

ЭЛЕКТРОННЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ И СТАБИЛИЗАТОРЫ

14.1. КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОННЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНЫХ УСТРОЙСТВ

Преобразовательные электронные устройства осуществляют преобразование напряжения и тока источника энергии в напряжение и ток, необходимые приемнику энергии.

В зависимости от видов напряжений и токов источника и приемника различают:

- *выпрямители* — для преобразования синусоидальных напряжений и токов в постоянные;
- *инверторы* — для преобразования постоянных напряжений и токов в синусоидальные;
- *конверторы* — для преобразования постоянных напряжений и токов в постоянные — других значений.

Комбинирование выпрямителя и инвертора реализует преобразование синусоидальных напряжения и тока одной частоты в синусоидальные напряжения и ток другой частоты.

Преобразователи большой мощности (до сотен и более киловатт) применяются в электроприводе, устройствах электросварки, электротермии и т.п., малой мощности (до нескольких десятков ватт) — в источниках вторичного электропитания (ИВЭП) радиоэлектронной аппаратуры.

Рассмотрим принцип действия и характеристики выпрямителей, которые классифицируют по числу фаз источника выпрямленного синусоидального напряжения — на однофазные и многофазные (чаще трехфазные) выпрямители, по схемотехническому решению — с выводом нулевой точки трансформатора и мостовые, по возможностям регулирования выпрямленного напряжения — на неуправляемые и управляемые.

14.2. НЕУПРАВЛЯЕМЫЕ ОДНОФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

В общем случае структурная схема выпрямительного устройства (рис. 14.1) содержит трансформатор T , выпрямитель B , сглаживающий фильтр Φ и стабилизатор выпрямленного напряжения St . Трансформатор служит для изменения значения синусоидального напряжения сети C до необходимого уровня, которое затем выпрямляется. Сглаживающий фильтр уменьшает пульсации выпрямленного напряжения. Стабилизатор поддерживает неизменным напряжение на приемнике Π при изменении напряжения сети. Отдельные узлы выпрямительного устройства, например трансформатор, могут отсутствовать, что зависит от условий работы.

Далее вместо термина «выпрямительное устройство» будем пользоваться сокращенным — «выпрямитель».

В неуправляемых выпрямителях для выпрямления синусоидального напряжения включаются диоды, т. е. неуправляемые вентили, а для сглаживания выпрямленного напряжения — обычно емкостные фильтры.

Для упрощения расчетов примем, что приемник представляет собой резистивный двухполюсник с сопротивлением нагрузки R_H .

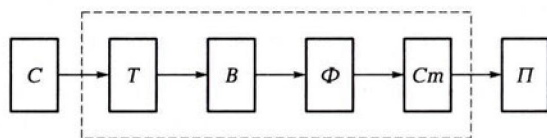


Рис. 14.1

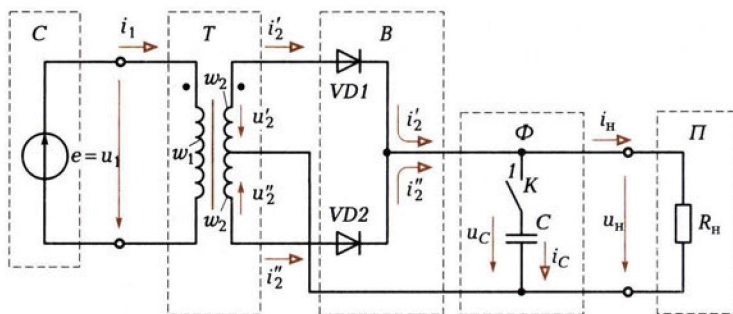


Рис. 14.2

а диоды — идеальные ключи, реализующие короткое замыкание цепи для тока в прямом направлении и ее разрыв для тока в обратном направлении.

В выпрямителе с нулевым выводом трансформатора приемник подключается к выводу от середины вторичной обмотки трансформатора (рис. 14.2). Рассмотрим работу выпрямителя без сглаживающего фильтра (ключ K разомкнут). Если в каждой половине вторичной обмотки с числом витков w_2 считать положительным направление тока, при котором соответствующий диод включен, то ток в каждой половине обмотки и в каждом диоде будет синусоидальным в течение положительного (для этой половины) полупериода и равным нулю в течение отрицательного полупериода (рис. 14.3, а). В приемнике положительные направления обоих токов совпадают, т.е. $i_n = i'_2 + i''_2$ (рис. 14.3, б).

Такое выпрямление синусоидального тока называется *двухполупериодным*. Если цепь одной из вторичных обмоток w_2 разомкнуть, то выпрямление синусоидального тока будет *однополупериодным*.

При идеальном трансформаторе постоянная составляющая тока на грузки

$$I_0 = \frac{2}{\pi} I_{m2} \approx 0,64 I_{m2} \quad (14.1)$$

и его действующее значение

$$I = \sqrt{\frac{2}{T} \int_0^{T/2} I_{m2}^2 \sin^2 \omega t dt} = \frac{I_{m2}}{\sqrt{2}} \quad (14.2)$$

равны значениям соответствующих величин синусоидального тока с той же амплитудой.

Ток в первичной обмотке трансформатора с числом витков w_1 синусоидальный

$$i_1 = (i'_2 - i''_2) \frac{w_2}{w_1} = I_{m2} \frac{w_2}{w_1} \sin \omega t$$

и совпадает по фазе с синусоидальным напряжением сети (рис. 14.3, в)

$$u_1 = (u'_2 - u''_2) \frac{w_1}{2w_2} = U_{m2} \frac{w_1}{w_2} \sin \omega t.$$

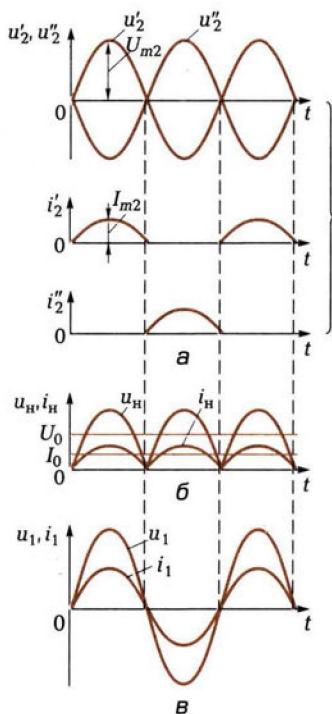


Рис. 14.3

Рассмотрим, как изменится работа выпрямителя после включения сглаживающего фильтра (ключ K замкнут). По первому закону Кирхгофа для узла 1 цепи прямой ток диода $VD1$ равен

$$i'_2 = i_C + i_H,$$

или

$$i'_2 = C \frac{du_C}{dt} + u_H / R_H,$$

где $u_C = u_H = u'_2 = U_{m2} \sin \omega t$ и $i_C = C \frac{du_C}{dt} = \omega C U_{m2} \cos \omega t$ — напряжение на конденсаторе фильтра и ток в нем.

Подставив в это уравнение значение тока $i'_2 = 0$, определим момент времени t_1 выключения диода:

$$\omega C U_{m2} \cos \omega t_1 + \frac{U_{m2}}{R_H} \sin \omega t_1 = 0,$$

откуда

$$t_1 = \frac{\arctg(-\omega R_H C)}{\omega}.$$

Начиная с момента времени t_1 , напряжение на приемнике будет изменяться экспоненциально (см. подразд. 1.5):

$$u_H = u_C = U_{m2} \sin \omega t e^{-\frac{t-t_1}{R_H C}},$$

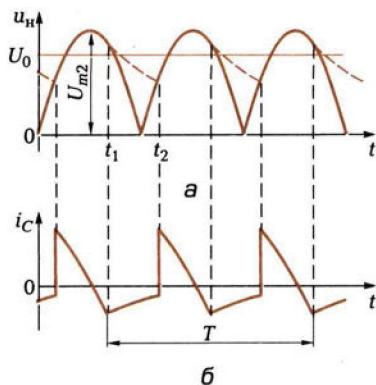


Рис. 14.4

как показано на рис. 14.4, а штриховой линией.

В момент времени t_2 напряжения на конденсаторе u_C и на входе выпрямителя $u_2'' = -U_{m2} \sin \omega t_2$ будут равны и включится диод $VD2$. Далее процесс в цепи будет периодически повторяться. Происходит периодическая зарядка конденсатора фильтра током i_C от источника энергии и его последующая разрядка на цепь приемника (рис. 14.4, б).

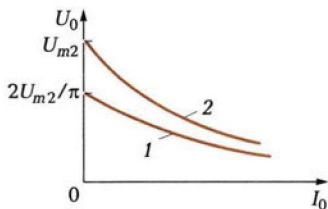


Рис. 14.5

Включение сглаживающего фильтра увеличивает постоянную составляющую U_0 и уменьшает содержание гармонических составляющих выпрямленного напряжения.

Внешней характеристикой выпрямителя называется зависимость среднего значения выпрямленного напряжения U_0 от среднего значения выпрямленного тока I_0 .

На рис. 14.5 приведены внешние характеристики однофазного выпрямителя без сглаживающего фильтра (зависимость 1) и со сглаживающим фильтром (зависимость 2).

В первом случае уменьшение напряжения U_0 при уменьшении сопротивления цепи нагрузки и увеличении выпрямленного тока объясняется увеличением падения напряжения на реальном диоде, а во втором — также более быстрой разрядкой конденсатора.

В мостовой схеме выпрямителя (рис. 14.6) четыре диода образуют четыре плеча выпрямительного моста. Одну половину периода диоды $VD1$ и $VD2$ включены и проводят ток i' , а диоды $VD3$ и $VD4$ выключены. Вторую половину периода диоды $VD3$ и $VD4$ включены и проводят ток i'' , а диоды $VD1$ и $VD2$ выключены (рис. 14.7, а). Для мостовой схемы справедливы все полученные

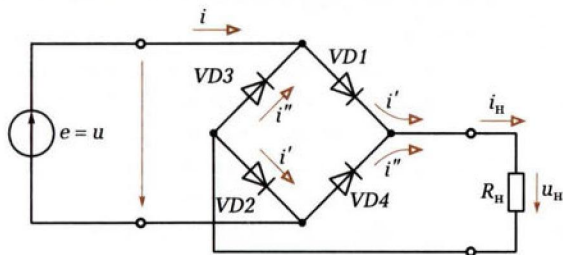


Рис. 14.6

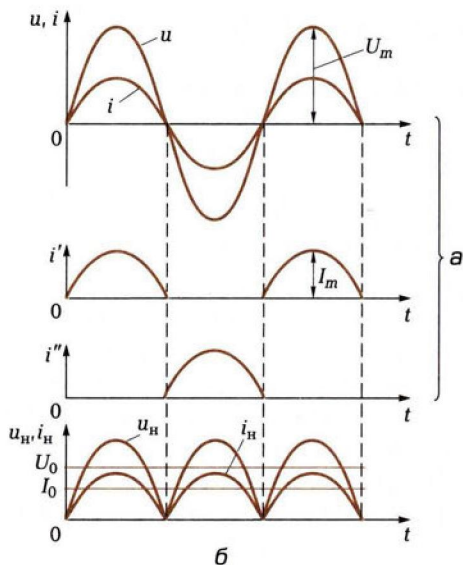


Рис. 14.7

выше соотношения для выпрямителя с нулевым выводом трансформатора. При этом ток нагрузки выпрямленный $i_n = i' + i''$ (рис. 14.7, б), а ток источника $i = i' - i''$ синусоидальный (см. рис. 14.7, а).

14.3. НЕУПРАВЛЯЕМЫЕ МНОГОФАЗНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Многофазные выпрямители по сравнению с однофазными уменьшают пульсацию выпрямленного напряжения.

На рис. 14.8 показана схема трехфазного выпрямителя с нулевым выводом трехфазного трансформатора (см. рис. 7.13, б). В каждый данный момент времени ток проводит только тот диод, анод которого соединен с выводом той вторичной обмотки трансформатора (a , b или c), напряжение на которой (u_a , u_b или u_c) положительное и наибольшее (рис. 14.9, а).

Для идеального трансформатора токи вторичных обмоток i_a , i_b и i_c представляют собой три последовательности импульсов с периодом повторения $T = 2\pi/\omega$, длительностью $T/3$ и амплитудой

$I_{m2} = U_{m2}/R_n$ каждая, сдвинутые относительно друг друга на $\frac{1}{3}$ периода (рис. 14.9, б).

Токи первичных обмоток равны

$$i_A = \frac{w_2}{w_1} i_a, \quad i_B = \frac{w_2}{w_1} i_b, \quad i_C = \frac{w_2}{w_1} i_c,$$

ток нагрузки $i_n = i_a + i_b + i_c$ имеет постоянную составляющую I_0 . Выпрямленное напряжение в этом случае совпадает с огибающей положительных полуволн напряжений вторичных обмоток $u_n = R_n i_n$ (рис. 14.9, в). Заметим, что токи во вторичных и первичных обмотках трансформатора имеют постоянные составляющие $I_0/3$ и $w_2 I_0/(3w_1)$, а магнитный поток в его магнитопроводе переменный.

В трехфазной *мостовой* схеме выпрямителя нулевой вывод вторичной обмотки трехфазного трансформатора не нужен. Поэтому его вторичные обмотки могут быть соединены как звездой, так и треугольником, или, если позволяют условия работы, трехфазный трансформатор может вообще отсутствовать. При отсутствии трехфазного трансформатора выпрямитель подключается к трехфазному источнику (рис. 14.10) так, что диоды $VD1, VD3$ и $VD5$ образуют группу, в которой соединены все катодные выводы, а диоды $VD2, VD4$ и $VD6$ — группу, в которой соединены все анодные выводы.

Примем значение потенциала нейтральной точки N трехфазного источника $v_N = 0$. При этом потенциалы его выводов A, B и C равны (рис. 14.11, а)

$$\begin{aligned} v_A &= u_A = U_m \sin \omega t; \\ v_B &= u_B = U_m \sin (\omega t - 2\pi/3); \\ v_C &= u_C = U_m \sin (\omega t - 4\pi/3). \end{aligned}$$

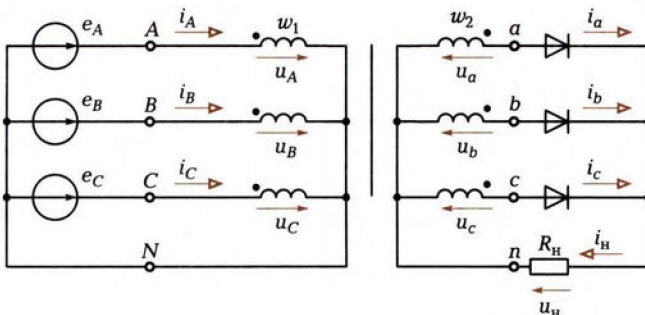


Рис. 14.8

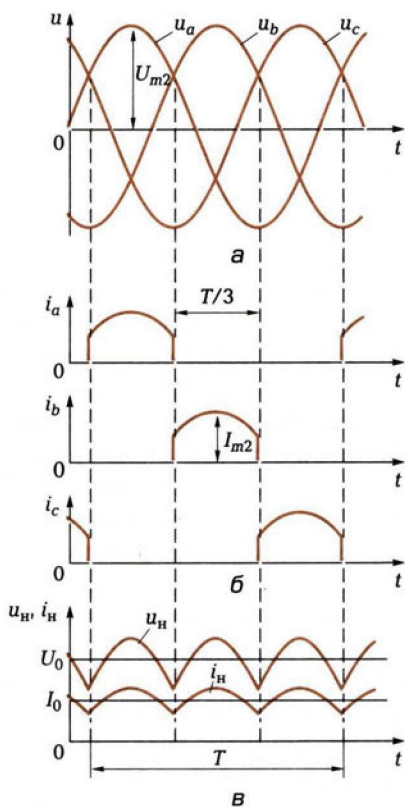


Рис. 14.9

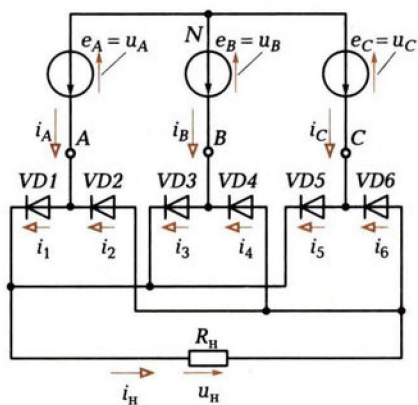


Рис. 14.10

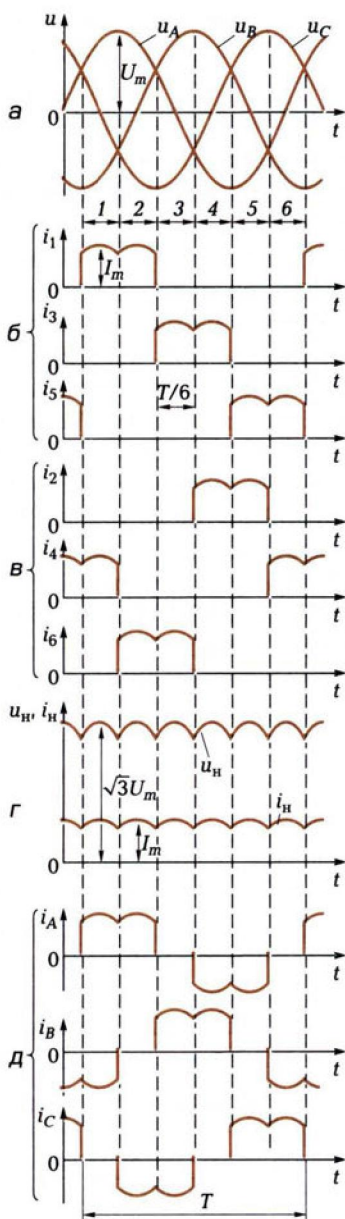


Рис. 14.11

В каждый данный момент времени включен тот диод первой группы, у которого анодный вывод имеет наибольший положительный потенциал $v_{\text{Анод max}} > 0$ относительно потенциала нейтральной точки N , а вместе с ним — диод второй группы, у которого катодный вывод имеет наибольший отрицательный потенциал $v_{\text{Кат max}} < 0$ относительно потенциала этой же точки. Чтобы проследить порядок переключения диодов, разделим один период T работы цепи на шесть равных интервалов времени, как показано на рис. 14.11, а.

В табл. 14.1 для каждого интервала времени приведены величины с наибольшим положительным потенциалом анодов $v_{\text{Анод max}}$ диодов первой группы и с наибольшим отрицательным потенциалом катодов $v_{\text{Кат max}}$ диодов второй группы, а также номера включенных диодов каждой группы. В течение одного периода происходит шесть переключений, т.е. в два раза больше числа фаз $m = 3$.

Работу выпрямителя иллюстрируют совмещенные по времени зависимости токов диодов первой группы i_1, i_3 и i_5 (рис. 14.11, б), токов диодов второй группы i_2, i_4 и i_6 (рис. 14.11, в), тока нагрузки $i_n = i_1 + i_3 + i_5 = i_2 + i_4 + i_6$, выпрямленного напряжения $u_n = R_n i_n$ (рис. 14.11, г) и переменных фазных токов трехфазного источника $i_A = i_1 - i_2, i_B = i_3 - i_4$ и $i_C = i_5 - i_6$ (рис. 14.11, г). Заметим, что максимальное значение выпрямленного напряжения равно амплитуде синусоидального линейного напряжения трехфазного источника $\sqrt{3}U_m$, а максимальное значение выпрямленного тока $I_m = \sqrt{3}U_m/R_n$.

Мощность многофазных неуправляемых выпрямителей обычно средняя или большая (от десятков до сотен киловатт и больше при токах до 100 000 А). Мощность однофазных неуправляемых

Таблица 14.1. Порядок переключения диодов в трехфазной мостовой схеме выпрямителя

Номер интервала	$v_{\text{Анод max}} > 0$	$v_{\text{Кат max}} < 0$	Диод первой группы	Диод второй группы
1	v_A	v_B	VD1	VD4
2	v_A	v_C	VD1	VD6
3	v_B	v_C	VD3	VD6
4	v_B	v_A	VD3	VD2
5	v_C	v_A	VD5	VD2
6	v_C	v_B	VD5	VD4

выпрямителей малая или средняя (от единиц до десятков киловатт), коэффициент полезного действия неуправляемых выпрямителей достигает 98 %.

В управляемых выпрямителях вместо неуправляемых (диоды) применяются управляемые (тиристоры, транзисторы) вентили, включение и выключение которых задается последовательностью импульсов системы управления.

14.4. СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПЯЖЕНИЯ И ТОКА

Стабилизаторы предназначены для стабилизации режима работы приемника при изменении его нагрузки и влиянии дестабилизирующих факторов. Наиболее распространены электронные стабилизаторы постоянных напряжения и тока.

Стабилизаторы напряжения. Различают параметрические и компенсационные стабилизаторы.

В *параметрических* стабилизаторах стабилизация постоянного напряжения на выходе осуществляется элементами с нелинейными вольт-амперными характеристиками. Одним из таких элементов является стабилитрон (см. подразд. 13.3).

Принципиальная схема стабилизатора напряжения на основе стабилитрона и его схема замещения приведены на рис. 14.12, а и б, где $R_{\text{диф.ст}}$, $I_{\text{ст}}$ и $U_{\text{пор}}$ — дифференциальное сопротивление, ток и пороговое напряжение проводимости стабилитрона (см. рис. 10.14); $R_{\text{н}}$ и $R_{\text{б}}$ — сопротивления цепи нагрузки и балластного резистора. При изменении напряжения на входе стабилизатора

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{пор}} + R_{\text{диф.ст}} I_{\text{ст}} + U_{R_{\text{б}}} = U_{\text{вых}} + U_{R_{\text{б}}}$$

напряжение на его выходе при малом значении дифференциального сопротивления стабилитрона $R_{\text{диф.ст}}$ изменяется незначитель-

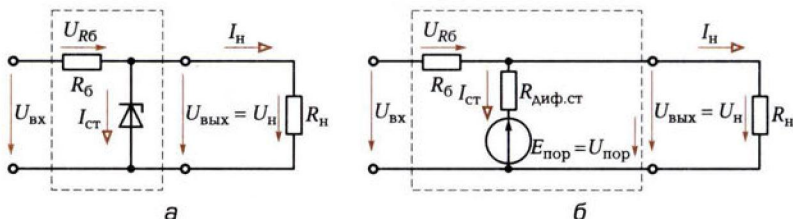


Рис. 14.12

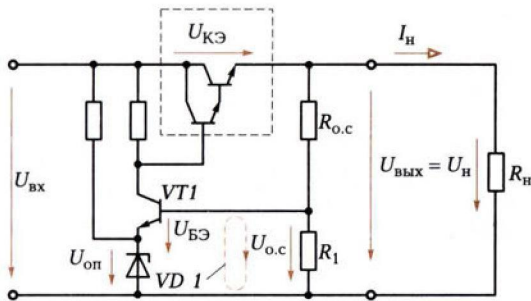


Рис. 14.13

но за счет падения напряжения U_{R6} на балластном резисторе. Параметрические стабилизаторы на основе стабилитронов имеют типовые значения номинального стабилизированного напряжения $U_{\text{ст.ном}} = 0,3\text{—}100$ В и коэффициента стабилизации $20\text{—}50$:

$$K_{\text{стаб}} = \frac{\Delta U_{\text{ВХ}}}{U_{\text{ВХ}}} \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}$$

В компенсационных стабилизаторах стабилизация постоянного напряжения на выходе осуществляется с помощью отрицательной обратной связи по напряжению (см. рис. 15.18, а).

В состав компенсационного стабилизатора любого типа входят регулирующий элемент, устройство сравнения и усилитель постоянного тока. На рис. 14.13 приведена типовая схема компенсационного стабилизатора, в котором роль устройства сравнения и усилителя постоянного тока выполняет транзистор $VT1$, а регулирующего элемента, отмеченного внутри штриховой линией, — составной транзистор (см. рис. 13.17). опорное напряжение $U_{\text{оп}}$ на стабилитроне VD сравнивается через делитель напряжения на резисторах R_1 и $R_{\text{о.с}}$ с напряжением обратной связи

$U_{\text{о.с}} = \frac{R_1}{R_1 + R_{\text{о.с}}} U_{\text{ВЫХ}}$, пропорциональным напряжению на выходе

стабилизатора. Разность этих напряжений по второму закону Кирхгофа для контура 1 определяет напряжение между базой и эмиттером транзистора $VT1$ $U_{\text{БЭ}} = U_{\text{о.с}} - U_{\text{оп}}$. Увеличение (уменьшение) напряжения на выходе стабилизатора $U_{\text{ВЫХ}}$ увеличивает (уменьшает) напряжение $U_{\text{БЭ}}$. Соответственно уменьшается (увеличивается) ток базы $I_{\text{Б}}$ составного транзистора и увеличивается (уменьшается) напряжение между его коллектором и эмиттером $U_{\text{КЭ}}$, что означает стабилизацию значения напряжения $U_{\text{ВЫХ}}$.

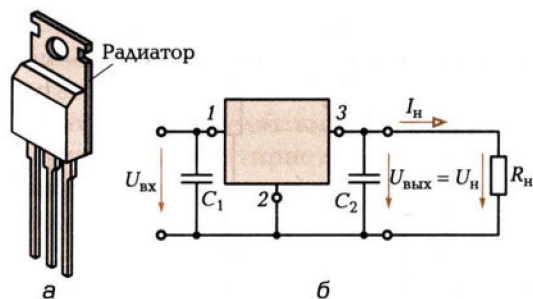


Рис. 14.14

Выпускаются компенсационные стабилизаторы напряжения в виде интегральных схем двух типов с фиксированным и регулируемым напряжением на выходе. Последние для своей работы требуют подключения к ним ряда внешних элементов (до шести—восьми резисторов и конденсаторов). Интегральная схема стабилизатора с фиксированным напряжением на выходе имеет три вывода (рис. 14.14, а) и включается по схеме (рис. 14.14, б). Конденсатор

Таблица 14.2. Параметры интегральных схем стабилизаторов с фиксированным напряжением

Параметр	Значение
Кoeffициент нестабильности напряжения на выходе:	
от напряжения на входе, %/В	0,05
$K_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{\Delta U_{\text{ВХ}} U_{\text{ВЫХ}}} 100;$	
от тока нагрузки $0 \leq I_{\text{н}} \leq I_{\text{н max}}$, %	1,00
$K_I = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}}} 100;$	
от температуры, %/°С	0,02
$\alpha_U = \frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВЫХ}} \Delta \theta} 100$	
Минимальное падение напряжения на стабилизаторе, В	2,50
Максимальный ток интегральной схемы, мкА	10,0

емкостью $C_2 \geq 2,2$ мкФ обеспечивает устойчивость при импульсном изменении тока нагрузки I_H . Конденсатор емкостью $C_1 \geq 0,33$ мкФ сглаживает пульсации напряжения (помехи) на входе. Интегральные схемы стабилизаторов напряжения содержат встроенную защиту от перегрузки по току и перегреву, имеют ряд номинальных значений стабилизированного напряжения 1,5—18 В при токах нагрузки до 8 А (табл. 14.2).

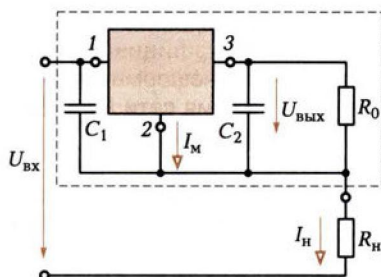


Рис. 14.15

Стабилизаторы тока. Схему компенсационного стабилизатора постоянного напряжения на рис. 14.13 можно преобразовать в схему компенсационного стабилизатора постоянного тока. Для этого обратную связь по напряжению следует заменить обратной связью по току (см. рис. 15.18, б), включив резистор R_1 последовательно в цепь нагрузки. При этом значение напряжения обратной связи будет пропорционально значению тока нагрузки, т.е. $U_{o.c} = R_1 I_H$.

Стабилизированный источник тока можно реализовать также на основе интегральной схемы стабилизатора напряжения по схеме на рис. 14.15, где схема источника тока отмечена внутри штриховой линии. Пренебрегая током интегральной схемы I_M ,

ток в цепи нагрузки $I_H = \frac{U_{\text{ВЫХ}}}{R_0}$ не зависит от ее сопротивления R_H .

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Какие различают типы преобразовательных устройств по их функциональному назначению?
2. Почему пульсация выпрямленного напряжения у многофазных неуправляемых выпрямителей меньше, чем у однофазных?
3. Какую роль выполняет сглаживающий фильтр в неуправляемых выпрямителях?
4. Какие различают типы стабилизаторов постоянного напряжения по принципу их действия?

ЗАДАЧИ ДЛЯ САМОСТОЯТЕЛЬНОГО РЕШЕНИЯ

1. В выпрямителе с нулевым выводом трансформатора (см. рис. 14.2) без сглаживающего фильтра (ключ K разомкнут) определите постоянную составляющую напряжения между выводами

ми приемника U_0 (см. рис. 14.3) при значениях параметров: коэффициент трансформации напряжения понижающего трансформатора $n_{12} = \omega_1/\omega_2$, действующее значение напряжения сети $U_1 = 220$ В, все элементы схемы идеальные.

Ответ: 49, 5 В.

2. Чему равен коэффициент стабилизации постоянного напряжения схемы на рис. 14.12, а при значениях параметров: $U_{вх} = 10$ В, $\Delta U_{вх} = 1$ В, $U_{вых} = 3$ В, $\Delta U_{вых} = 10$ мВ?

Ответ: 30.