

УДК 621.382.2

ПРИБЛИЖЕННЫЕ СООТНОШЕНИЯ ДЛЯ РАСЧЕТА ПОТЕРЬ В МОСТОВОМ ВЫПРЯМИТЕЛЕ ПО ПАРАМЕТРАМ МОДЕЛИ ДИОДОВ

Падеров В.П., Виль А.В.

ФГБОУВПО «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 прямых и 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.

Мощность потерь в выпрямительных диодах при протекании прямого тока выделяется только в течение короткого промежутка времени Δt , когда пара диагональных диодов находится в открытом состоянии.

Мощность потерь, выделяемую в мостовом выпрямителе при протекании прямого тока, можно рассчитать, интегрируя за один полупериод мгновенную мощность, выделяемую в одном диоде и удваивая результат, поскольку за полупериод одинаковый ток протекает через пару диагональных диодов.

$$P_F = 2 \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_F t V_F t dt = \frac{4}{T} \int_0^{\Delta t} i_F t V_F t dt, \quad (1)$$

где i_F и V_F – прямой ток и падение напряжения на диоде.

За ноль отсчета в первом интеграле принят момент времени, когда входное напряжение проходит через ноль, а во втором интеграле – момент времени, когда ток через диод скачкообразно нарастает до максимальной величины I_{Fm} и линейно спадает до нуля за время Δt .

Пилообразный ток через диод в первом приближении за интервал времени Δt можно описать линейной функцией

$$i_{F t} = I_{Fm} \left(1 - \frac{t}{\Delta t} \right). \quad (2)$$

При расчете мощности потерь прямое падение напряжения на диодах обычно описывается линейной функцией от тока [2], но такое описание является достаточно грубым приближением.

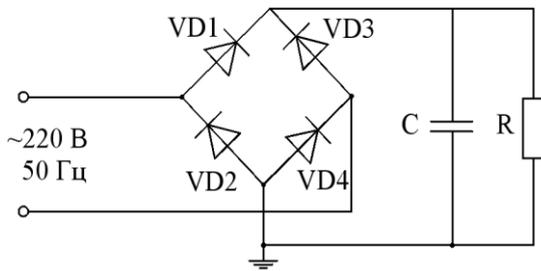


Рисунок 1 – Схема мостового выпрямителя

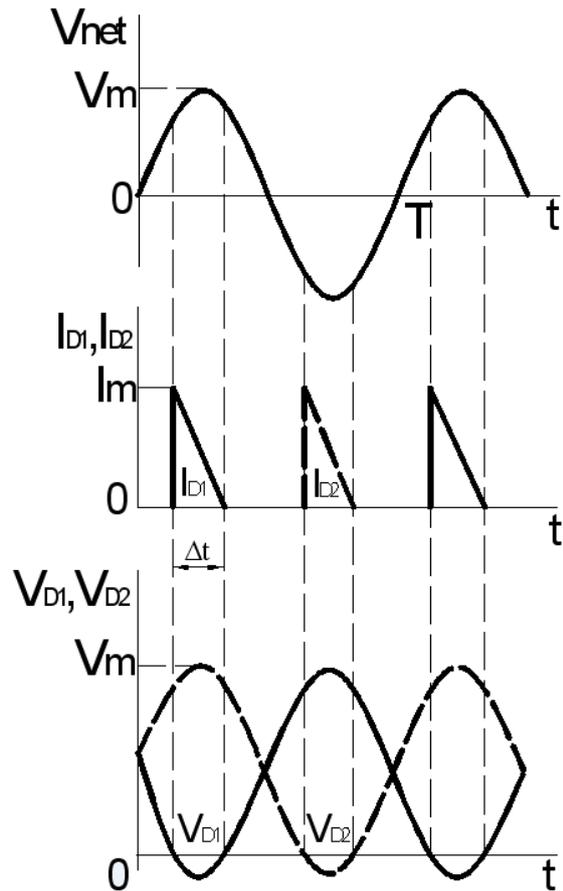


Рисунок 2 – Осциллограммы токов и напряжений на диодах моста

В современных программах схемотехнического анализа прямое падение напряжения на диоде описывается более точной линейно-логарифмической функцией [3]

$$V_F = NV_T \ln \left(\frac{i_F}{I_S} + 1 \right) + R_S i_F, \quad (3)$$

где N – коэффициент неидеальности ВАХ диода (параметр модели),

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

I_S – ток насыщения диода (параметр модели),

R_S – последовательное сопротивление диода (параметр модели).

Подставив выражение (2) в (3), а затем (2) и (3) в (1), получим

$$P = 2I_{Fm} \frac{\Delta t}{T} \left[NV_T \ln \left(\frac{I_{Fm}}{I_S} - \frac{1}{2} \right) + \frac{2}{3} I_{Fm} R_S \right]. \quad (4)$$

С учетом выражения (3) выражение (4) можно переписать

$$P = 2I_{Fm} \frac{\Delta t}{T} \left(V_{Fm} - \frac{NV_T}{2} - \frac{1}{3} I_{Fm} R_S \right), \quad (5)$$

где

$$V_{Fm} = NV_T \ln \left(\frac{I_{Fm}}{I_S} \right) + I_{Fm} R_S \quad -$$

– напряжение на диоде при протекании максимального прямого тока I_{Fm} .

Параметры прямого тока, протекающего через диоды моста I_{Fm} и Δt , можно выразить через средний ток нагрузки равный удвоенному среднему току через диоды [1]

$$I_{av} = 2I_{Dav} = 2 \frac{1}{T} \int_0^T i_F dt. \quad (6)$$

Подставляя (2) в (6) и заменяя пределы интегрирования, получим

$$I_{av} = \frac{2I_{Fm}}{T} \int_0^{\Delta t} \left(1 - \frac{t}{\Delta t}\right) dt = I_{Fm} \frac{\Delta t}{T}. \quad (7)$$

С учетом выражения (7) выражение (5) переписется

$$P_F = 2I_{av} \left(V_{Fm} - \frac{NV_T}{2} - \frac{1}{3} R_S I_{av} \frac{T}{\Delta t} \right), \quad (8)$$

Таким образом, мощность потерь в диодном мосте с активно-емкостной нагрузкой при протекании прямого тока прямо пропорциональна среднему току нагрузки и прямому падению напряжения на диоде при протекании тока, близкого к максимальному току. Поскольку величина максимального тока через диоды не известна и зависит от мощности нагрузки и конденсатора фильтра, выразим прямое падение V_{Fm} через прямое падение V_{Fav} при протекании среднего тока нагрузки. С использованием уравнения (3), получим

$$V_{Fm} = V_{Fav} + NV_T \ln \left(\frac{I_{Fm}}{I_{av}} \right) + R_S (I_{Fm} - I_{av}). \quad (9)$$

Из уравнения (7) следует, что

$$\frac{I_{Fm}}{I_{av}} = \frac{T}{\Delta t}. \quad (10)$$

Отношение периода переменного напряжения к длительности протекания прямого тока через диоды можно выразить через угол проводящего состояния диагональной пары диодов моста θ [1]:

$$\frac{T}{\Delta t} = \frac{\pi}{\theta}. \quad (11)$$

При малых углах проводящего состояния этот угол можно рассчитать через эквивалентный резистор нагрузки и емкость фильтра [1]:

$$\theta = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{2\pi}{\omega RC}}. \quad (12)$$

где ω – угловая частота сети переменного напряжения.

При подстановке выражений (10) - (12) в (9) получаем итоговое выражение для расчета мощности потерь в мостовом выпрямителе при протекании прямых токов через диоды:

$$P_F = 2I_{av} V_{Fav} \left[1 + \frac{NV_T}{2V_{Fav}} \ln 2\pi\omega RC - 1 + \frac{R_S I_{av}}{V_{Fav}} \left(\frac{2}{3} \sqrt{2\pi\omega RC} - 1 \right) \right]. \quad (13)$$

Численные расчеты показывают, что выражение в квадратных скобках дает добавку к мощности потерь в пределах 30%. Если в качестве нагрузки используется преобразователь, то средний ток нагрузки и эквивалентный резистор входной цепи преобразователя при условии малых пульсаций выпрямленного напряжения можно оценить по следующим приближенным соотношениям [1]:

$$I_{av} \approx \frac{P_L}{\sqrt{2} \eta V_i},$$

$$R \approx \frac{2\eta V_i^2}{P_L},$$

где η – КПД преобразователя,

V_i – действующее значение входного напряжения,

P_L – мощность нагрузки.

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

$$P_r = \left(\frac{0,0847}{M} + 1,532 \right) I_{SR} V_{rm}^{M+1}, \quad (14)$$

где M – показатель резкости р-п перехода (параметр модели),

I_{SR} – ток насыщения неидеального диода (параметр модели),

V_{rm} – максимальное обратное напряжение.

Как следует из выражения (14), зависимость мощности потерь от показателя резкости р-п перехода M слабая, следовательно, этой зависимостью можно пренебречь и рассчитывать P_r по более простому выражению

$$P_r = 1,75 I_{SR} V_{rm}^{M+1}. \quad (15)$$

Принятие множителя в скобках выражения (14) постоянной величиной, не зависящей от коэффициента резкости, в диапазоне изменения коэффициента резкости р-п перехода M от 0,33 до 0,5 дает погрешность не более 3%.

Таким образом, суммируя выражения (13) и (15) получаем более точное расчетное соотношение для мощности потерь в мостовых выпрямителях по параметрам модели диодов:

$$P = 2 I_{av} V_{Fav} \left[1 + \frac{N V_T}{2 V_{Fav}} \ln 2\pi\omega RC - 1 + \frac{R_S I_{av}}{V_{Fav}} \left(\frac{2}{3} \sqrt{2\pi\omega RC} - 1 \right) \right] + 1,75 I_{SR} V_{rm}^{M+1} \quad (16)$$

$$V_{Fav} = N V_T \ln \left(\frac{I_{av}}{I_S} \right) + R_S I_{av}$$

В соотношение входят только пять параметров модели диода: I_S , N , I_{SR} , M , R_S . Остальные параметры это параметры сети переменного тока и нагрузки.

Если параметры модели диодов I_S , N , I_{SR} , M не известны и их необходимо определять экспериментально, то проще измерить прямое падение напряжения при среднем токе нагрузки V_{Fav} и обратный ток при максимальном обратном напряжении I_{rm} , а мощность потерь рассчитывать по соотношению

$$P = 2 I_{av} V_{Fav} \left[1 + \frac{N V_T}{2 V_{Fav}} \ln 2\pi\omega RC - 1 + \frac{R_S I_{av}}{V_{Fav}} \left(\frac{2}{3} \sqrt{2\pi\omega RC} - 1 \right) \right] + 1,75 I_{rm} V_{rm}, \quad (17)$$

поскольку

$$I_{rm} = I_{SR} V_{rm}^M.$$

Коэффициент неидеальности N можно принять равным 1,5, что дает максимальную погрешность не более 5% в диапазоне изменения N от 1 до 2. Как правило, малы также потери за счет обратных токов диодов по сравнению с потерями за счет прямых токов.

В качестве образцов для исследования мощности потерь в мостовых выпрямителях использовались два типа диодных моста: отечественный диодный мост КЦ407 и зарубежный RC207 (Тайвань). Данные мосты можно рекомендовать для использования в источниках питания от сети переменного тока 220 В драйверов светодиодов мощностью до 100 Вт. Поскольку параметры SPICE моделей диодов не приводятся в справочных данных, их можно получить из измерения ВАХ диодов моста.

Для измерения прямой ВАХ на одном из диодов мостовых выпрямителей использовалась схема измерений, приведена на рисунке 3.

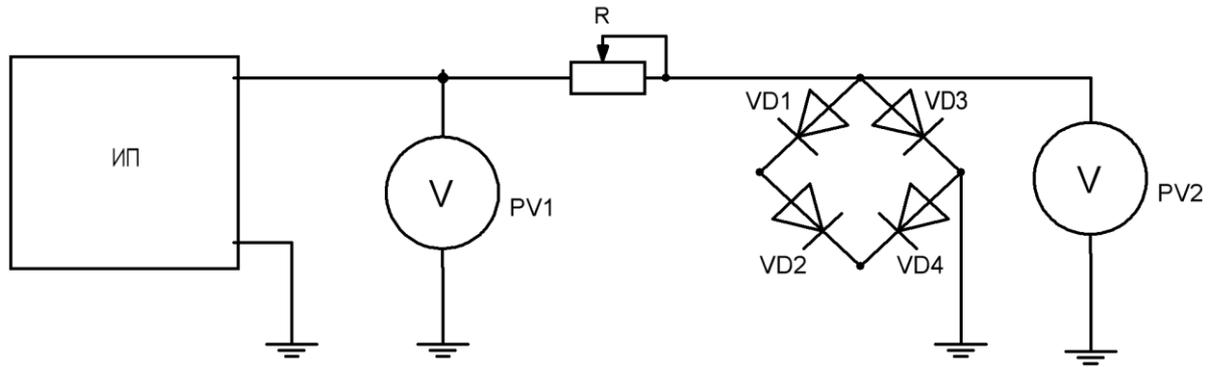


Рисунок 3 – Схема измерения прямой ВАХ диода

В качестве источника питания использовался источник питания Б5-71 с максимальным током нагрузки 10 А, магазин сопротивлений МСР58 с диапазоном эталонных сопротивлений от 0,01 до 10 кОм, цифровые вольтметры В7-16 и В7-23 с входным сопротивлением более 10 МОм. Вольтметром В7-16 измеряется напряжение на источнике питания (PV1), а вольтметром В7-23 измеряется прямое падение напряжения на диоде VD3 (PV2).

Последовательно с прямо смещенным диодом включен эталонный резистор магазина сопротивлений R, по падению напряжения на котором рассчитывается прямой ток через диод VD3. Падение напряжения на эталонном резисторе рассчитывается как разность показаний вольтметров PV1 и PV2. К прямому току через диод VD3 добавляется обратный ток диода VD4. Поскольку обратный ток диода VD4 много меньше прямого тока, он не вносит существенной погрешности в измеряемый прямой ток.

Прямая ВАХ диодов измерялась в диапазоне от 1 до 1000 мА. Изменение тока производилось либо изменением напряжения источника питания, либо выбором эталонных резисторов из магазина сопротивлений, но так, чтобы не превышалась допустимая мощность рассеяния на эталонных резисторах.

Измерения обратной ВАХ на одном из диодов мостовых выпрямителей производились по схеме, приведенной на рисунке 4. В качестве источника питания использовался источник питания Б5-50 с максимальным выходным напряжением 300 В, магазин сопротивления Р33 с диапазоном сопротивлений от 0,1 до 100 кОм, вольтметры В7-23 и В7-16. Вольтметром PV1 (В7-16) измеряет напряжение на источнике питания, а вольтметром В7-23 падение напряжения на магазине сопротивления (PV2).

Последовательно с обратно смещенным диодом VD1 включен эталонный резистор магазина сопротивлений R, по падению напряжения на котором рассчитывается обратный ток через диод VD1. Падение напряжения на диоде рассчитывается как разность показаний вольтметров PV1 и PV2. К обратному току через диод VD1 добавляется обратный ток диодов VD3 и VD4. Поскольку диоды VD3 и VD4 соединены последовательно, ток через них может достигать до 42% от тока диода VD1. Следовательно, по данной схеме замеряется завышенное значение обратного тока диода. Обратная ВАХ диодов измерялась в диапазоне напряжений от 1 до 300 В. Изменение напряжения производилось изменением напряжения источника питания.

Экстракция параметров SPICE модели диодов проводилась с помощью модуля Model Editor программы OrCAD 9.2. На форму прямой ВАХ диода влияют следующие параметры модели: ток насыщения I_s , коэффициент неидеальности N , последовательное сопротивление R_s и ток излома на ВАХ при высоком уровне инжекции IKF. Достаточно малую погрешность аппроксимации экспериментальной ВАХ можно получить с использованием трех параметров модели диода: I_s , N и R_s . Четвертый параметр IKF принимаем равным большому числу

(например 100 А), чтобы этот параметр не влиял на погрешность расчета первых трех параметров.

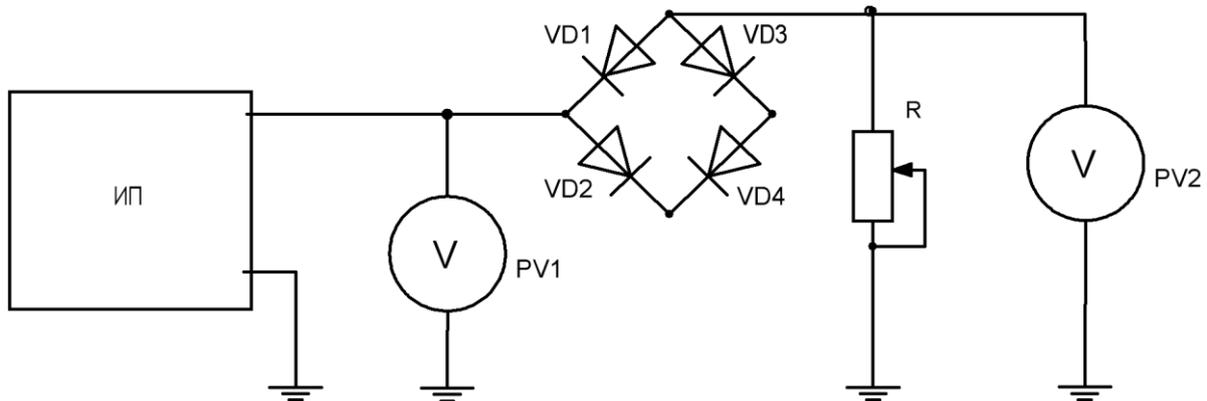


Рисунок 4 – Схема измерения обратной ВАХ диода

На форму обратной ВАХ диода влияют следующие параметры модели: параметр тока рекомбинации I_{SR} и коэффициент резкости р-п перехода M . Параметр тока рекомбинации I_{SR} экстрагируется из обратной ВАХ диода, а коэффициент резкости перехода M из зависимости барьерной емкости диода от обратного напряжения, измеренная мостовым измерителем E7-23. Экстрагированные параметры модели диодов приведены в таблице 1.

Программа Schematic из пакета программ OrCAD 9.2 позволяет проводить расчеты переходных процессов в элементах схемы и вычислять активную мгновенную мощность, выделяемую на элементах во времени. В программе Schematic проводился расчет переходных процессов в схеме мостового выпрямителя с активной нагрузкой, представленной на рисунке 1. Расчет производился при эквивалентном сопротивлении нагрузки 8960 Ом и емкости конденсатора фильтра 47 мкФ. Действующее напряжение сети переменного тока принималось равным 220 В. Используя математические средства обработки временных характеристик, в частности интегрирование активной мощности, выделяемой за период переменного сетевого напряжения, можно рассчитать среднюю мощность, выделяемую в каждом диоде мостового выпрямителя при протекании прямого и обратного тока.

При условии одинаковости параметров модели всех диодов моста, средняя мощность, выделяемая на всех диодах моста, будет в 4 раза больше средней мощности выделяемой на одном диоде.

Таблица 1. Параметры SPICE модели диодов мостовых выпрямителей

Тип мостового выпрямителя	I_S , А	N	R_s , Ом	M	I_{SR} , А
RC 207	$1,59 \cdot 10^{-9}$	1,72	0,021	0,334	$2,46 \cdot 10^{-7}$
КЦ407А	$8,58 \cdot 10^{-9}$	2,044	0,094	0,234	$9,36 \cdot 10^{-8}$

Результаты расчета мощности потерь за счет протекания прямых и обратных токов, полной мощности потерь, выполненные по предложенным формулам и полученные из результатов моделирования в программе Schematic, приведены в таблице 2.

Из сравнения результатов моделирования, полагаемых точными, и результатов, полученных по выведенным соотношениям, следует, что погрешность расчетов по приближенным формулам мала и не превышает 3%, если угол проводящего состояния диодов меньше 30° .

Таким образом, выведены уточненные соотношения для расчета мощности потерь в мостовом выпрямителе по пяти параметрам модели диодов I_s , N , R_s , M и I_{SR} и основным параметрам выпрямителя (средний ток нагрузки и максимальное выпрямленное напряжение).

Таблица 2. Мощности потерь в мостовых выпрямителях

Тип мостового выпрямителя	P_F , мВт	Погрешность, %	P_r , мВт	Погрешность, %	P_T , мВт	Погрешность, %
RC 207 (формулы)	60,5	0,1	0,9062	0,5	61,4	0,2
RC 207 (моделирование)	60,56		0,9106		61,47	
КЦ407А (формулы)	69,36	1,1	0,2099	3,3	69,59	1,1
КЦ407А (моделирование)	68,62		0,217		63,84	

Литература

1. Мелешин В.И. Транзисторная преобразовательная техника. –М.: Техносфера, 2005. – 632 с.
2. Евсеев Ю.А., Дерменжи П.Г. Расчёт силовых полупроводниковых приборов. Учебник для техникумов. – М.: Энергоиздат, 1981. – 472с.
3. Разевиг В.Д. Система сквозного проектирования электронных устройств DesignLab 8.0 –М.: Солон, 1995. – 696с.

APPROXIMATE RELATIONS FOR THE CALCULATION OF LOSS IN THE BRIDGE RECTIFIER BY DIODES MODEL PARAMETERS

Summary. The article presents the refined relations for calculating the power losses in the rectifier bridge, taking into account the direct and reverse currents of diodes.

Keywords: bridge rectifier; power loss; the calculated ratio.