электроснабжения в общем виде классифицируются как низкочастотные электромагнитные помехи (см. ниже).

Реальное положение дел с энергоснабжением констатируют и нормативные документы. Например, ГОСТ Р 51317.2.4-2000, ГОСТ Р 51317.2.5-2000, ГОСТ 13109-97 и другие вынуждены нормировать неблагоприятные для потребителей параметры низкочастотных помех для коммерческих и производственных зон с малым энергопотреблением, а так-

Таблица 1. Уровни низкочастотных помех в виде установившихся отклонений и изменений напряжения, провалов напряжения и кратковременных перерывов питания

Зоны применения ТС	Вид низкочастотной электромагнитной помехи			
	Отклонения напряжения, % $U_{ном}$	Колебания напряжения, % $U_{ном}$	Провалы напряжения (от 10 до 99% $U_{ном}$) с длительностью, с	Кратковременные перерывы питания (>99% $U_{ном}$) с длительностью, с
Жилые, коммерческие и производственные зоны с малым энергопотреблением	10	3	< 0,8	< 0,6
Промышленные зоны	10	10	< 3	< 60

Таблица 2. Результаты измерений амплитуды, длительности и частоты возникновения провалов напряжения и кратковременных перерывов питания

Амплитуда провалов, % $U_{ном}$	Количество провалов напряжения, кратковременных перерывов питания в год при длительности			
	От 10 до 100 мс	От 100 до 500 мс	От 500 мс до менее 1 с	От 1 с до менее 3 с
От 19 до 30	61	66	12	6
От 30 до 60	8	36	4	1
От 60 до 100	2	17	3	2
100	0	12	24	5

Таблица 3. Уровни электромагнитных помех в виде аperiodических колебательных переходных процессов в сетях электроснабжения

Класс мест размещения ТС	Уровни высокочастотных кондуктивных аperiodических переходных помех		
	Наносекундной длительности	Микросекундной длительности	Миллисекундной длительности
Жилые помещения в сельской местности и в городе	2 кВ (●)	2 кВ (●); 0,5 кВ (●●)	Помехи отсутствуют
Помещения производственного назначения на промышленных объектах с малым энергопотреблением	2 кВ (●); 1 кВ (●●)	2 кВ (●); 1 кВ (●●)	Помехи отсутствуют
Помещения производственного назначения на предприятиях тяжелой промышленности и т. п.	2 кВ (●); 1 кВ (●●)	4 кВ (●); 2 кВ (●●)	0,5 $U_{макс}$ (порт электропитания переменного тока)

● – порт электропитания переменного тока, ●● – порт ввода-вывода сигналов.

Таблица 4. Уровни ЭМС для основных гармоник и коэффициента несинусоидальности $K_{нс}$ кривой сетевого напряжения в различных зонах

Зоны применения ТС	Уровни ЭМС в % к величине напряжения основной частоты для гармоник									
	$K_{нс}$, %	Порядок гармоники								
		Нечетные гармоники (не кратные 3)			Нечетные гармоники (кратные 3)			Четные гармоники		
		5	7	11	3	9	15	2	4	6–10
Жилые, коммерческие зоны и производственные зоны с малым энергопотреблением	8	6	5	3,5	5	1,5	0,3	2	1	0,5
Промышленные зоны	10	8	7	5	6	2,5	2	3	1,5	1

же для производственных зон. В таблице 1 представлены уровни низкочастотных помех в виде установившихся отклонений и изменений напряжения, а также провалов напряжения и кратковременных перерывов в питании [1].

В таблице 2 приведены результаты измерений амплитуды, длительности и частоты возникновения провалов напряжения и кратковременных перерывов питания, вызванных переключениями в сетях электроснабжения или отказами оборудования с учетом ГОСТ Р 51317.4.4-99 [1].

Рассмотрим установленные в ГОСТ Р 51317.2.5-2000 уровни электромагнитных помех, которые представляют собой аperiodические колебательные переходные процессы в сетях электроснабжения (табл. 3). Уровни напряжения (перенапряжения) приведены для холостого хода, что характерно для систем электроснабжения с малым энергопотреблением для различных классов размещения ТС (потребителей) [1].

Из таблицы 3 видно, что величины перенапряжений в сети электропитания переменного тока могут достигать больших значений — от 1 до 4 кВ (на холостом ходу источника перенапряжений). Это требует применения эффективных защитных устройств и элементов подавителей перенапряжений на входе импульсного ИВЭ. Строго говоря, нормативные документы трактуют эти перенапряжения как

высокочастотные кондуктивные аperiodические колебательные помехи. Однако помещая этот материал в данный раздел, авторы исходили из желания разделить (для удобства изложения) основные аномалии (или помехи) в электропитании и помехи, создаваемые самим импульсным источником питания.

Особый вид аномалии создают бытовые и промышленные силовые устройства, питающиеся выпрямленным током, а также ТС с фазовым управлением потребляемой мощностью. Речь идет об искажении формы кривой потребляемого тока, а следовательно, и формы сетевого напряжения. В настоящее время существенный «вклад» в эту аномалию вносят AC/DC-преобразователи (из-за наличия в них фильтрующих конденсаторов с большой емкостью на выходе сетевого выпрямителя). Образующиеся при этом гармоники также попадают в категорию низкочастотных электромагнитных помех. В нормативных документах, в частности в отечественных ГОСТ Р 51417.2.5-2000 и ГОСТ 13109-97, даны допустимые уровни ЭМС по содержанию разных гармоник в различных зонах потребителей. В таблице 4 приведены уровни ЭМС для основных гармоник напряжения в системах электроснабжения (по отношению к величине напряжения основной частоты), а также значения коэффициента искажений синусоидальности кривой сетевого напряжения $K_{нс}$ в различных зонах [1].

Виды и допустимые нормы электромагнитных помех

Рассмотрим виды электромагнитных помех [1, 2]. Сразу отметим, что излучаемая ЭМП — это помеха, распространяющаяся в окружающем пространстве. Ее описанию и мерам подавления будет уделено меньше внимания, поскольку, как будет показано далее, сравнительно несложные меры конструктивного характера позволяют уменьшить ее уровень до допустимых норм.

Кондуктивная ЭМП — помеха, распространяющаяся в проводящей среде (по проводам, проводящим поверхностям, то есть помеха, передаваемая контактным способом). Высокочастотные кондуктивные помехи могут быть по характеру процессов отнесены либо к непрерывным колебаниям, либо к аperiodическим и колебательным переходным процессам.

В зависимости от происхождения и характера распространения кондуктивные помехи принято разделять на следующие виды:

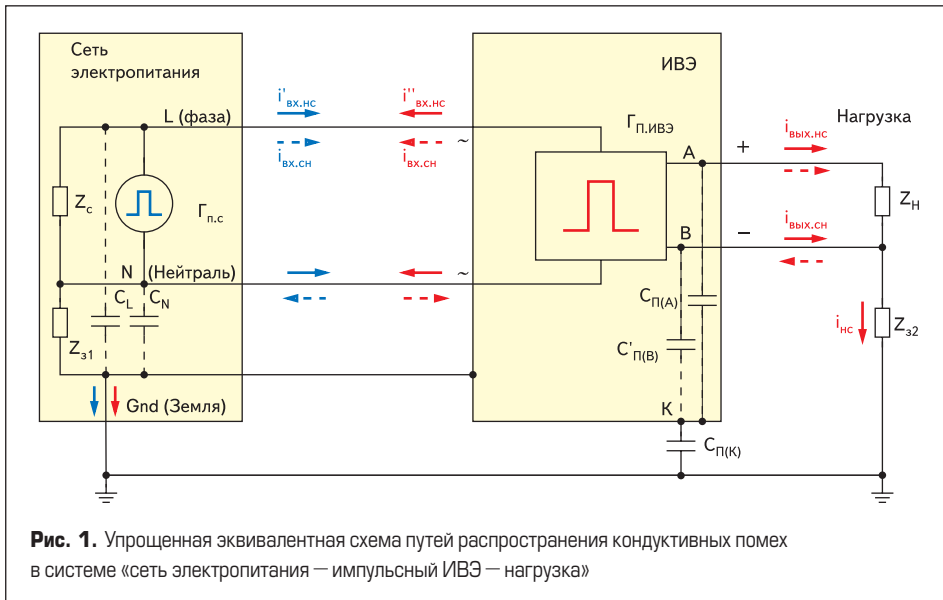
- **симметричные** (дифференциальные — differential mode);
- **несимметричные** (синфазные или общего вида — common mode).

Симметричная помеха возникает, когда напряжение помехи приложено между фазным (линейным) и нейтральным проводами, то есть это помеха, распространяющаяся аналогично протеканию переменного тока в сети. В цепях постоянного тока напряжение симметричной помехи приложено между положительным и отрицательным проводниками.

Несимметричная помеха — это помеха, действующая между проводниками и корпусом или шиной заземления через паразитный импеданс (паразитные емкости) между этими объектами. В цепях постоянного тока напряжение несимметричной помехи приложено между проводниками (положительным, отрицательным) и корпусом. В МЭК 50-161-90 даются более строгие определения видов помех. В частности, симметричное напряжение — напряжение между двумя любыми проводниками из заданной группы активных проводников. Несимметричное напряжение — напряжение между проводником и регламентированным эталоном, обычно «землей» или пластиной заземления.

На рис. 1 представлена упрощенная эквивалентная схема путей распространения кондуктивных помех в системе «сеть электропитания — импульсный ИВЭ — нагрузка» [6, 11]. На схеме сплошными линиями показаны пути распространения несимметричных помех, а пунктирными — симметричных помех. Синим цветом условно изображены направления распространения помех со стороны сети электропитания, а красным — направления распространения помех, создаваемые самим источником питания. Источники помех обозначены следующим образом: $\Gamma_{п.с}$ — источник помех со стороны сети электропитания, $\Gamma_{п.ИВЭ}$ — импульсный ИВЭ как источник (генератор) помех.

Другие обозначения: Z_c, Z_n — импеданс сети и нагрузки соответственно; Z_{31}, Z_{32} — им-



педанс проводников заземления нейтрали и одного (например, отрицательного) полюса нагрузки; $C_{п(А)}$, $C_{п(В)}$, $C_{п(К)}$ — паразитные емкости выходных полюсов (зажимов) источника относительно корпуса и корпуса относительно «земли». Несимметричные помехи замыкаются на «землю» через токонесящие цепи и соответствующие паразитные емкости (импеданс). Нетрудно заметить, что величина (амплитуда) токов несимметричных помех зависит как от амплитуды сигналов помех, так и от импеданса паразитных связей с шиной заземления.

Более детально эти вопросы будут рассмотрены при анализе эквивалентной схемы импульсного ИВЭ с точки зрения образования в нем помех.

По частотному диапазону и энергетическому спектру помехи разделяются:

- **низкочастотная ЭМП** — помеха, подавляющая часть спектра которой лежит ниже определенной частоты (в международных нормативных документах за указанную частоту принимают 9 кГц);
- **высокочастотная ЭМП** — помеха, подавляющая часть спектра которой лежит выше определенной частоты (по ГОСТ Р 51317.2.5-2000 это 9–150 кГц);
- **радиопомеха** — помеха, спектральная составляющая которой находится в полосе радиочастот (по МЭК 50-160-90 — свыше 150 кГц). Обычно в технической литературе для удобства объединяют последние два вида помех в один, называемый **ВЧ-помехами**. Для источников питания, как правило, ВЧ-помехи рассматриваются в диапазоне до 30 МГц;
- **узкополосная ЭМП** — помеха, воздействующая на источник питания (ТС), у которой ширина спектра меньше или равна ширине полосы пропускания ТС; для импульсного источника питания за нее можно принять линейчатый спектр частоты (частот) преобразования;
- **широкополосная ЭМП** — помеха, воздействующая на источник питания, у которой ширина спектра шире полосы пропускания источника.

По длительности и регулярности помехи разделяются:

- **непрерывная (длительная) ЭМП** — помеха, уровень которой не опускается ниже определенного значения в регламентированном интервале времени (например, гармоника потребляемого сетевого тока источника питания);
- **прерывистая ЭМП** — помеха, длящаяся в течение определенных интервалов времени, разделенных интервалами, свободными от помех (например, при работе силовых устройств с индуктивной нагрузкой в повторно-кратковременном режиме);
- **кратковременная ЭМП** — помеха, продолжительность которой, измеренная в регламентированных условиях, не превышает определенных значений (имеет много общего с прерывистой помехой; иногда проявляется как импульсная помеха);

• **импульсная ЭМП** — помеха, которая проявляется, например, в такте рабочей частоты источника питания, как последовательность отдельных импульсов или переходных процессов.

Электростатический разряд — импульсный перенос электростатического заряда между телами с разными электростатическими потенциалами, например, между корпусом (кожухом) источника питания и близко расположенными к нему высокопотенциальными поверхностями (выводами компонентов) внутри источника.

Стандарты на излучение электромагнитных помех учитывают два вида излучений [7]:

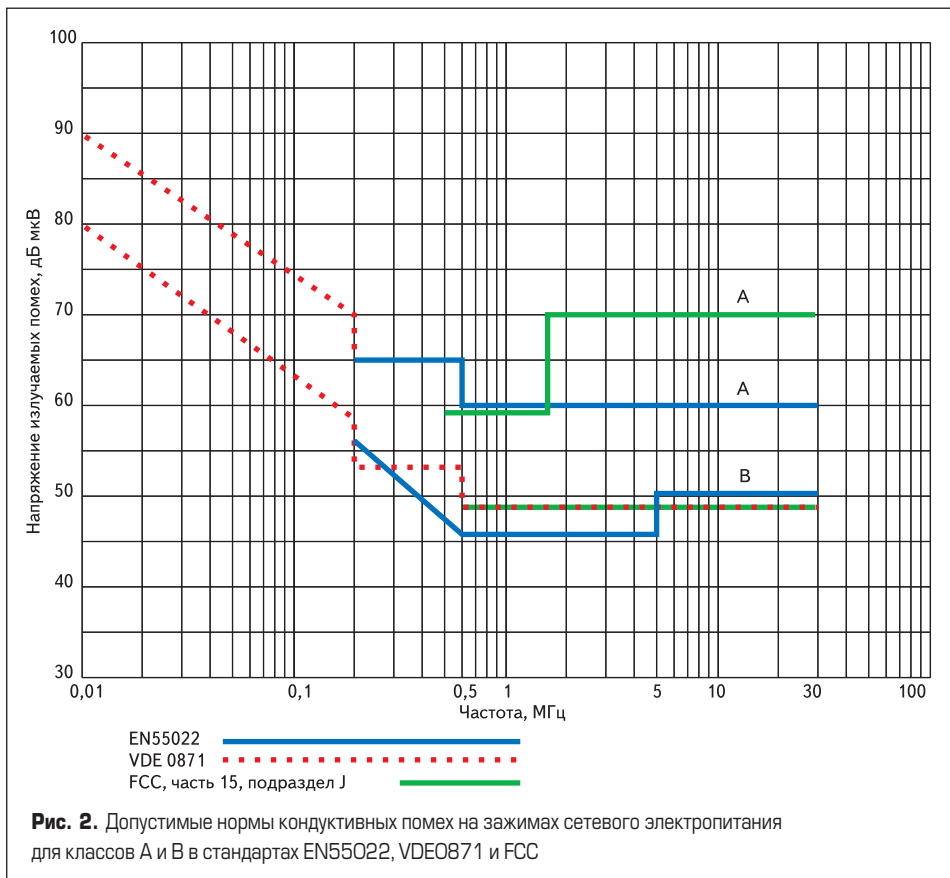
- кондуктивные помехи на вводах электропитания;
- напряженность электрического поля помех при их излучении в эфир.

Существует два набора ограничений на уровни помех для определенного вида оборудования: оборудование класса А (Class A), которое может использоваться только в промышленных или в других специально подготовленных зонах; оборудование класса В (Class B), которое может использоваться только в жилых помещениях, офисах, телекоммуникационном оборудовании.

Наиболее важные международные стандарты в этой области:

- **EN55022 (CISPR22)** — европейский стандарт для оборудования информационных технологий (ИТ);
- **FCC (раздел 15, подраздел J)** — американский стандарт для оборудования ИТ;
- **VDE0871** — немецкий стандарт для оборудования ИТ.

Уровни А и В немецкого стандарта VDE0871 долгое время оставались самыми жесткими для контроля уровня кондуктивных помех



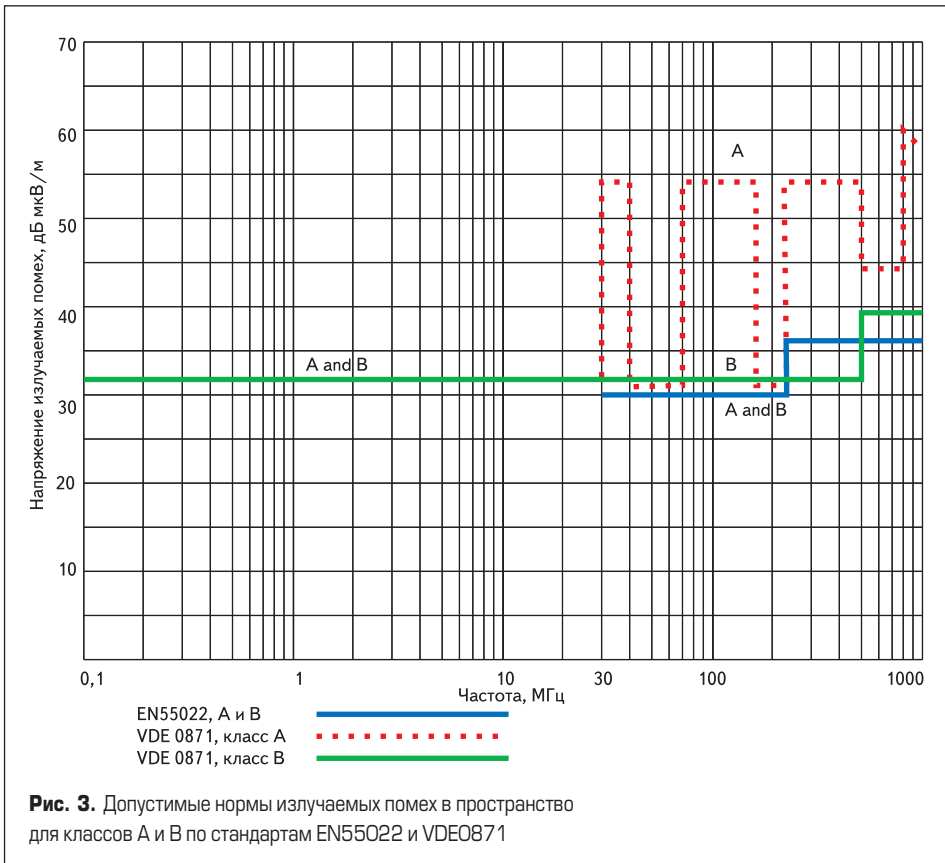


Таблица 5. Основные стандарты по устойчивости к электромагнитным помехам

Виды воздействий	Обозначения стандартов		
	Стандарты МЭК (IEC)	Европейские стандарты (CENELEC)	Отечественные стандарты
Электростатический разряд	IEC61000-4-2-95	EN61000-4-2	ГОСТ Р 51317.4.2-99
Излучение радиочастот	IEC61000-4-3-95	EN61000-4-3	ГОСТ Р 51317.4.3-99
Быстрые переходы/пачки импульсов в питающей сети	IEC61000-4-4-95	EN61000-4-4	ГОСТ Р 51317.4.4-99
Броски напряжения в питающей сети	IEC61000-4-5-95	EN61000-4-5	ГОСТ Р 51317.4.5-99
Контактные радиопомехи, индуцированные полями радиочастот	IEC61000-4-6-96	EN61000-4-6	ГОСТ Р 51317.4.6-99
Магнитное поле питающей сети переменного тока	IEC61000-4-8-93	EN61000-4-8	ГОСТ Р 50648-94
Затухающее колебательное магнитное поле	IEC61000-4-10-93	EN61000-4-10	ГОСТ Р 50652-94
Скачки, пропадания и изменения напряжения питания	IEC61000-4-11-94	EN61000-4-11	ГОСТ Р 51317.4.11-99
Синусоидальные сигналы (пачки и затухающие колебания)	IEC61000-4-12-97	EN61000-4-12	ГОСТ Р 51317.4.12-99

в сети электропитания — в частности, более жесткими, чем у стандарта CISPR22 на более низких частотах. Для выполнения директивы ЕС в Германии был принят национальный стандарт VDE0878 (часть 30), являющийся, по сути, эквивалентом стандарта EN55022.

На рис. 2 изображены допустимые нормы кондуктивных помех на зажимах сетевого электропитания для классов А и В в частотном диапазоне от 10 кГц до 30 МГц, принятые стандартами EN55022, VDE0871 и FCC.

Из рис. 2 видно, что VDE0871 ограничивает уровни кондуктивных помех в сеть электропитания в диапазоне частот от 10 до 150 кГц. Этот диапазон частот важен даже для современных импульсных ИВЭ, работающих на частотах преобразования ≥ 100 кГц. Стандарт EN55022 не предъявляет требований к области частот ниже 150 кГц. Вместе с тем, ограничение в классе В у EN55022 выше (уровень помех ограничен на более низком уровне). В диапазоне частот от 150 кГц до 30 МГц для оборудования класса А нормы помех в стандартах EN55022 и VDE0871 совпадают. Стандарт FCC позиционируется в частотном диапазоне от 450 кГц до 30 МГц и для классов А и В его нормы ниже, чем у EN55022.

Рассмотрим нормы на излучение ЭМП в пространство. Сравнение норм по стандартам EN55022, VDE0871, FCC сделать труднее, поскольку эти нормы приводятся для различных расстояний точки измерения от объекта. На рис. 3 даны допустимые нормы излучаемых помех в пространство для классов А и В по стандартам EN55022 и VDE0871. По стандартам EN55022 и VDE0871 различие в нормах между классами А и В в диапазоне частот ниже 30 МГц отсутствуют вообще. Разница лишь в расстояниях измерения — 30 и 10 м соответственно; в VDE0871 — 100 и 30 м соответственно.

Основным отечественным стандартом, в котором нормирован уровень помех для ИВЭ, является ГОСТ Р 51527-99 (МЭК 60478-3-89) «Совместимость технических средств электромагнитная. Стабилизированные источники постоянного тока. Кондуктивные электромагнитные помехи. Нормы и методы испытаний».

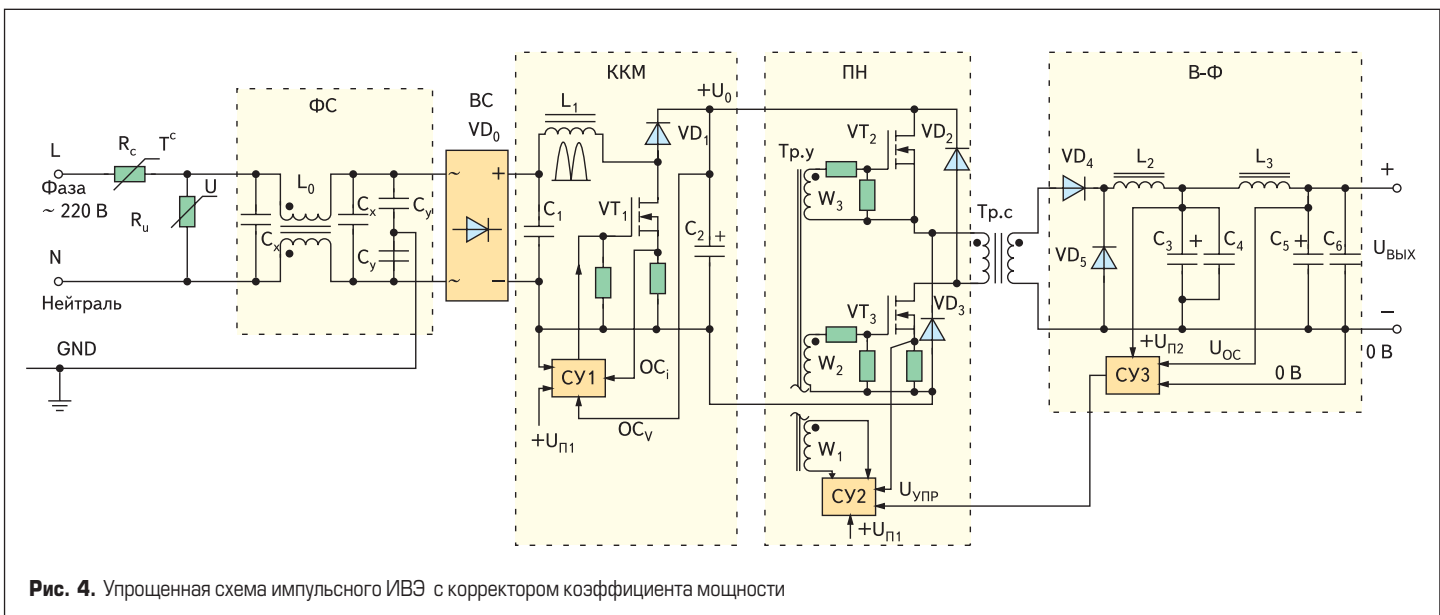


Таблица 6. Допустимые уровни радиопомех

Частота, МГц	Напряжение радиопомех, дБ (мкВ)	
	Уровень D (Class A)	Уровень B (Class B)
0,15	79	66
0,15–0,5	79	56–66
0,5–5	73	56
5–30	73	60

По стандарту VDE0871 для частот выше 30 МГц допустимые нормы помех для класса В в среднем выше, но в классе А есть другие границы в некоторых частотных поддиапазонах (рис. 3).

Отметим, что для импульсных ИВЭ небольшой и средней мощности (до 300 Вт, токи — не более 10 А) в составе аппаратуры, как правило, проблема соблюдения допустимых норм по излучаемым помехам решается. При этом только необходимо, чтобы источник был заключен в металлический корпус (кожух), а аппаратура имела свой металлический (металлизированный) корпус.

Рассмотрим более детально характеристики воздействий, оказываемых при испытаниях на большинство ТС. Источники питания также подвергаются таким воздействиям в полном объеме или частично в зависимости от того, являются ли они эксплуатационно самостоятельными изделиями (например, лабораторные источники) или встраиваемыми блоками и модулями. В последнем случае источники проходят соответствующие испытания в составе аппаратуры.

В таблице 5 приведен перечень основных стандартов по устойчивости ТС к электромагнитным помехам. В соответствующих стандартах содержатся общие требования помехоустойчивости и методы испытаний.

Появившиеся в 1990-е годы отечественные стандарты ГОСТ Р 51517-99 и ГОСТ Р 51518-99 содержат аутентичный тест международных стандартов МЭК серии 61000 в соответствии с некоторыми особенностями нашей страны. В обозначениях указанных ГОСТов после цифр 51317 и 51318 приведены дополнительные цифры, указывающие части и разделы стандартов МЭК серии 61000 [1].

Классу В соответствуют уровень D и уровень В упомянутого ГОСТ Р (табл. 6).

Основные проблемы обеспечения электромагнитной совместимости в импульсных ИВЭ и общие методы их решения

Как уже отмечалось ранее, импульсные ИВЭ подвержены воздействию электромагнитных помех различного вида. Помехи могут поступать из сети электропитания, наводиться внешними высокочастотными магнитными полями. Поэтому, с одной стороны, импульсный источник питания, как и любое ТС, должен обладать необходимым уровнем помехоустойчивости. С другой стороны, импульсный ИВЭ является источником (генератором) электромагнитных помех (рис. 1) в широком диапазоне частот и поэтому должен иметь уровень помехоэмиссии, соответствующий принятым нормам. При этом следует учиты-

Таблица 7. Общие методы обеспечения ЭМС импульсных источников питания

Виды электромагнитных воздействий и проявлений	Меры по ослаблению и подавлению электромагнитных аномалий и помех
1. Электромагнитные воздействия со стороны сети электропитания (входа)	
1.1. Провалы напряжения	
а) Медленные снижения напряжения	<ul style="list-style-type: none"> • Применение схемы ИВЭ с универсальным входом. Примечание. Типовой диапазон сетевого напряжения для AC/DC-преобразователя с универсальным входом: ~ 85(90)... ~ 265 В 47–63 Гц; • Применение схемы ИВЭ с корректором коэффициента мощности (ККМ/ПФС)
б) Быстрые снижения напряжения	<p>Оптимальное значение величины емкости конденсатора сетевого выпрямителя или выходного конденсатора в ККМ.</p> <p>Примечание. Стандартное время удержания выходного напряжения при пропадании сетевого напряжения – 20 мс (1 период сетевого напряжения)</p>
1.2. Броски напряжения (перенапряжения)	<p>То же</p> <p>Рациональный выбор параметров импульсного управления (ШИМ, ЧИМ), включая введение управляющего сигнала по изменению входного напряжения</p>
1.3. Высшие гармонические составляющие входного тока	<p>Применение схем ИВЭ с ККМ/ПФС:</p> <p>а) пассивный ККМ (НЧ-дрессель) – для маломощных AC/DC-преобразователей;</p> <p>б) активный ККМ – для AC/DC-преобразователей повышенной и большой мощности</p>
1.4. Кондуктивные помехи	
а) Импульсные помехи	Применение варисторов на входе сетевого помехоподавляющего фильтра (ППФ)
б) Низкочастотные помехи	Применение корректора мощности ККМ
в) Высокочастотные помехи и радиопомехи	Применение высокоэффективного сетевого ППФ и рациональный выбор его компонентов (особое внимание подавлению несимметричных помех)
1.5. Помехи излучения	<ul style="list-style-type: none"> • Экранированный корпус (кожух); • Правильное заземление; • Минимизация площади контуров с повышенным индуктивным сопротивлением
2. Собственные помехи ИВЭ (внутриблоковые помехи)	
2.1. Кондуктивные помехи	<ul style="list-style-type: none"> • Применение в ККМ и преобразователе напряжения (инверторе) высококачественных компонентов: <ul style="list-style-type: none"> – быстродействующих транзисторов (MOSFET и IGBT); – быстродействующих рекуперативных диодов: fast (ultrafast) FRED и диодов Шоттки из карбида кремния; – ограничителей скорости нарастания напряжения – RC- и RCVD-цепей (демпферов, снабберов – snabbers); – VDRC-фиксаторов уровня напряжения (claspers), – униполярных TVS-диодов и мощных стабилитронов. • Оптимальная компоновка узлов и компонентов (минимизация взаимного влияния)
2.2. Помехи излучения	<ul style="list-style-type: none"> • Оптимизация площади и поперечного сечения силовых контуров с большими токами; • Оптимизация конструкции и топологии намотки высокочастотных силовых трансформаторов преобразователей ИВЭ: <ul style="list-style-type: none"> – уменьшение индуктивности рассеяния трансформатора; – минимизация паразитной емкости между первичной и вторичной силовой обмоткой трансформатора (применение специальных экранных обмоток). Экранирование силовых индуктивных компонентов (трансформаторов, дросселей), особенно с зазором
3. Кондуктивные помехи на выходе	
3.1. Импульсные помехи	<ul style="list-style-type: none"> • Использование квазирезонансного метода преобразования; • Использование в выходном ВЧ-выпрямителе: <ul style="list-style-type: none"> – диодов Шоттки или сверхбыстродействующих диодов (ultrafast FRED); – ограничителей скорости нарастания напряжения – RC-цепей; – (демпферов) для шунтирования силовых диодов. Использование ВЧ-дросселей с малой паразитной емкостью; • Шунтирование электролитических конденсаторов – керамическими конденсаторами; • Использование на выходе проходных конденсаторов; • Оптимальная компоновка узлов и компонентов ИВЭ (минимизация взаимного влияния); • Рациональный электромотаж (разводка печатной платы): <ul style="list-style-type: none"> – оптимизация и разнесение контуров (силовых и управления); – оптимальная разводка «земель».
3.2. Низкочастотные помехи	Выбор повышенной частоты преобразования и оптимального закона и регулирования (ШИМ или ЧИМ)
3.3. Высокочастотные помехи и радиопомехи	
а) Помехи на частоте преобразования	<ul style="list-style-type: none"> • Применение высокоэффективного ППФ (двухзвенного); • Рациональный выбор компонентов ППФ: <ul style="list-style-type: none"> – ВЧ-дросселей с величиной индуктивности, обеспечивающей его неразрывный ток; – специальных конденсаторов с низким импедансом на высоких частотах (с малым ECR), в том числе трех- и четырехвыводных.
б) Помехи на сопредельных частотах	<p>То же</p> <p>Примечание. При разных частотах преобразования активного ККМ и преобразователя</p>

Примечание:

¹ Приводит к значительному увеличению стоимости ИВЭ

вать, что сам импульсный источник питания состоит из функциональных узлов и модулей различного назначения, работающих в различных частотных диапазонах, с разными энергетическими уровнями, требованиями к чувствительности, точности, зачастую с внешним интерфейсом и т. д. Таким образом, проблемы обеспечения ЭМС импульсных ИВЭ необходимо решать конкретно в трех основных направлениях:

- 1) Мероприятия по подавлению (ослаблению) электромагнитных аномалий и помех со стороны сети электропитания (входа).
- 2) Мероприятия по ослаблению собственных (внутриобъектовых) помех.
- 3) Мероприятия по подавлению (ослаблению) кондуктивных помех на выходе ИВЭ.

Прежде чем перейти к системному изложению путей решения поставленных выше задач, кратко рассмотрим упрощенную схему импульсного ИВЭ с корректором коэффициента мощности (рис. 4).

Во входной цепи однофазного переменного тока (220 В, 50 Гц) включены: ограничитель пусковых токов — терморезистор R_t (НТС), ограничитель импульсных перенапряжений помех — варистор R_U ($\sim 275 V_{эф. max}$). Сетевой помехоподавляющий фильтр (ФС), например, типа $C_x - L_0 - (C_x + 2C_y)$, осуществляет как подавление электромагнитных помех со стороны сети (помехоустойчивость), так и подавление помех со стороны самого импульсного ИВЭ (уменьшение помехоэмиссии). С выхода выпрямительного моста (VD_0 или BC), выбранного с обратным напряжением не менее 600 В, выпрямленное пульсирующее напряжение частоты 100 Гц поступает на вход активного корректора коэффициента мощности (ККМ). Керамический конденсатор $C1$ (емкость 0,47–1 мкФ, напряжение не менее 630 В) облегчает начальный пуск ККМ и осуществляет частичную фильтрацию ВЧ-помех ККМ.

Корректор КМ является повышающим (до напряжения $U_0 = +350 \dots 400$ В) импульсным стабилизатором выпрямленного сетевого напряжения. Основные элементы ККМ: силовой ключ $VT1$, бустерный диод $VD1$, накопительный дроссель $L1$, выходной буферный электролитический конденсатор $C2$, схема управления ($СУ1$) на основе контроллера ККМ. Силовой ключ — мощный высоковольтный (600 В, 800 В) MOSFET (МОП-транзистор), имеющий низкое сопротивление открытого канала «сток–исток» и высокое быстродействие. В настоящее время частота работы ККМ (частота переключения MOSFET) составляет порядка 100–150 кГц [9].

Диод $VD1$ должен иметь обратное напряжение U_{RRM} не ниже 600 В и малое время восстановления обратного сопротивления (десятки наносекунд). Обычные требования к накопительному дросселю $L1$: индуктивность 200–1000 мкГн, минимальные паразитные параметры (емкость C_s) или высокая добротность. Дроссель $L1$ чаще всего выполняется на кольцевых сердечниках из магнитодиэлектриков, например МП140, МП250 или их зарубежных аналогов. Выходной (буферный) конден-

сатор ($C2$) — электролитический с напряжением 450 В и низким выходным импедансом на частоте пульсаций преобразования (не менее 100 кГц).

Преобразователь напряжения (ПН) — это однотактный прямоходовый преобразователь, выполненный по схеме так называемого «косого» моста на транзисторах MOSFET ($VT2, VT3$), работающих синхронно. Диоды $VD2$ и $VD3$ рекуперировать избыточную энергию намагничивания силового трансформатора Тр.с обратнo в ККМ (конденсатор $C2$). Эти диоды должны иметь обратное напряжение U_{RRM} не ниже 600 В (лучше 800–1000 В) и малое значение времени восстановления ($trr = 35 \dots 100$ нс). Управление силовыми ключами производится от схемы управления ($СУ2$) на основе ШИМ-контроллера с развязкой на основе управляющего трансформатора Тр.у.

Выходной ВЧ-выпрямитель (диоды $VD4, VD5$) должен выполняться на низковольтных диодах Шоттки, имеющих соответствующее значение обратного напряжения (45–200 В), наименьшее падение напряжения ($U_F = 0,35 \dots 0,6$ В) и традиционно малое время восстановления ($trr = 35 \dots 75$ нс). Сглаживающий фильтр ВЧ-пульсаций и кондуктивных помех выполнен двухзвенным. При этом первое звено ($L2-C3C4$) обеспечивает «главное» подавление пульсаций на частоте переключения. Второе звено ($L3-C5C6$) в большей степени осуществляет подавление гармоник основной частоты пульсаций и помех. По подобной схеме выполнен импульсный ИВЭ с выходной мощностью до 1500 Вт [9].

В таблице 7 рассмотрены основные проблемы в области ЭМС импульсных ИВЭ и приведены в обобщенном виде мероприятия по обеспечению ЭМС. Предлагаемые мероприятия и рекомендации даны на основе работ [2, 6, 10–12] и многолетнего опыта авторов статьи в сфере разработки и испытаний импульсных источников различного назначения и мощности.

Отметим важное обстоятельство при реализации рекомендаций, приведенных в таблице 7 или описанных в других работах: для уверенного решения задачи практического обеспечения ЭМС импульсных источников питания по всем требуемым нормам необходимо выполнять **весь комплекс мероприятий**. Накопленный опыт разных разработчиков и исследователей показывает, что при пренебрежении какими-то отдельными рекомендациями (второстепенными по мнению новичка), недопустимый уровень помех может проявиться в непредвиденных аспектах: некоторые режимы функционирования, диапазон частот, «другая» сеть электропитания и т. д. В то же время разумный подход к проблеме обеспечения ЭМС импульсных ИВЭ, использование «чужого» положительного опыта и, конечно, инженерная интуиция позволяют достигнуть существенных результатов даже при решении сложных задач по подавлению помех.

Так, в конце 1980-х — начале 1990-х годов одному из авторов довелось принимать участие в измерениях уровня высокочастотных кондуктивных помех мощных импульсных блоков питания. Блоки были разработаны под

руководством известного отечественного специалиста в области средств электропитания, доктора технических наук Ж. А. Мкртчяна [10]. Эти блоки питания были предназначены для специальных суперЭВМ, работали на частотах 80–100 кГц и имели следующие выходные параметры: +2 В/100–400 А, +5 В/50–400 А. Уровень высокочастотных пульсаций и помех на выходе этих источников, измеренный осциллографом с полосой 50 МГц, составлял 20–30 мВ (пик-пик)!

Другой пример относится к маломощным DC/DC-преобразователям. В 1980–1985 годах в НПО «Дальняя связь» (Санкт-Петербург) у преобразователей с выходной мощностью 30 Вт (при напряжении 5–12–27 В) удалось достичь уровня высокочастотных пульсаций и помех порядка 5–10 мВ (пик-пик). В числе прочих мероприятий по подавлению помех в упомянутых преобразователях были применены закрытый вариант модуля с использованием специального многослойного экранирования, внутренних отсеков и проходных помехоподавляющих фильтров.

Продолжение следует

Литература

1. Электромагнитная совместимость технических средств. Справочник / Под ред. Кармашева В. С. М.: 2001.
2. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции. М.: Технологии. 2003.
3. ГОСТ Р 50397-92. Совместимость технических средств электромагнитная. Термины и определения.
4. ГОСТ 23875-88. Качество электрической энергии. Термины и определения.
5. ГОСТ 13109-97. Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения.
6. Гурвич И. Защита ЭВМ от внешних помех. Энергоатомиздат. 1984.
7. Дмитриев С. Международные стандарты электромагнитной совместимости электронной аппаратуры // Электронные компоненты. 2000. № 1.
8. ГОСТ Р 51527 — 99 (МЭК 60478-3-89). Совместимость технических средств электромагнитная. Стабилизированные источники постоянного тока. Кондуктивные электромагнитные помехи. Нормы и методы испытаний.
9. Эраносян С., Ланцов В. Электронные компоненты для мощных импульсных источников питания // Силовая электроника. 2006. № 2.
10. Мкртчян Ж. Основы построения устройств электропитания ЭВМ. М.: Радио и связь. 1990.
11. Векслер Г., Недочетов В., Пилинский В. и др. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания. Киев: Техника. 1990.
12. Барнс Дж. Электронное конструирование: методы борьбы с помехами. М: Мир. 1990.