

# Расчет фильтра синфазной помехи ИВЭП для схем с ШИМ

**В статье показан инженерный подход к расчету параметров типовой схемы входного фильтра ИВЭП (синфазной помехи), основанный на условии удовлетворения требованиям стандарта по электромагнитной совместимости спектрального состава образующегося сигнала помехи на гармониках, кратных основной в ИВЭП с ШИМ.**

**Дмитрий Бердников,  
к. т. н.**

berdnikov@continent-tm.ru

### Постановка задачи

При разработке импульсных источников вторичного электропитания (ИВЭП) серьезной задачей становится обеспечение электромагнитной совместимости этих устройств с другой аппаратурой. В силу своего принципа действия, импульсный ИВЭП является источником разнообразных электромагнитных помех. Уровни таких помех должны удовлетворять требованиям соответствующих стандартов. В данной статье рассмотрен аспект этой проблемы, касающийся кондуктивных помех, которые отдает ИВЭП в питающую сеть.

Зарубежные стандарты — CISPR22, EN55022 и другие — определяют допустимый уровень помех в полосе частот 150 кГц — 30 МГц для двух классов аппаратуры: Class A — для использования в промышленности, Class B — для использования в быту (более жесткие требования). Основным отечественным стандартом, нормирующим уровни кондуктивных помех для стабилизированных ИВЭП и методы их измерений, является [1]. Уровням Class A и Class B в [1] соответствуют уровень D и уровень B (таблицу).

Таблица

| Частота     | Напряжение радиопомех, дБ (мкВ) |                     |
|-------------|---------------------------------|---------------------|
|             | Уровень D (Class A)             | Уровень B (Class B) |
| 150 кГц     | 79                              | 66                  |
| 150–500 кГц | 79                              | 56–66               |
| 0,5–5 МГц   | 73                              | 56                  |
| 5–30 МГц    | 73                              | 60                  |

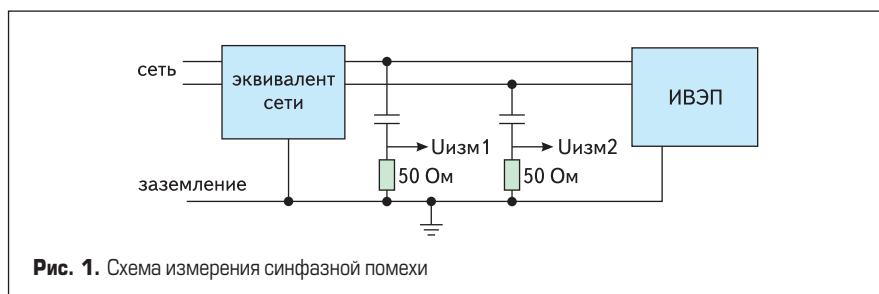


Рис. 1. Схема измерения синфазной помехи

Методика измерения синфазной помехи в указанной полосе частот согласно [1] сводится, по сути, к измерению падения напряжения на входных зажимах ИВЭП относительно корпуса на тестовых подгружающих резисторах номиналом 50 Ом (рис. 1). При этом по постоянному напряжению измерительная цепь отвязана от цепей питания конденсатором (0,25 мкФ для уровней потребляемого тока до 25 А либо 0,1 мкФ для уровня свыше 25 А), а влияние импеданса питающей цепи на измеряемые характеристики в области интересующих частот исключается при помощи так называемого эквивалента сети. Применение эквивалента сети также ослабляет возможное влияние помех от самой питающей сети.

Измерения производят при помощи измерителя радиопомех, имеющего входное сопротивление 50 Ом, поочередно для каждого из питающих выводов. Одно из показанных на рис. 1 сопротивлений 50 Ом отображает в этом случае входное сопротивление измерителя, а другое является подгрузочным. Переключения измерителя и подгрузочного резистора производятся с помощью коммутирующих цепей, не показанных для простоты на рисунке.

Испытания на электромагнитную совместимость, в том числе кондуктивных помех, производятся на сертифицированном оборудовании и требуют определенных финансовых затрат. Поэтому еще на этапе разработки ИВЭП необходимо учитывать основные факторы, влияющие на результаты подобных испытаний. Одним из основных источников синфазных помех в ИВЭП в полосе частот 150 кГц — 30 МГц являются процессы, связанные с самим принципом действия ИВЭП с ШИМ, а именно наличие тактовой частоты преобразования и ее высших гармоник в измеряемом сигнале. Другим заметным фактором могут быть коммутационные процессы, происходящие в ключевых элементах ИВЭП, — они могут проявиться в области высоких частот диапазона. Цель настоящей статьи — показать возможность расчета уровней синфазной помехи для основной гармоники и ряда высших гармоник преобразователя с ШИМ (то есть с постоянной частотой), для того чтобы учесть как минимум первый указанный фактор при проектировании фильтра синфазной помехи ИВЭП.

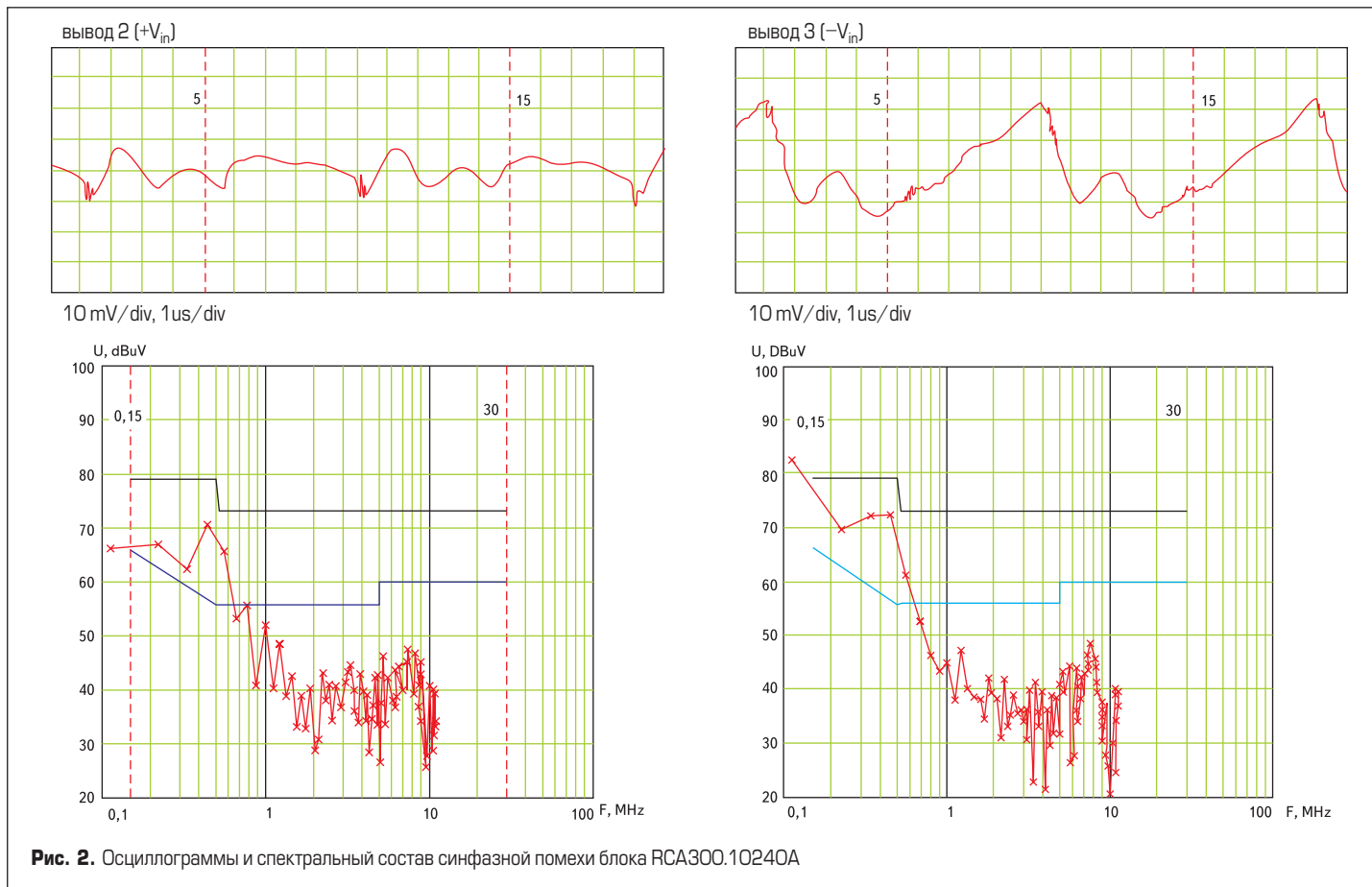


Рис. 2. Осциллограммы и спектральный состав синфазной помехи блока RCA300.10240A

**Практическая методика измерения синфазной помехи**

Специальное, особенно сертифицированное оборудование для измерения синфазной помехи не всегда доступно инженеру при исследовании макетов ИВЭП на этапе разработки. Однако для приблизительной оценки уровней помех в области относительно низких частот можно использовать более доступные средства — например, цифровой осциллограф. Идея состоит в том, чтобы оцифровать осциллограммы напряжения на тестовых резисторах, являющиеся периодическими сигналами, а затем рассчитать их гармонический состав посредством преобразования Фурье.

На рис. 2 показаны осциллограммы напряжения  $U_{изм1}$  и  $U_{изм2}$  относительно заземления (согласно рис. 1) для блока RCA300.10240A [2] при следующих параметрах:  $V_{in} = 60\text{ V}$ ,  $V_o = 24\text{ V}$ ,  $I_o = 1,25\text{ A}$ . Данный блок питается от сети постоянного напряжения, но имеет в своем составе фильтр синфазной помехи. Там же показан спектральный состав измеренных сигналов, рассчитанный с помощью преобразования Фурье до частоты, равной половине от частоты дискретизации оцифрованного сигнала (в данном случае до 12,5 МГц).

На рис. 2 черным цветом показана ограничительная кривая по Class A, а синим цветом — по Class B. Как видно из рисунка, наиболее критичный диапазон с точки зрения удовлетворения требованиям стандарта — первые пять гармоник частоты преобразования (однако первая гармоника, чуть выше 100 кГц, не попадает еще в интересующий нас диапазон частот). Следует отметить, что различие в осциллограммах и спектрах сигналов,

снятых на разных выводах блока, связано с отсутствием фильтра дифференциальной помехи в его составе, так что сигнал дифференциальной помехи в первом случае (осциллограмма слева) вычитается из сигнала синфазной помехи, а во втором случае (справа) складывается с ним. Тем не менее и в том, и в другом случае блок не удовлетворяет требованиям по Class B, но «проходит» по Class A.

**Определение источников синфазной помехи**

**Учет дифференциальной составляющей**

При отсутствии специального фильтра дифференциальной помехи в ИВЭП, ее доля в синфазной составляющей, отдаваемой в сеть, может быть весьма существенной (пример см. выше). Источником помехи можно считать напряжение  $U_{диф}$  — напряжение на входе ИВЭП (после фильтра). Здесь L1, C1, C2 составляют стандартную схему фильтра синфазной помехи. При этом дифференциальная составляющая без помех проходит через дроссель синфазного фильтра и выделяется с соответствующим знаком на делителе напряжения, образованном тестовыми резисторами (рис. 3). Разделительные конденсаторы

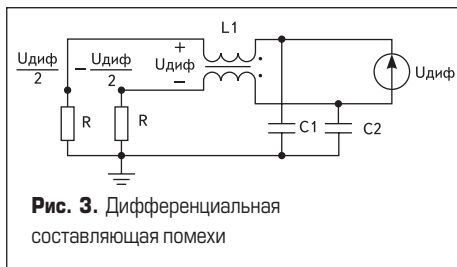


Рис. 3. Дифференциальная составляющая помехи

не показаны, так как их импедансом в рассматриваемой полосе частот можно пренебречь.

Напряжение  $U_{диф}$  может быть достаточно хорошо определено исходя из анализа электрических процессов в преобразователе, в частности в качестве  $U_{диф}$  может быть принята высокочастотная пульсация на входном конденсаторе, входящем в состав ИВЭП. Как можно видеть, дифференциальная составляющая совершенно не подавляется синфазным фильтром и может присутствовать в измеряемом сигнале в результате применения методики измерения из [1]. Хороший метод исключения этой составляющей из сигнала помехи — применение дополнительного фильтра дифференциальной помехи (в простейшем случае LC-фильтра).

**Учет синфазной составляющей**

Однако основной составляющей помехи относительно заземления (особенно при хорошем фильтре дифференциальной помехи) служит именно синфазная помеха — то есть помеха, одинаковая для обоих входных выводов ИВЭП в заданном частотном диапазоне. Для данного случая справедлива схема замещения, показанная на рис. 4.

Сигнал помехи  $U_{сиф}$  выделяется на Y-конденсаторах фильтра (для данной схемы заме-

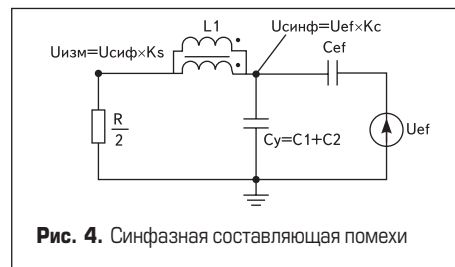
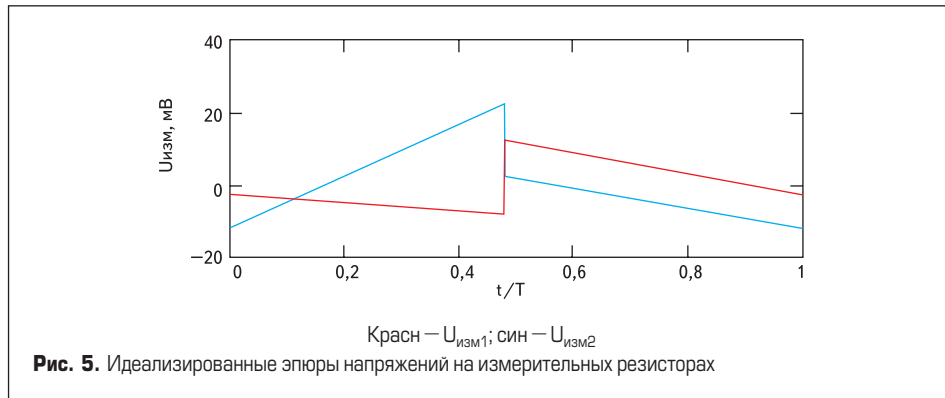


Рис. 4. Синфазная составляющая помехи



щения они оказываются включенными параллельно), в результате деления напряжения некоего эффективного источника помехи  $U_{ef}$  емкостным делителем с коэффициентом передачи (1), верхнее плечо которого образует эффективная емкость  $C_{ef}$ .

$$K_c = \frac{1}{1 + \frac{C_y}{C_{ef}}} \quad (1)$$

Чем больше суммарная емкость Y-конденсаторов  $C_y$  по сравнению с  $C_{ef}$ , тем меньше напряжение помехи. Отметим, что ограничения на увеличение емкости Y-конденсаторов накладывают стандарты безопасности, нормирующие максимально допустимый ток утечки. Далее сигнал помехи фильтруется LR-фильтром с коэффициентом передачи (2), составленным из индуктивности синфазного дросселя L1 и тестовых сопротивлений R, соединенных параллельно, согласно схеме замещения (рис. 4).

$$K_s = \frac{1}{1 + p \frac{L_s 2}{R}} \quad (2)$$

Задача определения  $U_{эф}$  и  $C_{эф}$  в общем случае нетривиальна. Ее решение будет зависеть от примененных схемы ИВЭП, компонентов, конструкции и технологии. В простейшем случае  $C_{эф}$  определяется межобмоточной емкостью трансформатора, а  $U_{эф}$  — напряжением, приложенным между его обмотками. Очевидно, что чем больше индуктивность дросселя L1, тем сильнее подавляется синфазная помеха.

**Примеры расчета**

**Расчет в одной точке**

В качестве первого примера рассмотрим расчет уровня синфазной помехи для преобразователя, экспериментальные характеристики которого были показаны на рис. 2. В данном случае ставится скорее задача анализа — для проверки методики и сравнения с экспериментальными результатами.

В этом случае сначала была рассчитана синфазная составляющая сигнала помехи  $U_{синф}$  (рис. 4), являвшаяся для данного режима прямоугольными импульсами напряжения с размахом (от пика до пика)  $dU1$  (3), где  $V_{in}$ ,  $V_o$  — входное и выходное напряжения преобразователя,  $w1$ ,  $w2$  — числа витков в первичной и вторичной обмотках трансформатора.

Преобразователь — обратногоходовой, работающий при данном  $V_{in}$  в режиме непрерывного тока и скважностью  $G = t_n/T$ .

$$dU1 = \left[ V_{in} \left( 1 - \frac{w2}{w1} \right) + V_o \left( \frac{w1}{w2} - 1 \right) \right] K_c \quad (3)$$

Затем сигнал  $U_{синф}$  раскладывался на гармоники с помощью процедуры быстрого преобразования Фурье и умножался на коэффициент передачи фильтра  $K_s$  (2). После этого полученный сигнал восстанавливался во временной области с помощью обратного быстрого преобразования Фурье. Таким образом была получена синфазная составляющая в измеряемом сигнале.

После этого к полученному сигналу была прибавлена с соответствующим знаком дифференциальная составляющая (рис. 3), определенная как произведение тока во входном конденсаторе преобразователя на его ESR (эквивалентное последовательное сопротивление). Дифференциальная составляющая в этом случае определялась по (4), где  $I_0$  — начальное значение тока первичного ключа преобразователя, L — индуктивность намагничивания. Отметим, что начальное значение тока  $I_0$  в данном случае было близко к нулю, то есть блок был близок к граничному режиму. Также следует отметить: сложение сигналов на тестовых резисторах производилось без учета их постоянных составляющих, что позволило существенно упростить расчеты во временной области. В результате были получены идеализированные эпюры напряжений на измерительных резисторах (рис. 5), которые можно сравнить с экспериментальными осциллограммами (рис. 2):

при  $0 < t < GT$ ,  $U_{эф} = - \left( I_0 + \frac{V_{in}}{w1^2} \frac{1}{L} t \right) ESR$

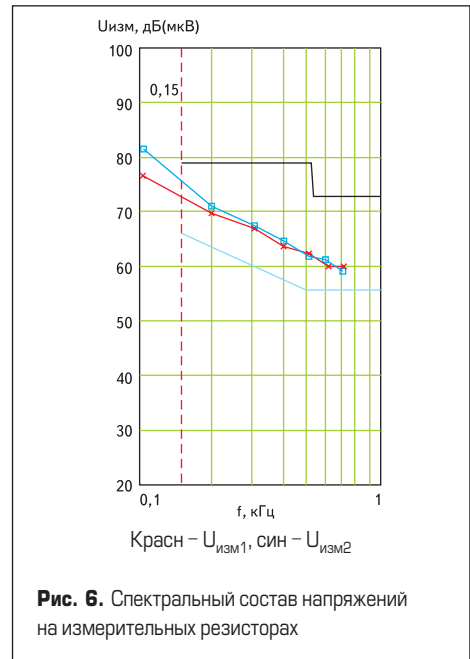
где

$$I_0 = \frac{1}{w1} \left[ I_o \left( \frac{V_o}{V_{in}} \right) w1 + w2 \right] - \frac{1}{2} \frac{V_{in}}{w1^2} \frac{T}{L} G \quad (4)$$

при  $GT < t < T$   $U_{эф} = 0$ .

Спектральный состав (до 7-й гармоники) этих временных характеристик представлен на рис. 6. Несмотря на некоторые отличия от характеристик, вычисленных по экспериментальным данным, можно утверждать, что в первом приближении расчет дает правильные результаты.

В заключение приведем значения всех параметров, использованных при расчетах данного примера:



- $V_{in} = 60$  В — входное напряжение преобразователя;
- $V_o = 24$  В — выходное напряжение преобразователя;
- $I_o = 1,25$  А — выходной ток преобразователя;
- $w1 = 60$ ,  $w2 = 27$  — витки трансформатора;
- $T = 10$  мкс — период коммутации;
- $G = 0,48$  — коэффициент заполнения (скважность);
- $C_{ef} = 62$  пФ — межобмоточная емкость трансформатора;
- $C_y = 4,4$  нФ — суммарная емкость Y-конденсаторов;
- $L_s = 3,8$  мГн — индуктивность синфазного дросселя;
- $L = 40$  нГн — индуктивность намагничивания силового трансформатора, приведенного к единичному витку;
- $ESR = 20$  мОм — эквивалентное последовательное сопротивление входного конденсатора;
- $I_0 = 0,06$  А — значение тока первичного ключа преобразователя при  $t = 0$ ;
- $R = 50$  Ом — номинал тестового резистора.

**Расчет при вариации параметров**

Расчет в одной точке не всегда удовлетворяет разработчика, так как параметры преобразователя (например, входное напряжение) могут меняться. На основе знания о характере влияния тех или иных параметров разработчик может сделать окончательный выбор параметров фильтра синфазной помехи.

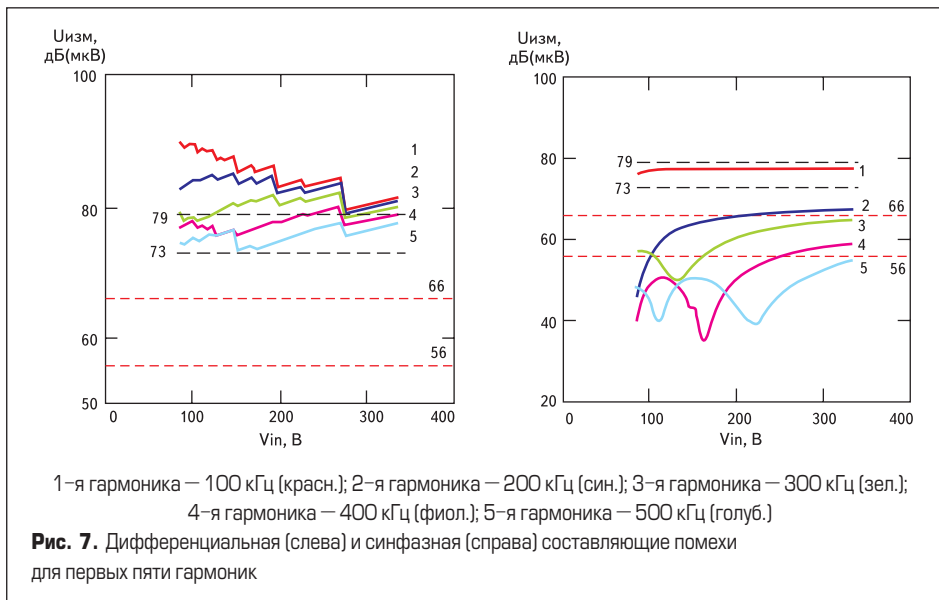
Для примера рассмотрим, как будут меняться гармонический состав дифференциальной и синфазной составляющих помехи, измеряемой на тестовом резисторе, в зависимости от питающего напряжения ИВЭП. Данный пример касается серии ИВЭП, рассчитанных на расширенный диапазон входного напряжения (85–342 V<sub>dc</sub>) и выходную мощность 30 Вт. Для этой серии ИВЭП был сделан расчет зависимости амплитуд первых пяти гармоник, измеряемых на тестовом резисторе (рис. 1), от входного напряжения преобразователя. На рис. 7 показаны результаты этого расчета

для наихудшего случая в ряду выходных напряжений ( $V_o = 5 В$ ).

Из рисунка видно, что в части дифференциальной составляющей блок не может удовлетворять требованиям ГОСТ [1] и необходимо введение фильтра дифференциальной помехи. В части синфазной помехи при использовании синфазного дросселя номиналом 8,2 мГн блоки попадают в Class A (промышленное применение). Выход из группы Class B происходит на второй гармонике при  $V_{in} > 200 В$ . Увеличение индуктивности синфазного дросселя на 20% позволит согласно расчету удовлетворить требованиям Class B (бытовое применение).

**Заключение**

Для схем с ШИМ достаточно просто, еще на этапе проектирования ИВЭП, оценить с помощью предложенной методики — удовлетворяет ли выбранный фильтр синфазной помехи заданному классу по ЭМС в части кондуктивных электромагнитных помех. Рассмотренная методика излагалась для простоты на примере питания ИВЭП от источника постоянного напряжения, однако ее можно распространить и на синусоидальный питающий источник, исходя из конкретных условий применения. Например, можно было бы учесть влияние



высших гармоник выпрямленного питающего напряжения на состав сигнала помехи (для случая относительно высокой частоты питающей сети и относительно низкой частоты преобразователя) либо оценить интервалы, в которые происходит передача помех в питающую сеть (например, для мостового выпрямителя). Однако в любом случае данный вопрос выходит за рамки статьи.

**Литература**

- ГОСТ Р 51527-99 (МЭК 60478-3-89). Совместимость технических средств электромагнитная. Стабилизированные источники питания постоянного тока. Кондуктивные электромагнитные помехи. Нормы и методы испытаний.
- [www.continent-tm.ru](http://www.continent-tm.ru)