

**МИНИСТЕРСТВО ВЫСШЕГО И СРЕДНЕГО СПЕЦИАЛЬНОГО
ОБРАЗОВАНИЯ РСФСР**

**Пермский ордена Трудового Красного Знамени
государственный университет им. А.М.Горького**

Кафедра экспериментальной физики

**ВЫПРЯМИТЕЛИ В ПРИБОРАХ ФИЗИЧЕСКОГО
ЭКСПЕРИМЕНТА**

**Методические указания к занятиям
в монтажном практикуме**

Пермь 1988

УДК 621.396.2:631.311.6

Выпрямители в приборах физического эксперимента: Методические указания к занятиям в монтажном практикуме/Перм. ун-т; Сост. А.Г.Михайловский. - Пермь, 1988. - 31 с.

Методические указания соответствуют программе курса "Монтажный практикум". Предназначены для студентов I курса дневного отделения физического факультета специальности "Радиофизика".

В указаниях содержится анализ работы нестабилизированных источников питания, приведены формулы для их расчета, даны рекомендации по практическому изготовлению.

Библиогр. 6 назв.

Печатается по постановлению методической комиссии физического факультета Пермского университета

І. В В Е Д Е Н И Е

Настоящее издание посвящено анализу работы и инженерному расчету сетевых источников питания радиоаппаратуры средней мощности (до 500 Вт). Основное внимание уделяется двум вопросам — процессам, протекающим в рассматриваемых устройствах, и практическим выводам, которые следуют из этого рассмотрения. Под практическими выводами мы понимаем самостоятельную оценку схем, умение провести их критический анализ, а также выбрать схему, рассчитать её, собрать и наладить. Если все это будет осуществляться не за счет грубого использования формул из справочника, а на основе понимания процессов в схеме и того, откуда эти формулы берутся, то цель, поставленную нами можно считать достигнутой.

В ряде случаев формулы, приводимые в тексте, являются упрощенными. И это, на наш взгляд, вполне оправданно, поскольку использование в лабораторной практике точных формул, значительно более громоздких, часто не дает существенного изменения результата, а лишь заслоняет суть физических явлений, происходящих в схеме.

В конце разделов приводятся вопросы, которые можно использовать для самоконтроля. Они расположены в порядке усложнения. На некоторые наиболее сложные вопросы приведены ответы или "подсказки" для решения.

2. ТИПЫ СЕТЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

В настоящее время наиболее широко распространенными являются источники питания (ИП), построенные по "классической" блок-схеме (рис. 2.1.)

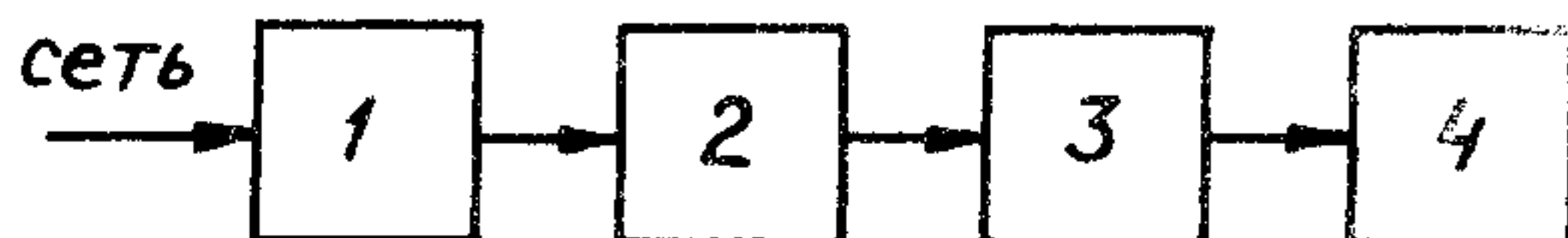


Рис. 2.1. Блок-схема сетевого источника питания.

1 — трансформатор, 2 — выпрямитель, 3 — сглаживающий фильтр, 4 — стабилизатор напряжения (или тока)

Трансформатор понижает напряжение сети до необходимой величины и обеспечивает гальваническую развязку ИП от сети.

Выпрямитель преобразует переменное напряжение в пульсирующее, т.е. имеющее постоянную составляющую.

Сглаживающий фильтр осуществляет фильтрацию пульсирующего напряжения, увеличивая тем самым отношение постоянной составляющей к переменным.

Стабилизатор должен обеспечивать постоянство выходного напряжения ИП при изменении величины сетевого напряжения и нагрузки. Если требования к стабильности напряжения ИП невысоки, то стабилизатора в схеме может и не быть.

На рис. 2.2. изображена схема простейшего ИП, содержащего все перечисленные элементы.

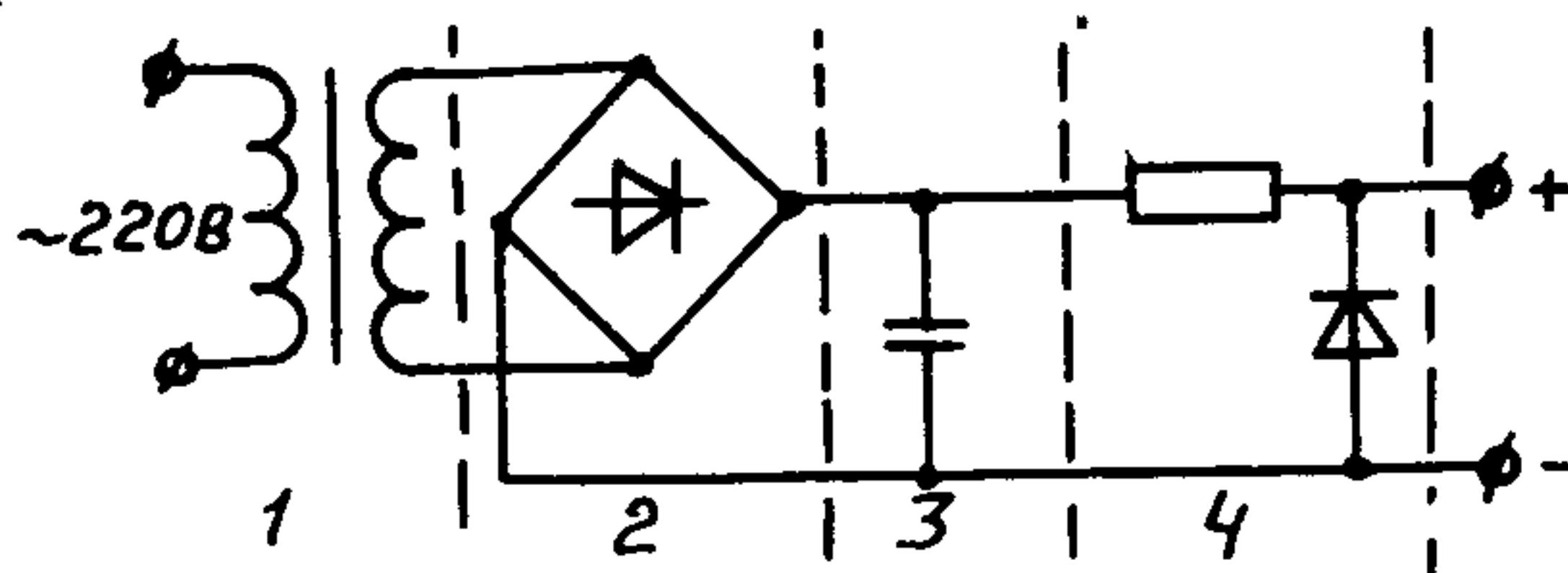


Рис. 2.2. Схема сетевого ИП. Цифры на рисунке соответствуют цифрам на блок-схеме рис. 2.1

В настоящее время все шире применяются сетевые ИП, построенные по другой блок-схеме (рис. 2.3).

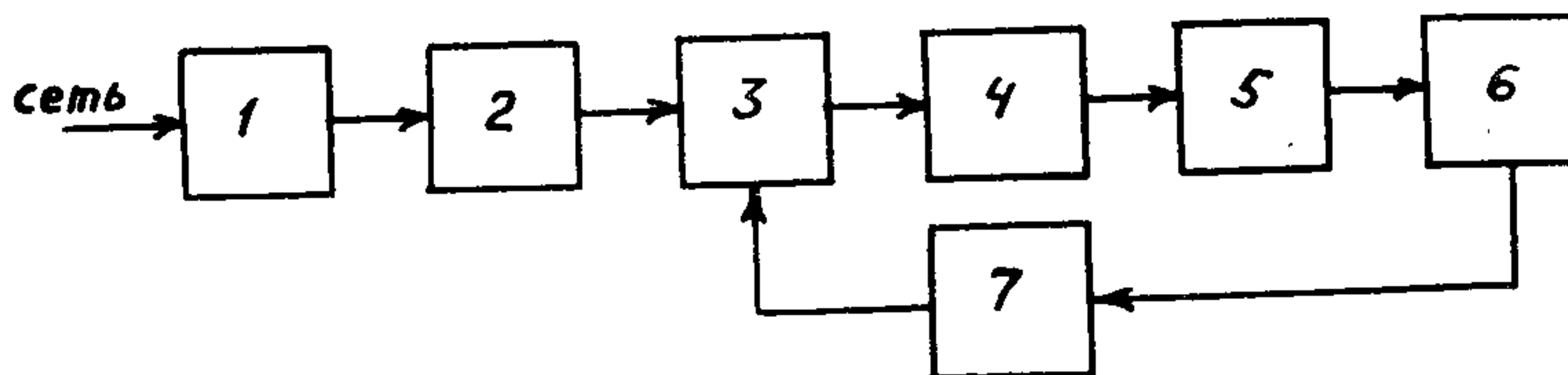


Рис. 2.3. Блок-схема ИП с трансформатором во вторичной цепи: 1 - выпрямитель, 2 - сглаживающий фильтр, 3 - высокочастотный преобразователь, 4 - трансформатор, 5 - выпрямитель, 6 - сглаживающий фильтр, 7 - устройство управления

В этом ИП выпрямленное и сглаженное сетевое напряжение (около 300 В) преобразуется в высокочастотное переменное (обычно

20-30 кГц), которое понижается трансформатором, выпрямляется и сглаживается. Управление величиной выходного напряжения чаще всего осуществляется изменением формы высокочастотного напряжения.

Несмотря на очевидную сложность, этот ИП обладает преимуществами перед классической схемой: размеры и масса высокочастотного трансформатора при той же передаваемой мощности в десятки раз меньше, чем низкочастотного, а по величине КПД такой источник значительно превосходит "классические" схемы. Использование источников подобного типа весьма перспективно в массовой аппаратуре: телевизорах, ЭВМ и т.п., ибо в масштабах страны это ведет к значительной экономии электроэнергии.

Однако разработка ИП с высокочастотным преобразованием является задачей сложной, поэтому при необходимости их использования целесообразно применять готовые устройства или собирать проверенные, хорошо зарекомендовавшие себя схемы.

3. ПАРАМЕТРЫ СЕТЕВЫХ ИСТОЧНИКОВ ПИТАНИЯ

Для расчета ИП необходимо задать параметры, которые он должен обеспечивать:

$U_{0 \text{ вых}}$ - номинальная величина выходного напряжения ИП.
 $I_{0 \text{ вых}}$ - значение тока, потребляемого от ИП.

Поскольку ИП не является идеальным прибором, ему присущи пульсации - периодические изменения напряжения, а также нестабильность - однозначное изменение напряжения за заданным промежутком времени. Величина пульсаций напряжения описывается амплитудой

$$\Delta U_{0 \text{ вых}} = (U_{0 \text{ макс}} - U_{0 \text{ мин}}) / 2$$

или относительной амплитудой

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{0 \text{ макс}} - U_{0 \text{ мин}}}{U_{0 \text{ макс}} + U_{0 \text{ мин}}} = \frac{\Delta U_0}{2 U_0}, \quad (3.1)$$

называемой коэффициентом пульсаций по напряжению.

Нестабильность выходного напряжения ИП определяется целым рядом факторов - колебаниями напряжения питающей сети, температурной зависимостью параметров отдельных элементов ИП, изменением характеристик нагрузки и т.д. По этой причине нестабильность ИП обычно характеризуют, перечисляя параметры, описывающие влияние различных факторов на величину $U_{0 \text{ вых}}$, например:

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх мин}} \div U_{\text{вх макс}}$$

- диапазон входных напряжений ИП, в котором он обеспечивает заданные характеристики работы;

коэффициент стабилизации по напряжению

$$K_{\text{ст}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}} : \frac{\Delta U_{0 \text{ вых}}}{U_{0 \text{ вых}}} = \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{\Delta U_{0 \text{ вых}}} \cdot \frac{U_{0 \text{ вых}}}{U_{\text{вх}}}, \quad (3.2)$$

где чертой обозначены средние значения величин. $K_{\text{ст}}$ показывает, во сколько раз относительное изменение напряжения на выходе ИП меньше, чем относительное изменение на входе.

Пример: При изменении напряжения сети на 10% напряжение на выходе ИП изменяется только на 1%. Из формулы (3.2) следует $K_{\text{ст}}=10$.

Температурный коэффициент напряжения

$$TKH = \frac{\Delta U_{0 \text{ вых}}}{U_{0 \text{ вых}}} \cdot \frac{1}{T} \quad (3.4)$$

определяет влияние температуры на величину $U_{0 \text{ вых}}$.

Влияние изменения сопротивления нагрузки на $U_{0 \text{ вых}}$ описывается величиной выходного сопротивления ИП:

$$R_{\text{вых}} = \frac{\Delta U_{0 \text{ вых}}}{\Delta I_{0 \text{ вых}}}, \quad (3.5)$$

где $\Delta U_{0 \text{ вых}}$ - изменение напряжения на выходе ИП, вызванное изменением выходного тока $I_{0 \text{ вых}}$.

У идеального источника напряжения $R_{\text{вых}} = 0$. Если же нас интересует ИП, стабилизирующий в нагрузке ток, а не напряжение (стабилизатор тока), то для такого идеального источника, как следует из (3.5), $R_{\text{вых}} = \infty$.

При проектировании ИП главное - разумный выбор его параметров, что позволяет избежать значительных усложнений схемы, по существу не влияющих на работу питаемого устройства. Например, при работе прибора от городской сети 220 В вовсе не обязательно требовать работоспособности ИП в диапазоне 180 + 260 В, вполне достаточно 200 + 240 В. Для работы усилителя мощности НЧ подходит значение $K_{\text{п}} = 0,01$. Если же УНЧ требует меньшего значения $K_{\text{п}}$, то следует подумать, так ли он хорош, чтобы делать для него столь сложный ИП. Для питания цифровых микросхем допустимо изменение напряжения питания $\pm 5\%$, поэтому нет никакого смысла добиваться $K_{\text{п}} = 0,02$ и т.д.

Таким образом, для расчета ИП необходимо задать параметры: $I_{0 \text{ вых}}$, $U_{0 \text{ вых}}$, $K_{\text{п}}$ (или $\Delta U_{0 \text{ вых}}$). В тех случаях, когда существенна стабильность напряжения питания, дополнительно

задает диапазон изменения напряжения сети и коэффициент стабилизации $K_{ст}$.

ВОПРОСЫ

1. У вас есть выпрямитель, но неизвестно, где "плюс", а где "минус". Как определить? Предложите не менее трех способов.

2. Выпрямитель при номинальном напряжении сети 220 В дает напряжение $U_{0\text{ вых}} = 10$ В. Сколько вольт будет на выходе выпрямителя, если напряжение сети возрастет на 11 В?

3. Имеется некий источник питания, дающий при номинальном напряжении сети 220 В $U_{0\text{ вых}} = 10$ В. Что вы можете сказать об его устройстве, если при увеличении напряжения сети на 22 В его $U_{0\text{ вых}}$

- а) возрастает на 1 В?
- б) изменяется не более чем на 1 мВ?
- в) возрастает на 0,2 В?
- г) падает на 0,2 В?
- д) возрастает на 2 В?

Вычислите в каждом случае $K_{ст}$.

4. Почему КИД ИП с трансформатором во вторичной цепи значительно превосходит КИД "классических" стабилизаторов напряжения?

5. Почему ИП с трансформатором во вторичной цепи начинают применяться только последнее время? Что этому мешало раньше?

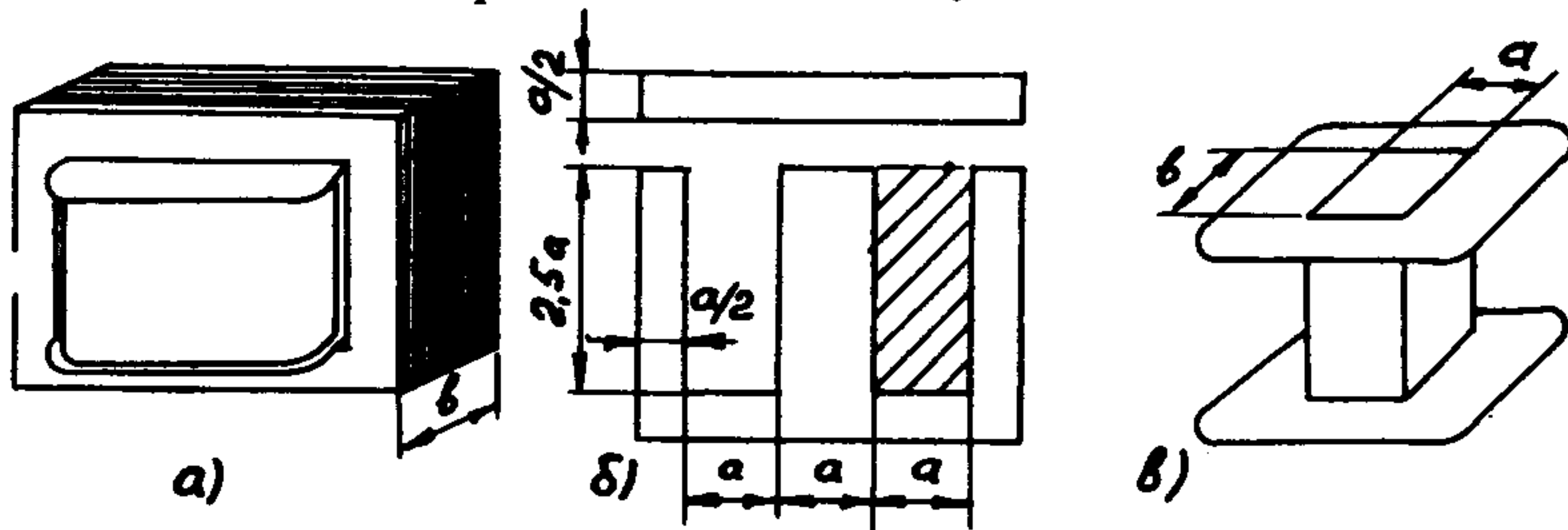
4. Т Р А Н С Ф О Р М А Т О Р Ы

Силовой трансформатор (т.е. трансформатор источника питания) состоит из ферромагнитного сердечника (магнитопровода) и обмоток. Обмотка, включаемая в сеть, называется первичной, а все остальные - вторичными.

Среди многих типов магнитопроводов [1] в лабораторной практике чаще всего используют так называемые броневые сердечники, что связано с простотой расчета и изготовления трансформаторов на сердечниках этого типа.

Подробно о работе трансформатора можно прочитать в учебнике [2] или методическом пособии [3].

Сердечник такого трансформатора (рис. 4.1.) собирается из Ш-образных пластин электротехнической стали.



4.1. Трансформатор с бронзовым магнитопроводом:

а) внешний вид, б) пластина сердечника, в) каркас обмоток трансформатора

Бронзовые сердечники обозначаются буквой Ш и двумя цифрами: Шахв, где а - ширина центральной части пластины, в - толщина набора в миллиметрах. Например, Ш16х20 обозначает сердечник с параметрами а=16, в=20 мм. Центральная часть сердечника, находящаяся внутри обмоток, называется керном. Площадь керна $S_K = a \cdot b$

4.1. Упрощенный расчет трансформатора

Расчет трансформатора сводится к выбору магнитопровода, определению числа витков и диаметров проводов в обмотках. Для трансформаторов малой мощности (≤ 100 Вт) существуют простые и достаточно точные соотношения, определяющие эти величины.

Габаритная мощность трансформатора и площадь керна связаны формулой

$$S_K (\text{см}^2) = \sqrt{P_r (\text{Вт})}. \quad (4.1)$$

Число витков на 1 Вольт

$$e_1 = 45 / S_K (\text{см}^2). \quad (4.2)$$

Число витков в первичной обмотке

$$N_1 = e_1 U_1. \quad (4.3)$$

Число витков во вторичной обмотке

$$N_2 = 1,05 e_1 U_2. \quad (4.4)$$

Диаметры проводов определяются по формуле

$$d (\text{мм}) = \sqrt{\frac{4I}{\pi \Delta}},$$

где I - ток в обмотке, Δ - максимально допустимая плотность тока в проводе.

Для трансформаторов, работающих при температуре до 60° , можно принять $\Delta = 2,5 \text{ A/mm}^2$, тогда диаметры проводов в обмотках равны:

$$\begin{aligned} d_1 (\text{мм}) &= 0,8 \sqrt{I_1 (\text{А})} \\ d_2 (\text{мм}) &= 0,7 \sqrt{I_2 (\text{А})} \end{aligned} \quad (4.5)$$

Расчет удобно проводить в следующей последовательности.

1) Определение габаритной мощности P_r .

$$P_r = (\sum P_{ir}) / \eta, \quad (4.6)$$

где $\sum P_{ir}$ - сумма габаритных мощностей в каждой из вторичных обмоток, η - КПД.

Габаритная мощность в каждой из вторичных обмоток

$$P_{ir} = I_i U_i K, \quad (4.7)$$

где I_i , U_i - ток и напряжение в обмотке, K - коэффициент, определяемый типом применяемого выпрямителя (см. табл. 5.2).

$K=3,1$ для однополупериодного выпрямителя; $1,2I$ - для мостового и т.д.

Вычислив $\sum P_{ir}$, по графику (рис. 4.2) находят η и вычисляют P_r .

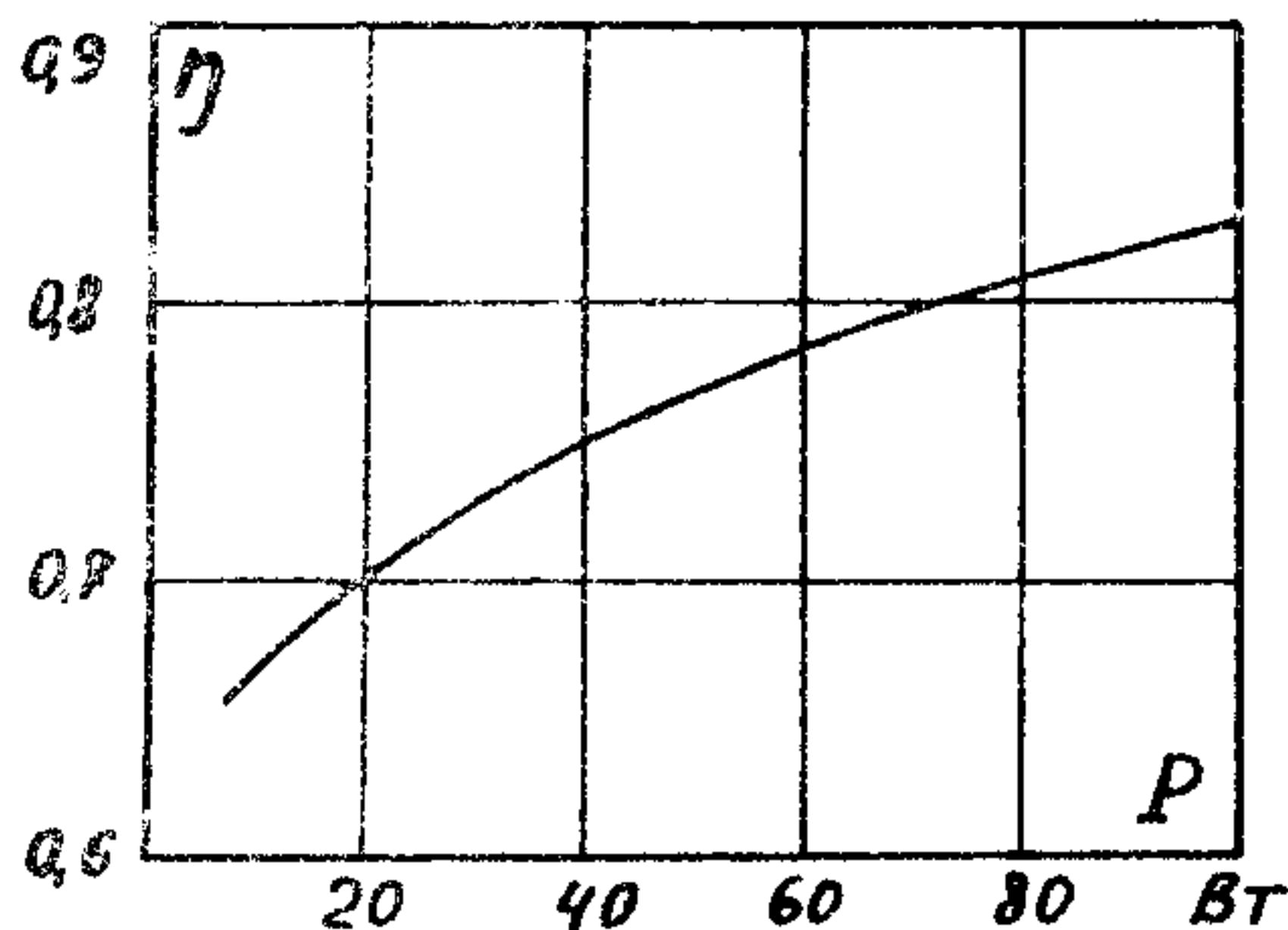


Рис. 4.2. КПД трансформатора малой мощности с броневым сердечником

2) Выбор магнитопровода.

По формуле (4.1) вычисляем S_K . Из имеющихся в наличии пластин подбираем сердечник, такой, чтобы при площади керна не менее S_K , соблюдалось соотношение $b/a \geq 1,2$. При $b/a < 1,2$ у

трансформатора велико поле рассеяния, а при $v/a < 2$ обмотка может не поместиться в "окно" сердечника.

3) Число витков и диаметр провода обмоток трансформатора определяем по формулам (4.3), (4.4), (4.5).

4) Расчет на вместимость.

Вычисляем площадь сечения обмоток

$$S_{обм} = \sum d_i^2 N_i$$
 , где d_i, N_i - диаметр и число витков обмотки с номером i .

Определяем коэффициент заполнения $Q = S_{обм} / S_0$, где S_0 - площадь "окна" сердечника (заштриховано на рис. 4.1,б).

При $Q < 0,5$ обмотки заведомо поместятся в "окне" сердечника. Если $Q \approx 0,7$, то они могут поместиться лишь при весьма квалифицированной намотке. При $Q > 0,7$ следует выбрать другой магнитопровод с большей площадью "окна".

Описанный метод расчета можно применять и при использовании сердечников других типов (тороидальных, стержневых и т.п.). При этом число витков в обмотках и диаметр их провода получаются несколько завышенными, а расчетная габаритная мощность - ниже, чем реальная габаритная мощность, с которой может работать сердечник. Однако по ряду причин [4] в большинстве случаев такое расхождение является благоприятным фактором.

При необходимости точные, но значительно более сложные формулы расчета трансформаторов можно найти в [1].

Весьма целесообразным является применение тороидальных сердечников. При такой же мощности, что и трансформаторы с броневыми сердечниками, они имеют меньший вес и габариты, отличаются лучшими условиями охлаждения обмоток, большим КПД. Кроме того, поле рассеяния таких сердечников очень мало и в большинстве случаев экранировка их не требуется.

Для расчета тороидальных трансформаторов удобно пользоваться табл. 4.1 [5].

При расчете, вычислив P_r по формулам, приведенным в табл. 4.1, определяют S_k - площадь сечения сердечника. Затем, подобрав сердечник с площадью сечения не менее вычисленной, находят

$N_1 = e_1 U_1$ и $N_2 = 1,03 e_1 U_2$. Диаметры проводов определяют по формулам $d_1(\text{мм}) = 1,25 \sqrt{I_1 / \Delta}$; $d_2(\text{мм}) = 1,13 \sqrt{I_2 / \Delta}$.

Таблица 4.1

Основные соотношения для расчета тороидальных трансформаторов

P_r , Вт	e_1 , вит./В	S_K , см ²	Δ , А/мм ²	η
< 10	$41/S_K$	$\sqrt{P_r(\text{Вт})}$	4,5	0,8
10 - 30	$36/S_K$	$0,9\sqrt{P_r}$	4,0	0,9
30 - 50	$34/S_K$	$0,83\sqrt{P_r}$	3,5	0,92
50 - 120	$32/S_K$	$0,8\sqrt{P_r}$	3,0	0,95

4.2. Практические рекомендации по изготовлению трансформаторов

1. Каркас трансформатора бронзового типа лучше всего делать из жесткого изоляционного материала - гетинакса, пресспана. Каркасы из мягких материалов типа картона при намотке сминаются, и их невозможно потом надеть на сердечник. Лучше всего зарекомендовала себя конструкция каркаса, приведенная на рис. 4.3.

Перед намоткой трансформатора на готовый каркас наматывают несколько слоев кабельной бумаги.

2. Выводы намоток диаметром не менее 0,5 мм обязательно следует делать мягкими проводниками, иначе они обрываются в самый неподходящий момент.

На выводы проводов большего диаметра надевают тонкую изоляционную трубку. Выводы закрепляют на каркасе с помощью ниток и киперной ленты.

3. Намотку трансформатора производят слоями, виток к витку, следя за тем, чтобы по краям обмоток не происходило западание витков ниже предыдущего слоя.

Между слоями провода желательно делать прокладки из конденсаторной или кабельной бумаги. Это значительно увеличивает надежность трансформатора, если провода ложатся ровно, и ставить витки легче. Если используются провода марок ПЭЛ, ПЭВ-1 или бывшие в

употреблении, то применение прокладок обязательно из-за низкой электрической прочности изоляции этих проводов.

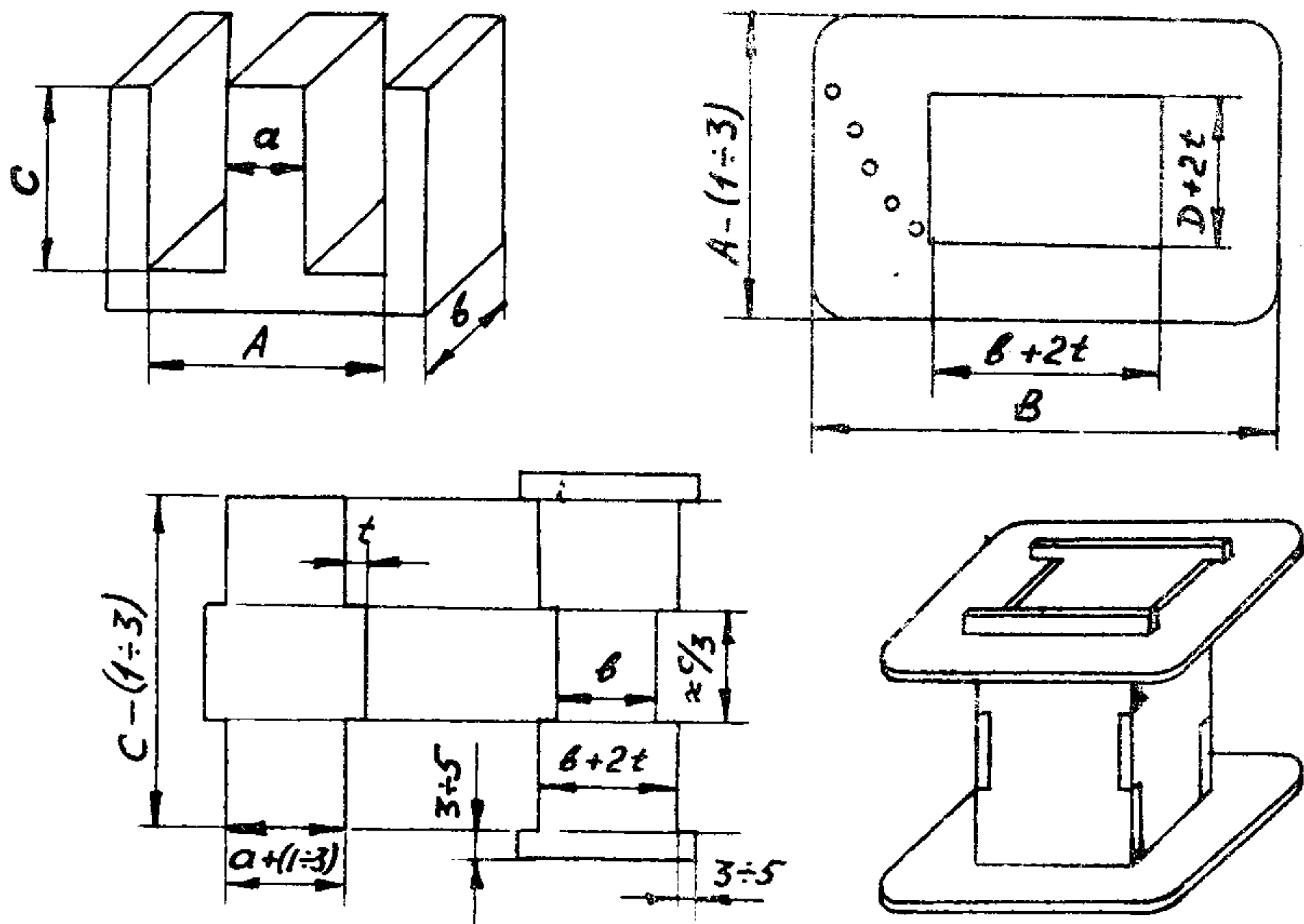


Рис. 4.3. Жесткий каркас трансформатора. Для вывода концов обмоток в боковых щечках каркаса сверлятся отверстия

4. Обмотки тщательно изолируют друг от друга 2-3 слоями кабельной бумаги, а между первичной и вторичными обмотками помещают экран — один слой провода любого диаметра с одним выводом, либо незамкнутый слой из медной фольги с припаянным к нему мягким выводом.

5. Первичную обмотку трансформатора лучше всего мотать первой. Это дает возможность легко изменять параметры вторичных обмоток, не затрагивая первичной обмотки, обычно содержащей самое большое число витков.

6. В изготовленному трансформатору обязательно следует прикрепить этикетку с указанием расположения выводов, числа витков

и диаметра провода. Опыт показывает, что пренебрежение этим простым правилом чревато потерей времени на определение данных "неизвестного" трансформатора.

7. Совершенно недопустимо применение липкой полихлорвиниловой изолянты - при нагреве трансформатора она легко плавится, и, кроме того, из-за плохой теплопроводности ухудшает тепловой режим трансформатора.

8. При намотке тороидального трансформатора сердечник сначала обматывают двумя-тремя слоями лакоткани. Намотку производят с помощью специально изготовленного челнока. Для намотки необходимо применять провод с повышенной механической и электрической прочностью изоляции - марок ПЭЛШО, ПЭВ-2, ПТВЛ, а в качестве изоляции - ленты из лакоткани, фторопласта, стеклоткани или батиста.

4.3. ВОПРОСЫ

6. Имеются две лампы накаливания одинаковой мощности - одна на 12 В, другая на 36 В. Необходимо намотать трансформатор для питания этих ламп. В каком из трансформаторов "окно" сердечника будет заполнено меньше?

7. Можно ли на сердечнике из пластин Ш10 сделать трансформатор мощностью 36 Вт?

8. Имеются два сердечника: Ш30х30 и Ш20х45. На каком из них обмотки будут занимать меньшую часть "окна"?

9. Трансформатор собран на сердечнике Ш20х20, $U_2 = 5$ В. Сколько витков (приблизительно) надо домотать, чтобы получить напряжение 10 В? Каков диаметр этого провода?

10. Первичная обмотка трансформатора имеет отводы, переключая которые, можно менять U_2 от 8 В до 12 В через 1 В. Ток всегда меньше 5 А. $U_1 = 220$ В. Сделать расчет трансформатора.

11. Трансформатор имеет две вторичные обмотки: 8 В и 4 В. Для того чтобы получить $U_2 = 12$ В, обе обмотки включили последовательно. Однако при измерении напряжения вольтметр показал $U_2 = 4$ В. В чем тут дело?

12. Первичная и вторичная обмотки трансформатора имеют равное число витков одинакового диаметра. Концы вторичной обмотки

замкнуты накоротко. Какая из обмоток при включении в сеть сгорит раньше - вторичная или первичная?

13. При включении трансформатора, рассчитанного на напряжение 127 В в сеть 220, первичная обмотка обычно сгорает. Как надо рассчитать трансформатор, чтобы описываемое включение не вывело трансформатор из строя?

14. Известно, что трансформатор имеет 3 обмотки: первичную $U_1 = 220$ В и две вторичные $U_2 = 6,3$ В, $I_2 = 3$ А и $U_3 = 220$ В, $I_3 = 0,1$ А. К каким обмоткам относятся выводы трансформатора - неизвестно. Как определить, где какая обмотка?

15. Сердечник трансформатора $\Pi 16 \times 16$, $U_1 = 220$ В. Рассчитать максимальное напряжение во вторичной обмотке при условии использования всей мощности, какую позволяет получить сердечник. Минимальный диаметр используемого провода - 0,05 мм.

5. В Ы П Р Я М И Т Е Л И

Выпрямитель - это электрическая схема, предназначенная для преобразования переменного напряжения в постоянное. Выпрямитель всегда содержит элемент с нелинейной вольт-амперной характеристикой (ВАХ). В результате воздействия на этот элемент гармонического переменного напряжения ток, текущий через него, становится негармоническим и может быть представлен как сумма постоянной составляющей и гармоник:

$$I = I_0 + \sum_{k=1}^{\infty} I_k \sin(k\omega t) . \quad (5.1)$$

Если $I_0 \neq 0$, то такой ток называется пульсирующим. Устанавливаемый после выпрямителя сглаживающий фильтр уменьшает амплитуды гармонических составляющих, уменьшая тем самым величину пульсаций.

Таким образом, функция выпрямителя состоит в том, чтобы исказить форму тока так, чтобы величина тока I_0 была максимально большой по сравнению с I_k . Нелинейные элементы, с помощью которых эта задача решается наилучшим образом, называются вентильми. В качестве вентилей могут быть использованы полупроводниковые приборы (диоды, тринисторы, транзисторы), электро-

вакуумные (диоды, радиолампы), газозарядные (тиратроны, газотроны и т.д.).

Если ВАХ вентилля в процессе выпрямления можно изменять (например, используя в качестве вентилля тринистор или тиратрон), меняя тем самым величину постоянной составляющей тока, то такой выпрямитель называется управляемым.

Выпрямители можно классифицировать

- по типу вентилля - диодные, тринисторные, кенотронные, газотронные и т.д.;
- по схеме выпрямления - одно- и многофазные, однотактные и двухтактные, с умножением напряжения;
- по виду нагрузки на выпрямитель - активная, емкостная, индуктивная нагрузка.

Для питания аппаратуры малой мощности (до 100 Вт) и средней мощности (до 500 Вт) в настоящее время используются выпрямители на полупроводниковых диодах.

5.1. Полупроводниковые выпрямительные диоды

Вольт-амперная характеристика идеального диода показана на рис. 5.1, а. При $U < 0$ он не пропускает ток, при $U > 0$ его сопротивление равно 0.

ВАХ полупроводниковых диодов (рис. 5.1, б) отличается от идеальной: при $U < 0$ через диод идет так называемый обратный ток, (прикладываемое при этом к диоду напряжение $U < 0$ называется обратным), а при $U > 0$ зависимость $I(U)$ нелинейна.

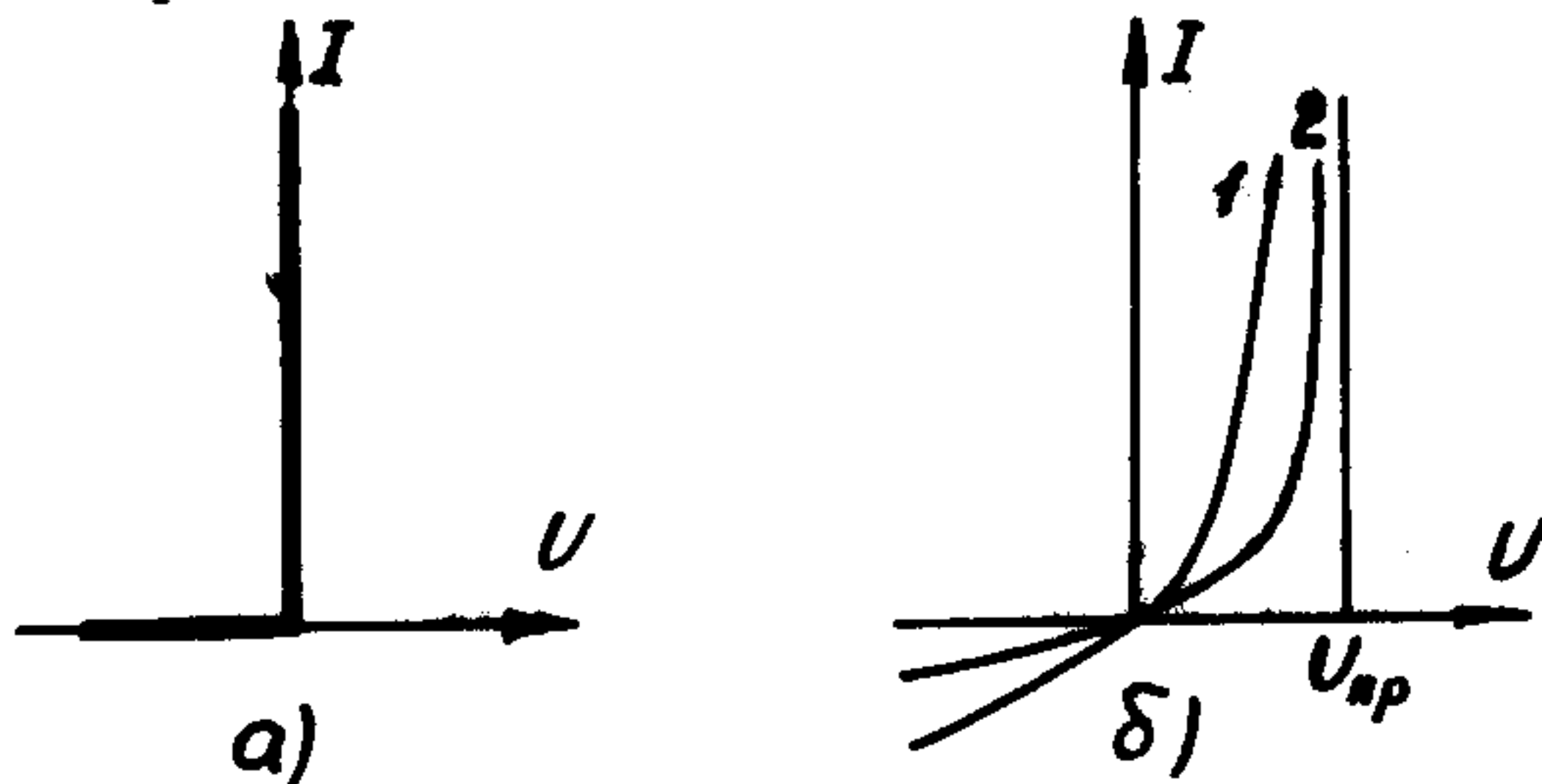


Рис. 5.1. а) ВАХ идеального вентилля, б) ВАХ полупроводникового диода: 1 - германиевого, 2 - кремниевого

Основными электрическими параметрами полупроводниковых выпрямительных диодов являются

- максимально допустимая амплитуда обратного напряжения $U_{обр. макс}$;
- максимально допустимое среднее значение выпрямленного тока $I_{ср. макс}$;
- прямое падение напряжения на диоде $U_{пр}$, измеренное при постоянном токе, равном $I_{ср. макс}$;
- максимальная рабочая частота $f_{макс}$.

Превышение первых двух из перечисленных параметров ведет к необратимым изменениям в диоде и нарушению его работоспособности.

Прямое падение напряжения $U_{пр}$ для большинства германиевых диодов составляет 0,5 В, а для кремниевых - около 1 В и мало зависит от величины протекающего тока.

Параметры диодов существенно меняются с температурой - с увеличением температуры численные значения всех перечисленных параметров уменьшаются. Параметры кремниевых диодов зависят от температуры в значительно меньшей степени, чем германиевых.

Диоды обозначаются с помощью буквенно-цифрового кода.

Первый элемент кода - буква или цифра - обозначает исходный материал вентиля:

Г или I - германий,

К или 2 - кремний.

Второй элемент - буква Д обозначает, что полупроводниковый прибор является диодом.

Третий элемент - цифра:

1 - для выпрямительных диодов со средним значением выпрямленного тока не более 0,3 А;

2 - для выпрямительных диодов со средним значением выпрямленного тока от 0,3 до 10 А.

Четвертый, пятый, шестой элементы - двух- или трехзначное число, обозначающее порядковый номер разработки.

Седьмой элемент - буква определяет классификацию прибора по параметрам для данной технологии его изготовления.

Пример: КД213А - кремниевый выпрямительный диод со средним выпрямленным током более 0,3 А.

Внутри корпуса полупроводникового прибора может быть собрана

схема, состоящая из нескольких выпрямительных диодов. В этом случае второй элемент обозначения - буква Ц, третий элемент определяет разновидность схемы.

Пример: КЦ405А - кремниевый выпрямительный мост.

В табл. 5.1 приведены параметры выпрямительных диодов наиболее часто используемых при конструировании выпрямителей.

5.2. Однополупериодный выпрямитель

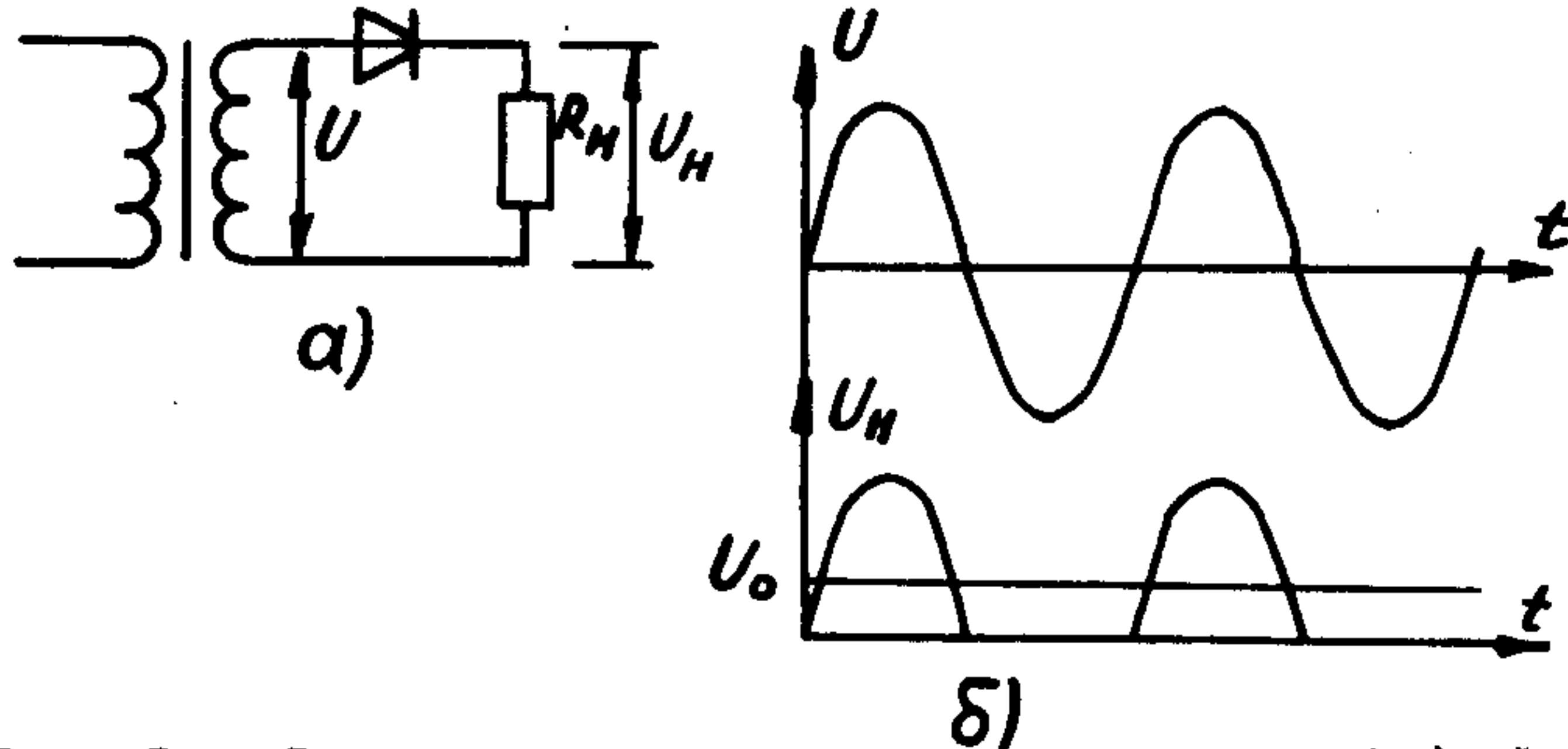


Рис. 5.2. Схема однополупериодного выпрямителя (а), форма напряжений на входе и на нагрузке (б)

Схема однополупериодного выпрямителя приведена на рис. 5.2, а. Пусть напряжение на вторичной обмотке трансформатора $U = U_M \sin \omega t$. Тогда, если считать сопротивление обмотки трансформатора малым по сравнению с R_H , а диод - близким к идеальному (а на практике именно так и бывает), то в те моменты времени, когда $U > 0$, ток через диод равен U/R_H и равен нулю при $U < 0$. В соответствии с этим величина напряжения на нагрузке изменяется, как показано на рис. 5.2, б. Приблизительно такую зависимость можно представить в виде ряда

$$U_H(t) = U_M \left(\frac{1}{\pi} + \frac{1}{2} \sin \omega t + \frac{3}{2\pi} \sin 2\omega t + \dots \right) = (5.2) \\ \approx U_M (0,32 + 0,5 \sin \omega t + 0,21 \sin 2\omega t + \dots).$$

Коэффициент пульсации определяется в нашем случае в основном первой гармоникой (она имеет наибольшую амплитуду):

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\sim}}{U_0} = \frac{0,5}{0,32} \approx 1,57. \quad (5.3)$$

Таблица 5.1

Основные параметры диодов при $T = 298^{\circ}\text{K}$

Обозначение	$U_{\text{обр. макс,}}$ В	$I_{\text{ср. макс,}}$ А	$U_{\text{пр,}}$ В	$f_{\text{макс,}}$ кГц
КД102А	250	0,1	1,0	100
Б	350	—	—	—
КД105Б	400	0,3	1,0	1,0
В	600	—	—	—
Г	800	—	—	—
КД202А	50	5,0*	1,0	1,2
В	100	—	—	—
Д	200	—	—	—
И	300	—	—	—
К	400	—	—	—
М	500	—	—	—
Р	600	—	—	—
КД208А	100	1,5	1,0	1,0
КД209А	400	0,7	1,0	1,0
Б	600	0,5	—	—
В	800	0,5	—	—
КД212А	200	1,0	1,0	100
Б	100	—	—	—
КД213А	200	3,0*	1,0	100
Б	200	1,0	—	—
В	100	3,0	—	—
Г	100	1,0	—	—
КЦ405А	600	1,0	4,0	5,0
Б	500	—	—	—
В	400	—	—	—
КЦ407А	300	0,5	2,5	20,0

* С теплоотводом

5.3. Двухполупериодный выпрямитель

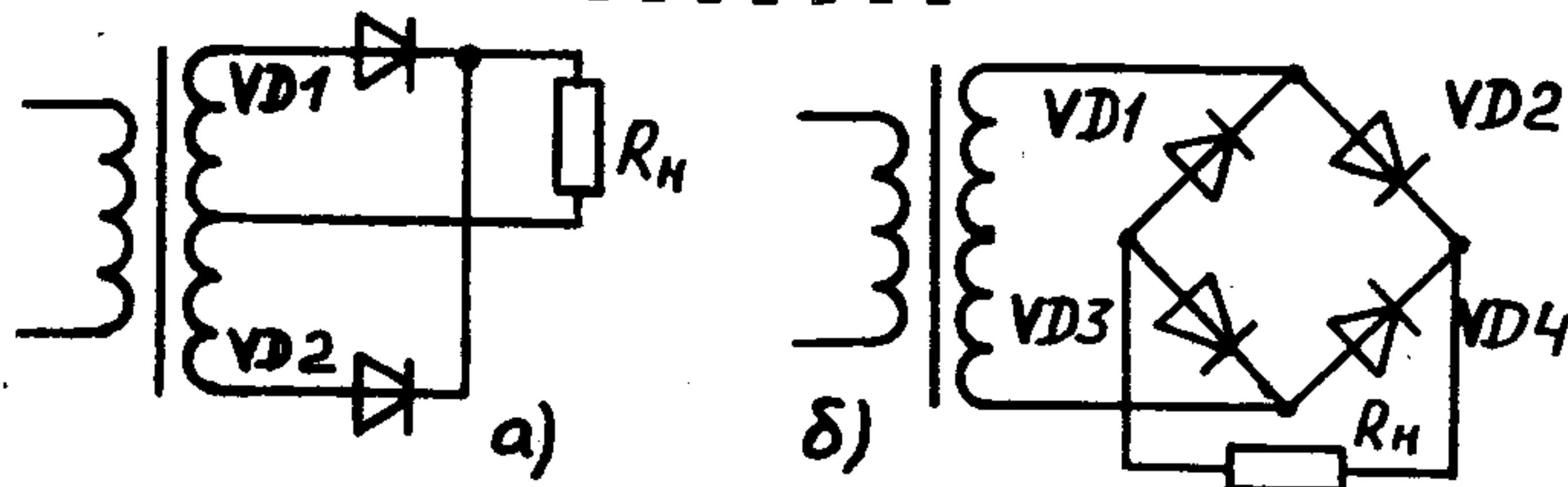


Рис. 5.3. Схемы двухполупериодных выпрямителей:
а) двухфазная; б) мостовая

Схемы двухполупериодных выпрямителей приведены на рис. 5.3. Двухфазную схему можно рассматривать как комбинацию двух однополупериодных схем, работающих на общую нагрузку. При этом диоды \$VD1\$ и \$VD2\$ проводят ток в каждый из полупериодов входного напряжения поочередно. В мостовой схеме в течение одного полупериода проводят ток диоды \$VD2, VD3\$, в течение другого — \$VD1, VD4\$. Форма напряжения на нагрузке имеет вид, представленный на рис. 5.4.

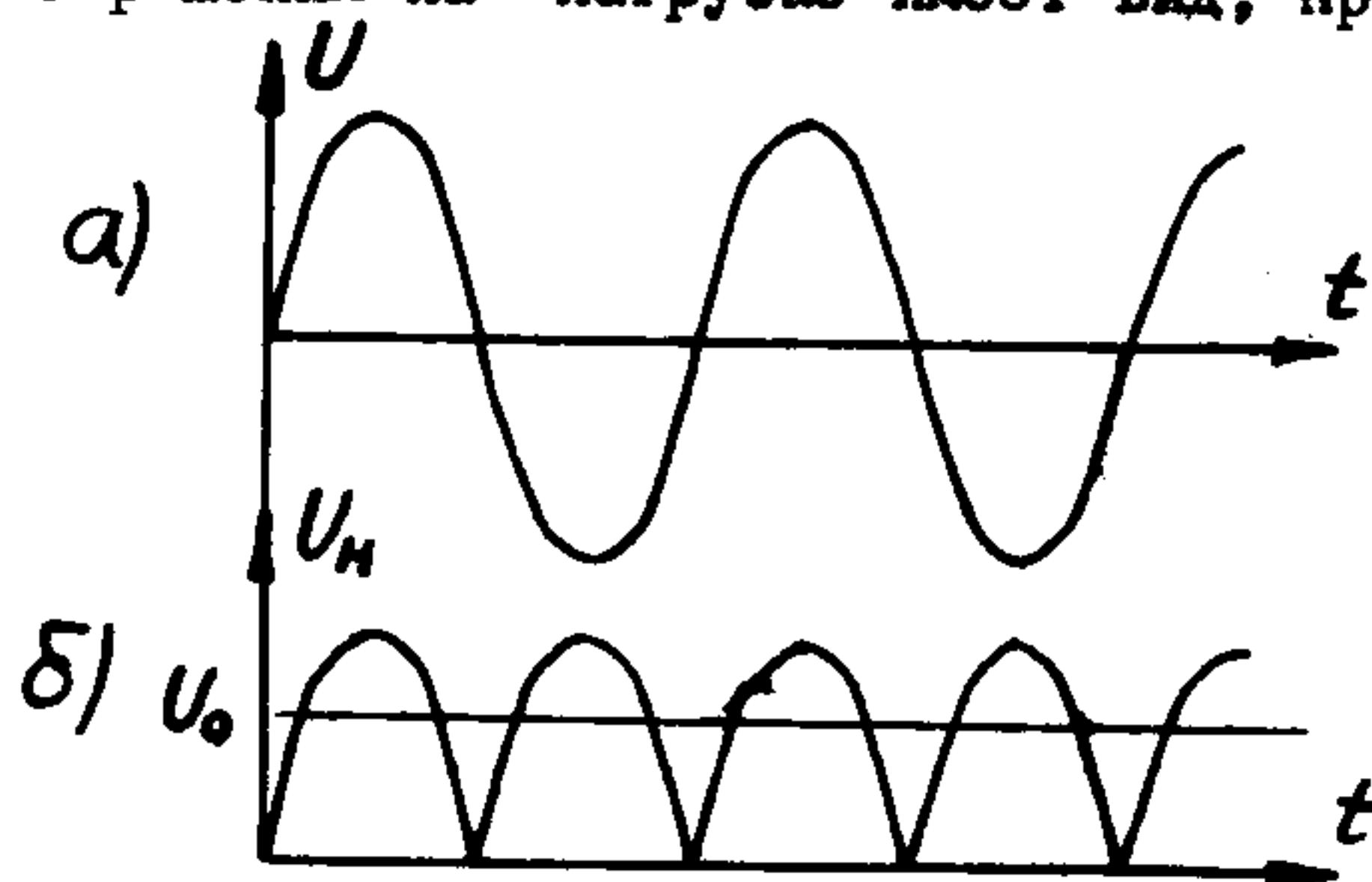


Рис. 5.4. Форма напряжения на входе (а) и на нагрузке (б) двухполупериодного выпрямителя

В этом случае зависимость $U_H(t)$ выражается рядом

$$U_H(t) = U_M \left(\frac{2}{\pi} + \frac{4}{3\pi} \sin 2\omega t + \frac{4}{15\pi} \sin 4\omega t + \dots \right) \approx U_M (0,64 + 0,43 \sin 2\omega t + 0,085 \sin 4\omega t + \dots), \quad (5.4)$$

т.е. амплитуда постоянной составляющей в 2 раза выше по сравнению с однополупериодной схемой, а пульсации определяются в основном второй гармоникой, которая подавляется фильтрами сильнее, чем первая. Эти два преимущества и обуславливают значительно более широкое распространение двухполупериодных схем по сравнению с одно-

полупериодными. Коэффициент пульсаций выпрямителя

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\sim}}{U_0} \approx \frac{U_2}{U_0} = \frac{0,43}{0,64} = 0,67. \quad (5.5)$$

В схемах часто используют упрощенное изображение диодного моста (рис. 2.2), эквивалентное схеме на рис. 5.3, б.

5.4. Многофазные выпрямители

При питании аппаратуры от трехфазной сети весьма выгодным является использование трех- и шестифазных выпрямителей, схемы которых приведены на рис. 5.5.

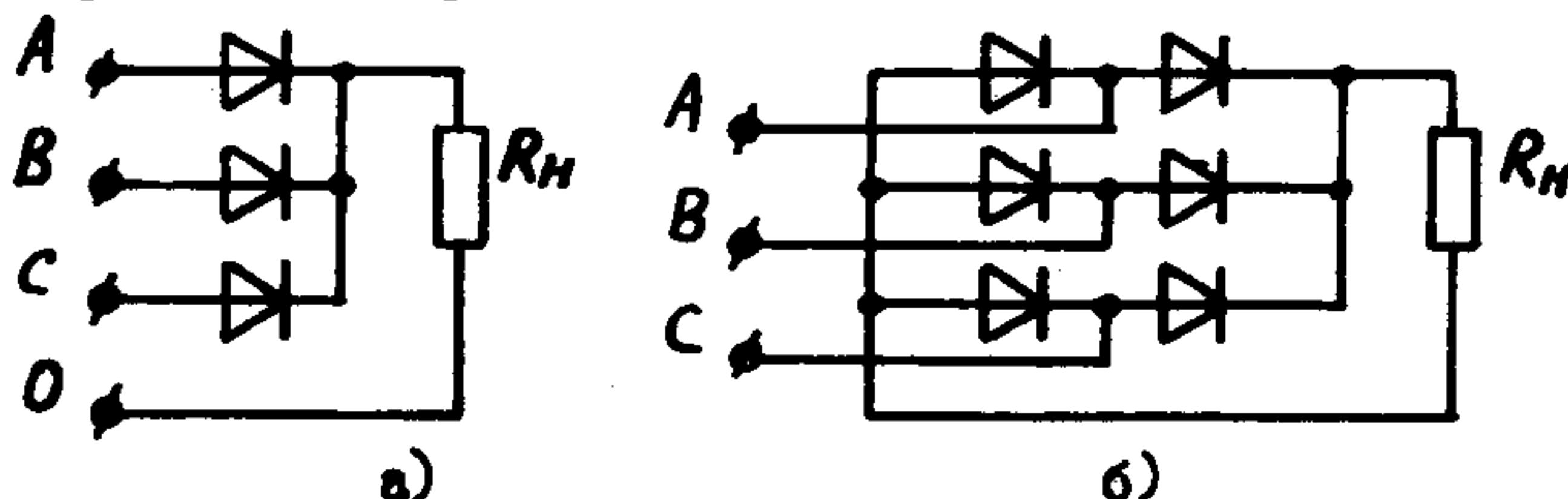


Рис. 5.5. Схемы трехфазного и шестифазного выпрямителей

Характерные для этих схем малые пульсации (табл. 5.2) позволяют использовать их в ряде случаев без сглаживающих фильтров. Подробный анализ многофазных выпрямительных схем можно найти в [1, 6].

5.5. ВОПРОСЫ

I6. В каком трансформаторе (при одинаковых параметрах выпрямленного тока) вторичная обмотка занимает меньше места — для схемы рис. 5.3, а или 5.3, б?

I7. Можно ли заземлять какую-либо из выходных клемм бестрансформаторного сетевого выпрямителя?

I8. Многофазные выпрямители (рис. 5.5) даже без фильтра должны давать небольшую величину коэффициента пульсаций (см. табл. 5.2). Однако на практике он часто оказывается значительно выше. Почему?

I9. При коротком замыкании в цепи нагрузки мостового выпрямителя диоды сгорают всегда парами. Почему?

Характеристики выпрямителей

Таблица 5.2

Параметр	Схема				
	Однополу- периодный	Двухполу- периодный мостовой	Двухполу- периодный двухфазный	Трех- фазный	Шести- фазный
Постоянная составляющая напряжения U_0	$0,32 U_M$	$0,64 U_M$	$0,64 U_M$	$0,83^* U_{мф}$	$1,65 U_{мл}^{**}$
Частота пульсаций ω_p	ω	2ω	2ω	3ω	6ω
Коэффициент пульсаций K_p	1,57	0,67	0,67	0,25	0,157
Средний ток через вентиль	$1,57 I_0$	$0,78 I_0$	$0,78 I_0$	$0,58 I_0$	$0,38 I_0$
Расчетная мощность трансформатора P_r	$3,1 P_0$	$1,21 P_0$	$1,48 P_0$	$1,35 P_0$	$1,05 P_0$

* $U_{мф}$ — амплитуда фазного напряжения, т.е. амплитуда напряжения между "нулем" и фазным проводом.

** $U_{мл}$ — амплитуда линейного напряжения, т.е. напряжения между линиями фаз.

6. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Для уменьшения пульсаций напряжения применяются сглаживающие фильтры. Идеальный сглаживающий фильтр, не изменяя величину постое-

янной составляющей напряжения U_0 , должен уменьшать амплитуду переменных составляющих до нуля. Для характеристики реальных фильтров вводят коэффициент сглаживания:

$$K_{\text{сгл.}} = \frac{K_{\Pi}}{K'_{\Pi}}, \quad (6.1)$$

где K_{Π} - коэффициент пульсаций до фильтра, K'_{Π} - после фильтра.

Сглаживающие фильтры (рис. 6.1.) подразделяются на простые (содержащие один элемент) и сложные - однозвенные, многозвенные, резонансные и др. [1]. Нередко применяются также электронные фильтры, которые по существу представляют разновидность электронных стабилизаторов напряжения.

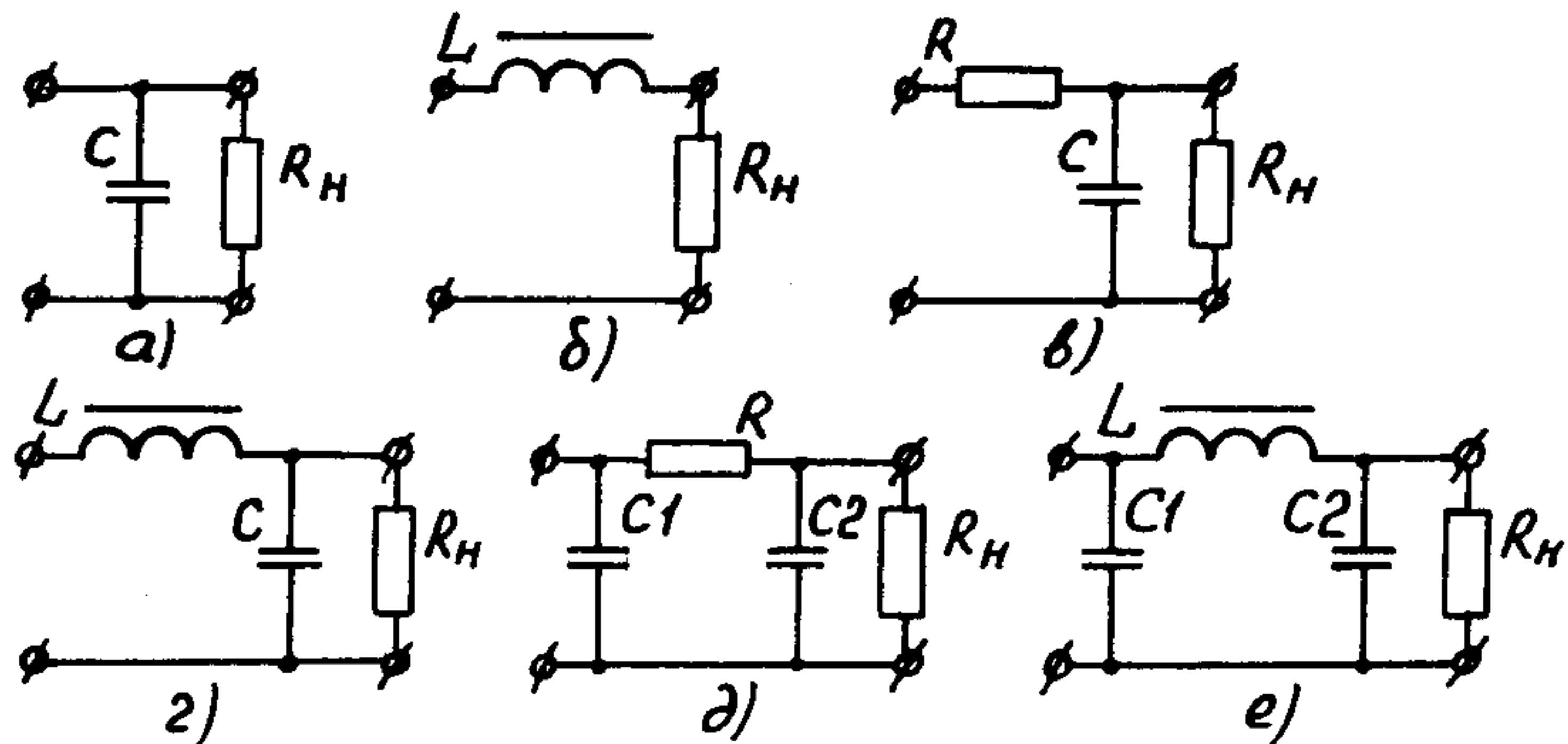


Рис. 6.1. Основные схемы сглаживающих фильтров:

а), б) - простые фильтры - а) емкостной, б) индуктивный;
в), г), д), е) - сложные - в) Г-образный RC , г) Г-образный LC ,
д) П-образный RC , е) П-образный LC

6.1. Простые фильтры

Простейшим и наиболее часто применяемым фильтром является C -фильтр (рис. 6.1, а). Работа фильтра поясняется на рис. 6.2.

Действие такого фильтра сводится к тому, что при повышении напряжения источника питания происходит заряд конденсатора, а при понижении - разряд его через сопротивление нагрузки. Тем самым конденсатор способствует поддержанию напряжения на нагрузке. От источника ток потребляется лишь во время зарядки конденсатора

(рис. 6.2, б), причем, как правило, амплитуда этого тока значительно больше тока нагрузки.

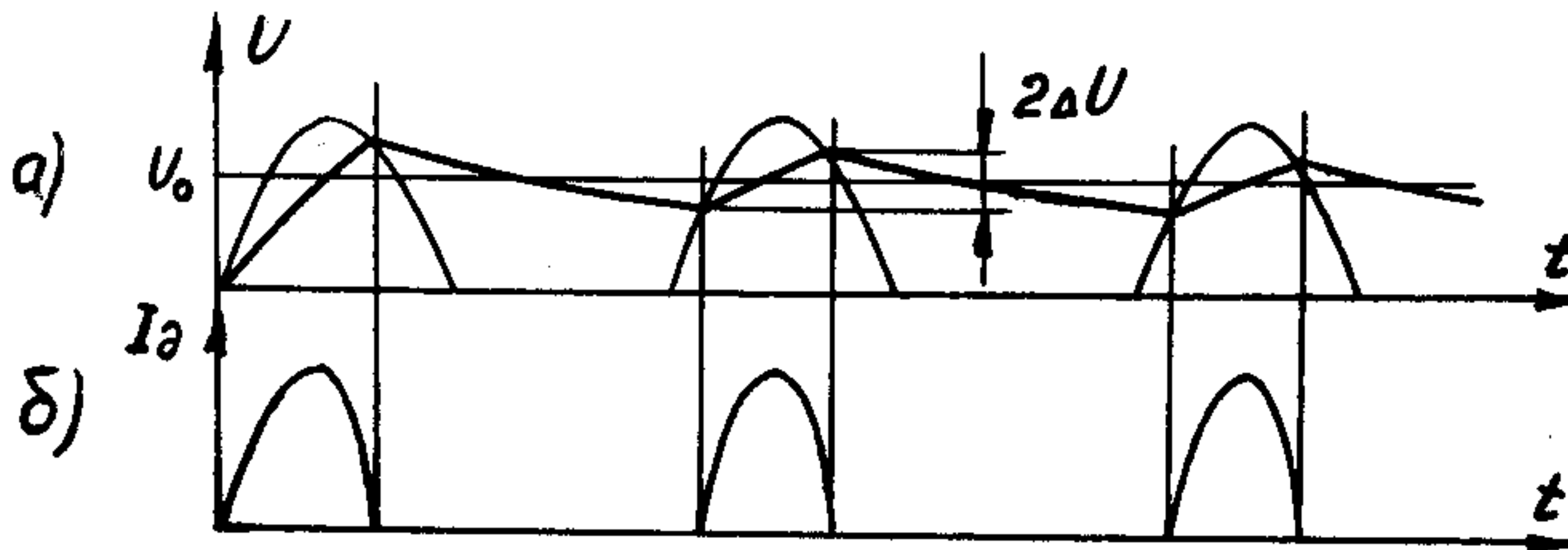


рис. 6.2. Действие С-фильтра на выходе однополупериодного выпрямителя : а - напряжение на выходе выпрямителя, тонкие линии - без фильтра, толстые - с фильтром; б - форма тока через вентиль

Коэффициент пульсаций на выходе С-фильтра легко рассчитать, предположив, что во время заряда напряжение на конденсаторе достигает напряжения, близкого амплитудному U_M , а разряд конденсатора происходит только через сопротивление нагрузки в течение времени, почти равного T - периоду пульсаций на выходе выпрямителя.

Во время разряда напряжение на конденсаторе уменьшается по закону $U_C(t) = U_M e^{-t/RC}$. При $RC \gg T$, разложив экспоненту в ряд, получим $2\Delta U = U_M T/RC$, а так как $T = 1/f$, то

$$\Delta U = \frac{U_M}{2f_n R_H C}, \quad (6.2)$$

где f_n - частота пульсаций на выходе выпрямителя. Поскольку мы предположили $U_0 \approx U_M$, то

$$K_n = \frac{\Delta U}{U_0} = \frac{1}{2f_n R_H C}. \quad (6.3)$$

Учтя тот факт, что $U_M / R_H = I_0$, а величина f_n кратна частоте питающей сети: $f_n = m f$ (m - число "фаз" выпрямления: $m = 1$ для однополупериодного, $m = 2$ для двухполупериодного и т.д.), из формулы (6.2) следует

$$2\Delta U = \frac{I_0}{m f C}, \quad (6.4)$$

где $2\Delta U$ (рис. 6.2, а) - так называемый "размах" пульсаций, величина, которую легко измерить по экрану осциллографа. Если I_0 выразить в миллиамперах, а C - в микрофарадах, то для $f = 50$ Гц

получим формулу

$$2 \Delta U = \frac{20 I (\text{мА})}{m C (\text{мкФ})} \quad (6.5)$$

При использовании этой формулы следует помнить, что она верна при $R_H C \geq 10 T$, например, если выпрямитель однофазный, то пользоваться ею можно при $R C \geq 0,2 \text{ с}$

6.3. Индуктивный фильтр

Индуктивный фильтр (рис. 6.16) состоит из низкочастотного дросселя, включенного между ИП и сопротивлением нагрузки. Переменная составляющая тока через нагрузку

$$I_{\Pi} = \frac{U_{\Pi}}{\sqrt{(R_H + R_{др})^2 + (\omega L)^2}} \quad (6.6)$$

где $R_{др}$ - активное сопротивление дросселя, L - его индуктивность, $\omega = 2\pi m f$. В реальных случаях $R_{др} \ll R_H$, тогда постоянное напряжение после дросселя $U'_0 = U_0$, а переменная составляющая

$$U'_{\Pi} = I_{\Pi} R_H = \frac{U_{\Pi} R_H}{\sqrt{R_H^2 + (2\pi m \omega L)^2}} = \frac{U_{\Pi}}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi m \omega L}{R_H}\right)^2}} \quad (6.7)$$

Коэффициент пульсаций напряжения на нагрузке

$$K_{\Pi} = \frac{U'_{\Pi}}{U'_0} = \frac{U_{\Pi}}{U_0} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{2\pi m \omega L}{R_H}\right)^2}} \quad (6.8)$$

Отсюда

$$K_{сгл} = \sqrt{1 + \left(\frac{2\pi m \omega L}{R_H}\right)^2} \quad (6.9)$$

а поскольку в реальных случаях существенно необходимо, чтобы $K_{сгл} \gg 1$, то единицей под корнем можно пренебречь и тогда

$$K_{сгл} = \frac{2\pi m \omega L}{R_H} \quad (6.8)$$

Для $f = 50 \text{ Гц}$ получим

$$K_{сгл} = \frac{157 m L (\text{Гн})}{R_H (\text{Ом})} \quad (6.9)$$

Из формулы (6.8) следует, что применение L -фильтра эффективно в многофазных схемах выпрямления при небольших значениях R_H .

Существенным недостатком L -фильтра является появление ЭДС

самоиндукции при резком изменении тока нагрузки или обрыве цепи, что в ряде случаев может быть крайне нежелательно.

6.4. Г-образный RC-фильтр

Фильтр этого типа (рис. 6.1, в) является самым распространенным и часто носит название "развязывающаяся цепочка". Для расчета коэффициента сглаживания вычислим комплексный коэффициент передачи фильтра на частоте ω : $K(j\omega) = \dot{Z} / (R + \dot{Z})$, где $\dot{Z}$ - общий импеданс нагрузки и включенного параллельно ей конденсатора. Если $K(j\omega)$ известно, то коэффициент пульсаций после фильтра

$$K'_n = \frac{U'_n}{U_0} = \frac{U_n / K(j\omega)}{U_0 / K(0)} = K_n / \frac{K(j\omega)}{K(0)} = K_n \cdot K_{сгл}, \quad (6.10)$$

Следовательно,

$$K_{сгл} = \left| \frac{K(0)}{K(j\omega)} \right|. \quad (6.11)$$

Для нашего случая легко вычислить, что

$$K(j\omega) = \frac{1}{(1 + R/R_n) + j\omega RC}. \quad (6.12)$$

Поскольку в реальном случае $R \ll R_n$, то подставив (6.12) в (6.11) получим $K_{сгл} = \sqrt{1 + (\omega RC)^2}$, а при $K_{сгл} \gg 1$

$$K_{сгл} \approx \omega RC = 2\pi m f RC. \quad (6.13)$$

Для частоты $f = 50$ Гц

$$K_{сгл} = 0,16 R(\text{кОм}) C(\text{мкФ}). \quad (6.14)$$

Г-образный RC-фильтр целесообразно применять при небольших токах нагрузки ($I_0 \leq 10$ мА) и небольших значениях $K_{сгл}$. При его применении напряжение на нагрузке снижается на величину $\Delta U = I_0 R$, рассеивается значительная тепловая мощность: $W = I_0^2 R$.

При использовании фильтра для развязки отдельных каскадов, питающихся от общего источника, коэффициент сглаживания вычисляют по формуле (6.13), где $\omega = 2\pi f_n$, f_n - наиболее низкая частота усиливаемых сигналов.

6.5. Г-образный LC-фильтр

Для Г-образного фильтра (рис. 6.1, г), как и в предыдущем случае, в результате вычислений получим

Отсюда $K_{сгл} = \sqrt{(1 - \omega^2 LC) + (\omega L/R)^2}$.

Считая, что индуктивное сопротивление дросселя значительно превосходит сопротивление нагрузки и $K_{сгл} \gg 1$, получим

$$K_{сгл} \approx \omega^2 LC \quad (6.14)$$

Если частота сети 50 Гц, то

$$K_{сгл} = 0,025 L(\text{Гн}) C(\text{мкФ}). \quad (6.15)$$

LC-фильтры применяют в тех случаях, когда можно реализовать значительную величину L при малых габаритах катушки, т.е. в случаях небольших токов нагрузки (чаще всего - до нескольких сотен миллиампер). Поскольку $K_{сгл} \sim \omega^2$, то LC-фильтр выгодно применять при повышенной частоте питающей цепи.

6.6. Сложные П-фильтры

Сложные П-фильтры (рис. 6.1, д, е) можно рассматривать как последовательно включенные простые и Г-образные фильтры. В соответствии с этим величина пульсаций на выходе фильтра может быть найдена путем деления величины пульсаций на конденсаторе на $K_{сгл}$ соответствующего Г-фильтра.

При заданной величине суммарной емкости $C_1 + C_2$, как показано в [1], наибольшего коэффициента сглаживания можно достичь, если $C_1 = C_2 = C$. Тогда коэффициент пульсаций на выходе П-образного RC-фильтра

$$K_{\pi} = \frac{\pi}{\omega^2 R R_H C^2} = \frac{\pi}{(2\pi m f)^2 R R_H C^2}, \quad (6.16)$$

А для П-образного LC-фильтра

$$K_{\pi} = \frac{\pi}{\omega^3 L C^2 R_H} = \frac{\pi}{(2\pi m f)^3 L C^2 R_H} \quad (6.17)$$

6.7. Обратное напряжение вентиля

Чтобы вентиль в выпрямительной схеме не вышел из строя, обратное напряжение, прикладываемое к нему (т.е. напряжение такой полярности, когда вентиль не проводит тока), не должно превосходить $U_{обр. макс.}$

При использовании фильтров $U_{обр.}$ может быть значительно больше, чем напряжение на нагрузке. Для иллюстрации этого факта рассмотрим схему однополупериодного выпрямителя с С-фильтром.

На катоде диода, соединенном с R_H (рис. 5.2), благодаря действию фильтра напряжение относительно другого вывода R_H почти не меняется, имеет положительную полярность и величину $U_K \approx +U_M$ (рис. 6.2). Анод диода соединен с трансформатором, и напряжение U_A относительно той же точки схемы изменяется по гармоническому закону $U_A = U_M \sin \omega t$. Обратное напряжение, прикладываемое к диоду $U_{обр} = U_K - U_A$, и при $U_A = -U_M$ достигает максимального значения, равного $2U_M$.

Соотношение $U_{обр} \approx 2U_M$ справедливо для всех выпрямительных схем, представляющих комбинацию однополупериодных: двухполупериодной двухфазной (рис. 5.3, а), трехфазной (рис. 5.5, а) а также схем однополупериодного умножения напряжения.

В отличие от однополупериодных схем в мостовых схемах выпрямления (рис. 5.3, б и 5.5, б), максимальное обратное напряжение диодов не превосходит U_M - амплитуды напряжения от трансформатора.

Таким образом, при использовании однополупериодных схем выпрямления вентили должны иметь $U_{обр. макс} > 2U_M$ и $U_{обр. макс} > U_M$ - во всех остальных случаях.

6.8. ВОПРОСЫ

20. Для нанесения гальванических покрытий необходим источник питания с параметрами: $U_0 = 12В$, $I_0 = 100А$, $K_H = 0,01$. Какой выпрямитель и с каким фильтром предложите вы для такого источника?

21. На выходе двухполупериодного выпрямителя с напряжением $U_0 = 10В$ установлен конденсатор $C = 1мкф$. Размах пульсаций, вычисленный по формуле (6.5), при $I_0 = 20мА$ дает $2\Delta U = 200в$, что гораздо больше напряжения на входе выпрямителя. Так ли это на самом деле?

22. Можно ли использовать диод КД102 в бестрансформаторном однополупериодном выпрямителе, питающемся непосредственно от сети 220В?

23. Можно ли включать полупроводниковые диоды последовательно либо параллельно? Для чего такое включение может быть использовано?

24. Покажите, что в схеме мостового выпрямителя с С-фильтром обратное напряжение диода не превышает амплитудного значения выходного напряжения.

7. ТЕХНИКА БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ КОНСТРУИРОВАНИИ И НАСТРОЙКЕ СЕТЕВЫХ ИИ

При работе с сетевыми источниками питания следует соблюдать все правила техники безопасности общих электротехнических работ. Кроме того, следует соблюдать и некоторые дополнительные простые правила, которые помогут вам избежать многих неприятных моментов в работе.

1. Собрав трансформатор, не забудьте (с помощью омметра) убедиться в отсутствии замыканий между обмотками, а также между обмотками и сердечником трансформатора.

2. Для включения в сеть используйте только двухполюсную штепсельную вилку. Провода, вставленные в розетку, всегда вываливаются из нее в самый неподходящий момент!

3. При первом включении трансформатора в сеть лучше всего использовать лабораторный автотрансформатор и обязательно - плавкий предохранитель! Напряжение, подаваемое на трансформатор, постепенно увеличивайте до рабочего. Если с некоторого напряжения трансформатор резко начинает гудеть и быстро нагревается - значит, число витков в первичной обмотке меньше, чем необходимо, или в трансформаторе есть короткозамкнутые витки.

4. Если при первом включении трансформатора ничего не сгорело, оставьте его включенным на 1-2 часа. Если за это время его сердечник нагреется не более чем до $40+50^{\circ}\text{C}$ - трансформатор вполне работоспособен.

5. Тщательно следите за соблюдением полярности включения электролитических конденсаторов. При неправильном включении они взрываются!

6. Никогда не оставляйте без присмотра источник питания, не проверив его предварительно под нагрузкой в течение нескольких часов. Опыт показывает, что вовремя выключить прибор всегда проще, чем потом заниматься его тушением.

7. Постарайтесь выработать у себя привычку проводить все измерения в схемах, пользуясь только одной рукой. Тем самым вы гарантируете себя от неприятных ощущений при прохождении электрического тока по вашим рукам в случае, если сорвется измерительный щуп.

8. ОТВЕТЫ НА ВОПРОСЫ

2. 10,5 В.

3. а) выпрямитель без стабилизации,

б) очень хороший стабилизатор,

в) стабилизатор, скорее всего параметрический, т.к. $K_{ст}$ невелико,

г) стабилизатор, но не параметрический, т.к. $R_{вых} < 0$.

5. Основная причина - отсутствие высоковольтных коммутирующих элементов, необходимых для преобразования выпрямленного сетевого напряжения в высоковольтное.

II. Обмотки включены навстречу друг другу.

12. При решении учтите, что КПД трансформатора всегда меньше единицы.

13. Необходимо увеличить число витков во всех обмотках в $220/127 \approx 1,73$ раза.

14. Ни в коем случае! Один из проводов сети, так называемый "нулевой", соединен с землей. Поскольку сетевая вилка вставляется в розетку каждый раз по-разному, короткое замыкание неминуемо.

9. ЛИТЕРАТУРА

1. Рогинский В.Ю. Электропитание радиоустройств. М.: Энергия, 1970.

2. Касаткин А.С., Немцов М.В. Электротехника. М.: Энергоатомиздат, 1983.

3. Коротаев Н.Н., Михайловский А.Г. Электротехника: Методические указания к лаб. работам/Перм. ун-т, 1984. Ч. П.

4. Поляков В. Уменьшение поля рассеяния трансформаторов. Радио. 1983. № 7. 28-29.

5. Мартынихин Г. Расчет тороидальных трансформаторов. Радио. 1972. № 3. 42.

6. Источники питания на полупроводниковых приборах. Проектирование и расчет/Под ред С.Д.Додика и Е.И.Гальперина. М.: Сов. радио, 1969.

О Г Л А В Л Е Н И Е

1. Введение	3
2. Типы сетевых ИП	3
3. Параметры сетевых ИП	5
4. Трансформаторы	7
5. Выпрямители	14
6. Сглаживающие фильтры	21
7. Техника безопасности при конструировании и настройке ИП	28
8. Ответы на вопросы	29
9. Литература	29

Выпрямители в приборах физического эксперимента. Методические указания к занятиям в монтажном практикуме

Составитель Алексей Георгиевич Михайловский

Редактор Л.А.Богданова

Технический редактор Л.Г.Подорова

Корректор О.В.Сандалова

Подписано в печать 30.09.88. Формат 60х84/16. Бум.тип. № 3.

Печать офсетная. Усл.печ.л. 1,89. Уч.-изд.л. 1,8. Тираж 600.

Заказ 787. Бесплатно.

Редакционно-издательский отдел Пермского университета. 614600

Пермь, ул.Букирева, 15

Типография Пермского университета. 614600 Пермь, ул.Букирева, 15

Бесплатно