

Оценка подавления синфазных и дифференциальных помех в сетевых фильтрах с применением осциллографов Rigol серии DS70000

Николай Лемешко (АО «Корпорация «Комета»)
Михаил Горелкин (ООО «РШ Тех»)

В статье рассматривается вопрос о проведении экспериментальной оценки эффективности подавления сетевыми фильтрами помех некоторых видов с использованием типовых средств измерений современных радиолaborаторий. Дается характеристика составляющих электромагнитной обстановки в электросетях общего назначения. Рассматриваются некоторые теоретические аспекты борьбы с кондуктивными помехами в сетях электропитания. Обоснованы типы имитационных воздействий, подходящих для оценки эффективности подавления помех, рассмотрены схемы и особенности проведения таких измерений. Приведен пример измерений для оценки эффективности подавления импульсных синфазных помех, выполненных с использованием осциллографа серии DS70000 компании Rigol.

Введение

Обеспечение требований по электромагнитной совместимости (ЭМС) уже давно стало неотъемлемым спутником проектирования электронных устройств (ЭУ). В этом направлении радиоэлектроники важнейшими являются понятия помехоэмиссии и помехоустойчивости [1]. При этом нежелательные воздействия – радиопомехи – подразделяются на кондуктивные, распространяющиеся в проводящих средах, и излучаемые, передаваемые через свободное пространство. Мероприятия, направленные на обеспечение ЭМС некоторого ЭУ на стадии его проектирования и эксплуатации, всегда должны учитывать принципиальные различия в механизмах распространения этих типов радиопомех.

Основным способом снижения эмиссии кондуктивных помех и повышения стойкости к ним является ограничение по спектру, или фильтрация [2], которая может быть реализована как для питающих напряжений, так и для информационных сигналов. Для обеспечения ЭМС почти всегда применяются фильтры низких частот, по возможности имеющие наиболее простую структуру и минимальное количество элементов. Вместе с тем фильтрацию питающих напряжений можно

отнести к сфере особой ответственности, поскольку помеховая обстановка в электросетях общего назначения характеризуется наличием как сравнительно безобидного широкополосного радишума, так и эпизодическим появлением помех весьма большой энергии, способных вывести ЭУ из строя в отсутствие дополнительных мер защиты. Таким образом, роль сетевых фильтров (СФ) в ЭУ фактически состоит в том, что они принимают на себя первый удар кондуктивных помех из питающей сети, включая возможные перенапряжения разной природы. Для борьбы с последними в структуру СФ вводят специальные нелинейные элементы – разрядники, варисторы, диоды Зенера.

Выдвигая те или иные требования к СФ в части ослабления помех, всегда следует ориентироваться на конкретную электромагнитную обстановку, характерную для типового применения ЭУ [3]. Ясно, что в электросетях промышленных предприятий и жилых домов абсолютный уровень помех будет различным, однако на основе элементарного анализа можно выделить некоторые типовые источники кондуктивных помех. Например, к ним относятся импульсные источники вторичного электропитания, отличающи-

еся много большей частотой рабочего цикла по отношению к номинальной частоте электросети. Массовое применение импульсных источников приводит к формированию широкополосного радишума на частотах до 5...10 МГц. Ещё одним примером являются электродвигатели, способные формировать помехи на частотах до 300 МГц из-за наличия скользящих контактов [1]. При оценке электромагнитной обстановки для обоснования требований к фильтрам необходимо оценивать вклад каждого источника помех, а также не забывать давать прогнозную оценку помехоэмиссии со стороны ЭУ, которая также должна в требуемой степени ослабляться СФ.

Схемотехнические и конструкторские решения, закладываемые в СФ, должны быть проверены экспериментально на опытных либо серийных образцах. Несмотря на то что СФ могут быть весьма точно промоделированы, уже на частотах порядка нескольких мегагерц в их конструкции возможно проявление паразитных индукционно-ёмкостных связей, а также резонансных явлений, в том числе на отдельных компонентах, что существенно снижает эффективность фильтрации. Для проведения измерений для оценки эффективности работы СФ целесообразно использовать стандартные средства измерений и ориентироваться на виды помех, являющиеся характерными для электросетей.

Помеховая обстановка в электросетях, её основные составляющие и некоторые характеристики

Номенклатура показателей качества электрической энергии устанавливается стандартом [4] и включает характеристики, относящиеся к частоте переменного напряжения, его отклонению от номинального значения, к уровню гармоник, к степени симме-

три линейных напряжений в трёхфазных сетях. Это те показатели, которые определяются состоянием первичного источника электрической энергии и средств её доставки потребителям. При этом указанный стандарт не охватывает характеристики скоротечных случайных процессов, таких как провалы, прерывания напряжения и импульсные перенапряжения.

На рис. 1 представлена общая схема, показывающая составляющие электромагнитной обстановки в электросетях (ЭС). В ней процессы, охватываемые стандартом [4], объединены в группу продолжительных изменений характеристик питающих напряжений. К группе случайных процессов, которые требуют статистического описания, относятся:

- прерывания напряжения, при которых остаточное напряжение в точке подключения составляет менее 5% от его номинального значения. Прерывания характеризуются длительностью, а для трёхфазных сетей соответствуют случаю, когда напряжение снижается во всех трёх фазах. Типичной причиной появления прерываний является проведение регламентных работ на электросетях;
- провалы напряжения, под которыми понимается внезапное понижение напряжения в точке электрической сети ниже 90% номинального значения, за которым следует восстановление напряжения до первоначального или близкого к нему уровня через промежуток времени от 10 мс до нескольких десятков секунд. Они характеризуются длительностью, а также абсолютной и относительной глубиной. Провалы напряжения обычно происходят из-за неисправностей в электрических сетях (короткие замыкания) или в электроустановках потребителей, а также при подключении мощной нагрузки;
- перенапряжения, представляющие собой временное возрастание напряжения в конкретной точке электрической системы выше установленного порогового значения. Они также характеризуются длительностью, которая для этого класса явлений всегда превышает половину периода питающего напряжения, а также коэффициентом перенапряжения, который показывает кратность превышения номинального амплитудного значения в ЭС. Пе-



Рис. 1. Составляющие электромагнитной обстановки в сетях электропитания

ренапряжения, как правило, вызываются коммутационными явлениями, ошибками и инерционностью регулирования состояния электрической сети;

- импульсные перенапряжения в виде одиночного импульса или затухающего колебательного процесса длительностью до 5...10 мс. Импульсные напряжения в некоторой точке ЭС вызываются, в основном, молниевыми разрядами или процессами коммутации в электрической сети или включением/отключением нагрузок индукционного характера. Импульсные перенапряжения отличаются весьма широкой полосой частот, время нарастания напряжения до максимального значения может составлять менее 1 мкс. К характеристикам такого процесса относятся длительность импульса по половинному уровню, его максимальная амплитуда, а также кратность превышения номинального амплитудного значения питающего напряжения.

Следующая группа явлений включает помехоэмиссию со стороны технических средств (ТС). Несмотря на то что сама электросеть имеет свойства фильтров низких частот, при неблагоприятном стечении обстоятельств кондуктивные помехи способны распространяться на многие километры от точки инъекции, особенно если речь идёт о неразветвленных сетях. В спектральном составе совокупной помехоэмиссии ряда потребителей можно выделить широкополосный шум, в основном присутствующий на частотах до 30 МГц, а также узкополосные спектральные составляющие, формируемые некоторыми классами ТС.

Фильтры, имеющиеся в составе ТС, обычно ослабляют составляющие с частотами выше 10 кГц. Их применение особенно важно для вторичных источников электропитания импульсного типа, а также ЭУ, характеризующихся инъекцией импульсных помех.

Наконец, четвёртый класс явлений, определяющих ЭМО в ЭС, включает узкополосные сигналы в интервале частот от 3 до 525 кГц [5, 6], специально передаваемые вместе с питающими напряжениями для обеспечения управления автоматикой и для низкоскоростной передачи данных без использования дополнительных проводников.

Таким образом, оказывается, что формирующие ЭМО в ЭС процессы являются весьма разнородными как по длительности, так и по спектру частот. Ясно, что СФ не должны вносить значительные потери в полосе частот гармоник питающего напряжения, иначе их использование будет неэффективно с энергетической точки зрения. Также очевидно, что СФ неспособны корректировать частоту и симметрию в трёхфазных сетях электропитания. В частном случае применения режекторных фильтров они могут снизить влияние гармоник напряжения электропитания, однако такие технические решения обычно применяются в точках подключения промышленных предприятий, на которых используются мощные нелинейные потребители электрической энергии, например, дуговые печи высокого напряжения [4].

Что касается случайных процессов в ЭС, то с точки зрения спектрального распределения перенапряжения длительностью свыше 10 мс занимают частоты менее 1 кГц, т.е. охватывают частоты гармоник, однако применение

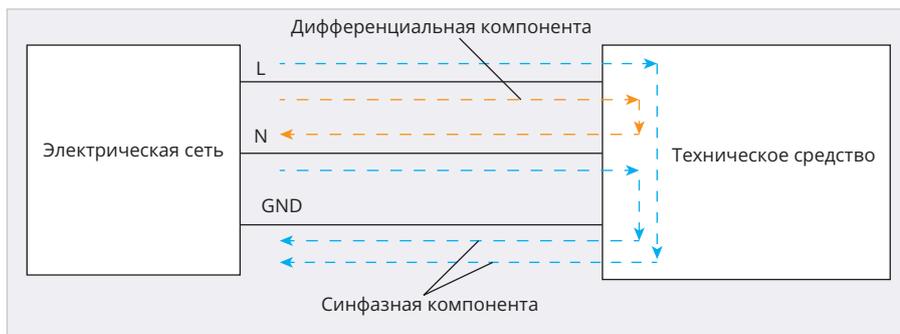


Рис. 2. Дифференциальная и синфазная компоненты кондуктивных помех в трёхпроводной ЭС через техническое средство

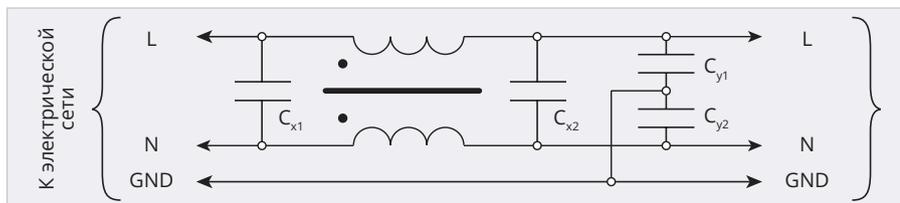


Рис. 3. Типовая принципиальная электрическая схема СФ



Рис. 4. Эквивалентная схема: а) для дифференциальной составляющей; б) для синфазной составляющей

ограничителей напряжения позволяет смягчить эту проблему. Импульсные перенапряжения имеют малую длительность, их спектр может простираться до 10 МГц и выше, поэтому СФ способны эффективно ослаблять помехи такого рода. Наконец, типовые СФ вполне способны подавлять узкополосные и широкополосные помехи, сформированные и инжектированные в ЭС сторонними техническими средствами, а также специально передаваемые сигналы для управления автоматикой и информационного обмена.

Таким образом, при оценке эффективности подавления помех СФ следует ориентироваться на узкополосные составляющие, а также на импульсные помехи со спектром, охватывающим частоты выше 10 кГц. Для определения показателей эффективности СФ должна использоваться обоснованная номенклатура тестовых воздействий.

Типовые схемы сетевых фильтров

Согласно теории обеспечения ЭМС, схемотехнические методы, реализуемые в СФ, обеспечивают снижение помехонесущих напряжений за счёт повышения полного сопротивления

и помехонесущих токов за счёт шунтирования с использованием цепей с частотно-зависимыми свойствами. При этом для трёхпроводных цепей питания все помехи могут быть разделены на синфазную и дифференциальную компоненты [1].

Любое распределение помех в трёхпроводной сети может быть представлено так, как показано на рис. 2. Синфазная и дифференциальная компоненты помех, ничем не отличаясь в смысле физической природы, возвращаются к источнику, т.е. в электросеть, разными путями. Дифференциальная компонента помех протекает через фазный и нулевой проводники в разных направлениях, а синфазная – однонаправленно в этих же проводниках и возвращается к источнику через цепи заземления. Пути протекания помех дифференциального и синфазного типа должны быть реализованы в сетевом фильтре, а отключение заземления недопустимо по соображениям не только электробезопасности, но и ЭМС. Типовые схемы сетевых фильтров, если только они не построены по одноэлементным неэффективным схемам, отвечают данным требованиям.

На рис. 3 представлен один из вариантов схемотехнического решения для СФ. Здесь ослабление дифференциальной компоненты достигается её шунтированием ёмкостями C_{x1}, C_{x2} , последовательно включёнными C_{y1} и C_{y2} , а также совокупной индуктивностью рассеяния L_{lkg} обмоток ферритового трансформатора FT. Ослабление синфазной компоненты достигается за счёт встречного протекания токов в обмотках ферритового трансформатора, создающего дополненную индуктивность L , а также шунтирования ёмкостями C_{y1} и C_{y2} . Эквивалентные схемы для дифференциальной и синфазной компонент показаны на рис. 4.

Для эффективной работы СФ его плечи должны быть симметричны. При отключении заземления на соответствующем выходе СФ появляется потенциал, составляющий половину напряжения электропитания. Ввиду того, что безопасным для человека считается ток, равный 1 мА, ёмкости C_{y1} и C_{y2} не могут иметь большой номинал, если речь идёт о ТС с напряжением электропитания от 110 В. В типовом случае они имеют номиналы 3...5 нФ, в то время как ёмкости C_{x1} и C_{x2} составляют 0,1...0,47 мкФ. Индуктивность обмоток ферритового трансформатора обычно лежит в интервале 1...10 мГн.

Из анализа типовой схемы фильтра следует, что при возникновении импульсных перенапряжений через обмотки FT могут кратковременно протекать токи, вызывающие насыщение в магнитопроводе. В первую очередь это касается синфазной составляющей. В этом случае эффективность фильтрации резко снижается, что вдвойне усугубляет ситуацию с воздействием помех на ЭУ. Ввиду этого в ЭУ ответственного назначения применяются фильтры с повышенной эффективностью. Пример схемы такого фильтра показан на рис. 5. Здесь имеется ряд дополнительных элементов. Перед точками подключения схемы ЭУ устанавливаются ферритовые дроссели L_1 и L_2 без взаимной индуктивности, которые дают высокое полное сопротивление для любой составляющей помех. Поскольку их магнитопроводы не должны насыщаться при полном переменном токе линии, то они будут иметь значительные размеры и массу. Применение ферритов в качестве материалов магнитопровода позволяет достичь сохранения вно-

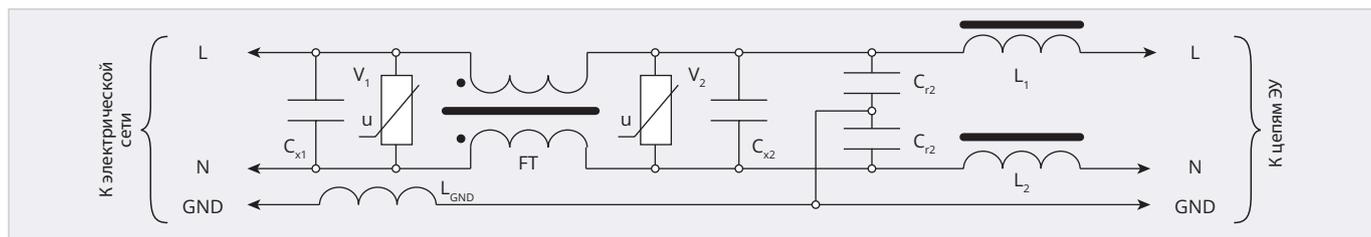


Рис. 5. Типовая схема СФ повышенной эффективности

симого индуктивного сопротивления на частотах до 100 МГц и более.

Для блокировки насыщения магнитопроводов, а также проникновения импульсных помех в ЭУ в схемах применяются варисторы – элементы, сопротивление которых нелинейно зависит (резко падает) от приложенного напряжения. Эти элементы поглощают энергию помех, обращая её в тепло, и должны быть рассчитаны на такое рассеяние. Установка варисторов в разных сечениях СФ позволяет организовать многорубежную защиту и распределить энергию помехи между поглощающими элементами. В схеме на рис. 5 варисторы V_1 и V_2 включены между фазой и нейтралью, чем достигается защита от перенапряжений дифференциального характера. Однако от синфазных перенапряжений это не защищает. Существуют схемы СФ, в которых ограничители перенапряжения устанавливаются попарно между всеми тремя линиями питающей сети.

Цепь заземления СФ в схеме на рис. 5 включает индуктивность L_{GND} , обычно выполняемую на ферритовом магнитопроводе. Поскольку заземление важно и для обеспечения электробезопасности, то вносимое такой индуктивностью дополнительное сопротивление на частоте ЭС и, вообще говоря, кратных гармониках не должно быть больше некоторого допустимого значения. Эта индуктивность препятствует протеканию помехонесущих токов в обоих направлениях, повышая показатели ЭМС.

Модульные СФ, широко применяемые в современных устройствах, обычно не сопровождаются электрической схемой, на основе которой могло бы быть проведено их моделирование. Это подчёркивает важность проведения оценочных измерений. Из рассмотренных примеров схем СФ следуют несколько важных выводов.

1. В общем случае дифференциальная и синфазная составляющая помех ослабляются СФ по-разному и в

зависимости от того, в каком направлении они распространяются. Следовательно, оценка их ослабления должна проводиться при поочередном подключении имитирующего источника сигнала к входу и выходу фильтра. Значения коэффициентов ослабления дифференциальных и синфазных помех для этих случаев должны указываться в технических заданиях на разработку СФ.

2. СФ представляют собой четырёхполюсник, вносящий зависящее от частоты ослабление, которое для выбранной компоненты помех и заданной частоты может быть охарактеризовано обобщённым частотно-зависимым сопротивлением $Z_{СФ}$. Если считать, что источник помех и нагрузка СФ имеют сопротивления $Z_{И}$ и $Z_{Н}$, то коэффициент ослабления помех на некоторой частоте составит

$$K_N = \frac{Z_{Н} + Z_{СФ} + Z_{И}}{Z_{Н} + Z_{СФ}} \quad (1)$$

Таким образом, значение K_N при измерениях, да и при эксплуатации СФ будет зависеть от $Z_{И}$ и $Z_{Н}$, что вносит неопределённость в задачу их проектирования при неизвестности этих параметров. В [1] на этот случай имеется рекомендация считать, что $Z_{И}$ и $Z_{Н}$ имеют только действительные части, в сумме составляющие 150...400 Ом, что на практике справедливо в основном для сигнальных, а не сетевых фильтров. Тем не менее расчётные значения K_N всегда могут быть пересчитаны к другим параметрам $Z_{И}$ и $Z_{Н}$ после их уточнения.

3. Из формулы (1) следует, что при большом $Z_{Н}$ значение K_N может оказаться близко к единице, т.е. фильтр продемонстрирует малую эффективность из-за маскировки его свойств особенностями измерительной установки. Ввиду этого при оценке эффективности СФ в части подавления помех выход СФ, как правило, не должен работать на холостом ходу.

4. Для импульсных помех с заданной длительностью в качестве характеристики ослабления целесообразно использовать отношение

$$K_I = U_I / U_O, \quad (2)$$

где U_I и U_O – амплитуда импульсов на входе и выходе фильтра.

5. В качестве дополнительных характеристик могут рассматриваться [7]:

- отношение электрических площадей импульсов до и после СФ КС как мера их способности возбуждать переходные процессы;
- отношение энергии импульсов до и после СФ КЕ.

Исходя из этой совокупности характеристик, должны выбираться схемы и средства измерений.

Испытательные воздействия и схемы для оценки эффективности подавления помех

Как было обосновано выше, при оценке эффективности СФ можно ориентироваться на узкополосные и импульсные тестовые сигналы. Первые из них должны использоваться для оценки ослабления помех на конкретных частотах либо в некоторой сравнительно небольшой полосе, вторые – для оценки ослабления импульсных помех. В качестве классического узкополосного воздействия может быть рассмотрен синусоидальный сигнал с фиксированной частотой. Такой случай является тривиальным, тем не менее путём измерений на ряде частот можно получить амплитудно-частотную характеристику фильтра, для чего, например, может быть использована опция для построения диаграмм Боде, реализуемая во многих современных осциллографах.

Вместе с тем для охвата некоторой полосы частот можно использовать идеальные узкополосные сигналы с локализованным спектром. Пусть такой идеальный полосовой сигнал (ИПС) имеет спектральную плотность S_0 в пределах интервала частот $f_1...f_2$. Тогда на основе обратного преобразования Фурье для непериодических сигналов [8] он будет описываться во времени функцией $U(t)$ вида

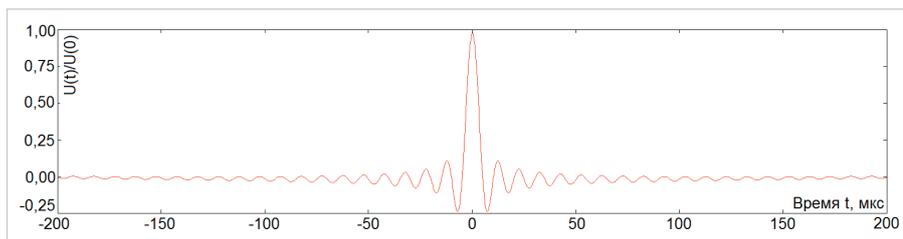


Рис. 6. График нормированного ИПС, построенный для $f_1 = 2$ кГц, $f_2 = 100$ кГц

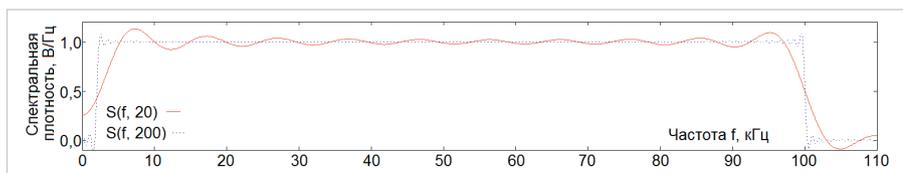


Рис. 7. Зависимости спектральной плотности от частоты для значений $k = 20$ и 200

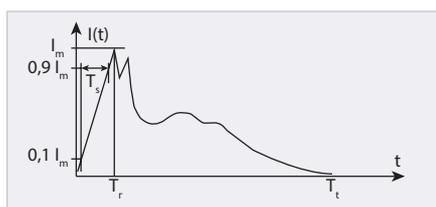


Рис. 8. Типовая форма импульсов при ЭСР

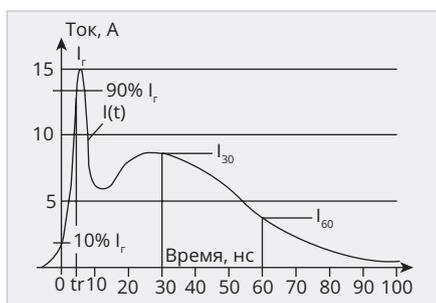


Рис. 9. Форма разрядного тока генератора ЭСР

$$\begin{aligned}
 U(t) &= \frac{1}{2\pi} \int_{-\infty}^{\infty} S(\omega) \exp(j\omega t) d\omega = \\
 &= \int_{-f_2}^{-f_1} S_0 \exp(j2\pi f t) df + \\
 &\quad + \int_{f_1}^{f_2} S_0 \exp(j2\pi f t) df = \\
 &= \frac{2S_0}{\pi t} \sin(\pi(f_2 - f_1)t) \cos(\pi(f_2 + f_1)t)
 \end{aligned}$$

где $\omega = 2\pi f$ – циклическая частота, t – время. Функция имеет максимальное значение при $t = 0$, оно составляет $2S_0(f_2 - f_1)$, что надо учитывать при синтезе сигналов.

На рис. 6 представлен график зависимости $U(t)/U(0)$, построенный для значений $f_1 = 2$ кГц, $f_2 = 100$ кГц. Как следует из уравнения (3), колебания имеют бесконечный характер, а спад огибающей обратно пропорционален модулю от времени. При измерениях эффективности подавления помех СФ период повторения таких

импульсов должен быть таким, чтобы огибающая успевала сойтись практически к нулевому значению. Чем больший период будет задан, тем более точно будет выдержано постоянство спектральной плотности в пределах полосы частот от f_1 до f_2 . Рекомендованное экспериментально подтвержденное значение периода повторения составляет $T = k/f_2$, где $k \geq 30$.

На рис. 7 показаны графики спектральной плотности $S(f)$, построенные на основе прямого преобразования Фурье для функции $U(t)$ при $k = 20; 200$, $S_0 = 1$ В/Гц и тех же значениях f_1 и f_2 . При малых значениях k спектральная плотность в пределах полосы частот ИПС претерпевает вариации, которые могут снизить точность измерений. Ввиду этого для расчёта ослабления помех в некоторой полосе следует использовать результаты быстрого преобразования Фурье, полученные для входного и выходного сигналов.

Для формирования тестового сигнала с огибающей вида $\sin(x)/x$ целесообразно использовать генераторы сигналов произвольной формы на основе прямого цифрового синтеза. В этом случае последовательность отсчёта для формирования файла установленного стандарта формируется в математических пакетах, при этом периодичность повторения выборки должна сопровождаться математической непрерывностью. Если в месте начала повтора будет резкий скачок напряжения, то в спектре испытательного сигнала возникнут незапланированные спектральные составляющие, которые способны существенно исказить результаты измерений. Для упрощения «сращения» выборка должна охватывать симметричный относительно нуле-

вого времени интервал и начинаться с локального минимума либо максимума (см. рис. 6).

При выборе формы тестовых импульсов для оценки эффективности их подавления СФ следует обратить внимание на те из них, которые обычно применяются при испытаниях технических средств по ЭМС. К последним относятся испытания на стойкость ТС к электростатическому разряду (ЭСР) [9] и на воздействие импульсов наносекундной и микросекундной длительности [10, 11]. При ЭСР форма воздействующих импульсов оказывается весьма сложной (рис. 8), она характеризуется длительностью нарастания T_s , временем достижения T_r пикового тока I_m , а также общей длительностью разряда T_t . Ясно, что большое количество параметров существенно усложняет их обоснование, поэтому генераторы разрядов, используемые при испытаниях на ЭСР, формируют ток с тремя нормируемыми параметрами, перечисленными на рис. 9. Здесь график представлен для контактного разряда с напряжением 4 кВ.

В случае СФ нет необходимости моделировать сложные по форме воздействия, в особенности с учётом возможного многообразия возможных форм импульсных помех в электросети.

При испытаниях ТС на стойкость к импульсам микросекундной и наносекундной длительности используются импульсы пилообразной и экспоненциальной форм с коротким передним фронтом [10, 11]. Случаи испытаний ТС на стойкость к ЭСР, а также к импульсам микро- и наносекундной длительности объединяет то, что для их генерации используются схемы, основанные на циклах управляемого заряда и разряда конденсаторов. Такие испытания имеют своей целью подтверждение сохранения работоспособности ТС и имитируют типовые виды соответствующих импульсных помех. В случае же испытаний СФ приходится иметь дело с во многом неопределённой электромагнитной обстановкой в электросети. Это обстоятельство позволяет значительно упростить подход к измерениям. Здесь целесообразно обратиться к теории динамической помехоустойчивости цифровых микросхем [12], входы которых также могут подвергаться воздействию импульсных помех разных форм и происхождения. Типовая форма помех в цифро-

вых устройствах – это прямоугольные, трапециевидные и экспоненциальные импульсы, но испытания на динамическую помехоустойчивость проводят только с использованием прямоугольных импульсов. Это обусловлено тем, что способность импульсов малой длительности вызывать переходные процессы в электрических цепях обусловлена не формой, а их электрической площадью и длительностью [13]. Ввиду изложенного в дальнейшем будем ориентироваться на использование классических прямоугольных импульсов, характеризующихся амплитудой A , длительностью τ и периодом T .

Испытания по стандартам [11–13] осуществляются для работающих ТС. Эффективность подавления помех СФ не зависит от подачи на них питающих напряжений и амплитуды помех, если протекание рабочих и помехоносущих токов не вызывает нелинейные эффекты в магнитопроводах и переход варисторов в активный режим. Если же это не так, то для испытаний следует применять источники, формирующие рабочее напряжение и инжектирующие помехи, а также обоснованно выбранные эквиваленты нагрузки. Схемы СФ повышенной эффективности, подобные показанной на рис. 5, применяются в основном в изделиях промышленного и специального назначения, поэтому для большей части СФ названное условие можно считать выполненным.

Для импульсных испытательных воздействий требуется выбрать их параметры. В теории обеспечения ЭМС фильтры относятся к классу ограничителей по спектру. Схемы СФ считаются линейными, поэтому параметры K_p, K_s, K_E для выбранных типа испытательных сигналов и направления их распространения не будут зависеть от амплитуды импульсов. Она может быть в принципе любой, достаточной для проведения измерений при использовании осциллографов с заданной чувствительностью.

Большее внимание следует уделить выбору длительности импульса τ и периода повторения T . Известно [8], что при действии импульсов на входе цепи, содержащей компоненты с активным и реактивным сопротивлением, в ней возникает переходный процесс, длительность которого для коротких импульсов полностью определяется топологией схемы. Импульсные помехи в электросетях, как пра-

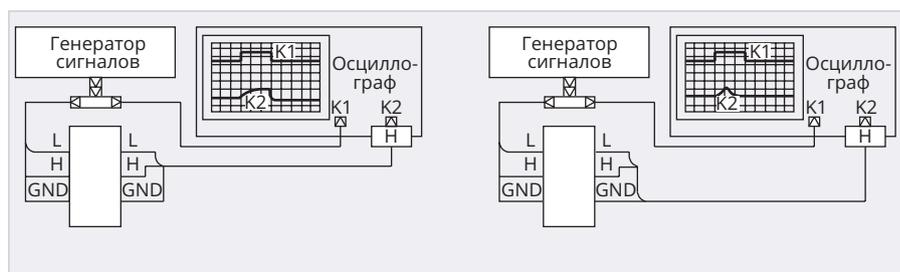


Рис. 10. Схемы для оценки эффективности подавления: а) дифференциальных помех; б) синфазных помех (для пары входов/выходов $L - GND$)

вило, носят одиночный характер. Поэтому при выполнении измерений с использованием импульсов целесообразно обеспечивать низкую частоту их следования, с тем чтобы переходные процессы в СФ успевали полностью завершиться. Экспериментально установлено, что для измерений характеристик типовых СФ целесообразно выбирать импульсы с периодом не менее 1 мс.

Оценить длительность импульсов можно из следующих соображений. Электрическая сеть, да и схемы ТС по отношению к помехам проявляют диссипативные свойства, ввиду чего на частотах выше 30 МГц значительный уровень кондуктивных помех считается маловероятным событием [3]. С другой стороны, согласно стандартам [10, 11], на ТС могут воздействовать и помехи с микросекундными и наносекундными длительностями, а диапазон частот помехозащиты импульсных источников электропитания обычно ограничен значениями 10 кГц ... 10 МГц. Исходя из этого, можно рекомендовать проводить основной объем испытаний СФ как отдельных изделий с использованием импульсов длительностью от 0,03 до 100 мкс. При этом первый ноль огибающей спектра импульсов будет лежать в диапазоне от 10 кГц до 30 МГц. Указанный интервал может быть существенно сужен, если учесть, что субмикросекундные импульсы небольшой энергии прекрасно ослабляются в схемах СФ (рис. 4, 5), если они сконструированы и собраны без принципиальных ошибок.

Исходя из изложенного, схемы измерений, которую можно использовать для оценки эффективности подавления помех СФ, оказываются достаточно простыми (рис. 10), но имеют ряд значимых особенностей. Они включают генератор сигналов, способный формировать все перечисленные выше испытательные воздействия,

и осциллограф. Можно рекомендовать использование встроенных генераторов, если они позволяют формировать сигналы произвольной формы. В таком случае в измерениях будет задействован один прибор. Если неиспользуемые при измерениях выводы СФ оставить без подключения, то это будет соответствовать наименьшему ослаблению помех, т.е. наихудшему случаю. На рисунке буквой Н обозначена нагрузка. В простейшем случае ею может служить входное сопротивление осциллографического канала, равное 50 Ом. В более сложных случаях могут применяться схемы ЭУ, в которых предполагается использовать данный СФ. Если такая нагрузка работает в штатном режиме, то для инъекции импульсных помех должны применяться специальные генераторы [10, 11], а порядок и схемы измерений несколько усложнятся из-за необходимости передачи питающего напряжения и синхронизации. В некоторых случаях могут быть использованы электронные нагрузки.

Важной особенностью экспериментальной оценки эффективности подавления дифференциальных помех является необходимость использования осциллографов, имеющих гальваническую развязку между каналами. Она необходима для того, чтобы оснастка и схема измерений не создавали путей стекания тестового тока с низким сопротивлением, а также для устранения возможного короткого замыкания. Альтернативой является использование пары дифференциальных пробников.

Если для тестирования выбран ИПС, то лучшим решением является использование полноценных анализаторов спектра, поскольку реализация быстрого преобразования Фурье в осциллографах зачастую сопровождается ограничениями, накладываемыми на полосу разрешения, длительность развертки и другие значимые настройки прибора.



Рис. 11. Фотография модульного сетевого фильтра

Особенности выполнения измерений для оценки эффективности подавления помех СФ

При выполнении измерений эффективности помехоподавления СФ целесообразно ориентироваться на использование стандартного лабораторного оборудования, в частности, на современные цифровые осциллографы. Измерения в частотной области с использованием ИПС требуют наличия соответствующей математической обработки осциллограмм. В современных осциллографах функция быстрого преобразования Фурье (БПФ) реализуется как базовая, аппаратно-программная платформа осциллографа имеет достаточную производительность для таких вычислений. Альтернативой является использование анализаторов спектра как отдельных средств измерений.

Оценка эффективности СФ в части ослабления импульсных помех осуществляется во временной области. В соответствии с данными ранее определениями её показателей от используемых средств измерений следует требовать наличие функций автоматических измерений по амплитуде и времени. Осциллографы должны позволять производить операции интегрирования сигналов и другие необходимые элементарные математические операции. Для удобства считывания показаний следует использовать курсорные измерения.

Учитывая, что основные измерения эффективности подавления помех СФ должны производиться для полосы частот от 9 кГц до 30 МГц [3], к измерительной оснастке особые требования не предъявляются. Однако на частотах выше 10 МГц в ней могут проявляться нежелательные резонансные эффекты. Из этого следует, что оснастка должна иметь минимально возможные паразитные параметры, а лучшим вариан-

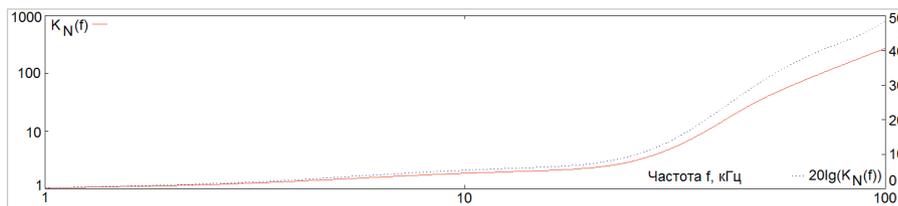


Рис. 12. Амплитудно-частотная характеристика СФ при выходной нагрузке 50 Ом

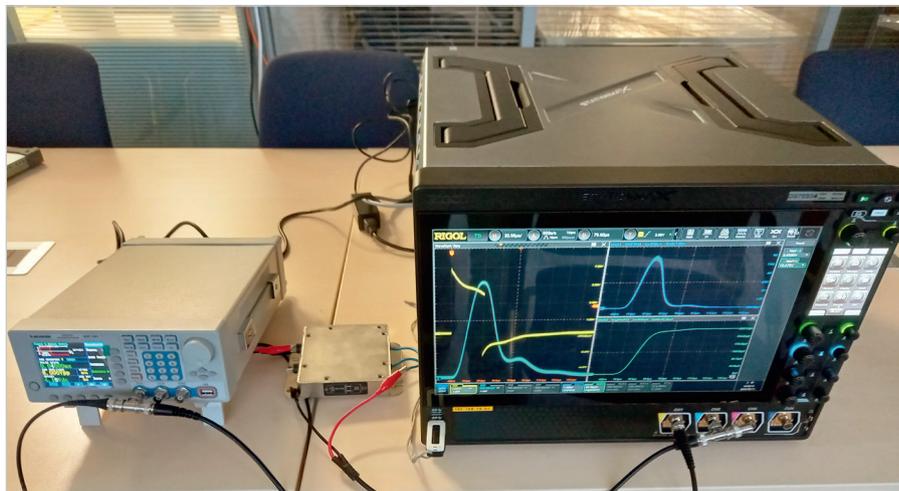


Рис. 13. Фотография измерительной установки

том является подключение СФ к измерительной установке коаксиальных линий. Также следует отметить, что при подготовке к выполнению рассматриваемых измерений справедливой является рекомендация [1] по максимальному пространственному разнесению входных и выходных проводников СФ, что необходимо для минимизации индуктивно-ёмкостной паразитной связи и переброса электромагнитной энергии в обход цепей фильтра посредством механизма ближнего поля.

Пример измерений показателей эффективности СФ с использованием осциллографа серии DS70000 компании Rigol

Объект исследований и измерительное оборудование. Для проведения демонстрационных измерений целесообразно использовать модульный фильтр, предназначенный для работы в трёхпроводных однофазных сетях переменного тока напряжением 220 В. Из имеющихся образцов был выбран фильтр (рис. 11), предназначенный для подавления помех, формируемых однофазными электродвигателями. Известно [1], что формируемые ими помехи являются широкополосными и могут охватывать полосу до 300 МГц. Такие помехи – в особенности при заметном износе щёток элек-

тродвигателя – являются весьма интенсивными.

Измеренная амплитудно-частотная характеристика (АЧХ) СФ, снятая при выходной нагрузке 50 Ом, представлена на рис. 12. При построении АЧХ использовалась схема, представленная на рис. 10б. Генератор с выходным сопротивлением 50 Ом формировал синусоидальный сигнал с изменяющейся частотой, при помощи осциллографа измерялись амплитудные напряжения U_1 и U_2 на входе и выходе фильтра. Учитывая (1), а также известные выходное сопротивление генератора и сопротивление нагрузки фильтра, и считая для упрощения сопротивление фильтра Z_{CF} действительным, можно показать, что $K_N = 0,5(1 + U_1/U_2)$. Аналогичные представленным на рис. 12 результаты могут быть получены на осциллографах со встроенным генератором, поддерживающих функцию построения диаграмм Боде [14]. Частота среза фильтра по уровню -3 дБ составляет 5,5 кГц.

Измерения, результаты которых представлены ниже, также проводились по схеме, представленной на рис. 10б, т.е. имитировались только синфазные помехи. Ключевым элементом схемы измерений являлся осциллограф DS70504 компании Rigol, имеющий полосу пропускания 5 ГГц и 4 канала. Необходимая математическая

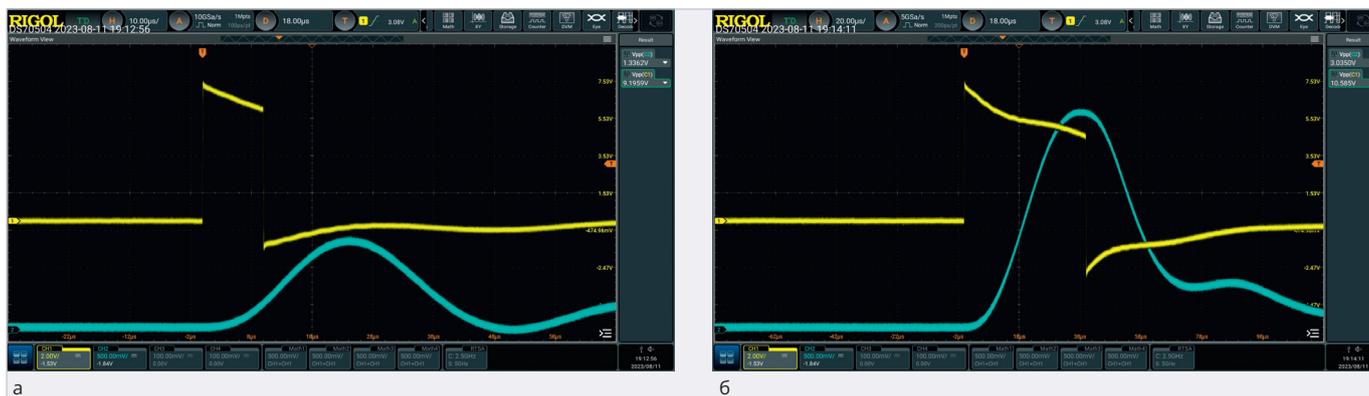


Рис. 14. Результаты измерений размаха сигнала на входе и выходе СФ для импульсов длительностью: а) 10 мкс; б) 40 мкс



Рис. 15. Результаты измерений электрической площади сигнала на входе и выходе СФ для импульсов длительностью: а) 10 мкс; б) 40 мкс

обработка сигналов выполнялась его встроенными средствами. Для генерации тестовых воздействий использовался генератор АНР-1041. Линии заземления подключались непосредственно к корпусу фильтра, как это и делается при его эксплуатации. Вторая линия фильтра оставалась неподключённой. Выход фильтра нагружался на нагрузку сопротивлением 50 Ом. В качестве вспомогательных элементов использовались необходимые элементы коаксиального тракта (рис. 13).

Номенклатура тестовых воздействий и их характеристики. В соответствии с приведёнными выше рекомендациями в качестве возможных тестовых воздействий рассматривались синусоидальный, идеальный полосовой и импульсный сигналы. Случай применения синусоидальных сигналов для оценки свойств СФ является тривиальным, и, по сути, его итогом будут точки на амплитудно-частотной и фазо-частотной характеристиках. Формирование ИПС может быть осуществлено с использованием генератора сигналов произвольной формы, однако также предназначено для построения АЧХ, как это было показано выше.

Ввиду изложенного в качестве тестовых сигналов были выбраны прямоугольные импульсы длительностью 10 и 40 мкс и с периодом повторения 1 мс. На холостом ходу амплитуда импульсов составляла 12 В. Для них определялись параметры K_p , K_s , K_E .

Результаты измерений. Сопоставляя АЧХ фильтра и выбранные характеристики прямоугольных импульсов, можно сделать вывод о том, что более короткие импульсы будут ослабляться сильнее. Этот качественный вывод подтверждается результатами измерений.

На рис. 14а показано, что для импульсов длительностью 10 мкс размах импульсов на входе и выходе СФ составил 9,20 и 1,34 Вп-п, что соответствует значению $K_I = 6,87$, или 16,7 дБ. На рис. 14б показаны аналогичные результаты измерений для импульсов длительностью 40 мкс, причём размах входного и выходного напряжений для СФ составил 10,59 и 3,04 Вп-п, $K_I = 3,48$, или 10,8 дБ. Автоматические измерения размаха сигналов являются стандартной функцией многих осциллографов, в том числе и приборов Rigol серии DSO70000.

На рис. 15 представлены результаты интегрирования входных и выходных напряжений СФ S_1 и S_2 в целях определения отношений их электрических площадей K_S . Само интегрирование осуществлялось посредством штатной математической обработки осциллограмм. Эта функция, равно как и обработка осциллограмм с использованием произвольных математических функций, реализуется обычно в приборах среднего и высшего класса. Важно обратить внимание, что до начала импульса входное и выходное напряжения для СФ близки нулю. Подача импульса на вход СФ вызывает переходной процесс, который отражается в виде экспоненциального выброса отрицательной полярности во входном сигнале и в виде колебательного процесса в выходном сигнале, которые также должны быть учтены при определении значений S_1 и S_2 . Их следует определять для момента времени, когда переходный процесс полностью завершился.

Для импульса длительностью 10 мкс и времени развёртки, равному 180 мкс, значения S_1 и S_2 равны соответственно 31,0 и 41,4 В-мкс (рис. 15а). Тогда значение $K_S = 0,75$, или -3,5 дБ, и ока-

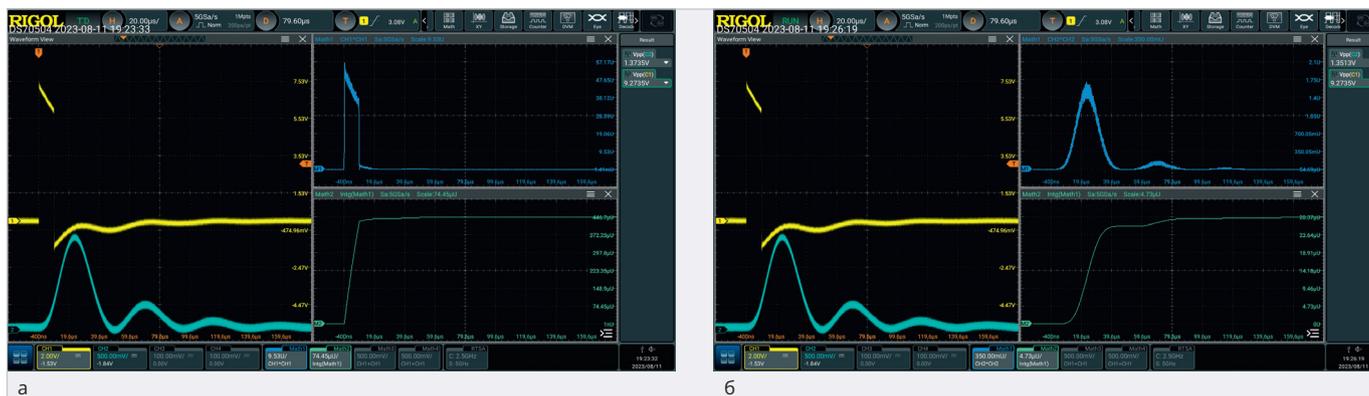


Рис. 16. Результаты измерений, полученные для импульсов длительностью 10 мкс интегрированием квадрата: а) выходного напряжения СФ; б) выходного напряжения СФ



Рис. 17. Результаты измерений, полученные для импульсов длительностью 40 мкс интегрированием квадрата: а) выходного напряжения СФ; б) выходного напряжения СФ

Таблица 1. Значения K_I , K_S , K_E , полученные по результатам измерений

Длительность импульса, мкс	K_I , ед./дБ	K_S , ед./дБ	K_E , ед./дБ
10	6,87/16,7	0,75/-3,5	15,2/11,8
40	3,48/10,8	0,97/-0,24	5,2/7,1

зывается, что электрическая площадь импульса на выходе фильтра будет больше, чем на его входе. Рассматриваемый СФ, по-видимому, имеет в своём составе ёмкости и индуктивности, что и вызывает заметный колебательный процесс. В то же время известно [15], что колебательные контуры, подверженные действию коротких импульсов, претерпевают переходный процесс с длительностью, многократно превышающей период свободных колебаний. Этот пример показывает, что характеристики эффективности СФ нужно рассматривать в совокупности друг с другом.

Кроме того, для оценки способности двухполярных импульсов возбуждать переходные процессы в некоторых цепях иногда используется электрическая площадь, рассчитанная по модулю напряжения [16]. Если же мы рассмо-

трим интегрирование модулей напряжений на входе и выходе СФ, то тогда получим значения S_1 и S_2 равными соответственно 99,6 и 44,5 В·мкс, т.е. $K_S = 2,23$, или 7,0 дБ.

На рис. 15б представлены результаты измерений, полученные для импульсов длительностью 40 мкс. Здесь $S_1 = 141,2$ В·мкс, $S_2 = 145,3$ В·мкс, т.е. $K_S = 0,97$, или -0,24 дБ. Если интегрировать модули напряжений на входе и выходе СФ, то тогда $S_1 = 300,9$ В·мкс, $S_2 = 149,0$ В·мкс, т.е. $K_S = 2,02$, или 6,1 дБ.

На рис. 16 и 17 представлены результаты интегрирования квадратов входных и выходных напряжений СФ E_1 и E_2 в целях определения соотношений их мощностей K_E , приведённых к единице сопротивления. Существенным моментом здесь является наличие двух математических операций – возведение в квадрат входного или выходного напряжения и интегрирование полученного результата по времени. Осциллографы Rigol серии DSO70000 способны выполнять до четырёх любых математических операций над входными сигналами и результатами других математических операций.

Как следует из рис. 16, после завершения переходного процесса для момента времени 180 мкс $E_1 = 446,7$ В²·мкс, $E_2 = 29,4$ В²·мкс, $K_E = 15,2$, или 11,8 дБ. На рис. 17 представлены результаты аналогичных измерений, полученные для импульсов длительностью 40 мкс. Здесь $E_1 = 1340$ В²·мкс, $E_2 = 260$ В²·мкс, $K_E = 5,2$, или 7,1 дБ. Как видно из сопоставления полученных результатов, энергия более коротких импульсов ожидаемо ослабляется сильнее, как это и следует из АЧХ СФ на рис. 12.

Полученные по результатам измерений значения K_I , K_S , K_E сведены в табл. 1.

Таким образом, характеристики эффективности СФ K_I , K_S , K_E определены для двух длительностей импульсов. Учитывая, что осциллографы RIGOL серии DS70000 позволяют реализовать до четырёх математических функций, на них могут быть построены непосредственно временные зависимости указанных характеристик. Альтернативный, но существенно менее удобный способ их получения состоит в сохранении осциллограмм в виде отсчётов и их последующей обработке на компьютере.

Заключение

Таким образом, эффективность подавления синфазных и дифференциальных помех СФ может быть оценена при помощи разных показателей, к числу которых можно отнести характеристики частотной избирательности, фазового сдвига, ослабления импульсных помех по амплитуде, электрической площади, энергии. Совокупность характеристик, применяемых для конкретного СФ, определяется его назначением, а также наличием априорной информации о помеховой обстановке в электросети. Зачастую её точное описание может быть дано только в вероятностных категориях, например, в терминах частоты появления помех с заданной энергетикой. В этой связи целесообразно использовать понятие типовой помехи с обоснованными для конкретной питающей сети параметрами.

Как это было продемонстрировано выше, осциллография позволяет измерить практически любые характеристики, необходимые для оценки показателей эффективности СФ представленной выше номенклатуры. Осциллографы фирмы Rigol серии DSO70000 реализуют функции автоматических измерений и математической обработки, что существенно упрощает и ускоряет проведение таких исследований.

Для построения амплитудно-частотных и фазо-частотных характеристик СФ в полосе частот до 25 МГц могут использоваться встроенные генераторы сигналов, опционально устанавливаемые в осциллографы Rigol некоторых серий, например, в приборы MSO8000. Полная автоматизация таких измерений достигается применением опций построения диаграмм Боде. Наконец, при помощи этих же генераторов могут быть синтезиро-

ваны ИПС, и тогда АЧХ могут быть построены альтернативным способом – на основе быстрого преобразования Фурье.

Таким образом, современные осциллографы, включая приборы Rigol серии DSO70000, при наличии некоторых опций позволяют проводить измерения любых значимых характеристик сетевых фильтров без привлечения дополнительных средств измерений.

Литература

1. Уильямс Т. ЭМС для разработчиков продукции / пер. с англ. В.С. Кармашева, Л.Н. Кечиева. М.: Издательский дом «Технологии», 2003. 540 с.
2. Лемешко Н.В. Обеспечение ЭМС изделий современной электроники // Авторский курс повышения квалификации. НОЧУ ДПО «Новая инженерная школа», 2018 г.
3. ГОСТ Р 51317.4.6-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к кондуктивным помехам, наведённым радиочастотными электромагнитными полями. Требования и методы испытаний». М.: Издательство стандартов, 2000. 30 с.
4. ГОСТ 32144-2013 «Электрическая энергия. Совместимость технических средств электромагнитная. Нормы качества электрической энергии в системах электроснабжения общего назначения» М.: Стандартинформ, 2014. 16 с.
5. Жежеленко И.В., Короткевич М.А. Электромагнитная совместимость в электрических сетях. Минск: Высшая школа, 2012. 197 с.
6. ГОСТ Р 51317.3.8-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Передача сигналов по низковольтным электрическим сетям. Уровни сигналов, полосы частот и нормы электромагнитных помех». М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 16 с.
7. Грязнов М.И. Интегральный метод измерений параметров импульсов. М.: Советское радио, 1975. 280 с.
8. Баскаков С.И. Радиотехнические цепи и сигналы: учебное пособие для вузов. М.: Высшая школа, 2003. 462 с.
9. ГОСТ 30804.4.2-2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к электростатическим разрядам. Требования и методы испытаний». М.: Стандартинформ, 2014. 50 с.
10. ГОСТ 30804.4.4-2013 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к микросекундным импульсным помехам большой энергии. Требования и методы испытаний». М.: ИПК Издательство стандартов, 2000. 25 с.
11. ГОСТ 51317.4.5-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Устойчивость к наносекундным импульсным помехам. Требования и методы испытаний». М.: Стандартинформ, 2014. 21 с.
12. Кечиев Л.Н. Проектирование печатных плат для цифровой быстродействующей аппаратуры. М.: ООО «Группа ИДТ», 2007. 616 с.
13. Харкевич А.А. Спектры и анализ. М.: Государственное издательство технико-теоретической литературы, 1962. 236 с.
14. Лемешко Н.В., Горелкин М.В., Струнин П.А. Использование опции построения диаграмм Боде R&S RTM-K36 для измерения импеданса первичных преобразователей ультразвуковых расходомеров // Современная электроника. 2021. № 8. С. 14–20.
15. Корякин В.С., Кравчук Ю.В., Лебедев О.В. и др. Измерители радиопомех / под ред. И.А. Фастовского. М.: Связь, 1973. 152 с.
16. Лемешко Н.В. Теоретические основы моделирования сертификационных испытаний радиоэлектронных средств по эмиссии излучаемых радиопомех. М.: МИЭМ, 2012. 196 с.



НОВОСТИ МИРА

Российский чипмейкер «Микрон» переходит на китайское оборудование

На фоне практически полного отсутствия у России доступа к зарубежному оборудованию производитель полупроводников «Микрон» переходит на применение в своём производстве необходимого оборудования от китайских компаний, а также из некоторых других стран, включая даже Беларусь.

Как уточняет топ-менеджер «Микрона» Сергей Ранчин, предприятие старается увеличить свои производственные мощности в плане выпуска полупроводниковой продукции по 90-нм технологическим нормам, однако в условиях установленных запретов по закупке передовых материалов, технологий и сервисов заводу приходится развивать производство заменой «одной лошади на другую».

Ещё в прошедшем году представители «Микрона» открыто объявили о планах по увели-

чению к 2025 году объёмов по изготовлению кремниевых пластин под 90/180-нанометровые чипы с 3000 до 6000 единиц, что потребует инвестиций в объёме около 10 млрд рублей.

Кроме того, с 2022-го на «Микроне» отмечается серьёзная перегруженность производственных линий, а в будущем году завод должен приступить к созданию собственных чипов, необходимых для выпуска SIM-карт с отечественной криптографией.

techcult.ru