

УДК 621.314.6:621.382.2/.3:004.925.84

МОДЕЛИРОВАНИЕ ВЛИЯНИЯ ПАРАМЕТРОВ МОДЕЛЕЙ БВД И МОП ТРАНЗИСТОРА НА КОММУТАЦИОННЫЕ ПОТЕРИ В ПониЖАЮЩЕМ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕ

Силкин Д.С., Падеров В.П.

ФГБОУ ВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск, кафедра микроэлектроники, тел. (8342) 290753, E-mail: silkin4@rambler.ru

Аннотация. В статье приводится методика расчёта мощности коммутационных потерь и потерь проводимости в МОП транзисторах и быстро восстанавливающихся диодах в составе понижающих преобразователей, а также зависимости мощности коммутационных потерь от параметров моделей транзистора и диода.

Ключевые слова: понижающий преобразователь; мощность потерь; МОП транзистор; быстро восстанавливающийся диод.

Понижающие преобразователи широко используются для питания различных устройств, требующих для работы напряжение, меньшее, чем выдаётся сетью. В частности, эти схемы незаменимы в качестве драйверов, позволяющих подключать светодиодные лампы к электрической сети с напряжением 220В. В таких понижающих преобразователях в качестве выходного каскада часто используется цепь МОП-ПТ – БВД. Частота переключений этих элементов может быть довольно большой и достигать десятков килогерц. При этом коммутационные потери, то есть потери на переключение из открытого состояния в закрытое и наоборот, в этих элементах могут быть сравнимы или даже превышать потери проводимости.

Коммутационные потери представляют собой короткие выбросы мощности большой амплитуды при переключении элемента. Разделить коммутационные потери и потери проводимости экспериментальными способами – крайне сложная задача. Однако современные программы схемотехнического анализа, позволяющие рассчитать и вывести в виде графика мгновенную мощность, позволяют решить её легко и без особых затрат. Однако для этого требуются модели, адекватно описывающие поведение элементов при переключении. К таким программам относится SaberRD. Данная статья посвящена определению коммутационных потерь и исследованию влияния на них параметров элементов.

Для моделирования была использована схема, приведённая на рисунке 1.

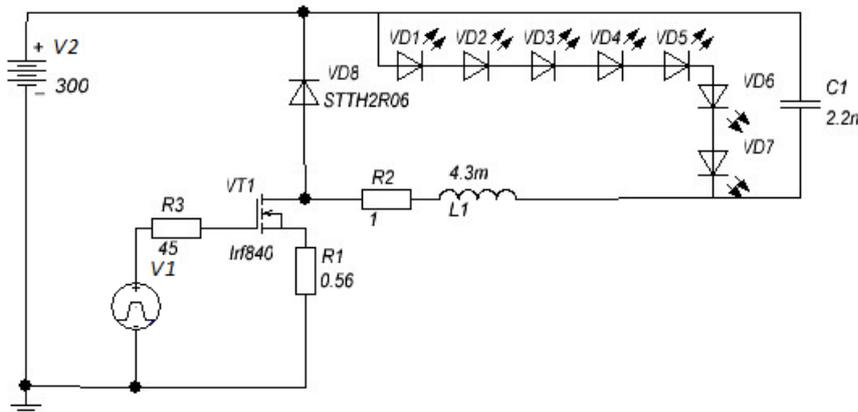


Рисунок 1 – схема понижающего преобразователя

Параметры светодиодов VD1-VD7 были заданы согласно спецификации XlampXPEwhite. Коммутационные потери можно рассчитать через энергию включения/выключения прибора:

$$P_{sw}=(E_{turn-on}+E_{turn-off})f_{sw}, \quad (1)$$

где $E_{turn-on}$ – энергия включения;

$E_{turn-off}$ – энергия выключения;

f_{sw} – частота переключения.

Энергии включения и выключения могут быть получены как интеграл от мощности:

$$E = \int_{t1}^{t2} p(t)dt, \quad (2)$$

где $t1$ – момент начала процесса включения/выключения;

$t2$ – момент окончания процесса включения/выключения.

Статические потери можно определить аналогичным образом, заменив в формуле (1) энергию ($E_{turn-on}+E_{turn-off}$) на энергию, выделяемую во включенном состоянии E_{on} . Формула (1) при этом примет вид:

$$P_{stat}=E_{on}f_{sw}, \quad (3)$$

Энергию E_{on} можно определить по формуле (2), изменив пределы интегрирования следующим образом:

$t1$ – момент окончания процесса включения;

$t2$ – момент начала процесса выключения.

Результаты моделирования мощности и энергии включения и выключения БВД и МОП транзистора показаны на рисунках 2 и 3. Значения энергий и мощностей приведены в таблицах 1 и 2. Частота работы схемы f_{sw} составляет 50 кГц.

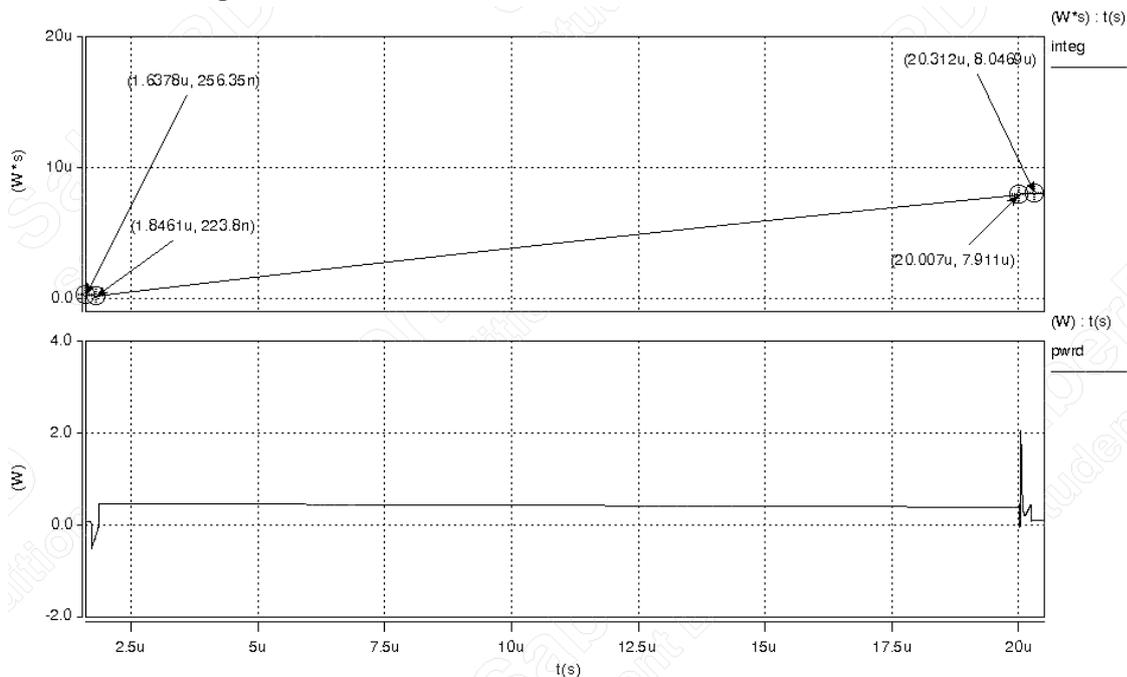


Рисунок 2 - мощность (pwrtd) и интеграл от мощности (integ) БВД

Выброс отрицательной мощности при включении БВД можно объяснить тем, что через диод начинает протекать положительный ток до того, как напряжение переключается с отрицательного на положительное. Для разрешения противоречия энергию выключения в этом случае берём по модулю.

Таблица 1. Потери в БВД.

$E_{\text{turn-on}}$, мкДж	$E_{\text{turn-off}}$, мкДж	P_{sw} , мВт	E_{on} , мкДж	P_{stat} , мВт
0,0225	0,136	8,42	7,69	384

Расчёт показывает, что в данном случае коммутационные потери составляют примерно 2% от общей мощности, выделяемой на БВД.

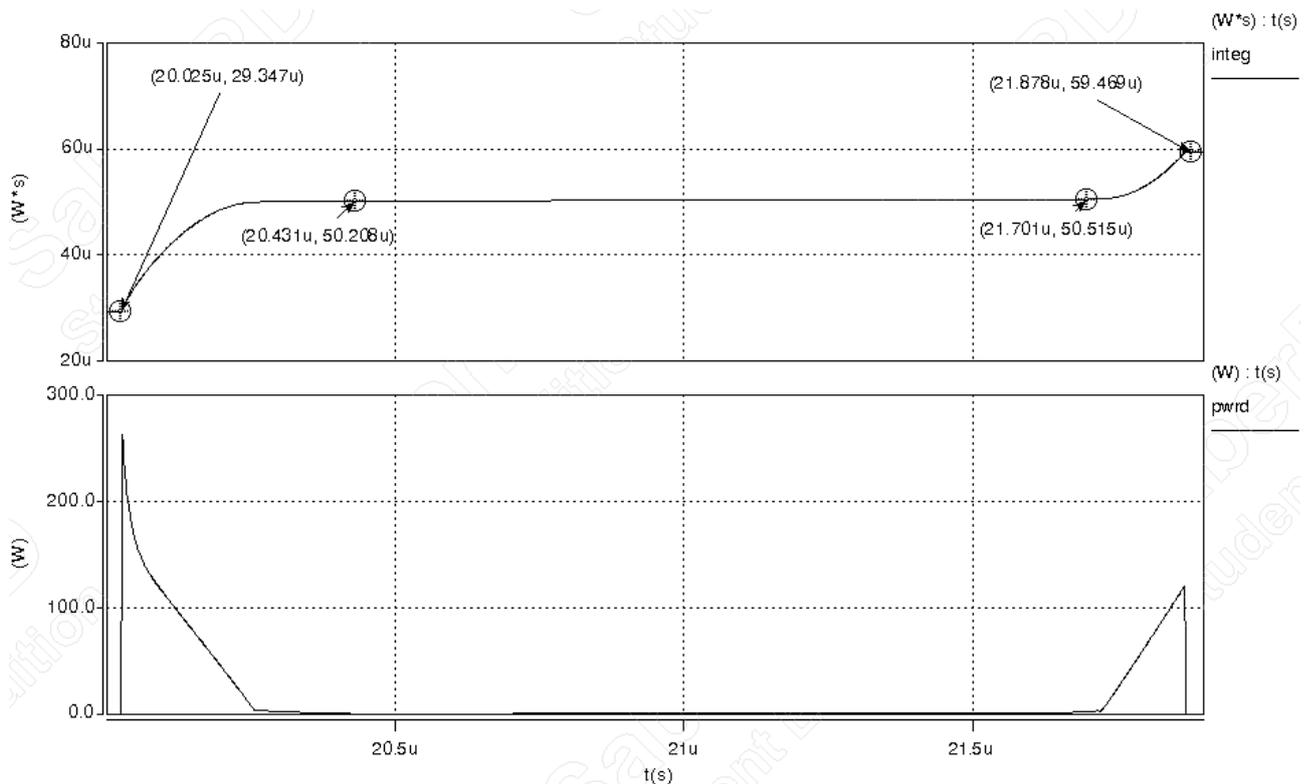


Рисунок 3 - мощность (pwr) и интеграл от мощности (integ) МОП транзистора

Таблица 1. Потери в МОП транзисторе.

$E_{\text{turn-on}}$, мкДж	$E_{\text{turn-off}}$, мкДж	P_{sw} , Вт	E_{on} , мкДж	P_{stat} , Вт
20,86	8,95	1,49	0,307	0,0153

Расчёт показывает, что в данном случае коммутационные потери составляют примерно 99% от общей мощности, выделяемой на МОП транзисторе.

Для минимизации потерь важно знать, какие параметры элементов оказывают наибольшее влияние на потребляемую мощность. В МОП транзисторе это межэлектродные емкости, а в диоде – параметры обратного восстановления: время обратного восстановления t_{rr} , пиковый ток обратного восстановления I_{rrm} и заряд обратного восстановления q_{rr} .

Рассмотрим зависимость мощности коммутационных потерь от межэлектродных емкостей МОП транзистора. Для определения зависимости потерь от конкретной емкости необходимо произвести следующие измерения:

1. Мощность P_{sw} при изменении емкости затвор-сток C_{gd} : $P_{sw} = f(C_{gd}) \Big|_{C_{gs}, C_{ds}=\text{const}}$
2. Мощность P_{sw} при изменении емкости затвор-исток C_{gs} : $P_{sw} = f(C_{gs}) \Big|_{C_{gd}, C_{ds}=\text{const}}$
3. Мощность P_{sw} при изменении емкости сток-исток C_{ds} : $P_{sw} = f(C_{gd}) \Big|_{C_{gs}, C_{gd}=\text{const}}$

Емкости C_{gd} и C_{gs} в применяемой модели описываются, как параллельно включенные линейная емкость c и нелинейная емкость cnl . Емкость в этой модели зависит от двух напряжений (для C_{gd} это напряжения V_{gd} и V_{gs}). Зависимость емкости от напряжения в модели cnl определяется по следующим параметрам (для C_{gd}):

c_{\max} – максимальная емкость;

c_0 – емкость при нулевом смещении;

v_{ref} – напряжение, при котором задаются c_{ref} и $c_0 v_{ref}$ (по умолчанию $v_{ref} = 2В$);

c_{ref} – емкость при напряжении $V_{gd} = v_{ref}$;

$c_0 v_{ref}$ – емкость при $V_{gd} = 0, V_{gs} = v_{ref}$;

c_{\min} – минимальная емкость (по умолчанию $c_{\min} = 0Ф$).

Параметру $c_0 v_{ref}$ было присвоено значение 0, чтобы исключить зависимость емкости от напряжения на третьем выводе, параметр c_{ref} по умолчанию автоматически рассчитывается по формуле[1]:

$$c_{ref} = 0.1(c_{\max} - c_{\min}) + c_{\min}$$

Таким образом, емкость можно изменять, изменяя параметры c_{\max} и c_0 . Этим параметрам присваивались практически равные значения с разницей в 5 пФ. Графики, полученные по результатам моделирования, представлены на рисунках 3, 4 и 5.

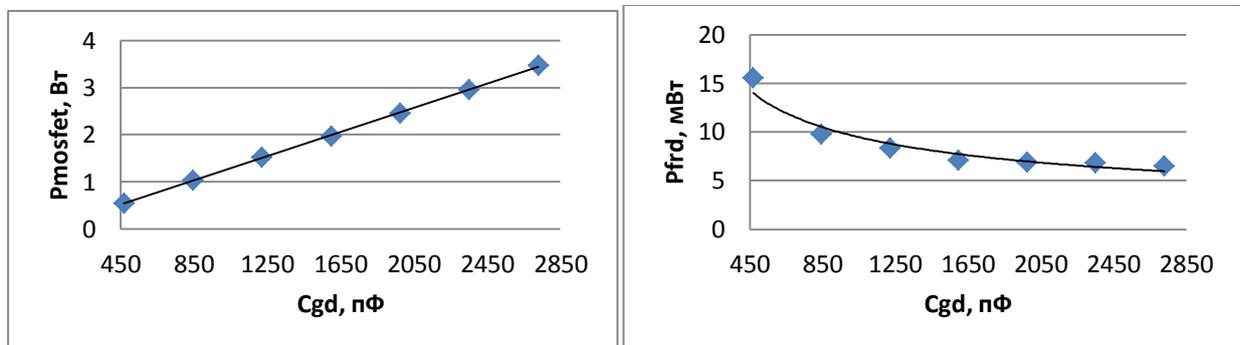


Рисунок 3 - Зависимость мощности коммутационных потерь в БВД и МОП транзисторе от емкости затвор-сток

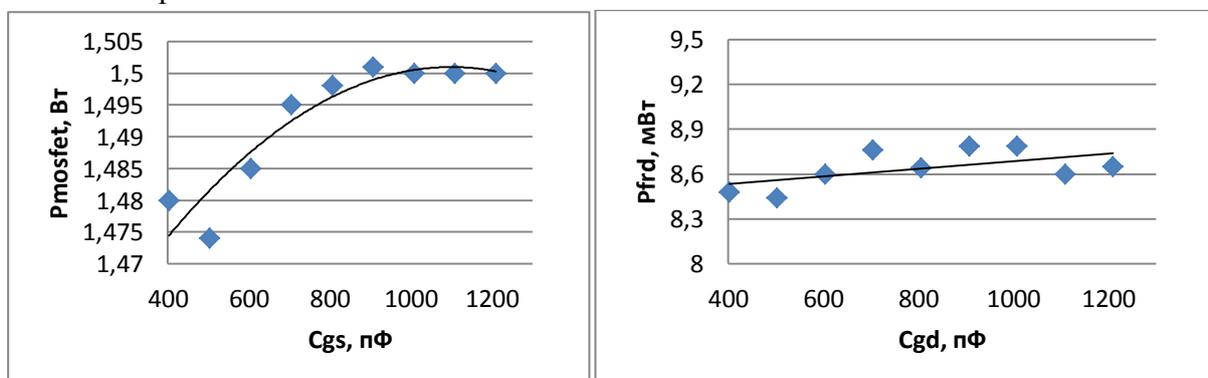


Рисунок 4 - Зависимость мощности коммутационных потерь в БВД и МОП транзисторе от емкости затвор-исток

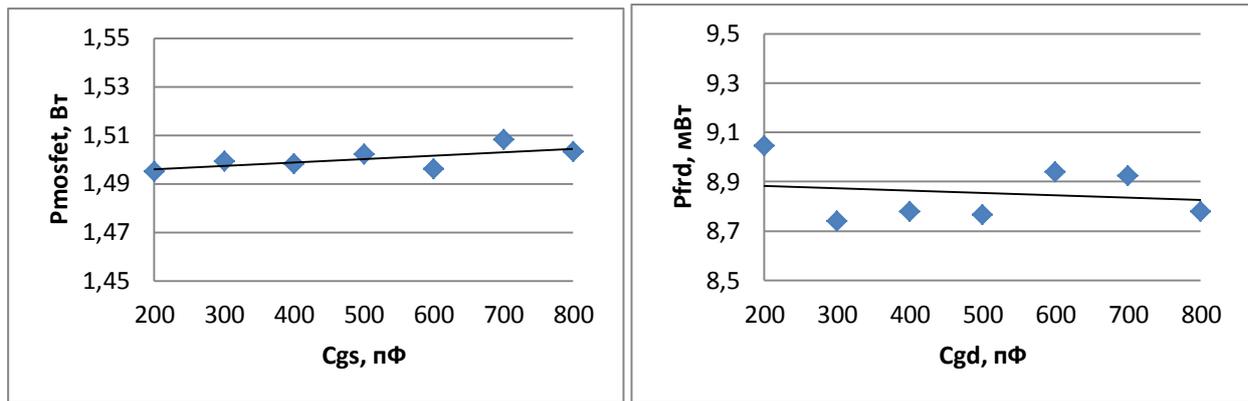


Рисунок 5 - Зависимость мощности коммутационных потерь в БВД и МОП транзисторе от емкости сток-исток

Из графиков видно, что наибольшее влияние на коммутационные потери оказывает емкость затвор-сток. Примечательно, что увеличение этой емкости явно ведёт к снижению мощности, выделяемой на БВД. Однако этот спад незначителен по сравнению с ростом потерь на транзисторе, поэтому при разработке понижающего преобразователя следует, по возможности, выбирать МОП транзистор с как можно меньшим значением C_{gd} . Повышение емкостей C_{gs} и C_{ds} хоть и приводит к малому росту потерь, не более чем на 1,7%.

Аналогичным образом определялась зависимость P_{sw} от параметров обратного восстановления БВД. При этом были измерены следующие зависимости: 1) $P_{sw} = f(t_{rr}) \Big|_{q_{rr}=\text{const}}$, 2) $P_{sw} = f(q_{rr}) \Big|_{t_{rr}=\text{const}}$.

Графики представлены на рисунках 6 и 7.

Заряд обратного восстановления определяется по формуле:

$$Q_{rr} = \int_{t_0}^{t_0+t_{rr}} I(t) dt,$$

где t_0 – время, при котором $I = 0$.

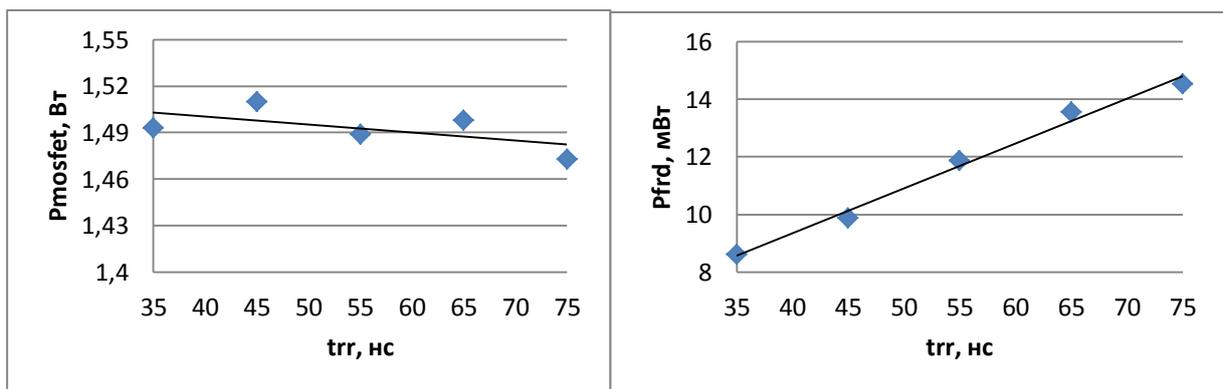


Рисунок 6 - Зависимость мощности коммутационных потерь в БВД и МОП транзисторе от времени обратного восстановления

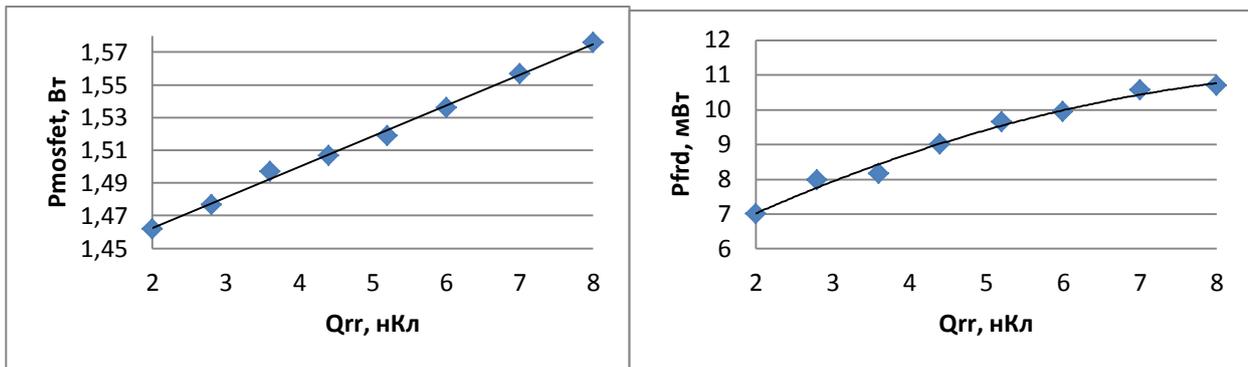


Рисунок 7 - Зависимость мощности коммутационных потерь в БВД и МОП транзисторе от пикового тока обратного восстановления

При фиксированном заряде между параметрами t_{rr} и I_{rrm} имеется обратная зависимость. Увеличение одного из этих параметров приводит к уменьшению второго. При фиксированном t_{rr} прирост заряда осуществляется за счёт увеличения I_{rrm} . Учитывая это, можно заключить из рисунков 6 и 7, что наибольшее влияние на потери оказывает время обратного восстановления. Вклад, вносимый БВД в коммутационные потери на МОП транзисторе, определяется зарядом, то есть совокупностью t_{rr} и I_{rrm} , а не каким-то из этих параметров в отдельности.

Таким образом, для уменьшения потерь нужно использовать диоды с малым временем обратного восстановления. Пиковый ток при этом не играет большой роли.

Подводя итоги, можно заключить, что для минимизации потерь на переключение в понижающих преобразователях необходимо использовать МОП транзисторы с как можно меньшей емкостью затвор-сток и диод с как можно меньшим зарядом обратного восстановления.

Литература

1.cnl (NonlinearCapacitor)[Электронный ресурс]: файл справки SaberRD. Систем. требования: AdobeReader. Режим доступа: ... \F-2011.09\doc\library\cATL

MODELING OF QUICKLY RECOVERS DIODES AND MOS TRANSISTORS SWITCHING LOSSES ARE REDUCED CONVERTER

Summary. The article provides a method of calculating the power switching losses and conduction losses in the MOSFETs and fast recovering diodes in the buck converter, as well as the dependence of the power switching losses of the model parameters of the transistor and diode.

Keywords: down-converter, power loss, the MOS transistor, a diode rapidly recovering.