

РАСЧЕТ ПОТЕРЬ В МОСТОВОМ ВЫПРЯМИТЕЛЕ ЗА СЧЕТ ОБРАТНЫХ ТОКОВ ДИОДОВ

Падеров В.П., Виль А.В., Шестеркина А.А.

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

Аннотация. В статье приводятся уточненные соотношения для расчета мощности потерь в мостовом выпрямителе с учетом обратных токов диодов.

Ключевые слова: мостовой выпрямитель; мощность потерь; расчетное соотношение.

Мостовой выпрямитель является обязательным элементом любых электронных устройств, запитываемых от сети переменного тока, в частности драйверов светодиодных светильников общего освещения. Актуальной задачей является разработка высокоэффективных драйверов, а следовательно, необходимы точные методы расчета потерь в элементах драйвера. В мостовом выпрямителе мощность потерь выделяется при протекании прямых и обратных токов через диоды моста. Если мощность, потребляемая устройством, относительно высока, потери в мостовом выпрямителе обусловлены в основном прямыми токами диодов. Однако для маломощных светильников (меньше 10 Вт) нельзя пренебрегать потерями в мостовом выпрямителе за счет протекания обратных токов диодов. На рисунке 1 представлен мостовой выпрямитель с активно-емкостной нагрузкой, где C – емкость фильтра, R – эквивалентный резистор нагрузки, заменяющий реальную принципиальную схему драйвера. Осциллограммы напряжений и токов на диодах моста показаны на рисунке 2.

Как видно из рисунка 2, прямой ток через диоды моста имеет пилообразную форму и протекает в течение малого промежутка времени открытого состояния диагональной пары диодов. Основную часть периода переменного напряжения диоды находятся под обратным смещением. В [1] было показано, что мощность потерь в мостовом выпрямителе при протекании прямых токов через диоды, рассчитывается по соотношению:

$$P_F = 2I_{av}V_{Fav} \left[1 + \frac{nV_T}{2V_{Fav}} (\ln(2\pi\omega RC) - 1) \right], \quad (1)$$

где I_{av} – средний ток, потребляемый от мостового выпрямителя;

V_{Fav} – прямое падение напряжения на диоде моста при протекании среднего тока I_{av} ;

n – коэффициент неидеальности ВАХ диода (параметр модели диода);

$V_T = \frac{kT}{q}$ – тепловой потенциал;

ω – угловая частота сети переменного тока;

C – емкость фильтра;

R – эквивалентный резистор нагрузки.

Средний ток, потребляемый от мостового выпрямителя, и эквивалентный резистор нагрузки можно оценить при условии малых пульсаций выпрямленного напряжения по следующим приближенным соотношениям [2]:

$$I_{av} \approx \frac{P_{LED}}{\sqrt{2\eta}V_{net}}, \quad (2)$$

$$R \approx \frac{2\eta V_{net}^2}{P_{LED}}, \quad (3)$$

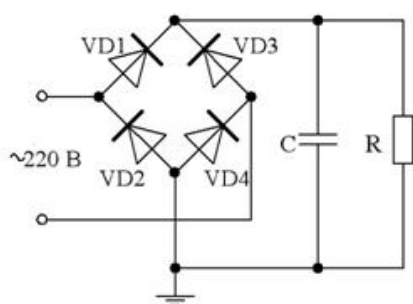


Рисунок 1 – Схема мостового выпрямителя

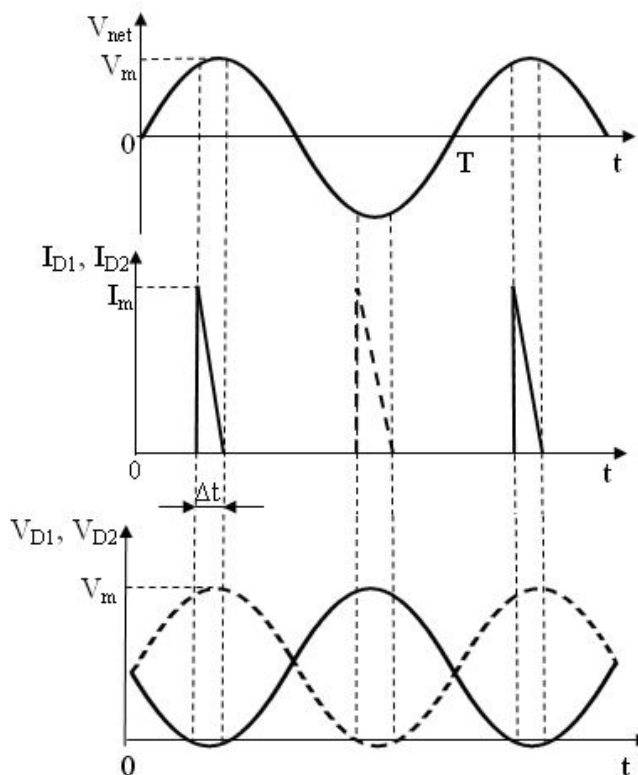


Рисунок 2 – Осциллограммы токов и напряжений на диодах моста

где P_{LED} – мощность, потребляемая светодиодами;
 V_{net} – действующее значение входного напряжения сети;
 η – КПД драйвера.

Как и при прямом смещении, мощность потерь при протекании обратных токов 4-х диодов моста рассчитывается по соотношению

$$P_r = \frac{4}{T} \int_0^T i_r(t) V_r(t) dt, \quad (4)$$

где $i_r(t)$ и $V_r(t)$ – обратный ток и обратное напряжение на одном диоде моста.

При малых углах открытого состояния диагональной пары диодов форма обратных напряжений на диодах моста близка к синусоидальной, амплитуда обратного напряжения приблизительно равна амплитудному значению входного напряжения V_m , а обратное напряжение смещено относительно нуля на $V_m/2$. Фазы обратных напряжений на диагональных парах диодов сдвинуты на половину периода $T/2$. Если за ноль отсчета периода в интеграле уравнения (4) принять момент начала нарастания обратного напряжения, то обратное напряжение можно аппроксимировать косинусоидальной функцией:

$$V_r(t) = \frac{V_m}{2} [1 - \cos(\omega t)] = V_m \sin^2\left(\frac{\omega t}{2}\right), \quad (5)$$

где V_m – амплитудное значение выпрямленного напряжения,

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \quad (6)$$

угловая частота сетевого напряжения.

Основная компонента обратного тока кремниевых диодов это генерационный ток в пределах области пространственного заряда (ОПЗ) р-п перехода, который пропорционален ширине ОПЗ, а, следовательно, обратный ток кремниевых диодов достаточно точно аппроксимируется степенной зависимостью от обратного напряжения V_r ,

$$i_r = AV_r^m, \quad (7)$$

где A – постоянная аппроксимации, зависящая от типа диодов и температуры;
 m – показатель степени зависящий от профиля примеси в пределах ОПЗ р-п перехода ($m=2$ для резких р-п переходов, $m=3$ для плавных (линейных) р-п переходов).

Если зависимости (5)-(7) подставить в уравнение (4), получим

$$P_r = 4I_{rm}V_{rm} \frac{1}{T} \int_0^T \sin^{\frac{2}{m}+2} \left(\frac{\pi t}{T} \right) dt, \quad (8)$$

где

$$I_{rm} = AV_{rm}^m \quad (9)$$

максимальный обратный ток при максимальном обратном напряжении.

Введя промежуточную переменную

$$x = \frac{\pi t}{T}, \quad (10)$$

выражение (8) переписывается

$$P_r = 4I_{rm}V_{rm} \frac{1}{\pi} \int_0^\pi \sin^{\frac{2}{m}+2}(x) dx. \quad (11)$$

Интеграл в выражении (11) в общем случае аналитически не решается, но поскольку показатель степени m для большинства выпрямительных диодов находится в пределах от 2 до 3, его можно рассчитать численно и аппроксимировать линейной функцией в зависимости от показателя степени m :

$$\int_0^\pi \sin^{\frac{2}{m}+2}(x) dx = 0,065m + 1,203. \quad (12)$$

Погрешность линейной аппроксимации интеграла (12) в интервале изменения m от 2 до 3 не превышает 0,3%. Например, для диодных мостов RC207 и КЦ407А показатель степени $m \approx 2,7$. При подстановке выражения (12) в (11) получаем следующее выражение для расчета мощности потерь в мостовом выпрямителе за счет обратных токов диодов

$$P_r = (0,0847m + 1,532) I_{rm} V_{rm}. \quad (13)$$

Как следует из выражения (13), зависимость мощности потерь от показателя плавности р-п перехода m слабая, следовательно этой зависимостью можно пренебречь и рассчитывать P_r по более простому выражению

$$P_r = 1,75I_{rm}V_{rm} \quad (14)$$

Погрешность выражения (14) в диапазоне изменения коэффициента плавности р-п перехода m от 2 до 3 не превышает 3%.

Таким образом, получено более точное расчетное соотношение для мощности потерь в мостовых выпрямителях:

$$P = P_F + P_r = 2I_{av}V_{Fav} \left[1 + \frac{nV_T}{2V_{Fav}} (\ln(2\pi\omega RC) - 1) \right] + 1,75I_{rm}V_{rm} . \quad (15)$$

В соотношение входят только три параметра диодов моста: V_{Fav} , n , I_{rm} . Остальные параметры это параметры сети переменного тока и нагрузки.

В качестве примера в таблице 1 приведены расчеты мощности потерь по выведенным соотношениям в двух мостовых выпрямителях, работающих в составе понижающего драйвера светодиодов мощностью 8,1 Вт: мостовой выпрямитель отечественного производства КЦ407 и мостовой выпрямитель RC207 производства фирмы «Rectron Semiconductor» (Тайвань). Параметры диодов моста получены из измерений прямых и обратных ВАХ и также приведенные в таблице 1. Расчет производился при среднем токе, потребляемом от выпрямителя, 35 мА, эквивалентном сопротивлении нагрузки 8960 Ом и емкости конденсатора фильтра 47 мкФ. Действующее напряжение сети переменного тока принималось равным 220 В. Более точные расчеты мощности потерь в мостовом выпрямителе проводились с использованием программы схемотехнического анализа OrCAD9.2. Погрешности мощности потерь по выведенным соотношениям и результатам моделирования составляют не более 2 %.

Таблица 1.

| Тип мостового выпрямителя | V_F , В $I_F=35$ мА | I_{rm} , мкА 300 В, 100 °С | I_s , А | n | m | P_F , мВт | P_r , мВт | P_T , мВт |
|---------------------------|-----------------------------|------------------------------------|-----------------------|-------|-----|-------------|-------------|-------------|
| КЦ407А | 0,798 | 1,7 | $9,07 \cdot 10^{-9}$ | 2,044 | 2,7 | 66,4 | 0,93 | 67,3 |
| RC207 | 0,739 | 1,96 | $4,21 \cdot 10^{-10}$ | 1,57 | 2,7 | 59,7 | 1,07 | 60,8 |

Литература

1. Падеров В.П., Виль А.В., Симкин А.В. Расчет мощности потерь в мостовом выпрямителе с активно-емкостной нагрузкой // Электроника и информационные технологии. Вып.2(7) – 2009. - <http://fetmag.mrsu.ru/2009-3/pdf/03-Convertors.pdf-0420800067\0092>
2. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. –М.: Техносфера, 2005. – 632с.

CALCULATION OF LOSSES IN BRIDGE RECTIFIERS DUE TO THE REVERSE CURRENTS DIODES

Paderov, V.P, Wil A., Shesterkina A.

Abstract. The article presents the revised ratio to calculate the power losses in the bridge rectifier with a view of the reverse currents of diodes.

Keywords: bridge rectifier; power loss; calculated ratio.