

## Лабораторная работа 2 (Lr22) ОДНОФАЗНЫЕ ПОЛУПРОВОДНИКОВЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

### ЦЕЛЬ РАБОТЫ

Исследование однофазных одно- и двухполупериодных схем выпрямления и сглаживающих LC-фильтров; построение вольтамперных характеристик неуправляемого и управляемого выпрямителей.

### ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ СВЕДЕНИЯ И РАСЧЕТНЫЕ ФОРМУЛЫ

#### 1. ОБЩИЕ ПОЛОЖЕНИЯ

*Выпрямителем* (источником вторичного электропитания) называют устройство, служащее для преобразования переменных напряжения и тока в постоянные, которые необходимы для питания ряда электронных устройств.

Обобщенная структурная схема однофазного выпрямителя на полупроводниковых приборах, состоящая из трансформатора, выпрямительного блока, сглаживающего фильтра и стабилизатора, приведена на рис. 22.1 а.

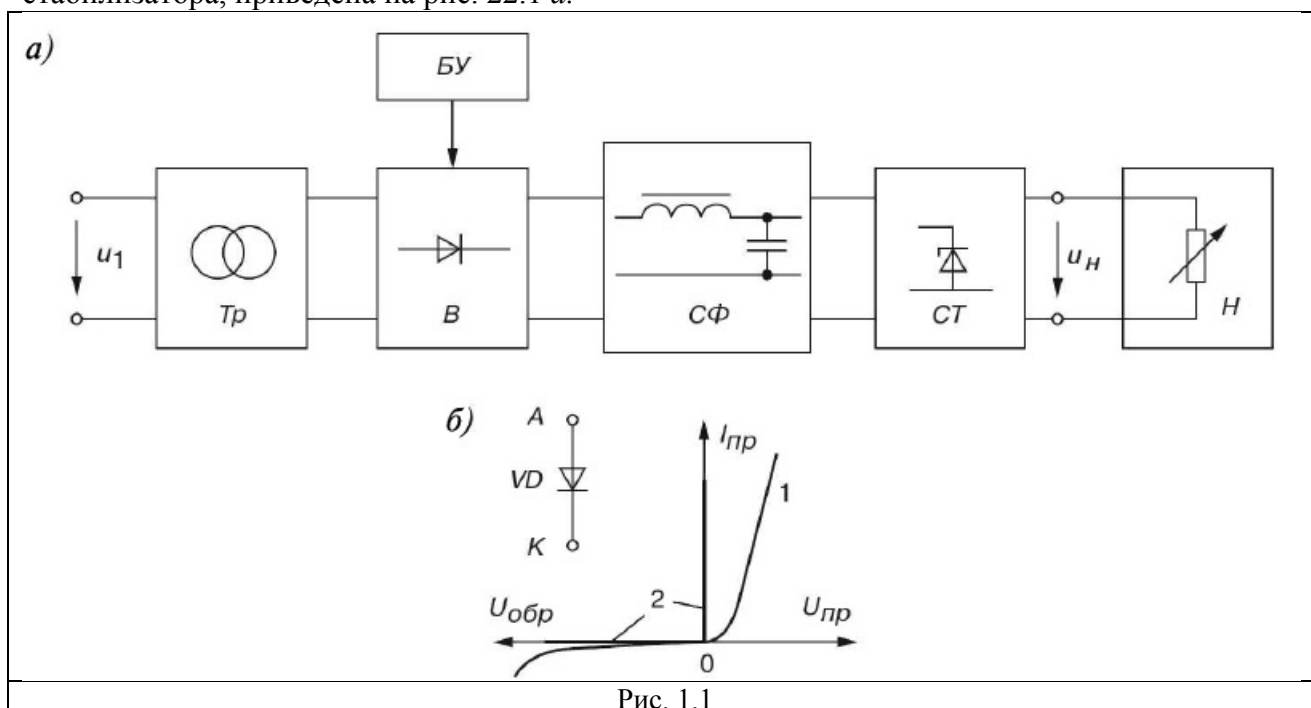


Рис. 1.1

Трансформатор  $Tr$  предназначен для согласования входного (сетевое) напряжения  $u_1$  и выходного (выпрямленного)  $u_n$  напряжения нагрузки  $H$ . Блок вентилей  $B$  выполняет функцию выпрямления переменного тока. Для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения (тока) в цепи нагрузки  $H$  применяют сглаживающий фильтр  $СФ$ . В случае управляемого выпрямителя необходим блок управления  $БУ$ , содержащий систему управления вентилями и систему автоматического регулирования уровня выходного напряжения  $u_n$ . В неуправляемые выпрямители встраивают блок стабилизации  $СТ$ , поддерживающий номинальный уровень выходного напряжения или тока нагрузки при колебаниях напряжения сети и при изменении сопротивления нагрузки. В зависимости от условий работы и предъявляемых требований к выпрямителю отдельные его узлы могут отсутствовать.

Преобразование переменного тока в постоянный осуществляется с помощью нелинейных элементов с несимметричной ВАХ, обладающих вентильными свойствами (односторонней проводимостью). Это свойство характерно для электровакуумных, ионных и полупроводниковых приборов. В данной работе будут исследоваться выпрямители на полупроводниковых приборах, которые в настоящее время находят наибольшее применение.

Идеальный электрический вентиль не имеет потерь, его сопротивление в проводящем направлении от анода  $A$  к катоду  $K$  (рис. 1.1б) равно нулю, в непроводящем — бесконечности, то есть ВАХ имеет вид 2 в отличие от ВАХ 1 реального вентиля. Простейшие вентили (диоды) являются неуправляемыми, а вентили (тиристоры, транзисторы, электронные лампы), имеющие третий (управляющий) электрод, составляют широкий класс управляемых вентиляей.

С учетом рассмотренных типов вентиляей и предъявляемых требований к качеству напряжения питания нагрузочных устройств строят различные схемы выпрямления, то есть устройства, называемые выпрямителями.

Классификационные признаки выпрямителей:

2. неуправляемые ( $U_n = \text{const}$ ) и управляемые ( $U_n = \text{var}$ );
3. однотактные и двухтактные;
4. однофазные и многофазные (чаще трехфазные);
5. малой (до 1 кВт), средней (до 100 кВт) и большой (свыше 100 кВт) мощности;
6. низкого (до 25 В), среднего (до 1000 В) и высокого (свыше 1000 В) напряжений.

Основные параметры выпрямителя:

- $U_{\text{cp}}$  ( $I_{\text{cp}}$ ) — среднее значение выпрямленного напряжения (тока) нагрузки;
- $U_{m.\text{ог}}$  — амплитуда основной гармоники выпрямленного напряжения;
- $q_n = U_{m.\text{ог}}/U_{\text{cp}}$  — коэффициент пульсации выпрямленного напряжения;
- $S$  — мощность трансформатора (в вольтамперах — В·А или в киловольтамперах — кВ·А);
- $I_{\text{пр.ср}}$  — прямой средний ток вентиля;
- $U_{\text{пр.ср}}$  — среднее напряжение (менее 2 В) на вентиле при токе  $I_{\text{пр.ср}}$ ;
- $U_{\text{обр.мах}}, I_{\text{пр.мах}}$  — максимальные допустимые обратное напряжение и прямой ток вентиля.

## 2. НЕУПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

Мощность однофазных неуправляемых выпрямителей переменного тока колеблется от десятков до нескольких сотен ватт. Основными схемами однофазных выпрямителей являются однополупериодная и двухполупериодная (мостовая или со средней точкой).

Однофазная однополупериодная схема выпрямления (рис. 1.1а) с активной нагрузкой является простейшей из известных схем выпрямления. Она состоит из силового трансформатора  $Tr$ , одного вентиля (диода)  $VD$  и нагрузки  $R_H$ . Первичная обмотка трансформатора включена в сеть переменного тока с напряжением  $u_1$ ; к вторичной обмотке с напряжением  $u_2$  последовательно подключены диод  $VD$  и нагрузка (резне- тор  $R_H$ ).

Временные диаграммы напряжения  $u_2$  вторичной обмотки трансформатора, напряжения на нагрузке  $u_H$  и на вентиле  $u_d$  представлены на рис. 1.2б, в и г.

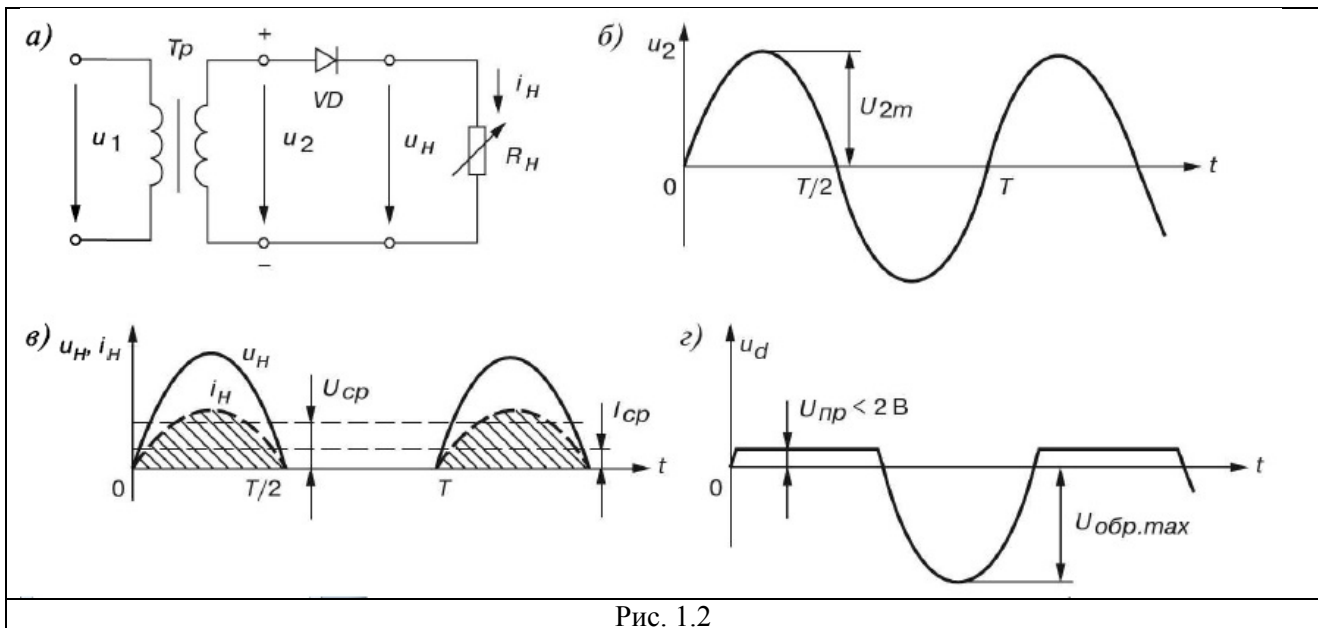


Рис. 1.2

Ток  $i_H$  в нагрузке протекает только при положительной полуволне вторичного напряжения  $u_2$  трансформатора, то есть когда напряжение на аноде диода более положительное, чем на его катоде. При этом напряжение на диоде  $U_{пр} < 2$  В. При отрицательной полуволне  $u_2$  диод закрыт, максимальное обратное напряжение на диоде

Ток в нагрузке  $R_H$  протекает только в один полупериод синусоидального напряжения, отсюда название выпрямителя — однополупериодный.

Среднее выпрямленное напряжение и ток за период

$$U_{cp} = U_{2m}/\pi \approx 0,318U_{2m}; I_{cp} = I_{2m}/\pi \approx 0,318I_{2m}.$$

Амплитуда  $U_{m.or}$  основной гармонике выпрямленного напряжения, определенная из разложения в ряд Фурье:

$$U_{m.or} = U_{2m}/2.$$

Тогда коэффициент пульсации

$$q_n = U_{m.обр}/U_{cp} = \pi/2 \approx 1,57.$$

Однофазные полупроводниковые выпрямители используют для питания устройств, требующих малого тока и высокого напряжения, например для питания электронно-лучевых трубок, трубок рентгеновских аппаратов и др.

К недостаткам этих выпрямителей следует отнести униполярный ток, который, проходя через вторичную обмотку, намагничивает сердечник трансформатора, изменяя его характеристики и уменьшая КПД; малое значение выпрямленного напряжения ( $U_{cp} \approx 1/3 U_{2m}$ ); высокий уровень пульсаций ( $q_n = 1,57$ ) и большое обратное напряжение на диоде ( $U_{обр} \approx U_{2m}$ ).

Мостовая схема двухполупериодного выпрямителя (рис. 1.3а) состоит из трансформатора  $Tr$  и четырех диодов, собранных по мостовой схеме.

Одна из диагоналей моста соединена с выводами вторичной обмотки трансформатора, вторая диагональ — с нагрузкой  $R_H$ . Положительным полюсом нагрузки является общая точка соединения катодов вентилей, отрицательным — точка соединения анодов. Временные диаграммы выпрямленного напряжения  $u_H$  и тока  $i_H$  приведены на рис. 1.2б. В положительный полупериод синусоидального напряжения  $u_2$ , когда точка 1 находится под положительным, а точка 2 — под отрицательным потенциалами, ток  $i_2'$  протекает через вентиль  $VD1$ , сопротивление нагрузки  $R_H$  и вентиль  $VD3$ . Вентили  $VD2$  и  $VD4$  в этот момент закрыты, так как находятся под обратным напряжением.

Во второй полупериод, когда в точке 1 вторичной обмотки отрицательный потенциал, а в точке 2 — положительный, ток  $i_2''$  протекает через вентиль  $VD2$ , резистор  $R_H$

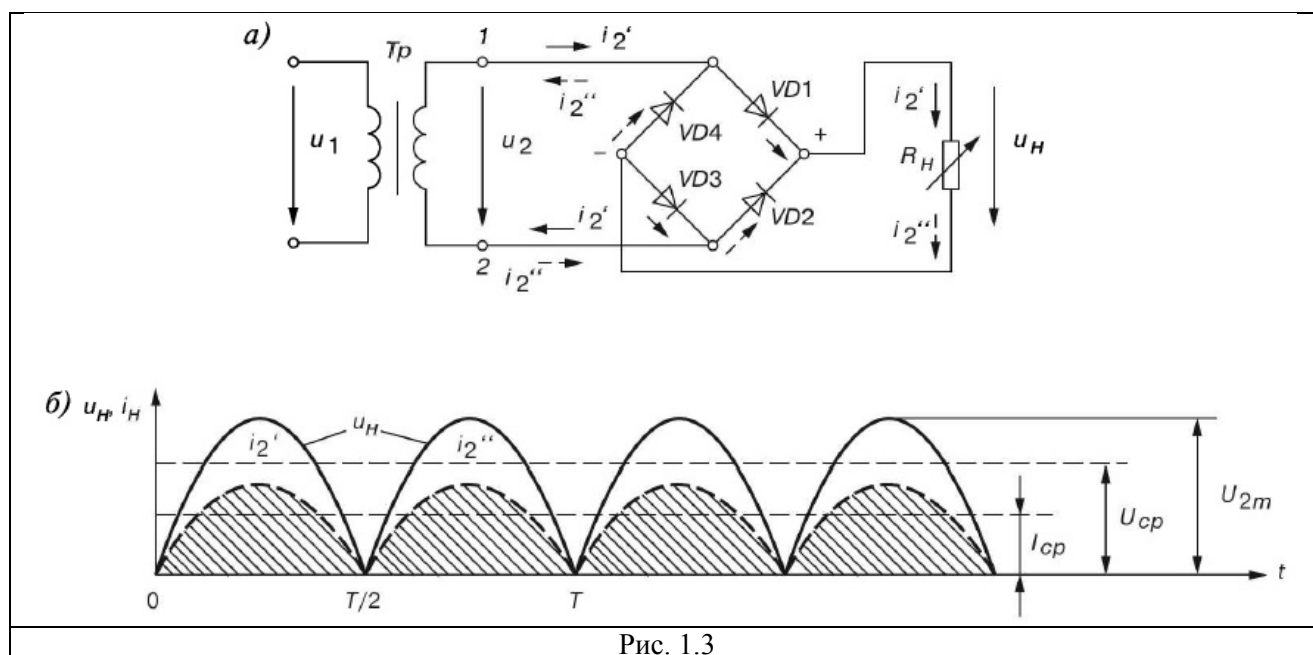


Рис. 1.3

и вентиль  $VD4$  в направлении, указанном стрелками с одним штрихом. Вентили  $VD1$  и  $VD3$  в этот момент закрыты, так как находятся под обратным напряжением.

Таким образом, токи  $i_2'$  и  $i_2''$ , протекающие через нагрузку  $R_n$ , совпадают по направлению. Кривые напряжения и тока на нагрузке (см. рис. 1.3б) повторяют (при прямом напряжении на диодах  $U_{np} \approx 0$ ) по величине и форме выпрямленные полуволны напряжения и тока вторичной обмотки трансформатора. Они пульсируют от нуля до максимального значения  $U_{2m}$ .

Среднее значение выпрямленного напряжения и тока (постоянные составляющие):

$$U_{cp} = (2/\pi) U_{2m} \approx 0,636 U_{2m};$$

$$I_{cp} = (2/\pi) I_{2m} \approx 0,636 I_{2m},$$

где  $I_{2m} = U_{2m}/R_n$ .

Амплитуда основной (второй) гармоники выпрямленного напряжения, определенная из разложения в ряд Фурье:

$$U_{m.or} = (4/3\pi) U_{2m} \approx 0,424 U_{2m}.$$

Тогда коэффициент пульсации

$$q_n = U_{m.or}/U_{cp} = 2/3 \approx 0,667$$

Обратное напряжение на вентиле  $U_{обрmax} \approx U_{2m}$ .

В двухполупериодной схеме выпрямления в сравнении с однополупериодной значительно лучше используется трансформатор, меньше коэффициент пульсации ( $q_n \approx 0,67$ ), хотя его величина остается значительной.

#### 4. СГЛАЖИВАЮЩИЕ ФИЛЬТРЫ

Требования к уровню пульсации питающего электронную аппаратуру напряжения очень высокие: так, допустимый коэффициент пульсации  $q_n$  для питания двухтактных усилителей напряжения не должен превышать 1—2%, одноктактных усилителей 0,1—0,5%, а усилителей промежуточной частоты — 0,01—0,05%.

*Сглаживающие фильтры* предназначены для уменьшения пульсаций выпрямленного напряжения на нагрузке до значений, при которых не сказывается их отрицательное влияние на работу электронной аппаратуры. Они должны пропускать постоянную составляющую выпрямленного напряжения и заметно ослаблять его гармонические составляющие.

Действие фильтра по уменьшению пульсации напряжения (тока) на нагрузке характеризуется *коэффициентом сглаживания*  $k_c$ , представляющим собой отношение коэффициента пульсации на выходе выпрямителя  $q_n$  (до фильтра) к коэффициенту пульсации на нагрузке  $q_{n1}$  (после фильтра), то есть

$$k_c = q_n/q_{n1}.$$

Различают пассивные и активные сглаживающие фильтры. Принцип работы *пассивных LC-фильтров* основан на способности индуктивных катушек (дросселей) и

конденсаторов изменять свои сопротивления при изменении частоты протекающего через них тока. В бездрессельных *активных* фильтрах роль индуктивных элементов выполняют обычно транзисторы, сопротивления которых по переменному току при определенных режимах работы могут быть во много раз больше сопротивлений по постоянному току. Активные фильтры обеспечивают независимость коэффициента сглаживания  $\kappa_c$  от тока нагрузки и имеют меньшие габариты по сравнению с  $LC$ -фильтрами, однако их параметры зависят от температуры.

На рис. 1.4 приведены схемы простейших однофазных сглаживающих  $LC$ -фильтров широкого применения. *Емкостный* фильтр  $C$  (рис. 1.4а) включается параллельно высокоомной нагрузке  $R_H$ , что исключает прохождение через нагрузку высокочастотных гармонических составляющих тока.

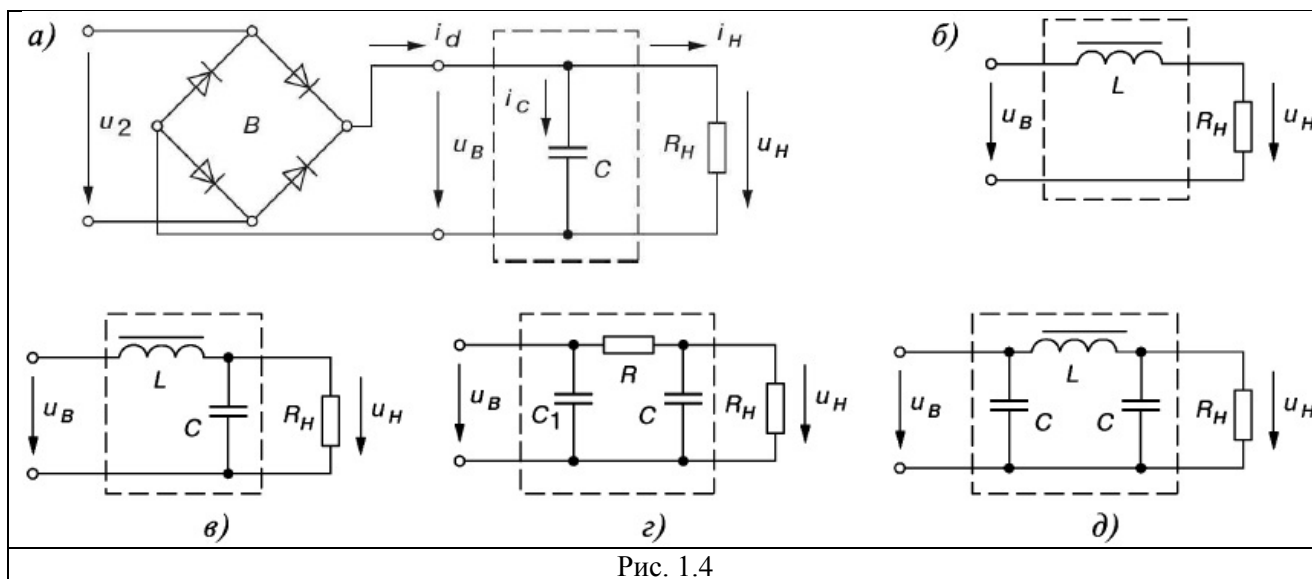


Рис. 1.4

Сглаживание пульсаций напряжения и тока нагрузки происходит за счет периодической зарядки конденсатора  $C$  фильтра (когда напряжение  $u_B > u_C$ ) и последующей его разрядки на сопротивление нагрузки при  $u_B < u_C$ .

Временные диаграммы выпрямленного напряжения  $u_B$  двухполупериодного выпрямителя и напряжения на нагрузке  $u_H$ , поясняющие принцип действия  $C$ -фильтра, изображены на рис. 1.5а.

Требуемая емкость конденсатора фильтра при заданном коэффициенте пульсации  $q_{nl}$ :

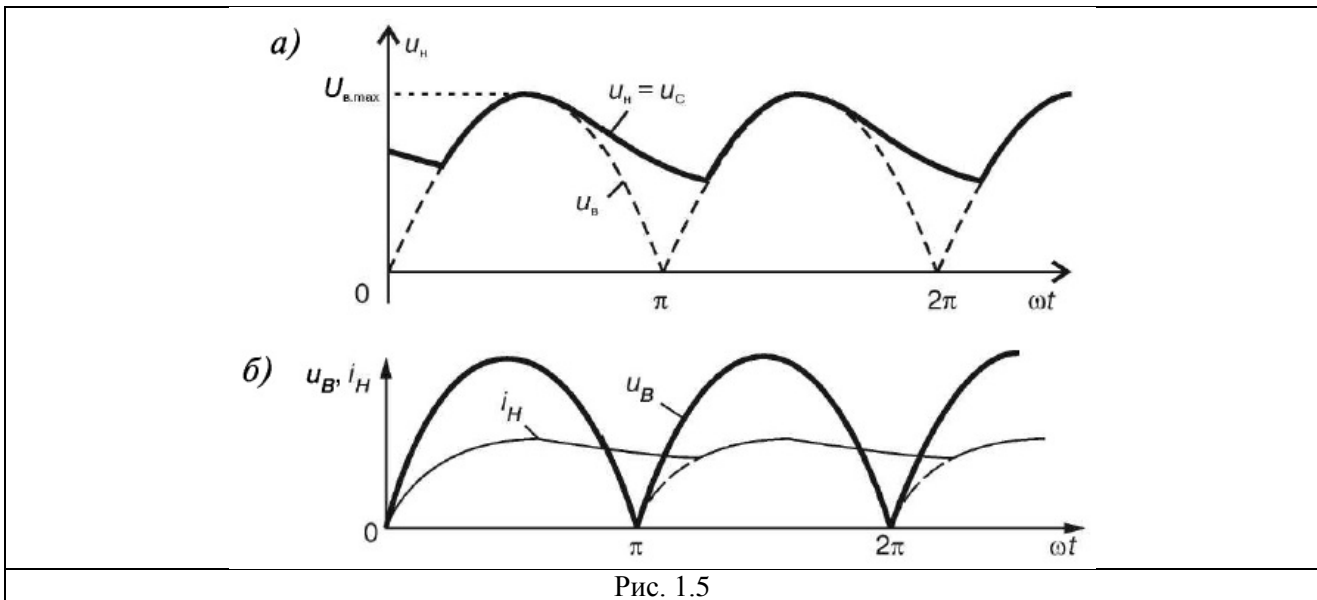


Рис. 1.5

7. для однополупериодной схемы выпрямления

$$C \geq 2 / (q_{n1} \omega R_H);$$

8. для двухполупериодной схемы выпрямления

$$C \geq 1 / (q_{n1} \omega R_H);$$

где  $\omega$  — угловая частота напряжения  $u_2$  трансформатора.

Коэффициент пульсации обычно выбирается в диапазоне  $q_{n1} = 0,01—0,1$ .

Пусть  $q_{n1} = 0,1$  и  $R_H = 320$  Ом. Тогда  $C \geq 2 / (0,1 \cdot 314 \cdot 320) \approx 200$  мкФ для однополупериодной и  $C \geq 50$  мкФ для двухполупериодной схем выпрямления.

Одноэлементный  $L$ -фильтр (рис. 1.4б) включают последовательно с нагрузкой  $R_H$ . При нарастании выпрямленного напряжения и тока нагрузки  $i_H$  магнитная энергия запасается в индуктивном элементе  $L$  (дросселе). При снижении напряжения  $u_B$  ток в нагрузке поддерживается за счет накопленной энергии в дросселе (рис. 1.5б). Коэффициент сглаживания  $L$ -фильтра

$$k_c = X_L / R_H$$

Из этого выражения следует, что в мощных выпрямителях (когда сопротивление  $R_H$  мало)  $L$ -фильтр действует наиболее эффективно.

Требуемая индуктивность дросселя при заданном коэффициенте  $k_c$ :

$$L \approx k_c R_H / (n \omega),$$

где  $n$  — номер основной гармоники выпрямленного напряжения  $u_B$ .

Например, при заданном коэффициенте  $k_c = 10$  и  $R_H = 10$  Ом требуемая индуктивность дросселя  $L \geq k_c R_H / (n \omega) = 10 \cdot 10 / 314 = 0,32$  Гн для однополупериодной и  $L \geq 0,16$  Гн для двухполупериодной схем выпрямления.

В  $LC$ -фильтре (рис. 1.4в) конденсатор шунтирует нагрузку по переменной составляющей ( $X_C = 1 / (n \omega C)$ ;  $X_C \ll R_H$ ), а сопротивление дросселя  $X_L$  по переменной составляющей должно быть значительно больше сопротивления  $Z_{\text{пар}}$  параллельно

соединенных элементов  $R_H$  и  $X_C$ . Приняв  $Z_{\text{нар}} = X_C$ , коэффициент сглаживания  $LC$ - фильтра:

$$k_c = n^2 \omega^2 LC - 1.$$

Тогда для расчета  $L$  и  $C$  получаем

$$LC = (1 + k_c) / (n\omega)^2.$$

Из этого равенства находят  $L$ , задавая  $C$ , или находят  $C$ , задавая  $L$ .

Если при расчете  $LC$ -фильтра мощного выпрямителя получают слишком большие значения индуктивности ( $L > 100$  Гн) дросселя и емкости ( $C > 150$  мкФ) конденсатора, то применяют двухзвенный  $CRC$ -фильтр: одноэлементное  $C_\Gamma$ -звено и  $\Gamma$ -образное  $RC$ -звено (рис. 1.5з), у которого

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2},$$

где  $k_{c1}$  и  $k_{c2}$  — соответственно коэффициенты сглаживания первого и второго звеньев. Активное сопротивление  $R$  и емкость  $CRC$ -фильтра:

$$R = (0,15 - 0,25)R_H; k_c = n\omega RCR_H / (R + R_H); C = k_c(R + R_H) / (n\omega RR_H).$$

Для получения лучшего сглаживания выходного напряжения после  $C$ -фильтра обычно включают дополнительное  $\Gamma$ -образное  $LC$ -звено. Получившийся  $\Pi$ -образный  $CLC$ -фильтр (рис. 1.5д) рассчитывают как двухзвенный:

$$k_c = k_{c1} \cdot k_{c2},$$

Пусть  $R_H = 320$  Ом;  $k_{c1} = 15,7$  и  $k_{c2} = 10$ . Тогда для однополупериодной схемы выпрямления  $C_1 = 2k_{c1} / (1,57\omega R_H) = 200$  мкФ, а

$$LC_2 = (1 + k_c) / (n\omega)^2 = (1 + 10) / (1 \cdot 314)^2 \approx 111,6 \cdot 10^{-6} \text{ с}^2.$$

Зададим  $C_2 = 100$  мкФ. Отсюда  $L = 111,6 \cdot 10^{-6} / 100 \cdot 10^{-6} \approx 1,12$  Гн.

Для двухполупериодной схемы выпрямления при  $C_2 = 100$  мкФ требуемая индуктивность дросселя  $L \approx 0,28$  Гн.

## 5. ВНЕШНИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Под *внешней характеристикой* выпрямителя понимают зависимость среднего значения выпрямленного напряжения от среднего значения тока нагрузки, то есть  $U_{cp} = f(I_{cp})$ :

$$U_{cp} = E_{2cp} - \Delta U_{Tp} - \Delta U_\epsilon - \Delta U_\phi = E_{2cp} - (R_{Tp} + R_\epsilon + R_\phi) I_{cp},$$

где  $E_{2cp}$  — среднее значение ЭДС вторичной обмотки трансформатора;  $\Delta U_{Tp}$ ,  $\Delta U_\epsilon$  и  $\Delta U_\phi$  — активные падения напряжений на вторичной обмотке трансформатора, на одновременно открытых вентилях и на активном сопротивлении дросселя фильтра (рис. 1.6).

Из выражения внешней характеристики видно, что с ростом выпрямленного тока  $I_{cp}$  увеличивается падение напряжений на сопротивлениях  $R_{Tp}$  и  $R_\epsilon$ , а напряжение на сопротивлении нагрузки  $U_{cp}$  уменьшается, то есть наклон внешней характеристики выпрямителя определяется значениями внутренних сопротивлений обмотки трансформатора, выпрямителя, фильтра и характером нагрузки.



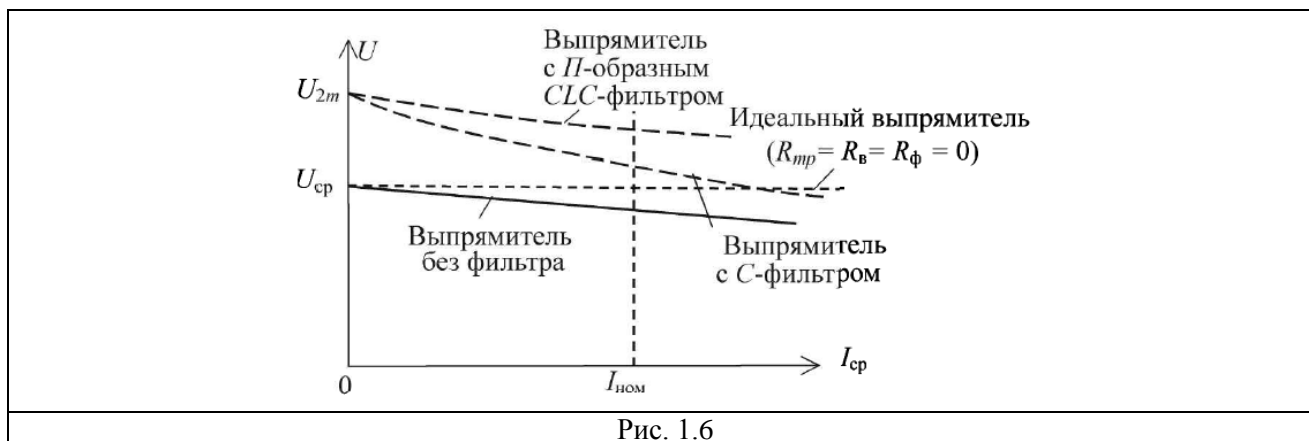


Рис. 1.6

Если в выпрямительное устройство включен фильтр, то зависимость  $U_{cp}=f(I_{cp})$  изменяется. Уменьшение напряжения  $U_{cp}$  выпрямителя с емкостным фильтром происходит более резко, чем без него. Это объясняется тем, что с увеличением тока нагрузки, помимо причин, по которым уменьшалось напряжение  $U_{cp}$  в выпрямителе без фильтра, накладывается снижение напряжения  $U$ , вызванное уменьшением постоянной времени  $\tau = R_H C$  с разрядки конденсатора  $C$  из-за уменьшения сопротивления  $R_H$ .

Выпрямленное напряжение при холостом ходе выпрямителя с П-образным CLC-фильтром такое же, как у выпрямителя с емкостным фильтром, то есть равно ЭДС  $E_{2m}$ , однако снижение напряжения с увеличением тока нагрузки у выпрямителя с CLC-фильтром меньше.

## УЧЕБНЫЕ ЗАДАНИЯ И МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ИХ ВЫПОЛНЕНИЮ

**Задание 1.** Запустить лабораторный комплекс EWB. На рабочем поле среды EWB собрать схему бестрансформаторного однофазного мостового неуправляемого выпрямителя (рис. 1.8) или открыть файл **22.8.msl0**, размещенный в папке **CircuitDesignSuite10.0** среды EWB.

1.1. Подготовить схему к проведению исследований. С этой целью:

9. установить параметры компонентов схемы, указанные на рис. 1.7: амплитуду ЭДС источника напряжения  $E_{1m} = 14,142$  В (действующее значение  $E_1 = 10$  В), частоту ЭДС  $f = 50$  Гц, начальный угол сдвига фазы  $\psi_e = 0$ ;

10. режим **АС** работы вольтметра **V** и режим **ДС** работы вольтметра **V1** и амперметра **A1**;

11. разомкнуть ключи **Q**, **A** и **B** и замкнуть ключ **W**, сформировав тем самым *однополупериодный* выпрямитель при работе на нагрузку **R2** ( $R_2 = 320$  Ом) без сглаживающего фильтра с параметрами:  $C_1 = 200$  мкФ,  $L = 1$  Гн и  $C_2 = 100$  мкФ;

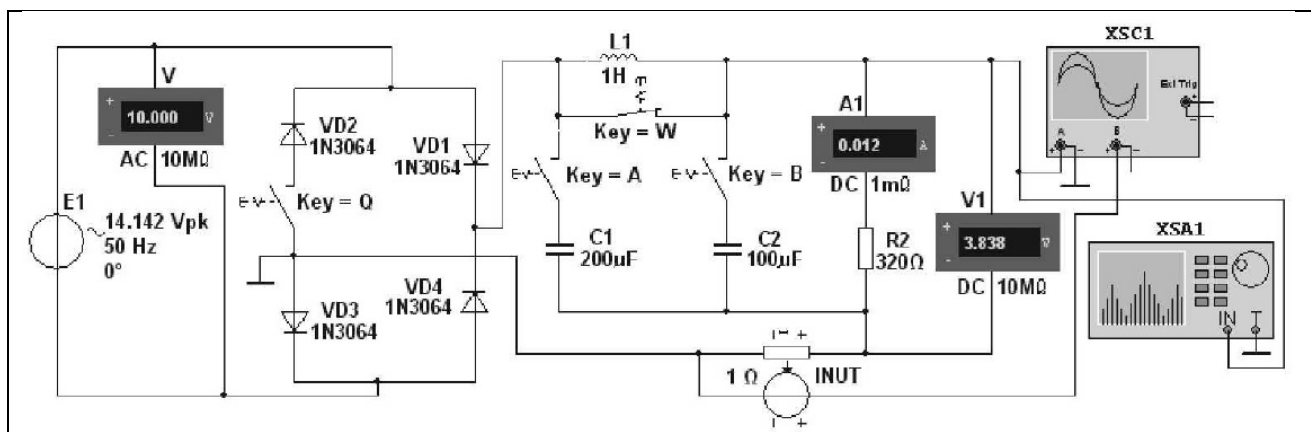


Рис. 1.7

12. подключить к соответствующим узлам схемы входы двухлучевого осциллографа **XSC1** (для наблюдения и регистрации формы напряжения нагрузки  $u_n$  и формы напряжения с выхода источника **INUT**, идентичной форме тока  $i_b$  на выходе выпрямительного блока при коэффициенте передачи  $k = 1$  Ом) и спектроанализатора **XSA1** (для построения спектра напряжения  $u_n$  и измерения амплитуды  $U_{m.or}$  его основной гармоники). Ориентировочные параметры настройки приборов **XSC1** и **XSA1** приведены на рис. 1.8;

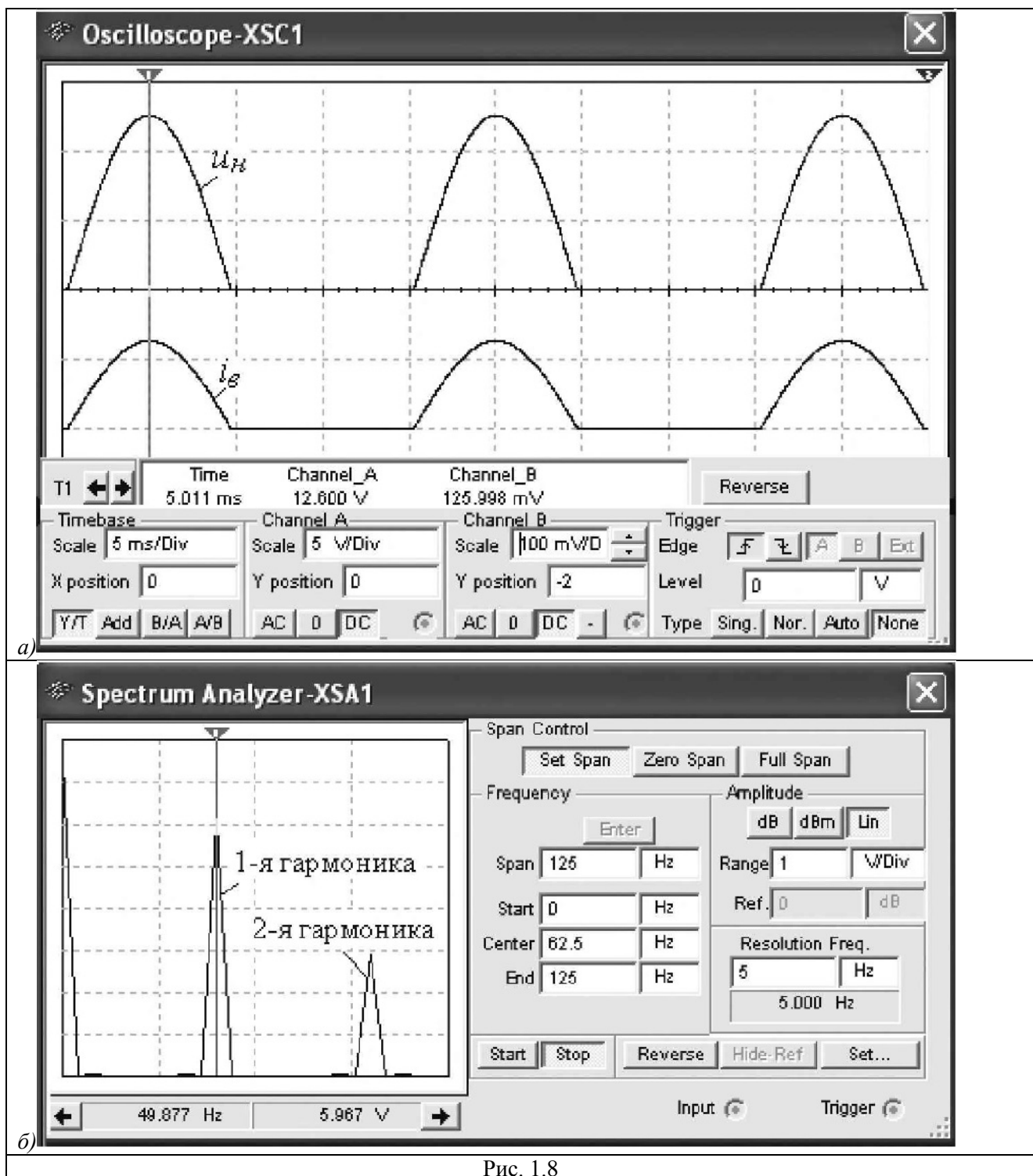
13. скопировать изображение схемы выпрямителя (см. рис. 1.7) на страницу отчета.

1.2. Провести моделирование процессов, происходящих в однополупериодном выпрямителе. Для этого:

- запустить программу EWБи после окончания моделирования спектра  $U_{mk}(f)$  напряжения нагрузки  $u_n$ , то есть после вывода на экран прибора **XSA1** значения **ResolutionFreq.** = 5 Гц (см. обведенное эллипсом значение 5 Hz на рис. 1.8б), занести показание ( $U_{cp}$ ) вольтметра **V1** и показание ( $I_{cp}$ ) амперметра **A1** в первую строку табл. 1.1;

Таблица 1.1

| Тип выпрямителя                    | Установлено   | Измеренно   |             |             |               | Рассчитано            |                           |
|------------------------------------|---|-------------|-------------|-------------|---------------|-----------------------|---------------------------|
|                                    |   | $U_{2m}, В$ | $U_{cp}, В$ | $I_{cp}, В$ | $U_{m.or}, В$ | Коэффициент пульсации | Коэффициент сглаживания   |
| Однополупериодный<br>- без фильтра | Ключ <b>W</b> замкнут;<br>ключи <b>Q</b> , <b>A</b> и <b>B</b> разомкнуты   |             |             |             |               | $q_n =$               | Нет                       |
| - с C-фильтром                     | Ключи <b>W</b> и <b>A</b> замкнуты;<br>ключи <b>Q</b> и <b>B</b> разомкнуты |             |             |             |               | $q_{n1} =$            | $k_{c1} = q_n / q_{n1} =$ |
| - с CLC-фильтром                   | Ключи <b>Q</b> и <b>W</b> разомкнуты;<br>ключи <b>A</b> и <b>B</b> замкнуты |             |             |             |               | $q_{n2} =$            | $k_{c2} = q_n / q_{n2} =$ |



- задать на экране осциллографа **XSC1** размеры осциллограмм напряжения  $u_n$  и тока  $i_b$ , равные 0,4—0,5 шкалы по вертикали и не более двух-трех периодов их изменения по горизонтали; установить визирную линию на максимальное значение  $U_{2m}$  напряжения  $u_n$  и занести его значение в табл. 1.1; скопировать изображение осциллограммы напряжения  $u_n$  на страницу отчета (см. рис. 1.8а и 1.9а);

- установить визирную линию на экране спектроанализатора **XSA1** на частоте основной гармоники выпрямленного напряжения  $f = 50$  Гц (см. рис. 1.8б) и занести значение амплитуды основной гармоники  $U_{m.or}$  в табл. 1.1. Вертикальный размер амплитуд напряжения на спектральной диаграмме  $U_{mk}(f)$  можно регулировать с помощью закладки **Range** (см. обведенное эллипсом заданное значение 1 В/дел на рис. 1.8б);
- замкнуть ключ **A**, подключив тем самым  $C_x$ -фильтр к нагрузке **R2**. Запустить программу EWVi выполнить измерительные процедуры, перечисленные в предыдущих абзацах п. 1.2. Осциллограммы напряжения  $u_n$  и тока  $i_B$  однополупериодного выпрямителя с  $C$ -фильтром приведены на рис. 1.9б;

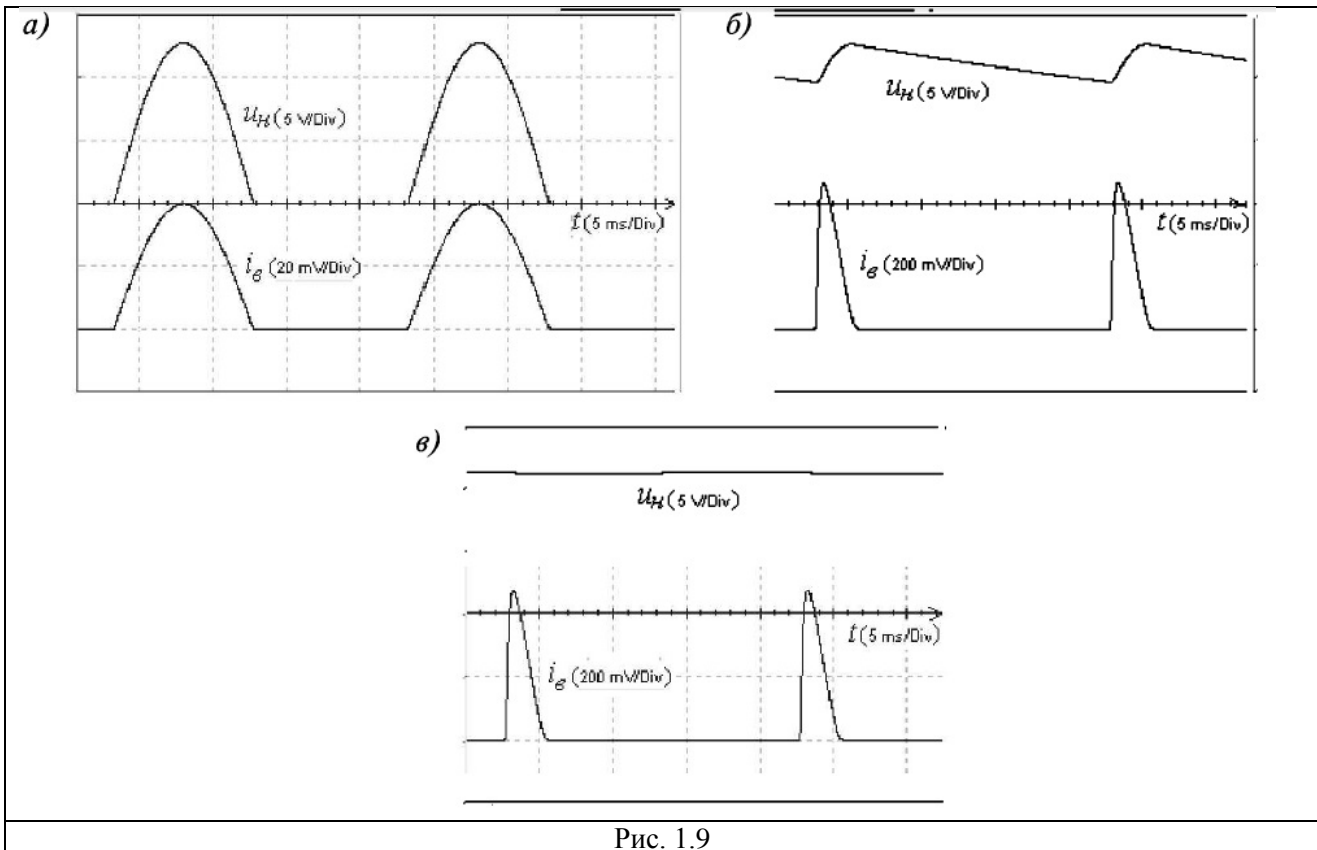


Рис. 1.9

- разомкнуть ключ **W** и замкнуть ключ **B** (сформировав тем самым  $CLC$ -фильтр и подключив его к нагрузке **R2**). Запустить программу EWVi выполнить необходимые измерительные процедуры, перечисленные в предыдущих абзацах п. 1.2. Осциллограммы напряжения  $u_n$  и тока  $i_B$  однополупериодного выпрямителя с  $CLC$ -фильтром показаны на рис. 1.9в;
- рассчитать коэффициенты пульсации  $q_n, q_{n1}, q_{n2}$  выходного напряжения и коэффициенты сглаживания  $k_{c1}$  и  $k_{c2}$  однополупериодного выпрямителя; занести их значения в табл. 1.1;

- снять ВАХ однополупериодного выпрямителя без фильтра и с *CLC*-фильтром. С этой целью, ступенчато изменяя в открывающемся окне резистора **R2** (после двойного щелчка мышью на его изображении) значение сопротивления от  $R_2 = 2$  кОм до значения  $R_2 = 50$  Ом, заносить показания вольтметра **V1** и амперметра **A1** в табл. 1.2 вначале для выпрямителя без фильтра, а затем с *CLC*-фильтром. По результатам измерений построить в одном масштабе (на одном рисунке) вольтамперные характеристики  $U_{cp}(I_{cp})$  однополупериодного выпрямителя без сглаживающего фильтра и с *CLC*-фильтром (см. рис. 1.7).

**Задание 2.** Исследовать схему двухполупериодного (мостового) неуправляемого выпрямителя при работе без сглаживающего фильтра и с фильтрами *C*- и *CLC*-типа. С этой целью, замкнув ключ **Q** (посредством нажатия клавиши **Q** клавиатуры), провести эксперименты, аналогичные экспериментам, описанным в задании **1**, в том числе:

Таблица 1.2

| Тип Выпрямителя                     | Установлено   | Измерено      |               |              |               |              |               |              |               |              |               |
|-------------------------------------|---|---------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|--------------|---------------|
|                                     |   | $R_2 = 2$ кОм |               | 600 Ом       |               | 320 Ом       |               | 100 Ом       |               | 50 Ом        |               |
|                                     |   | $U_{cp}$ , В  | $I_{cp}$ , мА | $U_{cp}$ , В | $I_{cp}$ , мА | $U_{cp}$ , В | $I_{cp}$ , мА | $U_{cp}$ , В | $I_{cp}$ , мА | $U_{cp}$ , В | $I_{cp}$ , мА |
| Однополупериодный:<br>- без фильтра | Ключ <b>W</b> замкнут;<br>ключи <b>Q</b> , <b>A</b> и <b>B</b> разомкнуты |               |               |              |               |              |               |              |               |              |               |
| - с <i>CLC</i> -фильтром            | Ключи <b>Q</b> и <b>W</b> разомкнуты; ключи <b>A</b> и <b>B</b> замкнуты  |               |               |              |               |              |               |              |               |              |               |

- скопировать три осциллограммы выходного напряжения  $u_n$  (без фильтра и с фильтрами *C*- и *CLC*-типа) (см. рис. 1.10) на страницу отчета;
- записать показания приборов **V1**, **A1**, **XSC1** и **XSA1** в табл. 1.3 при запусках программы EWBi окончании процессов моделирования, учитывая, что основная гармоника схемы двухполупериодного выпрямления имеет частоту  $f = 100$  Гц;
- снять и построить (по данным табл. 1.4) в одном масштабе (на одном рисунке) вольтамперные характеристики  $U_{cp}(I_{cp})$  двухполупериодного выпрямителя без сглаживающего фильтра и с *CLC*-фильтром.

**Задание 3.** Собрать схему однофазного управляемого выпрямителя со средней точкой (рис. 1.11) или открыть файл **22.12.msl0**, размещенный в папке **CircuitDesignSuite10.0** среды EWBi. Схема содержит источник синусоидального напряжения **E1**; трансформатор **T1** со средней точкой; два тиристора **VS1** и **VS2**; источник **E2** с регулируемым временем задержки  $t_3$  (**DelayTime**) управляющих импульсов для отпираания тиристоров (задана длительность импульсов (**PulseWidth**)  $t_n = 0,2$  мс и период (**Period**)  $T = 10$  мс); приборы для измерения и наблюдения за изменениями электрических величин; нагрузочный резистор **R2**.

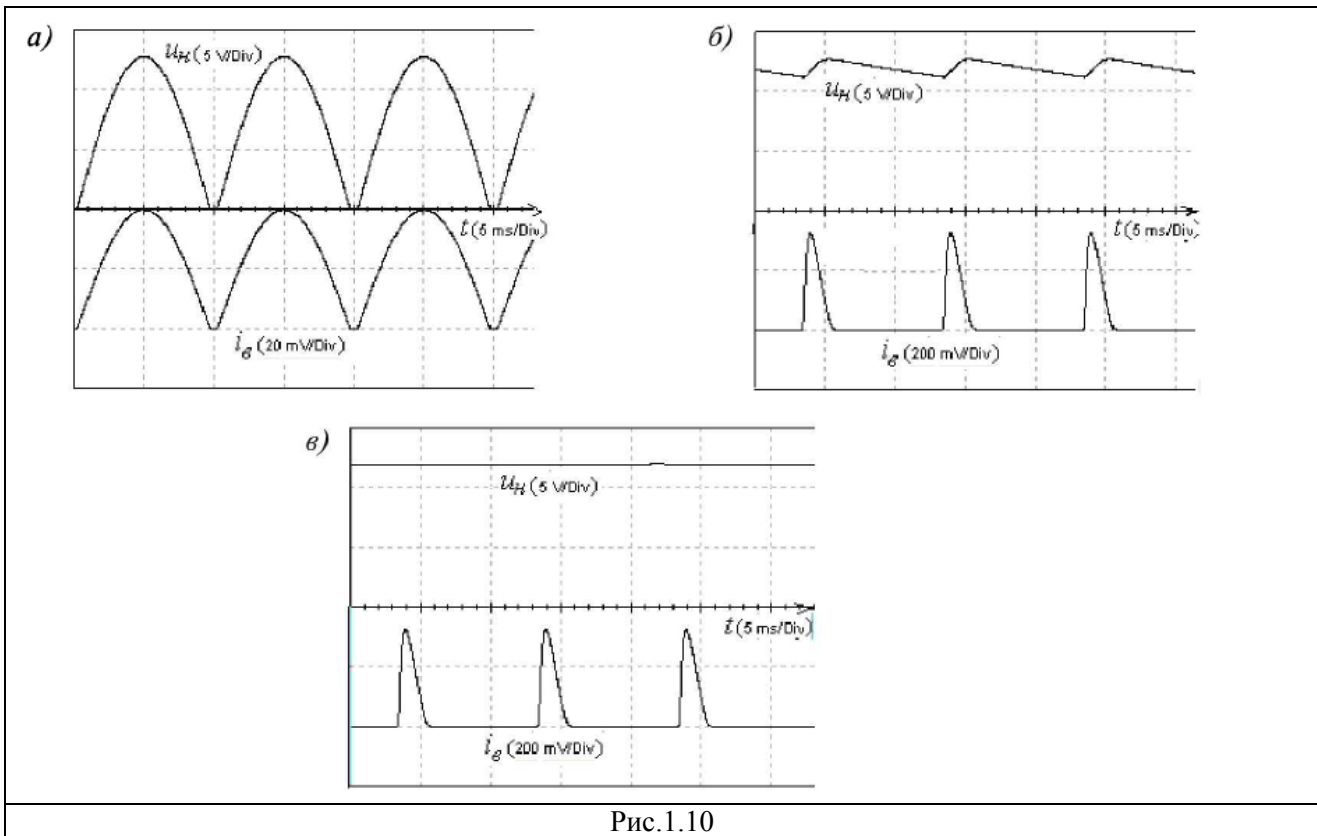


Рис.1.10

Таблица 1.3

| Тип выпрямителя                    | Установлено   | Измеренно   |             |             |               | Рассчитано            |                           |
|------------------------------------|---|-------------|-------------|-------------|---------------|-----------------------|---------------------------|
|                                    |   | $U_{2m}, В$ | $U_{cp}, В$ | $I_{cp}, В$ | $U_{m.ор}, В$ | Коэффициент пульсации | Коэффициент сглаживания   |
| Двухполупериодный<br>- без фильтра | Ключи <b>Q</b> и <b>W</b> замкнуты;<br>ключи <b>A</b> и <b>B</b> разомкнуты |             |             |             |               | $q_n =$               | Нет                       |
| - с C-фильтром                     | Ключи <b>Q, W</b> и <b>A</b> замкнуты;<br>ключ <b>B</b> разомкнут           |             |             |             |               | $q_{n1} =$            | $k_{c1} = q_n / q_{n1} =$ |
| - с CLC-фильтром                   | Ключ <b>W</b> разомкнут;<br>ключи <b>Q, A</b> и <b>B</b> замкнуты           |             |             |             |               | $q_{n2} =$            | $k_{c2} = q_n / q_{n2} =$ |

3.1. Подготовить схему к проведению исследований. С этой целью:

- установить параметры компонентов схемы, указанные на рис. 1.10;
- сформировать *однополупериодный* управляемый выпрямитель при работе на нагрузку **R2**, разомкнув ключ **Q**;
- подключить к соответствующим узлам схемы входы четырехлучевого осциллографа **XSC2**: на канал **A** подать синусоидальное напряжение  $u_2$  от одной из

Таблица 1.4

| Тип | Установлено | Измерено |
|-----|-------------|----------|
|-----|-------------|----------|

| Выпрямителя                         |   | $R_2 = 2 \text{ кОм}$ |                | 500 Ом         |                | 250 Ом         |                 | 100 Ом         |                 | 50 Ом          |                 |
|-------------------------------------|---|-----------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|----------------|-----------------|
|                                     |   | $U_{cp},$<br>В        | $I_{cp},$<br>А | $U_{cp},$<br>В | $I_{cp},$<br>А | $U_{cp},$<br>В | $I_{cp},$<br>мА | $U_{cp},$<br>В | $I_{cp},$<br>мА | $U_{cp},$<br>В | $I_{cp},$<br>мА |
| Двухполупериодный:<br>- без фильтра | Ключи <b>Q</b> ,<br><b>W</b> замкнуты;<br>ключи <b>A</b> и <b>B</b><br>разомкнуты |                       |                |                |                |                |                 |                |                 |                |                 |
| - с <i>CLC</i> -<br>фильтром        | Ключ<br><b>W</b> разомкнут;<br>ключи <b>Q</b> , <b>A</b><br>и <b>B</b> замкнуты   |                       |                |                |                |                |                 |                |                 |                |                 |

двух вторичных полуобмоток трансформатора **T1**, на канал **B** — напряжение  $u_n$  с нагрузки **R2**, на канал **C** — управляющие импульсы  $u_y$  от источника прямоугольных импульсов **E2**;

- скопировать изображение схемы (рис. 1.10) на страницу отчета.

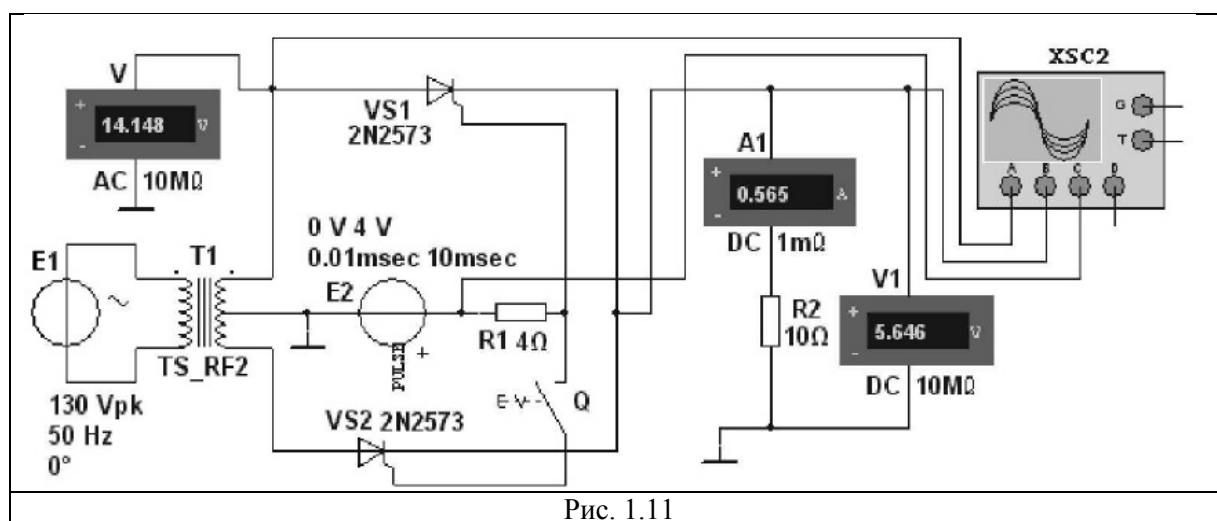


Рис. 1.11

3.2. Провести моделирование процессов в однополупериодном управляемом выпрямителе:

- снять и построить регулировочную характеристику  $I_{cp}(\alpha)$  выпрямителя, последовательно задавая время задержки  $t_3 = 0, 2; 2; 4; 6; 8$  и  $10$  мс импульсов управления  $u_y$  генератора **E2** и измеряя для заданных значений  $t_3$  (соответствующих углов отпирания  $\alpha$ ) ток  $I_{cp}$  нагрузки;
- скопировать осциллограммы напряжения  $u_n$  на нагрузке при  $t_3 = 4$  и  $8$  мс на страницу отчета.

В качестве примера на рис. 1.12 приведены осциллограммы напряжений  $u_2$ ,  $u_n$  и управляющих импульсов  $u_y$  при времени их задержки  $t_3 = 2$  мс (при угле отпирания  $\alpha = 36^\circ$ )

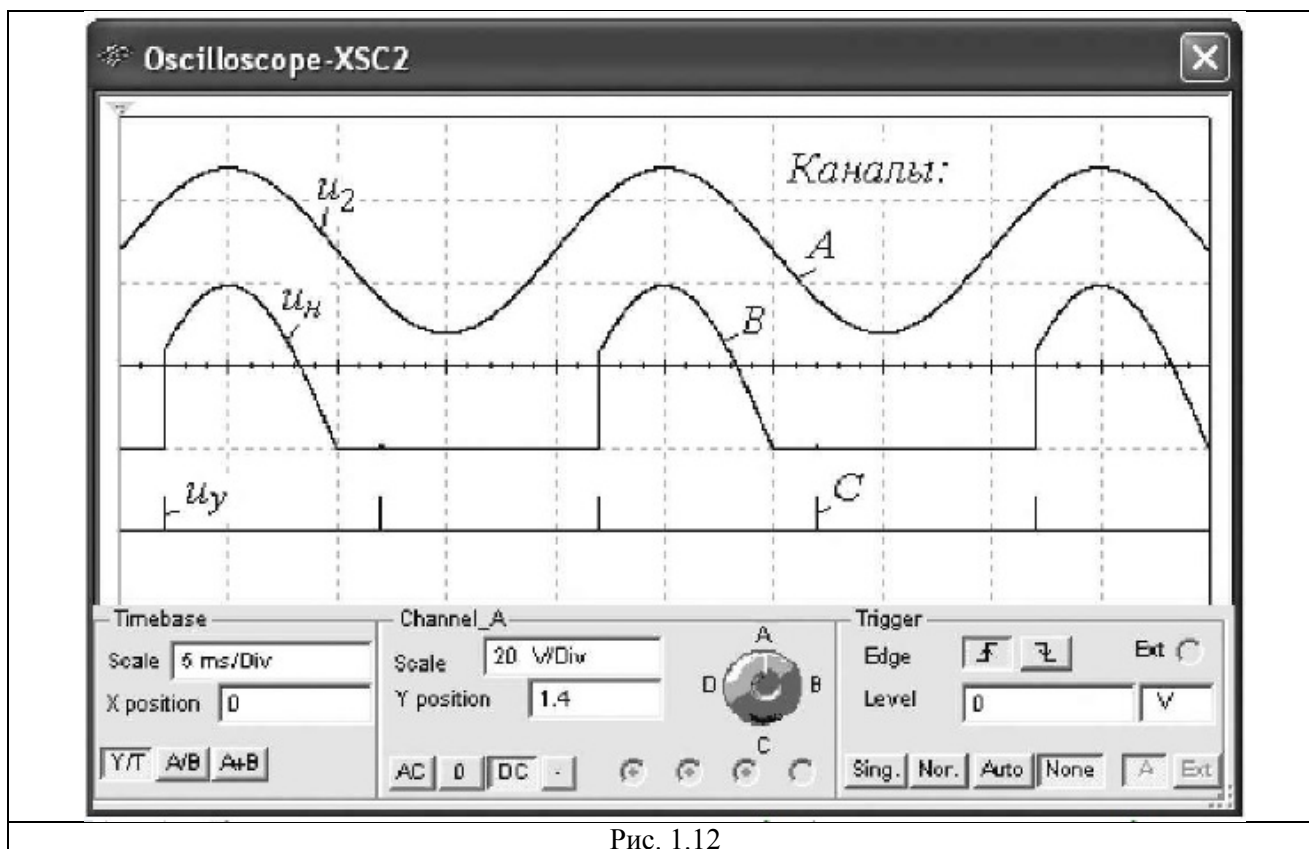


Рис. 1.12

по отношению к началу нарастания положительной полуволны синусоидального напряжения  $u_2$  с периодом  $T = 20$  мс.

3.3. Провести исследования, аналогичные п. 3.2, для двухполупериодного управляемого выпрямителя (в предыдущей схеме замкнуть ключ Q).

## СОДЕРЖАНИЕ ОТЧЕТА

1. Наименование и цель работы.
2. Перечень приборов, использованных в экспериментах, с их краткими характеристиками.
3. Изображения электрических схем испытания выпрямителей и осциллограмм напряжения  $u_n$  на нагрузке.
4. Таблицы результатов измерений и расчетов.
5. Расчетные формулы.
6. Выводы по работе.

## ТЕСТОВЫЕ ЗАДАНИЯ К РАБОТЕ 2

1. Каково **назначение** трансформатора в выпрямительных схемах:
  - для развязки электрической сети и нагрузки;
  - для изменения значения переменного напряжения, получаемого от источника питания, с целью приведения его в соответствие со значением требуемого выпрямленного напряжения;
  - для более стабильной работы выпрямителя при колебаниях напряжения источника питания.



2. Укажите коэффициенты пульсации  $q_n$  схем выпрямления без сглаживающих фильтров:

- а) однополупериодный:  0,25;  0,667;  1,57;  0,057  
 б) двухполупериодной:  0,25;  0,667;  1,57;  0,057    
 в) трехфазной «мостовой»:  0,25;  0,667;  1,57;  0,057

3. Поясните, в каких случаях целесообразно использовать в выпрямителях:

- а) *индуктивный* фильтр:  
 при любой нагрузке;  при высокоомной нагрузке;  
 при низкоомной нагрузке;  
 б) *емкостный* фильтр:  
 при любой нагрузке;  при высокоомной нагрузке;  
 при низкоомной нагрузке.

4. Укажите, чему равно среднее значение  $U_{cp}$  выпрямленного напряжения однофазных выпрямителей без сглаживающих фильтров при работе на активную нагрузку:

- а) *однотактного*:  
 $(1/\pi)U_{2m}$ ;  $(1/2)U_{2m}$ ;  $(2/3)U_{2m}$ ;  $(2/\pi)U_{2m}$ ;  $(4/3\pi)U_{2m}$ ;    
 б) *двухтактного*:  
 $(1/\pi)U_{2m}$ ;  $(1/2)U_{2m}$ ;  $(2/3)U_{2m}$ ;  $(2/\pi)U_{2m}$ ;  $(4/3\pi)U_{2m}$ .

5. Укажите соотношение, посредством которого вычисляют коэффициент сглаживания  $k_c$  фильтра ( $q_n$  и  $q_{n1}$  — коэффициенты пульсации выпрямленного напряжения до фильтра и после фильтра):

- $U_{cp}/U_{2m}$ ;   $U_{2m}/U_{cp}$ ;   $q_n/q_{n1}$ ;   $q_{n1}/q_n$ .