

## РАСЧЕТ МОЩНОСТИ ПОТЕРЬ В МОСТОВОМ ВЫПРЯМИТЕЛЕ С АКТИВНО-ЕМКОСТНОЙ НАГРУЗКОЙ

Падеров В. П., Виль А. В., Симкин А. В.

ГОУВПО «Мордовский государственный университет им. Н. П. Огарева», г. Саранск  
Тел. (8342)290625, E-mail: [paderov@mail.ru](mailto:paderov@mail.ru)

**Аннотация.** Выведено приближенное соотношение для расчета мощности потерь в мостовом выпрямителе по основным электрическим параметрам выпрямителя и диодов.

**Ключевые слова:** мостовой выпрямитель, мощность потерь.

Потери в выпрямителях переменного тока частотой 50 Гц обусловлены, в основном, статическими потерями в диодах при протекании прямого и обратного токов. Коммутационные потери незначительны ввиду малой частоты переменного тока.

Схема мостового выпрямителя с активно-емкостной нагрузкой показана на рисунке 1[1]. Если на вход подается синусоидальное напряжение (рисунок 2а), то формы токов, протекающих через нагрузку  $R_L$  и диоды моста, являются, как правило, треугольной (рисунок 2б) и пилообразной (рисунок 2в), соответственно. Следовательно, мощность в выпрямительных диодах при протекании прямого тока выделяется только в течение короткого промежутка времени  $\Delta t$ , когда заряжается конденсатор фильтра  $C$ .

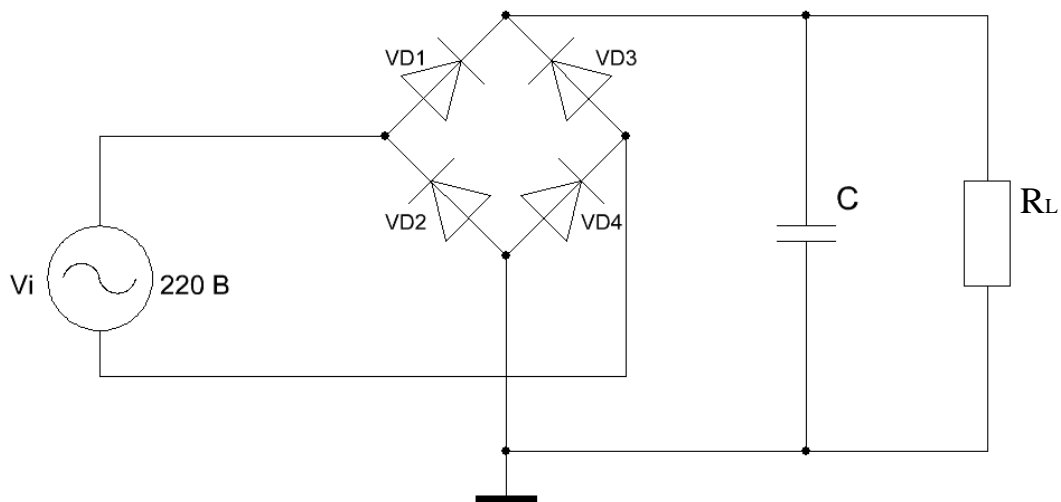


Рисунок 1 – Схема мостового выпрямителя

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

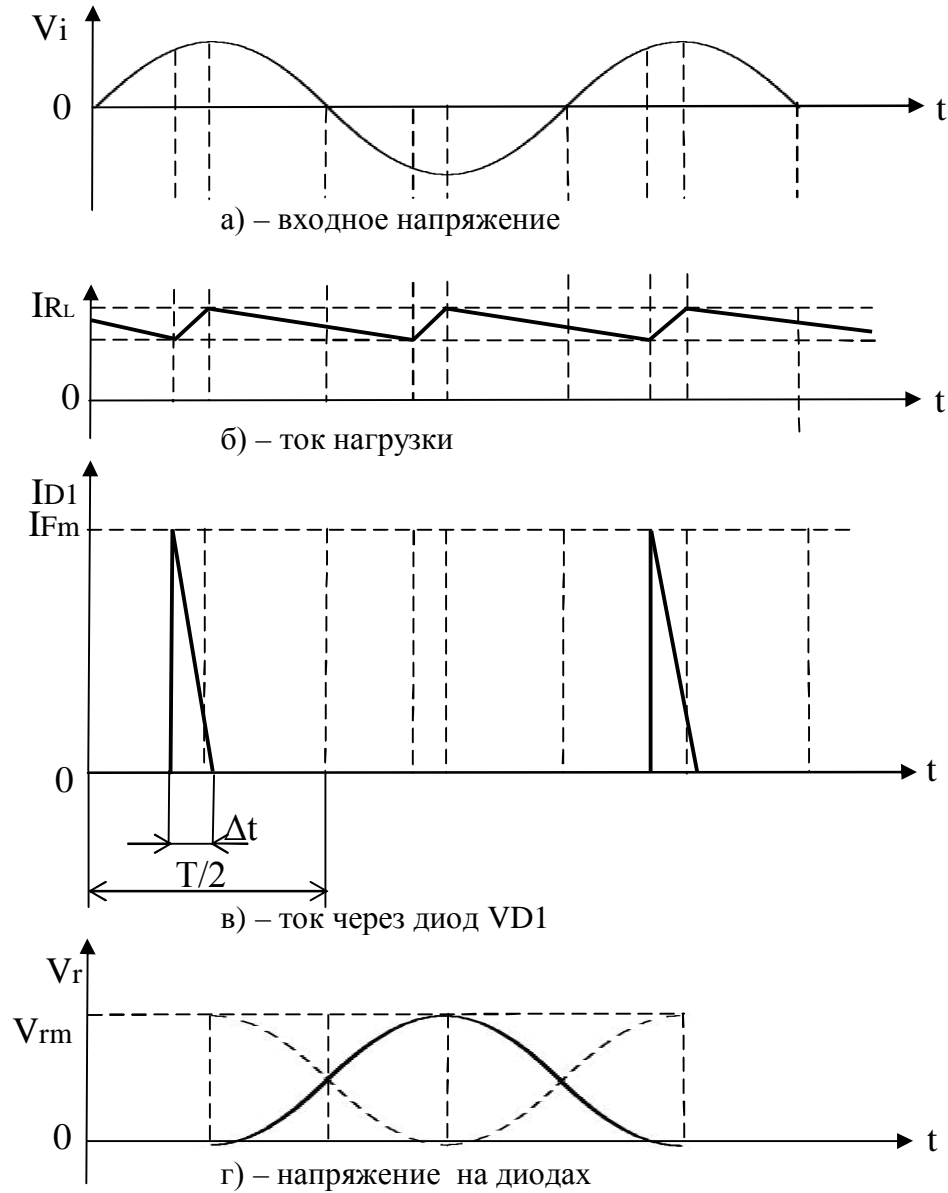


Рисунок 2 – Осциллограммы напряжений и токов

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

где  $V_f$  - прямое 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  $I_{Fm}$ .

Пилообразный ток через диод в первом приближении за интервал времени  $\Delta t$  можно описать линейной функцией

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

Прямое падение напряжения на диоде связано с протекающим через него током достаточно точной логарифмической функцией [2]

$$V_F = nV_T \ln\left(\frac{i_F}{I_0} + 1\right), \quad (3)$$

где  $n$  – коэффициент неидеальности ВАХ диода,

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

$I_0$  – начальный ток диода.

Параметры  $n$  и  $I_0$  – параметры схемотехнической модели диода.

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

$$P_F = \frac{4nV_T I_{Fm}}{T} \int_0^{\Delta t} \left(1 - \frac{t}{\Delta t}\right) \ln\left[\frac{I_{Fm}}{I_0} \left(1 - \frac{t}{\Delta t}\right) + 1\right] dt, \quad (4)$$

Введем новую переменную

$$x = 1 - \frac{t}{\Delta t}, \quad (5)$$

и подставим ее в выражение (4), после преобразования получим

$$P_F = \frac{4nV_T I_{Fm} \Delta t}{T} \int_0^1 x \ln(ax + 1) dx, \quad (6)$$

где

$$a = \frac{I_{Fm}}{I_0}. \quad (7)$$

Интеграл в выражении (6) можно рассчитать аналитически, используя метод интегрирования по частям:

$$\int_0^1 x \ln(ax + 1) dx = \frac{1}{2} \left(1 - \frac{1}{a^2}\right) \ln(a + 1) - \frac{1}{4} + \frac{1}{2a}. \quad (8)$$

Для реальных диодов всегда выполняется неравенство

$$a \gg 1. \quad (9)$$

С учетом неравенства (9) интеграл в (8) с малой погрешностью равен

$$\int_0^1 x \ln(ax + 1) dx \approx \frac{1}{2} \left(\ln a - \frac{1}{2}\right). \quad (10)$$

Подстановка (10) в (6) дает следующую зависимость мощности потерь в мостовом выпрямителе от параметров формы прямого тока через диод:

$$P = 2I_{Fm} \frac{\Delta t}{T} nV_T \left[ \ln\left(\frac{I_{Fm}}{I_0}\right) - \frac{1}{2} \right]. \quad (11)$$

С учетом выражения (3) и неравенства (9), выражение (11) можно переписать

$$P = I_{Fm} \frac{\Delta t}{T} (2V_{Fm} - nV_T), \quad (12)$$

где

$$V_{Fm} = nV_T \ln \left( \frac{I_{Fm}}{I_0} \right) - \quad (13)$$

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

Параметры прямого тока, протекающего через диоды моста  $I_{Fm}$  и  $\Delta t$ , можно выразить через средний ток нагрузки равный среднему току через диоды:

$$I_{av} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i_F(t) dt. \quad (14)$$

При подстановке (2) в (14) и заменяя пределы интегрирования, получим

$$I_{av} = \frac{2I_{Fm}}{T} \int_0^{\Delta t} \left( 1 - \frac{t}{\Delta t} \right) dt = I_{Fm} \frac{\Delta t}{T}. \quad (15)$$

С учетом выражения (15) выражение (12) переписывается

$$P_F = I_{av} (2V_{Fm} - nV_T) \approx 2I_{av} V_F, \quad (16)$$

где

$$V_F = V_{Fm} - \frac{nV_T}{2}. \quad (17)$$

Таким образом, мощность потерь в мостовом выпрямителе с активно-емкостной нагрузкой при протекании прямого тока прямо пропорциональна среднему току нагрузки и прямому падению напряжения на диоде при протекании тока, примерно в 1,6 раза меньше максимального. Учитывая, что падение напряжения на диоде слабо зависит от тока (выражение (2), при  $n=1$  изменение тока на порядок величины приводит к изменению прямого падения всего на 0,06 В), в качестве  $V_F$  в первом приближении можно использовать напряжение при протекании среднего тока, а это напряжение в свою очередь оценить из типовой вольт-амперной характеристики диода.

В выпрямительном мосте на сетевое напряжение 220 В используются высоковольтные диоды с напряжением пробоя не менее 450 В. Такие диоды при высоком обратном напряжении ведут себя как резкие р-п переходы, у которых обратный ток пропорционален ширине области пространственного заряда и, следовательно, обратный ток аппроксимируется степенной зависимостью от обратного напряжения

$$i_r = A\sqrt{V_r}, \quad (18)$$

где  $A$  – постоянная аппроксимации, зависящая от типа диодов и температуры.

Большую часть периода переменного напряжения (>85%) каждый диод находится под обратным смещением, форма которого при малых пульсациях тока нагрузки близка к косинусоидальной и показана на рисунке 2г. Сплошная линия соответствует диодам VD1,

VD4, а пунктирная - диодам VD2, VD3; причем ноль отсчета периода смещен относительно нуля входного переменного напряжения на четверть периода. Сплошная линия аппроксимируется следующей функцией:

$$V_r(t) = \frac{V_{rm}}{2} [1 - \cos(\omega t)], \quad (19)$$

где  $V_{rm}$  – амплитудное значение выпрямительного напряжения,

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} - \quad (20)$$

– круговая частота сетевого напряжения.

Поскольку сплошная и пунктирная кривая описываются одинаковыми функциями с фазовым сдвигом  $T/2$ , мощность потерь во всех четырех диодах будет одинаковой. Следовательно, мощность потерь в мостовом выпрямителе за счет протекания обратных токов через 4 диода можно рассчитать как

$$P_r = \frac{4}{T} \int_0^T i_r(t) V_r(t) dt. \quad (21)$$

Подставив (19) в (18), а (18) и (19) в (21) и учитывая, что  $1 - \cos \alpha = 2 \sin^2\left(\frac{\alpha}{2}\right)$ , получим

$$P_r = \frac{4A V_{rm}^{3/2}}{T} \int_0^T \sin^3\left(\frac{\omega t}{2}\right) dt. \quad (22)$$

С учетом (20) интеграл в (22) переписывается

$$\int_0^T \sin^3\left(\frac{\omega t}{2}\right) dt = \int_0^T \sin^3\left(\frac{\pi t}{T}\right) dt = \frac{T}{\pi} \int_0^\pi \sin^3 x dx, \quad (23)$$

где  $x = \frac{\pi t}{T} - \quad (24)$

– промежуточная переменная.

Интеграл в (23) берется аналитически и равен

$$\int_0^\pi \sin^3 x dx = \frac{4}{3}. \quad (25)$$

Подставив (25) в (23), а (23) в (22), получим мощность потерь в мостовом выпрямителе за счет протекания обратных токов

$$P_r = \frac{16}{3\pi} A V_{rm}^{3/2} = \frac{16}{3\pi} I_{rm} V_{rm} \approx 1,7 I_{rm} V_{rm}, \quad (26)$$

где 
$$I_{rm} = A\sqrt{V_{rm}} \quad - \quad (27)$$

– максимальный обратный ток через диод при максимальном обратном напряжении.

Полная мощность потерь складывается из мощности потерь при протекании прямых и обратных токов

$$P_{tot} = P_F + P_r = 2V_F I_{av} + 1,7V_{rm} I_{rm}. \quad (28)$$

При следующих значениях параметров мостового выпрямителя:  $I_{av} = 33$  мА,  $V_F = 0,6$  В,  $V_{rm} = 310$  В и  $I_{rm} = 0,1$  мА имеем

$$P_{tot} = 0,04 + 0,053 = 0,093 \text{ Вт.}$$

Из сравнения численных значений видно, при существенных обратных токах утечки диодов мощность потерь за счет протекания обратных токов может быть выше мощности потерь за счет протекания прямых токов.

Таким образом, выведены простые приближенные соотношения для расчета мощности потерь в диодном мосте с активно-емкостной нагрузкой по паспортным данным диодов (прямое падение напряжения при среднем токе нагрузки  $V_F$  и ток утечки на максимальном обратном напряжении  $I_{rm}$ ) и основным параметрам выпрямителя (средний ток нагрузки и максимальное выпрямительное напряжение). Из соотношения (28) следует, что уменьшить мощность потерь в мостовом выпрямителе можно за счет уменьшения двух параметров: или  $V_F$  или  $I_{rm}$ , предварительно оценив их значимость в общих потерях.

### Литература

1. Джонс М.Х. Электроника–практический курс. М.: Постмаркет, 1999.–528 с.
2. Соклоф С. Аналоговые интегральные схемы. М.: Мир, 1988.–583 с.