

# ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЕ ПОМЕХИ В ИМПУЛЬСНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯХ

ВЛАДИМИР КАЛИНОВ, разработчик

В статье рассматриваются основные виды электромагнитных помех, генерируемых AC/DC- и DC/DC-преобразователями, а также описываются основные методы их уменьшения. Эту публикацию можно считать кратким справочником по решению задач электромагнитной совместимости.

## ВВЕДЕНИЕ

Как правило, AC/DC- и DC/DC-преобразователи являются одними из главных источников помех. Мы рассмотрим основные причины появления помех и некоторые рекомендации по их уменьшению. Требования по электромагнитной совместимости задаются в зарубежных и аналогичных им российских стандартах. Международные стандарты разрабатываются Международным специальным комитетом по радиопомехам (CISPR) и Европейским комитетом по стандартизации (CEN), который создает европейские

стандарты (EN). К основным международным стандартам, которые ограничивают уровень электромагнитных помех, относятся следующие.

- EN 55022/CISPR 22 Information Technology Equipment – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement. Ему соответствует российский стандарт [1].
- CISPR 25 Vehicles, boats and internal combustion engines – Radio disturbance characteristics – Limits and methods of measurement for protection of on-board receivers. Аналогом является российский стандарт [2].

- EN 55032/CISPR 32 Electromagnetic compatibility of multimedia equipment – Emission requirements. С ним гармонизирован российский стандарт [3].

## ВИДЫ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ПОМЕХ И СПОСОБЫ ИХ ОСЛАБЛЕНИЯ

Помехи в AC/DC- и DC/DC-преобразователях можно разделить на дифференциальные и синфазные. На рисунке 1 схематично показаны области распространения помех этих видов и схема их измерения. Для того

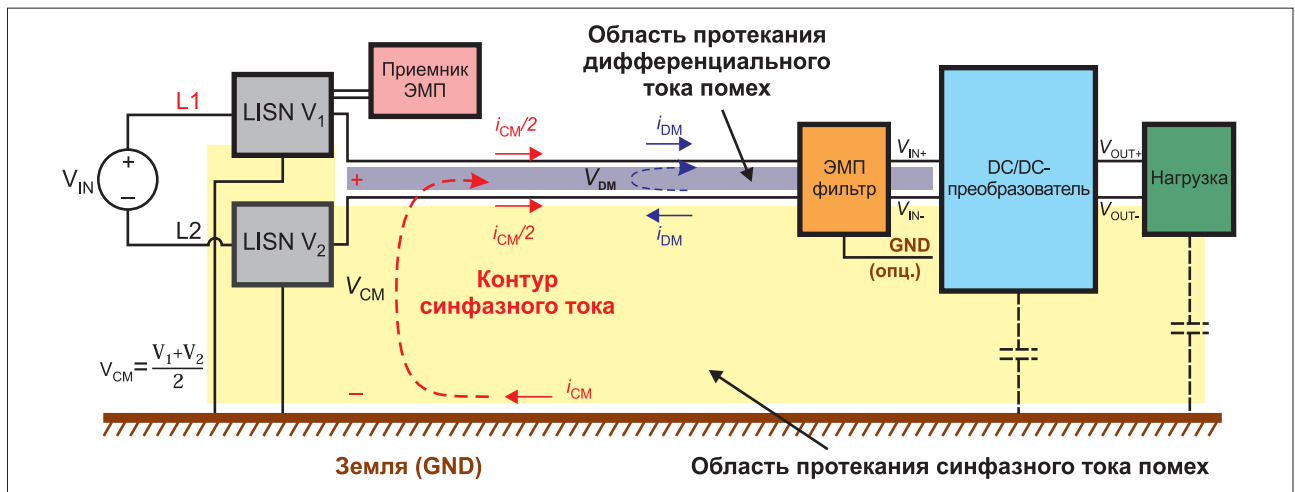


Рис. 1. Синфазные и дифференциальные помехи

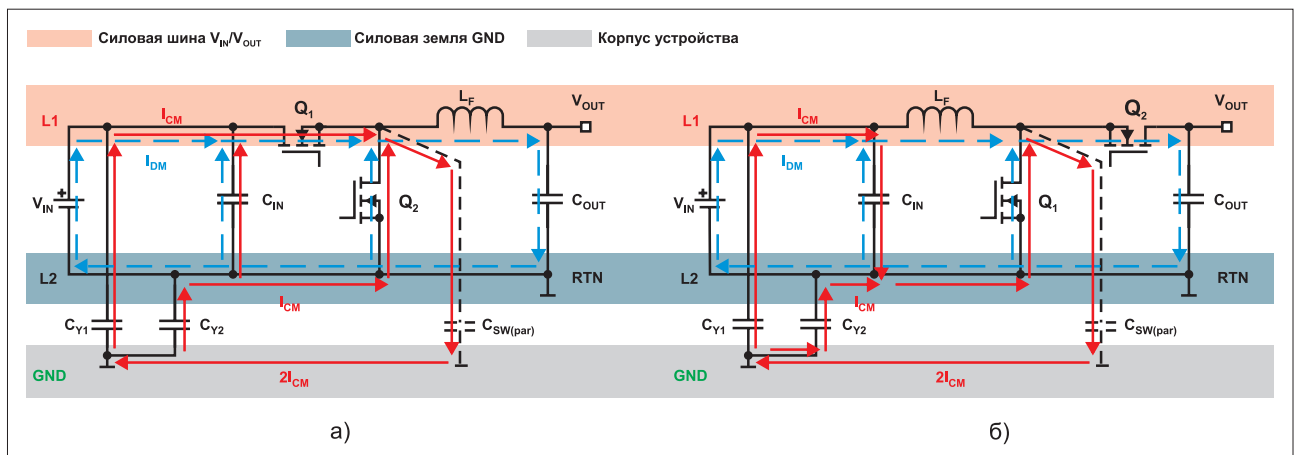


Рис. 2. Синфазные и дифференциальные электромагнитные помехи в: а) понижающем; б) повышающем DC/DC-преобразователях

чтобы избавиться от влияния сети и измерить электромагнитные помехи, генерируемые только AC/DC- или DC/DC-преобразователем, используется эквивалент сети (LISN), позволяющий значительно ослабить нестабильность импеданса сети и помехи, проникающие из сети.

Механизм возникновения синфазных и дифференциальных помех иллюстрируется на рисунке 2, где приведены упрощенные схемы повышающего и понижающего DC/DC-преобразователей. На этом рисунке показаны неизолированные преобразователи. В случае изолированных преобразователей синфазный ток через паразитные межобмоточные емкости проникает на вторичную сторону преобразователя.

Можно выделить три основных источника формирования электромагнитных помех.

1. Несинусоидальные формы напряжений и токов.
2. Колебательный процессы («звон»), возникающие при коммутации силовых ключей из-за паразитных индуктивностей и емкостей силового контура.
3. Переходные процессы в силовых компонентах. В данном случае преобладает процесс восстановления обратных характеристик силовых диодов.

Помехи п. 1. являются кондуктивными. Их частотный диапазон зависит от рабочей частоты преобразователя, режима его работы и формы напряжений и токов. Для примера на рисунке 3 показаны входные токи DC/DC-преобразователя, работающего в режиме прерывистых токов. Как правило, он ограничен частотой 50–70 МГц. Эти помехи сводятся к минимуму или практически отсутствуют в резонансных преобразователях. Не считайте за рекламу, но в данном случае нельзя не упомя-

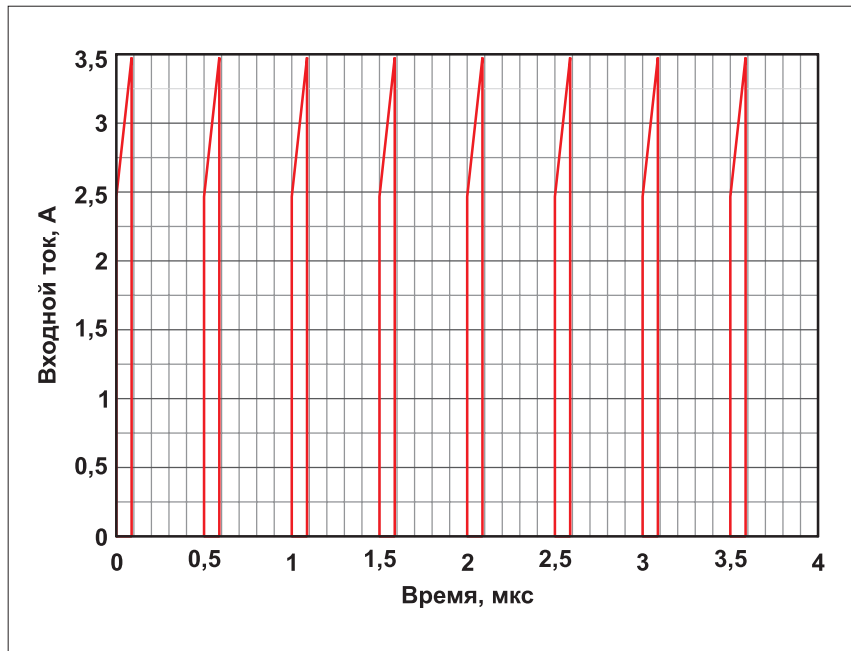


Рис. 3. Входные токи DC/DC-преобразователя, работающего в режиме прерывистых токов

нуть преобразователи компании Vicor. Инженерам этой компании удалось добиться практически синусоидальной формы тока в своих преобразователях и соответственно уменьшить уровень генерируемых помех.

Величина и частотный диапазон помех п. 2. существенно зависят от топологии платы и собственных силовых MOSFET. Эти емкости также входят в состав силовых контуров, в которых протекают переходные процессы коммутации. Данные емкости выражаются следующими соотношениями:

$$\begin{aligned} C_{ISS} &= C_{GS} + C_{GDr} \\ C_{OSS} &= C_{DS} + C_{GDf} \\ C_{RSS} &= C_{GDf} \end{aligned}$$

где  $C_{ISS}$  – входная емкость;  $C_{OSS}$  – выходная емкость;  $C_{RSS}$  – емкость обратной связи;  $C_{GS}$  – емкость затвор–исток;  $C_{GD}$  –

емкость затвор–сток;  $C_{DS}$  – емкость сток–исток.

Принято считать, что частотный диапазон этих помех составляет 30–250 МГц. Следует учитывать, что величину (но не частоту!) этих помех можно ослабить за счет увеличения времени отпирания и запираения силовых ключей, для чего в цепь затвора вводят дополнительный резистор. При малых временах нарастания и спада при отпирании и запираении силовых ключей в спектре сигнала напряжения значимой может оказаться даже сотая гармоника.

В [4] приводятся экспериментальные данные, согласно которым в спектре помех DC/DC-преобразователя с рабочей частотой 1 МГц и временем нарастания и спада равным 20 нс гармоники на частоте 33 МГц ослабляются на 38 дБ. В то же время в DC/DC-преобразователе при вре-

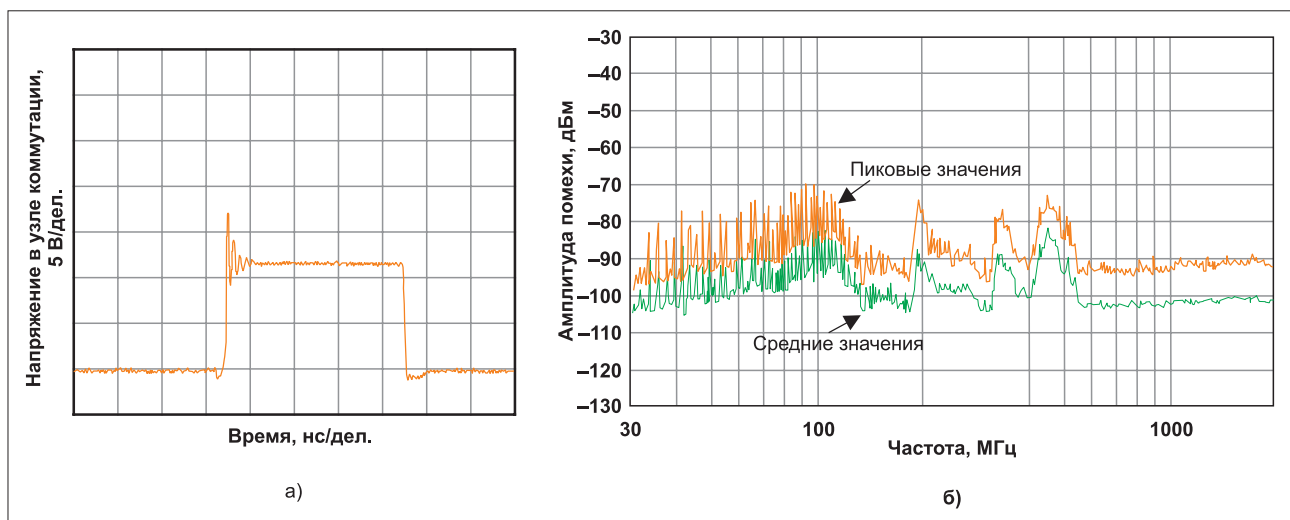


Рис. 4. а) колебательный процесс при коммутации силового ключа; б) его частотный спектр

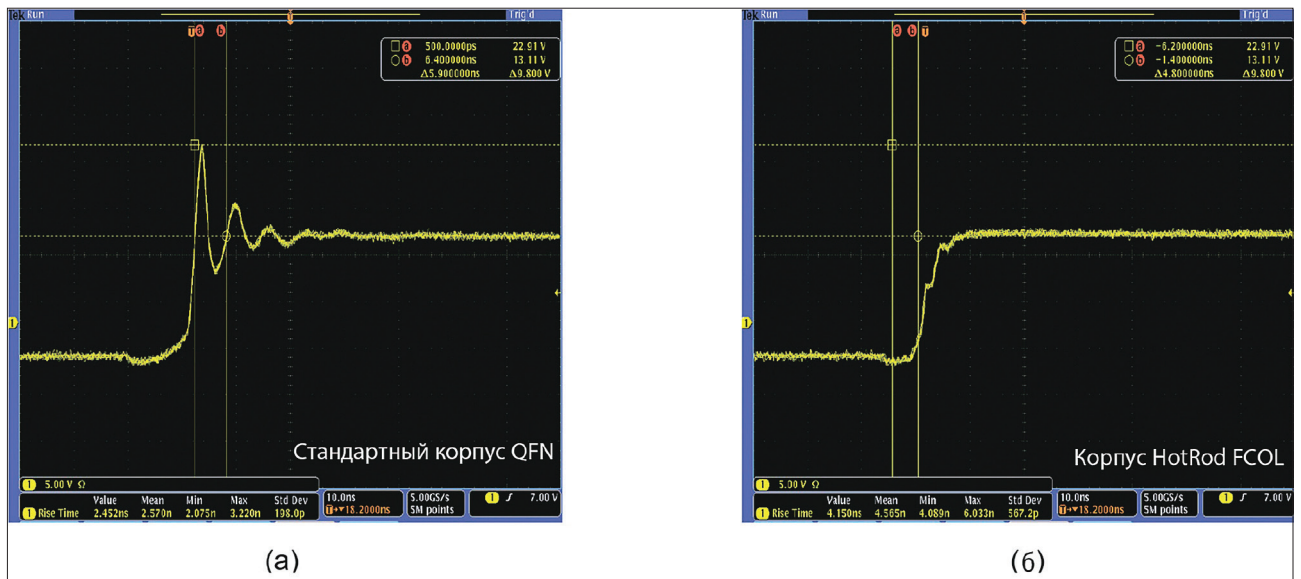


Рис. 5. Осциллограммы коммутации силовых ключей в: а) стандартном корпусе QFN; б) специально разработанном корпусе HotRod FCOL

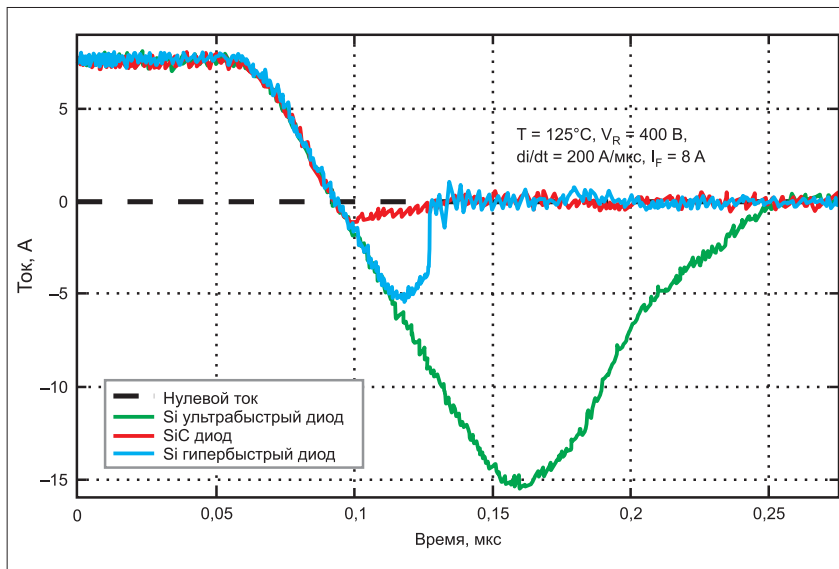


Рис. 6. Характеристики восстановления диодов разных типов

мени нарастания и спада 1 нс на 40 дБ ослабляются гармоники только на частоте 375 МГц! Как видите, разница весьма существенная. Следует учесть, что чем шире спектр помехи, тем хуже с ней справляется входной

ЭМП-фильтр. Пример колебательного процесса (звона) и соответствующий ему спектр приведен на рисунке 4.

Как уже отмечалось, колебательный процесс, вызванный коммутацией силовых ключей, возникает из-за

паразитных емкостей и индуктивностей силового контура. Однако не все эти паразитные компоненты принадлежат проводникам и силовым ключам – не следует забывать и о корпусах полупроводниковых приборов: их выводы, а также внутренние проводники имеют свои паразитные индуктивности и емкости. На рисунке 5 приведены осциллограммы коммутации силовых ключей в стандартном корпусе QFN и специально разработанном компанией TI корпусе HotRod FCOL с уменьшенной паразитной индуктивностью. При использовании технологии FCOL (flipped-chip-on-leadframe) контактные площадки кристалла расплавляются непосредственно на выводах микросхемы, а промежуточные проводники не используются.

Электромагнитные помехи п. 3 представляют собой радиопомехи, частота которых превышает 200 МГц. Они вызваны, в основном, восстановлением обратного сопротивления диодов. Уменьшить эти помехи можно путем выбора соответствующих дио-

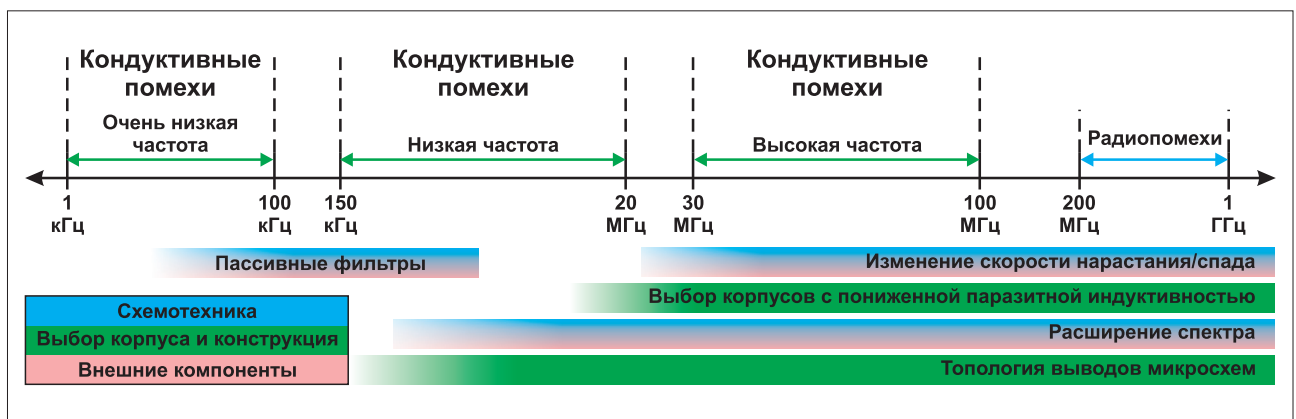


Рис. 7. Методы уменьшения помех для разных участков спектра

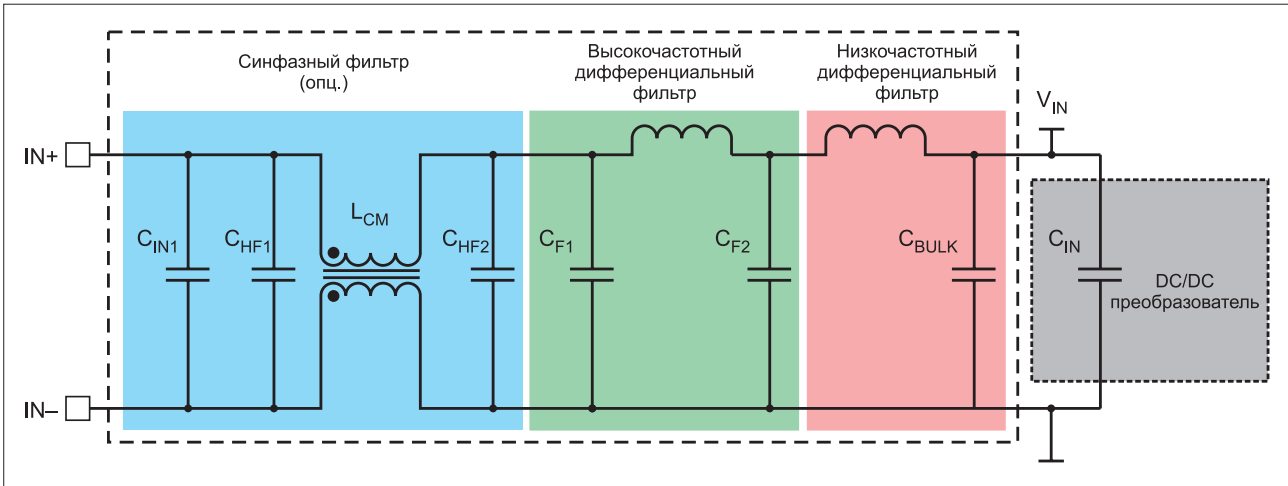


Рис. 8. Многокаскадные устройства с дифференциальным и синфазным фильтрами

дов. На рисунке 6 [5] показаны характеристики восстановления диодов разных типов. В настоящее время многие компании предлагают новые технологии диодов с быстрым восстановлением. В качестве примера можно привести 700-, 1200- и 1700- или 100-V диоды Шоттки MPS компании WeEn или диоды Super Barrier Rectifier (SBR) компании Diode Incorporated.

На рисунке 7 предлагаются методы уменьшения помех для разных участков спектра. На этом же рисунке показаны стандарты, которые нормируют уровень помех в автомобильной электронике. Пассивные ЭМП-фильтры во многих случаях являются обязательным атрибутом устройства. Они производятся многими компаниями, и их выбор не представляет трудностей. Можно выбрать не только отдельные ЭМП-фильтры для дифференциальных и синфазных помех, но и многокаскадные устройства с фильтрами обоих типов.

В общем виде схема такого фильтра приведена на рисунке 8. При разработке собственного фильтра следует учитывать, что для подавления помех на высокой частоте индуктивности и конденсаторы фильтра выбираются с максимальной собственной частотой SFR. Если вы не сможете подобрать дроссель с требуемой индуктивностью для высокочастотного каскада дифференциального фильтра, замените дроссель ферритовой бусиной. При выборе следует помнить, что незэкранированный дроссель может являться источником радиопомех. Также необходимо учитывать, что выходное сопротивление фильтра должно быть значительно меньше входного сопротивления преобразователя.

Достаточно эффективным способом борьбы с помехами является метод распределения спектра. Данный метод позволяет уменьшить пиковые значения помех за счет «размазывания» их

по широкому диапазону частот. Графическая иллюстрация метода показана на рисунке 9. Индекс модуляции  $M_F$  численно характеризует глубину модуляции частоты и определяется следующим выражением:

$$M_F = (\sigma \cdot F_C) / F_M$$

$$\sigma = \Delta F_C / F_M$$

где  $F_C$  – несущая частота;  $F_M$  – частота модуляции.

При увеличении коэффициента  $M_F$  помехи и шум уменьшаются. Увеличить ослабление помех можно, уменьшив частоту модуляции  $F_M$ , однако следует иметь в виду, что если она окажется ниже разрешения анализатора спектра, участвующего в тесте на ЭМС, измеренное ослабление помех станет меньше расчетной величины. Таким образом, не рекомендуется уменьшать частоту  $F_M$  ниже 9 кГц.

Обычно используются два способа модуляции частоты  $F_C$ : псевдослучайная и треугольная модуляции. При треугольной модуляции подавление помех лучше, но в ряде случаев в спектре помех в звуковой полосе наблюда-

ется значительный всплеск в районе частоты модуляции. Чтобы избавиться от него, используется смешанный метод AFM, при котором на треугольную форму частоты модуляции накладывается случайное изменение частоты. На рисунке 10 [4] показан пример треугольной модуляции и модуляции AFM.

### Выводы

Мы рассмотрели основные виды электромагнитных помех в AC/DC- и DC/DC-преобразователях и некоторые способы их ослабления. Разумеется, не обязательно применять все описанные решения. Например, если изделие потребляет не более нескольких десятков мВт, достаточно в качестве ЭМП-фильтра использовать помехоподавляющий конденсатор и не думать об остальных способах устранения помех, показанных на рисунке 8.

Если вы хотите упростить и удешевить решение и перед вами не стоит задача получения максимального КПД, имеет смысл использовать преобразователи со встроенными

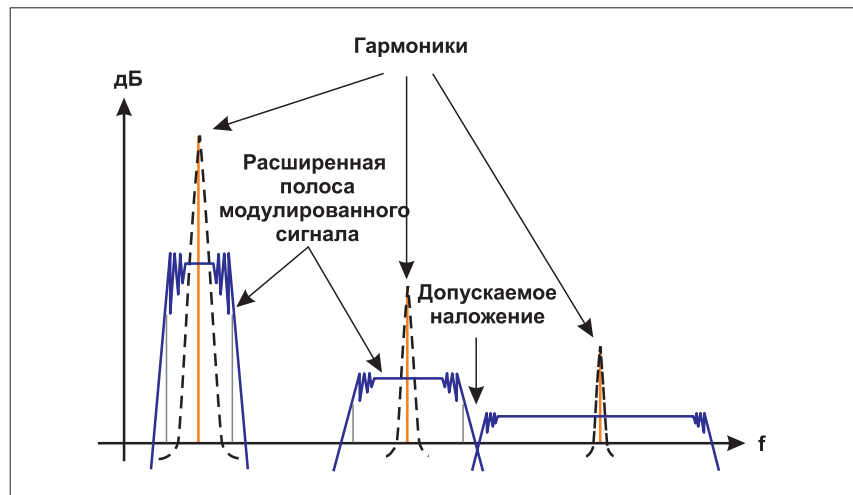


Рис. 9. Метод распределения спектра

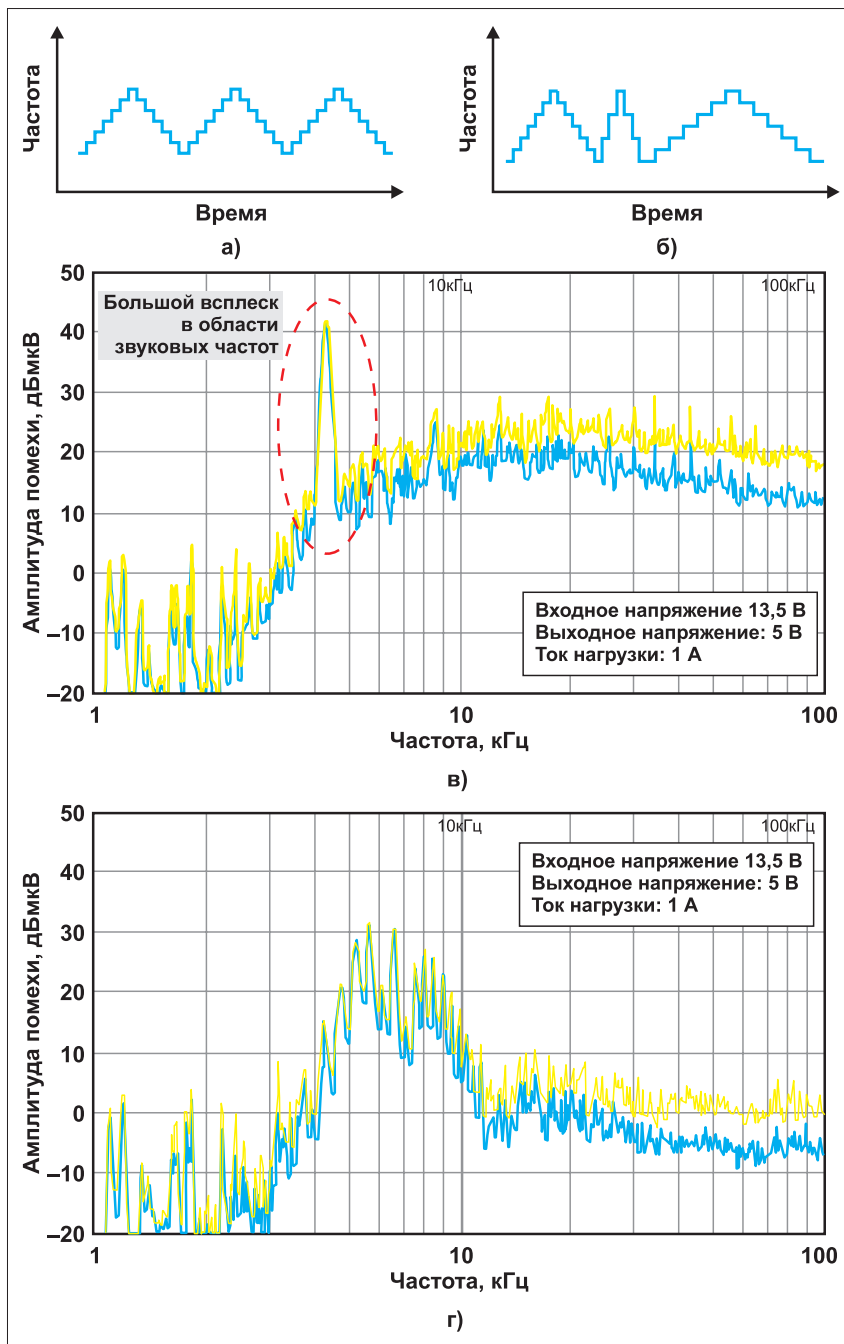


Рис. 10. а) треугольная модуляция; б) модуляция AFM; в) спектр помех при треугольной модуляции; г) спектр помех при модуляции AFM

силовыми ключами; при этом не обязательно думать о топологии силового каскада, но придется смириться с некоторым увеличением потерь в силовых ключах и, следовательно, снижении КПД.

В случае, когда нагрузка не меняется или меняется в небольших пределах, возможно, лучшим решением станет использование резонансного LLC-преобразователя. При этом останется только выбрать ЭМП-фильтр, а об остальных способах снижения помех, изложенных выше, можно будет забыть.

Мы не рассматривали особенности конструкции корпуса изделия и трансформаторов, хотя и то, и другое оказывают влияние на подавление помех. Но, как известно, нельзя объять необъятное и в рамках одной статьи рассмотреть все вопросы. ☞

#### ЛИТЕРАТУРА

- ГОСТ 30805.22–2013 (CISPR 22:2006). Совместимость технических средств электромагнитная. Оборудование информационных технологий. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы измерений.
- ГОСТ Р 51318.25–2012 (CISPR 25:2008) Совместимость технических средств электромагнитная. Транспортные средства, моторные лодки и устройства с двигателями внутреннего сгорания. Характеристики промышленных радиопомех. Нормы и методы измерений для защиты радиоприемных устройств, размещенных на подвижных средствах
- ГОСТ CISPR 32–2015. Электромагнитная совместимость оборудования мультимедиа. Требования к электромагнитной эмиссии.
- Advanced EMI mitigation techniques for automotive converters//www.ti.com.
- Андрей Ершов. Последние по порядку, но не по значению//Электронные компоненты. № 3. 2020.