

## Практическое занятие №2

### РАСЧЁТ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ И СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

#### Теоретические сведения

#### СЕТЕВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Основным назначением диодов является выпрямление переменного электрического тока. Оно связано с их преимущественно односторонней проводимостью. На рис. 1 показан простейший **однополупериодный** выпрямитель на диоде (а) и приведены временные диаграммы токов и напряжений (б), поясняющие его работу.

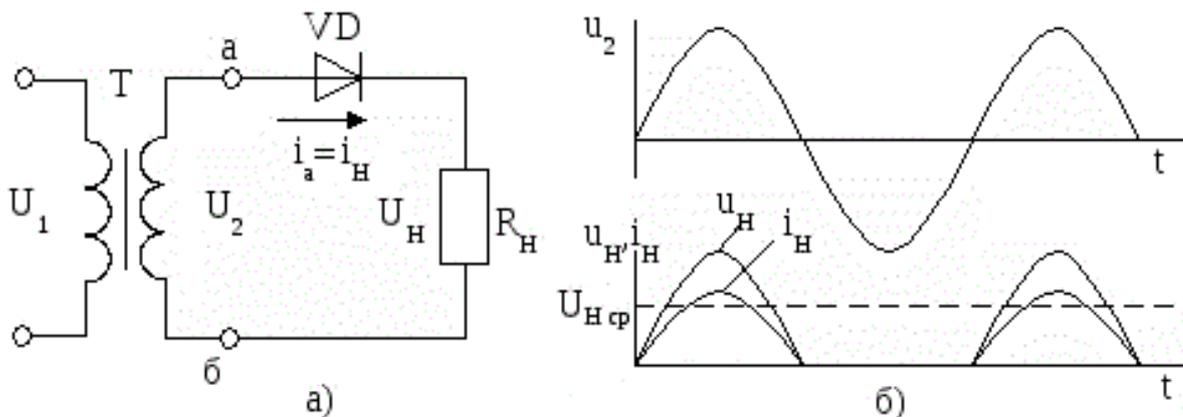


Рис. 1. Однополупериодный выпрямитель (а) и временные диаграммы напряжения вторичной обмотки трансформатора  $u_2$ , напряжения  $u_H$  и тока  $i_H$  нагрузки (б)

Ток через диод и последовательную с ним нагрузку протекает, когда напряжение вторичной обмотки прикладывается к диоду в прямом направлении, т.е. только в течение одного полупериода, отсюда и название схемы – однополупериодный выпрямитель.

Среднее значение напряжения нагрузки однополупериодного выпрямителя

$$U_{H, \text{cp}} = \sqrt{2} U_2 / \pi = 0,45 U_2, \quad (1)$$

где  $U_2$  – действующее значение напряжения на вторичной обмотке сетевого трансформатора.

Среднее значение тока нагрузки

$$I_{H, \text{cp}} = U_{H, \text{cp}} / R_H. \quad (2)$$

Средний ток диода равен среднему току нагрузки

$$I_{d, \text{cp}} = I_{H, \text{cp}}, \quad (3)$$

а амплитудное значение тока диода

$$I_{d, \text{max}} = I_{d, \text{cp}} \cdot \pi \quad (4)$$

Максимальное обратное напряжение, прикладываемое к диоду в течение второй половины периода, когда он ток не проводит, равно амплитудному значению напряжения:

$$U_{\text{обр.мах}} = U_{2m} = \sqrt{2}U_2. \quad (5)$$

Коэффициент трансформации трансформатора

$$n = U_1/U_2. \quad (6)$$

В **двухполупериодном** выпрямителе (рис. 2) благодаря использованию большего числа диодов ток в нагрузке протекает каждые полпериода. В течение первой половины периода, когда  $U_2 > 0$ , ток течет через VD1 и VD4, а во вторую часть периода, когда  $U_2 < 0$ , ток течет через VD2 и VD3.

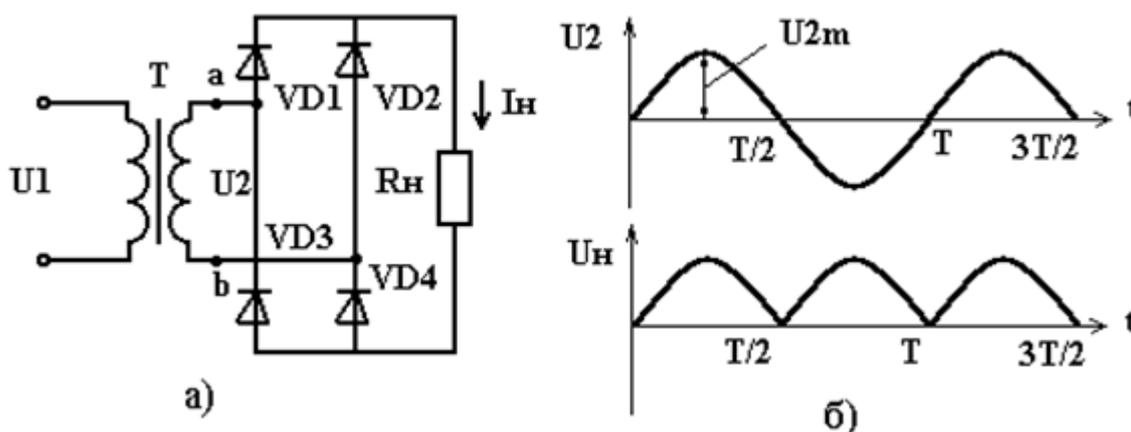


Рис. 2. Двухполупериодный мостовой выпрямитель (а) и временные диаграммы напряжения вторичной обмотки трансформатора  $u_2$  и напряжения нагрузки  $u_n$  (б)

Среднее значение напряжения нагрузки двухполупериодного выпрямителя

$$U_{\text{н.ср}} = 2\sqrt{2}U_2/\pi = 0,9U_2. \quad (7)$$

Максимальное обратное напряжение, прикладываемое к каждому диоду, когда он ток не проводит, так же находится по формуле (5).

В двухполупериодной схеме амплитудные значения тока  $I_m$  диода и нагрузки совпадают:

$$I_{\text{д.м}} = I_{\text{н.м}} = \sqrt{2}I_{\text{н.ср}}, \quad (8)$$

а вот средние значения токов диода и нагрузки отличаются в 2 раза, поскольку ток нагрузки проходит через каждый диод только в течение половины периода:

$$I_{\text{д.ср}} = I_{\text{н.ср}}/2. \quad (9)$$

Современные выпрямители часто работают непосредственно от сети, без сетевого понижающего трансформатора. В этом случае в формулы (1), (5) и (7) вместо напряжения вторичной обмотки  $U_2$  следует подставлять сетевое напряжение  $U_1$ .

Как видно из рис. 1 и 2, ток и напряжение нагрузки выпрямителя имеют пульсирующий характер. **Коэффициент пульсаций**  $q$  – отношение

амплитуды наиболее резко выраженной гармонической составляющей напряжения или тока на выходе выпрямителя к среднему значению напряжения или тока:

$$q = U_{п.м}/U_{ср}. \quad (10)$$

Для **однополупериодного** выпрямителя (рис. 1) коэффициент пульсаций  $q = 1,57$ . Для **двухполупериодного** выпрямителя (рис. 2) коэффициент пульсаций  $q = 0,67$ .

### СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Электронная аппаратура обычно требует для питания постоянное напряжение, т.е. с практически неизменной во времени амплитудой, с минимальными пульсациями. Для этого в схемах выпрямителей применяют дополнительные сглаживающие фильтры на выходе.

Основным параметром сглаживающего фильтра является **коэффициент сглаживания**  $S$ , который определяется как отношение коэффициента пульсаций напряжения на входе фильтра (на выходе выпрямителя)  $q$  к коэффициенту пульсаций на выходе фильтра (на нагрузке)  $q_{\phi}$ :

$$S = \frac{q}{q_{\phi}}. \quad (11)$$

На рис. 3 показан простейший **емкостной фильтр** на выходе однополупериодного (а) и двухполупериодного (в) выпрямителей и соответствующие этим схемам временные диаграммы (б) и (г). Пунктиром показаны временные диаграммы  $U_H$  при отсутствии сглаживающего конденсатора.

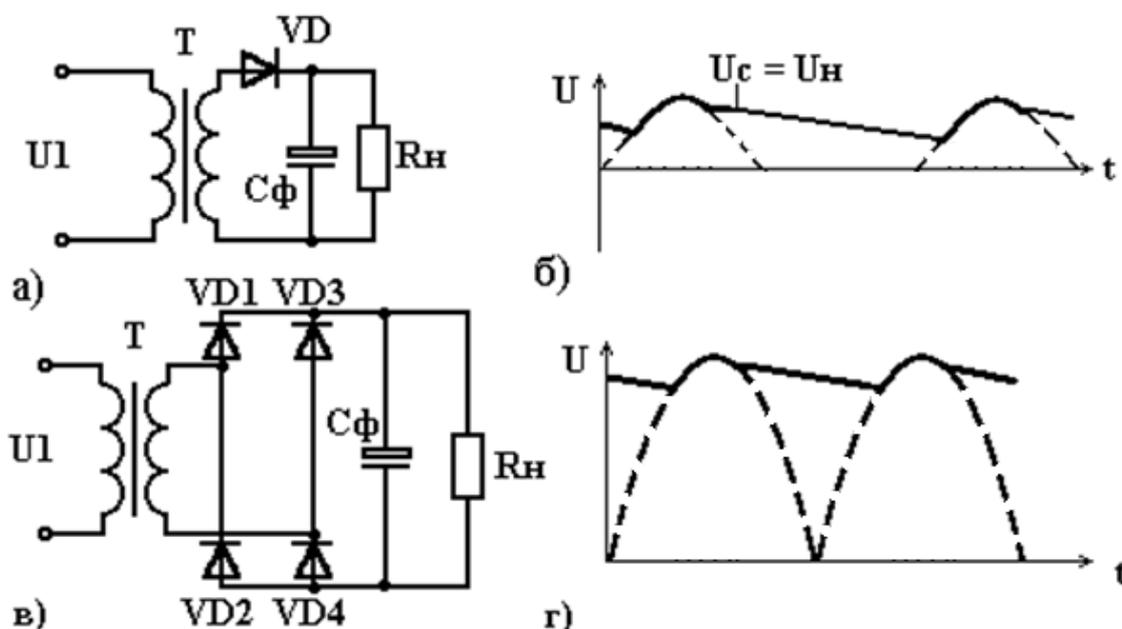


Рис. 3. Емкостной сглаживающий фильтр на выходе однополупериодного (а) и двухполупериодного (в) выпрямителей и соответствующие этим схемам временные диаграммы выходного напряжения (б) и (г)

Конденсатор включается параллельно нагрузке, т.е.  $U_H = U_C$ . Сглаживание происходит за счет инерционных свойств конденсатора, накапливающего и затем стремящегося сохранить накопленный заряд, а значит, и уровень напряжения, т.к.  $Q = CU$ . Заряд конденсатора расходуется на нагрузку в промежутки времени, когда амплитуда входного напряжения опускается ниже своего среднего за период значения  $U_{cp}$  (пунктирная линия на рис. 1, б). Соответственно, потраченный заряд восполняется от сети в моменты, когда амплитуда входного напряжения превышает его среднее значение.

Коэффициент пульсаций на выходе **емкостного фильтра** (рис. 3) определяется как

$$q_{\phi} = \frac{1}{2mfR_H C}, \quad (12)$$

где  $m$  – пульсность выпрямленного напряжения, т.е. число пульсаций за период ( $m = 1$  для однополупериодного выпрямителя,  $m = 2$  для однофазного двухполупериодного выпрямителя);  $f$  – частота сетевого напряжения;  $R_H$  – сопротивление нагрузки выпрямителя,  $C$  – емкость фильтра.

Сглаживающими свойствами обладает также и катушка индуктивности (рис. 4). Включенная последовательно с нагрузкой, она (вследствие явления самоиндукции) препятствует быстрым изменениям тока и сглаживает, таким образом, его форму. Соответственно, сглаживается и форма напряжения нагрузки  $U_H = R_H I_H$ .

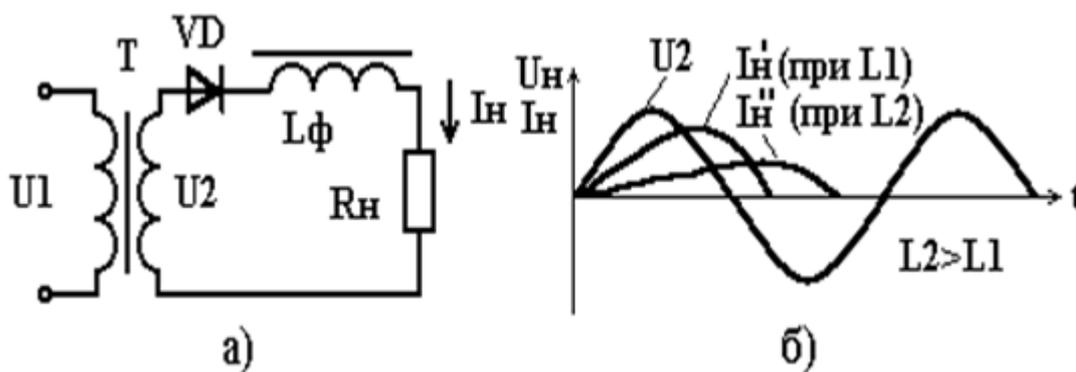


Рис. 4. Индуктивный сглаживающий фильтр (а) и временные диаграммы его работы (б)

Коэффициент сглаживания пульсаций на выходе **индуктивного фильтра** (рис. 4) определяется как

$$S = \frac{q}{q_{\phi}} = \frac{\sqrt{R_H^2 + (2\pi f m L)^2}}{R_H}, \quad (13)$$

где  $m = 1$  для однополупериодного выпрямителя,  $m = 2$  для однофазного двухполупериодного выпрямителя;  $f$  – частота сетевого напряжения;  $R_H$  – сопротивление нагрузки выпрямителя,  $L$  – индуктивность фильтра.

Емкостной сглаживающий фильтр обычно применяют при большом сопротивлении нагрузки, а индуктивный – при малом.

На практике сглаживающие свойства конденсатора и катушки индуктивности часто объединяют, применяя **LC-фильтр** (рис. 5). LC-фильтр рассчитывают таким образом, чтобы параметры элементов подходили под следующие условия:

$$\frac{1}{2\pi f m C} \ll R_{\text{н}}, \quad 2\pi f m L \gg \frac{1}{2\pi f m C}, \quad 2\pi f m L \gg R_{\text{н}}. \quad (14)$$

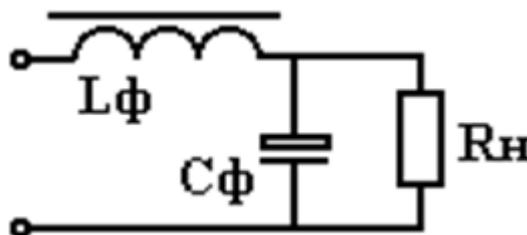


Рис. 5. Сглаживающий LC-фильтр

В этом случае коэффициент сглаживания LC-фильтра

$$S = \frac{q}{q_{\phi}} = (2\pi f m)^2 LC - 1. \quad (15)$$

## ВЫПРЯМЛЕНИЕ ПРЯМОУГОЛЬНЫХ ИМПУЛЬСОВ

**При выпрямлении прямоугольных импульсов**, когда подаваемое на диод напряжение практически мгновенно меняется с прямого на обратное, диод кратковременно теряет свои выпрямительные свойства: некоторое время через него течет большой обратный ток, связанный с перезарядкой емкости  $C_{p-n}$  и ограниченный по амплитуде только величиной внешнего сопротивления (рис. 6):

$$I_{\text{обр}} = E_{\Gamma 2} / R. \quad (16)$$

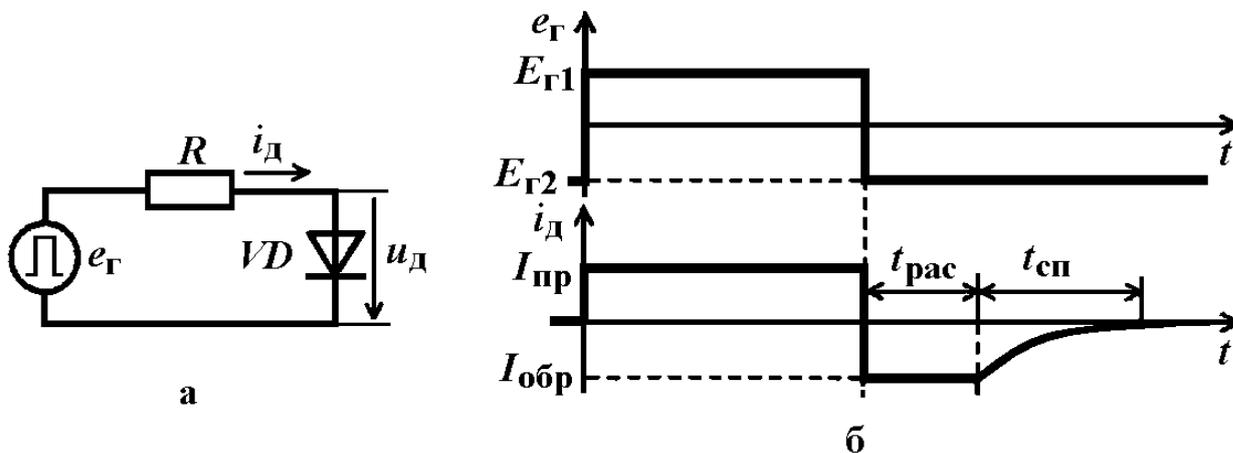


Рис. 6. Работа диода в импульсном режиме: а) схема; б) временные диаграммы

Длительности этапов, когда через диод протекает большой обратный ток, прямо зависят от значений его диффузионной (через параметр  $\tau_{эфф}$ ) и барьерной емкостей:

$$t_{рас} = \tau_{эфф} \ln \left( \frac{I_{пр}}{|I_{обр}|} + 1 \right); \quad t_{сп} \approx 3RC_{бар}, \quad (17)$$

где прямой ток диода  $I_{пр} = (E_{Г1} - U_{пр})/R$ .

В сумме этапы рассасывания носителей  $t_{рас}$  и спада обратного тока диода  $t_{сп}$  составляют *время восстановления обратного сопротивления диода*.

### Задачи для решения

**Задача 1.** Для схемы однополупериодного выпрямителя (рис. 1) найти среднее и амплитудное значения тока диода и максимальное обратное напряжение диода, если сопротивление нагрузки 100 Ом, а среднее значение тока нагрузки 2 А. Найти также коэффициент трансформации трансформатора, если известно, что его первичная обмотка подключена к сети с действующим значением напряжения 220 В.

*Подсказка: из формулы (2) находим  $U_{н.ср}$ , по формуле (1) –  $U_2$ , по формуле (5) –  $U_{обр.мах}$ , по формуле (3) находим  $I_{д.ср}$ , а по формуле (4) –  $I_{д.мах}$ , по формуле (6) находим  $n$ .*

**Задача 2.** Действующее значение напряжения на первичной обмотке трансформатора, к которому подключен двухполупериодный выпрямитель (рис. 2), составляет 220 В. Коэффициент трансформации равен 2. Сопротивление нагрузки выпрямителя составляет 50 Ом. Найти среднее и амплитудное значения токов диодов выпрямителя и максимальное обратное напряжение на них, а также амплитуду пульсаций напряжения на нагрузке.

*Подсказка: для решения последовательно используем формулы (6), (7), (8), (9), (5) и (10), используя в последней значение коэффициента пульсаций для данной схемы, т.е. 0,67.*

**Задача 3.** Найти значение емкости для емкостного фильтра, стоящего на выходе однополупериодного выпрямителя (рис. 3, а), чтобы коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке составлял 0,2. Сопротивление нагрузки равно 150 Ом, частота сетевого напряжения 50 Гц.

**Задача 4.** К выходу двухполупериодного выпрямителя (рис. 3, в) подключен емкостной фильтр с  $C = 1000$  мкФ. Каким должно быть сопротивление нагрузки, чтобы амплитуда пульсаций на ней не превышала 5 В? Частота сетевого напряжения – 50 Гц, среднее значение напряжения нагрузки 250 В.

*Подсказка: использовать формулы (10) и (12).*

**Задача 5.** Найти значения  $C$  и  $L$  для простых емкостного (рис. 3) и индуктивного (рис. 4) сглаживающих фильтров двухполупериодного выпрямителя для получения коэффициента пульсаций напряжения нагрузки  $q_{ф} = 0,01$  при двух значениях сопротивления нагрузки:  $R_{н} = 10$  Ом и  $R_{н} = 1$  кОм. Частота питающей сети  $f = 50$  Гц.

*Подсказка: используем формулы (12) и (13), причем в формуле (13) коэффициент пульсаций на выходе выпрямителя, т.е. на входе фильтра  $q = 0,67$ .*

**Задача 6.** Найти значения  $C$  и  $L$  для сглаживающего  $LC$ -фильтра двухполупериодного выпрямителя, чтобы коэффициент пульсаций напряжения нагрузки составлял не более 0,01. Сопротивление нагрузки 50 Ом, частота питающей сети  $f = 50$  Гц.

*Подсказка: сначала нужно выбрать значение одного из элементов –  $C$  или  $L$ , соответственно исходя из первого или третьего условия выражений (14). Затем использовать формулу (15).*

**Задача 7.** Чему равно время восстановления обратного сопротивления диода в однополупериодном выпрямителе, подключенном к источнику прямоугольных импульсов (рис. 6) с амплитудой  $E_{Г1} = -E_{Г2} = 40$  В, и с нагрузкой 25 Ом. Параметры диода:  $C_б = 200$  пФ,  $\tau_{эфф} = 300$  пс, прямое падение напряжения 0,65 В.