

Сетевой фильтр — последний рубеж защиты импульсного источника питания

Штефан КЛЯЙН (Stefan KLEIN)
stefan.klein@we-online.de

При работе импульсного источника возникают кондуктивные помехи. Они могут передаваться в сеть, от которой питается этот источник. Поскольку к сети, как правило, подключено другое оборудование, помехи будут оказывать на него негативное воздействие. Сетевые фильтры подавляют генерируемые импульсным источником радиопомехи. Фильтр можно собрать из простых пассивных элементов: токоограничивающих дросселей и помехоподавляющих конденсаторов X- и Y-типа. В статье рассматривается конструкция однофазного сетевого фильтра.

Токовые помехи на входе импульсного источника питания

Паразитные токи приводят к возникновению напряжения радиопомех на всех элементах схемы. На схеме, представленной на рис. 1, показаны паразитные токи, протекающие в первичных цепях импульсного источника питания.

После включения устройства высокочастотный импульсный ток i_{DM} протекает по первичной цепи с рабочей частотой импульсного преобразователя, что вызывает дифференциальную помеху. Обусловленные быстрой коммутацией полупроводниковых ключей, обычно силовых МОП-транзисторов, возникают высокочастотные колебания, оказывающие паразитное воздействие. Ток дифференциальной помехи протекает от сети питания по цепи L через диодный мост, затем через первичную обмотку импульсного трансформатора, МОП-транзистор и по нейтральному проводнику N возвращается в сеть. Силовой МОП-транзистор греется в процессе работы, поэтому его устанавливают на радиатор. В свою очередь, радиатор соединен с проводником защитного заземления PE. Емкостная связь между

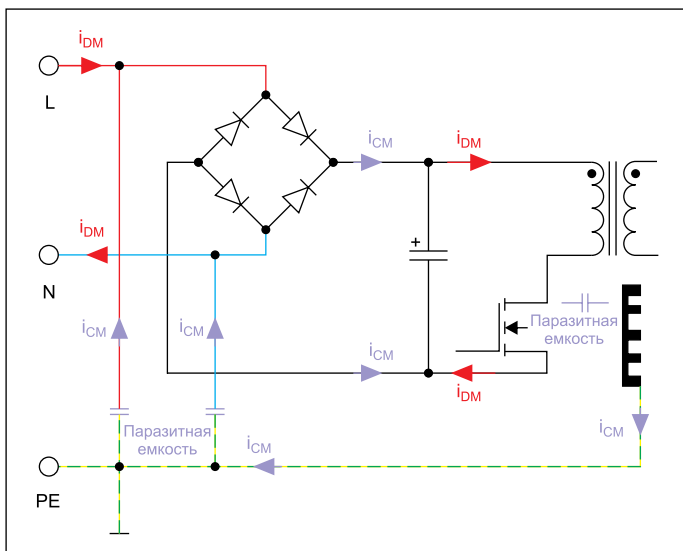


Рис. 1. Токи помех в первичных цепях импульсного источника питания

радиатором и МОП-транзистором приводит к возникновению тока утечки, что создает синфазную помеху. Емкостный ток синфазной помехи i_{CM} протекает по цепи заземления PE к входу источника питания, где через емкостную связь возвращается по фазному L и нейтральному N проводникам. Далее ток синфазной помехи i_{CM} протекает через диодный мост и МОП-транзистор, откуда он снова через емкостную связь с радиатором попадает на проводник заземления PE.

Расчетный уровень помехи

Напряжение, выпрямленное диодным мостом, подается на импульсный преобразователь. Максимальное значение выпрямленного напряжения составляет:

$$V_p = 230\sqrt{2} = 325 \text{ В.} \quad (1)$$

Частота преобразования рассматриваемого импульсного источника питания (f_{CLK}) равна 100 кГц, что соответствует периоду тактового сигнала $T = 10$ мкс. Длительность импульса — 2 мкс. Определим коэффициент заполнения:

$$D = t_{on}/T = 2/10 = 0,2. \quad (2)$$

Допустим, что импульс тока, протекающего через диодный мост, имеет трапециевидную форму, сетевой фильтр не установлен. Сначала, не используя преобразование Фурье, рассчитаем первую вершину огибающей амплитуды:

$$n_{co1} = 1/\pi D = 1/3,14 \times 0,2 = 1,592. \quad (3)$$

Далее получаем частоту для этой вершины:

$$f_{co1} = n_{co1} \times f_{CLK} = 1,592 \times 100 = 159,2 \text{ кГц.} \quad (4)$$

Отсюда можно определить амплитуду первой гармоники:

$$c_1 = 2V_p/\pi n_{co1} = (2 \times 325)/(1,592 \times 3,14) = 130 \text{ В.} \quad (5)$$

Предположим, что паразитная емкость C_p между импульсным источником питания и «землей» равна 20 пФ. Тогда можно определить ток первой гармоники синфазной помехи:

$$I_{cm1} = \frac{2\pi \times f_{col} \times C_p \times c_1}{\sqrt{(50\pi \times f_{col} \times C_p)^2 + 1}} = \frac{2 \times 3,14 \times 159,2 \times 10^3 \times 20 \times 10^{-12} \times 130}{\sqrt{(50 \times 3,14 \times 159,2 \times 10^3 \times 20 \times 10^{-12})^2 + 1}} = 2,6 \text{ mA.} \quad (6)$$

Напряжение радиопомехи измеряется при помощи эмулятора сети и приемника ЭМП. При параллельном соединении входного сопротивления измерительного приемника ЭМП (50 Ом) и выходного сопротивления эмулятора сети (50 Ом) общий импеданс схемы Z составит 25 Ом. Напряжение радиопомехи V_{cm} можно определить по формуле:

$$V_{cm} = Z \times I_{cm1} = 25 \times 2,6 \times 10^{-3} = 0,065 \text{ V.} \quad (7)$$

При переводе в другие единицы — децибелы на микровольты — получим:

$$V_{cm} = 20 \log(0,065/10^{-6}) = 96,26 \text{ дБ·мкВ.} \quad (8)$$

По результатам расчета ожидаемая радиопомеха имеет высокий уровень. Воспользуемся для оценки предельно допустимыми уровнями излучений по стандарту EN 55022. В частотном диапазоне от 0,15 до 0,5 МГц определен квазицикловый уровень предельно допустимого излучаемого сигнала от 56 до 66 дБ·мкВ. На рис. 2 показан график измеренного напряжения кондуктивной радиопомехи импульсного источника питания без сетевого фильтра. Измерения подтверждают необходимость использования сетевого фильтра.

Конструкция сетевого фильтра

На рис. 3 представлена электрическая принципиальная схема типового однофазного сетевого фильтра. Компания Würth Elektronik предлагает для установки в сетевые фильтры несколько типов синфазных дросселей, например серии WE-CMB. Синфазный дроссель обычно состоит из ферритового (MnZn) тороидального сердечника, на котором встречно намотаны две симметричные обмотки. На рис. 4 показана конструкция дросселя WE-CMB. Таким образом, WE-CMB работает как фильтр, ограничивая значение тока. Для импульсных источников питания следует использовать синфазные дроссели с низкой частотой собственного резонанса, поскольку преобразователи таких источников работают на низкой частоте. Низкая частота собственного резонанса обеспечивает высокое ослабление в области низких частот.

В данном случае был выбран дроссель WE-CMB XS (39 мГн). На рис. 5 изображены кривые ослабления помех для импеданса системы 50 Ом.

При расчете фильтра необходимо учитывать разницу между кривыми ослабления

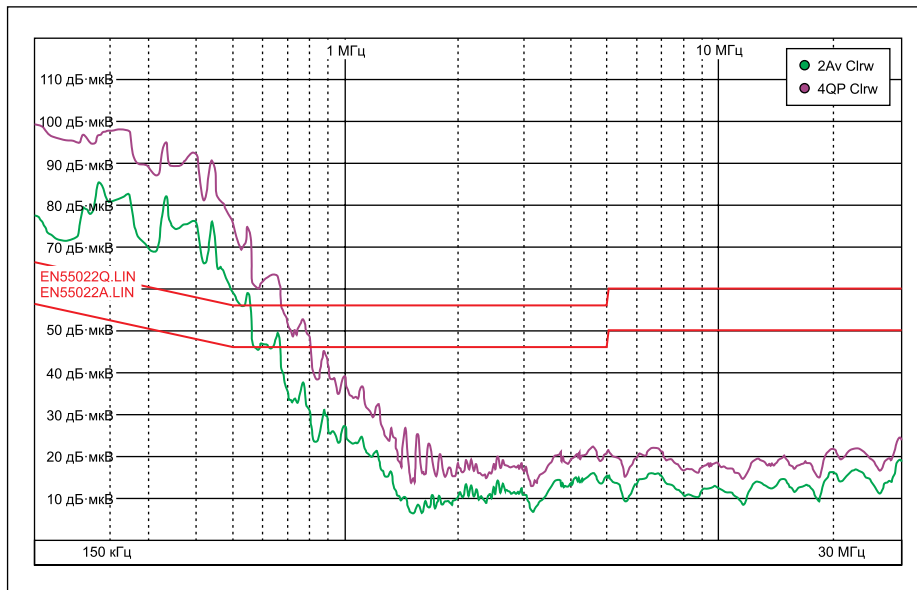


Рис. 2. Напряжение радиопомех импульсного источника питания без сетевого фильтра

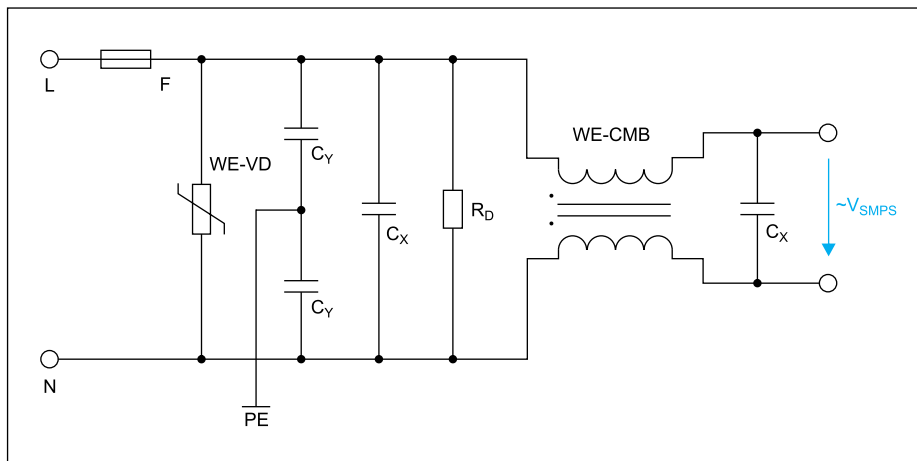


Рис. 3. Однофазный сетевой фильтр

помех: синфазной (черная линия) и дифференциальной (красная штриховая линия). При фильтрации токов синфазной помехи максимальное ослабление дросселя WE-CMB приходится на частоту 150 кГц. Однако значение ослабления падает с повышением частоты. Поскольку фильтр должен подавлять помехи вплоть до 30 МГц, для формирования соответствующей АЧХ необходимы помехоподавляющие конденсаторы X- и Y-типа. Конденсаторы X-типа включаются в схему до и после дросселя, чтобы подавлять токи дифференциальной помехи со стороны сети и со стороны импульсного источника питания. Индуктивность рассеяния дросселя WE-CMB в совокупности с емкостью конденсатора X-типа образует ФНЧ, ослабляющий токи дифференциальной и синфазной помех. В этом примере были выбраны два конденсатора X-типа емкостью 330 нФ. Частота их собственного резонанса составляет около 2 МГц.

Из соображений безопасности со стороны сети в схему необходимо ввести резистор

для разрядки конденсатора при отключении питания. Также перед фильтром следует включить варистор, защищающий схему от перенапряжений в питающей сети. Для



Рис. 4. Конструкция дросселя WE-CMB

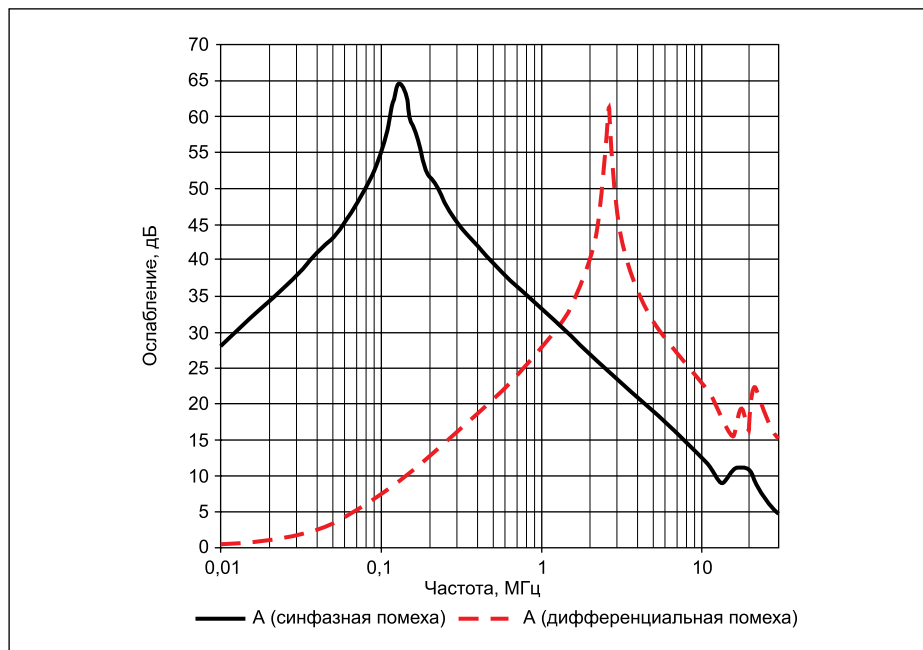


Рис. 5. АЧХ дросселя WE-CMB XS 39 мГн

этого подходит дисковый варистор серии WE-VD от Würth Elektronik. Еще необходимо предусмотреть защиту от перегрузки. Предохранитель, защищающий от перегрузки, нужно включить в цепь перед варистором. Предохранитель обеспечит отключение в случае срабатывания (короткого замыкания) варистора. Конденсаторы Y-типа служат для дополнительного ослабления токов синфазной помехи. В сочетании с дросселем WE-CMB они сглаживают пик АЧХ на резонансной частоте f_0 , определяемой по формуле Томсона:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}. \quad (9)$$

Для достижения допустимого минимума радиопомех 66 дБ·мкВ (на частоте 150 кГц) необходимо ослабление на 40 дБ, то есть в десять раз при пересчете из логарифмических единиц. При расчете емкости конденсаторов Y-типа в качестве резонансной частоты нужно взять значение частоты преобразования с коэффициентом 0,1. Из предыдущей формулы получаем искомую емкость:

$$C_Y = \frac{1}{\left(2\pi \frac{f_{CLK}}{10}\right)^2 \times L_{CMB}} = \frac{1}{\left(2 \times 3,14 \frac{100 \times 10^3}{10}\right)^2 \times 39 \times 10^{-3}} = 6,5 \text{ нФ}. \quad (10)$$

Так как требуется два конденсатора Y-типа, полученное значение емкости делим на два. Конденсаторы Y-типа обеспечивают протекание

токов синфазной помехи от импульсного источника питания обратно на защитное заземление. Допустимое значение тока утечки через защитное заземление находится в пределах от 0,25 до 3,5 мА, в зависимости от типа устройства, поэтому использование конденсаторов емкостью выше 4,7 нФ недопустимо. В данном случае были выбраны два конденсатора по 2,2 нФ из ряда номиналов E 12. На рис. 6 отражены характеристики с применением такого сетевого фильтра.

Оборудование с этим сетевым фильтром соответствует требованиям электромагнитной совместимости. Наименьшее отклонение уровня сигнала к помехе составляет 10 дБ (для квазипиковых значений) и наблюдается на самой низкой частоте —

150 кГц. Квазипиковые и средние значения существенно ниже предельного допустимого уровня во всем частотном диапазоне.

Оптимизация сетевого фильтра

Дополнительно можно снизить уровень низкочастотных помех. Для этого вместо двух конденсаторов X-типа емкостью 330 нФ нужно использовать два конденсатора по 1,5 мкФ. На рис. 7 отражены характеристики оптимизированного таким образом сетевого фильтра.

Увеличение емкости снизило уровень радиопомех на 15 дБ в диапазоне низких частот. Оптимизированный сетевой фильтр обеспечил подавление помех в более широком диапазоне.

Недооценка роли синфазного дросселя

Зачастую предпринимаются попытки создания сетевых фильтров только с использованием конденсаторов X- и Y-типа с целью сэкономить на синфазном дросселе. Это противоречит принципу построения сетевого фильтра как устройства, имеющего высокое сопротивление на частоте помехи. В качестве эксперимента была измерена характеристика сетевого фильтра без синфазного дросселя. На рис. 8 отражены результаты измерений.

Как и ожидалось, уровень помех в диапазоне низких частот без дросселя WE-CMB существенно возрастает. На частоте 200 кГц квазипиковое значение достигает приблизительно 78 дБ·мкВ, а среднее значение — 60 дБ·мкВ. Допустимый уровень помех превышен как по квазипиковому, так и по среднему значению в диапазоне вплоть до 600 кГц. Без синфазного дросселя сетевой фильтр не справляется со своей задачей.

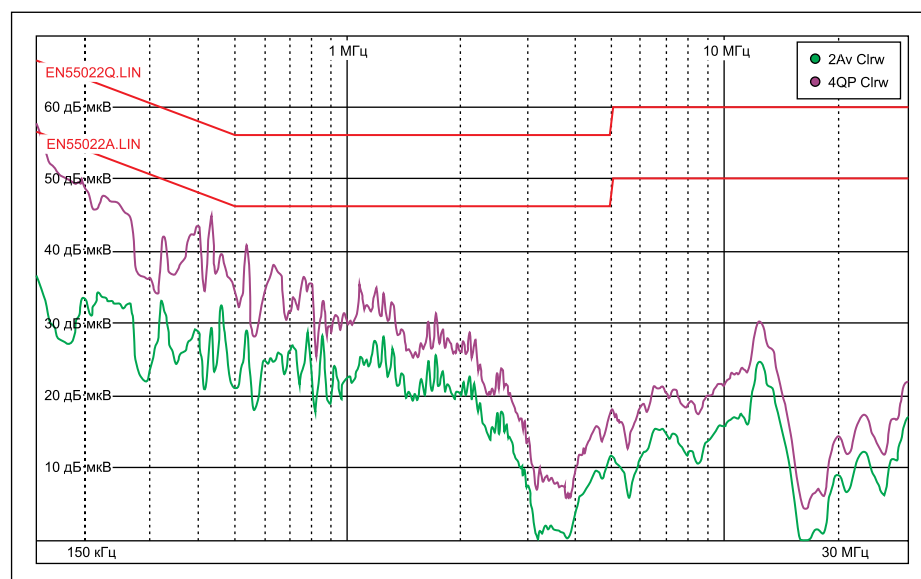


Рис. 6. Напряжение радиопомех с сетевым фильтром

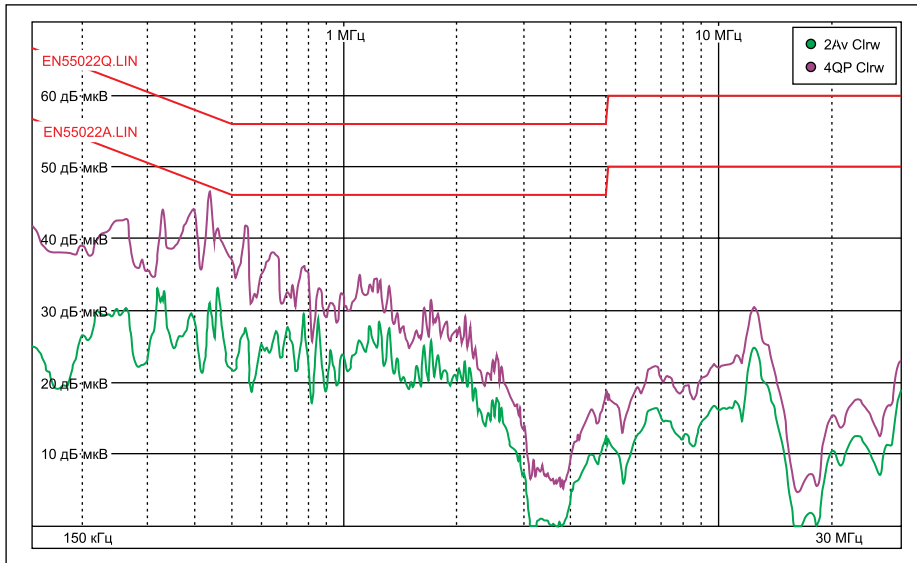


Рис. 7. Напряжение радиопомех с оптимизированным сетевым фильтром

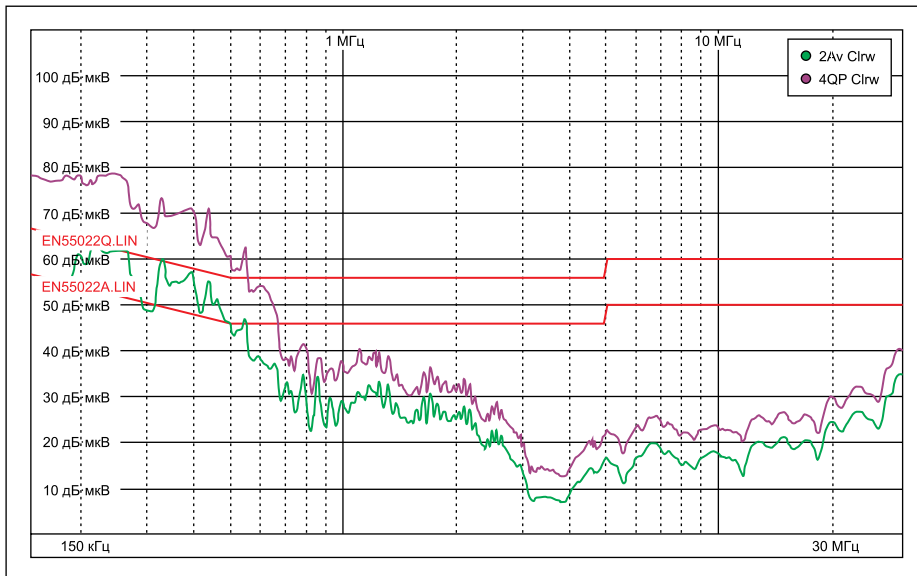


Рис. 8. Напряжение радиопомех сетевого фильтра без синфазного дросселя WE-CMB

Дополнительный фильтр для защиты от дифференциальных помех

В случае когда дроссели WE-CMB и конденсаторов X-типа недостаточно для подавления дифференциальной помехи, необходимо применение дополнительного фильтра, состоящего из двух дросселей, включенных последовательно в цепи фазного и нейтрального проводников. На рис. 9 показана принципиальная схема такого фильтра.

Для применения в качестве дополнительного фильтра дифференциальных помех подходят дроссели серий WE-TI HV, WE-PD2 HV или WE-SD от Würth Elektronik. Дроссели серии WE-UKW рекомендованы для защиты от высокочастотных помех. Для расчета параметров дросселя используется уравнение Томсона. Если каждый дроссель должен обе-

спечивать ослабление 40 дБ/дек., в вычислениях следует использовать значение частоты преобразования с коэффициентом 0,1.

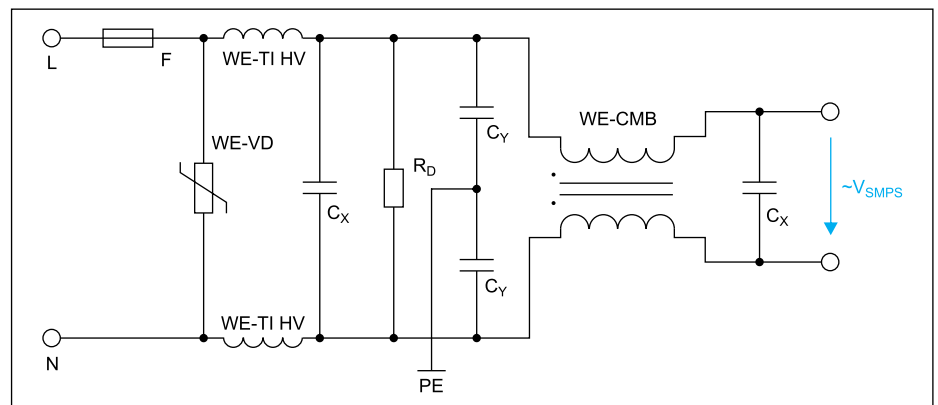


Рис. 9. Сетевой фильтр с синфазным дросселем WE-CMB и двумя дросселями WE-TI HV

Определенную ранее емкость конденсаторов X-типа можно использовать при расчете индуктивности дросселей защиты от дифференциальной помехи:

$$L_{DM} = \frac{1}{\left(2\pi \frac{f_{CLK}}{10}\right)^2 C_X} = \frac{1}{\left(2 \times 3,14 \frac{100 \times 10^3}{10}\right)^2 \times 330 \times 10^{-9}} = 768 \text{ мкГн.} \quad (11)$$

Так как дроссели устанавливаются в паре, расчетное значение нужно разделить на два. Выбираем дроссель по ряду номиналов с индуктивностью, немного больше расчетной, — WE-TI HV (470 мкГн). Необходимо удостовериться, что номинальный ток I_R выбранного дросселя с запасом превосходит номинальный входной ток импульсного источника питания.

Результат применения сетевого фильтра

В заключение еще раз напомним о неэффективности применения сетевого фильтра без синфазного дросселя, если этот фильтр предназначен для импульсного источника питания. Одних только конденсаторов недостаточно для эффективного подавления помех. Использование последовательно включенных дросселей перед сетевым фильтром является дополнительной защитой от дифференциальной помехи. Применяя сетевой фильтр, вы снижаете помехи до уровня допустимых, таким образом можно достичь соответствия параметров импульсного источника питания требованиям электромагнитной совместимости. ■

Литература

1. Брэндер Т., Герфер А., Рэлл Б., Зенкер Х. Трилогия магнетиков. Руководство по применению фильтров ЭМП, импульсных источников питания и ВЧ-устройств. Würth Elektronik eiSos GmbH & Co. KG. 2010.