

РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ОТКРЫТЫЙ  
ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ  
МИНИСТЕРСТВА ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ  
РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ

---

19/4/10

Одобрено кафедрой  
«Автоматика и телемеханика  
на железнодорожном транспорте»

**ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ УСТРОЙСТВ  
ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ АВТОМАТИКИ,  
ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ**

Руководство к выполнению лабораторных работ № 1–7  
для студентов V курса

специальности

210700 АВТОМАТИКА, ТЕЛЕМЕХАНИКА И СВЯЗЬ  
НА ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОМ ТРАНСПОРТЕ (АТС)



## 1. ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫЕ УСТРОЙСТВА И ИХ СОСТАВНЫЕ ЧАСТИ

С о с т а в и т е л и : д-р техн. наук, проф. И.Е. ДМИТРЕНКО  
канд. физ.-мат. наук, ст. преп. А.В. МОСКВИЧЕВ

В данном руководстве приводятся теоретические сведения для выполнения лабораторных работ по дисциплине «Электропитание устройств автоматики, телемеханики и связи» студентами V курса. Задание на выполнение лабораторных работ содержится в программном комплексе «Лабораторные работы по ЭПУ», разработанном на кафедре «Автоматика и телемеханика на железнодорожном транспорте» РГОТУПСа. Выполнение этих работ возможно также и с использованием лабораторных стендов. В этом случае задание на выполнение лабораторной работы формулируется преподавателем, согласно представленному теоретическому материалу.

Все устройства автоматики, телемеханики и связи по обеспечению надежности внешнего электроснабжения относятся к электроприемникам первой категории и являются, в основном, потребителями постоянного тока и напряжения различной величины. Для этих устройств сооружаются электропитающие установки (ЭПУ), обеспечивающие бесперебойное снабжение питаемой аппаратуры электроэнергией необходимого качества. В большинстве случаев к ЭПУ подводятся от энергосистемы два фидера, по возможности, от различных подстанций или электростанций с целью повышения надежности электроснабжения. С этой же целью в ЭПУ предусматриваются резервные источники электроэнергии переменного или постоянного тока.

Для преобразования переменного тока в постоянный применяются выпрямительные устройства, которые представляют собой совокупность ряда элементов, осуществляющих выпрямление, сглаживание пульсаций, стабилизацию напряжения, а также защиту и контроль (рис. 1.1).

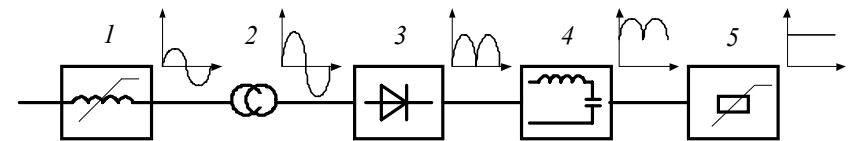


Рис. 1.1 Блок-схема выпрямительного устройства:

1 — стабилизатор напряжения переменного тока; 2 — трансформатор; 3 — выпрямитель; 4 — сглаживающий фильтр; 5 — стабилизатор напряжения постоянного тока

Важнейшим и неотъемлемым элементом выпрямительного устройства является выпрямитель 3 или схема выпрямления.

Схемы выпрямления можно различать по геометрическим или физическим признакам. К геометрическим признакам относятся число ветвей и плеч. Физическими признаками являются (рис. 1.2):

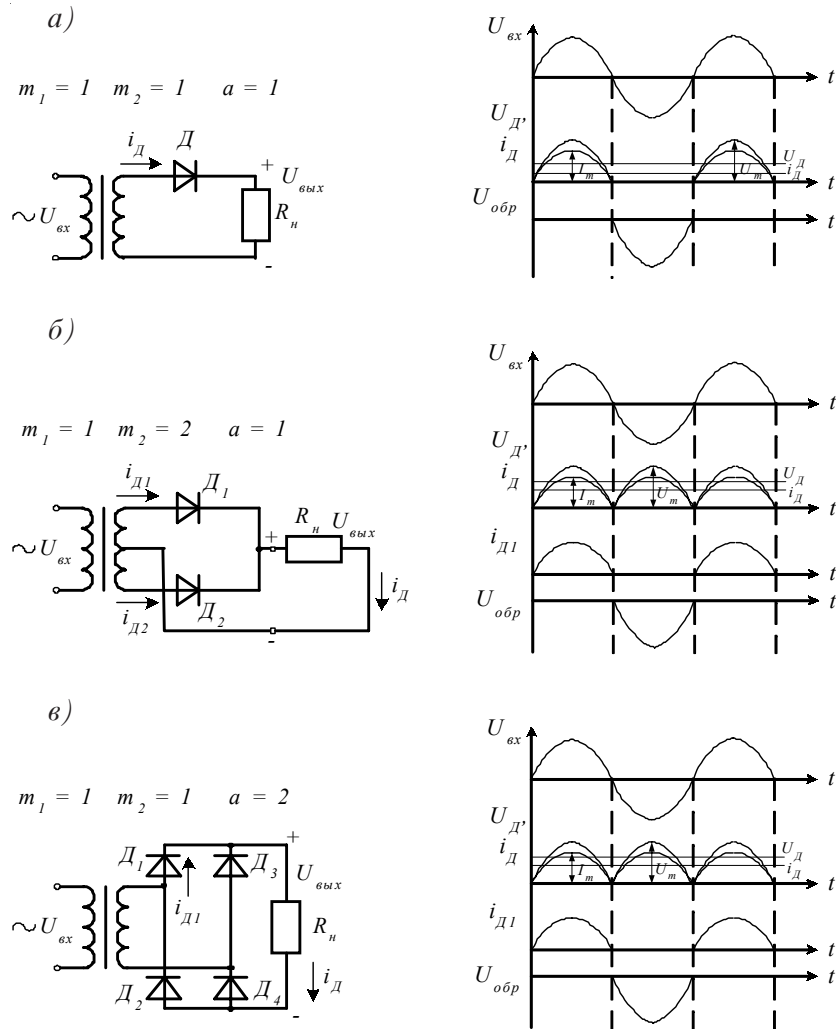


Рис. 1.2. Однофазные схемы выпрямления и их временные диаграммы напряжений и токов:

а — однофазная однополупериодная схема выпрямления; б — однофазная схема выпрямления с нулевым выводом; в — однофазная мостовая схема выпрямления

а) число фаз первичной обмотки трансформатора  $m_1$ , т.е. число фаз сети переменного тока, от которых получает питание выпрямитель;

б) число фаз вторичной обмотки трансформатора  $m_2$ ;

в) число тактов выпрямления  $a$  (число полупериодов напряжения каждой фазы вторичной обмотки трансформатора, выпрямленных на протяжении одного периода напряжения сети переменного тока). Различают однотактные (однополупериодные) и двухтактные (двуполупериодные) схемы выпрямления.

Выпрямители однофазного тока применяют для питания током различных систем и устройств автоматики, телемеханики и связи (АТС) мощностью до нескольких сот *ватт*. В более мощных устройствах, получающих питание от сети однофазного тока, применяются мощные однофазные выпрямители от нескольких сотен киловатт до нескольких мегаватт. Такие выпрямители должны обладать характеристиками, обеспечивающими экономичное использование энергии. Важно правильно выбрать схему выпрямления, полупроводниковые приборы, сглаживающий фильтр.

При сравнении схем выпрямления пользуются такими понятиями, как число фаз выпрямления  $m$ , расчетная мощность трансформатора  $P_m$ , коэффициент использования трансформатора  $k_m$ , коэффициент пульсации  $k_n$ .

Число фаз выпрямления в действительности зависит не только от числа фаз выпрямления переменного напряжения, но и от числа выпрямленных полупериодов. Таким образом,  $m$  — число импульсов выпрямленного тока за один период:

$$m = q \cdot p, \quad (1.1)$$

где  $q$  — число фаз выпрямленного переменного напряжения;

$p$  — число выпрямленных полупериодов.

Расчетная мощность трансформатора выражается в вольт-амперах и определяется как полусумма расчетных мощностей первичной и вторичной обмоток трансформатора:

$$P_T = \frac{P_1 + P_2}{2}, \quad (1.2)$$

где  $P_1 = U_1 \cdot I_1$ ;  $P_2 = U_2 \cdot I_2$ ;  $U_1$ ;  $U_2$  — действующие значения напряжения на входе и выходе трансформатора;  
 $I_1$ ;  $I_2$  — действующие значения тока на входе и выходе трансформатора.

Коэффициентом использования трансформатора называют отношение мощности выпрямленного тока к расчетной мощности трансформатора:

$$k_T = \frac{P_D}{P_T}, \quad (1.3)$$

где  $P_D = i_D \cdot U_D$  — мощность выпрямленного тока;  
 $i_D$ ;  $U_D$  — соответственно среднее значение выпрямленного тока и напряжения.

Средние значения выпрямленного тока и напряжения определяются по формулам:

$$i_D = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} I_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2 \cdot I_m}{\pi}, \quad (1.4)$$

$$U_D = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} U_m \sin(\omega t) d(\omega t) = \frac{2 \cdot U_m}{\pi}, \quad (1.5)$$

где  $I_m$ ;  $U_m$  — амплитуда выпрямленного тока и напряжения соответственно.

Формулы (1.4) и (1.5) справедливы только для двуполупериодных схем выпрямления (рис. 1.2, б и рис. 1.2, в), работающих на чисто активную нагрузку. Для однополупериодной схемы выпрямления (рис. 1.2, а) значения  $i_D$ ,  $U_D$  должны быть уменьшены в 2 раза.

На практике всегда имеют дело с коэффициентом пульсации, определяемым как отношение амплитуды первой гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения  $U_1 m$  к среднему значению выпрямленного напряжения, которые через действующее значение напряжения вторичной обмотки трансформатора определяются по формулам:

$$U_1 m = \frac{2m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \cdot U_2}{\pi(m^2 - 1)},$$

$$U_D = \frac{m \cdot \sin\left(\frac{\pi}{m}\right) \cdot U_2}{\pi}.$$

Следовательно, коэффициент пульсации в процентах

$$k_n = \frac{2}{m^2 - 1} \cdot 100. \quad (1.6)$$

Таким образом, зная число импульсов выпрямленного тока за один период, можно определить величину  $k_n$ .

**В лабораторной работе № 1** проводится исследование однофазных схем выпрямления с построением временных диаграмм напряжений и токов. Результатом выполненной работы является сравнительный анализ работы, приведенных на рис. 1.2 схем выпрямления, с рассчитанными по формулам (1.2–1.5) значениями расчетной мощности трансформатора и коэффициента его использования.

Выпрямители мощностью более 1 кВт, в большинстве случаев, выполняются трехфазными. При этом используются трехфазные схемы выпрямления (рис. 1.3 и рис. 1.4). В выпрямительных устройствах связи используются схемы с несколькими выпрямительными мостами, эквивалентные 12-ти и 18-ти фазным схемам выпрямления. Однако это не дает ожидаемых результатов, так как с увеличением числа фаз выпрямления выпрямительное устройство делается более чувствительным к несимметрии напряжений фаз и приходится значительно увеличивать сглаживающий фильтр.

**В лабораторной работе № 2** проводится исследование трехфазных схем выпрямления с построением временных диаграмм напряжений и токов. Результатом выполненной работы является сравнительный анализ работы, приведенных на рис. 1.3 и 1.4 схем выпрямления, с рассчитанными по формулам (1.2–1.5) зна-

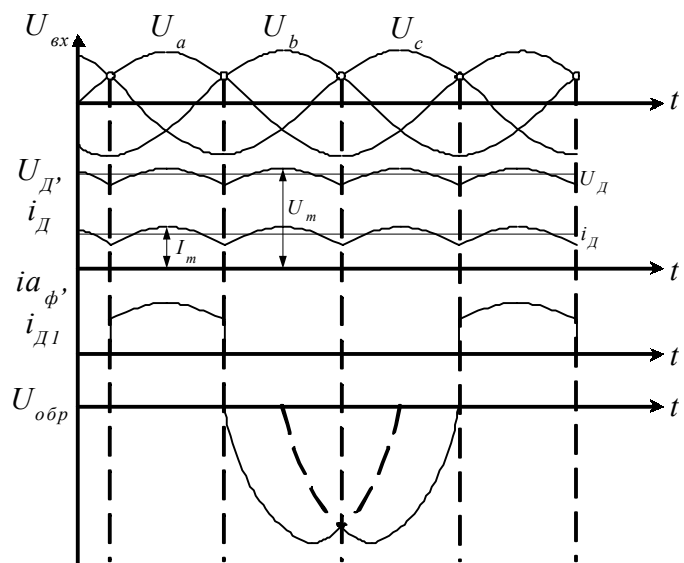
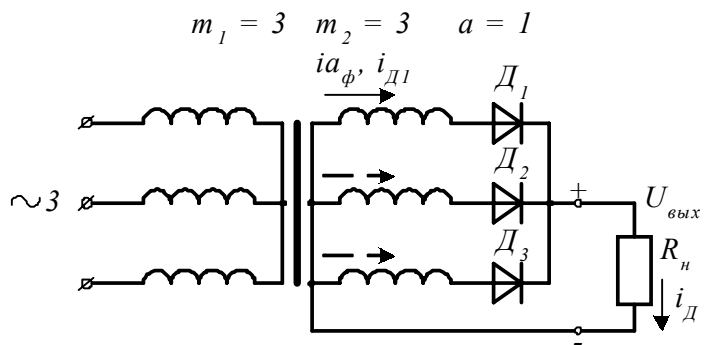


Рис. 1.3. Схема и временные диаграммы напряжений и токов нулевой трехфазной схемы выпрямления с нулевым выводом

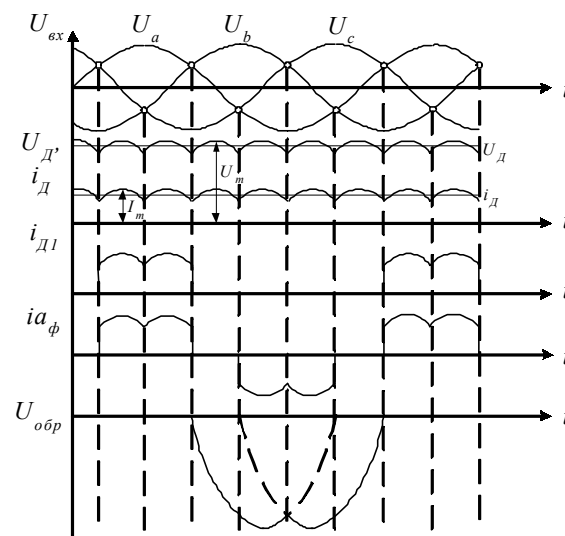
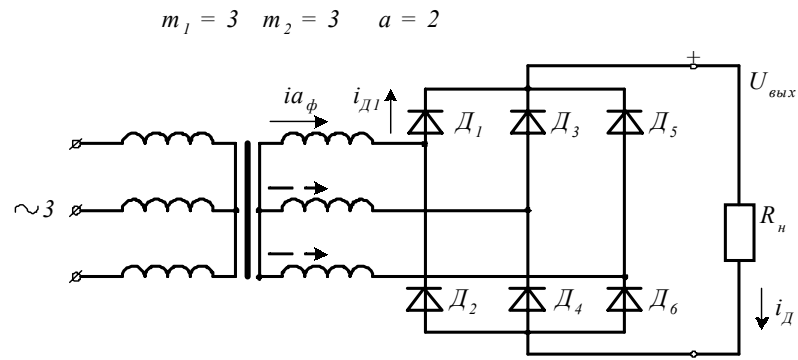


Рис. 1.4. Схема и временные диаграммы напряжений и токов трехфазной мостовой схемы выпрямления

чениями расчетной мощности трансформатора и коэффициента его использования.

### Контрольные вопросы

1. Назовите основное назначение и состав выпрямительного устройства?
2. Как определяются расчетная мощность трансформатора, коэффициент его использования и коэффициент пульсации схемы выпрямления?
3. Какие схемы применяются при мощности выпрямительной установки более 1 кВт?
4. Какие из схем однофазного и трехфазного выпрямления обладают наилучшими показателями

## 2. УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

В настоящее время используются тиристорные или тиристорно-диодные выпрямители. С их помощью решаются задачи плавного регулирования среднего значения выпрямленного напряжения  $U_o$  в результате изменения угла управления  $\alpha$ , задающего момент включения тиристоров относительно точки естественной коммутации. Также такие выпрямители имеют высокие энергетические показатели, в отличие от управляемых выпрямительных устройств с ЛАТРами или с переменными сопротивлениями.

Существует три способа управления тиристором:

- 1) постоянным током;
- 2) переменным током;
- 3) импульсным сигналом.

Рассмотрим работу управляемого выпрямителя с управляющим импульсным сигналом (рис. 2.1). Силовая часть выпрямительной схемы имеет два тиристора  $УВ_1$  и  $УВ_2$ . Для управления их работой используют фазовращатель  $ФВ$ , усилитель-ограничитель  $УО$  и формирователь импульсов  $ФИ$ .  $ФВ$  позволяет изменять фазу на выходе по отношению ко входу от  $\theta$  до  $\rho$ .  $УО$  преобразует сигнал синусоидальной формы в прямоугольный той же частоты.  $ФИ$  вырабатывает на двух выходах импульсы пилообразной формы  $U_{\phiи1}$ ,  $U_{\phiи2}$  по фронтам прямоугольных импуль-

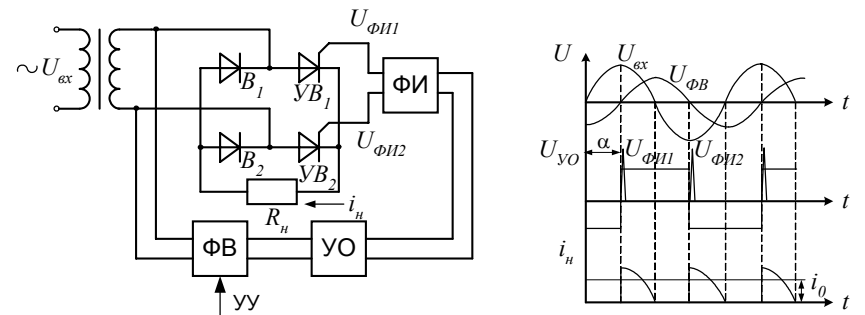


Рис. 2.1. Схема и временные диаграммы тока и напряжения управляемого выпрямителя

сов. С помощью устройства управления УУ происходит воздействие на  $\Phi B$ , который обеспечивает сдвиг по фазе на угол  $\alpha$ .

Во время первого положительного полупериода ток через  $UB_1$  протекать не будет до момента воздействия на него управляющего импульса  $U_{\Phi III}$ . Начало коммутации тиристоров задерживается на угол  $\alpha$ . При подачи на управляющий электрод  $U_{\Phi III}$  тиристор открывается, и ток через него возрастает скачкообразно. Изменяя  $\alpha$  от  $0$  до  $p$ , меняется значение напряжения от максимального до нуля. Данный управляемый выпрямитель легко преобразуется в стабилизатор. Для этого необходимо добавить схему сравнения, задающий элемент, а сигналом рассогласования управлять  $\Phi B$ . По такому принципу работают современные выпрямительные устройства СЦБ.

**В лабораторной работе № 3** проводится исследование схемы управляемого выпрямления с построением временных диаграмм напряжений и токов. Результатом работы является анализ работы управляемого выпрямителя, схема которого приведена на рис. 2.1.

### Контрольные вопросы

1. Что такое угол управления?
2. Назовите способы управления тиристором?
3. Изобразите схему управляемого выпрямителя с управляющим импульсным сигналом и опишите его работу?

## 3. РАБОТА ВЫПРЯМИТЕЛЯ НА РАЗЛИЧНЫЕ ВИДЫ НАГРУЗОК

### 3.1. Работа выпрямителя на активную нагрузку

Работа выпрямителя на активную нагрузку (рис. 3.1) имеет ту особенность, что ток проходит через фазы выпрямителя поочередно в течение времени, соответствующего углу  $\frac{2\pi}{m}$ , и ток выпрямителя существует непрерывно (кроме однофазной однополупериодной схемы). Кривая выпрямленного напряжения является огибающей кривых напряжения фаз. Кривая тока нагрузки повторяет в определенном масштабе кривую напряжения.

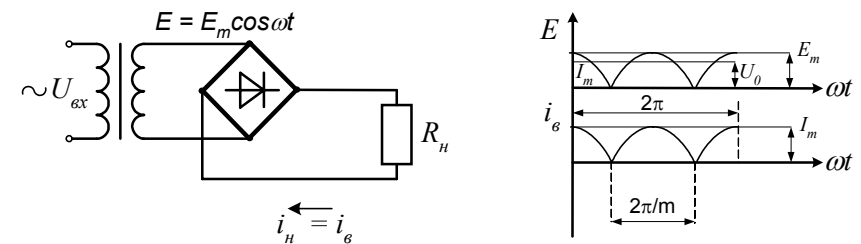


Рис. 3.1. Схема и временные диаграммы токов и напряжений работы выпрямителя на активную нагрузку

### 3.2. Работа выпрямителя на встречную ЭДС

Данный режим работы выпрямителя (рис. 3.2) возникает при буферной работе и заряде аккумуляторов. В том случае, когда амплитуда ЭДС  $E_m$  больше, чем встречная ЭДС  $E_0$ , то ток будет проходить через каждую фазу выпрямителя только в те моменты, когда ЭДС фазы  $E$  превышает  $E_0$ . Протекание тока в обратном направлении преграждается вентилями, которые закрываются обратным напряжением  $U_{обр} = E - E_0$ . Поэтому ток выпрямителя имеет вид импульсов, количество за период равно  $m$ , а длительность каждого из них равны промежутку времени, соот-

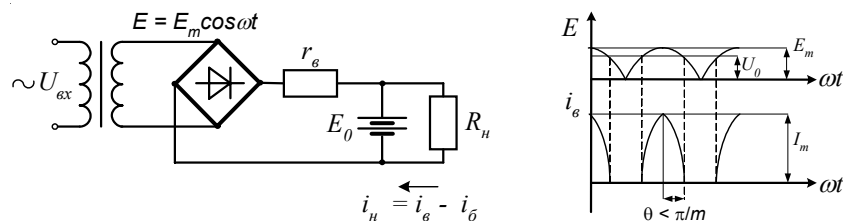


Рис. 3.2. Схема и временные диаграммы токов и напряжений работы выпрямителя на встречную ЭДС

ветствующему углу  $2\theta < \frac{2\pi}{m}$ . Угол  $\theta$  соответствующий половине промежутка времени, в течение которого протекает ток, называется углом отсечки и может быть определен из выражения:

$$\cos \theta = \frac{E_0}{E_m}. \quad (3.1)$$

Ток фазы выпрямителя определяется уравнением:

$$i_g = \frac{E_m}{r_g} (\cos \omega t - \cos \theta). \quad (3.2)$$

где  $r_g$  — сопротивление фазы выпрямителя.

Эти уравнения показывают, что импульсы тока имеют косинусоидальную форму, а их амплитуда и угол отсечки тем больше, чем больше амплитуда ЭДС трансформатора  $E_m$  и чем меньше сопротивление  $r_g$ .

### 3.3. Работа выпрямителя на нагрузку емкостного характера

Работа выпрямителя на нагрузку емкостного характера имеет сходство с работой на встречную ЭДС, так как ток выпрямителя имеет вид импульсов. Но, конденсатор обладает ограниченной емкостью и напряжение на нем остается неизменным, как, например, ЭДС аккумуляторов в предыдущем случае. В те моменты, когда ЭДС выпрямителя  $E$  выше, чем напряжение на

конденсаторе  $U_c$ , ток проходит через выпрямитель и разветвляется в нагрузку и конденсатор. Конденсатор при этом заряжается, и напряжение на нем возрастает. В те моменты когда ЭДС выпрямителя ниже, чем напряжение на конденсаторе, ток через выпрямитель не протекает, и конденсатор начинает разряжаться на нагрузку. При этом напряжение на конденсаторе понижается. Среднее значение выпрямленного напряжения равно  $U_0$  (рис. 3.3).

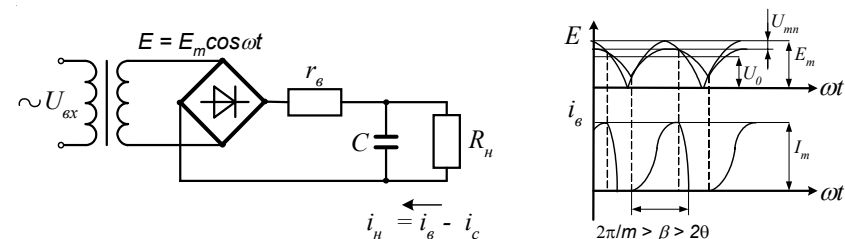


Рис. 3.3. Схема и временные диаграммы токов и напряжений работы выпрямителя на нагрузку емкостного характера

Ток каждой фазы имеет вид импульсов несимметричной формы, длительность и амплитуду которых невозможно представить такими простыми функциями от угла отсечки, как в предыдущем случае. Длительность существования тока при этом будет определяться соотношением:

$$2\theta < \beta < \frac{2\pi}{m}.$$

Напряжение на конденсаторе (и на нагрузке) периодически изменяется, что проявляется в виде пульсации выпрямленного напряжения, амплитуда которой равна  $U_{mn}$ .

### 3.4. Работа выпрямителя на нагрузку индуктивного характера

Работа выпрямителя на нагрузку индуктивного характера наблюдается при питании реле и других электромагнитных устройств, обладающих значительной индуктивностью и омическим сопротивлением. Индуктивность, включенная в цепь нагруз-



ки (3.4), препятствует изменениям тока, так как в ней наводится ЭДС самоиндукции. В результате сложения ЭДС выпрямителя и ЭДС самоиндукции форма кривых напряжения и тока будет иной, чем при нагрузке на резистор или емкость: напряжение и ток не будут снижаться до нуля, и ток будет протекать через выпрямитель и нагрузку непрерывно на протяжении всего периода.

Таким образом, характерной особенностью работы на нагрузку с индуктивным характером является то, что выпрямитель работает в режиме непрерывного тока. В этом заключается принципиальное отличие от работы на нагрузку с емкостным характером, при котором выпрямитель всегда работает в режиме с отсечкой тока.

**В лабораторной работе № 4** проводится исследование работы выпрямителя на нагрузку различного характера с построением временных диаграмм напряжений и токов. Результатом выполненной работы является анализ работы выпрямителя на различные виды нагрузок, приведенных на рис. 3.1–3.4.

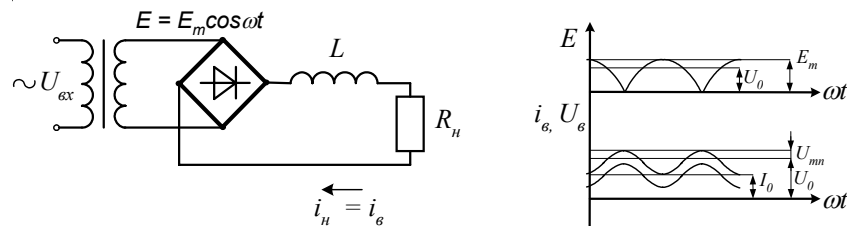


Рис. 3.4. Схема и временные диаграммы токов и напряжений работы выпрямителя на нагрузку индуктивного характера

### Контрольные вопросы

1. В каком случае возникает работа выпрямителя на встречную ЭДС, на нагрузку емкостного и индуктивного характера?
2. Что такое угол отсечки, и каким образом он определяется?
3. При каком характере нагрузки выпрямителя возникает режим непрерывного тока? Чем он обуславливается?
4. Изобразите временные диаграммы работы выпрямителя на нагрузку различного характера (активного, емкостного, индуктивного и встречную ЭДС).

## 4. ОСНОВНЫЕ СХЕМЫ СГЛАЖИВАЮЩИХ ФИЛЬТРОВ

Основным параметром, определяющим эффективную работу сглаживающих фильтров, является коэффициент сглаживания  $k_{сгл}$ , который определяется отношением:

$$k_{сгл} = \frac{k_n}{k_{nn}}, \quad (4.1)$$

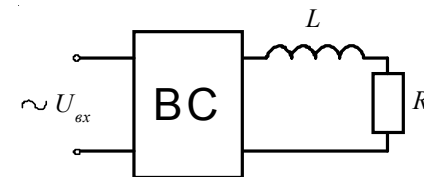
где  $k_n$  — коэффициент пульсации на выходе выпрямительной схемы при ее нагрузке на активном сопротивлении;

$k_{nn}$  — коэффициент пульсации на реальной нагрузке при наличии фильтра.

Из соотношения (4.1) видно, что при уменьшении коэффициента пульсации на реальной нагрузке за счет использования фильтра,  $k_{сгл}$  увеличивается. Соответственно, чем больше значение  $k_{сгл}$ , тем эффективнее происходит сглаживание сигнала с выпрямительной схемы (ВС).

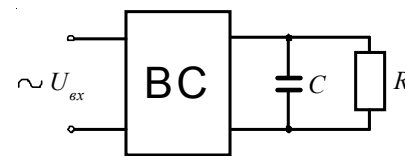
Сглаживающие фильтры бывают одноэлементные ( $L$  или  $C$ ), двухэлементные ( $\Gamma$ -образные  $LC$ - и  $RC$ - фильтры), фильтры с резонансными контурами. Далее представлены схемы включения перечисленных фильтров и эффективность их работы:

### 1) индуктивный фильтр



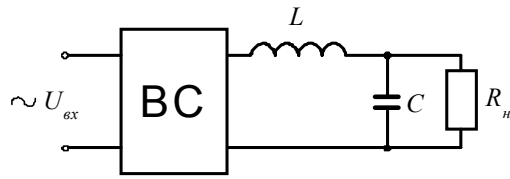
$$k_{сгл} = \frac{m \cdot \omega \cdot L}{R_n}$$

### 2) емкостный фильтр



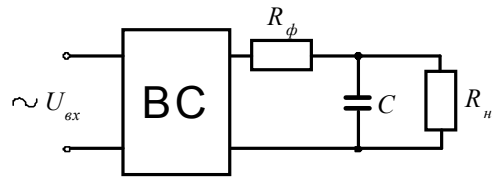
$$k_{сгл} = \frac{4 \cdot m \cdot \omega \cdot C \cdot R_n}{m^2 - 1}$$

3) Г-образный LC-фильтр



$$k_{cgl} = m^2 \cdot \omega^2 \cdot L \cdot C - 1$$

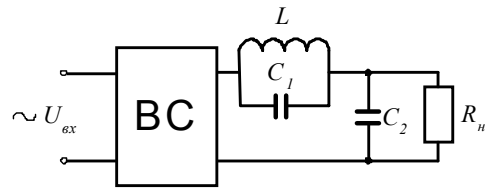
4) Г-образный RC-фильтр



$$k_{cgl} = m \cdot \omega \cdot C \cdot R_\phi$$

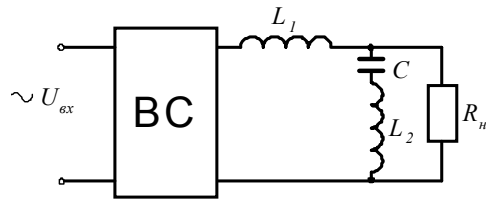
5) фильтры с резонансными контурами

а) фильтр с параллельным резонансным контуром



$$k_{cgl} = Z_{конт} \cdot m \cdot \omega \cdot C_2$$

б) фильтр с последовательным резонансным контуром



$$k_{cgl} = \frac{m \cdot \omega \cdot L_1}{Z_{конт}}$$

Из представленных выражений для  $k_{cgl}$  фильтров, можно определить область применения каждого фильтра. Коэффициент сглаживания индуктивного фильтра будет высоким при малом сопротивлении  $R_n$ , поэтому индуктивные фильтры применяются при больших токах нагрузки. В отличие от индуктивного фильтра,  $k_{cgl}$  емкостного прямо пропорционален  $R_n$ . Чем больше  $R_n$ , тем выше коэффициент сглаживания, поэтому емкостные фильтры применяются при малых токах нагрузки.

Коэффициент сглаживания Г-образных LC и RC фильтров не зависит от сопротивления нагрузки, а только лишь от значений индуктивности L и емкости C или сопротивления  $R_\phi$  и емкости C фильтров. Поэтому данный тип фильтров имеет широкое применение в устройствах электропитания. Необходимо отметить, что Г-образный RC фильтр, по сравнению с Г-образным LC-фильтром, наиболее простой и дешевый. А его основным недостатком является рассеивание активной мощности на сопротивлении фильтра  $R_\phi$ .

В фильтрах с резонансными контурами на частоте резонанса сопротивление контура  $Z_{конт}$  очень большое (гармоника не проходит на нагрузку), следовательно,  $k_{cgl}$  будет высоким.

В случае, когда фильтр содержит n цепочно-включенных фильтров (сложный фильтр), коэффициент сглаживания будет определяться произведением  $k_{cgl}$  каждого фильтра:

$$k_{cgl} = \prod_{i=1}^n k_{cgl_i} . \quad (4.2)$$

**В лабораторной работе № 5** проводится исследование работы индуктивного, емкостного и Г-образных LC и RC фильтров с построением временных диаграмм напряжений и токов. Результатом выполненной работы является сравнительный анализ работы сглаживающих фильтров. В качестве выпрямительной схемы используется однофазная мостовая схема выпрямления (рис. 1.2, в). Для схем выпрямления с индуктивным и емкостным фильтрами необходимо дополнительно построить зависимость  $k_{cgl}(R_n)$ .

### Контрольные вопросы

1. Что такое коэффициент сглаживания?
2. Каким образом определяется значение коэффициента сглаживания для различных видов сглаживающих фильтров?
3. Каким образом определяется коэффициент сглаживания сложных фильтров?
4. Из выражений для коэффициента сглаживания назовите область применения приведенных выше схем сглаживающих фильтров?

## 5. СТАБИЛИЗАТОРЫ НАПРЯЖЕНИЯ

Современные устройства автоматики, телемеханики и связи предъявляют жесткие требования к постоянству питающих напряжений. Устройства, предназначенные для автоматического поддержания постоянства напряжения, называются стабилизаторами напряжения. Стабилизатор включается в канал передачи от источника к потребителю и должен поддерживать напряжение в заданных пределах при воздействии различных дестабилизирующих факторов: изменении напряжения источника электроэнергии, тока и нагрузки, частоты, температуры окружающей среды и т.д.

В качестве регулирующего элемента стабилизатора используются приборы с нелинейной вольт-амперной характеристикой или управляемые приборы, изменяющие свое сопротивление при появлении определенных воздействий. Применяются электромеханические, электромагнитные, полупроводниковые и другие регулирующие элементы. Методы стабилизации разделяются на параметрические и компенсационные.

*Параметрические*, основанные на таком выборе схемы включения и параметров нелинейных или управляемых сопротивлений, при которых относительные изменения выходного напряжения оказываются меньше относительных изменений входного напряжения: *РЭ* обычно включается параллельно нагрузке, последовательно с ним включается линейное сопротивление (*ЛЭ*), на котором гасится избыток напряжения и которое защищает нелинейное сопротивление от перегрузки (рис. 5.1)

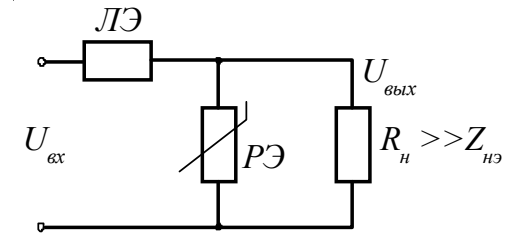


Рис. 5.1. Схема параметрического стабилизатора напряжения

*Компенсационные*, в которых производится измерение разности между фактическим значением выходного напряжения и, в зависимости от величины и знака этой разности, автоматически оказывается такое воздействие на элементы стабилизатора, при котором измеренная разность уменьшается до допустимого предела; регулирующий элемент в большинстве случаев включается последовательно с нагрузкой.

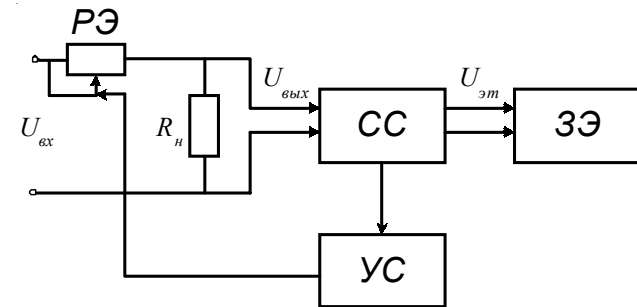


Рис. 5.2. Функциональная схема компенсационного стабилизатора напряжения

Компенсационные стабилизаторы представляют собой замкнутую систему автоматического регулирования с обратной связью. Рассмотрим принцип работы компенсационного стабилизатора напряжения (см. рис. 5.2).  $U_{вх}$  — входное напряжение, передается на выход ( $R_n$ ) через последовательно включенное сопротивление регулирующего элемента ( $PЭ$ ).  $U_{вых}$  — подается

на один из входов схемы сравнения ( $CC$ ), на второй вход подается эталонное напряжение  $U_{эм}$  (напряжение постоянное по величине) с задающего элемента ( $ЗЭ$ ).  $CC$  непрерывно сравнивает эти две величины и если между ними под влиянием дестабилизирующих факторов возникает разница, то на выходе  $CC$  вырабатывается сигнал рассогласования, который поступает на усилитель (усиливается) и воздействует на регулирующий элемент ( $РЭ$ ), изменяя его сопротивление таким образом, чтобы сигнал рассогласования уменьшился до 0.

Простейшим компенсационным стабилизатором является эмиттерный повторитель, на базу которого подается эталонное напряжение (рис. 5.3).

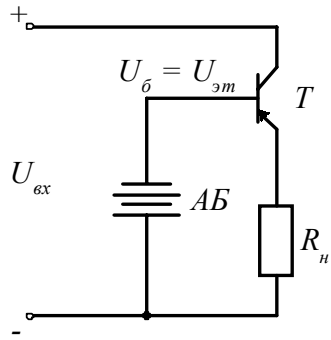


Рис. 5.3. Схема компенсационного стабилизатора на одном триоде

В данной схеме регулирующим элементом ( $РЭ$ ) является сопротивление эмиттер коллектор, в качестве задающего элемента ( $ЗЭ$ ) служит аккумуляторная батарея  $АБ$ . Схемой сравнения ( $CC$ ) является сопротивление база эмиттер.

В этой схеме  $U_{вх} = U_б = U_{аб}$ . Предположим, что напряжение  $U_{вх}$  уменьшилось. В этом случае уменьшается потенциал на эмиттере, разница потенциалов база эмиттер увеличивается, триод начинает открываться и  $U_{вх}$  восстанавливается до исходного значения. Схема не используется в

практике, так как использование аккумуляторной батареи в качестве  $ЗЭ$  достаточно дорого.

В качестве  $ЗЭ$  применяется параметрический стабилизатор на кремниевом стабилитроне, и при этом схема будет иметь следующий вид (рис. 5.4):

Напряжение на триода будет оставаться неизменным, и равным напряжению на кремниевом стабилитроне  $U_б = U_c$ . Сопротивление базы  $R_б$  в этом случае используется как линейный элемент параметрического стабилизатора.

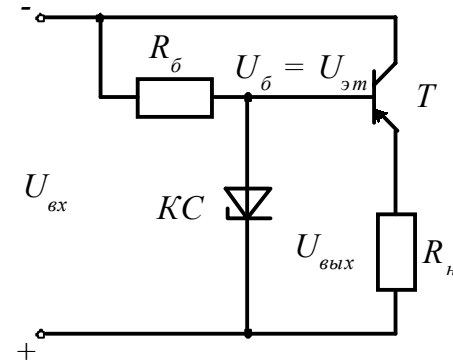


Рис. 5.4. Схема компенсационного стабилизатора с параметрическим стабилизатором напряжения на кремниевом стабилитроне

Для получения больших мощностей и токов в нагрузке в качестве регулирующего элемента применяется составной триод (рис. 5.5), который имеет высокий коэффициент усиления по току:

$$\beta_{экр} = \beta_1 \cdot \beta_2 \cdot \beta_3, \quad (5.1)$$

где  $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  — коэффициенты усиления по току триодов  $T_1, T_2, T_3$ .

Схема компенсационного стабилизатора с использованием составного триода составным будет иметь вид, показанный на рис. 5.6. Такая схема позволяет получить ток в нагрузке амперы и десятки ампер.

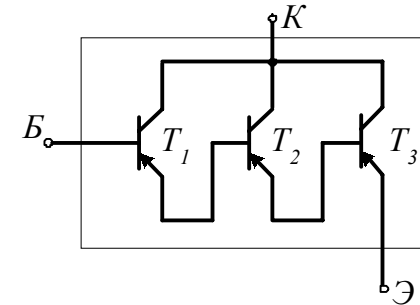


Рис. 5.5. Схема соединения трех триодов в составной триод

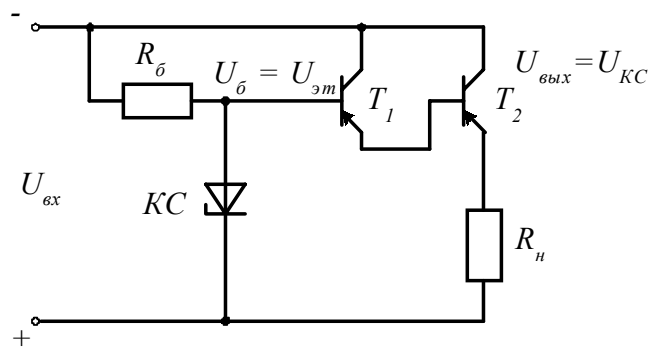


Рис. 5.6. Схема компенсационного стабилизатора с составным триодом

Недостатком рассмотренных схем является малый коэффициент стабилизации, так как отсутствует усилитель сигнала рассогласования. Для устранения этого недостатка в схеме компенсационного стабилизатора используется усилитель сигнала рассогласования (рис. 5.7)

Регулирующим элементом является переход эмиттер коллектор  $T_1$ . Задающим элементом является параметрический стабилизатор, выполненный на кремниевом стабилитроне ( $КС$ ) и со-

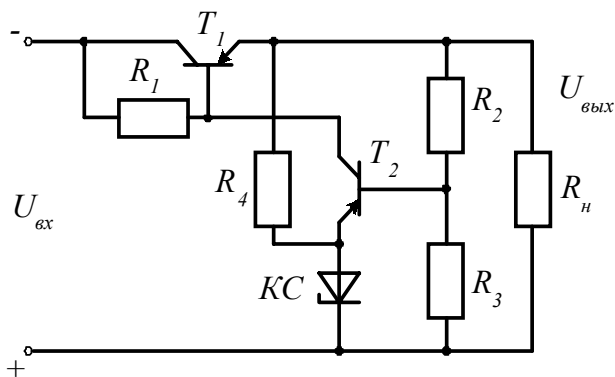


Рис. 5.7. Схема компенсационного стабилизатора с усилителем сигнала рассогласования

противление  $R_4$ . Эталонное напряжение подается на эмиттер  $T_2$ . На базу  $T_2$  подается выходное напряжение через делитель напряжения  $R_2$  и  $R_3$  следовательно, схемой сравнения является база эмиттер  $T_2$ . Усилитель сигнала рассогласования выполнен на  $T_2$  и  $R_1$ .

Предположим, что  $U_{вх}$  увеличится. В начальный момент  $U_{вых}$  также несколько увеличится за счет дополнительного падения напряжения на  $R_н$ . Увеличение  $U_{вых}$  через делитель цепи обратной связи  $R_2$  и  $R_3$  подается на базу  $T_2$ . На эмиттере  $T_2$  потенциал остается неизменным, следовательно разница потенциалов эмиттер-база возрастет и  $T_2$  начнет открываться. Увеличение тока в цепи  $T_2$  приведет к уменьшению потенциала на базе  $T_1$ , а следовательно к уменьшению разницы потенциалов эмиттер-база  $T_1$ . Триод  $T_1$  начнет закрываться, а сопротивление верхнего плеча делителя увеличится. Падение напряжения на верхнем плече тоже увеличится, а на нижнем — уменьшится, и величина  $U_{вых}$  восстановится с заданной степенью точности. Таким образом, отрицательная обратная связь так влияет на изменение сопротивления верхнего плеча делителя, что напряжение на нижнем плече остается постоянным.

Рассмотрим работу схемы при изменении  $R_н$  (увеличении). Вначале верхнее плечо делителя остается неизменным, а  $U_{вых}$  увеличится. Далее порядок протекания процессов аналогичен ранее рассмотренному случаю. Таким образом, стабилизация напряжения на выходе компенсационного стабилизатора осуществляется при наличии дестабилизирующих факторов, как с входной части схемы, так и со стороны нагрузки.

Качество работы стабилизатора можно охарактеризовать величиной выходного сопротивления и частными коэффициентами стабилизации выходного напряжения по входному напряжению ( $k_U$ ) и по току нагрузки ( $k_I$ ):

$$k_U = \frac{\frac{\Delta U_{вх}}{U_{вых}}}{\frac{\Delta U_{вых}}{U_{вых}}}, \quad (5.2)$$

$$k_I = \frac{\frac{\Delta I_H}{I_H}}{\frac{\Delta U_{\text{вых}}}{U_{\text{вых}}}}. \quad (5.3)$$

**В лабораторной работе № 6** проводится исследование работы компенсационного стабилизатора (см. рис. 5.7) в двух режимах: при увеличении  $U_{\text{вх}}$  и при изменении  $I_H$ . В ходе выполнения работы необходимо построить зависимости  $U_{\text{вых}}(U_{\text{вх}})$ ,  $i_{KC}(U_{\text{вх}})$ ,  $i_{\text{сТ2}}(U_{\text{вх}})$  и  $U_{\text{вых}}(I_H)$ , по формулам (5.2) и (5.3) определить величину  $k_U$  и  $k_I$ . Результатом выполненной работы является анализ работы компенсационного стабилизатора при воздействии на него дестабилизирующих факторов.

#### Контрольные вопросы

1. Каково назначение стабилизатора напряжения?
2. Изобразите функциональные схемы параметрического и компенсационного стабилизаторов напряжения и объясните принцип их действия?
3. Изобразите схему компенсационного стабилизатора с составным триодом? С какой целью в этой схеме используется составной триод?
4. Изобразите схему компенсационного стабилизатора с усилителем сигнала рассогласования и объясните принцип его работы?
5. Каким образом оценивается качество работы стабилизатора напряжения?

## 6. ПРЕОБРАЗОВАТЕЛИ ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ. ИНВЕРТОРЫ

Преобразователи постоянного напряжения (ППН) используются для преобразования постоянного тока в переменный или постоянного в постоянный, но другого уровня напряжения. Преобразование постоянного тока в переменный называется инвертирование, а постоянного тока в постоянный ток другой величины называется конвертирование, соответственно существуют ППН-инверторы и ППН-конверторы. Эти преобразователи используются в стационарных установках для резервирования питания от аккумуляторных батарей, а в переносных объектах — для получения нескольких уровней напряжения от одной батареи. Вместе с аккумуляторными батареями ППН являются резервными источниками электропитания стационарных устройств ЖАТС, когда пропадет внешнее энергоснабжение.

Рассмотрим подробнее процесс инвертирования, который состоит из двух этапов:

1. Преобразование постоянного тока в импульсы (прямоугольной формы);
2. Трансформирование полученного переменного напряжения до необходимого уровня.

Схема наиболее простого преобразования постоянного тока в прямоугольные импульсы имеет вид однотактного инвертора (рис. 6.1).

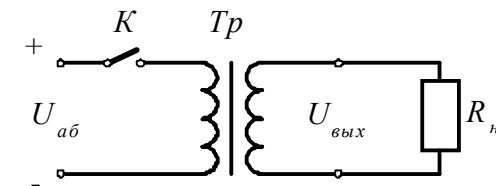


Рис. 6.1. Схема однотактного инвертора

Рассмотрим работу однотактного инвертора с использованием схемы замещения трансформатора (рис. 6.2)

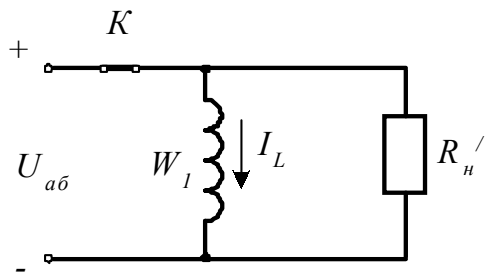


Рис. 6.2. Схема однотактного инвертора со схемой замещения трансформатора

В момент замыкания ключа  $K$  (участок  $0-t_1$ ) напряжение на обмотке трансформатора  $W_1$  равно напряжению аккумуляторной батареи  $U_{ab}$  (рис. 6.3). В момент размыкания ключа  $K$  (участок  $t_1-t_2$ ) через индуктивность  $W_1$  протекает ток  $I_L$ , обусловленный наличием в катушке ЭДС самоиндукции, направленной в сторону противоположную изменению тока. Величина напряжения на нагрузке при этом составит  $I_L R_n$  (см. рис. 6.3).

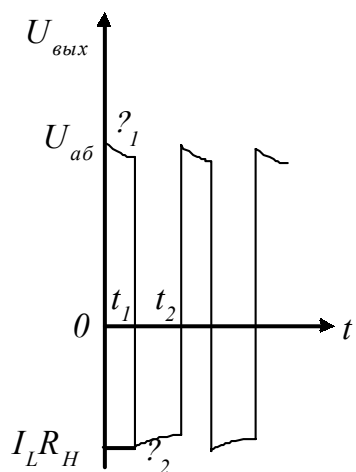


Рис. 6.3. Временная диаграмма работы однотактного инвертора

Очевидно, что  $\tau_1 \neq \tau_2$  поэтому форма импульсов будет несимметрична, имеет место подмагничивание сердечника. Амплитуда отрицательного полупериода будет зависеть от величины нагрузки  $R_n$ . Недостатком однотактной схемы является то, что ток от аккумуляторной батареи потребляется, когда замкнут ключ, т.е. в течение одного полупериода. Для устранения этого недостатка используется двухтактный инвертор, схема которого представлена на рис. 6.4.

Двухтактный инвертор содержит два однотактных инвертора, ключи  $K_1$  и  $K_2$  всегда имеют противоположные состояния. Трансформатор  $Tr$  имеет в первичной цепи

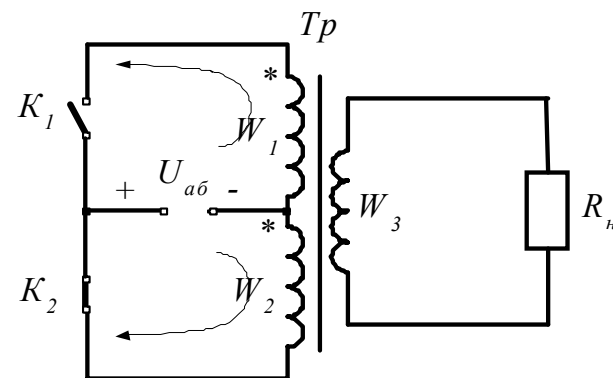


Рис. 6.4. Схема двухтактного инвертора

две полуобмотки  $W_1 = W_2$ , которые включены в одном направлении.

Предположим, что замкнут  $K_2$ . Тогда ток от аккумуляторной батареи протекает по полуобмотке  $W_2$  и на выходе образуется импульс одной полярности. Затем положение ключей меняется ( $K_1$  замкнут) и ток протекает через  $W_1$ . Во время каждого периода изменяется направление протекания тока, изменяется магнитный поток на  $180^\circ$  и напряжение на выходе имеет импульсы одинаковой формы, но противоположной полярности (рис. 6.5).

В ППН в качестве ключей используются полупроводниковые элементы: транзисторы и тиристоры. Схема ППН с использованием полупроводниковых ключей представляет собой мультивибратор с индуктивными связями (рис. 6.6).

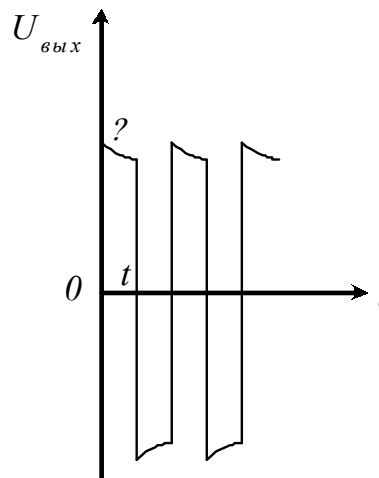


Рис. 6.5. Временная диаграмма работы двухтактного инвертора

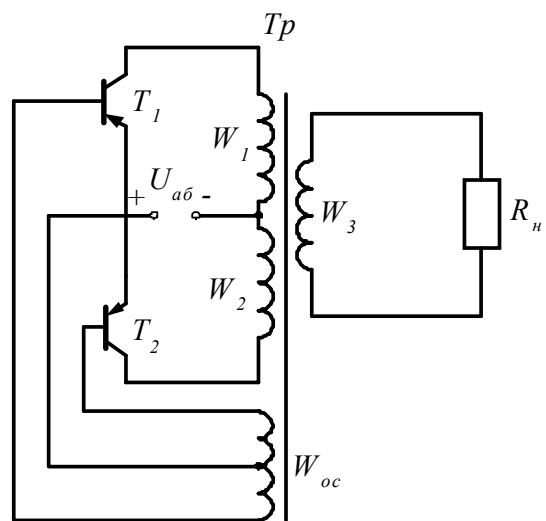


Рис. 6.6. Схема ППН в виде мультивибратора с индуктивными связями

ППН, представленный на рис. 6.6, представляет из себя двухтактный транзисторный усилитель, выполненный на двух транзисторах  $T_1$  и  $T_2$  и силовом трансформаторе  $Tr$ . С выхода напряжение подается на вход усилителя за счет витков обратной связи  $W_{oc}$  и начинается генерация. Транзисторы, работающие в ключевом режиме, поочередно переключаются, что вызывает на выходе ППН импульсы прямоугольной формы. Такая форма импульсов обусловлена также использованием в трансформаторе сердечника с прямоугольной петлей гистерезиса. Данная схема применяется при малых мощностях, так как сердечник находится в насыщении и лежит в основе конструкции транзисторного преобразователя с самовозбуждением (рис. 6.7).

При подключении преобразователя к источнику напряжения  $U_{ab}$  на резисторе  $R_1$  создается падение напряжения, которое через обмотки  $W_0$  прикладывается к базам обоих транзисторов и открывает их. В коллекторных цепях и обмотках  $W_k$  возникают токи  $i_{K1}$  и  $i_{K2}$ . Вследствие некоторого отличия параметров транзисторов ток одного из них будет больше другого, например,

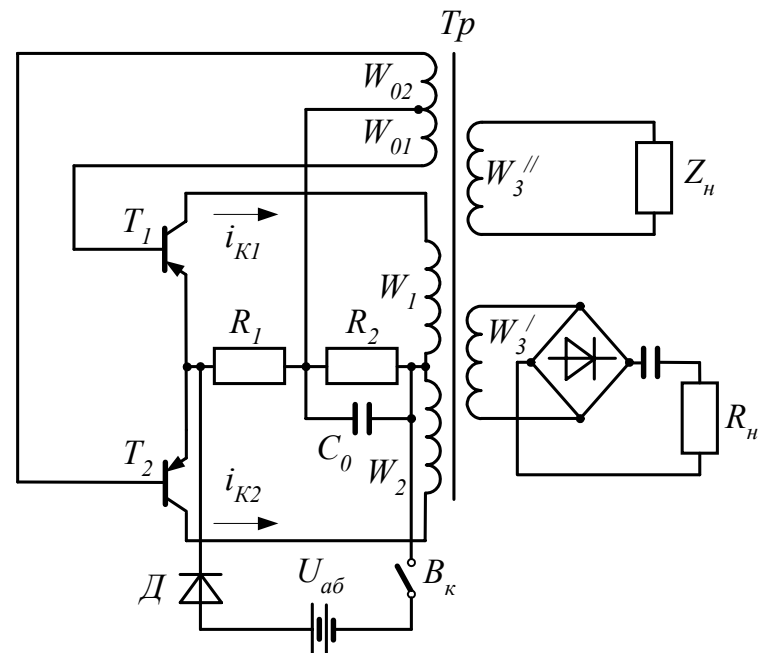


Рис. 6.7. Схема транзисторного преобразователя с самовозбуждением

$i_{K1} > i_{K2}$ . Разностный ток  $i_{K1} - i_{K2}$  создает магнитный поток, который наведет ЭДС  $e_{w0}$  в обмотках  $W_0$ . Эти обмотки должны быть включены таким образом, чтобы на базе транзистора  $T_1$  было отрицательное смещение  $U_{01} = - (U_{R1} + e_{w01})$ , а на базе  $T_2$  появилось бы положительное смещение  $U_{02} = + (e_{w02} - U_{R1})$ . Благодаря этому  $T_1$  откроется полностью, а  $T_2$  закроется. При этом к переходу эмиттер-коллектор  $T_2$  будет приложено примерно удвоенное напряжение источника  $2U_{ab}$ .

Величина обратной связи выбирается такой, чтобы открытый транзистор работал в области насыщения, а закрытый переходил в режим отсечки тока. Когда коллекторный ток  $T_1$  приближается к максимальному значению, наступает насыщение сердечника трансформатора и прекращается наведение ЭДС в его обмотках обратной связи. Из-за этого  $T_1$  начинает закрыв-



ваться, а  $T_2$  — открывается. Уменьшение тока  $i_{K1}$ , вызывает наведение ЭДС противоположной полярности и  $T_1$  полностью закрывается, а  $T_2$  — открывается. Процесс переключения транзисторов повторяется с частотой, зависящей от времени перемagnetизации сердечника и скорости рассасывания носителей в транзисторах, а также от величины напряжения источника питания и тока нагрузки. Кривая генерируемого напряжения близка к прямоугольной, благодаря чему повышается стабильность и уменьшается пульсация выпрямленного напряжения на выходе. Это позволяет обойтись конденсатором небольшой емкости ( $\sim 20$  мкФ) для фильтрации выпрямленного напряжения. Наличие индуктивности в фильтре ухудшает работу преобразователя.

Конденсатор  $C_0$ , заряжаясь в момент подключения преобразователя к источнику питания, увеличивает ток в  $R_1$  и падение напряжения на нем; к базам транзисторов прикладывается увеличенное отрицательное смещение, обеспечивающее надежный пуск преобразователя под нагрузкой и при пониженной температуре.

Диод  $D$  защищает транзисторы в случае ошибочного подключения полюсов источника питания.

**В лабораторной работе № 7** проводится исследование работы транзисторного преобразователя с самовозбуждением (см. рис. 6.7) с построением временных диаграмм  $i_{K1}(t)$ ,  $i_{K2}(t)$ ,  $U_{a0}(t)$ ,  $U_{W3}'(t)$ . Результатом выполненной работы является анализ временных диаграмм работы транзисторного преобразователя с самовозбуждением.

### **Контрольные вопросы**

1. Что такое процесс инвертирования и конвертирования сигнала?
2. Изобразите схему однотактного инвертора и объясните принцип его работы?
3. Изобразите схему двухтактного инвертора и объясните принцип его работы?
4. Изобразите схему преобразователя постоянного напряжения в виде мультивибратора с индуктивными связями и объясните принцип его работы?
5. Изобразите схему транзисторного преобразователя с самовозбуждением и объясните принцип его работы?

### **Рекомендуемая литература**

1. Тюрморезов В.Е. Источники электропитания устройств автоматики, телемеханики и связи железнодорожного транспорта. — М.: Транспорт, 1978.
2. Бурков А.Т. Электронная техника и преобразователи. — М.: Транспорт, 1999.
3. Фельдман А.Б., Частоедов Л.А. Электропитание устройств связи железнодорожного транспорта. — М.: Транспорт, 1980.
4. Степанов Н.М., Вельтистов П.К., Электропитание устройств СЦБ. — М.: Транспорт, 1976.
5. Казаринов И.А. Проектирование электропитающих установок предприятий проводной связи. — М.: Связь, 1974.

**ЭЛЕКТРОПИТАНИЕ УСТРОЙСТВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОЙ  
АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНИКИ И СВЯЗИ**

Руководство к выполнению лабораторных работ № 1–7

Редактор *В.К. Тихомичева*  
Компьютерная верстка *Н.Ф. Цыганова*

---

Тип. зак.	Изд. зак. 428	Тираж 700 экз.
Подписано в печать 08.09.04	Гарнитура Times.	Офсет
Усл. печ. л. 2,25		Формат 60×90 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>

---

Издательский центр РГОТУПСа,  
125993, Москва, Часовая ул., 22/2

Типография РГОТУПСа, 125993, Москва, Часовая ул., 22/2