УДК 621.314.1

Е.В. Загородских

Кондуктивная помехоэмиссия мостового инвертора напряжения в режиме стабилизации тока и пути её снижения

Рассмотрены вопросы влияния элементов схемы мостового инвертора напряжения, работающего в режиме стабилизации тока, на кондуктивную помехоэмиссию. В процессе исследований изменялись характеристики большинства элементов и оценивалось их влияние на уровень кондуктивных помех. На основании выполненных исследований даны рекомендации по улучшению кондуктивной помехоэмиссии данного типа преобразователя.

Ключевые слова: мостовой инвертор, стабилизатор тока, трансформатор, снабберная цепь, кондуктивная помехоэмиссия, электромагнитная совместимость.

doi: 10.21293/1818-0442-2016-19-1-14-17

Мостовой инвертор напряжения (МИ) является одним из устройств, на основе которых формируются импульсные источники питания (ИИП) повышенной мощности. Особенностью данного схемотехнического решения является то, что он работает в двухтактном режиме, а потому имеет более высокий коэффициент использования и КПД по сравнению с однотактными схемами [1, 2].

Режим стабилизации тока зачастую необходим для обеспечения высокой эффективности электрохимических процессов. Обеспечение данного режима возможно при использовании магнитного усилителя (МУ) [3, 4] или же подключением дросселя в диагональ МИ (рис. 1).

Применение МУ усложняет конструкцию ИИП, т.к. требует подключения дополнительного преобразователя, обеспечивающего режим вынужденного намагничивания, что приведёт к усложнению протекающих процессов и локализации источников помехоэмиссии, поэтому для обеспечения режима стабилизации тока применялся дроссель в диагонали МИ. Исследуемая схема приведена на рис. 1, она позволяет вводить дополнительные компоненты для получения определённых свойств поэтапно, не изменяя при этом её основы, т.е. методика заключается в последовательном наращивании элементов МИ и исследовании каждого из полученных режимов работы на уровень кондуктивной помехоэмиссии.

Рис. 1. МИ в режиме стабилизации тока

Все исследования проводились при использовании регламентированного стандартами комплекса, состоящего из эквивалента сети NNB12 и селектив-

ного микровольтметра SMV11 с учётом вопросов обеспечения полного сопротивления входной цепи и цепи измерителя [5–10].

Для наглядности полученных результатов на спектрограммах приводятся нормы ГОСТа, который распространяется на устройства на полупроводниковых приборах [11]. Данный стандарт устанавливает нормы кондуктивной помехоэмиссии в диапазоне частот 0,15–30 МГц, при этом он условно разделен на три поддиапазона: 0,15–0,5; 0,5–5 и 5–30 МГц.

В табл. 1 указаны параметры макета для выполнения экспериментов, при этом мощность нагрузки, напряжение питания, а также параметры дросселя остаются постоянными для всех экспериментов.

Таблица 1

Параметры макета

№	Наименование	Характеристика
1	Индуктивность / реактивное сопротивление дросселя (L_1)	1,77 мГн / 1112 Ом
2	Ток в диагонали МИ	0,28 А
3	Материал сердечника	Альсифер
4	Мощность нагрузки	≈ 87 Вт
5	Силовые ключи	IRF740
6	Частота преобразования	100 кГц
7	Пауза между срабатыванием ключей	1 мкс

Наличие дросселя L_1 (см. рис. 1) в диагонали МИ значительно снижает уровень эмитируемых помех относительно активной нагрузки. Результаты измерения помехоэмиссии представлены на рис. 2. Снижение уровня кондуктивных помех обусловлено двумя аспектами:

- смещением резонансных частот паразитных колебательных контуров в низкочастотную область;
- после введения в схему дросселя (L_1) форма тока стала треугольной, а значит, амплитуды гармоник убывают пропорционально $1/n^2$, в то время как для прямоугольника этот закон имеет вид $1/n$, где n – номер гармоники.

Наличие достаточной паузы между срабатыванием силовых ключей приводит к отсутствию сквозного тока и позволяет не использовать дроссель с обратным диодом в цепи питания преобразователя.

Рис. 2. Помехоэмиссия МИ при работе на активную и индуктивную нагрузку

Применение более быстрого обратного диода (100 нс) также не оказывает влияния на уровень эмитируемых помех, но несколько улучшает динамические характеристики МИ, при этом наличие снабберной RCD -цепи по питанию (параллельно стойке инвертора) заметно снижает уровень помехоэмиссии. Снабберная цепь необходима для поглощения рекуперационных токов, величина которых значительно возрастает при наличии в диагонали МИ дросселя. С одной стороны, данную цепь можно заменить на конденсатор, что уменьшит потери на резисторе, с другой – этот резистор позволяет уменьшить добротность паразитных колебательных контуров. На рис. 3 представлены результаты измерения помехоэмиссии при подключении параллельно стойке мостового инвертора RCD -цепи по отношению к схеме на рис. 1.

Рис. 3. Влияние RCD -цепи на уровень кондуктивной помехоэмиссии

Применение снабберных RC -цепей параллельно силовым ключам МИ снижает уровень кондуктивных помех не только путём уменьшения добротности и смещения резонансных частот [12], но и затягиванием фронта нарастания напряжения, прикладываемого к силовым ключам. Постоянная времени

данных цепей была выбрана порядка 300 нс, т.е. в идеальном случае на частотах выше 3,3 МГц такая цепь обеспечивает затухание помех с наклоном 40 дБ/мкВ. Как видно из рис. 4, в источнике тока снабберная цепь оказывает значительное влияние из-за наличия резонансов, которые вносит индуктивность в диагонали МИ. Она позволяет снизить добротность паразитных контуров, тем самым значительно уменьшить энергию помех.

Рис. 4. Влияние снабберной цепи на уровень кондуктивной помехоэмиссии

Введение трансформатора ($TV1$), включенного последовательно с дросселем в диагонали МИ (рис. 5), необходимо для обеспечения гальванической развязки, при этом сопротивление нагрузки $R6 = 0$, т.е. вторичная обмотка трансформатора замкнута, что является наилучшим режимом работы для стабилизатора (источника) тока.

Рис. 5. Схема мостового инвертора с дросселем и трансформатором в нагрузке

Параметры трансформатора приведены в табл. 2.

Таблица 2

Параметры трансформатора		
№	Наименование	Характеристика
1	Коэффициент трансформации	10
2	Количество слоёв первичной обмотки	1

Трансформатор вызвал рост помехоэмиссии во всем исследуемом диапазоне частот, что вызвано наличием его паразитных параметров, таких как

коэффициент связи, межвитковая и межобмоточная емкость (рис. 6). Таким образом трансформатор вызывает своего рода «раскачивание» амплитуды помех во всём диапазоне частот.

Рис. 6. Влияние трансформатора на уровень кондуктивной помехоэмиссии

Для обеспечения режима постоянного тока, который применяется в большинстве существующих источников питания, в нагрузку вторичной обмотки трансформатора подключается выпрямитель. Ввиду наличия паразитных емкостей диодов (барьерная и диффузионная) следует ожидать роста помех на частотах, соответствующих этим емкостям при учете индуктивности дросселя. На рис. 7 представлены спектрограммы помехоэмиссии при подключении мостового выпрямителя, при этом выход закорочен.

Рис. 7. Влияние мостового выпрямителя на уровень кондуктивной помехоэмиссии

Как видно из рис. 7, уровень помехоэмиссии возрос в области нижних частот примерно на 4 дБ/мкВ. Возрастание помехи на частоте порядка 2 МГц обусловлено паразитными параметрами дросселя и паразитной емкостью диодов [16] высокочастотного выпрямителя. Паразитная емкость

КД2999 составляет порядка 5 пФ, данная емкость создаёт колебательный контур с индуктивностью в диагонали МИ ($\approx 1,7$ мГн), резонансная частота которого соответствует 2 МГц. Увеличение индуктивности дросселя приводит к увеличению добротности колебательного контура и, следовательно, к росту помехоэмиссии на данной частоте. При проектировании стабилизатора тока, а именно при выборе частоты преобразования и индуктивности дросселя в диагонали МИ, необходимо, по возможности, обеспечить значение резонансной частоты, которая бы не попадала в исследуемую область частот. Снижение частоты позволяет не только снизить уровень эмитируемых помех, но и уменьшает значение резонансной частоты колебательного паразитного контура. Для обеспечения заданного уровня мощности можно обеспечить минимальную частоту 20 кГц, это позволит работать преобразователю вне звукового диапазона, при этом индуктивность дросселя составит порядка 9 мГн, но даже в этом случае значение резонансной частоты составит 751 кГц. Чтобы её снизить, при заданных параметрах (20 кГц, 9 мГн) необходимо обеспечить минимальную ёмкость порядка 150 пФ, что позволит сместить резонанс на частоту 137 кГц, которая лежит за диапазоном измерения.

Наличие неполярного конденсатора малой ёмкости в нагрузке стабилизатора тока незначительно улучшает помехоэмиссию, т.к. заряд конденсатора происходит ограниченным значением тока, а резонансная частота несколько смещается, что устраняет высокочастотные колебания паразитных резонансных контуров.

По результатам выполненных исследований получены следующие выводы:

- в работе рассмотрены возможности снижения уровня кондуктивных помех без использования помехоподавляющих фильтров в однофазных инверторах напряжения;

- наилучшие результаты показала схема со снабберными цепями, включенными параллельно каждому ключу инвертора, которые оказывают значительное влияние на уровень помехоэмиссии в диапазоне частот 0,5–4 МГц (снижают уровень помех примерно на 10 дБ/мкВ), устраняя влияние паразитных параметров дросселя в диагонали МИ и уменьшая количество гармоник в высокочастотной области;

- включение в диагональ МИ трансформатора последовательно с дросселем приводит к увеличению уровня помех более чем на 10 дБ/мкВ в области низких частот (до 3 МГц);

- применение диодов с большим временем восстановления позволяет сместить резонансную частоту за диапазон измерения, т.е. ниже 0,15 МГц;

- для стабилизатора тока применение нулевой схемы выпрямления (с параллельным включением диодов) позволит снизить уровень эмитируемых помех, т.к. результирующая паразитная ёмкость значительно возрастает;

– рассмотренные способы снижения уровня помех не позволяют спроектировать МИ в режиме стабилизации тока удовлетворяющего нормам ГОСТа без использования фильтра электромагнитных помех.

Литература

1. Моин В.С. Стабилизированные транзисторные преобразователи. – М.: Энергоатомиздат, 1986. – 376 с.
2. Баховцев И.А. Анализ выходных характеристик однофазного инвертора напряжения с гистерезисным управлением // Доклады ТУСУРа. – 2013. – № 3. – С. 58–62.
3. Дарибаев Т.Б. Источник асимметричного тока с улучшенными характеристиками по электромагнитной совместимости / Т.Б. Дарибаев, Е.В. Загородских, В.А. Скворцов // НТИ–2012: сб. статей. – Новосибирск, 2012. – С. 237–240.
4. Zagorodskikh E.V. An asymmetric current source for electrochemical technologies / E.V. Zagorodskikh, V.A. Skvortsov // Science progress in European countries: new concepts and modern solutions. – 2013. – Vol. 1. – P. 91–94.
5. ГОСТ Р 51318.16.1.2–2007. Аппаратура для измерения параметров промышленных радиопомех и помехоустойчивости. – М.: Стандартинформ, 2008. – 65 с.
6. ГОСТ Р 50414–92. Оборудование для испытаний. Камеры экранированные. – М.: Изд-во стандартов, 1998. – 28 с.
7. ГОСТ Р 51319–1999. Приборы для измерения промышленных радиопомех. – М.: Изд-во стандартов, 2000. – 54 с.
8. Селективный микровольтметр и прибор для измерения радиопомех типа SMV 11. Описание / VEB MESSELEKTRONIK BERLIN. – Berlin, 1985. – 57 с.
9. 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. – 45 с.

10. Загородских Е.В. Оценка согласующих устройств для измерений несимметричных промышленных радиопомех / Е.В. Загородских, В.А. Скворцов // Метрология. – 2015. – № 2. – С. 64–71.

11. ГОСТ Р 51318.14.1–2006. Совместимость технических средств электромагнитная. Бытовые приборы, электрические инструменты и аналогичные устройства. Радиопомехи промышленные. Нормы и методы испытаний. – М.: Стандартинформ, 2007. – 57 с.

12. Загородских Е.В. Анализ помех, эмитируемых в сеть силовым ШИМ-преобразователем в диапазоне частот 0,15–3 МГц / Е.В. Загородских, В.А. Скворцов // Технологии электромагнитной совместимости. – 2015. – № 1. – С. 21–27.

Загородских Евгений Вячеславович

Аспирант каф. промышленной электроники ТУСУРа
Тел.: 8-923-435-07-85
Эл. почта: eugenesis@yandex.ru

Zagorodskikh E.V.

Conductive emission of the bridge voltage inverter in current stabilization mode and the ways to reduce it

The paper outlines an impact of the bridge inverter elements, which operates in current stabilization mode on the conductive emission. During the investigation it was changed the parameters of the elements and estimated an impact on the interference emission. On the ground of the realized research it was given the recommendations to improve conductive emission of the converter.

Keywords: bridge inverter, current stabilization, transformer, snubber circuit, conductive emission, electromagnetic compatibility.