

Продолжение. Начало в №1'2013

Исследование устройств преобразовательной техники

на кондуктивную помехоэмиссию с использованием LTSpice

В предыдущей части был обоснован выбор программного обеспечения LTSpice фирмы Linear Technology для адекватного моделирования кондуктивной помехоэмиссии. Данная статья посвящена моделированию кондуктивной помехоэмиссии в одноключевых преобразователях напряжения. Показано влияние паразитных параметров активных элементов схемы на достоверность расчетов уровня помехоэмиссии электронных устройств, обосновывается необходимость использования более полных схем замещения активных элементов (с учетом реактивных параметров).

Виталий Скворцов, к. т. н.

sva@ie.tusur.ru

Константин Низаметдинов

morbisignare@me.com

В данной работе, посвященной исследованию влияния используемых схем замещения элементов силовой структуры на результаты моделирования в частотной области, в качестве критерия адекватности моделирования использу-

ется сопоставление результатов моделирования с результатами испытаний натурного макета преобразователя с аналогичными параметрами.

Объектом исследования выбран непосредственный повышающий преобразователь напряжения (рис. 1). Принцип его работы заключается в том, что при открытии транзистора VT1 происходит накопление энергии в дросселе L1. При этом нагрузка питается энергией, ранее накопленной в конденсаторе C1. При закрытом транзисторе энергия, накопленная в L1, передается на заряд конденсатора и нагрузку через диод VD1.

В моделирующем программном обеспечении LTSpice возможно использовать разнообразные схемы замещения элементов за счет задания реальных и нулевых параметров в перечне параметров схемы замещения элемента. При этом задание частичных параметров схемы позволяет получить различные схемы замещения.

Существуют различные схемы замещения MOSFET. На рис. 2 приведены наиболее распространенные в литературе варианты [1–3].

При моделировании силового преобразователя в LTSpice по умолчанию используется похожая схема замещения MOSFET с параметрами, приведенными в табл. 1 (ряд параметров изначально нулевые). Аналогично в таблице 2 приведены параметры, учитываемые в LTSpice для сопротивлений, индуктивностей, конденсаторов и силовых диодов.

Как видно, список параметров электронных компонентов довольно объемный, однако это не может гарантировать точности моделирования в частотной области, так как большинство параметров по умолчанию нулевые, хотя для временной области этих параметров более чем достаточно. Это подтверждается экспериментальными данными, приведенными на рис. 3–5. На рис. 5 приведены расчетная спектрограмма кондуктивных помех исследуемого преобразователя при использовании базовых схем замещения и спектрограмма, полученная при экспериментальном

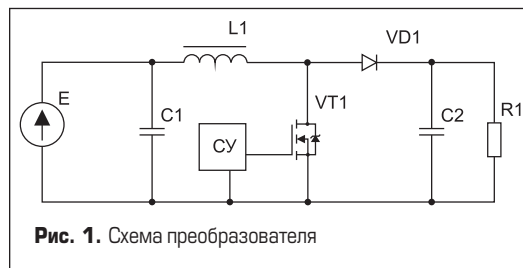


Рис. 1. Схема преобразователя

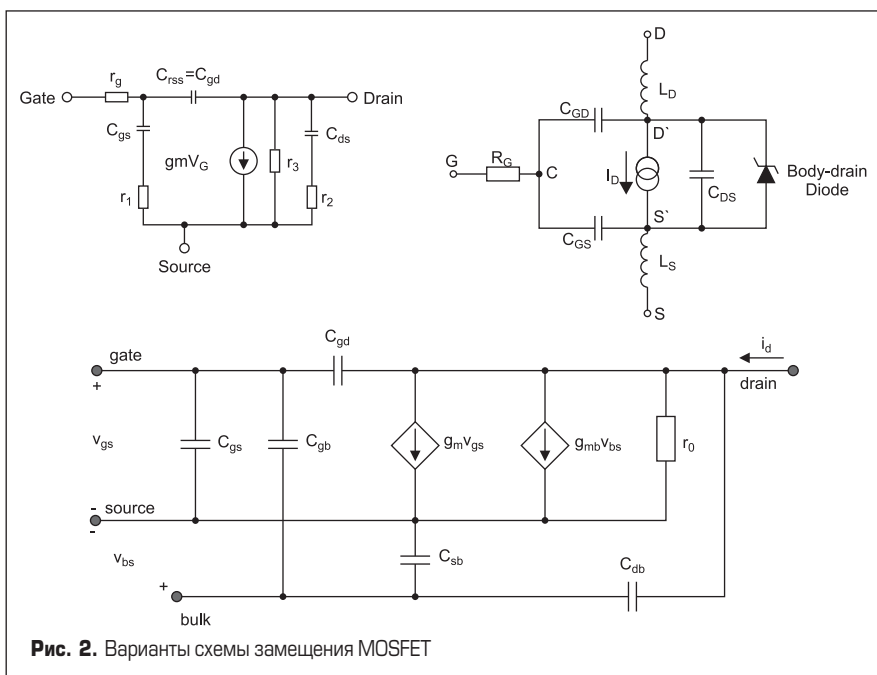


Рис. 2. Варианты схемы замещения MOSFET

исследовании аналогоичного преобразователя в соответствии с методиками ГОСТ; на рис. 3, 4 показаны расчетные и экспериментальные временные характеристики тока дросселя исследуемого преобразователя. Действующие и мгновенные значения тока дросселя отличаются не более чем на 10%, что является допустимым для инженерных расчетов, а полученный спектр помех расходитя более чем на 50 дБ по отношению к экспериментальным данным

Таблица 1. Параметры MOSFET

Обозначение	Название параметра
R_g	Омическое сопротивление затвора
R_s	Омическое сопротивление истока
R_d	Омическое сопротивление стока
$V_{ю}$	Пороговое напряжение
K_p	Крутизна
C_{gdmax}	Емкость затвор-сток максимальная
C_{gdmin}	Емкость затвор-сток минимальная
C_{gs}	Емкость затвор-исток
C_{ds}	Емкость сток-исток
$C_{ю}$	Емкость перехода внутреннего диода
a	Нелинейность параметра C_{gdmin}/C_{gdmax}
I_s	Обратный ток
R_b	Объемное омическое сопротивление
N	Коэффициент эмиссии внутреннего диода
t_f	Время восстановления внутреннего диода
E_g	Энергия активации внутреннего диода
V_{ds}	Напряжение сток-исток
R_{on}	Омическое сопротивление в открытом состоянии
Q_g	Суммарный заряд

Таблица 2. Параметры электронных компонентов схемы

Обозначение	Название параметра
R	Сопротивление резистора
L_R	Индуктивность резистора
C_R	Емкость резистора
C	Емкость конденсатора
L_c	Последовательная индуктивность конденсатора
R_c	Последовательное сопротивление конденсатора
C_c	Параллельная емкость конденсатора
R_{cp}	Параллельное сопротивление конденсатора
L	Индуктивность дросселя
C_l	Параллельная емкость индуктивности
R_l	Последовательное сопротивление индуктивности
R_{lp}	Параллельное сопротивление индуктивности
C_{cm}	Синфазная емкость
I_s	Ток насыщения диода
R_s	Омическое сопротивление диода
N	Коэффициент эмиссии диода
E_g	Энергия активации диода
X_{ii}	Температурный коэффициент
BV	Обратное напряжение пробоя диода
IBV	Ток напряжения пробоя
C_{ok}	Емкость перехода катод — анод
V_i	Напряжение диода в открытом состоянии
M	Классификационный коэффициент диода
t_f	Время восстановления диода
I_{avg}	Средний ток через диод
V_{pk}	Максимальное напряжение

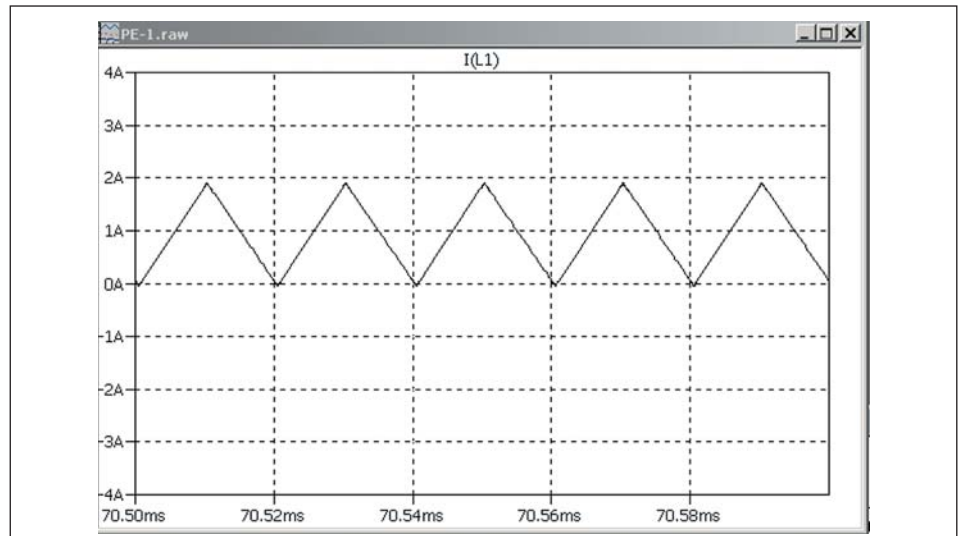


Рис. 3. Осциллограмма тока дросселя (модель)

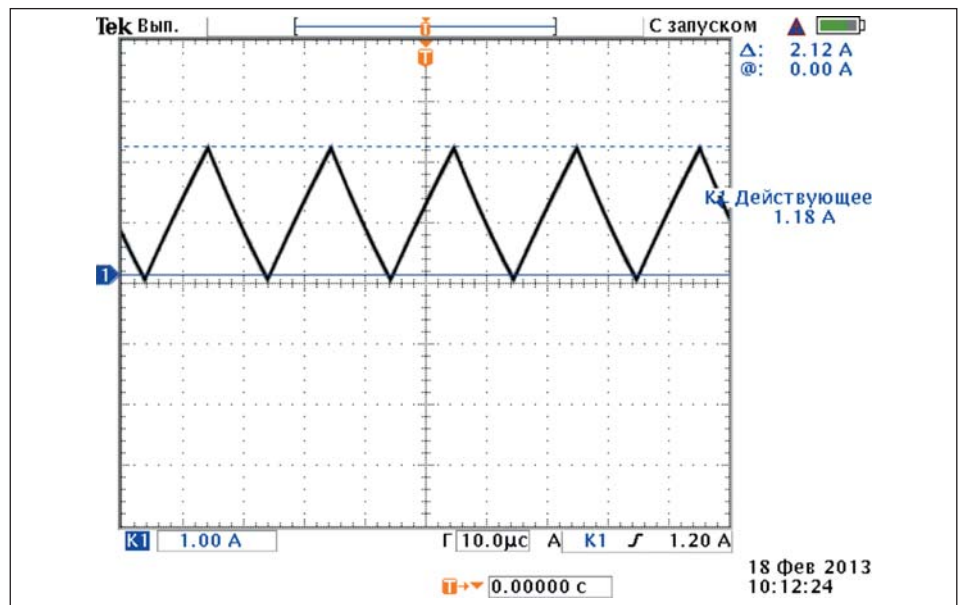


Рис. 4. Осциллограмма тока дросселя (макет)

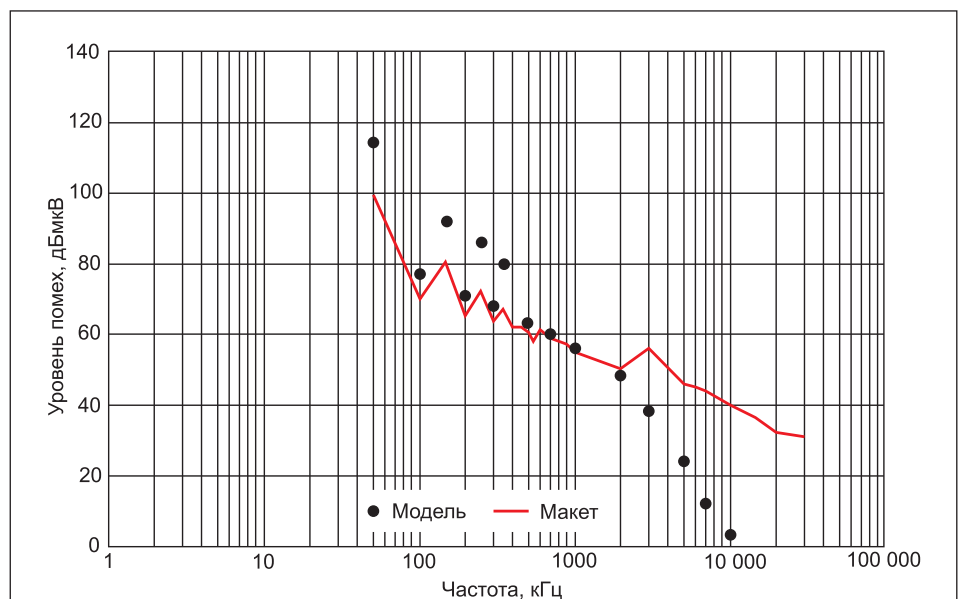


Рис. 5. Сравнительная спектрограмма кондуктивных помех

и совпадает лишь в небольшом диапазоне частот 300 кГц...1 МГц.

Согласно ГОСТ, для исключения влияния реактивных параметров источника электро-

питания при проведении экспериментов по электромагнитной эмиссии необходимо согласовывать измерительную цепь приборов с питающей сетью. Для этого в изме-

рительный комплекс вместе с селективным микровольтметром включен так называемый «эквивалент сети» с частотным диапазоном 10 кГц...0 МГц и коэффициентом калибровки $10 \pm 2,5$ дБ, который решает вышеуказанные задачи. В связи с этим при моделировании также необходимо согласовывать питающую сеть по измерительному импедансу. Для этого в структурную схему модели необходимо вводить эквивалент сети (в соответствии с ГОСТ Р 51318.15-99 и ГОСТ Р 51319-99), который будет задавать измерительный импеданс питающей сети. На рис. 6 приведены схема испытаний и структурная схема эквивалента сети.

Помимо эквивалента сети, было решено добавить параметры эквивалентных схем дросселя, конденсаторов и резистора: $L_R, C_R, L_C, R_C, R_{CP}, C_P, R_P, R_{IP}$. Результаты расчетов с измененными параметрами приведены на сравнительной спектрограмме (рис. 7).

Как видно на рисунке, после ввода более полных параметров элементов в модель преобразователя удалось получить совпадение спектра частот 50 кГц...1 МГц. Однако для полноценного сравнения спектров такого диапазона недостаточно, поэтому решено внести синфазные емкости монтажных цепей C_{cm} . Полученная в результате добавления указанных емкостей расчетная спектрограмма представлена на рис. 8.

Она позволяет сделать вывод о сходимости результатов в диапазоне 50 кГц...30 МГц с погрешностью в 2-4 дБ, однако есть точка 3 МГц, в которой результат не совпадает на 9 дБ, что объясняется неучтенными резонансными/паразитными контурами соединительных проводов и конструктивными элементами.

На основании проведенных расчетов с помощью программного пакета LTSpice и сопоставления полученных результатов с результатами натуральных экспериментов можно сказать, что данный программный продукт и использование полных схем замещения всех элементов цепей позволяют моделировать кондуктивную помехоэмиссию преобразовательных устройств с высокой степенью достоверности. Такой подход позволяет исключить дополнительные затраты, связанные с обеспечением электромагнитной совместимости разрабатываемых устройств.

Литература

1. Toshiba. Power MOSFET — Electrical Characteristics. 2012.
2. Electrical Engineering 105. Lecture 12. Spring, 1997.
3. Vrej Barkhordarian. International Rectifier. EI Segundo, Ca. 2011.
4. Скворцов В., Низаметдинов К. Моделирование кондуктивной помехоэмиссии в питающую сеть преобразователями параметров электрической энергии // Силовая электроника. 2013. № 1.
5. B. H. Lee. Exact Simulation of Conducted EMI in Switched Mode Power Supplies. 99IECEC-01-2598.

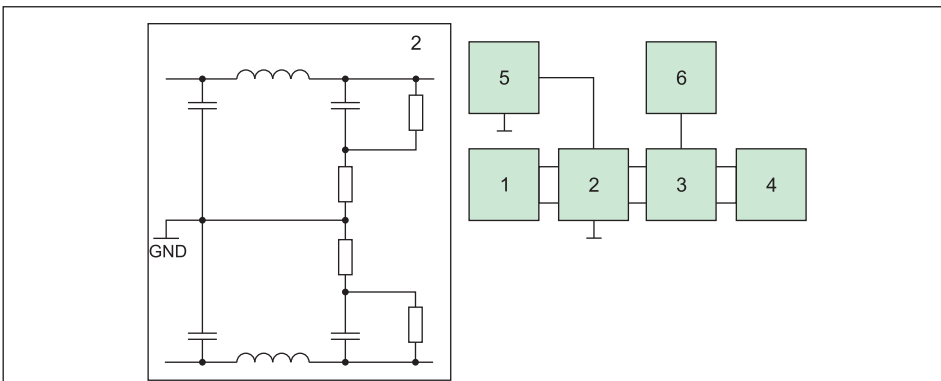


Рис. 6. Схема измерения с эквивалентом сети (1 — источник питания, 2 — эквивалент сети, 3 — преобразователь, 4 — нагрузка, 5 — селективный микровольтметр, 6 — осциллограф)

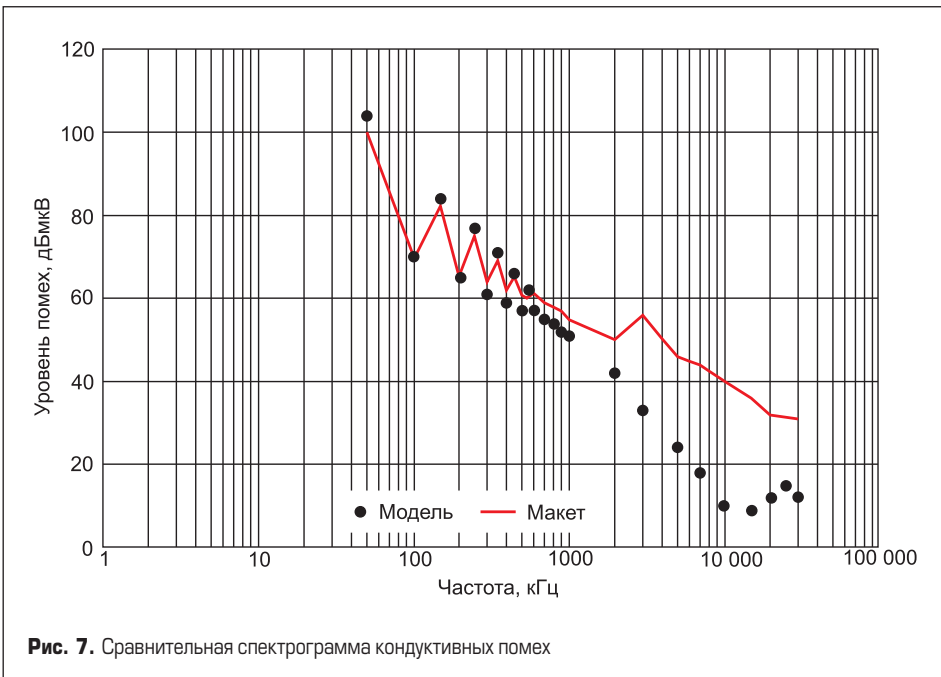


Рис. 7. Сравнительная спектрограмма кондуктивных помех

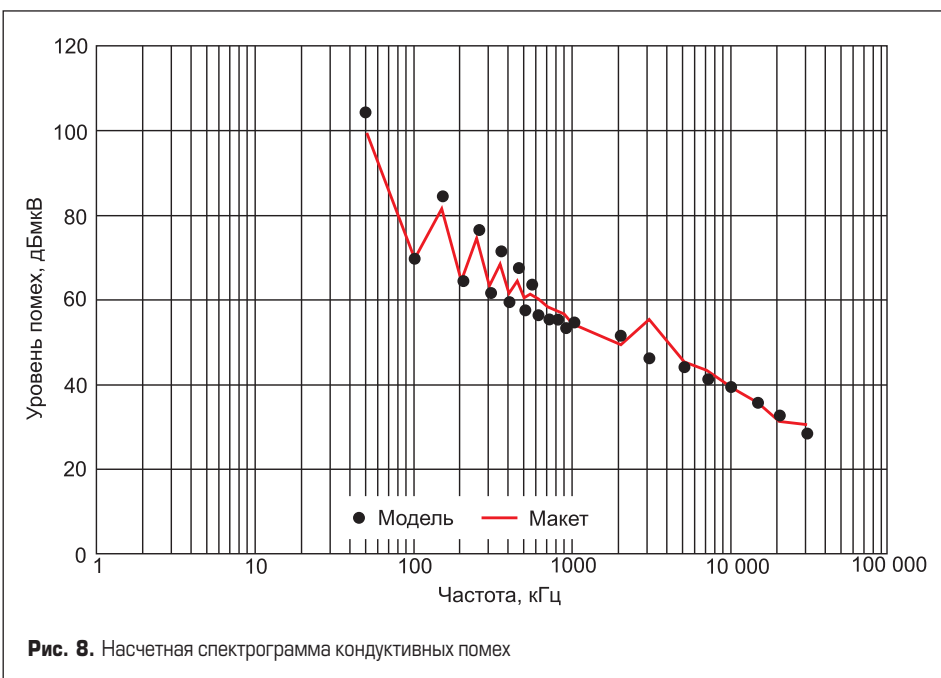


Рис. 8. Насчетная спектрограмма кондуктивных помех