

Выбор параметров ЭМП-фильтра

Игорь КОЛОБОВ,
инженер-разработчик

В статье рассматриваются способы построения фильтра электромагнитных помех, и даются рекомендации по выбору компонентов фильтра. Приводятся расчетные соотношения и графические иллюстрации.

Требования по электромагнитной совместимости (ЭМС) достаточно строги. AC/DC- и DC/DC-преобразователи, без которых в настоящее время не обходится практически ни одно изделие, порождают высокий уровень электромагнитных помех (ЭМП). В первом приближении их можно разделить на три группы.

1. Низкочастотные кондуктивные помехи в полосе частот 0,15–50 МГц.
2. Широкополосные кондуктивные и радиопомехи в полосе 50–200 МГц.
3. Высокочастотные радиопомехи частотой свыше 200 МГц.

Помехи первого вида порождаются пульсациями входного тока с рабочей частотой преобразователя и высшими гармониками этих пульсаций. Ток создает также падение напряжения на эквивалентном последовательном сопротивлении (ESR) входного сглаживающего конденсатора. Помехи, указанные в п. 2, возникают из-за паразитных емкостей и индуктивностей в силовых цепях и в цепях управления затвором силового ключа. И, наконец, указанные в п. 3 помехи являются следствием переходных процессов в полупроводниковых приборах,

например результатом восстановления обратного сопротивления диода.

Для подавления помех 1-го типа используются ЭМП-фильтры; их применение должно обеспечить выполнение требований ГОСТ 30804.3.2. «Эмиссия гармонических составляющих тока техническими средствами с потребляемым током не более 16 А (в одной фазе)» и аналогичных норм CISPR-25. Конструкция ЭМП-фильтров зависит от особенностей изделия. Их роль может выполнять и единственный помехоподавляющий конденсатор, и сложное устройство из нескольких конденсаторов и дросселей в одном корпусе.

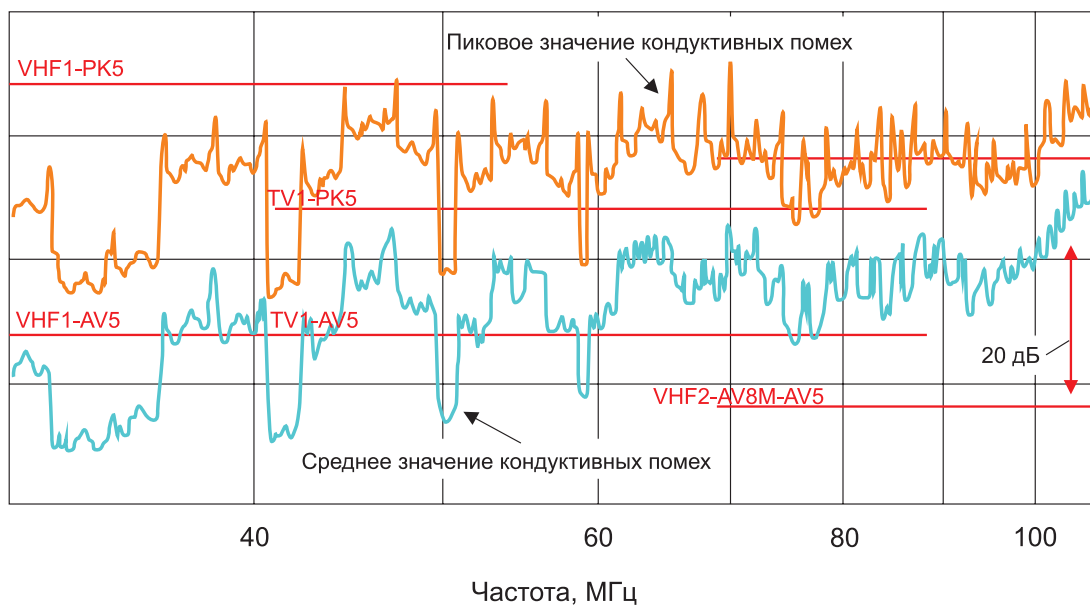


Рис. 1. Осциллограммы квазипикового и среднего значения помех DC/DC-преобразователя

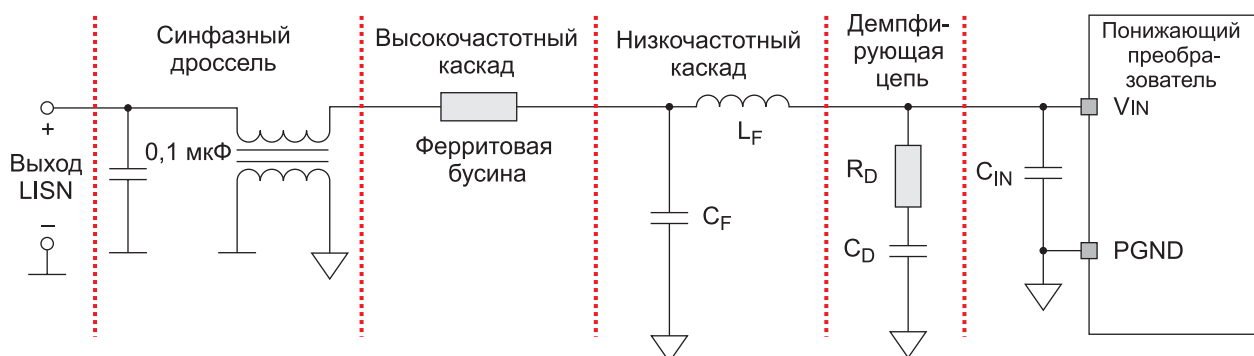


Рис. 2. Схема ЭМП-фильтра

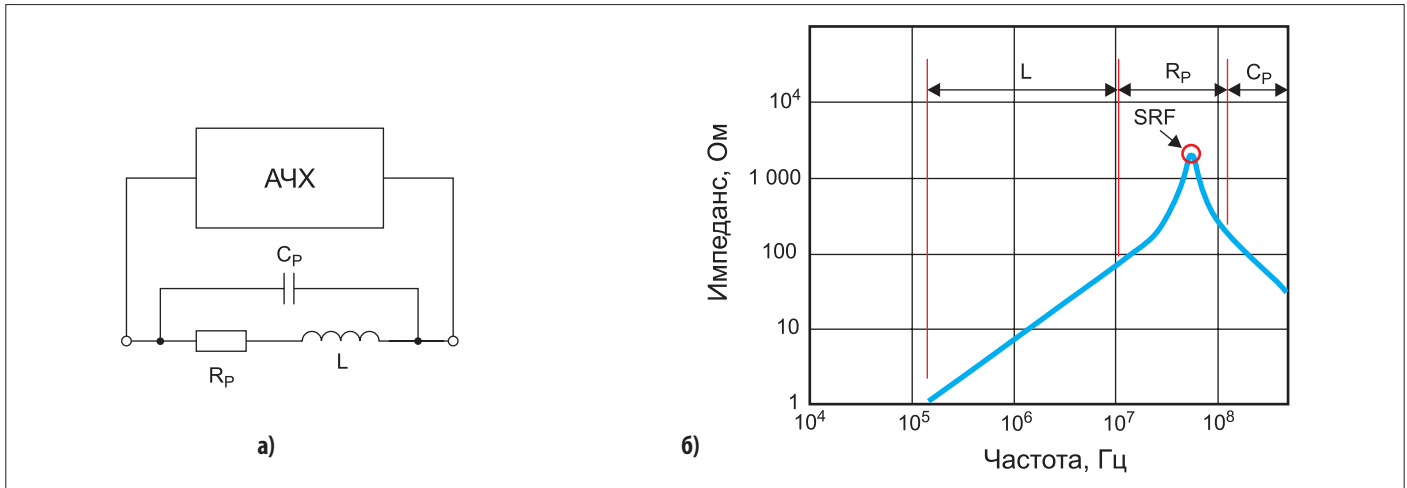


Рис. 3. а) эквивалентная схема дросселя; б) его частотная характеристика

Памюта, что нельзя объять необъятное, в настоящей статье мы рассмотрим только ЭМП-фильтры, оставив другие аспекты ЭМС за рамками этой статьи.

Рис. 1 иллюстрирует сказанное выше. На нем показаны осциллограммы квазипикового и среднего значения помех, порождаемых DC/DC-преобразователем. Осциллограммы снимались в отсутствие ЭМП-фильтра; на них горизонтальными полосами красного цвета обозначены предельные нормы помех. Как видно из рисунка, эти нормы существенно превышены — примерно на 20 дБ, т. е. в 10 раз. При таком превышении единственным средством, способным уменьшить величину помех до приемлемого значения, является ЭМП-фильтр.

На рис. 2 показана схема ЭМП-фильтра, разделенная на каскады. Фильтр подключен к устройству стабилизации полного сопротивления линии (LISN). Устройство LISN позволяет исключить влияние первичной сети и оценить только влияние ЭМП-фильтра. Высокочастотные пульсации входного тока, порождаемые DC/DC-преобразователем, имеют примерно трапециевидную форму. Это значит, что они содержат и четные, и нечетные высшие гармоники.

Токи пульсации трапециевидальной формы протекают через входной конденсатор C_{IN} и дополнительно создают падение напряжения на сопротивлении ESR этого конденсатора. Фильтр, расположенный на входе конденсатора, ослабит эти пульсации и позволит уложиться в требования стандартов.

Крутизна спада АЧХ LC-фильтра 2-го порядка низкочастотного каскада составляет 40 дБ/дек. Значение его частоты среза f_c выбирается из условия ослабления помех в требуемом диапазоне частот из выражения (1):

$$A = 40 \lg \left(\frac{f}{f_c} \right). \quad (1)$$

Ослабление A выражается в дБмкВ.

Из формулы (1) легко получается соотношение (2):

$$f_c = f \cdot 10^{-\frac{A}{40}}. \quad (2)$$

Таким образом, выбирая частоту среза, можно задать величину ослабления в требуемой полосе частот. К сожалению, простые и понятные расчетные соотношения (1) и (2) на практике служат лишь примерным ориентиром при расчете фильтра. Например, паразитная емкость и сопротивление дросселя могут внести существенные коррективы в расчет фильтра. На рис. 3а показана эквивалентная схема дросселя с учетом его паразитных параметров, а на рис. 3б — зависимость импеданса реального дросселя от частоты.

Как видно из рисунка, дроссель с учетом паразитных параметров представляет собой колебательный контур. Его резонансная частота называется собственной резонансной частотой дросселя (SRF). На частотной харак-

теристике выделены три области. В первой из них импеданс дросселя имеет индуктивный характер; далее, в районе точки SRF кривая импеданса носит резистивный характер и, наконец, при частоте выше SRF импеданс приобретает емкостной характер. Следовательно, в этом диапазоне частот ЭМП-фильтр перестает выполнять свою роль. Производители дросселей обязательно указывают величину SRF, а в ряде случаев и добротность.

Конденсатор, как и дроссель, имеет паразитные параметры — эквивалентную последовательную индуктивность (ESL) и эквивалентное последовательное сопротивление. Эквивалентная схема конденсатора также представляет собой колебательный контур. Зависимости импеданса дросселей от частоты для некоторых конденсаторов приведены на рис. 4. Как видно, импеданс реального конденсатора после точки SRF имеет отчетливо выраженный индуктивный характер. Иными словами, после того как частота входного сигнала

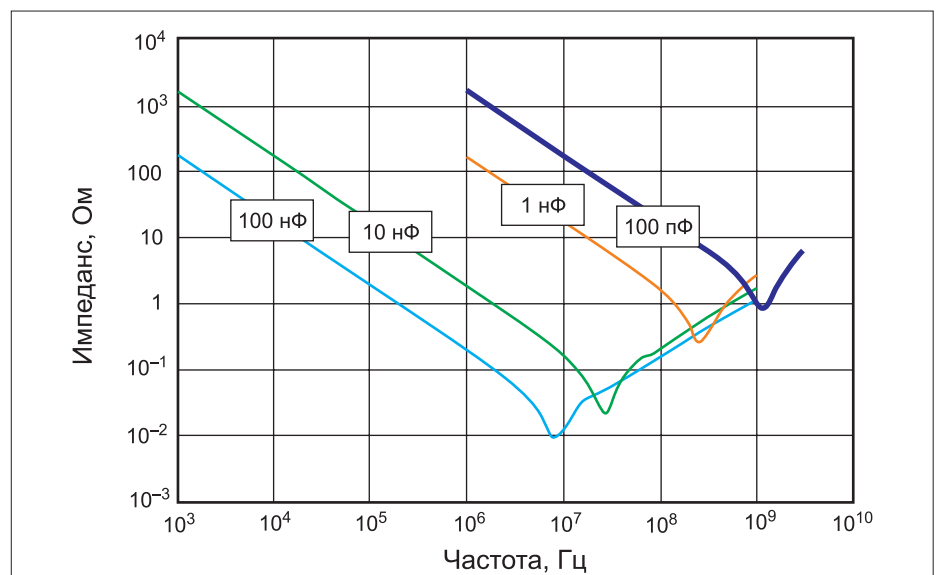


Рис. 4. Частотные характеристики реальных конденсаторов

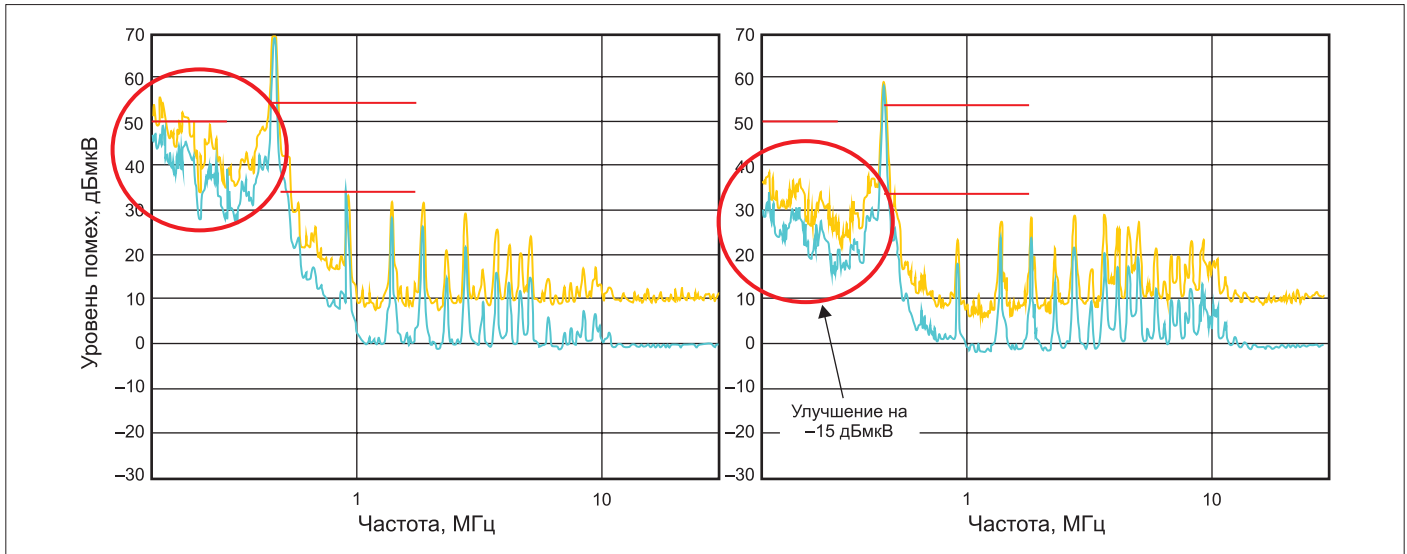


Рис. 5. Влияние демпфирующей цепочки на характеристики ЭМП-фильтра

превысит значение частоты SRF дросселя и конденсатора, фильтр нижних частот превращается в фильтр верхних частот. Следовательно, при выборе компонентов LFCF-фильтра необходимо учитывать это обстоятельство.

Для выравнивания амплитудно-частотной характеристики фильтра используется демпфирующая $R_D C_D$ -цепочка, включенная между линиями сети (рис. 2). Эта цепь позволяет избежать или уменьшить колебательный процесс, возникающий в $L_F C_F$ -фильтре, что может привести к нестабильной работе преобразователя. Величина компонентов демпфирующей цепочки определяется из соотношения (3):

$$R_D = \sqrt{\frac{L_F}{C_{IN}}} \quad (3)$$

Из уравнения (4) получаем величину демпфирующей емкости:

$$C_D = 4C_{IN} \quad (4)$$

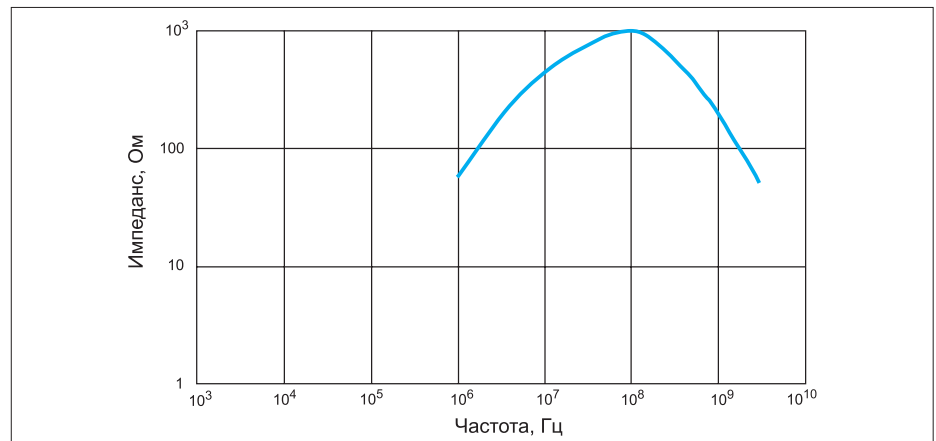


Рис. 6. Частотные характеристики синфазного дросселя

Важность демпфирующей цепочки иллюстрируется на рис. 5, где показаны осциллограммы помех при работе ЭМП-фильтра без демпфирующей цепочки (рис. 5а) и с демпфирующей цепочкой (рис. 5б), компоненты которой определены из соотношений (3—4).

Как видно из рисунка, демпфирующая цепочка позволяет уменьшить помехи в зоне FM-частот почти на 15 дБмкВ. Демпфирующая цепочка также улучшает устойчивость системы «фильтр–преобразователь»; подробнее с этим аспектом проблемы можно ознакомиться в [1].

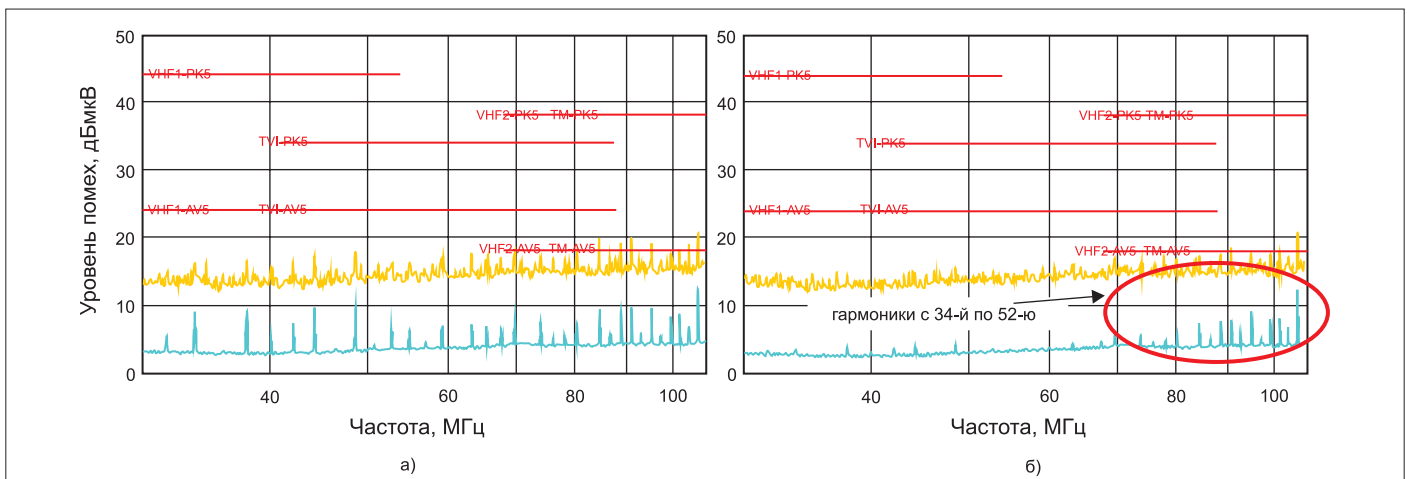


Рис. 7. Характеристики ЭМП-фильтра: а) без ферритовой бусины; б) с ферритовой бусиной

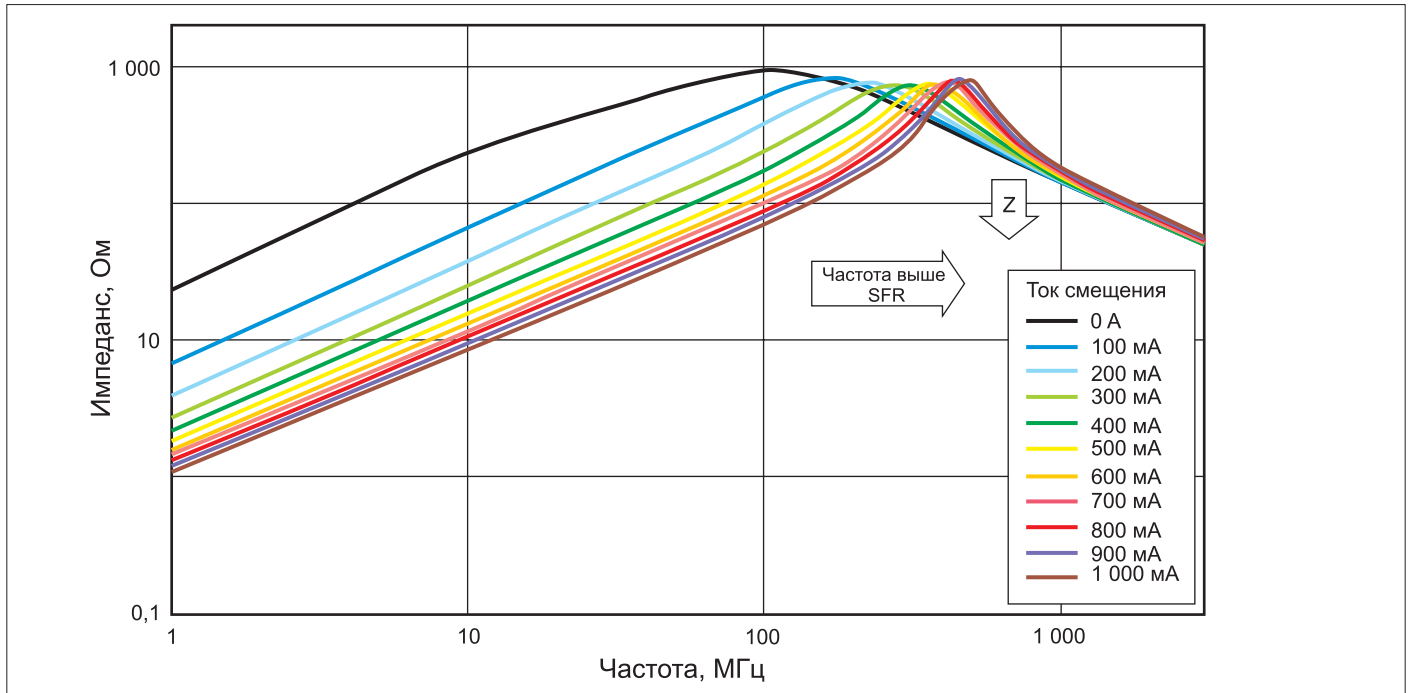


Рис. 8. Частотные характеристики ферритовой бусины при разных токах смещения

Помимо дифференциального шума, для подавления которого используется рассмотренный выше $L_F C_F$ -фильтр, существует синфазный шум. Этот шум, в основном, обусловлен токами, протекающими через паразитные межобмоточные емкости трансформатора импульсного источника питания, узла коммутации и паразитной емкостью между корпусом изделия и землей. Проблема усугубляется ростом рабочей частоты и уменьшением габаритов изделия. Как известно, величина электромагнитного поля ослабляется пропорционально квадрату расстояния от источника.

Для фильтрации синфазного шума используется синфазный дроссель (рис. 2) во входном каскаде ЭМП-фильтра. Правильно выбранный дроссель позволяет существенно уменьшить синфазный шум в широкой полосе вплоть до нескольких сотен МГц. При выборе синфазного дросселя необходимо оценить зависимость его импеданса от частоты. Пример такой зависимости для широкополосного дросселя приведен на рис. 6. Необходимо выбрать максимальный импеданс в требуемом диапазоне частот.

Наличие паразитных составляющих в элементах ЭМП-фильтра приводит к тому, что в полосе частот выше собственной резонансной частоты дросселя, обычно 85–100 МГц, ослабление шумов заметно ниже, чем на меньших частотах, и помехи могут превысить пороговые уровни, задаваемые стандартами ЭМС. Чтобы ослабить помехи в этом диапазоне частот, в ЭМП-фильтры вводится высокочастотный каскад, роль которого выполняет ферритовая бусина (рис. 2).

На рис. 7 показано ее влияние на работу ЭМП-фильтра. Хотя преобразователь работает в режиме расширенного спектра, соответствие требованиям стандартов ЭМС без ферритовой бусины не достигается (рис. 7а, б). Ее индуктивность невелика, но паразитные составляющие еще меньше, поэтому бусина отлично работает в диапазоне высоких частот вплоть до сотен МГц. Заметим, что ферритовая бусина подавляет дифференциальные помехи.

К сожалению, производители бусин, как правило, нормируют частотные характеристики при нулевом токе смещения, т. е. при отсутствии постоянной составляющей. На практике токи смещения почти всегда

наблюдаются вплоть до сотен мА. На рис. 8 показано, как в общем случае изменяются частотные характеристики ферритовой бусины при разных токах смещения. При выборе ферритовой бусины или нескольких бусин следует ориентироваться на выходной ток преобразователя. При этом токе смещения в требуемом диапазоне частот импеданс бусины должен быть наибольшим.

Мы проанализировали, каким образом компоненты фильтра влияют на его характеристики. Однако и сам ЭМП-фильтр влияет на устойчивость преобразователя и его динамические характеристики. Подробнее ознакомиться с влиянием ЭМП-фильтра на динамические характеристики преобразователя можно в [2].

Литература

1. The Engineer's Guide to EMI in DC-DC Converters (Part 10): Input Filter Impact on Stability.
2. The Engineer's Guide to EMI in DC-DC Converters (Part 11): Input Filter Impact on Dynamic Performance.

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 04'2020