

# Плюсы и минусы методов расширения спектра в понижающих стабилизаторах



Андрей ЩЕРБАКОВ  
инженер

**В силовых преобразователях и других устройствах механизм расширения спектра преобразует узкополосный сигнал в широкополосный, сохраняя при этом функциональность устройства. Преобразование пиков гармоник в плоскую сглаженную характеристику и смещение энергий гармонических составляющих друг с другом улучшает условия эксплуатации за счет уменьшения электромагнитных помех (ЭМП), воздействующих на устройство и соответствующую систему.**

Путем расширения спектра можно уменьшить пиковые и средние значения ЭМП, что позволяет выбрать входной фильтр электромагнитных помех меньшего размера по меньшей стоимости. В статье описывается процесс расширения спектра в понижающем преобразователе и возможности использования этого метода в других приложениях. Кроме того, мы рассмотрим наиболее распространенные современные способы реализации метода, их преимущества и недостатки.

Сначала зададимся вопросом о том, откуда в понижающем преобразователе возникают электромагнитные помехи? Это устройство преобразует мощность путем переключения коммутационного узла с высокой частотой между входным напряжением  $V_{IN}$  и заземлением. Коэффициент заполнения устанавливает среднее напряжение на коммутационном узле равным заданному выходному напряжению. Этот узел получает электропитание через фильтр нижних частот, образованный индуктивностью и емкостью, который обеспечивает выходное напряжение по постоянному току. Большинство понижающих преобразователей переключается на фиксированной частоте  $f_{SW}$ . На ней и ее гармониках  $nf_{SW}$  генерируются электромагнитные помехи. Отдельные пики основной частоты и ее гармоник могут превысить максимально допустимое электромагнитное излучение на этих частотах.

На рис. 1 частота переключения равна 2,1 МГц. Она не меняется со временем. Пульсация выходного напряжения имеет плоскую форму.

Помимо помех, генерируемых DC/DC-преобразователем, в системе имеются и другие источники помех. Как правило, частота этих помех меньше. Чтобы судить об эффективности мер по снижению помех от DC/DC-преобразователя, необходимо разделить эти помехи. С этой целью достаточно оценить величину низкочастотных электромагнитных помех. НЧ ЭМП имеют хорошо выраженные пики на основной частоте и ее гармониках, а на кривой ВЧ ЭМП видны гармоники более высокого порядка. Красные линии на рис. 1 соответствуют предельно допустимым значениям в типовом испытании на электромагнитные помехи.

В понижающем преобразователе с расширенным спектром частота  $f_{SW}$  размывается так, чтобы устройство переключалось в некотором диапазоне частот. Например, если устройство переключается на частоте 1 МГц с размытием (дизерингом)  $\pm 5\%$ , энергия основной частоты распределится в диапазоне 0,95–1,05 МГц, что соответствует ее расширению на 50 кГц выше и ниже центральной частоты. 2-я гармоника распределится между 1,90 и 2,10 МГц, что соответствует ее расширению на 100 кГц выше и ниже центральной частоты. В этом примере на 10-й и более высокие гармоники их частотные полосы начинают сливаться друг с другом, а пики приобретать плоскую форму с усредненной мощностью, которая часто на 10 дБмкВ ниже вершин острых пиков, возникающих в отсутствие расширенного спектра.

Мы рассмотрим два наиболее распространенных способа реализации расширенного спектра, а затем еще два дополнительных.

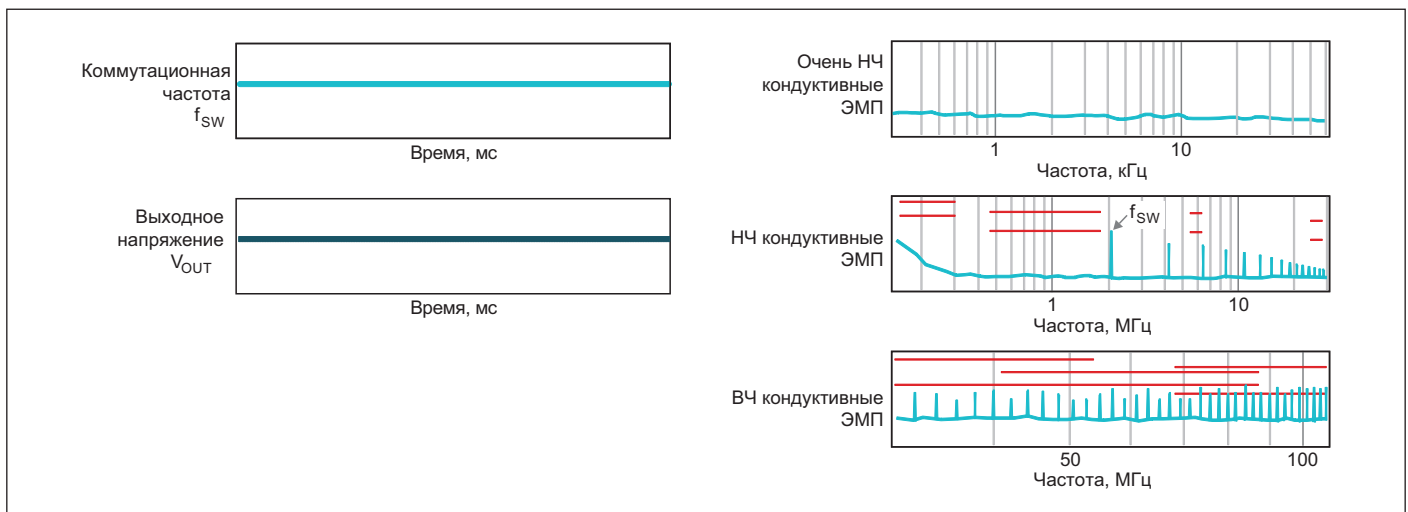


Рис. 1. Рабочие характеристики при фиксированной основной частоте без расширенного спектра

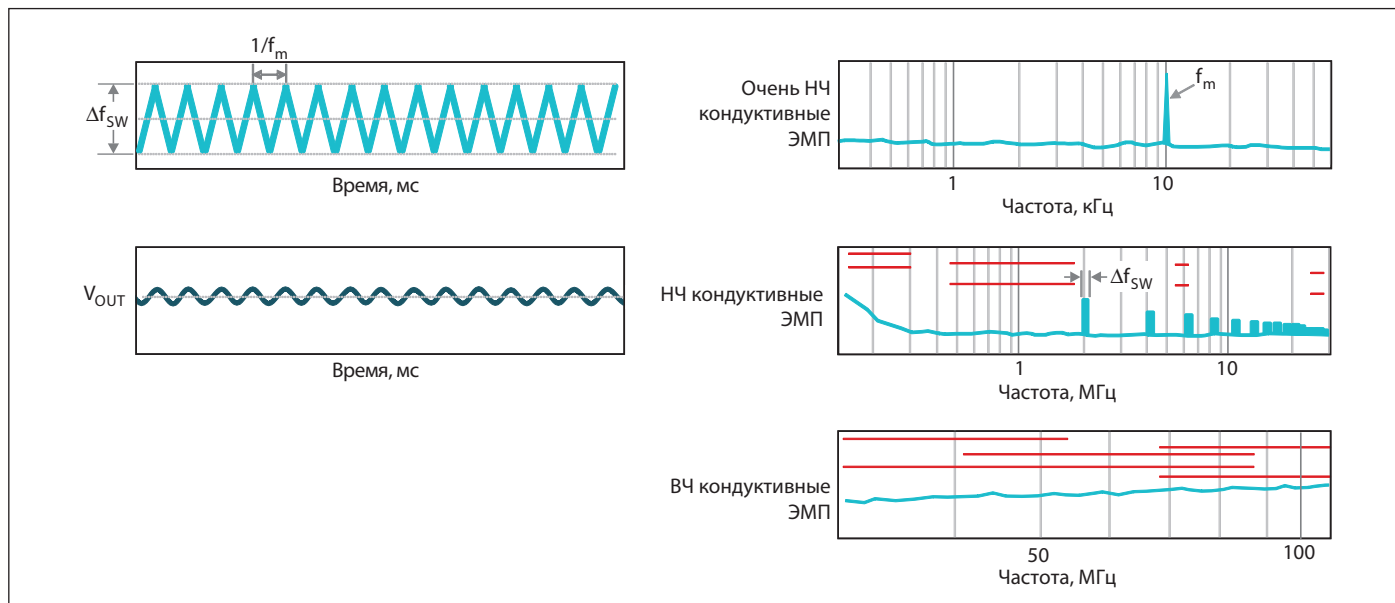


Рис. 2. Характеристики, полученные при использовании треугольной модуляции с расширенным спектром

## Метод треугольной модуляции

Данный метод определяет треугольную форму изменения частоты  $f_{SW}$ . Типичный разброс составляет  $\pm 4 \dots \pm 10\%$  ( $\Delta f_{SW}$ ) при частоте модуляции  $f_m = 4\text{--}15$  кГц, как показано на рис. 2.

### Плюсы

Рассматриваемый метод прост и легок для понимания и реализации. Непрерывное нарастание и уменьшение частоты гарантирует отсутствие последовательных циклов переключения одной и той же частоты, которые вызывают всплески на этой частоте и соответствующих гармониках. Треугольная модуляция также обеспечивает равномерное распределение мощности по бокам от центральной частоты, создавая преимущественно плоскую полосу с небольшим пиком на краю (пики не показаны на рис. 2). Такой подход расширяет основную частоту, а также более высокие гармоники.

Расширение основной частоты уменьшает ее амплитуду, позволяя выбрать более дешевый входной фильтр электромагнитных помех. Меньшей основной частоте требуется меньшая индуктивность и емкость входного LC-фильтра, что позволяет приложению работать ниже предельных условий испытаний на ЭМП. Использование треугольной модуляции гарантирует достаточно плоское и равномерное распределение основной частоты. Другие методы в большей мере «утяжеляют» центральные или конечные частоты, уменьшая затухание на основной частоте и на первых гармониках.

### Минусы

Во избежание чрезмерного перекрытия частот биения частота треугольной модуляции  $f_m$  должна быть достаточно низкой, чтобы обеспечить несколько циклов переключения при ее увеличении и уменьшении. Однако из-за колебаний ЭМП на более высоких частотах очень мало времени расходуется на измерение этих помех из расчета на точку данных. Медленное нарастание или спад могут привести к тому, что качание частоты ЭМП позволит измерять только небольшую часть этого нарастания/спада, что выглядит как менее распределенное излучение, эффективно уменьшающее  $\Delta f_{SW}$ . Медленное нарастание — более серьезная проблема в случае использования дискретной треугольной модуляции, где нарастание и спад происходят ступенчатообразно чаще одного раза за один прием.

Другим недостатком является то, что в выходном и входном напряжениях появляются пульсации на частоте треугольной модуляции. Это вызвано двумя факторами. Первый из них — амплитудная модуляция тока пульсации индуктивности. Понижение частоты переключения приводит

к возрастанию тока пульсации индуктивности, и, наоборот; на частоте треугольной модуляции появляется пульсация напряжения на входе. Второй фактор — это взаимодействие амплитудно-модулированного тока индуктивности со схемой управления, которое обычно осуществляется в режиме пикового или минимального тока. Изменение амплитуды тока индуктивности увеличивает или уменьшает ее средний ток, вызывая пульсации в выходном, а также во входном напряжении. Эта частота также равна  $f_m$  и часто находится в звуковом диапазоне, где может появиться слышимый звуковой сигнал, если очень низкочастотный шум взаимодействует с любой генерирующей звуки схемой, например с аудиоусилителем или даже с керамическим конденсатором на плохо смонтированной печатной плате.

## Метод псевдослучайной модуляции

Данный метод определяет изменения  $f_{SW}$  псевдослучайным образом: значения генерируются программно — по сути, случайным образом. Некоторые реализации ограничивают максимальный размер шага, чтобы частота не перескакивала слишком далеко и не вызывала значительных сбоев.

Типичный разброс составляет  $\pm 3 \dots \pm 6\%$ , а частота обычно меняется с каждым циклом переключения. Из рис. 3 видно, что масштаб временной шкалы сигналов исчисляется микросекундами (в отличие от миллисекунд в других схемах), поскольку коммутационная частота меняется каждый цикл.

### Плюсы

Заметим, что  $f_{SW}$  в зависимости от режима работы преобразователя может существенно измениться за короткий период времени. Соответственно, метод расширения спектра придется использовать в более широких пределах, что уменьшит пиковые и средние значения помех. Благодаря такому большому скачку обеспечиваются отличные характеристики на высоких частотах. Очень низкочастотные электромагнитные помехи распределяются случайным образом. Это значит, что ЭМП на выходе и входе не генерируют слышимый сигнал при наведении на схему генерации звука. Эти помехи никуда не делась, но они распределены в широком диапазоне и создают больше белого шума по сравнению с сигналом, который генерировался методом треугольной модуляции.

### Минусы

В зависимости от распределения частот и способа реализации энергии гармоник может распределиться неудачно. Из-за этой рассеянной

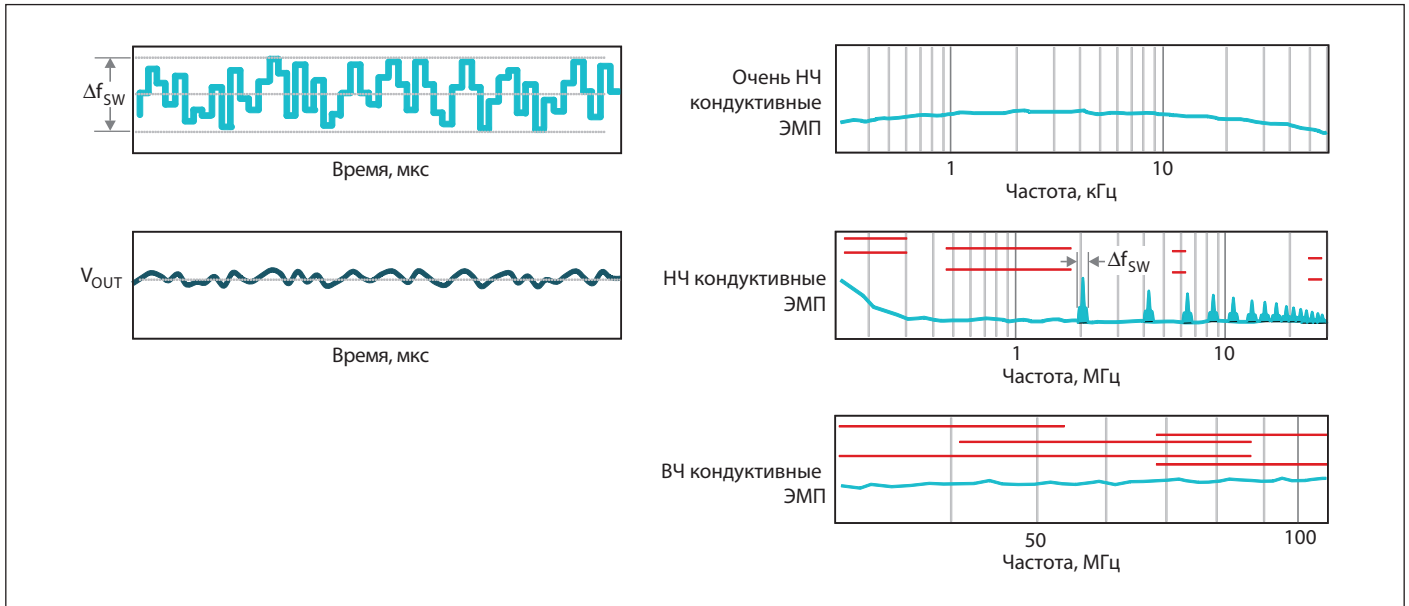


Рис. 3. Характеристики псевдослучайной модуляции с расширенным спектром

энергии возникают более резкие и высокие выбросы на указанных частотах. В отличие от метода треугольной модуляции, отсутствует возможность заметно уменьшить размер и стоимость входного ЭМП-фильтра.

Другой недостаток заключается в возможном повторении кодов, что обусловлено их псевдослучайной цифровой природой. Если генератор случайных чисел завершает коммутацию на одной и той же частоте на протяжении нескольких циклов, возникает ощущение, что метод расширения спектра перестал работать. Трудоемкое исключение повторяющихся кодов или использование аналоговых способов генерации действительно случайных последовательностей позволяет избежать ощущения того, что расширение спектра отсутствует.

### Дополнительное расширение спектра

Оба рассмотренных метода позволяют устранить пики помех, обусловленные коммутацией силовых ключей. При этом, однако, пропускаются некоторые из них, или появляется дополнительный

шум. Дополнительное расширение спектра позволяет уменьшить или устранить эти нежелательные явления. Использование дополнительной модуляции при треугольной модуляции позволяет менять частоту  $f_m$  со временем, превратив слышимый звук в шум. Звуковой сигнал модулируется псевдослучайным образом, как показано на рис. 4.

#### Плюсы

Низкочастотный звук превращается в шум при использовании методов треугольной и псевдослучайной модуляции. Основная частота и первые гармоники распределяются равномерно благодаря треугольной модуляции, которая позволяет уменьшить размер и стоимость входного ЭМП-фильтра. Высокочастотные гармоники распределяются с помощью дополнительной псевдослучайной модуляции.

#### Минусы

Этот метод труднее реализовать. Несмотря на распределение низкочастотного шума, он все еще присутствует и может вызывать, например, белый шум в цепях, генерирующих звук.

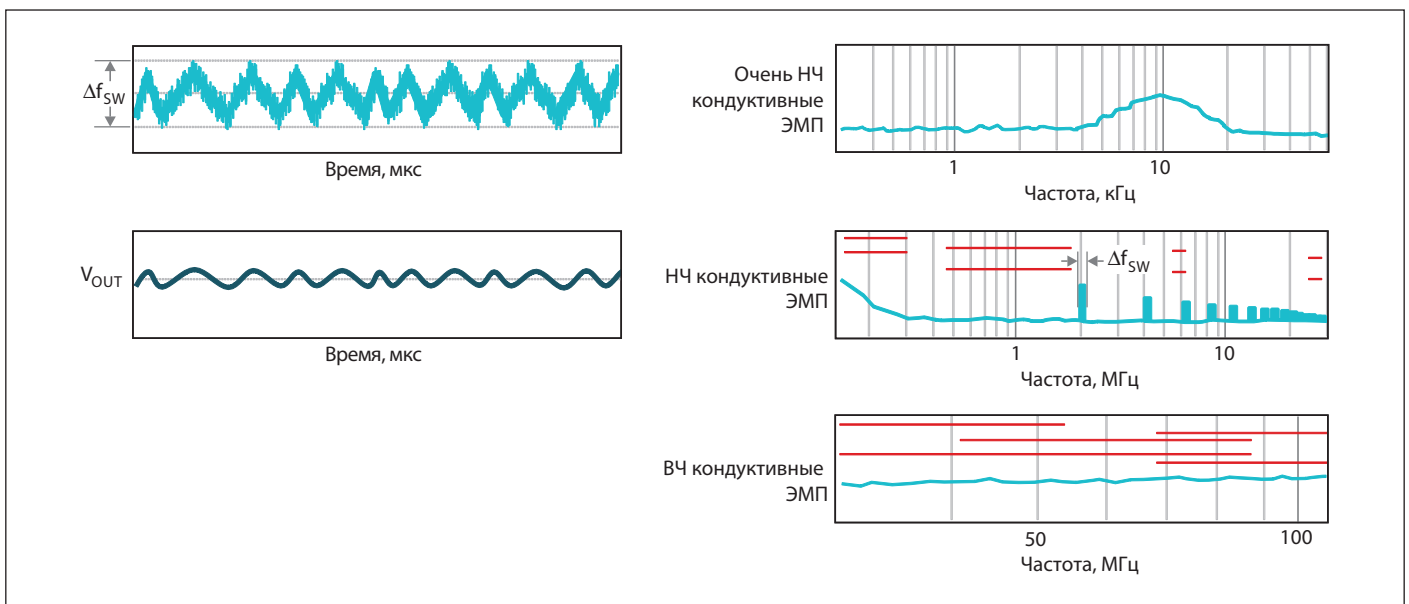


Рис. 4. Дополнительное расширение спектра лучше решает поставленную задачу

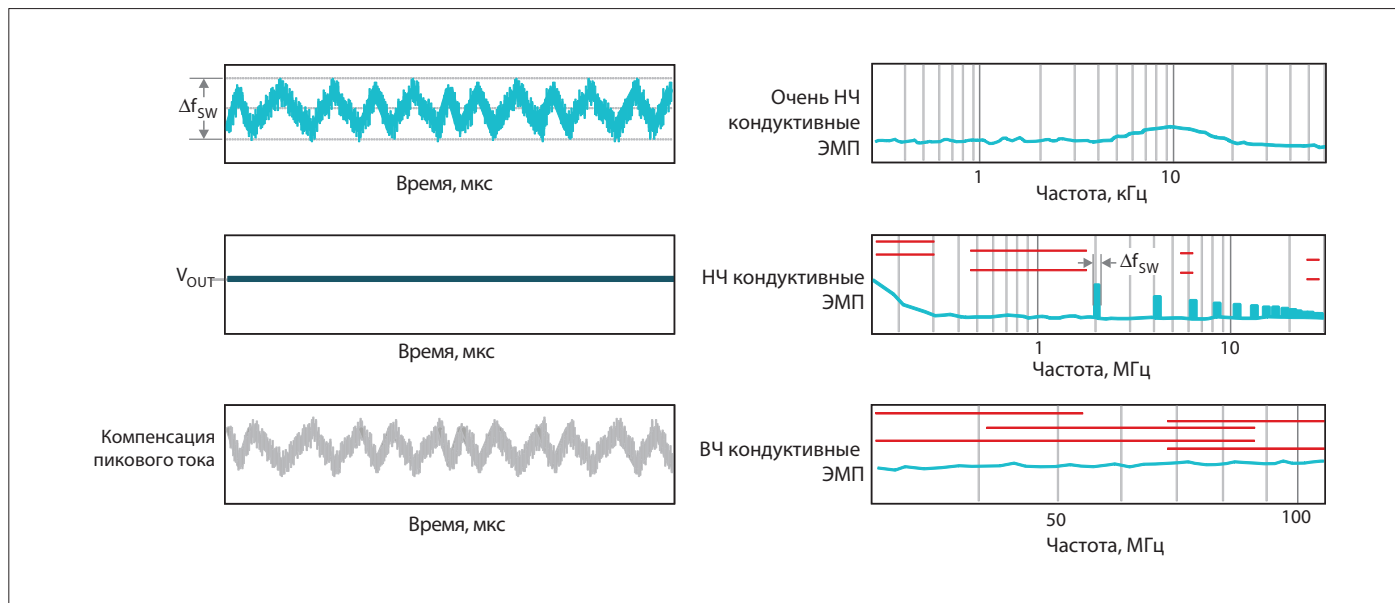


Рис. 5. Характеристики двойного случайного расширения спектра

### Двойное случайное расширение спектра

Данный метод отличается от рассмотренного выше только тем, что обеспечивает еще и подавление низкочастотных пульсаций. Между модулятором, используемым для расширения спектра, и схемой управления пиковым или минимальным током устанавливается связь для упреждающей настройки пороговых значений пикового или минимального тока с целью подавления шума, возникающего при расширении спектра (рис. 5).

#### Плюсы

Устраняются очень низкочастотные пульсации выходного напряжения и связанные с ними пульсации входного напряжения. Слышимый шум устраняется на выходе и значительно уменьшается на входе.

#### Минусы

Для настройки функции устранения шума может потребоваться резистор при определенных условиях эксплуатации, что зависит от используемого устройства.

#### Выводы

Расширение спектра – функция, позволяющая значительно подавить ЭМП, практически не повлияв на другие функции системы. Каждый из четырех описанных в этой статье методов имеет свои преимущества и недостатки. Эти методы продолжают совершенствоваться по мере оптимизации и с учетом новых требований. ■

Статья опубликована в журнале «Электронные компоненты» № 10/2021