



1.17. ТРАНСФОРМАТОРНО-ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ МОДУЛИ В ИСТОЧНИКАХ ЭЛЕКТРОПИТАНИЯ

Трансформаторно-выпрямительные модули в большинстве случаев содержат трансформатор, диоды и сглаживающий фильтр. Они характеризуются следующими параметрами [2]:

- значением входного напряжения, частотой входного тока и их отклонениями;
- полной мощностью, потребляемой от входной сети;
- значением выходного напряжения;
- коэффициентом пульсаций выходного напряжения и его отклонением от номинального;
- максимальным значением выходного тока;
- коэффициентом полезного действия.

Коэффициент пульсации выпрямителя принято определять в виде отношения двойной амплитуды переменной составляющей к постоянной составляющей выходного напряжения. Двойная амплитуда измеряется как сумма положительной и отрицательной полуволн переменной составляющей выпрямленного напряжения.

Из большого количества схемных решений выпрямителей рассмотрим лишь наиболее часто применяемые в источниках электропитания (рис. 1.17.1). Однополупериодная схема выпрямителя (рис. 1.17.1, а) используется обычно при выходной мощности до 10 Вт и в тех случаях, когда допускается сравнительно высокий коэффициент пульсации. Достоинство этой схемы — минимальное число диодов; недостаток — низкая частота пульсации, равная частоте входного тока. Магнитопровод трансформатора в этой схеме подмагничивается постоянным током.

Двухполупериодная схема с выводом средней точки (рис. 1.17.1, б) применяется обычно для получения выходной мощности до 500 Вт. Достоинством схемы является возможность применения диодов с электрически соединенными катодами в виде диодных сборок, а также возможность установки диодов на общий радиатор. К недостаткам следует отнести усложнение конструкции трансформатора из-за вывода средней точки вторичной обмотки трансформатора и повышенное обратное напряжение на диодах.

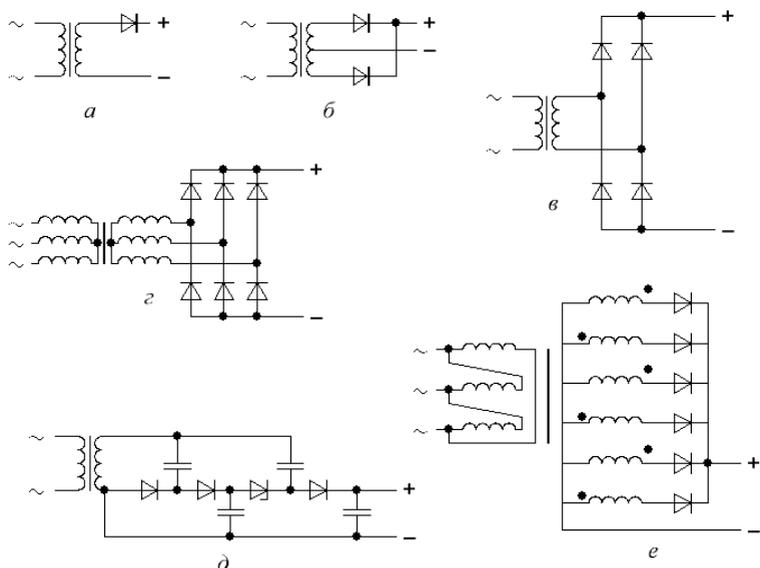


Рис. 1.17.1. Электрические схемы диодных выпрямителей:
а – однополупериодная; б – двухполупериодная с выводом средней точки; в – мостовая однофазная; г – мостовая трехфазная; д – с диодно-конденсаторными умножителями напряжения; е – шестифазная однотактная

Мостовая однофазная схема (рис. 1.17.1, в) используется в широком диапазоне выходных мощностей (обычно более 300 Вт). Достоинство схемы — повышенная частота пульсации, низкое обратное напряжение на диодах, возможность работы без трансформатора; недостаток — повышенное падение напряжения на диодах и необходимость применения изолирующих прокладок при установке диодов на один радиатор.

Мостовая трехфазная схема (рис. 1.17.1, г) обладает высоким коэффициентом использования мощности трансформатора, малым значением обратного напряжения на диоде, повышенной частотой пульсации выпрямленного напряжения. Эта схема применяется в широком диапазоне выходных мощностей и выпрямленных напряжений. Соединение вторичной обмотки трансформатора звездой позволяет избежать появления уравнивающих токов при асимметрии фазных напряжений. Возможно использование схемы без трансформатора.



В устройствах высокого напряжения применяются схемы выпрямителей, приведенные на рис. 1.17.1, а—г, а также схемы с диодно-конденсаторными умножителями напряжения, представленные на рис. 1.17.1, д. Трансформатор в таких схемах используется как промежуточное звено и выполняет функцию предварительного повышения напряжения. Массогабаритные характеристики высоковольтных выпрямителей оказывают существенное влияние на характеристики высоковольтных источников электропитания, так как кроме преобразования напряжения выпрямитель должен обеспечить электрическую изоляцию высоковольтных и низковольтных цепей. В зависимости от значения выходного напряжения и выходной мощности трансформаторно-выпрямительные модули занимают от 30 до 60 % массы и объема высоковольтных ИЭП.

Шестифазная однотактная схема (рис. 1.17.1, е) применяется для получения низких напряжений (менее 10 В) при токах нагрузки до сотен ампер. Первичная обмотка трансформатора должна быть соединена в треугольник для исключения вынужденного намагничивания магнитопровода. Пульсации выходного напряжения в этой схеме такие же, как в трехфазной мостовой, но трансформатор должен быть рассчитан на более высокую габаритную мощность. Целесообразность применения схемы для низких напряжений объясняется тем, что падение напряжения на диодах в каждом такте работы в 2 раза меньше по сравнению с трехфазной мостовой схемой.

Функционирование диодного выпрямителя в существенной мере определяется характером его нагрузки. Так, при различных видах нагрузки имеет место различная форма тока. Чисто активная нагрузка встречается редко и для нее наличие фильтра на выходе ИЭП необязательно. Примером может служить нагреватель электровакуумного прибора. Как правило, нагрузка является активно-емкостной или активно-индуктивной. К активно-емкостной нагрузке можно отнести электронно-лучевые трубки, электровакуумные приборы, вычислительные устройства и др. Активно-индуктивная нагрузка создается фильтром, начинающимся с дросселя, а при отсутствии фильтра такой нагрузкой могут быть технологическое оборудование, электромагнитные механизмы, электродвигатели системы охлаждения и др.

Рассмотрим две широко распространенные в ИЭП схемы выпрямления: двухполупериодную с выводом средней точки и однофазную мостовую.



В двухполупериодной схеме с выводом средней точки при работе на активно-емкостную нагрузку (рис. 1.17.2, а-е) выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ имеет пилообразную форму, а форма токов i_{21} и i_{22} через диоды близка к косинусоидальной. В общем токе двух вторичных полуобмоток $i_{2\text{общ}}$ отсутствует постоянная составляющая (см. рис. 1.17.2, д), поэтому ток i_1 первичной обмотки совпадает по форме с током $i_{\text{общ}}$, а превышение амплитуды тока первичной обмотки над амплитудой общего тока определяется коэффициентом трансформации n :

$$i_1 = n(i_{21} - i_{22})$$

Токи i_{21} и i_{22} во времени не перекрываются, поэтому действующее значение тока I_1 первичной обмотки равно:

$$I_1 = \sqrt{2}I_d,$$

где I_d – действующее значение тока через диод.

Габаритная мощность $P_{\text{габ}}$ трансформатора для рассматриваемой схемы:

$$P_{\text{габ}} = 0,5 \left(\frac{n\sqrt{2}I_d U_2}{n} + 2I_d U_2 \right) = 1,7I_d U_2 \approx 2P_{\text{вых}}$$

Здесь U_2 – напряжение на вторичной полуобмотке трансформатора; $P_{\text{вых}}$ – выходная мощность выпрямителя.

Отсюда следует, что габаритная мощность превышает выходную примерно в 2 раза. Амплитуда обратного напряжения на каждом диоде в 2 раза превышает амплитуду напряжения на вторичной полуобмотке трансформатора.

При активно-индуктивной нагрузке в схеме с выводом средней точки (рис. 1.17.3, а) выходное напряжение $U_{\text{вых}}$ имеет форму огибающей положительных значений напряжений вторичных полуобмоток (рис. 1.17.3, б). Токи вторичных полуобмоток i_{21} и i_{22} по форме близки к прямоугольникам (рис. 1.17.3, в, г), а их общий ток $i_{2\text{общ}}$ имеет форму меандра (рис. 1.17.3, д). По форме ток первичной обмотки i_1 совпадает с током $i_{2\text{общ}}$, а по значению отличается от него в n раз (рис. 1.17.3, е). Действующее значение тока первичной обмотки:

$$I_1 = n\sqrt{2}I_d = nI_{\text{вых}},$$

где $I_{\text{вых}}$ – выходной ток (ток в нагрузке) выпрямителя.

Габаритная мощность трансформатора:

$$P_{\text{габ}} = 0,5(I_1 U_1 + 2I_D U_2) = 1,2I_{\text{ВЫХ}} U_2 = 1,34P_{\text{ВЫХ}}$$

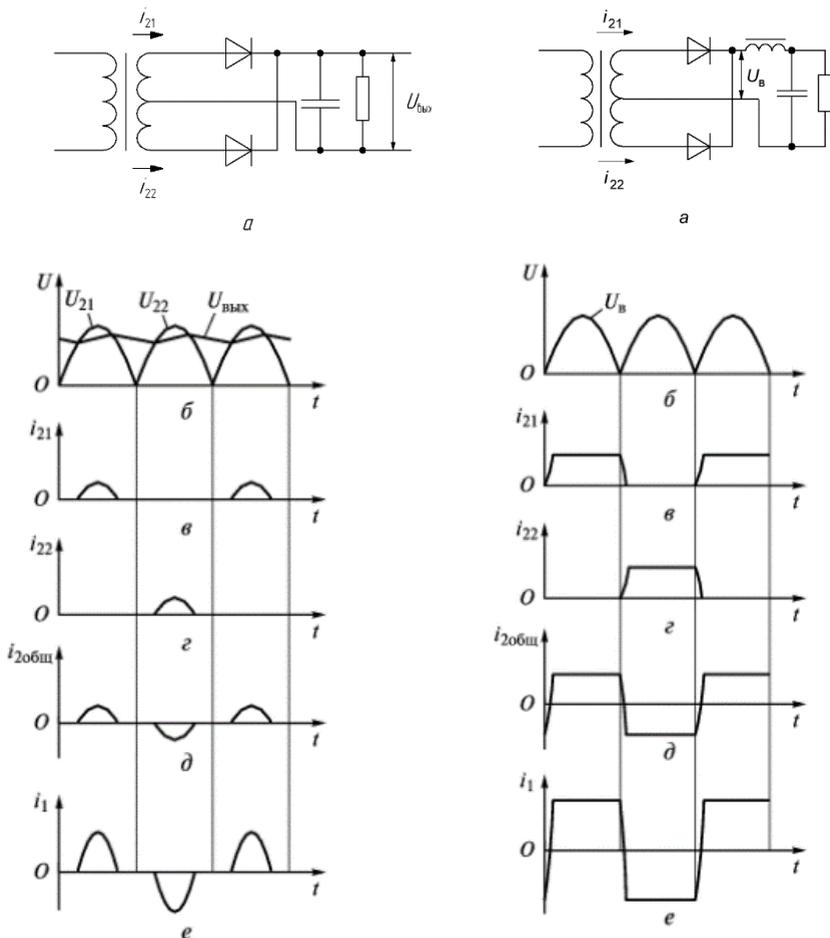


Рис. 1.17.2. Схема выпрямителя с выводом средней точки при подключении на активно-емкостную нагрузку (а) и диаграммы его работы (б-е)

Рис. 1.17.3. Схема выпрямителя с выводом средней точки при подключении на индуктивно-емкостную нагрузку (а) и диаграммы его работы (б-е)

Таким образом, в схеме с активно-индуктивной нагрузкой трансформатор используется лучше, чем в схеме с активно-



емкостной нагрузкой. Это объясняется тем, что индуктивность, обладающая значительным сопротивлением для переменной, составляющей тока, включается последовательно на определенную часть периода в цепь каждой фазы и уменьшает значение переменной составляющей.

К недостаткам схем, приведенным на рис. 1.17.2 и 1.17.3, следует отнести необходимость выполнения вторичных обмоток трансформатора симметричными. При асимметрии обмоток в выпрямленном напряжении возникает составляющая пульсации с частотой выпрямляемой сети.

Однофазная мостовая схема с активно-емкостной нагрузкой и диаграммы ее работы приведены на рис. 1.17.4, *a-e*. Напряжение на вторичной обмотке и выпрямленное напряжение показаны на рис. 1.17.4, *б*. Заряд емкости при одной полярности напряжения осуществляется через диоды $VD1$ и $VD4$, при противоположной полярности – через диоды $VD3$ и $VD2$. Таким образом, токи $i_{VD1,4}$ и $i_{VD3,2}$ через две группы диодов $VD1, VD4$ и $VD3, VD2$ протекают по вторичной обмотке в различные интервалы времени и в противоположных направлениях (рис. 1.17.4, *в, г*). Ток вторичной обмотки не содержит постоянной составляющей. Он равен сумме токов двух групп диодов и изменяется в соответствии с рис. 1.17.4, *д*. Ток первичной обмотки i_1 имеет форму, аналогичную форме тока $i_{2\text{общ}}$, а его значение отличается от значения тока i_2 , коэффициентом трансформации n :

$$i_1 = ni_{2\text{общ}}$$

Действующее значение тока I_1 первичной обмотки равно произведению действующего значения тока I_2 вторичной обмотки на коэффициент трансформации.

На рис. 1.17.4, *e* показан ток i_1 первичной обмотки с учетом тока холостого хода. В мостовой схеме отсутствует вынужденное подмагничивание, так как токи первичной и вторичной обмоток не содержат постоянных составляющих.

Действующее значение тока вторичной обмотки определяется по выражению:



$$I_2 = \sqrt{\left(\frac{1}{2\pi}\right) \int_{-\theta}^{\theta} i_{VD1}^2 d\omega t + \left(\frac{1}{2}\pi\right) \int_{\pi-\theta}^{\pi+\theta} i_{VD3}^2 d\omega t} \approx \sqrt{2}I_{VD}$$

где θ – угол отсечки диода (см. рис. 1.17.4, б).

Коэффициент использования вторичной обмотки трансформатора по току:

$$k_1 = \frac{I_2}{I_{\text{ВЫХ}}} = 0,707$$

Габаритная мощность трансформатора в рассматриваемой схеме:

$$P_{\text{Габ}} = U_2 I_2 = 1,66 P_{\text{ВЫХ}}$$

Обратное напряжение $U_{\text{обр max}}$ на двух одновременно закрытых диодах в 2 раза превышает напряжение на вторичной обмотке трансформатора. Если принять, что обратное напряжение распределяется между диодами примерно поровну, то к одному диоду прикладывается напряжение:

$$U_{\text{обр max}} = U_2 \text{ max} = 1,33 U_{\text{ВЫХ}}$$

Таким образом, в однофазной мостовой схеме обратное напряжение на диоде меньше, чем в схеме с выводом средней точки.

Однофазная мостовая схема при активно-индуктивном характере нагрузки приведена на рис. 1.17.5, а, диаграммы ее напряжений и токов — на рис. 1.17.5, б-е. Ток вторичной обмотки (рис. 1.17.5, д) является разностью токов двух групп диодов. Его действующее значение:

$$I_2 = \sqrt{2}I_{VD} = I_{\text{ВЫХ}}$$

При этом $k_1 = 1$. Токи первичной (рис. 1.17.5, е) и вторичной (рис. 1.17.5, д) обмоток имеют одинаковую форму.

Ток i_1 первичной обмотки и его действующее значение I_1 определяются из выражений:

$$i_1 = n i_{2\text{общ}}$$

$$I_1 = n I_{\text{ВЫХ}}$$

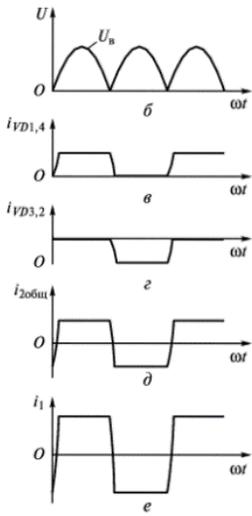
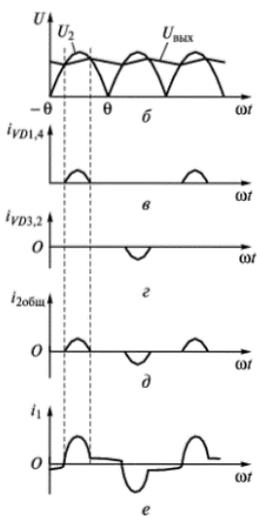
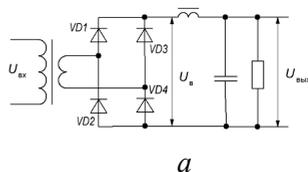
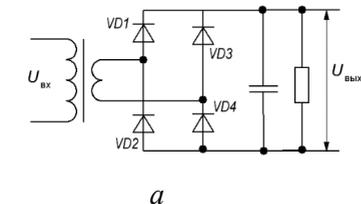


Рис. 1.17.4. Однофазная мостовая схема выпрямителя при подключении на активно-емкостную нагрузку (а) и диаграммы его работы (б-е)

Рис. 1.17.5. Однофазная мостовая схема выпрямителя при подключении на индуктивно-емкостную нагрузку (а) и диаграммы его работы (б-е)

Габаритная мощность трансформатора в однофазной мостовой схеме с активно-индуктивной нагрузкой без учета холостого хода:

$$P_{\text{габ}} = I_2 U_2 = 1,11 P_{\text{ВЫХ}}$$



Отсюда коэффициент использования трансформатора $k_{\text{тр}}$:

$$k_{\text{тр}} = \frac{P_{\text{габ}}}{P_{\text{вых}}} = 1,11,$$

что является хорошим показателем и важным достоинством схемы. Обратное напряжение на каждом диоде:

$$U_{\text{обр вых}} = 1,57 U_{\text{вых}}$$

т.е. меньше, чем в схеме с выводом средней точки.

Выпрямленный ток в мостовой схеме проходит через два последовательно включенных диода, что приводит к увеличенному падению напряжения. В связи с этим возрастает также сопротивление фазы выпрямителя:

$$r = r_{\text{тр}} + 2r_{VD}$$

где $r_{\text{тр}}$ – активное сопротивление обмотки трансформатора; r_{VD} – сопротивление диода.

Увеличение сопротивления фазы приводит к увеличению угла отсечки диода и выходного сопротивления выпрямителя. При низких выходных напряжениях падение напряжения на диодах оказывает существенное влияние на КПД выпрямителя.

При прямоугольной форме входного напряжения, которое имеет место в выходных каскадах ИЭП на базе инверторов (рис. 1.17.6), существенное влияние имеют инерционные свойства диодов, особенно при повышенной частоте преобразования инверторов (десятки килогерц). В момент коммутации напряжения диоды становятся проводящими в обоих направлениях в течение части рабочего полупериода. Такое явление не имеет места при входном напряжении синусоидальной формы.

Инерционные свойства диодов являются причиной уменьшения выходного напряжения и увеличения действующего значения тока через диод. С повышением частоты переменного напряжения указанные изменения проявляются в большей степени. Кроме того, повышение частоты приводит к росту потерь в выпрямителе и, следовательно, снижению его КПД.

Рассмотрим работу двухполупериодного выпрямителя на активно-индуктивную нагрузку при прямоугольной форме входного напряжения (рис. 1.17.7). В этой схеме ток открытого диода изменяется незначительно в течение полупериода. После смены полярности входного напряжения закрывающийся диод вследствие



инерционности, определяемой временем рекомбинации неосновных носителей, остается в течение некоторого времени в открытом состоянии, что вызывает прохождение большого обратного тока через закрывающийся диод. Независимо от характера нагрузки выпрямителя инерция диодов приводит к прохождению через них прямых и обратных коммутационных токов, в результате чего увеличиваются потери мощности в выпрямителе с повышением частоты выпрямляемого напряжения.

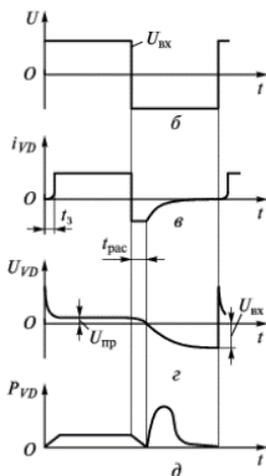
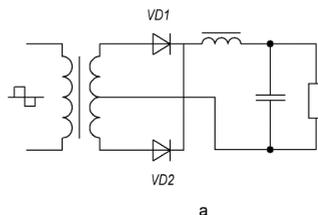
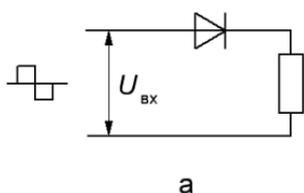


Рис. 1.17.6. Схема однополупериодного выпрямителя (а) и диаграммы его работы при входном напряжении прямоугольной формы (б-д)

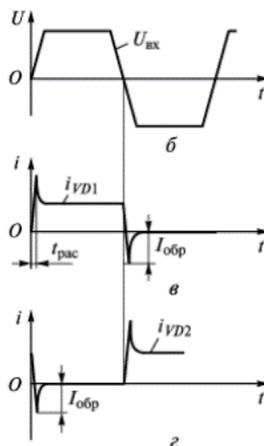


Рис. 1.17.7. Схема двухполупериодного выпрямителя (а) и диаграммы его работы при входном напряжении прямоугольной формы (б-г)

В случае активно-емкостной нагрузки усиливается влияние инерции диодов на уровень пульсации выходного напряжения вы-



прямителя. Это объясняется тем, что при смене полярности напряжения емкость нагрузки разряжается в контуре с весьма малой постоянной времени из-за отсутствия в этом контуре индуктивности.