

# Кондуктивная помехоэмиссия в двухтактных преобразователях

## с жестким и мягким переключением

**В статье выполнен анализ источников кондуктивной помехоэмиссии в схемах двухтактных преобразователей напряжения, среди которых мостовой инвертор с ШИМ-регулированием в режиме жесткой коммутации, LLC-конвертер, а также мостовой инвертор с фазовым управлением.**

**Евгений Загородских**

eugenesic@yandex.ru

Обеспечение мягкого переключения в импульсных преобразователях напряжения является достаточно распространенной задачей, поскольку данный подход при конструировании позволяет повысить КПД устройства, а также оказать влияние на уровень электромагнитных помех, что и будет рассмотрено в рамках данной статьи.

### Мостовой инвертор с ШИМ-регулированием в режиме жесткой коммутации

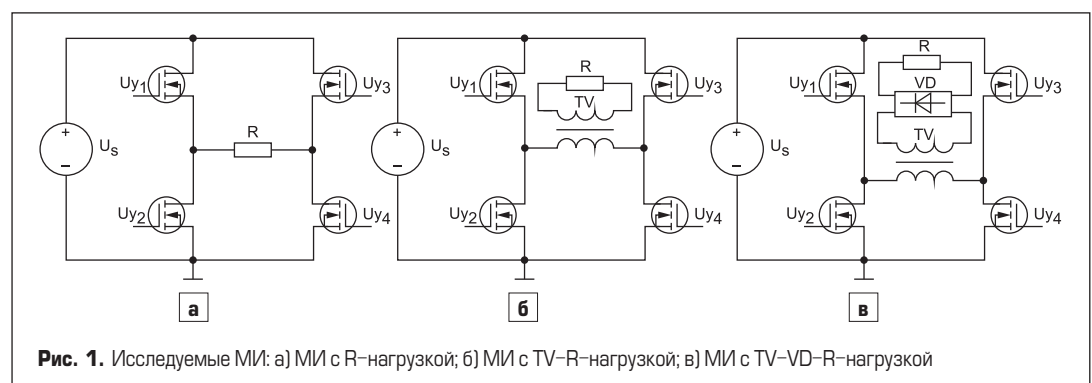
Прежде чем начинать рассмотрение схем с мягким переключением, необходимо провести краткий анализ базовой схемы мостового инвертора (МИ), что позволит адекватно оценить влияние вводимых элементов. Данный вопрос частично рассматривался в [1].

На рис. 1а представлен базовый вариант схемы, где отсутствуют конденсаторы и магнитные элементы — это позволит исключить влияние реак-

тивных составляющих. При работе схемы во всех случаях между срабатыванием силовых транзисторов выдерживается достаточная для восстановления запирающих свойств пауза. Элементы в схему мостового инвертора вводятся последовательно, причем в каждом случае измеряется уровень кондуктивной помехоэмиссии, таким образом можно локализовать источник помехи.

Результат измерения помехоэмиссии представлен на рис. 2 (диаграмма 1). Спектр равномерно затухает под углом 40 дБ/дек, но после 14 МГц заметен небольшой рост помех, что связано с длиной проводников, ведущих к нагрузке.

Введение трансформатора (рис. 1б) приводит к возникновению дополнительных резонансных микроконтуров (межвитковая и межобмоточная емкость, индуктивность рассеяния и пр.), которые «раскачивают» всю систему, что в свою очередь приводит к равномерному росту уровня помех во всем диапазоне частот (рис. 2, диаграмма 2).



**Рис. 1.** Исследуемые МИ: а) МИ с R-нагрузкой; б) МИ с TV-R-нагрузкой; в) МИ с TV-VD-R-нагрузкой

Влияние трансформатора достаточно просто подавить, если подключить параллельно силовым транзисторам RC-демпфер (рис. 3). В настоящее время этот способ практически не применяется, так как на резисторе демпферной цепи теряется мощность, но в данном случае целью является анализ протекающих процессов.

Результат измерения эмитируемых помех представлен на рис. 2 (диаграмма 3). Из графика видно, что влияние трансформатора удалось полностью устранить, а также наличие активной составляющей избавило от воздействия длины проводников на нагрузку инвертора (свыше 14 МГц).

В высокочастотной области не возникает проблем до тех пор, пока в схему не вводится выпрямитель, то есть появляется взаимодействие барьерной емкости выпрямительного диода и силового транзистора.

На рис. 4 представлены три варианта исследуемых схем выпрямления.

Каждый выпрямительный диод содержит диффузионную и барьерную паразитные емкости, последняя имеет важное значение с позиции как КПД, так и помехоэмиссии. На рис. 4а представлена схема выпрямления с нулевой точкой, причем для каждой обмотки имеется по три диода, что увеличивает суммарную паразитную емкость.

На рис. 5 получены результаты измерения помехоэмиссии. Рост помех в точке 2 (диаграмма 2) обусловлен именно наличием барьерной емкости, это легко проверить, изменив ее значение. Так, подключив к каждому диоду последовательно еще один, можно уменьшить суммарную емкость, и если в предыдущем случае она равнялась 3С, то для случая на рис. 4б эта емкость составит порядка 1,5С. Смещение точки роста помех можно увидеть на рис. 5 (диаграмма 3, точка 3).

В случае мостовой схемы (рис. 4в) барьерная емкость будет равна 0,5С. В результате уровень помехи снизился более чем на 10 дБ/мкВ (рис. 5, диаграмма 1).

При всех манипуляциях с выпрямителем на диаграммах рис. 5 неизменной осталась точка 1, определяемая паразитными параметрами транзисторов МИ, которые проявляются исключительно при взаимодействии с диодом. Величину помехи в данной точке можно снизить, если использовать транзи-

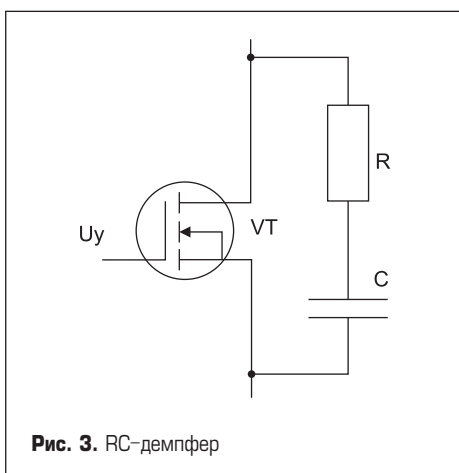


Рис. 3. RC-демпфер

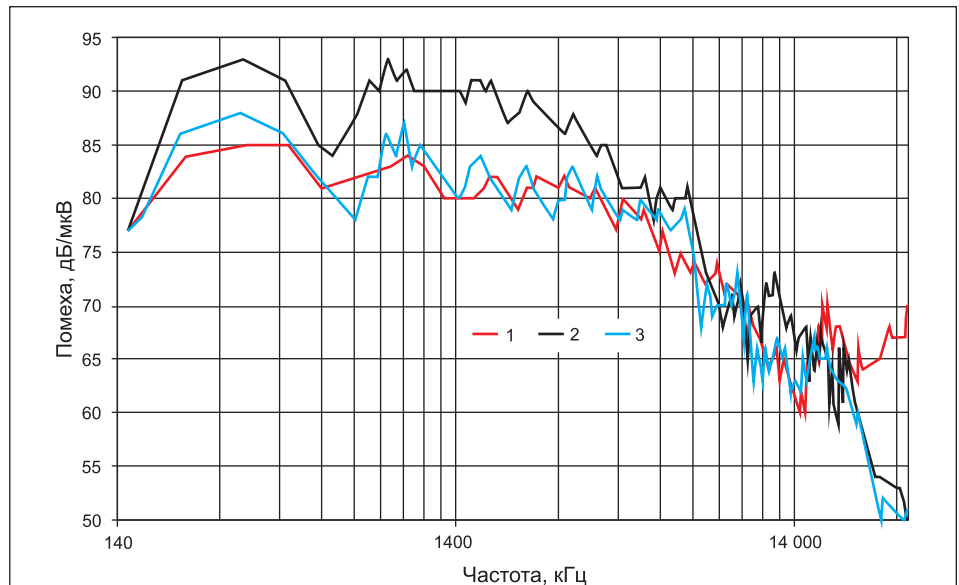


Рис. 2. Результаты измерения уровня помех для: 1 – МИ с R-нагрузкой; 2 – МИ с TV-R-нагрузкой; 3 – МИ с TV-R-нагрузкой и RC-демпфером

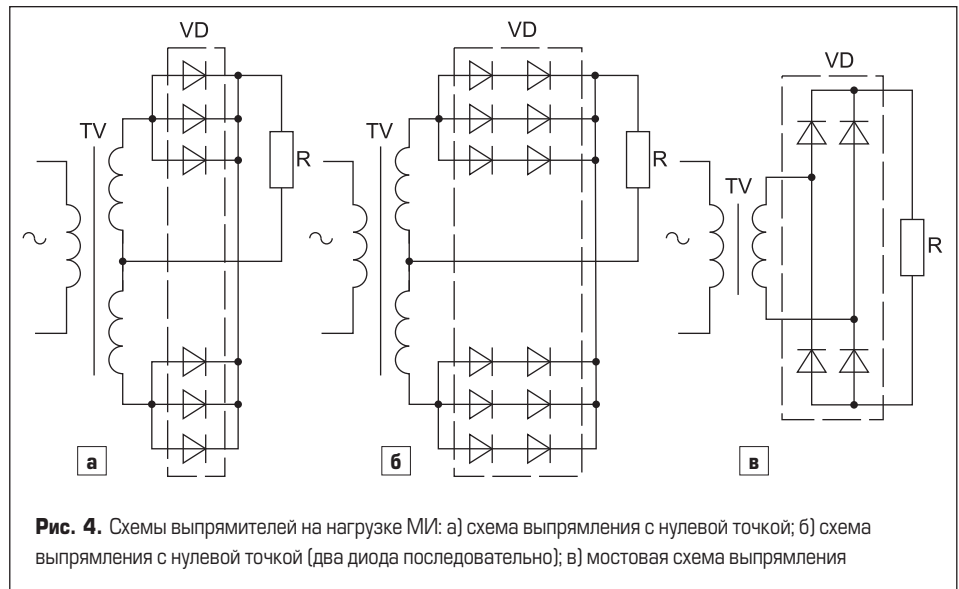


Рис. 4. Схемы выпрямителей на нагрузке МИ: а) схема выпрямления с нулевой точкой; б) схема выпрямления с нулевой точкой (два диода последовательно); в) мостовая схема выпрямления

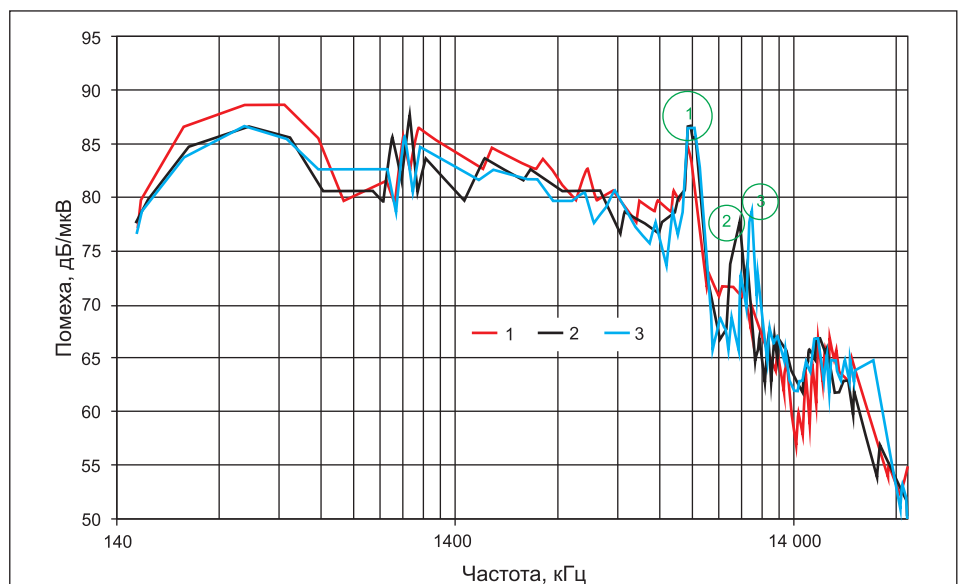


Рис. 5. Результаты измерения уровня помех для: 1 – мостовая схема выпрямления; 2 – схема выпрямления с нулевой точкой; 3 – схема выпрямления с нулевой точкой (два диода последовательно)

сторы с меньшим временем восстановления. Данная ситуация уже наблюдалась при исследовании однотактных преобразователей [2]. Использование SiC-транзистора позволило снизить помеху в данной точке, что применимо и для мостовой схемы.

Следует отметить, что в зависимости от параметров силовых элементов, качества конструкции и т. д. частоты, на которых образуется рост помех, могут сдвигаться, частота сопряжения может быть либо ярко выражена, либо не совсем, но в общем случае принцип распределения помех не изменится как для однотактных схем, так и для двухтактных.

### LLC-конвертер

LLC-конвертер — это одна из разновидностей резонансных схем, его отличительной особенностью является применение двух индуктивностей. Недостаток такой схемы заключается в сложности регулирования выходного напряжения при малых нагрузках. Принцип работы LLC-конвертера многократно был рассмотрен в различных источниках, поэтому сосредоточимся на анализе спектра эмитируемых помех [3].

В основе наиболее распространенной схемы LLC-конвертера (рис. 6) лежит полумостовой инвертор напряжения (ИН), поэтому и срав-

нение спектра помех следует вести по отношению к нему.

На рис. 7 приведены два графика спектра помех: 1 — LLC-конвертер и 2 — полумостовой инвертор напряжения.

Говоря об инверторе, нужно отметить точки 4 и 5, как уже рассматривалось ранее; величина помех в данных точках определяется взаимодействием транзисторов полумоста и выпрямительных диодов на выходе трансформатора. В LLC-конвертере ввиду обеспечения мягкой коммутации такой проблемы не возникает. В обоих преобразователях ярко выражена точка 3 — частота сопряжения. Но что более важно, это точки 1 и 2, как видно из диаграмм на рис. 7, величина помех на низких частотах LLC-конвертера выше на 10 дБ/мкВ по отношению к классической полумостовой схеме.

Величина помехи на частоте коммутации определяется добротностью резонансного контура Q, так как с ее увеличением растет напряжение, прикладываемое к реактивным элементам, а следовательно, и величина помехи. При этом чем выше Q, тем ближе форма тока и напряжения к синусоидальной, а значит, высшие гармоники будут отсутствовать и помехи сконцентрируются на одной частоте.

При снижении Q происходит распределение помех на более широкий диапазон частот за счет уменьшения максимального напряже-

ния на реактивных элементах и увеличения количества высших гармоник.

При нахождении баланса между максимальным значением Q и коэффициентом искажения синусоидальной кривой появляется возможность спроектировать максимально эффективный помехоподавляющий фильтр, при этом обладающий малыми габаритами.

Конечно, это перспективно, но следует учитывать, что проверка преобразователя на соответствие нормам ГОСТ производится при максимальной мощности и половине от максимальной мощности. Изменение нагрузки в таких преобразователях приводит к изменению частоты, и, как следствие, все наиболее важные параметры преобразователя изменят свое значение, а значит, и фильтр должен проектироваться таким образом, чтобы принимать в расчет такие изменения. Это относится к любому резонансному преобразователю, а не только к LLC-конвертеру.

### Мостовой инвертор с фазовым управлением

Существует еще один весьма распространенный способ обеспечения мягкой коммутации в двухтактных преобразователях — фазовое управление. Схема инвертора ничем не отличается от представленной на рис. 1в, кроме наличия фильтра, подключенного параллельно нагрузке.

Идея заключается в том, что в паузе проводят горизонтально расположенные транзисторы. В этом случае происходит замыкание первичной обмотки трансформатора на сопротивление сток-исток открытых транзисторов. В момент, когда открыты транзисторы одной из диагоналей, в индуктивности рассеяния протекает ток, который во время паузы продолжает оставаться примерно на том же уровне. В результате в момент записания одного из открытых горизонтально расположенных транзисторов создаются условия для перезарядки выходных емкостей транзисторов, расположенных в схеме вертикально, таким образом происходит переключение в нуле напряжения и транзисторы отпираются без потерь [4].

В данной схеме отсутствует резонансный контур, который приводит к увеличению помех на частоте коммутации, а по отношению к схеме с жесткой коммутацией потери на переключение будут значительно ниже. Какими-либо другими особенностями данная схема не обладает.

### Заключение

Следует сделать важное замечание, что в любой из рассматриваемых схем помехоподавляющий фильтр является неотъемлемой частью, но прежде чем усложнять устройство большим количеством звеньев фильтра, следует выбрать оптимальную схему и режим работы силовой части.

Применение инвертора в режиме жесткого переключения вполне возможно, но в этом случае необходимо использовать полупроводниковые элементы с малыми паразитными

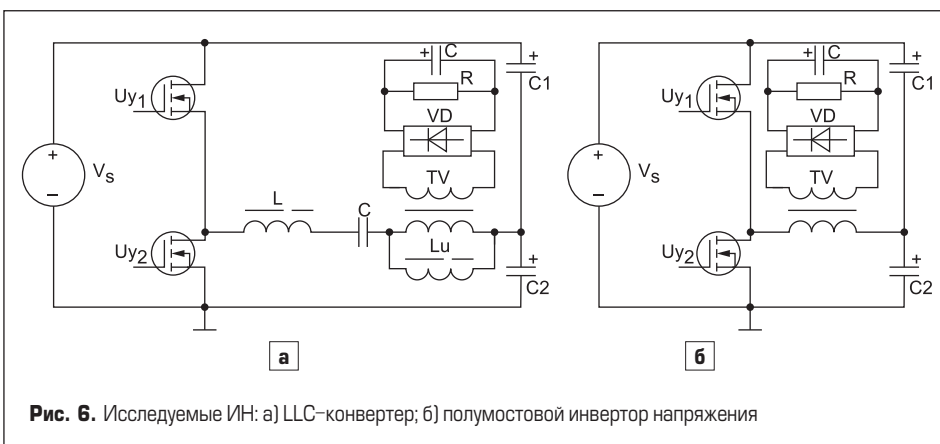


Рис. 6. Исследуемые ИН: а) LLC-конвертер; б) полумостовой инвертор напряжения

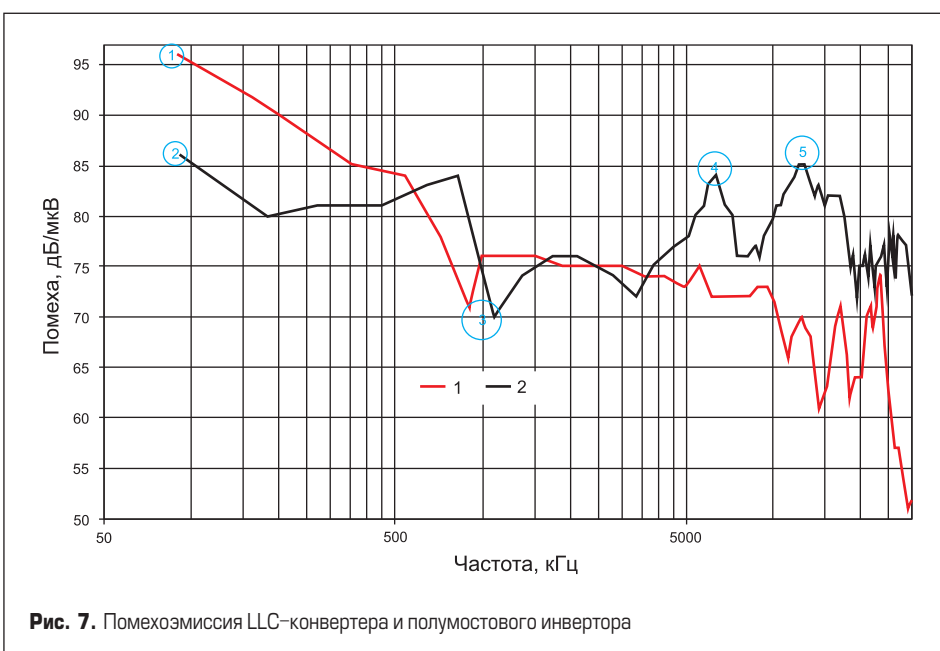


Рис. 7. Помехоэмиссия LLC-конвертера и полумостового инвертора

параметрами, например на основе SiC, что приведет к значительному удорожанию устройства. Если же такой возможности нет, проблему можно решить с помощью помехоподавляющего фильтра, однако подавление помех в высокочастотной области является достаточно сложной задачей и, вероятно, фильтр будет содержать несколько звеньев.

Другим способом снижения уровня помех при сохранении существующей конструкции силовой части является применение контроллера, обеспечивающего фазовое управление. Данный способ выглядит наиболее оптимальным с позиции регулирования, помехоэмиссии (преимущество по отношению ко всем рассмотренным схемам во всем исследуемом диапазоне частот), массогабаритных показателей, а также КПД.

LLC-конвертер также позволяет снизить уровень помех в высокочастотной области, тем не менее создаются некоторые трудности на низких частотах. Также при изменении нагрузки происходит изменение ключевых характеристик преобразователя, что влияет на уровень эмитируемых помех. Данный вариант имеет некоторые трудности при регулировании, уступает в массогабаритных показателях ввиду наличия резонансной цепи.

Таким образом, наиболее оптимальной схемой, в первую очередь с позиции кондуктивной помехоэмиссии, является классический мостовой инвертор с фазовым управлением.

### Литература

1. Загородских Е. В. Об источниках кондуктивной помехоэмиссии при проектировании мостового инвертора напряжения // Технологии электромагнитной совместимости. 2016. № 1.
2. Загородских Е. В. Выбор параметров непосредственного преобразователя напряжения с учетом вопросов электромагнитной совместимости // Силовая электроника. 2016. № 3.
3. Мелешин В. И. Управление транзисторными преобразователями энергии. М.: Техносфера, 2011.
4. Мелешин В. И. Транзисторная преобразовательная техника. М.: Техносфера, 2005.