

МИНИСТЕРСТВО ОБРАЗОВАНИЯ и НАУКИ РОССИЙСКОЙ ФЕДЕРАЦИИ  
ФЕДЕРАЛЬНОЕ ГОСУДАРСТВЕННОЕ БЮДЖЕТНОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ  
УЧРЕЖДЕНИЕ ВЫСШЕГО ПРОФЕССИОНАЛЬНОГО ОБРАЗОВАНИЯ  
**"МАТИ - РОССИЙСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНОЛОГИЧЕСКИЙ УНИВЕР-  
СИТЕТ имени К.Э. Циолковского"**

---

**Факультет №1 4**

**Кафедра "Моделирование систем и информационные технологии"**

**Методические указания к выполнению курсовой работы:**  
**«Электротехника и электроника»**

Составитель      Б.Б.Былов

МОСКВА 2011г.

Расчет электронных схем/ Сост.: Б.Б.Былов: Метод. указания. — М.: МАТИ, 2011. — 71 с.

© Б.Б.Былов составление 2011

© МАТИ, 201

## **Методические указания к выполнению курсовой работы**

Курсовая работа по дисциплине «Общая электротехника и электроника» выполняется студентами как этап изучения вышеназванного курса.

Цель курсовой работы:

1. Дать возможность использовать теоретические знания, приобретенные при изучении курса, для решения практических инженерных проблем.
2. Закрепить имеющиеся навыки решения электротехнических задач.
3. Проверить степень усвоения студентами соответствующих разделов курса.

Учебное пособие содержит материал по ряду разделов курса «Общая электротехника и электроника». Данный материал позволяет выполнить проектирование некоторых электротехнических и электронных устройств. Каждый из разделов пособия представляет собой самостоятельную, законченную методику расчета конкретного устройства. Объем и содержание курсовой работы определяет преподаватель-консультант.

Пояснительная записка к курсовой работе выполняется на стандартных листах формата А4 и включает следующие разделы:

1. Титульный лист соответствует стандарту для данного вида документации, принятому в ИГХТУ;
2. Содержание пояснительной записки;
3. Исходные данные для проектирования (если производится проектирование нескольких устройств, то исходные данные для каждого устройства);
4. Принципиальные схемы электротехнических или электронных устройств. Выполняются в формате А4 и включаются в Пояснительную записку.
5. Расчет принципиальной схемы с объяснением каждого действия и обоснованиями выбора всех элементов схемы.

6. Графическая часть (если это необходимо). Вольтамперные, амплитудно-частотные, фазо-частотные и другие характеристики. Векторные диаграммы, эпюры тока и напряжения и прочее.
7. Список используемой литературы.

Пояснительная записка может быть оформлена с использованием компьютерных текстовых и графических процессоров, а также различных математических сред или представлена в рукописном варианте и содержать расчет, выполненный вручную. Качество оформления пояснительной записки учитывается при окончательной оценке работы. После представления работы преподавателю-консультанту, она проверяется и подлежит защите.

# 1. РАСЧЁТ ОДНОТАКТНОГО КАСКАДА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

## Данные для проектирования

$P_{\text{вых}}$  - выходная мощность каскада,

$R_H$  - сопротивление нагрузки,

$f_H$ - $f_B$  - диапазон усиливаемых частот,

$M_H$  - коэффициент частотных искажений на нижней частоте,

$E_{\pi}$  - ЭДС источника питания.

На рис.1.1 приведена схема усилительного каскада.

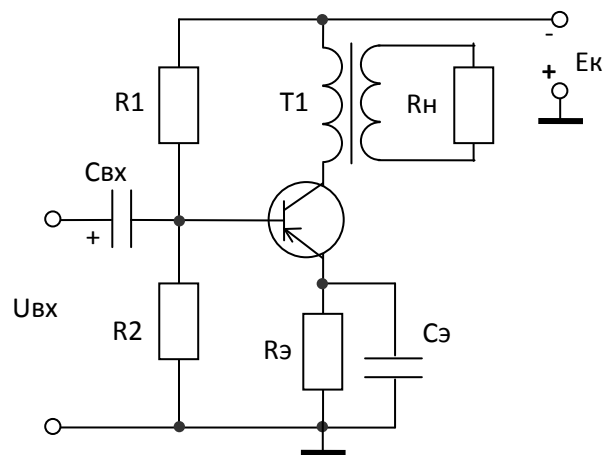


Рис. 1.1. Схема каскада усиления

Дано:  $P_{\text{вых}} = 20$  Вт;  $R_H = 4$  Ом;  $f_H - f_B = 12$  кГц;  $f_H = 70$  Гц;  $M_H = 1,1$ ;  
 $E_{\pi} = 24$  В.

## 1.1. ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. Распределяют по цепям частотные искажения.

$$M_H = \prod_{i=1}^K M_{Hi}.$$

Выходной трансформатор:  $M_H = 1,14$ .

Цепь эмиттерной стабилизации:  $M_H = 1,08$ .

Цепь связи RC между каскадами:  $M_H = 1,05$ .

2. Вычисляют мощность сигнала, отдаваемую транзистором

$$P_{\approx} = \frac{P_{\text{ВЫХ}}}{\eta_{\text{тр}}},$$

$\eta_{\text{тр}}$  - КПД выходного трансформатора.

КПД выходного трансформатора из таблицы 1.1 принимаем равным

$\eta_{\text{тр}} = 0,82$ .

$$P_{\approx} = P_{\text{ВЫХ}} / \eta_{\text{тр}} = 20 / 0,82 = 24,4 \text{ Вт.}$$

3. Находим мощность, выделяемую на транзисторе при  $k_A = 0,035 \dots 0,45$ .  
Принимаем коэффициент использования транзистора  $k_A = 0,2$ .

$$P_0 \approx \frac{P_{\approx}}{k_A} = 24,4 / 0,2 = 122 \text{ Вт.}$$

4. Ориентировочно определяют падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки трансформатора и на сопротивлении  $R_{\Sigma}$

$$\Delta U = U_{R_{\Sigma 1}} + U_{R_{\Sigma}} = (0,2 \dots 0,3) E_{\text{п}} = 0,25 \cdot 12 = 3 \text{ В.}$$

5. Наибольшее возможное напряжение на транзисторе

$$U_{\text{кэ.м}} = (E_{\text{п}} - \Delta U) / (0,4 \dots 0,45) = (12 - 3) / 0,42 = 21 \text{ В.}$$

По двум параметрам  $P_0$  и  $U_{\text{кэ.м}}$  выбираем транзистор p-n-p КТ818ВМ с  $U_{\text{кэ.м}} = 60 \text{ В}$ ;  $I_{\text{к.м}} = 15 \text{ А}$ ;  $P_{\text{к.доп.}} = 100 \text{ Вт}$ ;  $\beta = 20$ ;  $f_{h21\gamma} = 3 \text{ МГц}$  из таблицы: «Параметры транзисторов».

Проверяем транзистор по частоте, при этом:

$$f_{h21\gamma} \geq \frac{F_B}{\sqrt{M_B^2 - 1}} = 12 / \sqrt{1,1^2 - 1} = 26 \text{ кГц.}$$

где  $F_B$  - верхняя граничная частота усилителя;

$M_B$  - коэффициент частотных искажений на данной частоте ( $M_B = M_H = 1,1$ ).

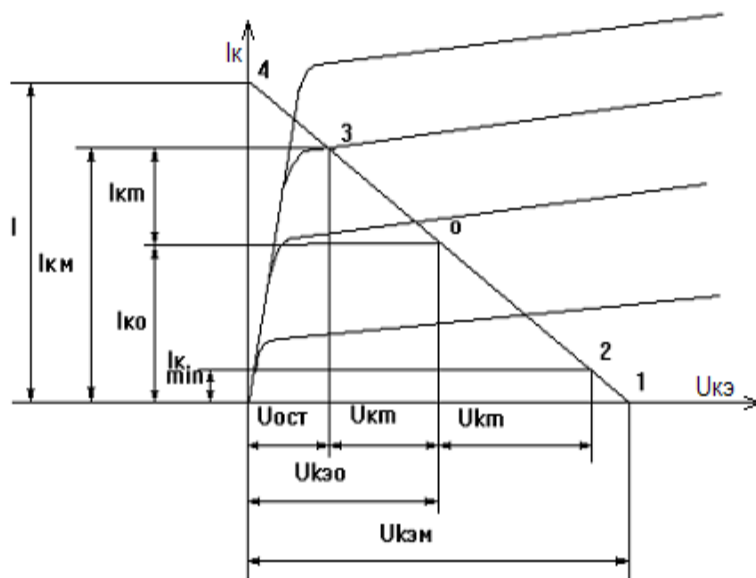


Рис. 1.2. Выходные характеристики условного транзистора

6. Определяют положение точки покоя на выходных статических характеристиках транзистора (рис. 1.2).

$$U_{к.э.0} = E_{п} - \Delta U = 24 - 3 = 21 \text{ В},$$

$$I_{к.0} = P_0 / U_{к.э.0} = 61 / 21 = 2,9 \text{ А}.$$

При отсутствии в справочниках выходных характеристик выбранного транзистора строим нагрузочную характеристику по аналогии с рис. 1.3 (прямая 1).

7. Определяем рабочий участок нагрузочной прямой 1.

Для чего задаемся величиной остаточного напряжения ( $U_{ост} = 2 \text{ В}$ ). Наименьший ток коллектора из рис. 3  $I_{к.min} = 1 \text{ А}$  (получился из условия симметрии с  $I_{кМ}$  относительно точки О, рис. 1.3).

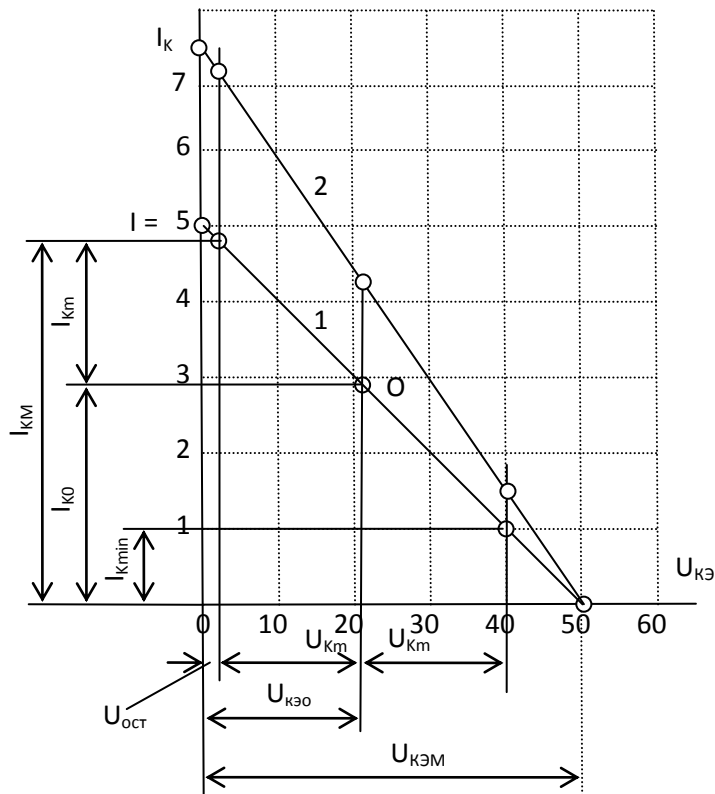


Рис. 1.3. Нагрузочные прямые: 1 – исходная; 2 – скорректированная.

8. Из построения определяем:

$U_{к.м} = U_{кэ.0} - U_{ост} = 21 - 2 = 19$  В - амплитуда выходного напряжения;

$I_{к.м} = I_{кМ} - I_{к0} = 4,8 - 2,9 = 1,9$  А - амплитуда выходного тока.

Соблюдается условие  $I_{к.м} \leq I_{к.доп} = 15$  А.

9. Вычисляют мощность сигнала, отдаваемую транзистором

$$P_T = 0,125(I_{к.м} - I_{к.мин})^2 R_{кп},$$

$R_{кп} = U_{кэ.м}/I = 50 / 5 = 10$  Ом - сопротивление нагрузки переменному току; I - точка пересечения нагрузочной прямой с осью ординат.

$$P_T = 0,125 (4,8 - 1)^2 \cdot 10 = 18 \text{ Вт.}$$

Что меньше, чем  $P_{\approx} = 24,4$  Вт.

Увеличиваем наклон нагрузочной прямой (увеличиваем I до 7,5 А - прямая 2, рис. 1.3) и вычисляем  $P_T$  с новыми параметрами.

$$R_{кп} = U_{кэ.м}/I = 50 / 7,5 = 6,7 \text{ Ом;}$$

$$P_T = 0,125 (7,2 - 1,5)^2 \cdot 6,7 = 27,2 \text{ Вт.}$$

Теперь  $P_T > P_{\approx}$  ( $P_T$  не должна превышать  $P_{\approx}$  более чем на (20...30) %).



Нагрузочная прямая не должна выходить из области допустимой мощности.  
 При  $U_{кЭ0} = 21 \text{ В}$  и  $I_{к0} = 4,3 \text{ А}$

$$P_{KM} \approx P_{к0} = U_{кЭ0} I_{к0} = 21 \cdot 4,3 = 90,3 \text{ Вт.}$$

$$P_{KM} < P_{к,доп.} = 100 \text{ Вт.}$$

10. Диапазон изменения входного тока (тока базы) при  $\beta = 20$ :

$$I_{б.м} = I_{к.м} / \beta = 7,2 / 20 = 0,36 \text{ А.}$$

$$I_{б.min} = I_{к.min} / \beta = 1,5 / 20 = 0,075 \text{ А.}$$

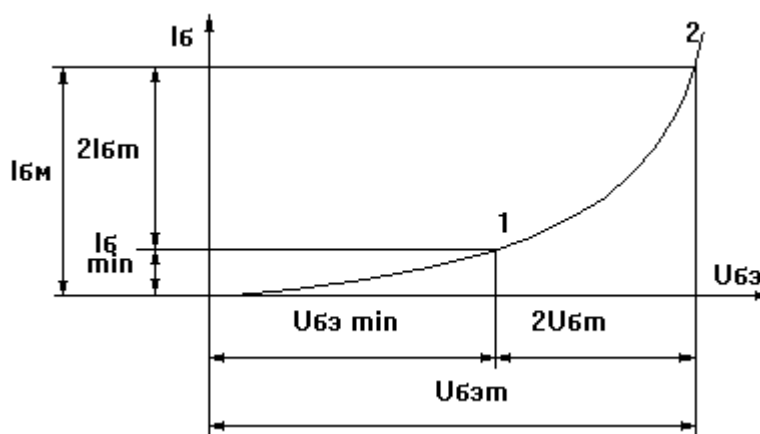


Рис. 1.4. Определение параметров входного сигнала

11. По входной характеристике транзистора находим  $U_{бэ.м}$  и  $U_{бэ.min}$  (рис. 1.4.)

Если входной характеристики данного транзистора в справочнике нет, то для кремниевого транзистора можно принять:  $U_{бэ.м} = 0,7 \text{ В}$ ,  $U_{бэ.min} = 0,5 \text{ В}$ .

12. Вычисляем мощность входного сигнала и входное сопротивление транзистора переменному току.

$$P_{вх} = 2U_{бэ.м} \cdot 2 I_{б.м} / 8 = 2 \cdot 0,7 \cdot 2 \cdot 0,36 / 8 = 0,126 \text{ Вт;}$$

$$R_{вх.тр} = U_{бэ.м} / I_{б.м} = 0,7 / 0,36 = 1,94 \text{ Ом,}$$

$U_{бэ.м}$  и  $I_{б.м}$  - соответственно амплитудные значения напряжения и тока базы.

13. Сопротивление в цепи эмиттера определяем по падению напряжения на этом сопротивлении при  $I_{к0} = 4,3 \text{ А}$ :

$$U_{RЭ} = (0,5...0,3) \Delta U = 0,4 \cdot 3 = 1,2 \text{ В;}$$

$$R_{Э} = U_{RЭ} / I_{к0} = 1,2 / 4,3 = 0,28 \text{ Ом.}$$

14. Определяют емкость конденсатора в цепи эмиттера. При  $f_H = 70 \text{ Гц}$

$$C_3 = 10 / (2 \pi f_H R_3) = 10 / (2 \pi \cdot 70 \cdot 0,28) = 0,081 \text{ Ф.}$$

15. Определяем входное сопротивление каскада  $R_{BX.K.}$  и  $R_1$ ,  $R_2$ .

$$R_{BX.K.} = R_{BX.тр} + \beta \cdot R_3 = 1,94 + 20 \cdot 0,28 = 7,5 \text{ Ом.}$$

Обычно величину резистора  $R_2$  делителя напряжения выбирают в несколько раз меньше, чем  $R_{BX.K.}$ . В нашем случае (с трансформаторным включением нагрузки) по постоянному току каскад охвачен глубокой отрицательной обратной связью, что уже обеспечивает его достаточно высокую температурную стабильность. Поэтому можем принять  $R_2 = R_{BX.K.} = 7,5 \text{ Ом.}$

Эти резисторы включены параллельно. Их общее сопротивление равно

$$R_{2-BX.K.} = R_2 / 2 = 7,5 / 2 = 3,75 \text{ Ом.}$$

Начальный ток базы

$$I_{6.0} = I_{K0} / \beta = 4,3 / 20 = 0,215 \text{ А.}$$

Падение напряжения на  $R_2$

$$U_{R2} = R_2 \cdot I_{K0} = 7,5 \cdot 0,215 = 1,6 \text{ В.}$$

Напряжение на  $R_1$

$$U_{R1} = E_{П} - U_{R2} = 24 - 1,6 = 22,4 \text{ В.}$$

$$R_1 = U_{R1} \cdot R_2 / U_{R2} = (22,4 \cdot 7,5) / 1,6 = 105 \text{ Ом;}$$

16. Вычисляют коэффициент усиления каскада по мощности

$$K_p = P_{вых} / P_{вх} = 20 / 0,126 = 159.$$

17. Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$K = \sqrt{\frac{R_H}{R_{КП} \eta_T}} = \sqrt{\frac{4}{6,7 \cdot 0,82}} = 0,73.$$

18. Сопротивление обмотки выходного трансформатора:

$$R_{т.1} = 0,5 R_{КП} (1 - \eta_T) = 0,5 \cdot 6,7 (1 - 0,82) = 0,60 \text{ Ом;}$$

$$R_{т.2} = R_{т.1} \cdot K^2 = 0,6 \cdot 0,73^2 = 0,32 \text{ Ом.}$$

19. Индуктивность первичной обмотки:

$$L = \frac{0,159(R_H + R_{т.2})}{f_H K^2 \sqrt{M_{HT}^2 - 1}} = \frac{0,159(4 + 0,32)}{70 \cdot 0,73^2 \sqrt{1,1^2 - 1}} = 0,04 \text{ Гн.}$$

20. Площадь поверхности охлаждающего радиатора,

$$S_{ox} = \frac{(1200 \div 1500)P_0}{T_{Т.М}^0 - T_{ср.М}^0 - P_0 R_{ТТ}},$$

где  $T_{ср.М}^0 = 40^\circ\text{C}$  - наибольшая возможная температура окружающей среды;  
 $T_{Т.М}^0 = 150^\circ\text{C}$  - наибольшая допустимая температура коллекторного перехода;  $R_{ТТ}$  - тепловое сопротивление. Для КТ818ВМ из справочника  $R_{ТТ} = 1^\circ\text{C/Вт}$ .

$$S_{ox} = \frac{1300 \cdot 61}{150 - 40 - 61 \cdot 1} = 1618 \text{ см}^2.$$

21. Находим емкость  $C_{ВХ}$

$$C_{ВХ} = 10 / (2 \pi f_n R_{2-ВХ.К.}) = 10 / (2 \pi \cdot 70 \cdot 3,75) = 0,006 \text{ Ф} = 6000 \text{ мкФ}.$$

## 2. РАСЧЕТ МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ФИЛЬТРОМ

Исходными данными для расчета выпрямителя являются:

$U_{н0}$  – среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке;

$I_0$  – среднее значение выпрямленного тока;

$U_1$  – напряжение сети;

$K_{п.ВЫХ}$  – коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения на нагрузке.

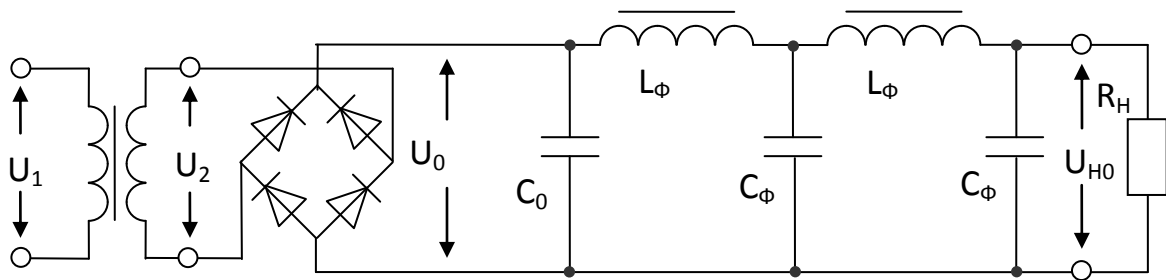


Рис. 2.1. Схема мостового выпрямителя с фильтром

В приводимых ниже расчетах напряжение выражается в вольтах, ток – в миллиамперах, сопротивление – в Омах, емкость – в микрофарадах, коэффициент пульсаций в процентах.

Произведем расчет со следующими данными.

Дано:  $U_{н0} = 4 \text{ В}$ ;  $I_0 = 2 \text{ А}$ ;  $U_1 = 220 \text{ В}$ ;  $K_{п.ВЫХ} = 2 \text{ \%}$ .

## 2.1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА

1. Для выбора типа диодов, определяют обратное напряжение на вентиле

$$U_{обр} = 1,5 \cdot U_o = 1,5 \cdot 1,2 \cdot 4 = 7,2 \text{ В},$$

где  $U_o = 1,2 \cdot U_{но}$  – напряжение на входе сглаживающего фильтра должно быть больше напряжения на нагрузке, т.к. учитывает потери напряжения на фильтре.

Средний ток через вентиль

$$I_{a\text{ ср}} = 0,5 \cdot I_o = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ А}.$$

Выбираем диоды КД130АС с  $I_{ср} = 3 \text{ А}$ ;  $U_{обр.М} = 50 \text{ В}$

Выбор диода производится по этим двум параметрам  $I_{a\text{ ср}}$  и  $U_{обр}$ . Из справочника выписывают максимальное обратное напряжение, средний ток и внутреннее сопротивление вентиля  $R_i$ . Если величины  $R_i$  в справочнике нет, то его легко рассчитать. При падении напряжения на кремниевом диоде  $U_d = 0,7 \text{ В}$  величина  $R_i = U_d / I_{a\text{ ср}} = 0,7 / 1 = 0,7 \text{ Ом}$ .

2. Расчет трансформатора при  $U_o = 1,2 \cdot U_{но} = 1,2 \cdot 4 = 4,8 \text{ В}$ :

Определяют сопротивление трансформатора

$$R_{тр} = \frac{830 \cdot U_o}{I_o \cdot (U_o \cdot I_o)^{1/4}} = \frac{830 \cdot 4,8}{2 \cdot (4,8 \cdot 2)^{1/4}} = 1132 \text{ Ом}.$$

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора

$$U_2 = 0,75 \cdot U_o + \frac{I_o (2R_i + R_{тр})}{530} = 0,75 \cdot 4,8 + \frac{2(2 \cdot 0,7 + 1132)}{530} = 11,5 \text{ В}.$$

Токи обмоток

$$I_2 = 1,41 \cdot I_o + \frac{16,6 \cdot U_o}{2 \cdot R_i + R_{тр}} = 1,41 \cdot 2 + \frac{16,6 \cdot 4,8}{2 \cdot 0,7 + 1132} = 2,9 \text{ А},$$

$$I_1 = \frac{1,2 \cdot U_2 \cdot I_2}{U_1} = \frac{1,2 \cdot 11,5 \cdot 2,9}{220} = 0,18 \text{ А}.$$

Вычисляется габаритная мощность трансформатора, которая для двухполупериодной схемы определяется выражением

$$P_r = 1,7 U_2 I_2 = 1,7 \cdot 11,5 \cdot 2,9 = 57 \text{ В} \cdot \text{А}.$$

Далее находится произведение площади сечения сердечника трансформатора  $Q_c$  на площадь окна сердечника  $Q_o$ , которое в зависимости от марки прово-

да обмотки равно, см<sup>4</sup>:

$Q_c Q_0 = 1,6 \cdot P_r$  для провода марки ПЭЛ;

$Q_c Q_0 = 2,0 \cdot P_r$  для провода марки ПЭШО;

$Q_c Q_0 = 2,4 \cdot P_r$  для провода марки ПШД.

Таблица 3.1

Тип пластины	Размеры				Пределы $Q_c Q_0$ , см <sup>4</sup>
	ширина среднего стержня а, см	ширина окна b, см	высота окна h, см	площадь окна $Q_0 = b h$ , см <sup>2</sup>	
Ш-10	1,0	0,5	1,5	0,75	0,75-1,5
Ш-10	1,0	0,65	1,8	1,17	1,17-2,34
Ш-10	1,0	1,2	3,6	4,32	4,32-8,64
Ш-12	1,2	0,6	1,8	1,08	1,56-3,12
УШ-12	1,2	0,8	2,2	1,76	2,53-5,06
Ш-12	1,2	1,6	4,8	7,68	11,1-22,2
Ш-14	1,4	0,7	2,1	1,47	2,88-5,76
Ш-14	1,4	0,9	2,5	2,25	4,41-8,82
Ш-15	1,5	1,35	2,7	3,65	8,21-16,4
Ш-16	1,6	0,8	2,4	1,92	4,91-9,82
УШ-16	1,6	1,0	2,8	2,8	7,17-14,3
Ш-18	1,8	0,9	2,7	2,43	7,87-15,7
Ш-19	1,9	1,2	3,35	4,02	14,5-29
Ш-20	2,0	1,0	3,0	3,0	12-24
Ш-20	2,0	1,7	4,7	7,99	32-64
УШ-22	2,2	1,4	3,9	5,46	26,4-52,8
Ш-25	2,5	2,5	6,0	15	93,7-180,7
Ш-25	2,5	3,15	5,8	18,3	114-228

Ш-28	2,8	1,4	4,2	5,88	46,5-93
УШ-30	3,0	1,9	5,3	10,1	91-182
Ш-32	3,2	3,6	7,2	25,9	265-530
УШ-35	3,5	2,2	6,15	13,5	165-330
УШ-40	4,0	2,6	7,2	18,7	300-600

Для провода ПЭЛ

$$Q_c Q_0 = 1,6 \cdot P_r = 1,6 \cdot 57 = 91 \text{ см}^4.$$

Из таблицы 3.1, в которой приведены основные данные типовых Ш-образных пластин, по значению  $Q_c Q_0$  выбирают тип пластины и выписывают все ее параметры.

Выбираем пластины УШ-30 с  $a = 3 \text{ см}$ ;  $b = 1,9 \text{ см}$ ;  $h = 5,3 \text{ см}$ ;  $Q_0 = b h = 10,1 \text{ см}^2$ .

При этом получают

$$Q_c = (Q_c Q_0) / Q_0 = 91 / 10,1 = 9 \text{ см}^2.$$

Необходимая толщина пакета пластин  $c = Q_c / a = 9 / 3 = 3 \text{ см}$ .

Отношение  $c/a$  рекомендуется брать в пределах 1...2. Если оно выйдет за эти пределы, то необходимо выбрать другой тип пластин.

Определяют число витков  $w$  и толщину провода  $d$  первичной и вторичной обмоток трансформатора при плотности тока в обмотках  $j = 3 \text{ А/мм}^2$ :

$$d = 1,13 (I/j)^{1/2} = 1,13(I/3)^{1/2} = 0,65 \cdot I^{1/2},$$

$$w_1 = 48 U_1 / Q_c = 48 \cdot 220 / 9 = 1173 \text{ вит.}$$

$$d_1 = 0,65 \cdot I_1^{1/2} = 0,65 \cdot 0,18^{1/2} = 0,28 \text{ мм},$$

$$w_2 = 54 U_2 / Q_c = 54 \cdot 11,5 / 9 = 69 \text{ вит.},$$

$$d_2 = 0,65 \cdot I_2^{1/2} = 0,65 \cdot 2,9^{1/2} = 1,1 \text{ мм}.$$

3. Расчет фильтра. Емкость конденсатор на входе фильтра

$$C_o = 30 \cdot I_o / U_o = 30 \cdot 2 \cdot 4,8 = 288 \text{ мкФ}.$$

Выбирают электролитические конденсаторы по величине емкости и номи-

нальному напряжению, причем  $U_c \geq 1,2 U_o$  В.

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения на выходе фильтра

$$K_{п.вх} = 300 \cdot I_o / (U_o \cdot C_o) = 300 \cdot 2 / (4,8 \cdot 288) = 0,43 \, \%$$

Необходимый коэффициент сглаживания фильтра

$$q = K_{п.вх} / K_{п.вых} = 0,43 / 2 = 0,215.$$

В данной схеме выбран двухзвенный LC-фильтр. Коэффициент сглаживания одного звена

$$q_{зв} = (q)^{1/2} = 0,215^{1/2} = 0,46.$$

Определяют произведение  $L_\phi C_\phi$  по формуле

$$L_\phi C_\phi = 2,5(q_{зв} + 1) = 2,5(0,45 + 1) = 3,63 \text{ Гн} \cdot \text{мкФ}.$$

Задаются емкостью  $C_\phi$  так, чтобы индуктивность дросселя фильтра не превышала 5 – 10 Гн и определяют индуктивность дросселя. Принимаем  $L_\phi = 7$  Гн.

$$C_\phi = 3,63 / 7 = 0,5 \text{ мкФ}.$$

Находят сечение сердечника  $Q_c$ , число витков  $w$  и диаметр провода  $d$  обмотки дросселя:

$$Q_c = L_\phi I_o^2 / 2 = 7 \cdot 2^2 / 2 = 14 \text{ см}^2;$$

$$w = 4 \cdot 10^2 / I_o = 4 \cdot 10^2 / 2 = 200 \text{ витков};$$

$$d = 0,65 \cdot I_o^{1/2} = 0,65 \cdot 2^{1/2} = 0,92 \text{ мм}.$$

Сечение обмотки

$$Q_w = w \cdot d^2 / 1000 = 200 \cdot 0,92^2 / 100 = 1,92 \text{ см}^2.$$

$$Q_c Q_w = 14 \cdot 1,92 = 27 \text{ см}^4.$$

По произведению  $Q_c Q_w$  из таблицы 3.1 выбирают тип сердечника и выписывают все параметры. С учетом объема, занимаемого стенками каркаса и изоляционными прокладками, сечение окна должно быть несколько больше сечения обмотки.

Выбираем пластины Ш-19 с  $a = 1,9$  см;  $b = 1,2$  см;  $h = 3,35$  см;  $Q_0 = b h = 4,02 \text{ см}^2$ .

4. Проверяют значение выпрямленного напряжения на нагрузке, для чего определяют среднюю длину витка обмотки  $l_w$  и сопротивление провода обмотки  $R_w$ :



$$l_w = \pi \cdot (a + b) = \pi \cdot (1,9 + 1,2) = 9,73 \text{ см};$$

$$R_w = 2 \cdot w \cdot l_w / (10^4 d^2) = 2 \cdot 200 \cdot 9,73 / (10^4 \cdot 0,92^2) = 0,46 \text{ Ом}.$$

При этом падение напряжение на двухзвенном фильтре

$$U_\phi = R_w \cdot I_0 = 0,46 \cdot 2 = 0,92 \text{ В}.$$

Напряжение на нагрузке

$$U_{н0} = U_0 - U_\phi = 4,8 - 0,92 = 3,88 \text{ В}.$$

Если напряжение на нагрузке получается меньше заданного, то необходимо провести корректировочный расчет. Простейшим является увеличение, до необходимого значения, диаметра провода обмотки дросселя. Увеличение диаметра провода приведет к уменьшению сопротивления обмотки  $R_w$ , что в свою очередь вызовет уменьшение падения напряжения на фильтре  $U_\phi$ . При этом необходимо проверить, может ли новый провод разместиться в окне выбранного сердечника дросселя фильтра.

### 3. РАСЧЕТ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ

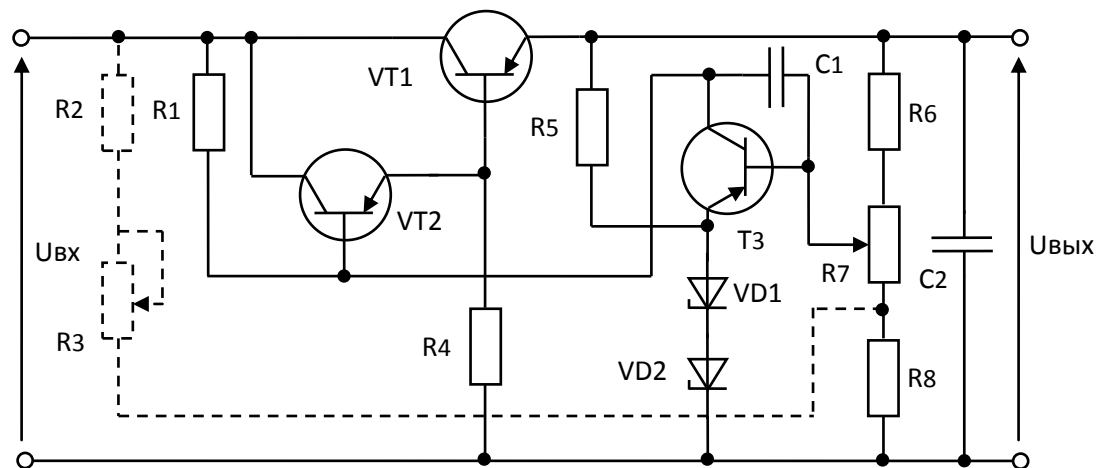


Рис.3.1. Схема компенсационного стабилизатора напряжения

Схема рис. 3.1 содержит три основных элемента: регулирующий элемент на транзисторах VT1 и VT2, усилительный элемент (усилитель постоянного тока) на транзисторе VT3 и источник опорного напряжения на стабилитронах. Собственно регулирующим элементом является транзистор VT1, а транзистор VT2 является согласующим элементом между большим выходным сопротивлением уси-

лителя постоянного тока и малым входным сопротивлением регулирующего транзистора VT1.

Достоинством транзисторных стабилизаторов является возможность получения большого тока нагрузки и регулировки выходного напряжения, а также малое выходное сопротивление. Выходное напряжение регулируется путем изменения сопротивления резистора  $R_7$ .

Исходными данными для расчета стабилизатора являются:

$U_{\text{вых}}$  - выходное напряжение, В;

$\Delta U_{\text{вых}}$  - пределы регулирования выходного напряжения, В;

$I_H$  - ток нагрузки, А;

$\Delta U_{\text{вх}}/U_{\text{вх}}$  - допустимое относительное изменение входного напряжения;

$K_{\text{ст}}$  - коэффициент стабилизации.

Расчет.

Дано:  $U_{\text{вых}} = 8 \text{ В}$ ;  $\Delta U_{\text{вых}} = 5 \text{ В}$ ;  $I_H = 4 \text{ А}$ ;  $\Delta U_{\text{вх}}/U_{\text{вх}} = 0,4$ .

### 3.1. ВЫБОР ТИПА РЕГУЛИРУЮЩЕГО ТРАНЗИСТОРА И ЕГО РЕЖИМА

Минимальное входное напряжение

$$U_{\text{вх.мин}} = U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{вых}} + U_{\text{КЭмин}} = 8 + 5 + 2 = 15 \text{ В},$$

где  $U_{\text{КЭмин}}$  - минимальное напряжение между эмиттером и коллектором транзистора VT1, при котором его работа не заходит в область насыщения. Для мощных транзисторов, которые используются в качестве регулирующих элементов, эта величина равна  $(1 \div 3) \text{ В}$ .

С учетом допустимых изменений входного напряжения определяют его номинальное  $U_{\text{вх}}$  и максимальное  $U_{\text{вх.макс}}$  значения.

$$U_{\text{вх}} = U_{\text{вх.мин}} / (1 - \Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}) = 15 / (1 - 0,4) = 25 \text{ В},$$

$$U_{\text{вх.макс}} = U_{\text{вх}} (1 + \Delta U_{\text{вх}} / U_{\text{вх}}) = 25(1 + 0,4) = 35 \text{ В}.$$

Находят максимальное напряжение  $U_{\text{КЭ1макс}}$  и максимальную мощность, рассеиваемую на регулирующем транзисторе:

$$U_{\text{КЭ1макс}} = U_{\text{вх.макс}} - U_{\text{вых.}} = 35 - 8 = 27 \text{ В};$$

$$P_{\text{К1макс}} = U_{\text{КЭ1макс}} I_H = 27 \cdot 4 = 108 \text{ Вт}.$$

По этим двум величинам из справочника выбирают подходящий транзистор, для которого выписывают  $P_{K\text{макс}}$ ,  $I_{K\text{макс}}$ ,  $h_{21}$ ,  $U_{KЭ\text{макс}}$ .

Выбираем транзистор p-n-p KT818BM с  $P_{K\text{макс}} = 100$  Вт;  $I_{K\text{макс}} = 20$  А;  $U_{KЭ\text{макс}} = 60$  В;  $h_{21} = 20$ .

### 3.2. ВЫБОР ТИПА СОГЛАСУЮЩЕГО ТРАНЗИСТОРА И ЕГО РЕЖИМА

Коллекторный ток транзистора VT2

$$I_{K2} \approx I_{Э2} = I_{Б1} + I_{R4} = I_H/h_{21,1} + I_{R4} = 4000/20 + 2 = 202 \text{ мА} = 0,2 \text{ А},$$

где  $I_{R4}$  - дополнительный ток, протекающий через резистор  $R_4$ . Для мало-мощных транзисторов, используемых в качестве согласующего элемента, дополнительный ток выбирают в пределах 1...2 мА.

Определяют максимальные значения напряжения  $U_{KЭ2}$  и мощности  $P_{K2}$  согласующего транзистора:

$$U_{KЭ2\text{макс}} \approx U_{KЭ1\text{макс}} = 27 \text{ В};$$

$$P_{K2} = I_{K2} U_{KЭ2\text{макс}} = 0,2 \cdot 27 = 5,45 \text{ Вт}.$$

Согласующий транзистор выбирают по двум параметрам  $U_{KЭ2\text{макс}}$  и  $P_{K2}$ , при этом должно соблюдаться неравенство  $I_{K\text{макс}} > I_{K2}$ .

Выбираем в качестве VT2 транзистор p-n-p KT814Г с  $P_{K\text{макс}} = 10$  Вт;  $I_{K\text{макс}} = 1,5$  А;  $U_{KЭ\text{макс}} = 80$  В;  $h_{21} = 30$ .

Сопротивление резистора

$$R_4 = U_{\text{вых}}/I_{R4} = 8 / 2 = 4 \text{ Ом}.$$

### 3.3. ВЫБОР УСИЛИТЕЛЬНОГО ТРАНЗИСТОРА $T_3$ И ЕГО РЕЖИМА

В качестве усилительного обычно выбирают маломощный транзистор. Это должен быть низко или среднечастотный транзистор подходящего напряжения и соответствующей структуры.

Выбираем p-n-p транзистор KT104Б с  $P_{K\text{макс}} = 0,15$  Вт;  $I_{K\text{макс}} = 50$  мА;  $U_{KЭ\text{макс}} = 15$  В;  $h_{21} = 60$ .

Задавая напряжением

$$U_{KЭ3} = (0,1 \div 0,5) U_{\text{вых}} = 0,3 \cdot 8 = 2,4 \text{ В},$$

определяют опорное напряжение

$$U_{оп} = U_{вых} - U_{кэз} = 8 - 2,4 = 5,6 \text{ В.}$$

Исходя из полученного опорного напряжения, по справочнику подбирают один или несколько стабилитронов, как правило, малой мощности, обеспечивающих заданное опорное напряжение. Для выбранного стабилитрона выписывают напряжение стабилизации и максимальный и минимальный токи стабилизации.

Выбираем стабилитрон КС 156 с  $I_{ст. макс} = 55 \text{ мА}$ , и  $U_{ст} = 5,6 \text{ В}$ .

Задаются рабочим током стабилитрона  $I_{ст}$  в пределах возможного изменения этого тока и определяют ограничивающее «балластное» сопротивление  $R_5$ . Примем  $I_{ст} = 10 \text{ мА}$ .

$$R_5 = (U_{вых} - U_{оп}) / (I_{ст} - I_{кз}) = (8 - 5,6) / (10 - 1,2) = 0,27 \text{ кОм.}$$

Коллекторный ток усилительного транзистора  $I_{кз}$  выбирают в пределах 1...1,5 мА. Затем находят сопротивление резистора  $R_1$ .

При

$$I_{б2} = I_{к2} / h_{21,2} = 0,2 / 30 = 0,0067 \text{ А} = 6,7 \text{ мА},$$

и

$$U_{кэ1} = U_{кэ1 макс} - \Delta U_{вых} = 27 - 5 = 22 \text{ В},$$

$$R_1 = U_{кэ1} / (I_{кз} + I_{б2}) = 22 / (1,2 + 6,7) = 2,78 \text{ кОм.}$$

### 3.4 РАСЧЕТ ДЕЛИТЕЛЕЙ НАПРЯЖЕНИЯ

$$\text{При } I_{б3} = I_{кз} / h_{21,3} = 1,2 / 60 = 0,02 \text{ мА};$$

Ток делителя  $I_{дел}$  выбирают в пределах  $(20 \div 70)I_{б3}$

$$I_{дел} = 60 \cdot 0,02 = 1,2 \text{ мА.}$$

Задаемся величиной  $R_8$  в пределах (0,5...3) кОм,  $R_8 = 3 \text{ кОм}$ .

$$R_7 = (U_{оп} - I_{дел} R_8) / (0,5 I_{дел}) = (5,6 - 1,2 \cdot 3) / (0,5 \cdot 1,2) = 3,3 \text{ кОм},$$

$$R_6 = (U_{вых} - U_{оп} - 0,5 I_{дел} R_7) / I_{дел} = (8 - 5,6 - 0,5 \cdot 1,2 \cdot 3,3) / 1,2 = 0,35 \text{ кОм.}$$

### 3.5. ВЫБОР КОНДЕНСАТОРОВ

Емкость конденсатора  $C_1$ , включаемого для предотвращения возбуждения стабилизатора, подбирают экспериментально. Обычно берут  $C_1$ , 0,5 ÷ 1 мкФ.

Емкость конденсатора  $C_2$ , включение которого приводит к незначительному уменьшению пульсации выходного напряжения и заметному уменьшению выходного сопротивления стабилизатора переменному току, выбирают в пределах  $1000 \div 2000$  мкФ.

#### 4. РАСЧЕТ УПРАВЛЯЕМОГО ТИРИСТОРНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

## Данные для проектирования

1. Схема управляемого тиристорного выпрямителя показана на рис.5.1. Пунктирным прямоугольником выделен силовой выпрямитель. Конкретная схема силового выпрямителя задается преподавателем (рис. 5.4...7).

2.  $I_{cp}$  – среднее значение выпрямленного тока при полностью открытых тиристорах VS1 и VS2;

3.  $U_{cp}$  – среднее значение выпрямленного напряжения при полностью открытых тиристорах VS1 и VS2;

#### 4. $\alpha$ - угол открытия тиристоров

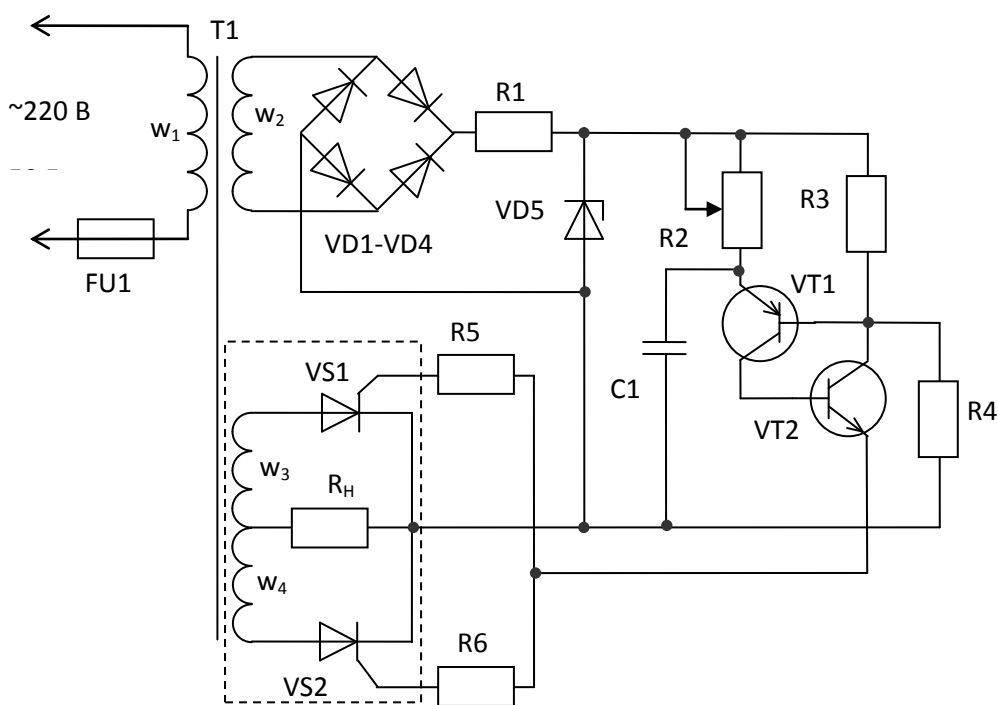


Рис.4.1. Принципиальная схема выпрямителя

**Принцип работы схемы.** Переменное напряжение с обмотки трансформатора  $w_2$  (рис.5.2, а.), выпрямленное мостом VD1-VD4 (рис.5.2, б.), через резистор R1 поступает на стабилитрон VD5, который отрезает верхушки импульсов синусоид на уровне напряжения стабилизации:  $u_{CT.VD5}$ . В результате на стабилитроне формируется напряжение, форма которого изображена на рис.5. 2, в.

От этого напряжения через  $R2$  за время  $t_1$  (рис.5.3) заряжается конденсатор  $C1$  до напряжения включения аналога динистора  $u_{R4}$ , собранного на транзисторах  $VT1$  и  $VT2$ . Величина напряжения включения определяется падением напряжения на резисторе  $R4$ .

Время заряда  $C1$  ( $t_1$ ) до напряжения включения зависит от положения движка резистора  $R2$ . Чем больше величина  $R2$ , тем позднее включится аналог динистора, через который ток разряда  $C1$  ( $i_\gamma$ ) подводится к управляющим электродам тиристоров  $VS1$  и  $VS2$  и тем меньше будет напряжение на нагрузке силового выпрямителя резисторе  $R_H$ .

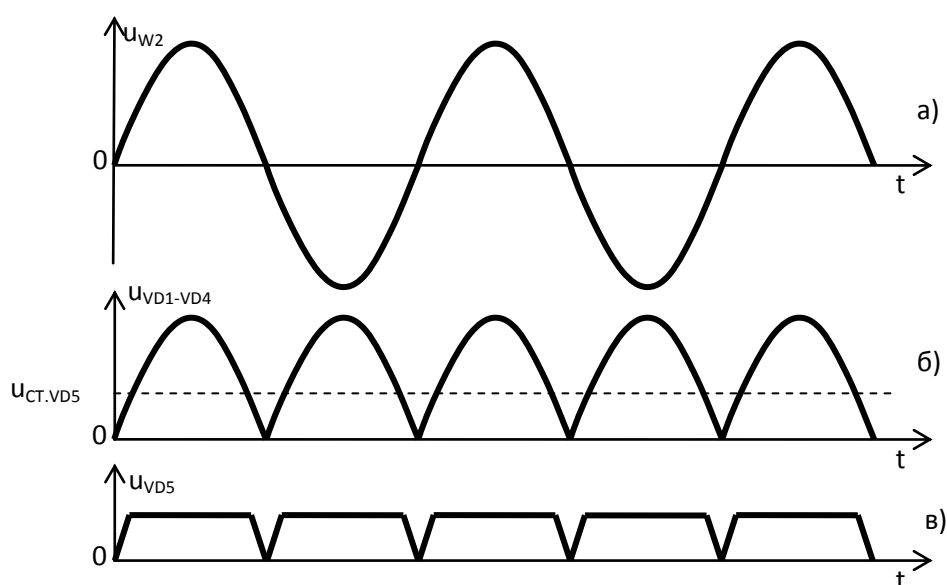


Рис.5. 2. Форма напряжения: а- на обмотке  $w_2$ ; б- на выходе выпрямителя  $VD1-VD4$ ; в- на стабилитроне  $VD5$

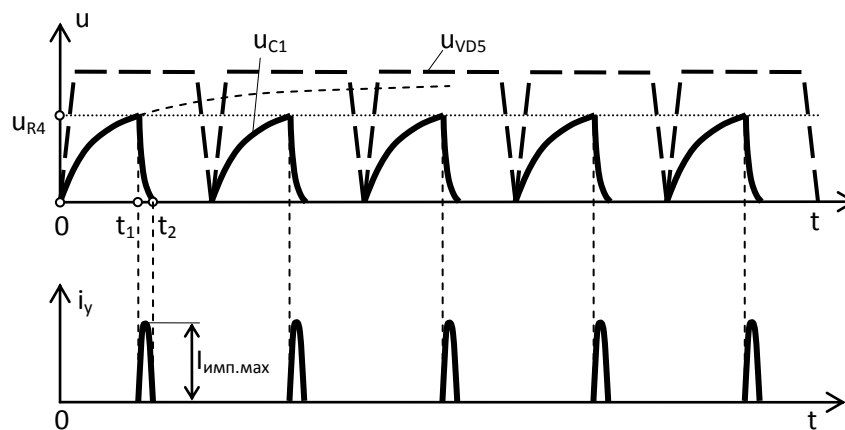


Рис. 5.3. Формы напряжений на стабилитроне ( $u_{VD5}$ ); на конденсаторе  $C_1$  ( $u_{C1}$ ); резисторе  $R_4$  ( $u_{R4}$ ) и импульсов тока управления  $i_y$  тиристоров  $VS1$  и  $VS2$

## 4.1 ПОРЯДОК РАСЧЕТА

1. По заданным  $I_{ср.}$  и  $U_{ср.}$  рассчитать **действующие** значения напряжения и тока ( $U_3$  и  $I_{3,4}$ ) на обмотках  $w_3$  и  $w_4$  для заданной схемы выпрямления.

2. Найти мощность, потребляемую нагрузкой ( $R_H$ ):

$$P_H = U_3 I_{3,4}.$$

Это исходный параметр для расчета трансформатора.

3. Определить амплитудное значение напряжения на  $w_3$ :

$$U_{3max} = U_3 \sqrt{2}.$$

4. С учетом  $U_{3max}$  и среднего значения тока через каждый тиристор выбрать по справочнику тиристоры  $VS1$  и  $VS2$ . Из справочника определить также ток управления  $I_{упр}$  и время включения тиристоров  $t_{вкл.}$

5. Определение величины  $R_5$  и  $R_6$ .

Чтобы выровнять токи управляющих электродов тиристоров, падение напряжения на этих резисторах принимают равным:

$$U_{R5} = U_{R6} = 5 \Delta U_{упр},$$

где  $\Delta U_{упр} \approx 0,7$  В – падение напряжения в управляющей цепи тиристора. Тогда получаем:

$$R_5 = R_6 = 5 \Delta U_{упр} / I_{упр}.$$

6. Рассчитаем напряжение на  $C_1$ :



$$U_{C1} = U_{R5} + \Delta U_{\text{упр}} + \Delta U_{VT1} + \Delta U_{VT2},$$

где  $\Delta U_{VT1} + \Delta U_{VT2}$  – падение напряжения на транзисторах VT1 и VT2 в режиме насыщения. Для кремниевых транзисторов:

$$\Delta U_{VT1} + \Delta U_{VT2} = U_{БЭ} + U_{КЭ \text{ нас}} = 0,7 + U_{КЭ \text{ нас}},$$

где  $U_{КЭ \text{ нас}}$  – напряжение коллектор-эмиттер в режиме насыщения для транзисторов типа КТ315 и КТ 361 принимаем равным 0,4 В.

7. Далее находим емкость конденсатора  $C_1$  из условия, что за время  $t_{\text{вкл}}$  конденсатор разрядится на величину  $U_{R5}$ :

$$C_1 = I_{\text{упр}} t_{\text{вкл}} / U_{R5}$$

8. Величину  $R_2$  находим из постоянной времени заряда  $C_1$ :

$$R_2 = \tau / C_1,$$

где  $\tau = 0,01$  с (полупериод напряжения сети при  $f = 50$  Гц).

9. Определяем напряжение на  $R_4$  и его величину. Разряд  $C_1$  через аналог диодистора на VT1 и VT2 начинается при:

$$U_{R4} = U_{C1} + U_{БЭ VT1};$$

где  $U_{БЭ VT1} \approx 0,4$  В – падение напряжения на переходе база-эмиттер транзистора VT1.

10. Ток резистора  $R_4$  должен быть в несколько десятков раз больше обратного тока коллектора VT2. Последний обычно не превышает нескольких микроампер. Поэтому ток через  $R_4$  можно принять равным:  $I_{R4} = 1$  мА.

Тогда

$$R_4 = U_{R4} / I_{R4} = U_{R4} / 10^{-3} = 1000 U_{R4}.$$

11. Находим величину  $R_3$ :

$$R_3 = (U_{CT} - U_{R4}) / I_{R4} = (U_{CT} - U_{R4}) / 10^{-3},$$

где  $U_{CT}$  – напряжение стабилизации стабилитрона VD5, которое целесообразно выбрать в пределах  $(1,5...1,8)U_{R4}$ .

12. Определяем величину  $R_1$ .

$$R_1 = U_{2\text{max}} / I_{\text{потр}},$$

где  $I_{\text{потр}} = I_{R2} + I_{R4} + (I_{CT\text{min}} + I_{CT\text{max}})/2$ ;  $I_{CT\text{min}} = 3$  мА и  $I_{CT\text{max}}$  (из справочника) – максимальный ток стабилизации  $I_{CT\text{max}}$  стабилитрона VD5;  $I_{R2} = U_{CT} / R_2$ ;  $U_{2\text{max}}$  –

амплитуда переменного напряжения с обмотки  $w_2$ , которое должно быть в 2,5...3 раза больше напряжения  $U_{CT}$ .

13. Диоды выпрямительного моста VD1-VD4 выбирают из условия:

$$I_{CP} > I_{потр} / 2; \quad U_{обр. max} > U_{2max},$$

где  $I_{CP}$  и  $U_{обр. max}$  – допустимый средний выпрямленный ток любого из диодов моста и максимальное допустимое обратное напряжение.

14. Зная  $I_{потр}$  и  $U_{2max}$ , определить действующие значения тока и напряжения на обмотке  $w_2$ , считая  $I_{потр}$  средним значением переменного тока этой обмотки.

Действующее значение тока:  $I_{w2} = 1,11 I_{потр}$ .

Действующее значение напряжения:  $U_{w2} = U_{2max} / \sqrt{2}$ .

15. По данным пункта 2 и 12 рассчитать трансформатор.

16. Построить в масштабе кривую напряжения на нагрузке (угол открытия тиристорov  $\alpha$ ).

17. Построить в масштабе кривую напряжения заряда конденсатора C1 при величине сопротивления R2 равном  $R2/2$  (расчет переходного процесса: заряд конденсатора через резистор от источника постоянного напряжения, учесть при этом напряжение на R4).

Расчет управляемых тиристорных выпрямителей производится по методике расчета выпрямителей на диодах.

## 4.2. СХЕМЫ СИЛОВОЙ ЦЕПИ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

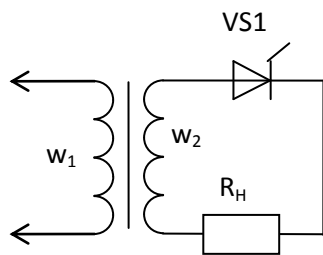


Рис. 4.4

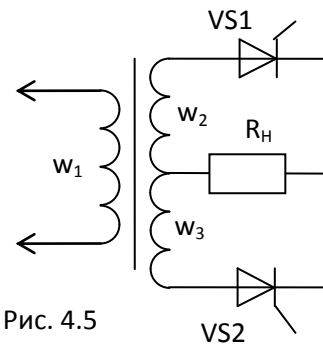


Рис. 4.5

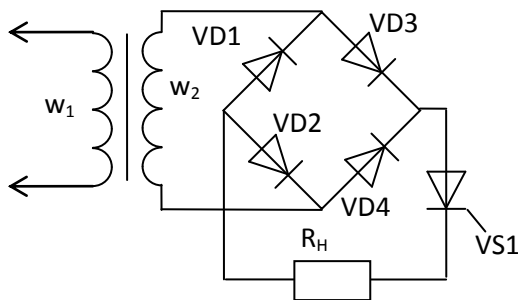


Рис. 4.6

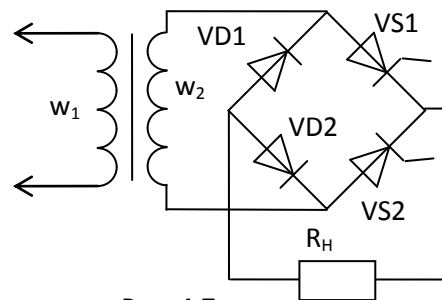


Рис. 4.7

## 5. РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ

Выпрямитель преобразует переменное напряжение, полученное от сетевого трансформатора, в постоянное. Точнее сказать, выпрямитель выдает не постоянное, а пульсирующее напряжение, которое потом сглаживают фильтром. Для преобразования служат нелинейные элементы, называемые вентилями, которые бывают электронными (электровакuumные диоды, кенотроны), ионными (газонаполненные лампы: тиратроны, газотроны), полупроводниковыми (полупроводниковые диоды и диодные сборки). Последние практически полностью вытеснили другие вентили.

В большинстве случаев для питания электронных схем применяют следующие выпрямители:

- 1) однополупериодные;
- 2) двухполупериодные.

Рассмотрим их при следующих предположениях: вентиль идеальный, т. е. его сопротивление при прохождении тока в прямом направлении равно нулю, а в обратном — бесконечно большое; нагрузка выпрямителя чисто активная.

## 5.1. ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ.

Его схема показана на рис. 5.1,а. Первичная обмотка трансформатора питания Т соединена с сетью, и напряжение  $U_1$  обычно составляет 220 В. Мгновенное напряжение на вторичной обмотке выразим формулой  $u_2 = U_m \sin \omega t$ , положив начальный фазовый угол нулевым.

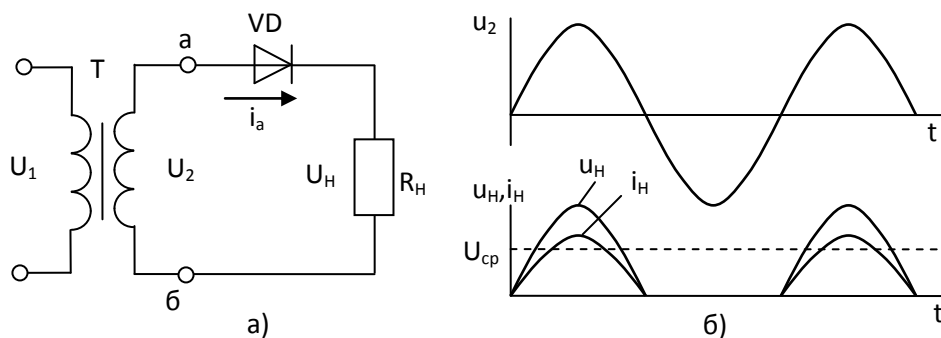


Рис. 5.1. Однофазный однополупериодный выпрямитель

Под действием этого напряжения через вентиль и нагрузку сопротивлением  $R_H$  протекает ток только во время положительных полупериодов напряжения  $u_2$ . На нагрузке выделяется напряжение  $u_H$ , форма которого показана на рис. 6,1,б. Отрицательный полупериод напряжения  $u_2$  не пропускается вентилем. Длительность полупериодов при частоте сети 50 Гц составляет 10 мс.

Среднее значение пульсирующего напряжения  $U_{cp} = U_0 = U_m / \pi$  в  $\pi$  раз меньше амплитуды подводимого к выпрямителю напряжения  $U_{2m}$ .

Отметим, что  $U_0$  вдвое меньше среднего значения за полупериод, поскольку ток в нагрузку течет только в течение одного положительного полупериода.

Найдем соотношение между действующим напряжением вторичной обмотки трансформатора  $U_2$  и средним выпрямленным напряжением:

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi U_{cp}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi U_0}{\sqrt{2}}.$$

Максимальное обратное напряжение на вентиле во время отрицательного полупериода (когда вентиль закрыт) равно амплитудному значению напряжения вторичной обмотки  $U_{обр.m} = U_{2m} = \pi U_0$ . Заметим, что если параллельно нагрузке подключить конденсатор фильтра, то напряжение на нем будет оставаться и во время отрицательного полупериода, тогда обратное напряжение на вентиле возрастет. В пределе, когда емкость конденсатора фильтра и сопротивление нагрузки велики (ток нагрузки мал, и конденсатор не успевает разрядиться),

напряжение  $U_0$  на выходе выпрямителя будет приближаться к амплитудному значению  $U_{2m}$ , а максимальное обратное напряжение на вентиле — к  $2U_{2m}$ .

Действующее значение тока выпрямителя определяется как среднеквадратичное за период (напомним, что ток течет только в течение одного полупериода и интегрирование ведется от 0 до  $T/2$ ):

$$I_2^2 = \frac{1}{T} \int_0^T i^2 dt = \frac{I_{2m}^2}{4}; \quad I_2 = \frac{I_{2m}}{2}.$$

Таким образом, амплитудное значение тока вдвое больше действующего.

Среднее значение тока определяется так же, как было ранее определено среднее значение напряжения. Соотношение между средним и амплитудным значениями тока:

$$I_{cp} = I_{2m} / \pi.$$

Рассчитаем теперь мощность вторичной обмотки трансформатора Т, определив ее как произведение действующих значений напряжения и тока:

$$P_2 = U_2 I_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} U_{CP} \cdot \frac{\pi}{2} I_{CP} = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} U_{CP} I_{CP} = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} P_0 = 3,48 P_0.$$

Оказывается, что мощность вторичной обмотки трансформатора должна почти в 3,5 раза превышать полезную мощность, отдаваемую выпрямителем. Это делает невыгодным применение однополупериодного выпрямителя на практике, поэтому их применяют редко, лишь в маломощных устройствах и в высоковольтных выпрямителях, рассчитанных на малый ток.

Габаритная мощность трансформатора (без учета КПД) равна полусумме мощностей первичной и вторичной обмоток. При  $P_1 = P_2$ :

$$P_r = 3,48 P_0.$$

## 5.2. ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

### 5.2.1 Выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.

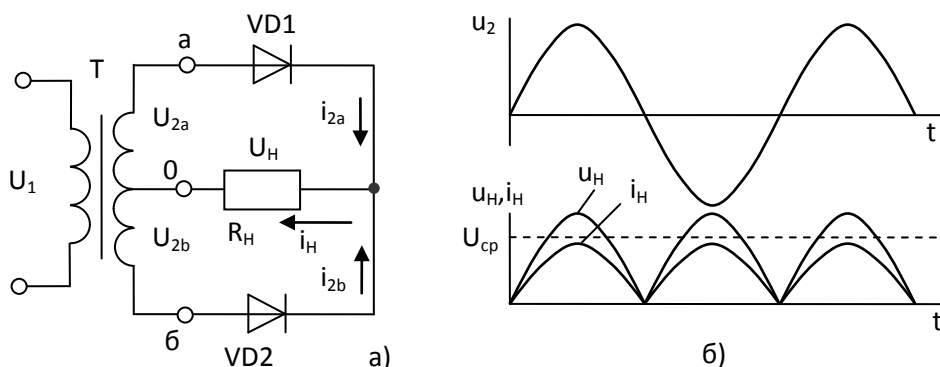


Рис. 6.2. Однофазный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора

Схема выпрямителя показана на рис. 6.2,а. Каждый вентиль питается от своего участка симметричной вторичной обмотки трансформатора. Поскольку напряжения на крайних выводах вторичной обмотки одинаковы и противофазны, этот выпрямитель иногда называют двухфазным. Напряжение на нагрузке этого выпрямителя — однополярное, кусочно-синусоидальное пульсирующее рис. 6,2,б. Таким же является и ток в нагрузке.

Среднее напряжение на нагрузке определяется формулой

$$U_{cp} = U_0 = 2U_{2m}/\pi.$$

Действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора (на ее одной половине)

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi U_{cp}}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi U_0}{2\sqrt{2}}.$$

Максимальное обратное напряжение каждого вентиля составит

$$U_{обр.м} = 2U_{2m} = \pi U_{cp} = \pi U_0.$$

Аналогично определяется среднее значение тока в нагрузке за период

$$I_{cp} = I_0 = \frac{2}{T} \int_0^T i \cdot dt = \frac{2I_{2m}}{\pi}.$$

Действующее значение тока, протекающего через каждый вентиль, определяем как среднеквадратичное значение тока за период

$$I_2 = I_B = I_{2m}/2.$$

Подставляя значение  $I_2$  для двухполупериодного выпрямителя, получаем:

$$I_2 = I_B = I_{2m} / 2 = \pi I_{cp} / 4 = \pi I_0 / 4.$$

На этот ток и следует рассчитывать диаметр провода вторичной обмотки. В нагрузке ток вдвое больше, поскольку токи двух вентилях суммируются.

Расчетную мощность вторичной обмотки трансформатора удастся определить несколькими способами. Можно взять суммарное напряжение вторичной обмотки  $2U_2$  и помножить на ток фазы  $I_2$ . Поскольку

$$2U_2 = \frac{\pi U_0}{\sqrt{2}}, \quad I_2 = \frac{\pi I_0}{4}, \text{ то}$$

$$P_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} U_0 \frac{\pi}{4} I_0 = \frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} P_0 = 1,74 P_0.$$

Можно также напряжение фазы  $U_2$  помножить на суммарный ток  $2I_2$  или взять произведение напряжения фазы на ток фазы и результат удвоить. Во всех случаях мы получим один и тот же результат.

Далее определяют расчетную мощность первичной обмотки трансформатора Т, считая его КПД = 1:

$$P_1 = U_1 I_1 = U_2 I_2.$$

$$\text{При } I_2 = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi I_{cp}}{2\sqrt{2}} \text{ и } U_2 = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi U_{cp}}{2\sqrt{2}} \text{ получаем:}$$

$$P_1 = \frac{\pi I_{cp}}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi U_{cp}}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi^2 P_{cp}}{8} = \frac{\pi^2 P_0}{8} = 1,23 P_0.$$

Поделим  $P_2$  на  $P_1$ :

$$P_2/P_1 = 1,74/1,23 = 1,41.$$

Таким образом, вторичная обмотка должна быть рассчитана на мощность, в 1,4 раза большую, чем первичная.

Габаритная мощность трансформатора (без учета КПД) равна по-

лусумме мощностей первичной и вторичной обмоток:

$$P_{\Gamma} = (P_1 + P_2)/2 = P_0 (1,23 + 1,74)/2 = 1,49 P_0.$$

Коэффициент пульсаций для двухполупериодного выпрямителя так же, как и для многофазных выпрямителей, находят по формуле  $K_p = 2/(m_2 - 1)$ , где  $m$  — число импульсов тока в нагрузке за период. Для двухфазного выпрямителя  $m = 2$  и  $K_p = 2/3$  или  $\approx 7\%$ .

### 5.2.2. Однофазный мостовой выпрямитель

Его схема показана на рис. 5.3,а. Форма напряжения и тока в нагрузке совпадает с аналогичными формами для двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (см. рис. 6.2,б). Хотя в этом выпрямителе только одна вторичная обмотка трансформатора (поэтому он и называется однофазным), в нагрузке выделяются обе полуволны тока, следовательно, выпрямитель двухполупериодный.

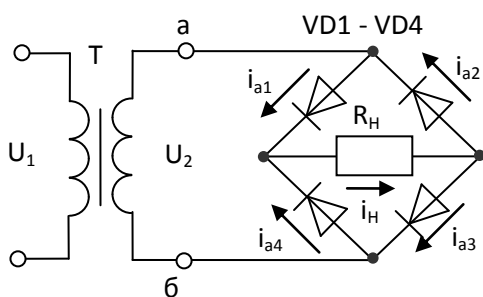


Рис. 5.3. Однофазный мостовой

Сред-

нее и действующее напряжения на нагрузке определяют по тем же формулам, что и для двухполупериодного выпрямителя:

$$U_{cp} = U_0 = \frac{2U_{2m}}{\pi}.$$

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi U_{cp}}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi U_0}{2\sqrt{2}}.$$

Обратное напряжение на вентильях определяют следующим образом:

$$U_{обр.m} = U_{2m} = \frac{\pi U_{cp}}{2} = \frac{\pi U_0}{2}.$$

Среднее значение тока соответствует выведенному для двухполупериодного выпрямителя:



$$I_{cp} = I_0 = \frac{2I_{2m}}{\pi}.$$

Действующее значение тока через вентиль определяется формулой

$$I_B = I_{2m} / 2 = \pi I_{cp} / 4 = \pi I_0 / 4.$$

Действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора

$$I_2 = \frac{\pi I_{cp}}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi I_0}{2\sqrt{2}}.$$

Расчетная мощность вторичной обмотки трансформатора составит

$$P_2 = U_2 I_2 = \frac{\pi I_{cp}}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi U_{cp}}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi^2 P_{cp}}{8} = \frac{\pi^2 P_0}{8} = 1,23 P_0$$

Мощности первичной и вторичной обмоток для мостового выпрямителя равны. Коэффициент пульсаций такой же, как для предыдущей схемы.

Теперь определим условный КПД для каждого из трех рассмотренных выпрямителей, как отношение полезной мощности в нагрузке к расчетной мощности вторичной обмотки трансформатора.

Однополупериодный выпрямитель:

$$\eta = \frac{P_0}{P_2} = \frac{2\sqrt{2} P_0}{\pi^2 P_0} = \frac{2\sqrt{2}}{\pi^2} = 0,28.$$

Выпрямитель с выводом средней точки трансформатора:

$$\eta = \frac{P_0}{P_2} = \frac{4\sqrt{2} P_0}{\pi^2 P_0} = 0,57.$$

Однофазный мостовой выпрямитель:

$$\eta = \frac{P_0}{P_2} = \frac{8P_0}{\pi^2 P_0} = 0,81.$$

Теперь видно, что наилучшие параметры у мостового выпрямителя, поэтому его широко применяют в устройствах малой и средней (до 1 кВт) мощности. Его достоинства: лучше используются обмотки трансформатора, обратное напряжение вентилях вдвое меньше, максимален услов-

ный КПД. К недостаткам мостового выпрямителя относится большое число вентиляторов.

## 7. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ

### 7.1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ

Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, предназначенный для преобразования одной системы переменного тока в другую систему, в частности имеющую другое напряжение и ток, но ту же частоту.

Как правило, простейший трансформатор имеет две изолированные обмотки, помещенные на стальном магнитопроводе. Обмотка, включённая в сеть источника электрической энергии, называется первичной, обмотка, от которой энергия подаётся к приёмнику – вторичной.

Обычно напряжения первичной и вторичной обмоток неодинаковы. Если первичное напряжение меньше вторичного, то трансформатор называется повышающим, если же первичное напряжение больше вторичного, то – понижающим. Любой трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий.

Протекающий по первичной обмотке переменный ток создает в магнитопроводе сердечника переменный магнитный поток  $\Phi$ . Этот поток сцеплен с обеими обмотками и вызывает в каждой из них переменную ЭДС. Поэтому вторичная обмотка может рассматриваться как источник переменного напряжения. Если вторичная цепь будет замкнута, то по ней потечет ток. Первичная активная мощность, потребляемая трансформатором из сети:

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \phi_1.$$

Вторичная активная мощность, отдаваемая потребителю:

$$P_2 = P_H = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \phi_2.$$

Если не учитывать потери в трансформаторе (КПД трансформаторов большой мощности 97-99%), то приближенно можно считать:

$$P_1 = P_2.$$

При обычной работе трансформаторов фазовые сдвиги первичной и вторичной цепей равны  $\phi_1 \approx \phi_2$ , а напряжения первичной и вторичной обмоток мало отличаются от ЭДС этих обмоток, поэтому можно записать:

$$U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2 \quad \text{и} \quad U_1 / U_2 \approx I_2 / I_1 \approx E_1 / E_2 = \omega_1 / \omega_2 = K,$$

где  $K$  - коэффициент трансформации трансформатора, показывает во сколько раз трансформатор повышает или понижает напряжение.

На каждом трансформаторе помещается табличка с указанием на

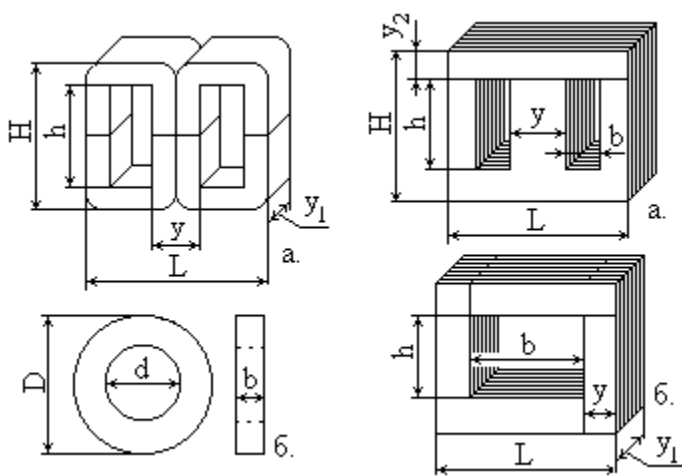


Рис 7.1. Витые магнитопроводы трансформаторов:

а- Ш-образный

Рис.7.2. Магнитопроводы из штампованных пластин:

а- Ш-образный (броневой), б- стержневой

них номинальных значений величин. К ним относятся: а) полная мощность, ВА или кВА; б) линейные напряжения, В или кВ; в) линейные токи при номинальной мощности; г) частота, Гц; д) число фаз; е) схема и группа соединений. Для однофазных трансформаторов ряд величин не указывается (в, д, е).

Рассмотрим конструктивное выполнение

однофазных трансформаторов наиболее используемых в практике.

## 7.2. МАГНИТОПРОВОДЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы трансформаторов низкой частоты навиваются из полос (рис.7.1 а и б) или набираются из пластин (рис.7.2,а и б), штампованных из электротехнической стали или железоникелевых сплавов. Применяют также магнитопроводы из ферритов.

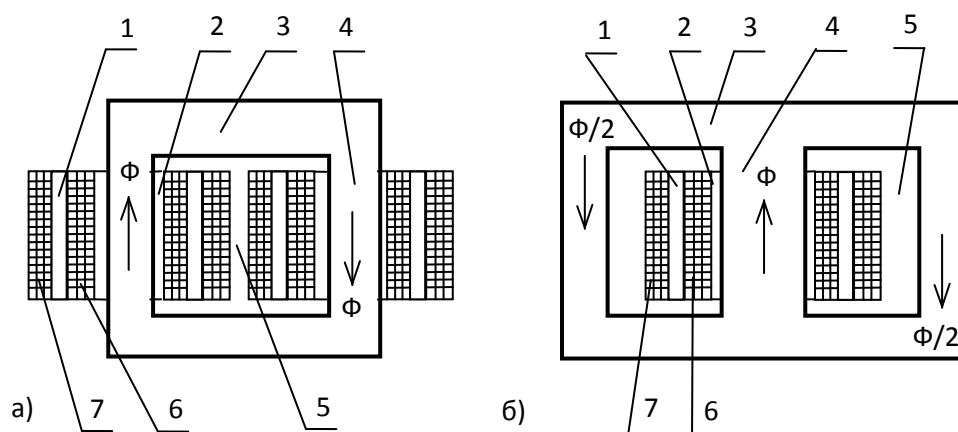


Рис 7.3. Однофазный стержневой трансформатор (а);  
однофазный броневого трансформатор (б):

1 - изоляция между обмотками; 2 - каркас; 3 - ярмо; 4 -

Штампованные пластины чаще всего бывают Ш - и П - образной формы. Пластины П-образной формы используются в мощных трансформаторах. Наиболее распространенными являются Ш-образные пластины. Обычная толщина пластин 0,5 или 0,35 мм. Если материал сердечника должен иметь толщину меньше 0,3 мм, то сердечник изготовляют не из пластин, а из ленты.

Для уменьшения потерь в магнитопроводе на вихревые токи пластины изолируют тонким слоем лака или окисла. Чтобы ликвидировать зазор между пластинами и перемычками, магнитопроводы собирают в переплет.

По расположению обмоток на сердечнике различают стержневые (рис.7.3,а) и броневого (рис.7.3,б) трансформаторы. Те части сердечника, на которых размещены обмотки, называются стержнями, те части, которые соединяют между собой стержни и служат для замыкания магнитной цепи, называются ярмами. Пространства между стержнями и ярмами, через которое проходят обмотки, называются окнами сердечника.

Пластины сердечника после сборки стягиваются планками или уголками при помощи шпилек с гайками либо специальными обжимками. Стяжные планки, уголки или обжимки служат одновременно для крепления трансформатора на шасси.

Из полос электротехнической стали навивают Ш-образные и то-

роидальные магнитопроводы.

Ш-образный и тороидальный витые магнитопроводы показаны на рис.7.1.

Самыми лучшими свойствами обладают тороидальные магнитопроводы, использование которых приводит к уменьшению уровня помех и взаимных связей в трансформаторах вследствие меньшего потока рассеяния. При одинаковых ампервитках индукция тороидальных магнитопроводов больше, чем в броневых и стержневых. Это позволяет уменьшать размеры и вес трансформаторов. В трансформаторах с тороидальными магнитопроводами лучше условия охлаждения обмоток, поскольку витки распределяются по тороиду. При этом уменьшается длина витка, расходуется меньше провода и повышается КПД трансформатора.

Для высокочастотных трансформаторов рекомендуется выбирать сердечники из ферритов. Ферритами называют ферромагнетики на основе двойных окислов железа и одновалентных или двухвалентных металлов: никеля, цинка, марганца и др. Ферриты имеют кристаллическую структуру и относятся к числу полупроводников с электронной электропроводностью. Для сердечников используют только магнитомягкие материалы. Конструкция ферритовых сердечников разнообразна, но чаще используют стержневые, кольцевые, броневые, Ш- и П-образные сердечники.

### 7.3. КАРКАСЫ.

Служат для наматывания обмотки трансформаторов, их прессуют из пластмасс, склеивают из электрокартона или собирают из отдельных деталей, изготовленных из гетинакса, прессшпана, текстолита или электрокартона. Иногда применяют бескаркасную намотку (на гильзу).

### 7.4. ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ.

Обмоткам трансформаторов придают преимущественно форму цилиндрических (круглых) катушек, concentрически накручиваемых на стержень магнитопровода. При такой форме обмотки лучше проти-

востоят механическим усилиям, возникающим во время работы трансформатора.

В некоторых случаях применяют прямоугольные, овальные и другие формы. При малых токах обмотки наматывают из медного или алюминиевого изолированного провода круглого поперечного сечения, а при больших - прямоугольного сечения. В трансформаторах для малогабаритной аппаратуры используют провод с эмалевой изоляцией (ПЭЛ или ПЭВ). Обмотки высокого напряжения наматывают из провода с шелковой или эмалево-шелковой изоляцией (ПЭЛШО, ПЭЛШД). Между слоями обмотки помещают прокладки из лакоткани или тонкой бумаги (чаще изолируют только обмотки первичную и вторичную).

Порядок расположения обмоток на каркасе не имеет принципиального значения. В трансформаторах большой мощности (выше 1 кВА) ближе к стержню располагают обмотку низшего напряжения, так как её легче изолировать от магнитопровода. Для снижения стоимости и удобства перемотки маломощных трансформаторов обмотки из тонких проводов помещают ближе к магнитопроводу (тонкие провода дороже).

## 7.5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРОВ

Рассчитать трансформатор - это значит определить размеры магнитопровода, диаметры проводов и числа витков обмоток при известных трансформируемых напряжениях и мощностях.

Изменением размеров окна и сечения магнитопровода можно получить ряд вариантов конструкции одного и того же трансформатора. При изготовлении трансформаторов в расчете часто приходится исходить из наличия имеющегося магнитопровода или пластин для его сборки.

### 7.5.1. Типовой расчет сетевого трансформатора

Исходные данные для расчёта:  $U_1$ ;  $U_2$  – напряжения первичной и вторичной обмоток;  $P_2$  – мощность вторичной обмотки, т.е. мощность нагрузки.

Таблица 7.1

Мощность трансформатора $S_1, \text{В} \cdot \text{А}$	Амплитуда магнитной индукции в сердечнике $B_m, \text{Тл}$	КПД $\eta, \%$	Плотность тока в обмотках $\delta, \text{А/мм}^2$
1	2	3	4
$\leq 10$	1,1	82	4,8
20	1,25	85	3,9
40	1,35	87	3,2
70	1,45	89	2,8
100	1,35	91	2,5
200	1,25	93	2,0
400	1,15	95	1,6
700	1,10	96	1,3
1000	1,05	96	1,2

### 7.5.2. Расчет однофазного трансформатора с учетом частоты напряжения сети

В основу расчета положен геометрический фактор  $\Gamma\phi$  – это произведение площади окна сердечника  $Q_o$ , на площадь сечения сердечника (стержня) -  $Q_c$ , т. е.  $Q_o \cdot Q_c$ . Исходными данными являются первичное и вторичное напряжения ( $U_1$ ;  $U_2$ ) и мощность вторичной обмотки ( $P_2$ ).

1. Определение расчетного геометрического фактора:

$$\Gamma\phi_{\text{расч.}} = (Q_o \cdot Q_c)_{\text{расч.}} = P_2 \cdot 10^2 / (2 \eta f \cdot \sigma \cdot \delta \cdot B_m) \text{ см}^4,$$

где  $P_2 = P_H$  – мощность, потребляемая нагрузкой трансформатора;  
 $\eta$  – КПД трансформатора из табл.7.1;  $f$  - частота, Гц;  $\sigma = 0,3$  - коэффи-

коэффициент заполнения окна медью;  $\delta$  - плотность тока в обмотке ( $\delta = 1 \dots 5$  А/мм<sup>2</sup>. При  $f = 50$  Гц  $\delta$  берут из табл.7.1. Чем выше частота тока, тем меньше плотность тока. Для импульсных токов с большой скважностью  $\delta = 1$  А/мм<sup>2</sup> и менее);  $B_m$  - максимальное значение индукции в сердечнике (для трансформаторной стали  $B_m$  из табл.7.1).

2. По величине  $\Gamma\Phi_{\text{расч.}}$  из табл.П.1 (Приложение 1) путём перемножения  $Q_o$  на  $Q_c$  подбирается сердечник трансформатора, таким образом, чтобы:

$$\Gamma\Phi_{\text{реальное}} \geq \Gamma\Phi_{\text{расчет.}}$$

Из марки выбранного сердечника выписываются величины « $y_1$ » и « $y$ », которые проверяют на соотношение:

$$y_1/y = 1 \dots 2$$

3. Расчет числа витков обмоток:

$$\omega_1 = U_1 10^4 / (4,44 f Q_c B_m)$$

$$\omega_2 = U_2 10^4 / (4,44 f Q_c B_m)$$

4. Выбор проводов обмоток.

4.1. Расчёт тока обмоток:

$$I_1 = P_1 / U_1; \quad I_2 = P_2 / U_2$$

4.2. Расчёт сечения проводов обмоток:

$$S_{\text{пр.1}} = I_1 / \delta; \quad S_{\text{пр.2}} = I_2 / \delta,$$

где  $\delta$  – плотность тока, выбранная в пункте 1.

4.3. Расчёт диаметра проводов обмоток:

$$d_{1\text{ПР}} = \sqrt{\frac{4I_1}{\pi\delta}}; \quad d_{2\text{ПР}} = \sqrt{\frac{4I_2}{\pi\delta}}.$$

Из стандартного ряда выбирают провод с ближайшим диаметром (табл.П.2, Приложение 2), ориентируясь в сторону увеличения и выписывают расшифровку марки провода и его паспортные данные.

5. Проверка заполняемости окна сердечника медью.

$$(\omega_1 S'_{\text{пр1}} + \omega_2 S'_{\text{пр2}} + \dots) / 0,3 \leq Q_{o\text{реальное}},$$

где  $\omega_1; \omega_2$  - числа витков и  $S'_{\text{пр1}} \geq S_{\text{пр.1}}, S'_{\text{пр2}} \geq S_{\text{пр.2}}$  - площади



сечения проводов первичной и вторичной обмоток. Выбирают по стандартному ряду (табл.П.2, Приложение 2) в соответствии с выбранными диаметрами.

Если это условие выполняется, то данный сердечник можно использовать для трансформатора.

## 8. СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ

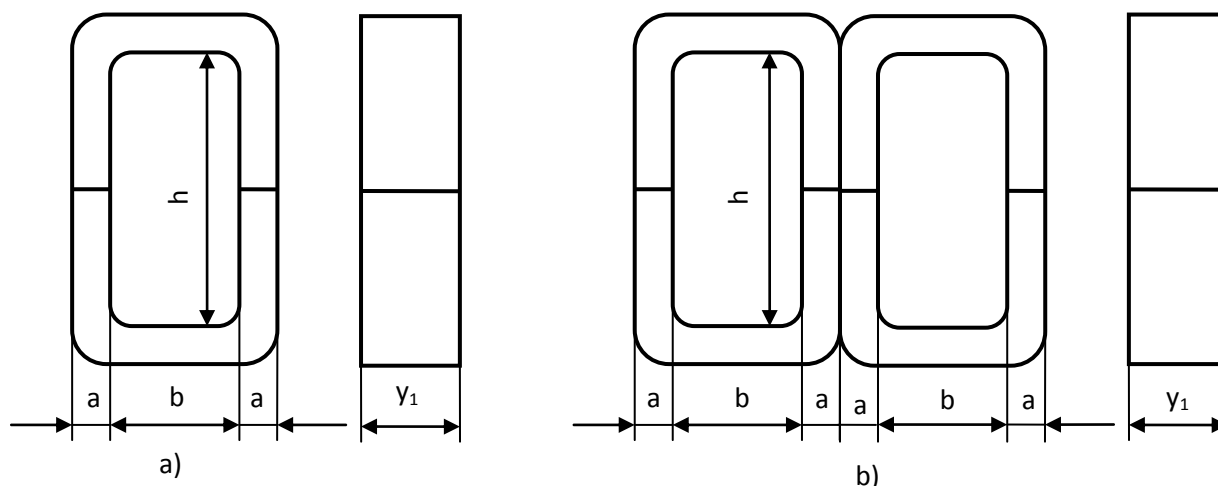


Рис. 4. Ленточные магнитопроводы. а - стержневой; б - броневой.

Броневой сердечник составляют из двух стержневых, размеры которых представлены в Приложении 1, Таблица П.1.

### Приложение 1

Таблица П.1

*Магнитопроводы типа ПЛ (П-образный, ленточный)*

Типоразмер магнитопровода	a, мм	y <sub>1</sub> , мм	b, мм	h, мм	S <sub>с</sub> , см <sup>2</sup>	S <sub>ок</sub> , см	S <sub>с</sub> S <sub>ок</sub> , см <sup>4</sup>	l <sub>ср</sub> , см
ПЛ6,5х12,5х8				8		0,64	0,5203	5,2
ПЛ6,5х12,5х10	6,5	12,5	8	10	0,813	0,8	0,6504	5,6
ПЛ6,5х12,5х12,5				12,5		1	0,813	6,1

ПЛ6,5х12,5х16				16		1,28	1,0406	6,8
ПЛ8х12,5х12,5	8	12,5	10	12,5	1	1,25	1;25	7
ПЛ8х12,5х16				16		1,6	1,6	7,7
ПЛ8х12,5х20				20		2	2	8,5
ПЛ8х12,5х25				25		2,5	2,5	9,5
ПЛ10х12,5х20	10	12,5	12,5	20	1,25	2,5	3,125	9,6
ПЛ10х12,5х25				25		3,12	3,9	10,6
ПЛ10х12,5х32				32		4	5	12
ПЛ10х12,5х40				40		6,25	7,812	13,6
ПЛ12,5х16х25	12,5	16	16	25	2	4	8	12,1
ПЛ12,5х16х32				32		5,12	10,24	13,5
ПЛ12,5х16х40				40		6,4	12,8	15,1
ПЛ12,5х16х50				50		8 [	16	17,1
ПЛ12,5х25х32	12,5	25	20	32	3,125	6,4	20	14,3
ПЛ12,5х25х40				40		8	25	15,9
ПЛ12,5х25х50				50		10	31,25	17,9
ПЛ12,5х25х60				60		12	37,5	19",9
ПЛ16х32х40	16	32	25	40	5,12	10	51,2	14
ПЛ16х32х50				50		12,5	64	20
ПЛ16х32х65				65		16,25	83,2	23
ПЛ16х32х80				80		20	102,4	26
ПЛ20х40х50	20	40	32	50	8	16	128	22,6
ПЛ20х40х60				60		19,2	153,6	24,6
ПЛ20х40х80				80		25,6	204,8	28,7
ПЛ20х40хЮ0				100		32	256	32,7
ПЛ25х50х65	25	50	40	65	12,5	26	325	28,8
ПЛ25х50х80				80		32	400	31,8
ПЛ25х50х100				100		40	500	35,8

ПЛ25х50х120				120		48	600	39,8
ПЛ32х64х80	32	64	50	80	20,48	40	819,2	36
ПЛ32х64х100				100		50	1024	40
ПЛ32х64х130				130		65	1331,2	46
ПЛ32х64х160				160		80	1638,4	52
ПЛ40х80х100	40	80	64	100	32	64	2048	45,4
ПЛ40х80х120				120		76,8	2457,6	49,4
ПЛ40х80х160				160		102,4	3276,8	57,4
ПЛ40х80х200				200		128	4096	65,4

Основные данные обмоточных проводов

Диаметр без изо- ляции, мм	Сечение меди, мм <sup>2</sup>	Сопротивление 1 м при 20 °С, Ом	нагрузка при плотности тока 2 А/мм <sup>2</sup> , А	ПЭЛ, ПЭТ		ПЭЛШО	
				изоляция, мм	Вес 100 м с изоляцией, г	изоляция, мм	Вес 100 м с изоляцией, г
1	2	3	4	5	6	7	8
0,05	0,002	9,29	0,004	0,06	1,8	0,11	2,56
0,06	0,003	6,44	0,0057	0,07	2,6	0,12	3,4
0,07	0,004	4,73	0,0077	0,08	3,5	0,13	4,55
0,08	0,005	3,63	0,0101	0,09	4,6	0,140	5,70
0,09	0,006	2,86	0,0127	0,1	5,8	0,15	7,02
0,1	0,008	2,23	0,0157	0,115	7,3	0,165	8,9
0,11	0,01	1,85	0,019	0,125	8,8	0,175	10,50
0,12	0,011	1,55	0,0226	0,135	10,4	0,185	12,3
0,13	0,013	0,32	0,0266	0,145	12,1	0,195	14,1
0,14	0,015	1,14	0,0308	0,155	14	0,205	16,1
0,15	0,018	0,990	0,0354	0,165	15,2	0,215	18,4
0,16	0,02	0,873	0,0402	0,175	18,3	0,225	20,6
0,17	0,023	0,773	0,0454	0,185	20,6	0,235	23
0,18	0,026	0,688	0,051	0,195	23,1	0,245	25,6
0,19	0,028	0,618	0,0568	0,205	25,8	0,255	28,4
0,2	0,031	0,558	0,0628	0,215	28,5	0,28	31,2

0,21	0,035	0,507	0,0692	0,23	31,6	0,29	34,6
0,23	0,042	0,423	0,0832	0,25	37,8	0,31	41
0,25	0,049	0,357	0,0982	0,27	44,5	0,33	48
0,27	0,057	0,306	0,1150	0,295	52,1	0,355	56
0,29	0,066	0,266	0,132	0,315	60,1	0,375	64,1
0,31	0,076	0,233	0,151	0,34	68,8	0,4	73,3
0,33	0,086	0,205	0,171	0,36	77,8	0,42	82,6
0,35	0,096	0,182	0,192	0,380	87,4	0,44	92,4
0,38	0,113	0,155	0,226	0,41	103	0,47	108,4
0,41	0,132	0,133	0,264	0,44	120	0,505	126,2
0,44	0,152	0,115	0,304	0,475	138	0,535	144,5
0,47	0,174	0,101	0,346	0,505	157	0,565	164
0,49	0,189	0,093	0,378	0,525	171	0,585	178
0,51	0,204	0,086	0,408	0,545	185	0,61	192,9
0,55	0,238	0,074	0,476	0,59	215	0,65	222,2
0,59	0,273	0,064	0,547	0,63	247	0,69	256,1
0,64	0,322	0,055	0,644	0,68	291	0,74	301,2
0,69	0,374	0,047	0,748	0,73	342	0,79	352,80
0,74	0,43	0,041	0,86	0,79	389	0,85	400,6
0,8	0,503	0,035	1,005	0,85	445	0,91	461,8
0,86	0,5809	0,03	1,16	0,91	524	0,97	537,9
0,93	0,679	0,026	1,36	0,96	612	1,04	627,3
1	0,785	0,022	1,57	1,05	707	1,12	723,6
1,08	0,9161	0,019	1,83	1,14	826	1,2	943,5

1,16	1,0568	0,0166	2,114	1,22	922	1,28	970,9
1,2	1,131	0,016	2,26	1,26	1022	1,32	1038
1,25	1,227	0,014	2,45	1,31	1105	1,37	1125
1,35	1.4314	0,012	2,86	1,41	1288	1,47	1309
1,45	1,651	0,011	3,3	1,51	1486	1,57	1508
1,56	1,911	0,009	3,822	1,62	1712	1,715	—
1,68	2,217	0,008	4,433	1,74	1992	1,835	—
1,81	2,573	0,007	5,146	1,87	2310	1,965	—
1,95	2,987	0,006	5,98	2,01	2680	2,106	—
2,02	3,205	0,006	6,409	2,08	2875	2,175	—
2,1	3,464	0,005	6,92	2,16	3110	2,255	—
2,26	4,012	0,004	8,023	2,32	3603	—	—
2,44	4,676	0,004	9,352	2,5	4210	—	—

### Приложение 3

Таблица П.3

#### *Характеристика изоляции обмоточных проводов*

Марка провода	Характеристика изоляции	Диаметр медной жилы, мм
ПЭЛ	Лакостойкая эмаль	0,03—2,44
ПЭТ	Эмалевая повышенной стойкости	0,1—5,2
ПЭЛШО	Лакостойкая эмаль (утолщенный слой) и один слой обмотки из натурального шелка	0,05—2,1

#### Приложение 4

### Параметры основных элементов, применяемых в проектируемых устройствах.

#### Параметры транзисторов

Тип прибора	$I_{К.МАХ},$ А	$U_{К.Э.МАХ},$ В	$P_{К.МАХ},$ Вт	$h_{21Э}$	$f,$ МГц	$U_{НАС},$ В	Тип
1	2	3	4	5	6	7	8
КТ203Б	0,01	30	0,15	30...150	5	1	p-n-p
П307Б	0,015	80	0,25	50...150	20	0,5	n-p-n
КТ206А	0,02	20	0,015	20...90	10	0,5	n-p-n
МП101	0,02	20	0,15	10...25	0,5	0,5	n-p-n
КТ3126А	0,02	20	0,15	25...150	0,6	0,5	p-n-p
КТ3127А	0,02	20	0,1	25...150	0,6	0,5	p-n-p
КТС3103А	0,02	15	0,3	40...200	600	0,6	n-p-n
ГТ109Д	0,02	6	0,03	20...70	3	0,5	p-n-p
КТ201Г	0,03	10	0,15	70...210	10	0,5	n-p-n
КТ312В	0,03	20	0,22	50...280	120	0,8	n-p-n
КТ601А	0,03	100	0,5	16	40	0,3	n-p-n
КТ306А	0,03	10	0,15	20...60	300	0,3	n-p-n
КТ312А	0,03	20	0,22	10...100	80	0,8	n-p-n
КТ315Ж	0,05	15	0,1	30...250	150	0,5	n-p-n
КТ315И	0,05	60	0,1	30	250	0,9	n-p-n
КТ340А	0,05	15	0,15	100...150	300	0,2	n-p-n
КТ342А	0,05	10	0,25	100...1000	300	0,1	n-p-n

ГТ108Б	0,05	15	0,075	60...130	1	0,5	p-n-p
КТ104Б	0,05	15	0,15	20...80	5	0,5	p-n-p
ГТ308А	0,05	15	0,15	20...75	120	1,2	p-n-p
КТ350А	0,06	15	0,3	20...200	100	0,4	n-p-n
КТ3107Л	0,1	20	0,3	380...800	200	0,5	p-n-p
КТ3129	0,1	20	0,15	80...250	200	0,5	p-n-p
КТ315А	0,1	25	0,15	20...90	250	0,4	n-p-n
КТ315Б	0,1	20	0,15	50...350	250	0,4	n-p-n
КТ315В	0,1	40	0,15	20...90	250	0,4	n-p-n
КТ315Г	0,1	35	0,15	50...350	250	0,4	n-p-n
КТ315Д	0,1	40	0,15	20...90	250	1	n-p-n
КТ315Е	0,1	35	0,15	50...350	250	1	n-p-n
КТ315Н	0,1	20	0,15	50...350	250	0,4	n-p-n
КТ315Р	0,1	35	0,15	150...350	250	0,4	n-p-n
КТ375А	0,1	60	0,2	10...100	250	0,4	n-p-n
КТ375Б	0,1	30	0,2	50...280	250	0,4	n-p-n
КТ3102Б	0,1	50	0,25	200...500	0,2	0,7	n-p-n
КТ315Б	0,1	20	0,15	50...350	250	0,4	n-p-n
ГТ125Г	0,1	30	0,15	70...140	1	0,3	p-n-p
КТ3107В	0,1	20	0,3	120...220	200	0,5	p-n-p
КТ605Б	0,1	250	0,4	30...120	40	8	n-p-n
КТ632Б	0,1	100	0,5	30	200	0,8	p-n-p
КТ502Е	0,15	80	0,35	40...120	5	0,6	p-n-p
КТ503Е	0,15	80	0,35	40...120	5	0,6	n-p-n



КТ208Д	0,15	30	0,2	40...120	5	0,4	p-n-p
КТ503Г	0,15	40	0,35	80...240	5	0,5	n-p-n
КТ502Е	0,15	90	0,35	40...120	5	0,5	p-n-p
КТ604АМ	0,2	250	3	10...40	30	8	n-p-n
ГТ321Е	0,2	30	0,16	80...200	60	1	p-n-p
КТ369А	0,25	45	0,05	20...100	200	0,8	n-p-n
КТ209Е	0,3	30	0,2	80...240	5	0,5	p-n-p
КТ209М	0,3	60	0,2	40...120	5	0,4	p-n-p
КТ645А	0,3	50	0,5	20...200	200	0,5	n-p-n
КТ385А	0,3	40	0,3	20...200	200	0,8	n-p-n
КТ209В	0,3	15	0,2	80...240	5	0,4	p-n-p
КТ603А	0,3	30	0,5	10...80	200	1	n-p-n
КТ501Л	0,3	60	0,35	20...60	5	0,5	p-n-p
КТ661А	0,3	60	0,4	100...300	200	0,4	p-n-p
КТ313В2	0,35	45	0,3	200...520	200	0,5	p-n-p
КТ3117А	0,4	50	0,3	40...200	200	0,5	n-p-n
КТ3117А	0,4	50	0,25	40...200	200	0,6	n-p-n
КТ608А	0,4	60	0,5	40...160	200	1	n-p-n
КТ626Д	0,5	20	6,5	40...250	45	1	p-n-p
КТ807А	0,5	70	60	20...125	10	2	n-p-n
ГТ404В	0,5	40	0,6	30...80	1	0,4	n-p-n
ГТ402Ж	0,5	40	0,6	30...80	1	0,3	p-n-p
КТ644В	0,6	40	1	40...120	200	0,4	p-n-p
КТ904А	0,8	40	5	10...60	350	0,6	n-p-n

KT660A	0,8	45	0,5	110...220	200	0,05	n-p-n
KT826Б	1	600	15	10...120	6	2,5	n-p-n
KT503A	1	350	1	15...100	20	0,5	n-p-n
KT683A	1	150	0,5	40...120	50	0,45	n-p-n
KT826Б	1	600	15	10...120	2	0,1	n-p-n
ГТ403Ж	1,25	80	4	20...60	0,008	0,5	p-n-p
KT814Г	1,5	80	10	30	3	0,6	p-n-p
KT639Г	1,5	60	1	40...100	80	0,5	p-n-p
KT814Б	1,5	60	10	40	3	0,6	p-n-p
KT851Б	2	250	25	20...200	20	1	p-n-p
KT887A	2	600	75	20...120	15	1,4	p-n-p
KT932A	2	80	20	5...80	80	1,5	p-n-p
KT804Б	2,5	400	15	10...100	5	1	n-p-n
KT817A	3	25	25	25	3	0,6	n-p-n
KT835A	3	30	30	10...100	3	2,5	p-n-p
KT816Г	3	80	25	25	3	0,6	p-n-p
ГТ703Б	3,5	40	15	20...45	0,01	0,6	p-n-p
ГТ705Г	3,5	30	15	50...100	1,5	5	n-p-n
KT962B	4	50	66	20...200	750	1	n-p-n
KT805AM	5	160	30	15	20	2,5	n-p-n
KT828A	5	700	50	2,25	4	3	n-p-n
KT805AM	5	160	30	15	60	2	n-p-n
KT837A	7,5	60	30	10...40	5	2,5	p-n-p
ГТ217Г	7,5	60	24	15...40	0,1	1	p-n-p

КТ812В	8	350	50	10...125	5	2,5	n-p-n
КТ808ВМ	10	80	60	20...125	10	2	n-p-n
КТ819ГМ	10	80	60	12	3	2	n-p-n
ГТ804Б	10	140	15	20...150	10	0,5	p-n-p
КТ803А	10	60	30	10...70	5	5	n-p-n
КТ908Б	10	60	50	20	50	4	n-p-n
КТ818ВМ	15	60	100	20	3	1	p-n-p
КТ819БМ	15	40	100	20	1	5	n-p-n
КТ827В	20	60	125	750...18000	4	2	n-p-n

#### Тиристоры

Тип прибора	Средний выпрямленный прямой ток, $I_{пр.}, A$	Максимальное обратное напряжение, $U_{обр. макс}, B$	Ток управления, $I_y,$ мА	Время включения, $t_{вкл. мкс}$
КУ109А	1	50	100	1
КУ201Б	2	25	50	2
КУ220(Г, Д)	4	50	4	0,3
КУ202М	10	300	100	10
Т25	25	50...1200	200	10
Т132-40-1	40	100	110	10
Т50	50	50...1200	300	10
Т100	100	50...1200	300	10



### Параметры диодов

Тип прибора	Средний выпрямленный прямой ток $I_{пр.}$ , А	Максимальное обратное напряжение $U_{обр. макс.}$ , В	$f_p$ , кГц
1	2	3	4
Д10А	0,016	10	150
ГД107А	0,02	15	50
ГД402Б	0,03	15	50
Д104	0,03	100	150
КД401Б	0,03	75	150
Д206	0,1	100	1
Д207	0,1	200	1
Д208	0,1	300	1
КД102Б	0,1	300	4
КД103А	0,1	50	20
2Д237В	0,3	100	300
Д7Ж	0,3	400	2,4
КД105Г	0,3	800	4
КД106А	0,3	100	30
Д202	0,4	100	1,2
Д203	0,4	200	1,2
Д204	0,4	300	1,2
Д205	0,4	400	1,2
Д302	1	200	5

КД226Д	2	600	50
Д303	3	150	5
КД130АС	3	50	200
КД248В	3	800	100
Д245Б	5	300	1,1
Д304	5	100	5
КД202Ж	5	140	1,2
2Д231Б	10	200	200
В10	10	100...1000	1
Д214А	10	100	1,1
Д215А	10	200	1,1
Д245	10	300	1,1
Д305	10	50	5
КД203А	10	420	1
КД213В	10	200	100
2Д239А	20	100	500
КД2999А	20	250	100
В25	25	100...1000	1
2Д252Б	30	80	200
КД2997Б	30	200	100
В50	50	100...1000	1
В100	100	100...1000	1

Тип	Напряжение стабилизации $U_{CT}$ , В	Максимальный ток стабилизации $I_{CT}$ , мА	Дифференциальное сопротивление, $R_d$ , Ом	Температурный коэффициент напряжения, % / град.
1	2	3	4	5
КС133А	3,3	81	65	—
КС139А	3,9	70	60	—
Д815И	4,7	1400	0,9	0,056
КС147А	4,7	58	56	—
Д815А	5,6	1400	0,9	0,056
КС 156 А	5,6	55	46	0,05
Д815Б	6,8	1150	1,2	0,062
КС168А	6,8	45	28	0,06
Д815В	8,2	950	1,5	0,088
Д818А	9	33	25	0,02
Д818Б	9	33	25	0,02
Д818В	9	33	25	$\pm 0,01$
Д818Г	9	33	25	$\pm 0,005$
Д818Д	9	33	25	$\pm 0,002$
Д818Е	9	33	25	$\pm 0,001$
Д815Г	10	800	2,7	0,1
Д815Д	12	650	3	0,11
Д815Е	15	550	3,8	0,13
Д815Ж	18	450	4,5	0,14

Д816А	22	230	10	0,15
Д816Б	27	180	12	0,15
Д816В	33	150	15	0,15
Д816Г	39	130	18	0,15
Д816Д	47	130	22	0,15
Д817А	56	90	52	0,18
Д817Б	68	75	60	0,18
Д817В	82	60	67	0,18
Д817Г	100	50	75	0,18
КС620А	120	42	150	0,2
КС630А	130	38	180	0,2
КС650А	150	33	255	0,2
КС680А	180	28	330	0,2
Д8П	10-12	23	15	—
Д814Г	10—12	29	15	0,095
Д813	11,5—14	20	18	—
Д814Д	11,5—14	24	18	0,095
Д814А	7-8,5	40	6	0,07
Д808	7—8,5	33	6	—
Д809	8—9,5	29	10	—
Д814Б	8—9,5	36	10	0,08
Д810	9—10,5	26	12	—
Д814В	9—10,5	32	12	0,09



### Номинальный ряд резисторов

10	11	12	13	15	16	18	20
22	24	27	30	33	36	39	43
47	51	56	62	68	75	82	91

### Буквенные коды элементов

Первая буква ко- да (обязательная)	Группа видов эле- ментов	Примеры видов элементов	Двух бук- вен- ный код
А	Устройства (общее обозначение)	Усилители, приборы телеуправле- ния, лазеры, мазеры	
В	Преобразователи не- электрических вели- чин в электрические (кроме генераторов и источников пита- ния) или наоборот, аналоговые или мно- горазрядные преоб- разователи или дат- чики для указания или измерения	Громкоговоритель Магнитострикционный элемент Детектор ионизирующих излучений Сельсин-приемник Телефон (капсюль) Сельсин-датчик Тепловой датчик Фотоэлемент Микрофон Датчик давления Пьезоэлемент Датчик частоты вращения (тахогене- ратор)	ВА ВВ ВД ВЕ ВF ВС ВК ВL ВМ ВР ВQ ВR

		Звукосниматель	BS
		Датчик скорости	BV
C	Конденсаторы		
D	Схемы интегральные, микросборки	Схема интегральная аналоговая	DA
		Схема интегральная цифровая, логический элемент	DD
		Устройства хранения информации	DS
		Устройство задержки	DT
E	Элементы разные (осветительные устройства, нагревательные элементы)	Нагревательный элемент	EK
		Лампа осветительная	EL
		Пиропатрон	ET
F	Разрядники, предохранители, устройства защитные	Дискретный элемент защиты по току мгновенного действия	FA
		Дискретный элемент защиты по току инерционного действия	FP
		Предохранитель плавкий	FU
		Дискретный элемент защиты по напряжению, разрядник	FV
G	Генераторы, источники питания, кварцевые осцилляторы	Батарея	GB
H	Устройства индикационные и сигнальные	Прибор звуковой сигнализации	HA
		Индикатор символьный	HG
		Прибор световой сигнализации	HL
K	Реле, контакторы,	Реле токовое	KA

	пускатели	Реле указательное Реле электротепловое Пускатель Реле времени Реле напряжения	KN KK KM KT KV
L	Катушки индуктивности, дроссели	Дроссель люминесцентного освещения	LL
M	Двигатели постоянного и переменного тока		
P	Приборы, измерительное оборудование.  <b>Примечание.</b>  Сочетание PE применять не допускается.	Амперметр Счетчик импульсов Частотомер Счетчик активной энергии Счетчик реактивной энергии Омметр Регистрирующий прибор Часы, измеритель времени действия Вольтметр Ваттметр	PA PC PF PI PK PR PS PT PV PW
Q	Выключатели и разъединители в силовых цепях (энергоснабжение, питание оборудования и т. д.)	Выключатель автоматический Короткозамыкатель Разъединитель	QF QK QS

R	Резисторы	Терморезистор	RK
		Потенциометр	RP
		Шунт измерительный	RS
		Варистор	RU
S	Устройства коммутационные в цепях управления, сигнализации и измерительных. Примечание. Обозначение SF применяют для аппаратов, не имеющих контактов силовых цепей	Выключатель или переключатель	SA
		Выключатель кнопочный	SB
		Выключатель автоматический	SF
		Выключатели, срабатывающие от различных воздействий:	
		уровня;	SL
		давления;	SP
		положения (путевой);	SQ
		частоты вращения;	SR
T	Трансформаторы, автотрансформаторы	Трансформатор тока	TA
		Электромагнитный стабилизатор	TS
		Трансформатор напряжения	TV
U	Устройства связи Преобразователи электрических величин в электрические	Модулятор	UB
		Демодулятор	UR
		Дискриминатор	UI
		Преобразователь частотный инвертор, генератор частоты, выпрями-	UZ

		тель	
V	Приборы электровакуумные и полупроводниковые	Диод, стабилитрон Прибор электровакуумный Транзистор Тиристор	VD VL VT VS
W	Линии и элементы СВЧ	Ответвитель Короткозамыкатель Вентиль	WE WK WS
W	Антенны	Трансформатор, неоднородность, фазовращатель Аттенюатор Антенна	WT WU WA
X	Соединения контактные	Токоъемник, контакт скользящий Штырь Гнездо Соединение разборное Соединитель высокочастотный	XA XP XS XT XW
Y	Устройства механические с электромагнитным приводом	Электромагнит Тормоз с электромагнитным приводом Муфта с электромагнитным приводом Электромагнитный патрон или плита	YA YB YC YN
Z	Устройства оконечные, фильтры	Ограничитель Фильтр кварцевый	ZL ZQ

	Ограничители		
--	--------------	--	--

### **Программа Electronics Workbench**

Система схемотехнического моделирования Electronics Workbench предназначена для моделирования и анализа электрических схем.

Программа Electronics Workbench позволяет моделировать аналоговые, цифровые и цифро-аналоговые схемы большой сложности. Имеющиеся в программе библиотеки включают в себя большой набор широко распространенных электронных компонентов. Есть возможность подключения и создания новых библиотек компонентов.

Широкий набор приборов позволяет производить измерения различных величин, задавать входные воздействия, строить графики.

Результаты моделирования можно вывести на принтер или импортировать в текстовый или графический редактор для их дальнейшей обработки.

#### ***Компоненты и проведение экспериментов***

В библиотеки компонентов программы входят пассивные элементы, транзисторы, управляемые источники, управляемые ключи, гибридные элементы, индикаторы, логические элементы, триггерные устройства, цифровые и аналоговые элементы, специальные комбинационные и последовательностные схемы. Активные элементы могут быть представлены моделями как идеальных, так и реальных элементов. Возможно также создание своих моделей элементов и добавление их в библиотеки элементов.

В программе используется большой набор приборов для проведения экспериментов: амперметр, вольтметр, осциллограф, мультиметр, Боде-плоттер (графопостроитель частотных характеристик схем), функциональный генератор, генератор слов, логический анализатор и логический преобразователь.

## ***Анализ схем***

Electronics Workbench может проводить анализ схем на постоянном (DC) и переменном (AC) токах. При анализе на постоянном токе определяется рабочая точка схемы в установившемся режиме работы. Результаты этой части анализа используются для дальнейшего расчета схемы. Анализ на переменном токе использует результаты анализа на постоянном токе для получения линеаризованных моделей нелинейных компонентов.

В Electronics Workbench можно исследовать переходные процессы при воздействии на схемы входных сигналов различной формы.

### ***Операции, выполняемые при анализе***

Electronics Workbench позволяет производить следующие операции:

- выбор элементов и приборов из библиотек;
- перемещение элементов и схем в любое место рабочего поля;
- поворот элементов и групп элементов на углы кратные 900;
- копирование, вставка или удаление элементов, групп элементов, фрагментов схем и целых схем;
- изменение цвета проводников;
- выделение цветом контуров схем для более удобного восприятия;
- одновременное подключение нескольких измерительных приборов и наблюдение их показаний на экране монитора;
- присваивание элементу условного обозначения;
- изменение параметров элементов в широком диапазоне.
- Все операции производятся при помощи мыши и клавиатуры.
- Путем настройки приборов можно:
- изменять шкалы приборов в зависимости от диапазона измерений;
- задавать режим работы прибора;
- задавать вид входных воздействий на схему.

Графические возможности программы позволяют:

- одновременно наблюдать несколько кривых на графике;
- отображать кривые на графике различными цветами;
- измерять координаты точек на графике;
- импортировать данные в графический редактор, что позволяет произвести необходимые преобразования рисунка и вывод его на принтер.

## Компоненты Electronics Workbench

Общее поле Electronics Workbench можно разделить на четыре области (рис. 8.1).

Сборка схемы производится на рабочем поле. Необходимые компоненты выбираются из поля компонентов, а из панели инструментов подбираются нужные приборы.

Щелчком левой клавиши мыши на одной из пиктограмм полей компонентов, расположенных на панели компонентов, можно открыть соответствующее поле.

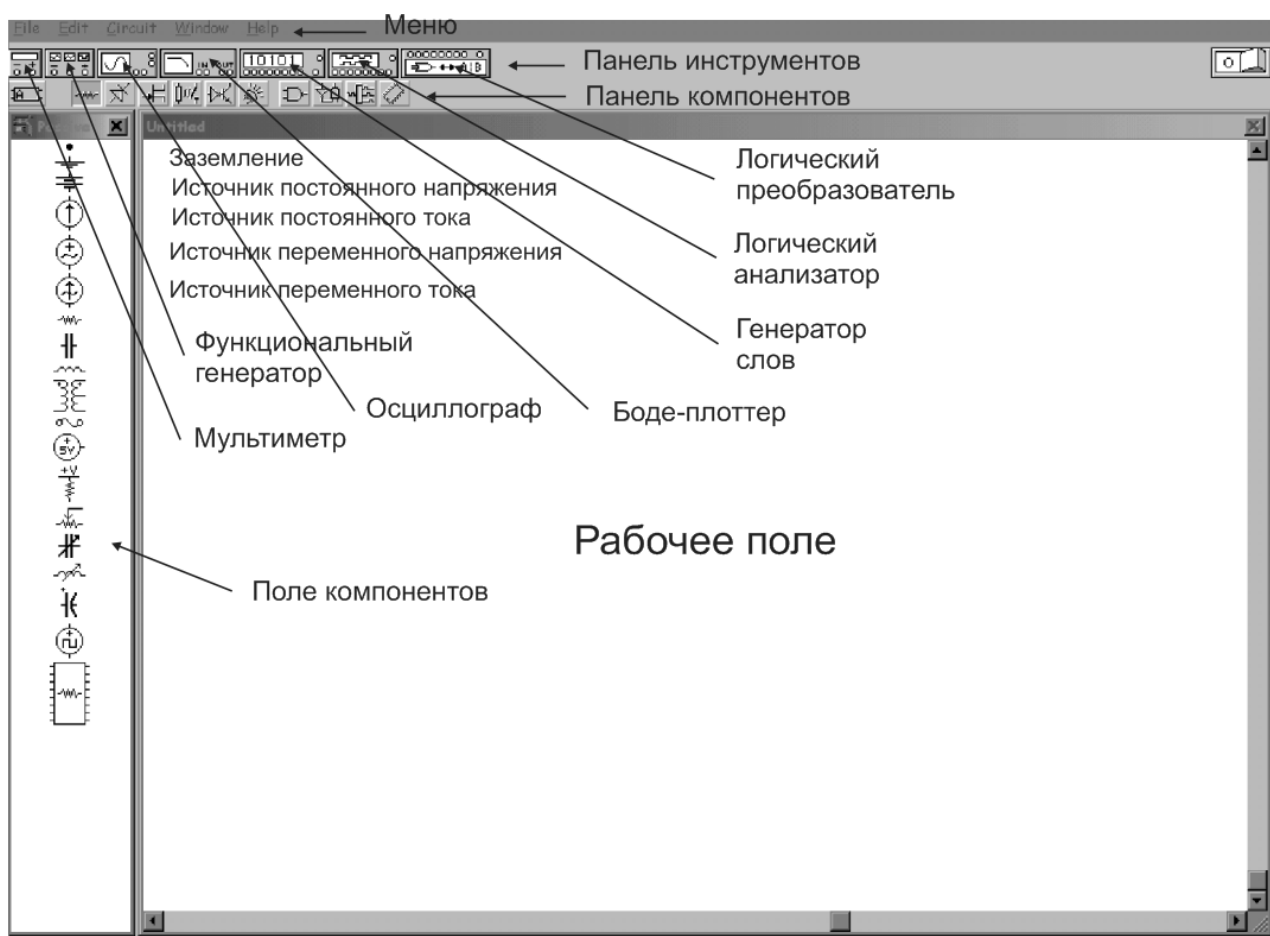


Рис. 8.1. Рабочее поле Electronics Workbench

## Моделирование схем

Моделирование схем состоит из ряда этапов:

- выбора компонентов и инструментов и размещение их на рабочем поле;
- соединения всех элементов схемы проводниками;



- установки значений параметров компонентов;
- проведения эксперимента.

Выбор нужного компонента производится из поля компонентов, нужное поле компонентов выбирается нажатием левой кнопки мыши на одной из пиктограмм на панели компонентов. Выбранный компонент перемещается на рабочее поле при помощи мыши при нажатой и удерживаемой левой клавише.

Для соединения компонентов проводниками нужно подвести указатель мыши к выводу компонента. При этом на выводе компонента появится большая черная точка. Нажав левую кнопку мыши, переместите ее указатель к выводу компонента, с которым нужно соединиться, и отпустите кнопку мыши. Выводы компонентов соединяются проводником.

Установка значений параметров компонентов производится в диалоговом окне свойств компонентов, которое открывается двойным щелчком мыши по изображению компонента.

Замечание: некоторые приборы и схемы необходимо заземлять, иначе показания будут неверными.

На рис. 8.2 показан скриншот схемы однотактного каскада усилителя мощности собранной в программе Electronics Workbench. А на рис. 8.3 пример частотной его характеристики заданной таблично и в виде графика.

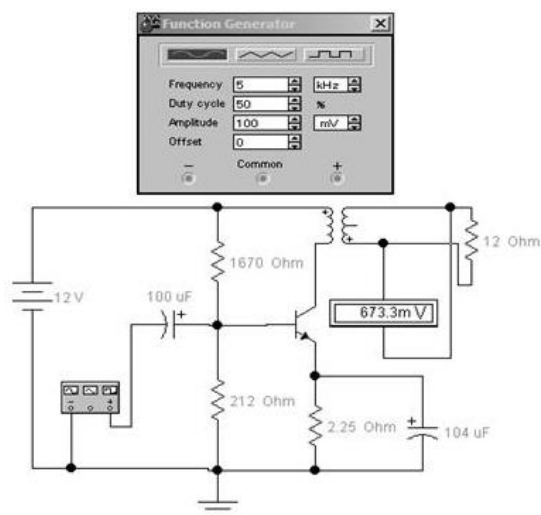


Рис. 8.2. Схема усилительного каскада

f (Гц)	U <sub>вых</sub> (В)
20	0.5
40	0.58
100	0.61
200	0.64
400	0.71
1000	1.03
2000	1.14
5000	0.62
10000	0.42
15000	0.32

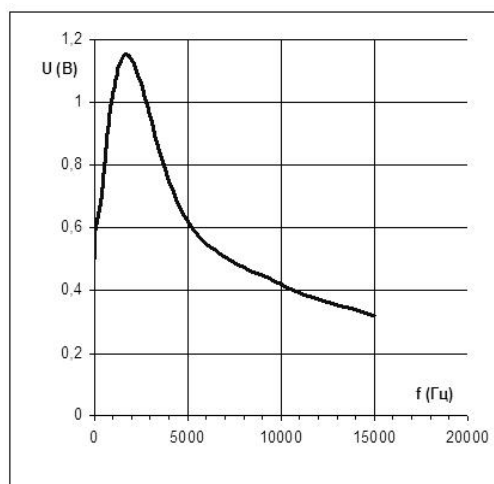


Рис. 8.3. Частотная характеристика

## 9. НОМЕРА ЗАДАНИЙ И ВАРИАНТОВ

1. Рассчитать и выбрать элементы однотактного каскада усилителя мощности (стр.2). Собрать ее в программе Electronics Workbench, снять характеристику  $U_{\text{вых}} = f(F)$  изменяя частоту синусоидального сигнала на входе  $F$  в диапазоне от 20...15000 Гц при  $U_{\text{вх}} = 0,1$  В. Привести скриншот схемы и осциллограммы  $U_{\text{вых}}$  при  $f = 500$  Гц.

Вариант	а	б	в	г	д	е	ж	з	и	к	л	м	н
$P_{\text{вых}}, \text{Вт}$	20	4	7	12	2	8	24	14	1	18	0,5	3	5
$R_{\text{н}}, \text{Ом}$	4	12	6	3	16	10	7	4	31	8	26	21	8
$f_{\text{н}}-f_{\text{в}}, \text{кГц}$	2,5	6,8	12	3,6	4	1,2	8	10	2	0,8	7	3,4	9
$f_{\text{н}}, \text{Гц}$	30	20	50	100	16	300	200	60	40	400	240	130	350
$M_{\text{н}}$	1,1	1,12	1,05	1,08	1,1	1,12	1,05	1,08	1,1	1,12	1,05	1,08	1,02
$E_{\text{п}}, \text{В}$	24	12	16	20	5	11	40	26	4,5	30	6	8,5	9

2. Расчет и выбор элементов мостового выпрямителя с фильтром (стр.8)

Вариант	а	б	в	г	д
$U_{\text{но}}, \text{В}$	24	12	16	20	9
$I_{\text{o}}, \text{А}$	5	0,5	1	4	1,5
$U_1, \text{В}$	220	110	380	190	250
$K_{\text{п.вых}}, \%$	3	5	8	7.5	11

3. Расчет компенсационного стабилизатора постоянного напряжения (стр.12)

Вариант	а	б	в	г	д
$U_{\text{вых}}, \text{В}$	20	16	9	12	6
$\Delta U_{\text{вых}}, \text{В}$	15	12	6	5	3
$I_{\text{н}}, \text{А}$	3	6	12	1	0,5
$\Delta U_{\text{вх}}/U_{\text{вх}}$	0,7	0,5	0,8	0,9	0,7

4. Расчет схемы управления тиристорным выпрямителем (Стр. 17, с пункта 5 по 14 включительно)

Вариант	а	б	в	г	д
$I_{\text{упр}}, \text{А}$	0,1	0,07	0,02	0,035	0,015
$t_{\text{вкл}}, \text{мс}$	220	110	380	190	250

5. Расчет силового тиристорного выпрямителя. Производится по методике для выпрямителя на диодах.

Вариант	а	б	в	г	д
$I_{\text{ср}}, \text{А}$	10	4	40	8	2
$U_{\text{ср}}, \text{В}$	9	16	6	12	24

Вариант	ж	з	и	к
№ рисунка	4.6	4.4	4.7	4.5

6. Расчет трансформатора (стр. 29)

Вариант	а	б	в	г	д
$P_2$ , Вт	25	70	60	120	14
$U_1$ , Ом	200	180	230	120	170
$U_2$ , Ом	12	6,8	12	3,6	24

## Список литературы

1. А.Л.Марченко, Е.А.Марченко. Основы преобразования информационных сигналов. Учебное пособие для вузов.-М.: Горячая линия-Телеком, 2010г, 288с., ил.
2. С.Б.Беневоленский, А.Л.Марченко. Основы электротехники. Учебное пособие для вузов. – М.: Изд. Физико-математической литературы, 2011г, 586с
3. А.Л.Марченко. Основы электроники. Учебное пособие для вузов. –М.: ДМК Пресс, 2008г., 296с, ил., табл.25
4. А.Л.Марченко, С.В.Освальд. Лабораторный практикум по электротехнике и электронике в среде Multisim. Учебное пособие для вузов.- М.: ДМК Пресс, 2010г, 448с., ил+CD
5. Ю.Ф.Опадчий, О.П.Глудкин, А.И.Гуров. Аналоговая и цифровая электроника. Учебник для вузов.- М.: Радио и связь. 2004
6. Г.Г.Рекус, В.Н.Чесноков. Лабораторные работы по электротехнике и основам электроники. – М.:Высшая школа. 2001
7. А.Л.Марченко. Методические указания к проведению лабораторного практикума. Выпуск 1, выпуск 2, выпуск 3.- М.:МАТИ-ЛАТМЭС, 2003
- 8.Волынский Б.А., Зейн Е.Н., Шатерников В.Е. Электротехника. - М.: Энергоатомиздат, 1987.- 526 с.
9. Морозов А.Г. Электротехника, электроника и импульсная техника.-М.: Высш. шк. 1987. - 448 с.
10. Першин В. Расчет сетевого трансформатора источника питания. // Радио.- 2004.- № 4.- С. 54 — 56;- № 5.- С. 55.

11. Герасимов В. Г. [и др.] Электротехнический справочник. Т. 1. - М.: Энергия, 1980.
12. Линде Д. П. [и др.] Справочник по радиоэлектронным устройствам. Т. 2. - М.: Энергия, 1978.
13. Малинин Р. Н. Упрощённый расчёт трансформаторов питания. //Радио.- 1980.- №10.- С. 62.
14. Никифоров И. С. Упрощённый расчёт сетевого трансформатора.// Радио.- 2000.- №10.- С. 39.
15. Справочник радиолюбителя-конструктора/ Сост. Р.Н Малинин – М.: Энергия, 1977.
16. Терещук Р.М. Малогабаритная радиоаппаратура. Справочник радиолюбителя. –Киев: Наукова Думка, 1971.
17. Кисаримов Р.А. Справочник электрика. – М.: РадиоСофт, 1998.
18. Лебедев Н.Н. Электротехника и электрооборудование. – М., Высш. шк. 1974.

## **Оглавление**

Методические указания к выполнению курсовой работы .....	1
1. РАСЧЁТ ОДНОТАКТНОГО КАСКАДА УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ .....	5
1.1. ПОРЯДОК РАСЧЕТА .....	5
2. РАСЧЕТ МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ФИЛЬТРОМ .....	11
2.1. ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНОСТЬ РАСЧЕТА .....	12
3. РАСЧЕТ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА ПОСТОЯННОГО НАПРЯЖЕНИЯ .....	17
3.1. ВЫБОР ТИПА РЕГУЛИРУЮЩЕГО ТРАНЗИСТОРА И ЕГО РЕЖИМА .....	18
3.2. ВЫБОР ТИПА СОГЛАСУЮЩЕГО ТРАНЗИСТОРА И ЕГО РЕЖИМА.....	19
3.3. ВЫБОР УСИЛИТЕЛЬНОГО ТРАНЗИСТОРА $T_3$ И ЕГО РЕЖИМА.....	19
3.5. ВЫБОР КОНДЕНСАТОРОВ .....	20
4. РАСЧЕТ УПРАВЛЯЕМОГО ТИРИСТОРНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ .....	22

4.1 ПОРЯДОК РАСЧЕТА.....	24
4.2. СХЕМЫ СИЛОВОЙ ЦЕПИ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ .....	27
5. РАСЧЕТ ВЫПРЯМИТЕЛЯ ИСТОЧНИКА ПИТАНИЯ.....	27
5.1. ОДНОПОЛУПЕРИОДНЫЙ ВЫПРЯМИТЕЛЬ.....	28
5.2. ДВУХПОЛУПЕРИОДНЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ .....	30
5.2.1 Выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора.....	30
5.2.2. Однофазный мостовой выпрямитель.....	32
7. РАСЧЕТ ТРАНСФОРМАТОРОВ .....	34
7.1. КОНСТРУКТИВНЫЕ ОСОБЕННОСТИ ТРАНСФОРМАТОРОВ .....	34
7.2. МАГНИТОПРОВОДЫ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ....	35
7.3. КАРКАСЫ. ....	37
7.4. ОБМОТКИ ТРАНСФОРМАТОРОВ. ....	37
7.5. МЕТОДИКА РАСЧЕТА ТРАНСФОРМАТОРОВ.....	38
7.5.1. Типовой расчет сетевого трансформатора .....	38
7.5.2. Расчет однофазного трансформатора с учетом частоты напряжения сети .....	39
8. СПРАВОЧНЫЙ МАТЕРИАЛ.....	41
Приложение 1 .....	41
Магнитопроводы типа ПЛ (П-образный, ленточный).....	41
Приложение 2 .....	44
Основные данные обмоточных проводов .....	44
Приложение 3 .....	46
Характеристика изоляции обмоточных проводов.....	46
Приложение 4 .....	47
Параметры основных элементов, применяемых в проектируемых устройствах. .....	47
Параметры транзисторов.....	47
Тиристоры.....	51

Параметры диодов.....	53
Параметры стабилитронов .....	54
Номинальный ряд резисторов .....	57
Буквенные коды элементов.....	57
Программа Electronics Workbench.....	62
Компоненты и проведение экспериментов .....	62
Анализ схем .....	63
Операции, выполняемые при анализе.....	63
Компоненты Electronics Workbench.....	64
Моделирование схем.....	64
9. НОМЕРА ЗАДАНИЙ И ВАРИАНТОВ.....	66
Список литературы.....	68

**Таблица заданий**

№ п/п	ФИО	Задание 1	Задание 2
1		1, а	2, в
2		1, б	3, б
3		1, в	4, д
4		1, г	5, а, и
5		1, д	6, г
6		1, е	5, б, ж
7		1, ж	2, а
8		1, з	3, г
9		1, и	4, б
10		1, к	5, г, з
11		1, л	6, б
12		1, м	4, г
13		1, н	2, д
14		1, а	3, а
15		1, б	4, в
16		1, в	5, в, к









*Борис Борисович Былов*

Методические указания к курсовой работе

**Расчет электронных схем**

Под редакцией авторов

Технический редактор Е.Е. Костылёва

Подписано в печать 03.04.2011 Формат 60х90.

Печать на ризографе. Усл. печ. л. 8,43. Уч. изд. л. 1,59

Тираж 50 экз. Заказ № 158

Издательский центр МАТИ

109240, Москва, Берниковская наб., 14

Типография Издательского центра МАТИ

109240, Москва, Берниковская наб., 14