

Министерство образования Республики Беларусь

**УО «МОГИЛЕВСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ  
УНИВЕРСИТЕТ ПРОДОВОЛЬСТВИЯ»**

Кафедра физики

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПРЯМЛЕНИЯ  
СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО  
ОСЦИЛЛОГРАФА**

Методические указания к лабораторной работе № 13  
по разделу "Электричество и магнетизм" курса общей физики  
для студентов всех специальностей дневной и заочной формы обучения

Могилев 2010

Рассмотрены и рекомендованы к изданию  
на заседании кафедры физики  
Протокол № 8 от 11 мая 2010 г.

Составитель:  
ст. преподаватель Каранчук Д. Я.

Рецензент:  
кандидат физико – математических наук, доцент УО МГУП А. С. Скапцов.

УДК 532.516  
©УО «Могилевский государственный  
университет продовольствия», 2010

## ЛАБОРАТОРНАЯ РАБОТА №13

**ЦЕЛЬ РАБОТЫ:** исследовать процесс выпрямления переменного тока с помощью полупроводниковых диодов. Изучить изменение выпрямленного тока в зависимости от различных сглаживающих фильтров. Рассчитать КПД выпрямителя. Научиться работать с осциллографом.

**ПРИБОРЫ И ПРИНАДЛЕЖНОСТИ:** осциллограф сервисный универсальный ОСУ–10А/ОСУ–10В, два диода Д7Ж, резистор, понижающий трансформатор, два электролитических конденсатора, два мультиметра DT9205А, соединительные провода.

### ТЕОРЕТИЧЕСКОЕ ВВЕДЕНИЕ

#### 1 НАЗНАЧЕНИЕ ЭЛЕКТРОННОГО ОСЦИЛЛОГРАФА. ОБЩАЯ ХАРАКТЕРИСТИКА ПЕРИОДИЧЕСКИХ ПРОЦЕССОВ

Для исследования быстро изменяющихся процессов используют электронный осциллограф. Это универсальный прибор и с его помощью можно измерить силу тока, напряжение, изменение их во времени, сдвиг фаз между ними, сравнивать частоты и амплитуды различных переменных напряжений. Применяя соответствующие преобразователи, с помощью осциллографа исследуют и неэлектрические процессы (малые промежутки времени, кратковременные давления и т.д.).

Периодические процессы – это процессы, характеризующиеся некоторой физической величиной  $F(t)$ , периодически изменяющейся со временем  $F(t) = F(t+T)$ , где  $T$  – период функции  $F(t)$ , т. е. промежуток времени, по истечении которого весь процесс повторяется сначала.

Простейшим периодическим синусоидальным процессом является синусоидальный ток, мгновенное значение силы тока  $i$  которого в момент времени  $t$  определяется соотношением

$$i = I_m \sin(\omega t + \varphi_0), \quad (1)$$

где  $I_m$  – амплитуда силы тока (максимально допустимое значение силы тока);

$\omega = 2\pi f$  – циклическая (круговая) частота колебаний (показывает число колебаний за  $2\pi$  секунд);

$f$  – линейная частота (показывает число колебаний за одну секунду);

$\varphi_0$  – начальная фаза колебаний (задает значение  $i$  в начальный момент времени);

$\omega t + \varphi_0$  – фаза колебания (задает значение силы тока  $i$  в любой момент времени).

Периодическим процессом, но не синусоидальным, является выпрямленный синусоидальный ток, т.е. ток, возникающий под действием переменного синусоидального напряжения

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (2)$$

в цепи, содержащей выпрямитель (диод).

## 2 ЭЛЕКТРОННО-ДЫРОЧНЫЙ ПЕРЕХОД В ПОЛУПРОВОДНИКАХ.

Контакт разнородных проводников обладает преимущественно односторонней проводимостью: его сопротивление току в одном направлении (пропускном) меньше, а в другом (запорном) – больше. Особенно сильно этот эффект выражен на границе дырочного p и электронного n полупроводника. Такой контакт называют электронно–дырочным, или p–n–переходом. Электронно–дырочный переход невозможно получить механическим прижатием двух полупроводников p– и n– типа. Его получают, например, введением донорной и акцепторной примесей с разных сторон в чистый монокристалл полупроводника. Для четырехвалентных германия или кремния донором (обеспечивающим электронную проводимость) могут служить пятивалентные мышьяк или фосфор, а акцептором (обеспечивающим дырочную проводимость) – трехвалентные индий или бор. В пластинку германия с одной стороны вваривают шарик индия, который при нагревании в процессе сваривания диффундирует в германий на некоторую глубину (рис. 1), с другой – оловянный шарик (электрод с примесью мышьяка), который также диффундирует в германий. В результате в одной части полупроводникового кристалла возникает электронная проводимость (n-область), а в другой – дырочная (p-область). Между этими областями расположен тонкий (порядка  $10^6$ – $10^7$  м) переходный слой (p–n–переход).

Свойства p–n–перехода существенно отличаются от свойств остальной части полупроводника. Вследствие теплового движения электроны из n–области диффундируют в p–область и там рекомбинируют с дырками, а дырки из p–области диффундируют в n–область и рекомбинируют с электронами. В результате переходный слой на границе p и n–областей полупроводника сильно обедняется носителями тока: электронами и дырками. Кроме того, в n–области вблизи границы возникает объемный положительный заряд ионов донорной примеси (ранее он компенсировался отрицательным зарядом электронов проводимости), а в p–области — отрицательный заряд акцепторных ионов (ранее он был скомпенсирован зарядом дырок). Образуется двойной электрический слой (рис. 2), создающий контактное поле  $E_k$ , направленное от n– к p–области. Это поле препятствует дальнейшей диффузии.

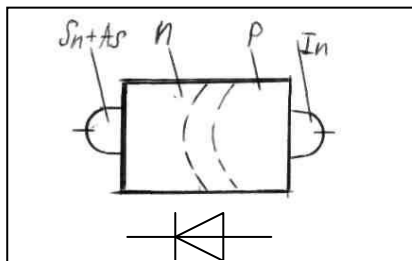


Рисунок 1 – Получение p–n– перехода и условное обозначение диода

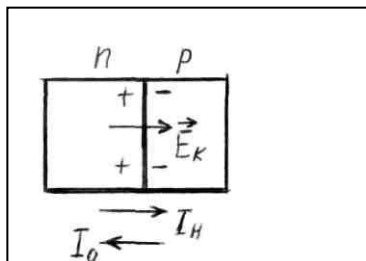


Рисунок 2 – Двойной запирающий слой

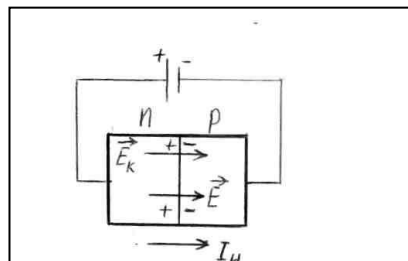


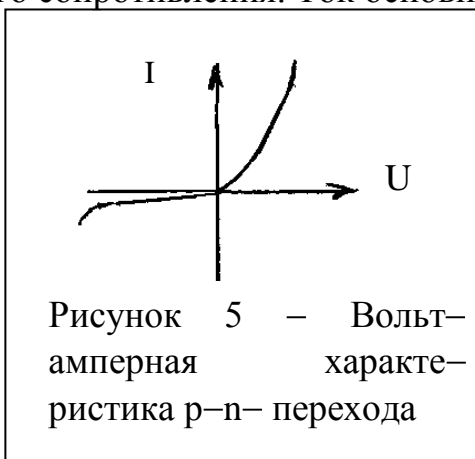
Рисунок 3–Включение p–n– перехода в обратном направлении

Оно выталкивает электроны в глубь электронного полупроводника, а дырки в глубь дырочного полупроводника, поддерживая зазор, своеобразный коридор между р- и n-областями, почти лишенный носителей тока.

Поэтому электрическое сопротивление р-n-перехода, несмотря на его малую ширину, во много раз больше сопротивления всей остальной части полупроводника. Через р-n-переход из n-области при тепловом движении могут прорваться только те электроны, энергия которых достаточна для преодоления контактного поля  $E_k$ . То же относится и к дыркам, диффундирующим из р-области. В результате создается некоторый диффузионный ток, текущий из р-области в n-область. Сила этого тока  $I_o$  сильно зависит от величины поля  $E_k$ .

В любом проводнике кроме основных носителей тока всегда имеется некоторое, как правило, небольшое количество не основных носителей, возникающих, например, в результате тепловой ионизации. Поэтому в n-области наряду с электронами проводимости (основными носителями) имеется небольшое количество дырок (не основных носителей), а в р-область кроме дырок – некоторое количество электронов. Контактное поле  $E_k$  способствует переходу не основных носителей через р-n-переход. В результате из n-области течет ток не основных носителей. Сила этого тока  $I_n$  слабо зависит от контактного поля. Она определяется количеством не основных носителей, образующихся в приконтактной области в единицу времени (все они и создают ток силой  $I_n$ ). При равновесии  $I_o=I_n$ , а полная сила тока в образце  $I=I_o+I_n=0$  (см. рис. 2).

Рассмотрим влияние внешнего электрического поля на свойства р-n-перехода. Включим образец в цепь источника тока, соединив n-область с положительным полюсом источника, а р-область — с отрицательным (рис. 3). Такое включение называют запорным (обратным). В этом случае поле  $E$ , созданное источником внутри переходного слоя (а оно будет довольно значительным ввиду большого сопротивления р-n-перехода), заметно усилит контактное поле  $E_k$ , что приведет к еще большему уменьшению концентрации дырок и электронов проводимости в переходном слое и, следовательно, к значительному увеличению его сопротивления. Ток основных носителей



практически прекратится. Через переход будет течь только ток не основных носителей, который, как отмечалось выше, практически не изменится. Сила тока  $I_n$  не основных носителей обычно весьма мала, так как мала их концентрация.

Если изменить полярность источника тока (рис. 4) (такое включение называют пропускным или прямым), то поле  $E$  частично или полностью компенсирует контактное поле  $E_k$  и обеспечит проникновение в переходный слой дырок и электронов проводимости. Сопротивление р–n–перехода уменьшится, а сила тока основных носителей  $I_o$  возрастет. Электроны проводимости из n–области и дырки из р–области, подходя к р–n–переходу, рекомбинируют, а из глубины полупроводника подходят все новые и новые носители тока, – в цепи течет ток.

Вольт–амперная характеристика р–n–перехода изображена на рисунке 5.

В пропускном направлении сила тока велика и быстро возрастает при увеличении напряжения. Так, для германия при площади контакта около  $1 \text{ мм}^2$  уже при напряжении  $1 \text{ В}$  сила тока становится более  $1 \text{ А}$ .

В запиорном направлении сила тока не превышает нескольких микроампер. С увеличением площади контакта сила тока в прямом направлении может достигать нескольких сотен ампер. Если в запиорном направлении значительно увеличить напряжение, то может произойти разрушение контакта, сила тока резко увеличится, произойдет электрический пробой.

С повышением температуры полупроводника возрастает концентрация не основных носителей и, следовательно, увеличивается сила тока в запиорном направлении. В основе принципа действия полупроводникового диода лежат свойства р–n–перехода. Условное обозначение диода на схеме приведено на рисунке 1 (треугольник направлен от р–области к n–области).

### 3 ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

В цепи переменного тока р–n–переход действует как выпрямитель. С изменением полярности и величины приложенного напряжения сопротивление перехода пульсирует, соответственно изменяется в цепи и сила тока. Так, если на резистор сопротивлением  $R_n$  подать синусоидальное напряжение (рис. 6, а),

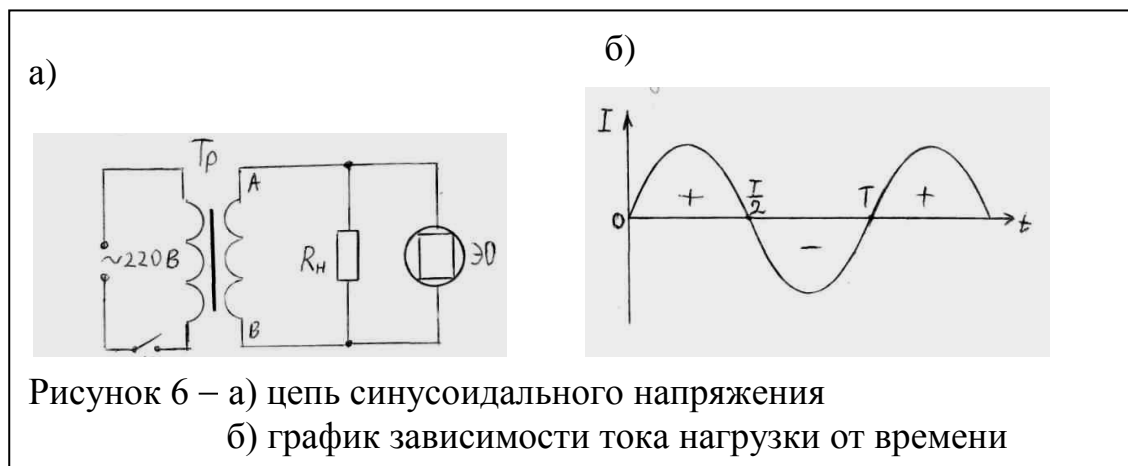
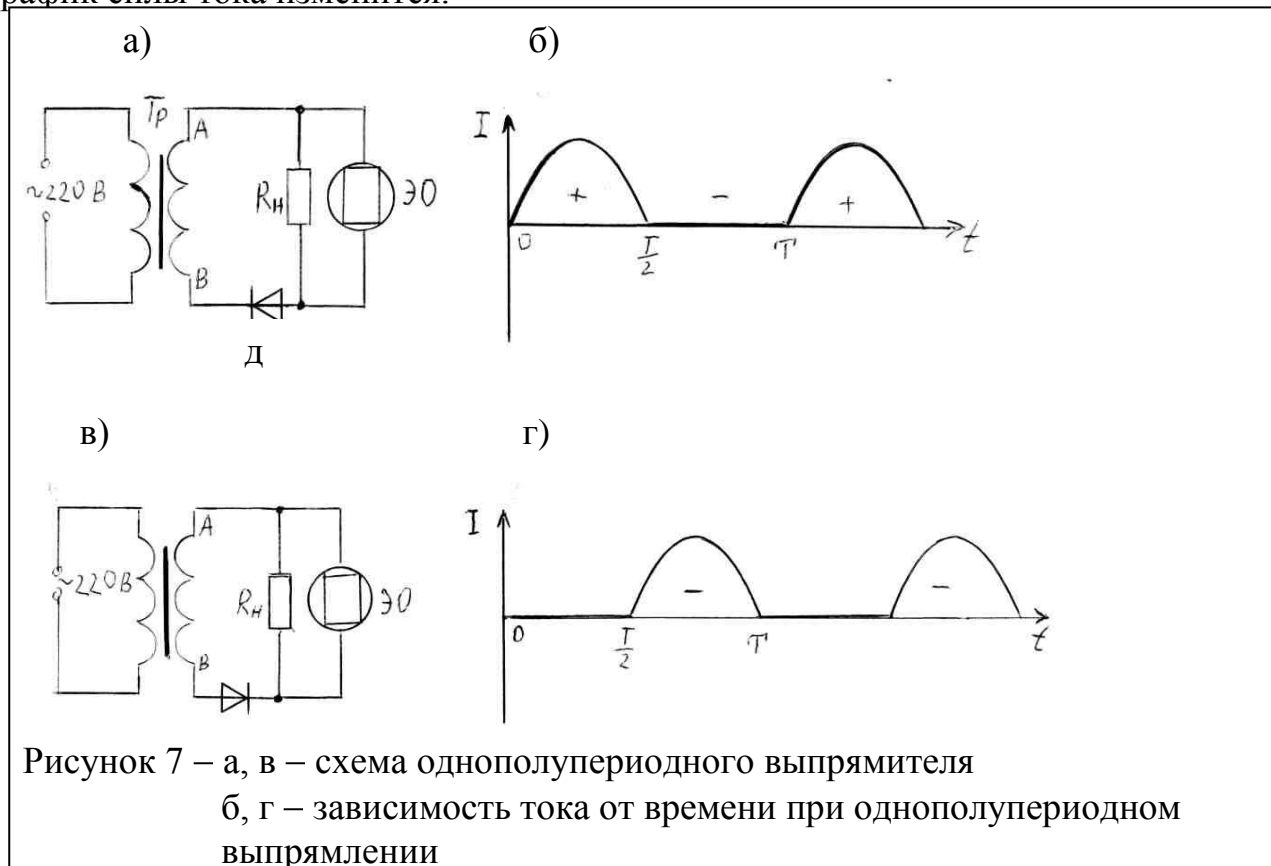


Рисунок 6 – а) цепь синусоидального напряжения

б) график зависимости тока нагрузки от времени

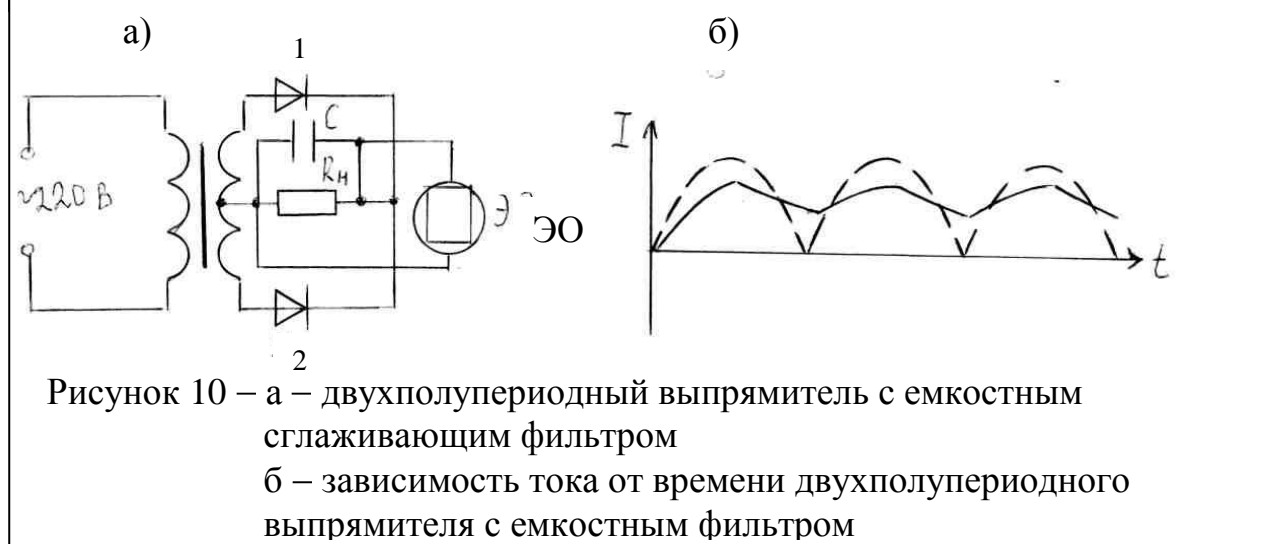
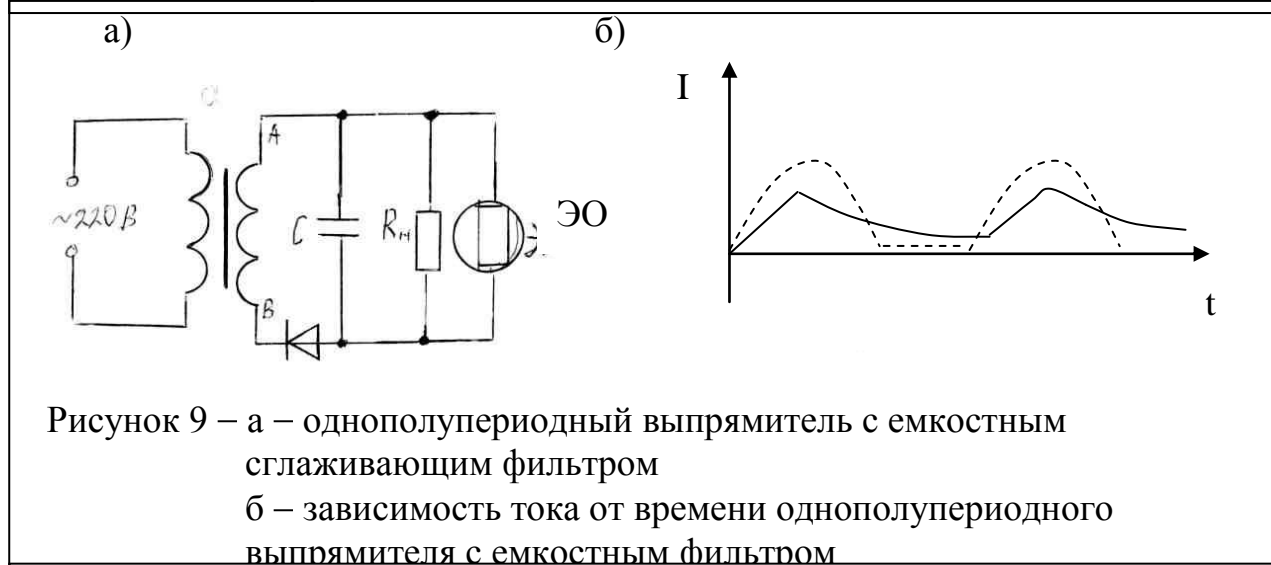
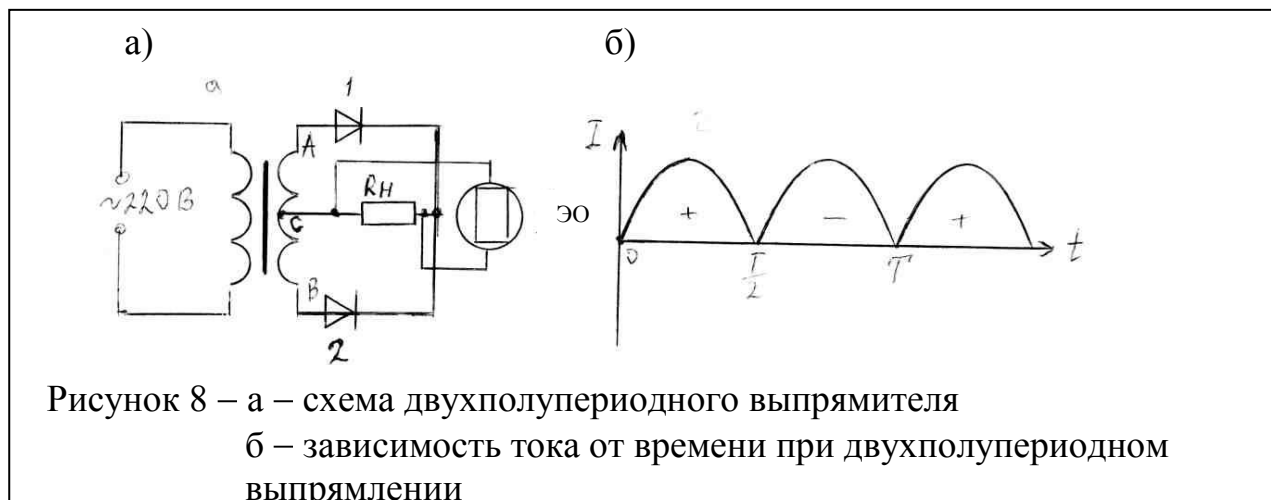
то на экране электронного осциллографа ЭО можно наблюдать изменение падения напряжения, а, следовательно, и силы тока в резисторе (рис. 6, б). При включении в цепь последовательно с резистором выпрямителя Д (рис. 7, а) график силы тока изменится.



В течение времени от нуля до  $T/2$  (действия положительного полупериода синусоиды) в точке А положительный потенциал, а в точке В – отрицательный. Поэтому к р-области подключен «плюс», а к п-области «минус». Диод включен в пропускном направлении и через нагрузку  $R_n$  течет прямой ток. В течение времени от  $T/2$  до  $T$  в точке А отрицательный потенциал, а в точке В – положительный (действует отрицательный полупериод синусоиды), к р-области подключен «минус», к п-области «плюс», поэтому диод включен в запирающем направлении и сила тока в нагрузке практически равна нулю. Так как напряжение во вторичной обмотке трансформатора синусоидальное, то ток в нагрузке пульсирующий (рис.7,б). Такой ток (одного направления) называют выпрямленным, а выпрямление – однополупериодным. Если диод включить по схеме (рис.7,в), то зависимость тока от времени представлена на рисунке 7, г.

Для двухполупериодного выпрямления, т.е. для получения в нагрузке выпрямленного тока в течение обоих полупериодов (рис. 8, б) можно использовать схему двухполупериодного выпрямителя со средней точкой, которая содержит два диода, включенных навстречу друг другу (рис.8, а). В ней  $R_n$  включается между общей точкой двух диодов и средней точкой вторичной обмотки трансформатора. В течение времени от нуля до  $T/2$  (рис. 8, а) в точке А будет положительный потенциал, а в точке В – отрицательный. В этом случае

диод 1 включен в пропускном направлении, а диод 2 включен в заперном направлении и ток течет от точки А через нагрузку  $R_H$  к средней точке С трансформатора потенциал которой равен нулю. В течение времени от  $T/2$  до  $T$  полярность в точках А и В изменяется и диод 1 оказывается включенным в заперном направлении, а диод 2 – в пропускном и ток течет от точки В через нагрузку  $R_H$  к точке С. Далее процесс повторяется. Следовательно, через нагрузку  $R_H$  течет ток в одном направлении в каждом полупериоде (рис. 8, б).





## 4 СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

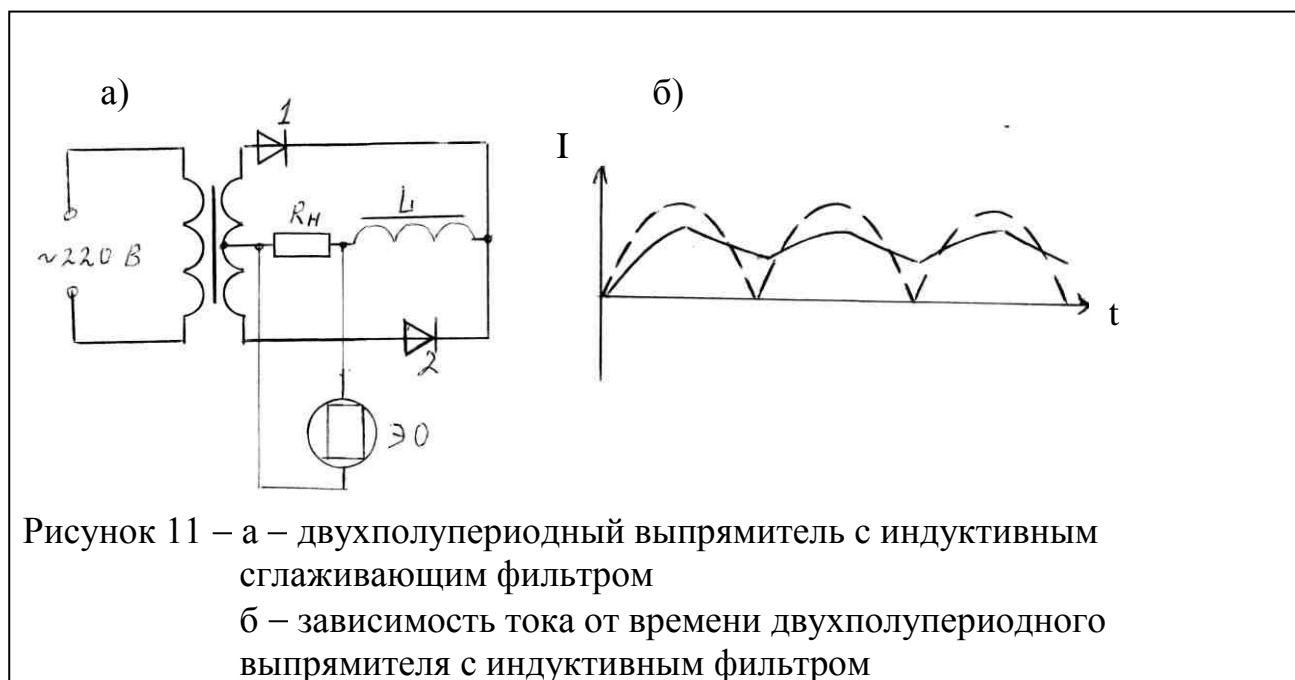
Сглаживание пульсаций выпрямленного тока осуществляется с помощью электрических фильтров, состоящих из конденсаторов и катушек индуктивностей. Сглаживание происходит за счет обратимых изменений энергии, накапливаемой в этих элементах фильтров.

Простейшим фильтром является конденсатор (емкостью  $C$ ), включенный параллельно нагрузке  $R_n$  (рис. 9, а). При росте напряжения в пропускном направлении конденсатор заряжается через сравнительно небольшое сопротивление выпрямителя. Когда напряжение падает, конденсатор разряжается через нагрузку  $R_n$ . Напряжение на конденсаторе убывает по экспоненциальному закону:

$$U = U_0 \exp(-t/(R_n C))$$

Чем больше величины  $R_n$  и  $C$ , тем медленнее происходит разряд конденсатора и тем медленнее убывает сила тока в нагрузке (рис. 9, б; штриховой линией изображен график силы тока в цепи без фильтра).

При двухполупериодном выпрямлении (рис. 10, а) эффект сглаживания с помощью конденсатора проявляется в большей степени (рис. 10, б).



Катушка с большой индуктивностью  $L$  (дроссель), включенная последовательно с нагрузкой  $R_n$  (рис. 11, а), сглаживает пульсации выпрямленного тока за счет возникающей в дросселе ЭДС самоиндукции, которая препятствует увеличению тока в цепи и поддерживает убывающий ток (рис. 11, б). Почти полное сглаживание пульсаций тока достигается с помощью комбинированных фильтров (рис. 12, а, б).

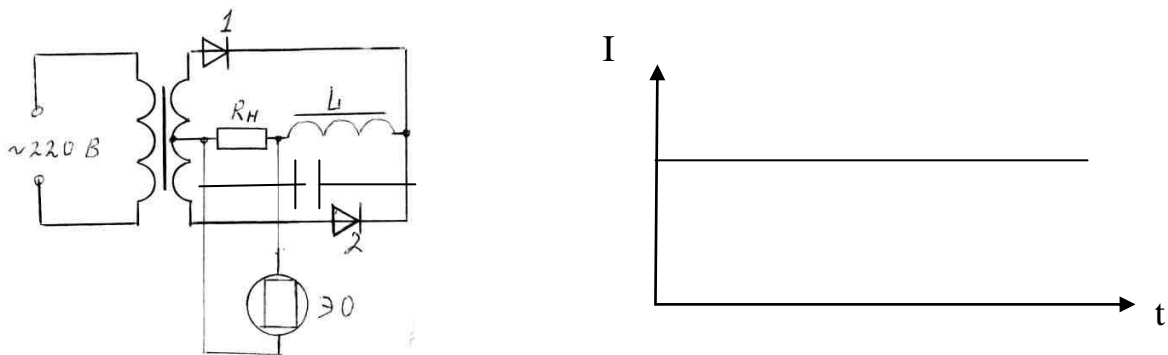


Рисунок 12 – а – двухполупериодный выпрямитель с комбинированным сглаживающим фильтром  
 б – зависимость тока от времени двухполупериодного выпрямителя с комбинированным фильтром

## 5 ДЕЙСТВУЮЩЕЕ ЗНАЧЕНИЕ СИНУСОИДАЛЬНОГО И ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ. СРЕДНЕЕ ЗНАЧЕНИЕ ВЫПРЯМЛЕННОГО ТОКА И НАПРЯЖЕНИЯ

За основу измерения переменного тока положено сопоставление его среднего теплового действия с тепловым действием постоянного тока. Действующим значением переменного тока называют такое значение постоянного тока, который, протекая через активное сопротивление  $R$ , выделяет такое же количество теплоты за время  $t$ , как и переменный ток  $i(t)$ , протекающий через то же сопротивление в течение того же интервала времени. Время  $t$  принимают равным периоду  $T$  синусоидального тока. В соответствии с законом Джоуля–Ленца для постоянного тока  $I_0$ :

$$Q_{пост} = I_0^2 RT. \quad (3)$$

Для переменного тока:

$$Q_{пер} = \int_0^T i^2 R dt, \quad (4)$$

где  $i$  – закон изменения силы тока с течением времени. Так как по определению  $Q_{пост} = Q_{пер}$ , то, приравняв правые части (3) и (4), получаем:

$$I_0 = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt}. \quad (5)$$

По аналогии вводят понятие действующего значения напряжения  $U_0$  для переменного напряжения  $u(t)$ . Закон Джоуля – Ленца в этом случае записывают в виде:

$$Q_{пост} = \frac{U_0^2}{R} T, \quad (6)$$

$$Q_{пер} = \int_0^T \frac{u^2}{R} dt. \quad (7)$$

Из (6) и (7) получаем:

$$U_{\partial} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u^2 dt}. \quad (8)$$

Для синусоидального тока, приняв  $\varphi_0=0$  и учитывая, что  $\omega=\frac{2\pi}{T}$  и

$\sin^2 \omega t = \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t)$  получаем:

$$\begin{aligned} I_{\partial} &= \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T I_m^2 \sin^2 \omega t dt} = \sqrt{\frac{I_m^2}{T} \int_0^T \frac{1}{2} (1 - \cos 2\omega t) dt} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T dt - \frac{1}{T} \int_0^T \cos \frac{4\pi}{T} t dt} = \\ &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \sqrt{1 - \frac{T}{T4\pi} \sin \frac{4\pi t}{T}} \Big|_0^T = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \end{aligned} \quad (9)$$

Аналогично выводится формула для действующего значения  $U_{\partial}$  синусоидального напряжения

$$u = U_m \sin \omega t, \quad (10)$$

$$U_{\partial} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}. \quad (11)$$

Такие же результаты были бы получены, если  $\varphi_0 \neq 0$ .

Вольтметры и амперметры, включенные в цепь переменного синусоидального тока, измеряют действующие значения напряжения и силы тока.

Из графиков зависимости выпрямленного тока нагрузки (рис. 7 б, г) и (рис. 8, б) видно, что напряжение постоянно по направлению, но не постоянно по величине. Пульсация напряжения (т.е. изменение по величине) говорит о наличии переменной составляющей в кривой выпрямленного напряжения и свидетельствует о некачественном (неполном) выпрямлении. Таким образом, напряжение на нагрузке  $u_{\text{вып}}$  представляет собой периодическую функцию, а поэтому может быть разложено в ряд Фурье, т.е. представлено в виде суммы постоянной составляющей  $U_{\text{пост}}$  и переменной  $u_n(t)$ :

$$u_{\text{вып}} = U_{\text{пост}} + u_n(t), \quad (12)$$

где 
$$U_{\text{пост}} = \frac{1}{T} \int_0^T u_{\text{вып}} dt \quad (13)$$

постоянная составляющая (полезная) или иначе говоря среднее значение напряжения за период,  $u_n(t)$  – напряжение пульсации, равное сумме всех гармонических составляющих.

Результаты разложения в ряд Фурье некоторых несинусоидальных периодических напряжений приведены в приложении А.

Вольтметры и амперметры, включенные в цепь с пульсирующим напряжением, измеряют не действующие значения напряжения и тока, а их постоянные составляющие (средние значения за период).

В таблице А.1 приведены соотношения, связывающие амплитудные значения  $I_m$ ,  $U_m$  синусоидально изменяющихся токов и напряжений с действующими значениями  $I_{\partial,i}$ ,  $U_{\partial,i}$ , а также постоянными составляющими для

однополупериодного и двухполупериодного выпрямителя. При этом диоды и цепи считаются идеальными.

Таблица 1 – Формулы, связывающие действующие значения и постоянные составляющие выпрямленного тока и напряжения с амплитудными

Схема выпрямления	Действующее значение		Постоянные составляющие	
	Силы тока $I_{di}$	Напряжения $U_{di}$	Силы тока $I_{ном i}$	Напряжения $U_{ном i}$
однополупериодная	$I_{d1} = \frac{I_m}{2}$	$U_{d1} = \frac{U_m}{2}$	$I_{ном 1} = \frac{I_m}{\pi}$	$U_{ном 1} = \frac{U_m}{\pi}$
двухполупериодная	$I_{d2} = \frac{I_m}{\sqrt{2}}$	$U_{d2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$	$I_{ном 2} = \frac{2I_m}{\pi}$	$U_{ном 2} = \frac{2U_m}{\pi}$

Вывод этих соотношений представлен в приложении 1 (2 ÷ 5).

## 6 МОЩНОСТЬ СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА И КПД ВЫПРЯМИТЕЛЬНЫХ СХЕМ

Потребляемая в цепи мощность равна произведению напряжения на зажимах этой цепи на силу тока.

Однако при переменном токе это справедливо только для мгновенной мощности  $p$ , выражаемой через мгновенное значение напряжение  $u(t)$  и силы тока  $i(t)$ , т.е.

$$p = u(t) \cdot i(t) \quad (14)$$

Поскольку величины  $u(t)$  и  $i(t)$  являются периодически изменяющимися функциями времени, следовательно,  $p$  – это величина периодически изменяющаяся, а поэтому мало удобная для практических расчетов. Для оценки энергетического состояния цепи переменного тока используют понятие средней мощности, называемой активной мощностью  $P$ :

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T u i dt \quad (15)$$

Эта мощность выделяется в виде тепловой.

Для цепи переменного тока, если принять, что напряжение  $u(t)$  на зажимах цепи изменяется по закону (10), а ток опережает напряжение по фазе на некоторый угол  $\varphi_0$ , т.е. определяется по формуле (1), то, подставляя (10) и (1) в (15), для активной мощности получаем

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T I_m U_m \sin \omega t \cdot \sin (\omega t + \varphi_0) dt$$

Выразив произведение синусов через разность косинусов, после почленного интегрирования получим

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T I_m U_m [\cos \varphi_0 - \cos (\omega t + \varphi_0)] dt = \frac{U_m I_m}{2} \cdot \cos \varphi_0 \quad (16)$$

Учитывая (9) и (11) для действующих значений синусоидальных токов и напряжений, формулу (16) запишем в виде

$$P = U_{\partial} I_{\partial} \cos \varphi_0. \quad (17)$$

Величина  $\cos \varphi_0$  зависит от параметров цепи (активного сопротивления  $R$ , емкости конденсатора  $C$ , индуктивности катушки  $L$ ) и частоты  $\omega = 2\pi f$ , где  $f$  – линейная частота тока в цепи,  $\varphi_0$  – сдвиг фазы между током и напряжением:

$$\cos \varphi_0 = \frac{R}{\sqrt{R^2 + \left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right)^2}} = \frac{R}{Z} \quad (18)$$

где  $R$  – активное сопротивление,  $X_L = \omega L$  – реактивное индуктивное сопротивление,  $X_C = \frac{1}{\omega C}$  – реактивное емкостное сопротивление,  $Z$  – полное сопротивление, соответственно. Величина  $S = U_{\partial} I_{\partial}$  выражает полную мощность цепи переменного тока. Она состоит из активной мощности  $P$  и реактивной  $Q$  и связана с ними соотношением  $S = \sqrt{P^2 + Q^2}$ . Реактивная мощность  $Q$  обусловлена энергией магнитного поля катушки индуктивности и энергией электрического поля конденсатора.

Определим мощность на нагрузке  $R_n$  в случае ее подключения к вторичной обмотке трансформатора (рис. 6, а), с напряжением, изменяющимся по закону (10). Цепь не содержит реактивных элементов (катушек и конденсаторов), поэтому  $X_L = X_C = 0$  и в соответствии с (18)  $\cos \varphi_0 = 1$ . Поэтому полная мощность на нагрузке равна активной мощности и на основании (16) и (17) определяется по формуле:

$$S = U_{\partial} I_{\partial} = \frac{U_m I_m}{2}. \quad (19)$$

В случае использования однополупериодных и двухполупериодных выпрямителей полная мощность (с учетом полезной составляющей и пульсирующих) определяется как произведение соответствующих действующих значений тока и напряжения. Используя результаты таблицы 1, для однополупериодной схемы получаем:

$$S_1 = U_{\partial 1} \cdot I_{\partial 1} = \frac{U_m}{2} \cdot \frac{I_m}{2} = \frac{U_m I_m}{4} \quad (20)$$

Для двухполупериодной схемы:

$$S_2 = U_{\partial 2} \cdot I_{\partial 2} = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_m}{\sqrt{2}} = \frac{U_m I_m}{2}. \quad (21)$$

Сравнивая (20) и (21), можно сделать вывод, что в энергетическом отношении гораздо выгоднее использовать двухполупериодный выпрямитель.

Необходимо помнить, что мы рассматривали идеальные цепи. На самом деле диоды не являются идеальными выпрямителями. Они имеют обратный ток порядка  $10^{-6}$  (А). Кроме того, при прямом включении они не являются идеальными проводниками (имеют некоторое сопротивление, зависящее от величины напряжения). Поэтому напряжение вторичной обмотки трансформатора создает падение напряжения и на нагрузке, и на диоде (в

зависимости от типа диода порядка  $0,2 \div 1$  В). Кроме этого р–n–переход имеет некоторую емкость и все узлы схемы (места соединения проводов) имеют контактные сопротивления. По этой причине приведенные теоретические соотношения в таблице 1 могут отличаться от измеренных значений приборами с учетом приборных погрешностей.

Все это приводит к тому, что КПД двухполупериодного выпрямителя меньше единицы, но всегда больше КПД однополупериодного выпрямителя.

Выпрямитель предназначен для того, чтобы из переменного синусоидального напряжения получить постоянное напряжение (аналогичное ЭДС гальванических элементов). КПД в общем случае определяется отношением полезной мощности  $P$  к полной потребляемой  $P_0$ :

$$\eta = \frac{P}{P_0}. \quad (22)$$

В данном случае полную потребляемую мощность определим как мощность синусоидального тока на нагрузке  $R_H$ :

$$P_0 = I_0 U_0 \quad (23)$$

Полезной мощностью будем считать мощность на нагрузке только постоянной составляющей выпрямленного тока и напряжения. Тогда полезная мощность  $P_1$  для однополупериодного выпрямителя:

$$P_1 = I_{ном1} \cdot U_{ном1}. \quad (24)$$

Полезная мощность для двухполупериодного выпрямителя:

$$P_2 = I_{ном2} \cdot U_{ном2} \quad (25)$$

Тогда из формул (22) (23), (24), (25) получаем:

КПД  $\eta_1$  однополупериодного выпрямителя:

$$\eta_1 = \frac{I_{ном1} U_{ном1}}{I_0 U_0}, \quad (26)$$

а КПД  $\eta_2$  двухполупериодного выпрямителя:

$$\eta_2 = \frac{I_{ном2} U_{ном2}}{I_0 U_0}, \quad (27)$$

где  $I_{ном1}$ ,  $I_{ном2}$ ,  $U_{ном1}$ ,  $U_{ном2}$  измеренные приборами постоянные составляющие выпрямленных токов и напряжений в однополупериодной и двухполупериодной выпрямительных схемах соответственно.

## 7 ОБЩИЕ ПРАВИЛА ЭКСПЛУАТАЦИИ ОСЦИЛЛОГРАФА

Осциллограф — дорогостоящий прибор, и эксплуатировать его необходимо технически грамотно:

1. Прибор не должен работать непрерывно более 4 часов.
2. Температура в помещении должна быть от  $10^{\circ}\text{C}$  до  $30^{\circ}\text{C}$ .
3. Нельзя оставлять неподвижную сфокусированную точку с большой яркостью на экране, так как это приводит к прогоранию экрана.
4. Ввиду хрупкости электронно-лучевой трубки, с прибором необходимо обращаться осторожно, не допуская ударов, встряски, вибраций.
5. Желательно устанавливать осциллограф вдали от источников магнитных полей, так как они влияют на устойчивость изображения.

6. Нельзя работать с прибором, вынутым из корпуса, ввиду высокого напряжения (до **1200 В** в отдельных узлах).
7. Не прилагайте больших усилий при вращении ручек осциллографа.

## **8 МЕРЫ БЕЗОПАСНОСТИ ПРИ РАБОТЕ**

- 1. Проверить наличие заземления!**
- 2. Выполнять все требования инструкции по охране труда при работе с напряжением 220 В.**
- 3. До проверки преподавателем Вашей готовности к занятиям приборы в электрическую сеть не включать!**
- 4. При выявлении неисправности немедленно отключить установку от электрической сети и сообщить об этом лаборанту или преподавателю.**
- 5. Самостоятельно неисправности не устранять!**

## **ПОРЯДОК ВЫПОЛНЕНИЯ РАБОТЫ.**

1. В лабораторной работе используются два мультиметра DT 9205A: один в качестве миллиамперметра, второй в качестве вольтметра. Включение приборов осуществляется нажатием кнопки «Power». Приборы имеют указатель перегрузки (если значение измеряемой величины превышает установленный предел измерения, то в этом случае показания прибора «1 -»). Если значения показаний с течением времени изменяются из-за нестабильности напряжения в сети, то для снятия показаний приборов одновременно необходимо нажать кнопки «HOLD». В этом случае приборы фиксируют значения измеряемых величин в момент измерения. Повторное нажатие кнопок «HOLD» переводит прибор в обычный режим измерения. Не допускайте длительной перегрузки прибора.
2. Включите трансформатор в сеть  $\sim 220 В$ .
3. Подготовьте осциллограф к работе. Для этого ручки «Яркость», «Фокус», « $\leftrightarrow$ », « $\beta$ » установите в среднее положение, переключатель «время / деление» в положение  $s^{-1}$ . Кнопки «XY», « $\pm$ », « $\sim$ », «Блк», «сеть» – нажать; «Внеш», « $\cong$ », « $\perp$ », «Авто», «ТВ» – отжать. Включите осциллограф в сеть 220В. На экране появится точка. Вращением ручки «Фокус» установите минимальный размер точки на экране, вращением ручки «Яркость» минимальную яркость точки. Вращением ручек « $\leftrightarrow$ » и « $\beta$ » установите точку в середине экрана. Подключив клеммы « $R_H$ » установки к пробнику 1:1 подайте исследуемый сигнал на вход Y осциллографа. Кнопку «X-Y» отожмите. Вращая обе ручки «плавно» против хода часовой стрелки установите их в крайнее положение. Переключатель «Вольт/дел» установите в положение 0,5 Вольт/дел. Переключатель «время/дел» установите в положение 2мс/дел. Дайте прогреться осциллографу 5 минут. При необходимости незначительно увеличьте яркость изображения.

4. Предел измерения вольтметра установите в положение «V~ 20В», предел измерения миллиамперметра включите в положение «A~ 200mA». Включите мультиметры, нажав «Power». Вставьте в верхние клеммы колодку с проволочной перемычкой. Вращая ручку « $\leftrightarrow$ » установите начальную фазу колебаний равную нулю. Зарисуйте график зависимости  $u(t)$  наблюдаемый на осциллографе и запишите показания приборов  $U_\delta$ ,  $I_\delta$  в цепи синусоидального тока. Извлеките колодку с проволочной перемычкой.
5. Предел измерения вольтметра установите в положение «V– 20В», а миллиамперметра «A– 200mA».
6. Вместо колодки с проволочной перемычкой вставьте в клеммы строго по схеме, соблюдая направления включения, колодку с диодом и исследуйте однополупериодный выпрямитель.
7. Занесите в таблицу 2 показания приборов  $I_{ном}$ ,  $U_{ном}$  и зарисуйте график зависимости  $u(t)$

Таблица 2. – Результаты измерений

№ опыта	$U_{ном}$	$I_{ном}$	$\eta$
1			
2			
3			

Рассчитайте КПД выпрямителя по формуле

$$\eta = \frac{I_{ном} \cdot U_{ном}}{I_\delta \cdot U_\delta} . \quad (28)$$

8. Отключите колодку из верхних клемм. Вставьте колодку со вторым диодом в нижние клеммы строго по схеме и выполните пункт 7.
9. Включите к клеммам  $R_H$  соблюдая полярность вначале конденсатор 470 мкФ, зарисуйте график. Отключите его, затем включите конденсатор 4700 мкФ и зарисуйте график.
10. Отключите конденсатор и разрядите оба конденсатора разрядником.
11. Включите вторую колодку с диодом, строго соблюдая направление в верхние клеммы и выполните пункт 7 для двухполупериодного выпрямителя.
12. Выполните пункт 9 для двухполупериодного выпрямителя. Сделайте вывод о влиянии величины электроемкости на эффект сглаживания.
13. Отключите конденсатор и разрядите оба конденсатора, поочередно соединив их клеммы разрядником.
14. Отключите мультиметры, нажав «Power». Трансформатор и осциллограф отключите от сети.



## Приложение А.

1. Таблица А.1 – Результаты разложения в ряд Фурье некоторых несинусоидальных периодических напряжений

Форма кривой напряжения	Разложение в ряд
Синусоидальное (рис. 6, б)	$U(t) = U_m \sin \omega t$
Выпрямленное однополупериодное (рис. 7, б)	$U(t) = \frac{U_m}{\pi} (1 + \frac{\pi}{2} \cos \omega t + \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t + \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \dots)$
Выпрямленное двухполупериодное (рис. 8, б)	$U(t) = \frac{2U_m}{\pi} (1 - \frac{2}{3} \cos 2\omega t - \frac{2}{15} \cos 4\omega t - \frac{2}{35} \cos 6\omega t - \dots)$

2. Действующее значение выпрямленного тока однополупериодного выпрямления.

Из графика зависимости  $i(t)$  (рис. 7, б) следует, что за время равное периоду  $T$  синусоидального тока, ток в нагрузке протекает в течение времени от 0 секунд до  $\frac{T}{2}$ . В течение интервала времени от  $\frac{T}{2}$  до  $T$  ток равен нулю.

Количество теплоты, выделившееся на сопротивлении  $R_n$ :

$$\begin{aligned}
 Q_{I_{выпр}} &= \int_0^{T/2} I_m^2 R \sin^2 \omega t dt + \int_{T/2}^T 0^2 R \sin^2 \omega t dt = I_m^2 R \int_0^{T/2} \sin^2 \omega t dt = \\
 &= I_m^2 R \int_0^{T/2} \frac{1}{2} (1 - \cos 2\frac{2\pi}{T} t) dt = \frac{1}{2} I_m^2 R \int_0^{T/2} dt - \frac{1}{2} \int_0^{T/2} \cos \frac{4\pi}{T} t dt = . \quad (1)
 \end{aligned}$$

$$\frac{1}{2} I_m^2 R \frac{T}{2} - \frac{1}{2} \frac{T}{4\pi} \sin \frac{4\pi}{T} t \Big|_0^{T/2} = \frac{I_m^2 RT}{4}$$

В случае протекания постоянного тока с силой тока  $I_{\partial 1}$ :

$$Q_{ном} = I_{\partial 1}^2 RT \quad (2)$$

Приравнивая правые части (1) и (2) получаем:

$$I_{\partial 1} = \frac{I_m}{2}$$

3. Действующее значение выпрямленного тока двухполупериодного выпрямления.

Из графика зависимости  $i(t)$  (рис. 8, б) видно, что выпрямленный ток меняется с течением времени в пределах каждого полупериода синусоидального тока по закону  $i = |I_m \cdot \sin \omega t|$ . Для выделившегося количества теплоты выпрямленного тока получаем:

$$\begin{aligned}
Q_{2\text{выпр}} &= \int_0^{T/2} i^2 R dt + \int_{T/2}^T i^2 R dt = \int_0^{T/2} I_m^2 R \sin^2 \omega t dt + \int_{T/2}^T I_m^2 R \sin^2 \omega t dt = \\
&= \frac{1}{2} \left( I_m^2 R t - \frac{T}{4\pi} \sin \frac{4\pi}{T} t \right) \Big|_0^{T/2} + \frac{1}{2} \left( I_m^2 R t - \frac{T}{4\pi} \sin \frac{4\pi}{T} t \right) \Big|_{T/2}^T = \frac{1}{2} I_m^2 R \frac{T}{2} + \frac{1}{2} I_m^2 R t \Big|_{T/2}^T = \\
&= \frac{I_m^2 R T}{4} + \frac{I_m^2 R T}{4} = \frac{I_m^2 R T}{2}
\end{aligned}$$

В случае протекания постоянного тока с силой тока  $I_{\text{д2}}$ :

$$Q_{2\text{пост}} = I_{\text{д2}}^2 R T \quad (4)$$

Из формул (3) и (4) получаем:

$$I_{\text{д2}} = \frac{I_m}{\sqrt{2}} \quad (5)$$

4. Вывод формулы связывающей постоянное (среднее во времени) значение выпрямленного  $U$  напряжения однополупериодного выпрямления с амплитудным значением  $U_m$  синусоидального напряжения.

Из графика зависимости  $u(t)$  на нагрузке для однополупериодного выпрямителя (рис. 7 б,) следует, что в течении времени от 0 до  $\frac{T}{2}$  напряжение меняется по закону  $u(t) = U_m \cdot \sin \omega t = U_m \sin 2\pi/T \cdot t$ . В течение интервала времени от  $T/2$  до  $T$   $u(t) = 0$ .

Поэтому постоянная составляющая  $U_{\text{пост1}}$  по формуле 13:

$$U_{\text{пост1}} = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \frac{2\pi}{T} dt = -\frac{U_m T}{T \cdot 2\pi} \cos \frac{2\pi}{T} t \Big|_0^{T/2} = -\frac{U_m}{2\pi} (\cos \pi - \cos 0^0) = \frac{U_m}{\pi} \quad (6).$$

5. Вывод формулы связывающей постоянное значение выпрямленного  $U_{\text{пост2}}$  напряжения двухполупериодного выпрямления с амплитудным значением  $U_m$  синусоидального напряжения.

Из (рис. 8 а, б) следует, что нагрузка находится под напряжением в течение всего периода действия синусоидального напряжения. В течение времени от 0 до  $\frac{T}{2}$   $u(t) = U_m \cdot \sin \omega t$ , в течение времени от  $\frac{T}{2}$  до  $T$   $u(t) = -U_m \cdot \sin \omega t$ . Поэтому постоянная составляющая  $U_{\text{пост2}}$ :

$$\begin{aligned}
U_{\text{пост2}} &= \frac{1}{T} \int_0^{T/2} U_m \sin \omega t dt - \frac{1}{T} \int_{T/2}^T U_m \sin \omega t dt = \\
&= \frac{U_m T}{T \cdot 2\pi} \int_0^{T/2} U_m \sin \frac{2\pi}{T} d\left(\frac{2\pi}{T} t\right) - \frac{U_m T}{T \cdot 2\pi} \int_{T/2}^T \sin \frac{2\pi}{T} d\left(\frac{2\pi}{T} t\right) = \\
&= -\frac{U_m}{2\pi} \cos \frac{2\pi}{T} \Big|_0^{T/2} + \frac{U_m}{2\pi} \cos \frac{2\pi}{T} \Big|_{T/2}^T = -\frac{U_m}{2\pi} (\cos \pi - \cos 0^0) + \frac{U_m}{2\pi} (\cos 2\pi - \cos \pi) = \\
&= \frac{U_m}{\pi} + \frac{U_m}{\pi} = \frac{2U_m}{\pi}
\end{aligned} \quad (7).$$

## КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ.

1. Для чего используют электронный осциллограф?
2. Дайте определения следующих понятий: периодические процессы, синусоидальный ток.
3. Как получают р–п– переход?
4. Какие процессы происходят в р–п– переходе в отсутствии внешнего источника напряжения?
5. Объясните процессы протекающие в р–п– переходе при прямом включении.
6. Объясните процессы протекающие в р–п– переходе при обратном включении.
7. Объясните принцип действия однополупериодного выпрямителя. Приведите его схему.
8. Объясните принцип действия двухполупериодного выпрямителя. Приведите его схему.
9. Нарисуйте схему включения и объясните принцип действия емкостного фильтра.
10. Нарисуйте схему включения и объясните принцип действия индуктивного фильтра.
11. Дайте определение действующего значения синусоидального тока. Среднего значения выпрямленного напряжения.
12. Как определяется активная мощность в цепи синусоидального тока?
13. Как определяется полная мощность  $S$ ?
14. Почему в энергетическом отношении выгоднее использовать двухполупериодный выпрямитель?
15. Как определяются КПД однополупериодного и двухполупериодного выпрямителей?
16. Расскажите правила эксплуатации осциллографа.

## ЛИТЕРАТУРА

1. Савельев, И.В. Курс общей физики. Т. 2 / И.В.Савельев. – 3-е изд. – М.: Наука, 1988
2. Детлаф, А.А. Курс физики / А.А.Детлаф, Б.М.Яворский. – 5-е изд. – М.: Академия, 2005
3. Трофимова, Т.И. Курс физики. – М.: ВШ, 2007.

Учебное издание

**ИССЛЕДОВАНИЕ ПРОЦЕССА ВЫПРЯМЛЕНИЯ  
СИНУСОИДАЛЬНОГО ТОКА С ПОМОЩЬЮ ЭЛЕКТРОННОГО  
ОСЦИЛЛОГРАФА**

Методические указания

Составитель: ст. преподаватель Каранчук Д. Я.

Редактор Щербакова А.А.

Технический редактор Хлыстова М.О.

Подписано в печать	Формат 60x84 <sup>1</sup> / <sub>16</sub>
Бумага офсетная. Гарнитура Таймс. Печать ризографическая.	
Усл. печ. л.	Уч.-изд. л.
Тираж	Заказ

Отпечатано на ризографе редакционно-издательского отдела  
Учреждение образования  
«Могилевский государственный университет продовольствия».

212027, Могилев, пр-т Шмидта, 3.  
ЛИ № 02330/0131913 от 08.02.2007.