

# Выбор параметров непосредственного преобразователя напряжения с учетом вопросов электромагнитной совместимости

**В рамках данной статьи рассмотрены основные источники кондуктивной помехозащиты непосредственного преобразователя напряжения повышающего типа, на основе которого строится активный корректор коэффициента мощности. В результате выполненного анализа динамических процессов преобразовательного устройства и измерения уровня кондуктивных помех даны рекомендации для проектирования, позволяющие снизить уровень помехозащиты в диапазоне частот 150 кГц...30 МГц.**

Евгений Загородских

eugenetic@yandex.ru

Непосредственный преобразователь напряжения повышающего типа (НПН ПТ), представленный на рис. 1, является основой активного корректора коэффициента мощности (ККМ). Он широко применяется в источниках вторичного электропитания (ИВЭП) [1, 2]. Хотя данный узел и вводится в схему ИВЭП для улучшения гармонического состава питающей сети, наличие коммутационных процессов вызывает другую проблему электромагнитной совместимости (ЭМС) — кондуктивную помехозащиту (КП). Уровень КП зависит от многих факторов: величины питающего напряжения, режима работы преобразователя, типа нагрузки, качества и плотности монтажа и т. д.

В большинстве случаев на этапе разработки устройства разработчики не задумываются о пробле-

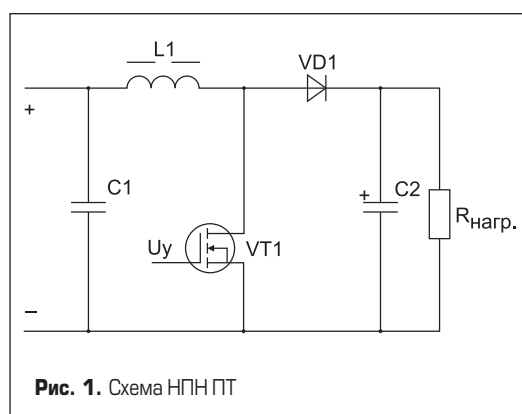


Рис. 1. Схема НПН ПТ

ме КП и решают эту задачу только после получения от преобразователя заданных техническим заданием характеристик по КПД и массо-габаритным показателям. Это является серьезной ошибкой, поскольку вынуждает проектировать фильтры электромагнитных помех достаточно сложной структуры.

При проектировании импульсных преобразователей разработчики зачастую стараются выбирать режимы, позволяющие «мягко» коммутировать элементы, что несколько повышает КПД. Так, в случае активного ККМ очень распространен граничный режим работы, который позволяет избежать тока обратного восстановления диода, но повышает уровень кондуктивных помех.

Для преобразовательного устройства любого типа можно определить ряд параметров, которые бы обеспечивали минимальный уровень помех. В данной статье рассмотрены параметры активного ККМ, так как в настоящее время именно этот узел считается неотъемлемой частью абсолютно любого ИВЭП.

Измерение КП осуществляется в соответствии с нормами ГОСТ Р 51527-99 «Совместимость технических средств электромагнитная. Стабилизированные источники постоянного тока. Кондуктивные электромагнитные помехи. Нормы и методы испытаний». Данный ГОСТ подразумевает два класса жесткости — А и В. Исследуемый в рамках этого стандарта диапазон весьма широкий — от 150 кГц до 30 МГц. Это делает задачу снижения КП очень сложной и требует тщательного разбора принципа работы импульсного преобразователя. При использовании материалов,

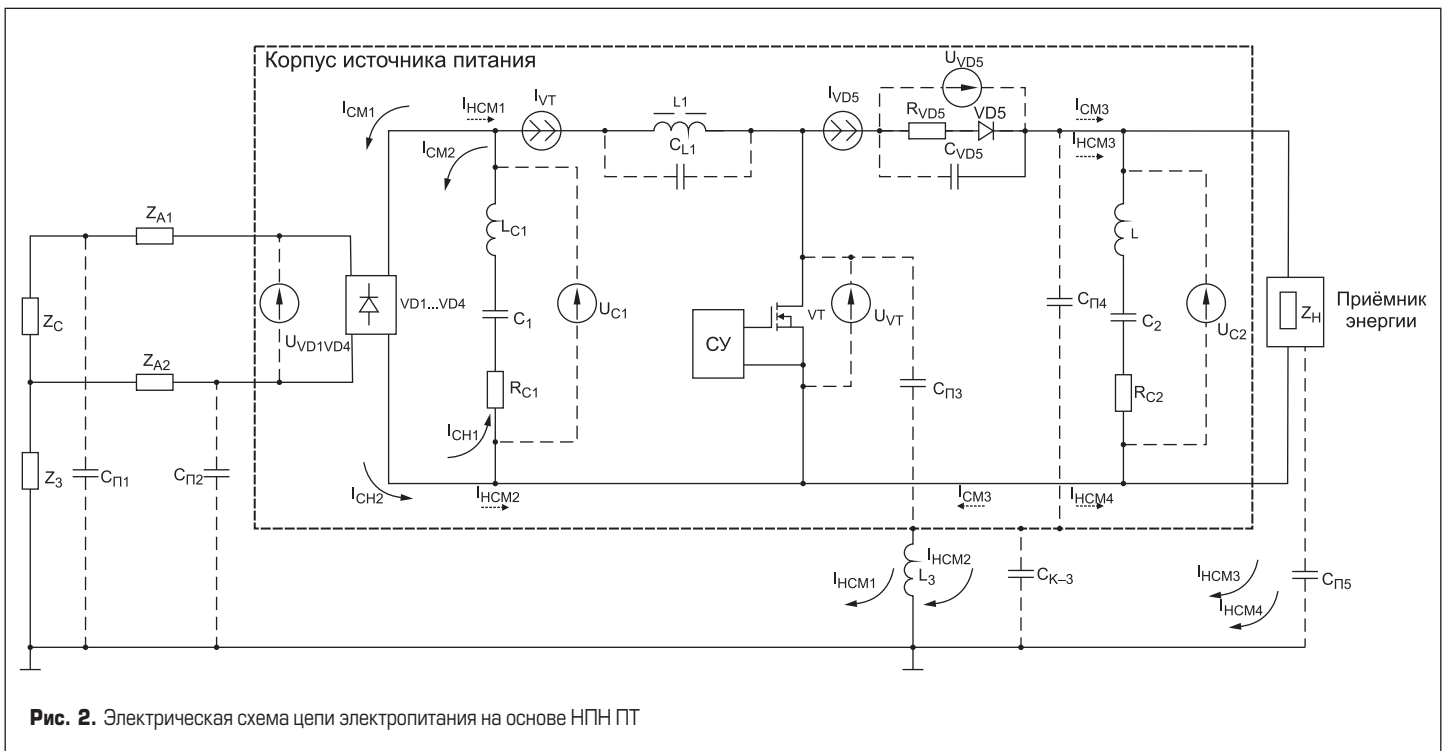


Рис. 2. Электрическая схема цепи электропитания на основе НПН ПТ

представленных в работах [3,4] была сформирована схема распространения помех в ИВЭП на основе НПН ПТ (рис. 2).

На схеме приведены следующие параметры:  $U(t)_{VD1-VD4}$ ,  $U(t)_{VD5}$ ,  $I(t)_{VD5}$  — указывающие на наличие импульсных напряжений и токов, возникающих при коммутациях диодов,  $U(t)_{VT}$ ,  $I(t)_{VT}$  — перенапряжение и броски тока во время коммутации силового ключа соответственно,  $U(t)_{C1}$  — падение напряжения на паразитном сопротивлении конденсатора входного фильтра.

Также на схеме представлены паразитные параметры элементов: сопротивления утечки и индуктивности выводов конденсаторов, межвитковая емкость дросселя, внутреннее сопротивление и барьерная емкость диодов, емкости между проводами линий электропитания и «землей», емкости между компонентами силовой цепи и корпусом, емкость приемника энергии относительно «земли», емкость между корпусом и «землей», индуктивность заземляющего проводника.

Экспериментально установлено следующее:

- наличие емкостного фильтра по питанию (десятки-сотни микрофарад) позволяет снизить уровень эмитируемых помех до 50 дБ/мкВ (рис. 3);
- при питании от источника постоянного напряжения и выпрямленного переменного, не сглаженного фильтром напряжения уровень помех практически идентичен.

Учитывая вышесказанное можно упростить анализ, заведомо приняв, что рассматриваемая схема классического НПН ПТ запитана от источника постоянного напряжения без фильтра. Для анализа протекающих процессов достаточно запитать НПН ПТ пониженным напряжением питания. В данном случае было принято напряжение, равное 20 В. Все последующие эксперименты проводились при

постоянной мощности на нагрузке ( $P_{нагр.} = Const$ ). При увеличении питающего напряжения уровень помех будет возрастать прямо пропорционально.

При коммутации силового транзистора образуется перепад напряжения, амплитуда которого зависит от напряжения питания. Этот перепад характеризуется очень широким спектром, помехи возникают в диапазоне частот 15 кГц...400 МГц. ИВЭП как источник помех создает на проводах питания напряжение помех — симметричное и несимметричное, которое, в свою очередь, создает токи помех. Симметричные токи помех считаются менее опасными, а несимметричные, достаточно сложно поддающиеся фильтрации, вследствие наличия высокочастотных составляющих проникают в защищаемый диапазон частот. Высокочастотные составляющие несимметричных токов поступают в источник электропитания через паразитную емкость между корпусом ИВЭП и заземлением, после

чего выделяются на сопротивлении источника, из-за чего создается напряжение помех [3, 4].

При несимметричном паразитном типе связи в проводниках протекают токи в одном направлении по каждому проводнику. Эти токи вызваны внешним полем в контуре между проводником и плоскостью заземления с различным значением полного сопротивления по отношению к земле. Однако помехи симметричного типа могут трансформироваться в несимметричные через паразитный импеданс устройства [3].

Существует три основные области в диапазоне 0,15–30 МГц, которые условно можно обозначить:

- область низких частот (ОНЧ) — 0,15–3 МГц;
- область средних частот (ОСЧ) — 3–16 МГц;
- область высоких частот (ОВЧ) — 16–30 МГц.

ОВЧ (выше 16 МГц) определяется высшими гармониками коммутируемого напряжения и перенапряжений силового ключа, но их влияние невелико. В значительной мере дан-

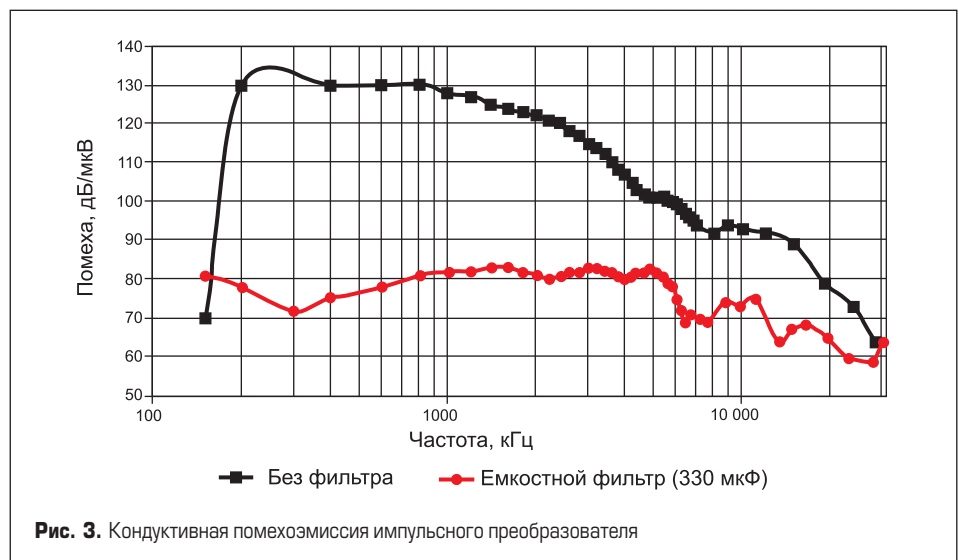


Рис. 3. Кондуктивная помехоземсия импульсного преобразователя

ная область зависит от длины проводников и возникающих из-за них резонансных явлений. Последствия от влияния резонансных процессов определить достаточно сложно, и потому следует разрешать эту проблему уменьшением длины проводников.

ОСЧ (3–16 МГц) в значительной мере определяется сквозными токами и перенапряжениями ключевых элементов, возникающими в преобразователе. Их можно рассматривать как разложение импульса в ряд Фурье, но его длительность будет составлять десятки-сотни наносекунд.

ОНЧ (0,15–3 МГц) определяется коммутацией напряжения на силовом ключе. Ее можно рассматривать как прямоугольный импульс, имеющий фронт нарастания. Этот фронт зависит от времени, затрачиваемого на включение и выключение полупроводниковых элементов (диода и транзистора). При математическом анализе (разложение в ряд Фурье) характеристики работы ключевых элементов преобразователя принимаются идеальными, то есть не учитываются длительность фронта, значения сквозных токов и перенапряжений [4, 5].

На рис. 4 представлен график спектра последовательности прямоугольных импульсов с длительностью  $t_{имп}$  и периодом  $T$ . Спектр имеет «лепестковый» характер, определяющийся скважностью импульсов. При этом из рис. 4 становится понятно, что появление гармоник зависит от периода.

Амплитуда напряжения спектральных составляющих убывает обратно пропорционально частоте, причем по гиперболическому закону [3]. При рассмотрении спектра на логарифмической шкале он будет затухать по закону 20 дБ/дек (рис. 5).

До частоты  $f_1$  спектр будет неизменным (с определенной долей погрешности), точка излома  $f_1$  будет определяться из соотношения  $1/\pi t_p$ , в то время как  $f_2$  зависит от длительности фронта импульса, которая определяется временем восстановления силового ключа [3].

Для анализа возникновения помех разработаны эквивалентные схемы НПН ПТ. Схемы замещения, представленные на рис. 6, позволяют проанализировать коммутационные процессы на интервалах включения и выключения транзистора.

На рис. 6а приведена схема НПН ПТ на коммутационном интервале 2–5 (рис. 7) при условии, что ток дросселя и напряжение на выходном фильтре не изменяют своего значения, а запирающие свойства шунтирующего диода полностью восстановлены. Здесь силовой транзистор характеризуется сопротивлением перехода, а диод — усредненным значением барьерной емкости. Схема, изображенная на рис. 6б, справедлива для интервалов 8–9 (рис. 7). Она учитывает влияние только основных параметров, определяющих коммутационные процессы на данном интервале. Здесь

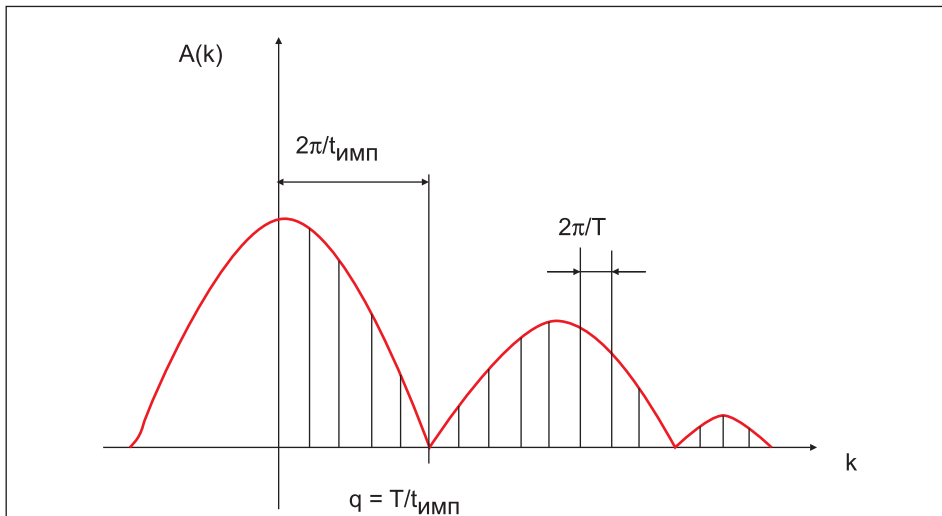


Рис. 4. Спектр периодической последовательности прямоугольных импульсов

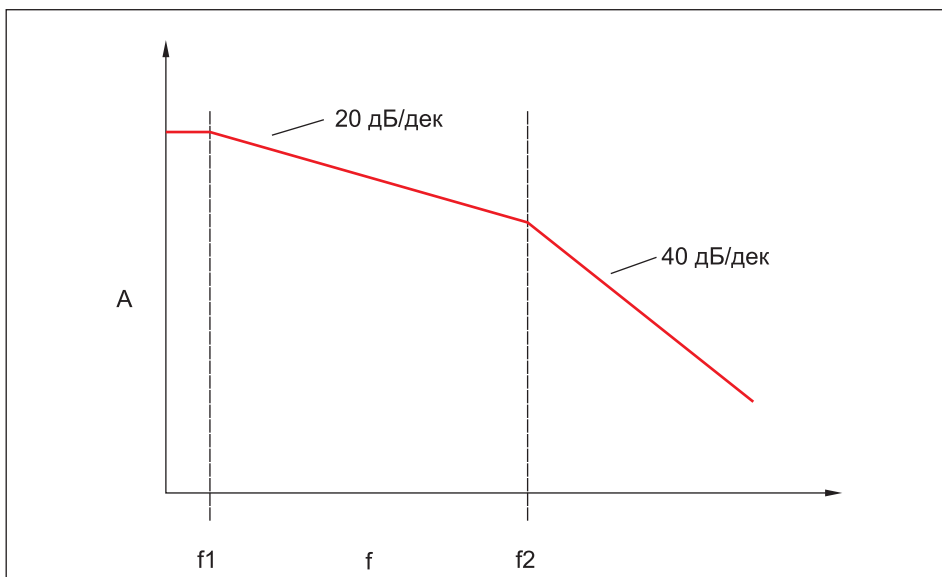


Рис. 5. График затухания спектра последовательности прямоугольных импульсов

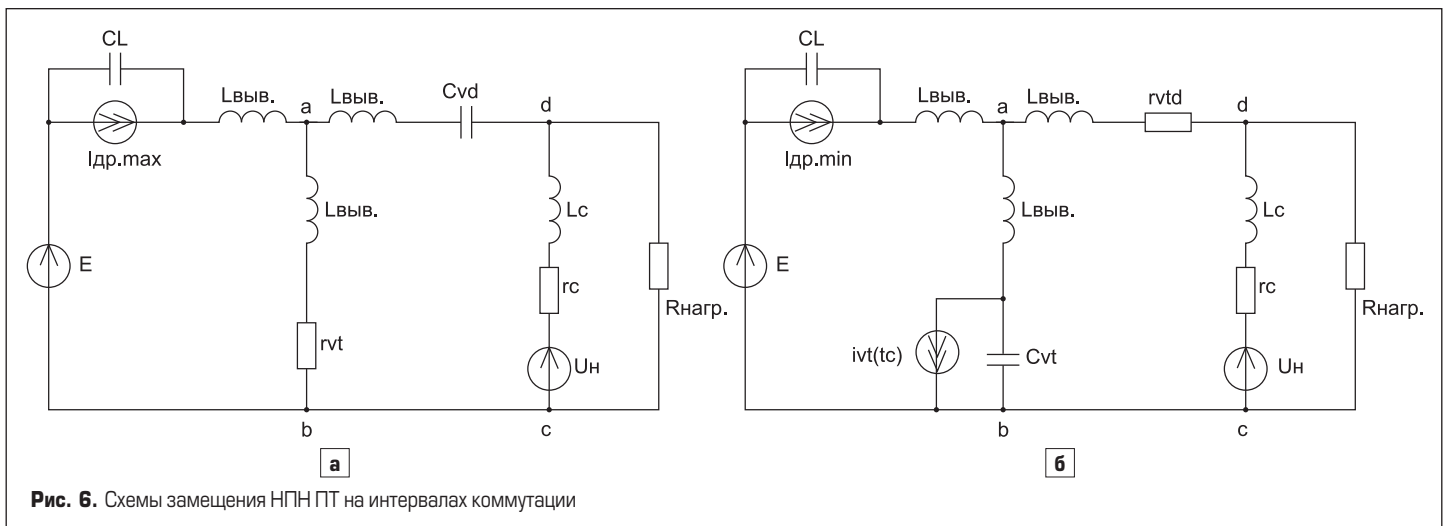


Рис. 6. Схемы замещения НПН ПТ на интервалах коммутации

силовой транзистор замещается емкостью перехода сток–исток и источником линейно спадающего тока. Диод замещен эквивалентным сопротивлением. Эквивалентная схема допускает, что рост напряжения на транзисторе начинается при токе стока, близком к нулю [3].

Из диаграмм, показанных на рис. 7, можно сделать вывод, что помехоэмиссия очень сильно зависит от взаимодействия диода и силового ключа. При жесткой коммутации во время отпирания силового ключа возникает кратковременное короткое замыкание, что приводит к появлению тока ударного возбуждения, который, в свою очередь, вызывает перенапряжение. Причем чем больше амплитуда этого тока, тем выше уровень помехоэмиссии. Таким образом, ОСЧ определяется паразитными параметрами полупроводниковых элементов.

Минимизация паразитных емкостей путем использования ключей из соответствующих материалов (например, из карбида кремния — SiC) позволит интенсифицировать процесс коммутации силового ключа и диода, что, в свою очередь, приведет к снижению ударного тока и, следовательно, уровня помех. Определяющими для ОНЧ факторами являются коммутируемый силовым ключом ток и амплитуда прикладываемого напряжения, так как именно эти параметры влияют на амплитуду тока ударного возбуждения (звона) при запираии транзистора.

ОНЧ, в случае НПН ПТ, определяется режимом работ. НПН ПТ способен работать в трех режимах: непрерывном, прерывистом и граничном, который можно рассматривать как частный случай прерывистого режима.

Режим непрерывного тока (рис. 8) характеризуется малым мгновенным значением коммутируемой силовым ключом

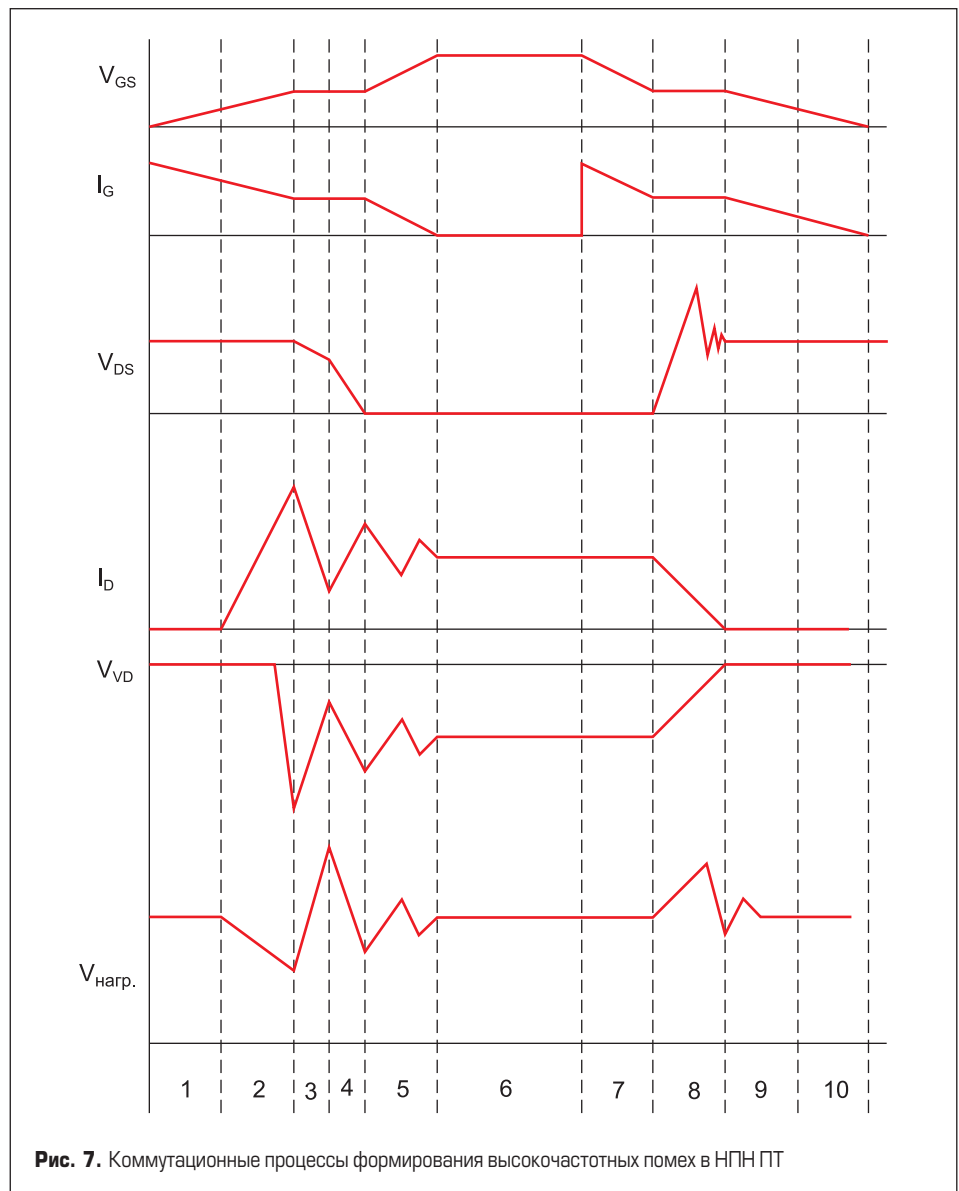


Рис. 7. Коммутационные процессы формирования высокочастотных помех в НПН ПТ

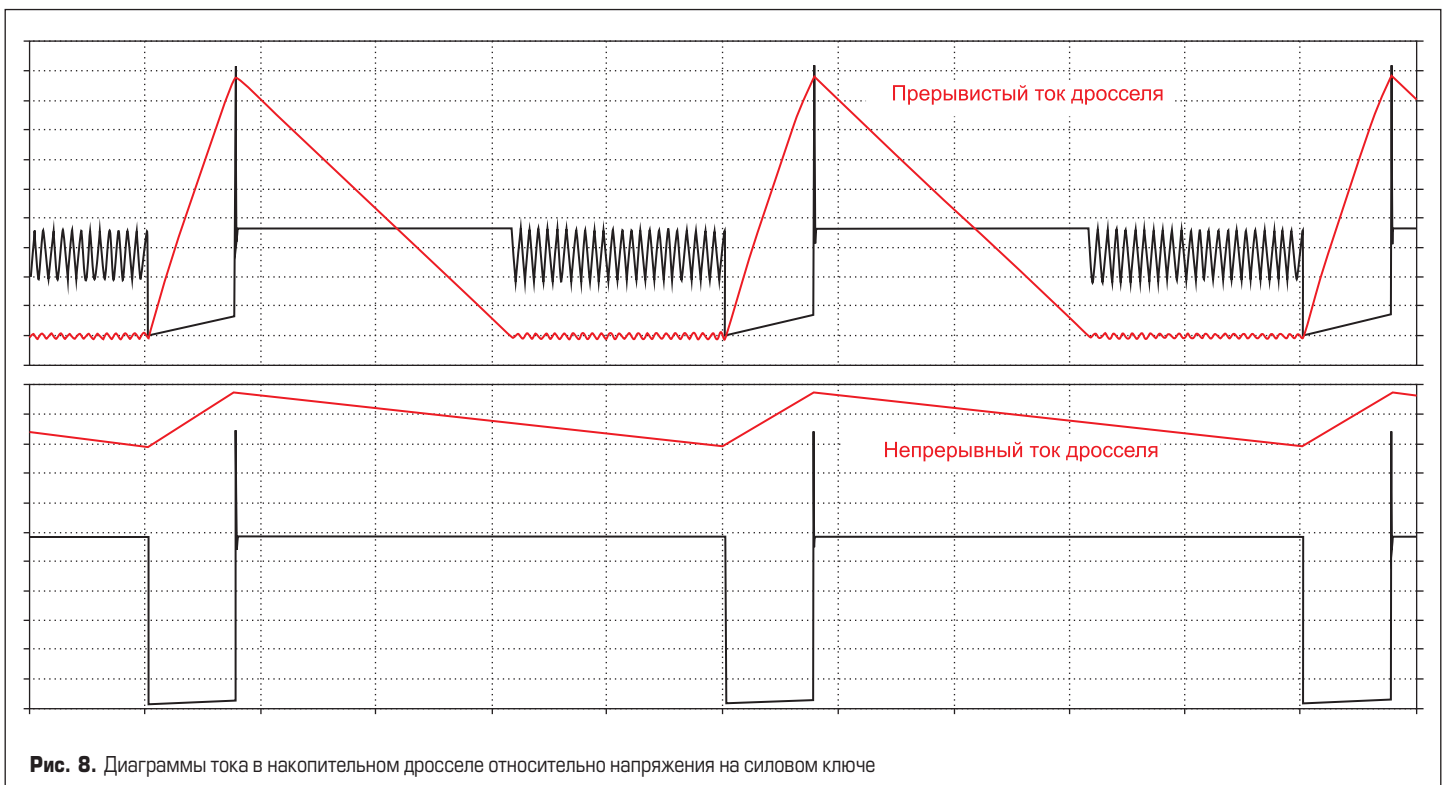


Рис. 8. Диаграммы тока в накопительном дросселе относительно напряжения на силовом ключе

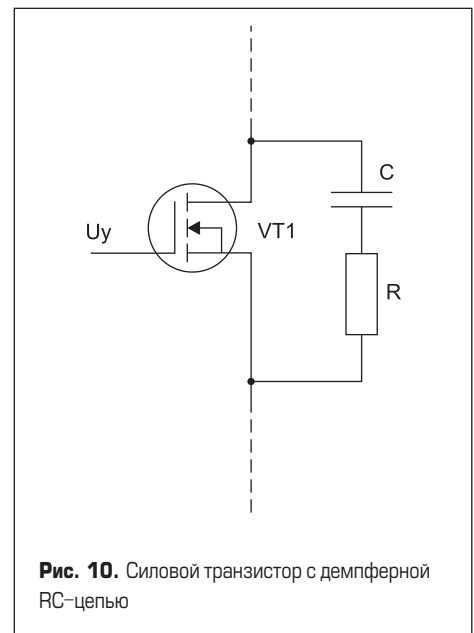
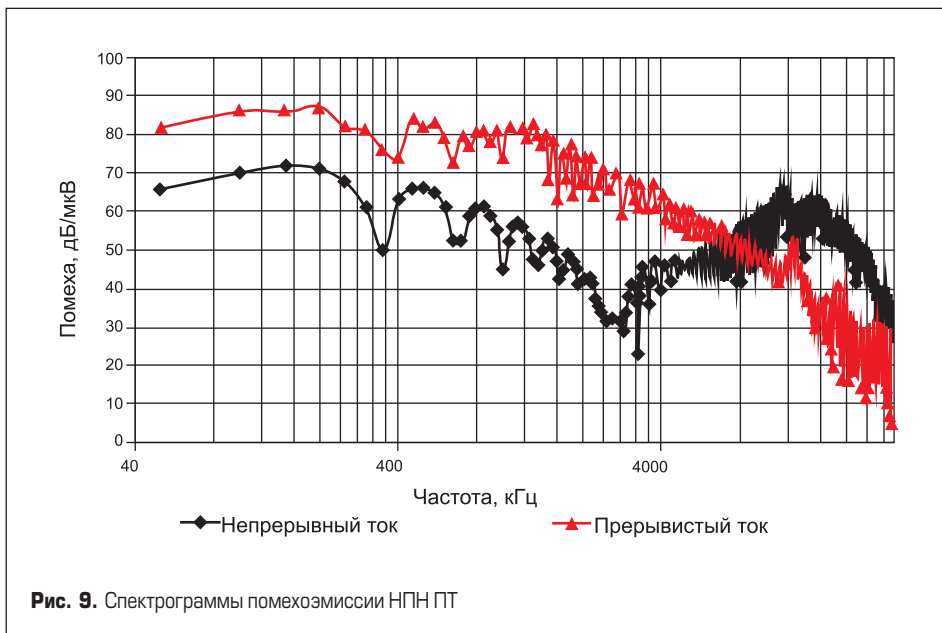


Рис. 10. Силовой транзистор с демпферной RC-цепью

мощности по сравнению с прерывистым режимом, но при этом возникает сквозной ток диода (ток обратного восстановления), вызывающий возрастание эмиссии помех в высокочастотной области спектра. Граничный режим, так же, как и прерывистый, позволяет «мягко» коммутировать диод, но отличается от непрерывного достаточно высокой коммутируемой мощностью, хотя и меньшей, чем для режима прерывистого тока.

В результате проведения экспериментов в двух режимах работы (при прерывистом и непрерывном токе дросселя) были получены спектрограммы, представленные на рис. 9. Из них становится понятно, что в ОНЧ (0,15–3 МГц), вследствие значительной величины коммутируемого ключом тока, уровень КП в режиме прерывистого тока дросселя превышает уровень для режима непрерывного тока на 15–40 дБ/мкВ.

В области частот 3–16 МГц (ОСЧ) КП будет в большей степени определяться сквозными токами [5]. Данное утверждение под-

тверждается графиком, приведенным на рис. 9. Так, при работе в прерывистом режиме сквозной ток отсутствует, и затухание помехи происходит равномерно с наклоном примерно 20 дБ/дек. При этом высшие гармонические составляющие основной частоты оказывают значительное влияние и на ОСЧ. При таком режиме работы можно улучшить помехоэмиссию, применив фильтр ЭМП. В режиме непрерывного тока возникает и сквозной ток, что также вызывает рост помех в ОСЧ.

С позиции ЭМС, режим прерывистого тока достаточно ущербный, в отличие от режима непрерывных токов, который имеет низкий уровень помех в ОНЧ, так как уровень тока, коммутируемый силовым ключом, достаточно мал, но имеет подъем помехоэмиссии в ОСЧ вследствие наличия обратного тока восстановления диода. Этот ток вызывает колебания напряжения на диоде и паразитных параметрах фильтрующего конденсатора. Простейшим способом уменьшить данное влияние является

применение демпферной цепи, включенной, например, параллельно силовому ключу (рис. 10) [6]. Демпферная цепь предназначена для затягивания фронта, сглаживания коммутационных процессов и снижения скорости их протекания.

Введение демпфера типа RC является одним из наиболее простых способов, позволяющих смягчить коммутацию полупроводниковых элементов, но при этом снижается КПД преобразователя. Для устранения этого недостатка применяются цепи без активной составляющей. Постоянная времени цепи равна примерно 300 нс при  $R = 10 \text{ Ом}$  и  $C = 30 \text{ нФ}$  (рис. 10). Постоянная времени, выбранная достаточно большой, в реальной схеме не применена. Но таким образом можно более явно показать область спектра, на которую она окажет влияние.

На рис. 11 видно, что в ОСЧ уровень помех снизился примерно на 5–7 дБ/мкВ, однако при этом ударный ток не становится меньше и устраняются только последствия (перенапряжение). Чтобы достичь максимального эффекта, необходимо устранять помехи непосредственно в источнике, то есть выбирать элементы с лучшими динамическими характеристиками. Используя диод на основе карбида кремния, можно уменьшить время обратного тока восстановления, а значит, и ударного тока, вызывающего колебательность и перенапряжение.

Для макетирования применялись диод C2D05120 на основе карбида кремния (SiC) и кремниевый (Si) диод FR308. Емкость перехода составляет 33 и 60 пФ, а время восстановления — 10 и 500 нс соответственно.

На рис. 12 приведены спектрограммы помех при использовании диода на основе карбида кремния и кремниевого диода. При этом параллельно транзисторам в обоих случаях подключены одинаковые демпферные RC-цепи с постоянной времени 300 нс.

Из рис. 12 видно, что преимущество SiC-диодов по снижению уровня помех достигает примерно 20 дБ/мкВ.

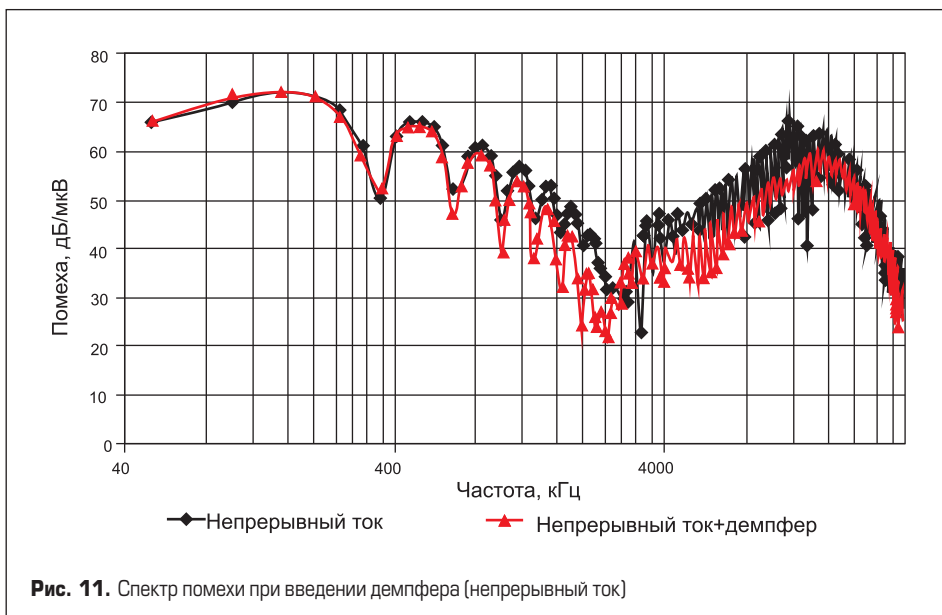


Рис. 11. Спектр помехи при введении демпфера (непрерывный ток)



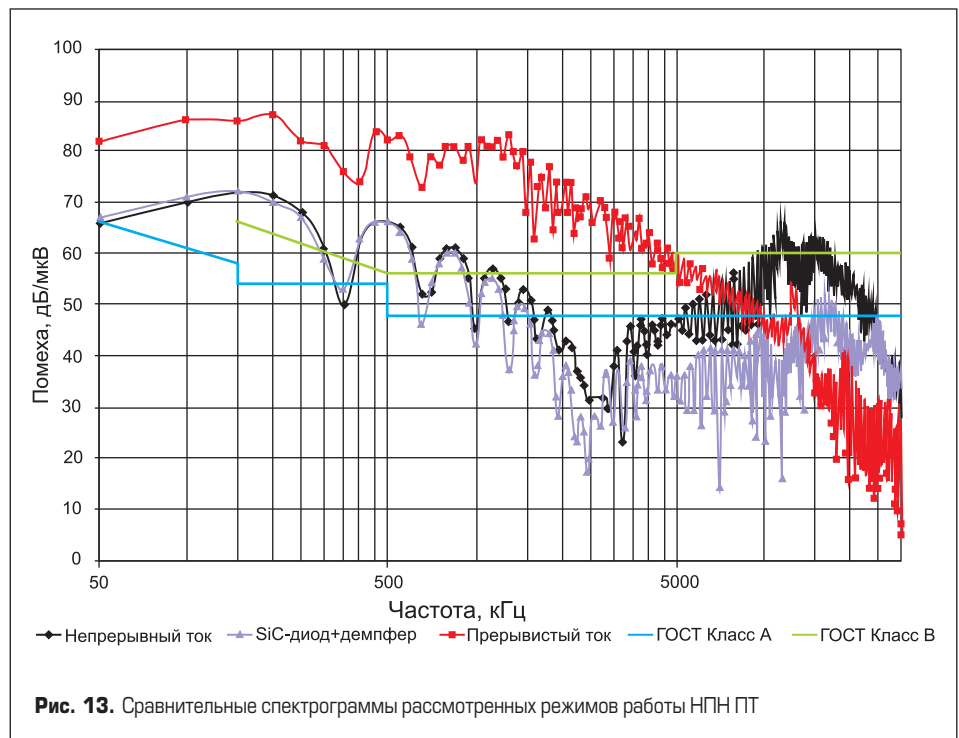
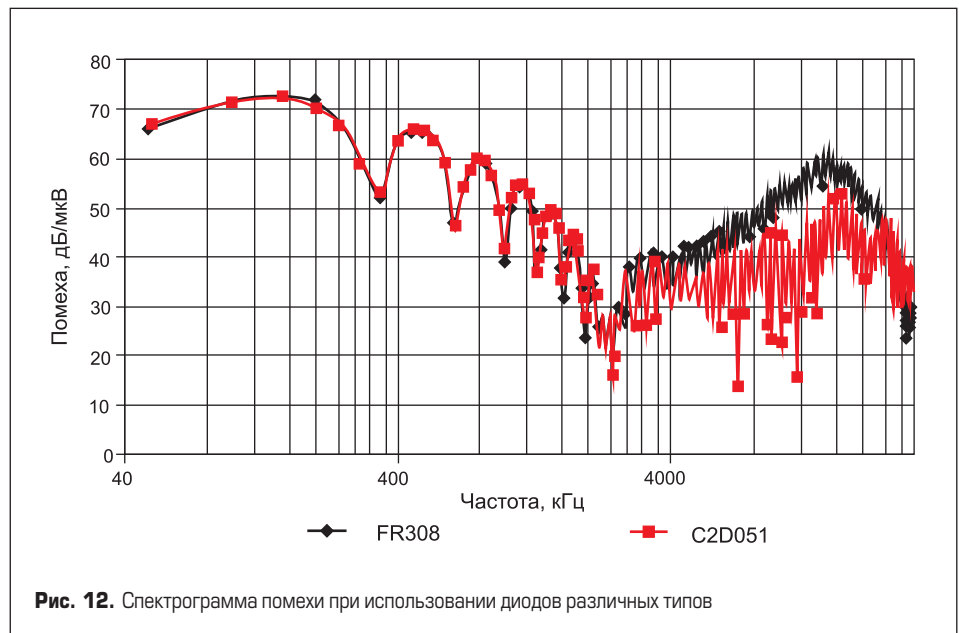
Чтобы подвести итог, необходимо соотнести базовую схему НПП ПТ без защитных цепей с кремниевыми элементами по отношению к наилучшему варианту, представленному на рис. 12, а также сравнить его с режимом прерывистого тока.

Сравнительные результаты, приведенные на рис. 13, показывают, что выбранный режим непрерывного тока, а также использование SiC-диода и демпферных цепей позволили снизить помехоэмиссию почти во всем исследуемом диапазоне частот. Снижение уровня эмитируемых помех составляет 5–40 дБ/мкВ.

В результате проведенных исследований можно сделать следующие выводы:

- низкочастотная область спектра помехи в основном определяется частотой коммутации ключевого элемента и падением напряжения на нем, а наличие высокого уровня коммутируемого тока усугубляет ситуацию;
- НПП ПТ, работающий в режиме непрерывного тока дросселя, имеет более низкий уровень помех в области низких частот, чем функционирующий в прерывистом;
- демпферная цепь, включенная параллельно силовому ключу, позволяет смягчить коммутацию ключевых элементов, тем самым снизив уровень помех в области средних частот;
- применение диода с барьером Шоттки на основе карбида кремния позволяет снизить обратный ток восстановления диода и, следовательно, уровень эмитируемых кондуктивных помех в области средних частот.

На основании проведенного исследования можно сделать ряд дополнительных выводов. Поскольку в ОНЧ (до 3 МГц) минимальное значение помехоэмиссии будет определяться напряжением, прикладываемым к силовому ключу, возможно проанализировать с позиции кондуктивной помехоэмиссии и другие типы импульсных преобразователей. Так, одноключевые схемы с гальваническим разделением являются самыми неудачными вариантами реализации ИВЭП, с точки зрения распространения помех, поскольку напряжение, прикладываемое к ключу, близко к удвоенному напряжению питания. Кроме того, наибольшее распространение в этих схемах получил режим прерывистых токов, то есть в данных схемах объединены два самых неудачных, с позиции кондуктивной помехоэмиссии, в области 0,15–3 МГц параметра работы ИВЭП. В случае двухтактных схем мостовая будет обладать меньшим уровнем помех в области 0,15–3 МГц, так как для получения той же мощности нагрузки в полумостовой схеме ток необходимо увеличить вдвое, а значит, также возрастут коммутируемая ключами мощность и уровень помех. Выбрав мостовую схему, можно выиграть от 7 до 10 дБ/мкВ. Следует отметить, что при таком рассмотрении двухтактных схем учитывается



только активная нагрузка. При использовании трансформатора в диагонали инвертора без соответствующего демпфирования силовых ключей преимущество данной схемы будет утрачено, потому что трансформатор вызывает рост помех во всем рассматриваемом диапазоне частот на те же 7–10 дБ/мкВ [6].

**Литература**

1. Васильев А., Худяков В., Хабuzов В. Анализ современных методов и технических средств коррекции коэффициента мощности у импульсных устройств // Силовая электроника. 2004. № 2.
2. Prasad A. R., Ziogas P. D., Manias S. An active power factor correction technique for three-phase diode rectifiers // IEEE Power Electronics Specialists Conference. [S. l.], 1989.

3. Электромагнитная совместимость устройств промышленной электроники: Руководство к организации самостоятельной работы / А. Н. Селяев, И. Е. Гребенев, А. Н. Лапин, В. В. Шкоркин / Томск: ТУСУР, 2007.
4. Подавление электромагнитных помех в цепях электропитания / Г. С. Векслер, В. С. Недочетов, В. В. Пилинский и др. — Киев: Техника, 1990.
5. Загородских Е. В., Скворцов В. А. Анализ помех, эмитируемых в сеть силовым ШИМ-преобразователем в диапазоне частот 0,15–3 МГц // Технологии электромагнитной совместимости. 2015. № 1.
6. Загородских Е. В. Об источниках кондуктивной помехоэмиссии при проектировании мостового инвертора напряжения // Технологии электромагнитной совместимости. 2016. № 1.