



Министерство образования и науки Российской Федерации
федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Алтайский государственный технический
университет им. И.И. Ползунова»

Е. В. Титов, Н.П. Воробьев

СИЛОВАЯ ЭЛЕКТРОНИКА В ЭНЕРГЕТИКЕ

Учебно-методическое пособие
по выполнению курсового проекта
по дисциплине «Силовая электроника» для студентов
направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника»



БАРНАУЛ 2018

УДК 621.382

Титов, Е. В. Силовая электроника в энергетике: учебно-методическое пособие по выполнению курсового проекта по дисциплине «Силовая электроника» для студентов направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника / Е. В. Титов, Н.П. Воробьев; Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул : Изд-во АлтГТУ, 2018. – 105 с.

Рассмотрены вопросы проектирования отдельных электротехнических и электронных устройств.

Учебно-методическое пособие разработано при участии студента АлтГТУ Кокорина И.А.

Рассмотрено и одобрено на заседании
кафедры ЭПБ 30.08.2018 протокол
№ 1

Рецензент:
заведующий кафедрой «Электрификация
и автоматизация сельского хозяйства»
ФГБОУ ВПО «АГАУ» (г. Барнаул)
д.т.н., профессор А. А. Багаев

СОДЕРЖАНИЕ

Введение	5
1 Расчет однотактного усилителя мощности	6
2 Расчет мостового выпрямителя с фильтром	18
3 Расчет компенсационного стабилизатора постоянного напряжения	26
3.1 Выбор типа регулирующего транзистора и его режима	28
3.2 Выбор типа согласующего транзистора и его режима	30
3.3 Выбор усилительного транзистора и его режима	31
3.4 Расчет делителей напряжения	33
3.5 Выбор конденсаторов	34
4 Расчет управляемого тиристорного выпрямителя.....	34
4.1 Схемы силовой цепи управляемых выпрямителей	40
5 Расчет выпрямителя источника питания	41
5.1 Однополупериодный выпрямитель	41
5.2 Двухполупериодный выпрямитель	44
5.3 Однофазный мостовой выпрямитель	49
5.4 КПД выпрямителей	51
6 Расчет трансформаторов	52
6.1 Конструктивные особенности трансформаторов	52
6.2 Магнитопроводы трансформаторов	54
6.3 Каркасы	56
6.4 Обмотка трансформаторов	56
6.5 Методика расчета трансформатора	57
6.6 Методика расчета трансформатора, работающего в составе выпрямителя.....	60
6.7 Справочный материал	63
7 Расчет преобразователя тока.....	63
8 Пример использования Scilab при расчете однофазного мостового выпрямителя.....	67
Заключение.....	76
Список литературы.....	77
Приложение А. Справочные данные для расчета трансформаторов	79

Приложение Б. Справочные данные для расчета трансформаторов	86
Приложение В. Исходные данные к выполнению курсового проекта	99

ВВЕДЕНИЕ

Учебно-методическое пособие по выполнению курсового проекта по дисциплине «Силовая электроника» коллективом авторов переработано и дополнено примерами выполнения расчетов изучаемых элементов. Проведена систематизация и оптимизация расчетных выражений и текстовой информации. [1]

Курсовой проект по дисциплине «Силовая электроника» выполняется студентами направления 13.03.02 «Электроэнергетика и электротехника» для достижения следующих целей: [1]

- Использовать теоретические знания, приобретенные при изучении курса, для решения практических инженерных проблем.
- Сформировать навыки решения электротехнических задач.
- Проверить степень усвоения соответствующих разделов изучаемого курса.

Каждый из разделов пособия представляет собой самостоятельную, законченную методику расчета конкретного устройства.

Объем и содержание курсового проекта определяет преподаватель.

Пояснительная записка к курсовому проекту выполняется на стандартных листах формата А4 и включает следующие разделы: [1]

- Титульный лист.
- Содержание пояснительной записки.
- Исходные данные для расчетов. В случае, когда производится проектирование нескольких объектов, приводятся исходные данные для каждого устройства.
- Принципиальные схемы электротехнических или электронных устройств.
- Расчет принципиальной схемы с объяснением каждого действия и обоснованиями выбора всех элементов схемы.
- Список литературы.
- Графическая часть (при необходимости), вольтамперные, амплитудно-частотные, фазо-частотные и другие характеристики, векторные диаграммы, эпюры тока и

напряжения и т.п.

Оформление курсового проекта должно быть выполнено в соответствии с требованиями СТО 12 570-2013.

Пояснительная записка должна быть оформлена с использованием компьютерных текстовых и графических редакторов, а также различных математических программных сред или представлена в рукописном варианте и содержать расчет, выполненный вручную. Качество оформления пояснительной записки учитывается при окончательной оценке работы. [1]

1 РАСЧЕТ ОДНОТАКТНОГО УСИЛИТЕЛЯ МОЩНОСТИ

Исходные данные: [1]

$P_{вых}$ – выходная мощность каскада, Вт;

R_n – сопротивление нагрузки, Ом;

$f_n \sim f_в$ – диапазон усиливаемых частот, Гц;

M_n – коэффициент частотных искажений на нижней частоте;

E_n – ЭДС источника питания, В. [1]

На рисунке 1.1 приведена принципиальная электрическая схема усилителя.

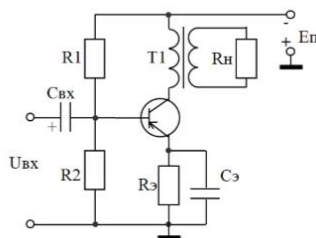


Рисунок 1.1 – Принципиальная электрическая схема усилителя

Дано: $P_{вых} = 20$ Вт; $R_n = 4$ Ом; $f_n \sim f_в = 12$ кГц; $f_n = 70$ Гц;

$$M_n = 1,1; E_n = 24 \text{ В.}$$

Порядок расчета

а) Распределяем по цепям частотные искажения [1]

$$M_n = \prod_{i=1}^k M_{ni}, \quad (1.1)$$

где M_n — коэффициент частотных искажений на нижней границе

Выходной трансформатор: $M_n = 1,14$.

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

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

б) Вычисляют мощность сигнала, отдаваемую транзистором [1]

$$P_{\approx} = \frac{P_{\text{вых}}}{\eta_{mp}}, \quad (1.2)$$

где η_{mp} — КПД выходного трансформатора;

$P_{\text{вых}}$ — выходная мощность каскада;

P_{\approx} — мощность сигнала, отдаваемая транзистором.

КПД выходного трансформатора выписываем из таблицы А.3, принимаем равным $\eta_{mp} = 0,82$. [1]

Мощность сигнала равна

$$P_{\approx} = \frac{20}{0,82} = 24,4 \text{ Вт.}$$

в) По формуле (1.3) вычисляем мощность, выделяемую на транзисторе при $k_a = 0,035 \dots 0,45$ [1]

$$P_{\kappa} = \frac{P_{\approx}}{k_a}, \quad (1.3)$$

где P_{\approx} — мощность сигнала, отдаваемая транзистором;

k_a — коэффициент использования транзистора;

P_{κ} — мощность, выделяемая на транзисторе.

Принимаем коэффициент использования транзистора $k_a = 0,4$

$$P_{\kappa} = \frac{24,4}{0,4} = 61 \text{ Вт.}$$

г) Ориентировочно определяем падение напряжения на активном сопротивлении первичной обмотки трансформатора и на сопротивлении R_3 [1]

$$\Delta U = U_{r1} + U_{r3}, \quad (1.4)$$

где U_{r1} – напряжение на активном сопротивлении первичной обмотки трансформатора;

U_{r3} — напряжение на сопротивлении R_3 ;

ΔU – падение напряжения.

$$\Delta U = (0,2 \dots 0,3) \cdot E_n = 0,25 \cdot 24 = 6B,$$

где ΔU – падение напряжения;

E_n – ЭДС источника питания.

д) Наибольшее возможное напряжение на транзисторе определяем по формуле (1.5) [1]

$$U_{кэ\max} = \frac{E_n - \Delta U}{(0,4 \dots 0,45)}, \quad (1.5)$$

где ΔU – падение напряжения;

E_n – ЭДС источника питания;

$U_{кэ\max}$ – напряжение на транзисторе;

$$U_{кэ\max} = \frac{24 - 6}{0,4} = 42,8B.$$

е) По двум параметрам P_k и $U_{кэ\max}$ выбираем транзистор из таблицы Б.1 [1] p-n-p КТ837А с параметрами $U_{кэ\max}=60$ В; $I_{к\max}=1,5$ А; $P_{к\max}=30$ Вт; $h_{21э}=40$; $f_{h_{21э}}=3$ МГц. [1]

ж) Проверяем транзистор по частоте [1]

$$f_{h_{21}} \geq \frac{f_g}{\sqrt{M_g^2 - 1}}, \quad (1.6)$$

где f_g - верхняя граничная частота усилителя;

M_g - коэффициент частотных искажений на данной частоте ($M_g=M_n=1,1$),

$$f_{h_{21}} \geq \frac{58}{\sqrt{1,1^2 - 1}} = 276,2 \Rightarrow f_{h_{21}} \geq 276,2 \text{ кГц}.$$

Выходные характеристики условного транзистора представлены на рисунке 1.2.

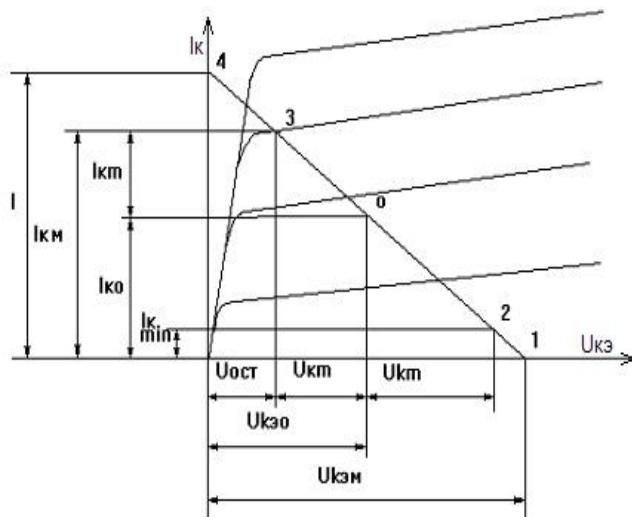


Рисунок 1.2 – Выходные характеристики условного транзистора

и) Определяем положение точки покоя на выходных статических характеристиках транзистора (рисунок 1.2) по формулам (1.7) и (1.8) [1]

$$U_{кэ0} = E_n - \Delta U, \quad (1.7)$$

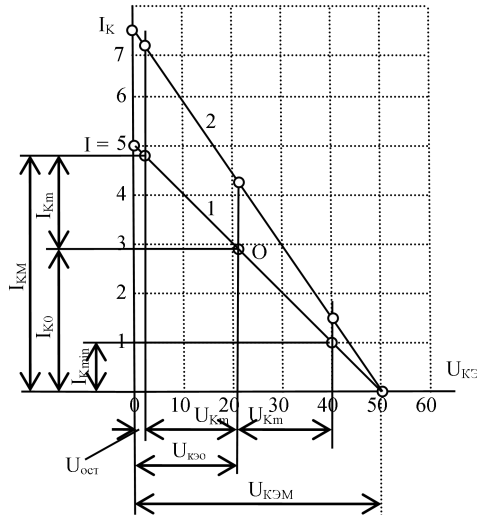
где $U_{кэ0}$ — начальное напряжение коллектор — эмиттер;
 E_n — ЭДС источника питания;
 ΔU — падение напряжения,

$$I_{к0} = \frac{P_k}{U_{кэ0}}, \quad (1.8)$$

где $I_{к0}$ — начальный ток коллектора;
 P_k — мощность, выделяемая на транзисторе;
 $U_{кэ0}$ — начальное напряжение коллектор — эмиттер,
 $U_{кэ0} = 24 - 6 = 18 В,$

$$I_{к0} = \frac{61}{18} = 3,4 А.$$

к) Определяем рабочий участок нагрузочной прямой 1 на рисунке 1.3, для чего задаемся величиной остаточного напряжения ($U_{ост}=2$ В). Наименьший ток коллектора, из рисунка 1.3, $I_{ктin}=1$ А. [1]



$I_{кэ0}$ – начальный ток коллектора; $U_{кэ0}$ – начальное напряжение коллектора; I_k – ток коллектора; $U_{кэ}$ – напряжение на переходе коллектор-эмиттер; $I_{ктin}$ – минимальный ток коллектора; $U_{ост}$ – остаточное напряжение на коллекторе; $I_{кэ}$, $U_{кэ}$ – амплитудные значения выходных напряжения и тока;

1 – исходная; 2 – скорректированная

Рисунок 1.3 - Нагрузочные прямые

л) Из построения определяем амплитуду выходного напряжения $U_{кэ}$ и амплитуду выходного тока $I_{кэ}$ по формулам (1.9) и (1.10) [1]

$$U_{кэ} = U_{кэ0} - U_{ост} \quad (1.9)$$

где $U_{кэ}$ – амплитудное значение выходного напряжения;

$U_{кэ0}$ – начальное напряжение коллектор – эмиттер;

$U_{ост}$ – остаточное напряжение,

$$I_{кт} = I_{ктmax} - I_{к0}, \quad (1.10)$$

где $I_{кт}$ – амплитудное значение выходного тока; к

$I_{ктmax}$ – максимальный ток коллектора;

$I_{к0}$ – начальный ток коллектора,

$$U_{кт} = 18 - 2 = 16B,$$

$$I_{кт} = 4,8 - 3,4 = 1,4A.$$

Соблюдается условие $I_{кт} \leq I_{кдоп} = 1,4 \leq 1,5A$.

м) Вычисляем мощность сигнала, отдаваемую транзистором по формуле (1.11) [1]

$$P_m = 0,125 \cdot (I_{кmax} - I_{кmin})^2 \cdot R_{кп}, \quad (1.11)$$

где P_m - мощность сигнала, отдаваемая транзистором;

$I_{кmax}$ – максимальный ток коллектора;

$I_{кmin}$ – минимальный ток коллектора;

$R_{кп}$ – сопротивление нагрузки по переменному току, определяется по формуле (1.12),

$$R_{кп} = \frac{U_{кэmax}}{I}, \quad (1.12)$$

где $R_{кп}$ – сопротивление нагрузки по переменному току;

I – точка пересечения нагрузочной прямой с осью ординат;

$U_{кэmax}$ – максимальное напряжение на переходе коллектор — эмиттер.

$$R_{кп} = \frac{50}{5} = 10Om,$$

$$P_m = 0,125 \cdot (4,8 - 1)^2 \cdot 10 = 18Bm.$$

Значение P_m меньше, чем $P_{э} = 24,4$ Вт.

н) Увеличиваем наклон нагрузочной прямой (увеличиваем I до 7,5 А - прямая 2, рисунок 1.3) и вычисляем P_m с новыми параметрами [1]

$$R_{кп} = \frac{50}{7,5} = 6,7Om,$$

где $R_{кп}$ – сопротивление нагрузки по переменному току

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

где P_m - мощность сигнала, отдаваемая транзистором.

Теперь P_m больше, чем P_{\approx} (P_m не должно превышать P_{\approx} более чем на (20...30)%). [1]

Нагрузочная прямая не должна выходить из области допустимой мощности. При $U_{кэ0}=18$ В и $I_{к0}=1,4$ А, [1]

$$P_{км} \approx P_{к0} = U_{кэ0} \cdot I_{к0} = 18 \cdot 1,4 = 25,2 \text{ Вт},$$

где $P_{км}$ — амплитудное значение мощности;

$P_{к0}$ — мощность, выделяемая на транзисторе;

$I_{к0}$ — начальный ток коллектора;

$U_{кэ0}$ — начальное напряжение коллектора

$$P_{км} < P_{кдоп} = 25,2 < 30 \text{ Вт},$$

где $P_{км}$ — амплитудное значение мощности;

$P_{кдоп}$ — допустимое значение мощности.

п) Диапазон изменения входного тока (тока базы) при $\beta = 20$ [1]

$$I_{\delta m} = \frac{I_{км}}{\beta}, \quad (1.13)$$

где $I_{\delta m}$ - амплитудное значения тока базы;

$I_{км}$ — амплитудное значение выходного тока;

β — коэффициент усиления

$$I_{\delta \min} = \frac{I_{к \min}}{\beta}, \quad (1.14)$$

где $I_{\delta \min}$ — минимальный ток базы;

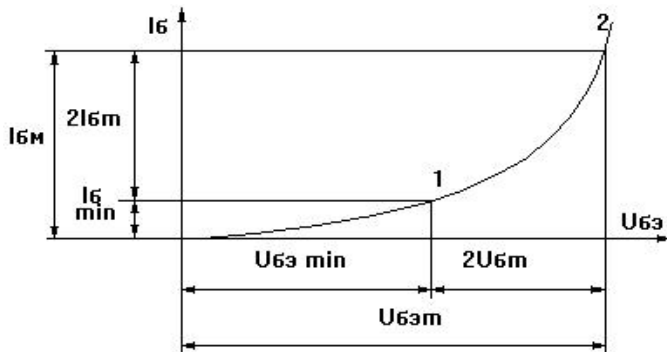
$I_{к \min}$ — минимальный ток коллектора;

β — коэффициент усиления,

$$I_{\delta m} = \frac{7,5}{20} = 0,24 \text{ А},$$

$$I_{\delta \min} = \frac{1}{20} = 0,05 \text{ А}.$$

На рисунке 1.4 представлено определение параметров входного сигнала.



$I_{бm}$ — амплитудные значения тока базы; $U_{бэм}$ — амплитудные значения напряжения; $I_{бmin}$ — минимальный ток базы; $U_{бэmin}$ — минимальное напряжение на переходе база эмиттер

Рисунок 1.4 – Определение параметров входного сигнала

р) По входной характеристике транзистора находим $U_{бэм}$ и $U_{бэmin}$ (рисунок 1.4).[1] Для кремниевого транзистора можно принять $U_{бэм}=0,7$ В, $U_{бэmin}=0,5$ В. [1]

с) По формулам (1.15) и (1.16) вычисляем мощность входного сигнала и входное сопротивление транзистора по переменному току [1]

$$P_{вх} = \frac{2 \cdot U_{бэм} \cdot 2 \cdot I_{бm}}{8}, \quad (1.15)$$

где $P_{вх}$ — мощность входного сигнала транзистора по переменному току;

$U_{бэм}$ — амплитудные значения напряжения;

$I_{бm}$ — амплитудные значения тока базы

$$R_{вхтр} = \frac{U_{бэм}}{I_{бm}}, \quad (1.16)$$

где $R_{вхтр}$ — входное сопротивление транзистора;

$U_{бэм}$ — амплитудные значения напряжения;

$I_{бm}$ — амплитудные значения тока базы,

$$P_{вх} = \frac{2 \cdot 0,7 \cdot 2 \cdot 0,24}{8} = 0,084 \text{ Вт},$$

$$R_{\text{эмп}} = \frac{0,7}{0,24} = 2,92 \text{ Ом.}$$

т) Сопротивление в цепи эмиттера определяем по падению напряжения на этом сопротивлении при $I_{\text{к0}}=2,9\text{А}$ [1]

$$R_3 = \frac{U_{r3}}{I_{\text{к0}}}, \quad (1.17)$$

где R_3 — сопротивление в цепи эмиттера;

$I_{\text{к0}}$ — начальный ток коллектора;

U_{r3} — падение напряжения на сопротивлении, определяемое в соответствии с выражением

$$U_{r3} = (0,3 \dots 0,5) \cdot \Delta U, \quad (1.18)$$

где U_{r3} — падение напряжения на сопротивлении;

ΔU — падение напряжения,

$$U_{r3} = 6 \cdot 0,4 = 2,4 \text{ В,}$$

$$R_3 = \frac{2,4}{2,9} = 0,83 \text{ Ом.}$$

у) Определяем емкость конденсатора в цепи эмиттера. При $f_H=70 \text{ Гц}$ [1]

$$C_3 = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_H \cdot R_3}, \quad (1.19)$$

где C_3 — емкость конденсатора в цепи эмиттера;

f_H — нижняя граничная частота усилителя;

R_3 — сопротивление в цепи эмиттера

$$C_3 = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 70 \cdot 0,83} = 0,027 \text{ Ф.}$$

ф) Определяем входное сопротивление каскада $R_{\text{вх}}$ и $R1, R2$ [1]

$$R_{\text{вх}} = R_{\text{эмп}} + \beta \cdot R_3, \quad (1.20)$$

где $R_{\text{вх}}$ — входное сопротивление каскада;

$R_{\text{эмп}}$ — входное сопротивление транзистора;

R_3 — сопротивление в цепи эмиттера;

β — коэффициент усиления,

$$R_{\text{вх}} = 1,94 + 20 \cdot 0,83 = 18,54 \text{ Ом.}$$

Обычно величину резистора $R2$ делителя напряжения выбирают в несколько раз меньше, чем $R_{вхк}$. 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 $R2 = R_{вхк} = 18,54 \text{ Ом}$. [1]

Эти резисторы включены параллельно. Их общее сопротивление равно

$$R_{2_{вхк}} = \frac{R2}{2} = \frac{18,54}{2} = 9,27 \text{ Ом},$$

где $R_{2_{вхк}}$ — общее сопротивление;

$R2$ – сопротивление резистора делителя напряжения.

Сопротивление на $R1$ можно найти по формуле (1.21), начальный ток базы по формуле (1.22) [1]

$$R1 = \frac{U_{r1} \cdot R2}{U_{r2}}, \quad (1.21)$$

где $R1$ – сопротивление резистора делителя напряжения;

U_{r1} – падение напряжения на $R1$;

$R2$ – сопротивление резистора делителя напряжения;

U_{r2} – падение напряжения на $R2$,

$$I_{\delta 0} = \frac{I_{к0}}{\beta}, \quad (1.22)$$

где $I_{\delta 0}$ — начальный ток базы;

$I_{к0}$ – начальный ток коллектора;

β — коэффициент усиления,

$$I_{\delta 0} = \frac{2,9}{20} = 0,145 \text{ А}.$$

Падение напряжения на $R2$ определим по формуле (1.23) [1]

$$U_{r2} = R2 \cdot I_{к0}, \quad (1.23)$$

где U_{r2} – падение напряжения на $R2$;

$R2$ – сопротивление резистора делителя напряжения;

$I_{к0}$ – начальный ток коллектора,

$$U_{r2} = 18,54 \cdot 0,145 = 2,69 \text{ В}.$$

Напряжение на $R1$ определяется по формуле (1.24) [1]

$$U_{r1} = E_n - U_{r2}, \quad (1.24)$$

где U_{r1} – падение напряжения на R1;

E_n – ЭДС источника питания;

U_{r2} – падение напряжения на R2,

$$U_{r1} = 24 - 2,69 = 21,31 \text{ В},$$

$$R1 = \frac{21,31 \cdot 18,54}{2,69} = 147.$$

х) Вычисляем коэффициент усиления каскада по мощности [1]

$$K_p = \frac{P_{\text{вых}}}{P_{\text{вх}}}, \quad (1.25)$$

где K_p – коэффициент усиления каскада по мощности;

$P_{\text{вых}}$ — выходная мощность каскада;

$P_{\text{вх}}$ — мощность входного сигнала транзистора по переменному току,

$$K_p = \frac{20}{0,126} = 159.$$

ц) Коэффициент трансформации выходного трансформатора

$$K = \sqrt{\frac{R_n}{R_{\text{кн}} \cdot \eta_{\text{мп}}}} = \sqrt{\frac{4}{6,7 \cdot 0,82}} = 0,73, \quad (1.26)$$

где K - коэффициент трансформации выходного трансформатора;

R_n – сопротивление нагрузки;

$R_{\text{кн}}$ – сопротивление нагрузки по переменному току;

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

ч) Сопротивление обмотки выходного трансформатора [1]

$$R_{m1} = 0,5 \cdot R_{\text{кн}} \cdot (1 - \eta_{\text{мп}}), \quad (1.27)$$

где R_{m1} — сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора;

$R_{\text{кн}}$ – сопротивление нагрузки по переменному току;

$\eta_{\text{мп}}$ - КПД выходного трансформатора,

$$R_{m2} = R_{m1} \cdot K^2, \quad (1.28)$$

где R_{m2} — сопротивление вторичной обмотки выходного трансформатора;

R_{m1} — сопротивление первичной обмотки выходного трансформатора;

K — коэффициент трансформации выходного трансформатора,

$$R_{m1} = 0,5 \cdot 6,7 \cdot (1 - 0,82) = 0,6 \text{ Ом},$$

$$R_{m2} = 0,6 \cdot 0,73^2 = 0,32 \text{ Ом}.$$

ш) Индуктивность первичной обмотки [1]

$$L = \frac{0,159 \cdot (R_n + R_{m2})}{f_n \cdot K^2 \cdot \sqrt{M_n^2 - 1}}, \quad (1.29)$$

где L — индуктивность первичной обмотки;

R_n — сопротивление нагрузки;

R_{m2} — сопротивление вторичной обмотки выходного трансформатора;

K — коэффициент трансформации выходного трансформатора;

f_n — нижняя граничная частота усилителя;

M_n — коэффициент частотных искажений на нижней частоте,

$$L = \frac{0,159 \cdot (4 + 0,32)}{70 \cdot 0,73^2 \cdot \sqrt{1,1^2 - 1}} = 0,04 \text{ Гн}.$$

ы) Площадь поверхности охлаждающего радиатора определяется по формуле (1.30) [1]

$$S_{ox} = \frac{(1200 \div 1500) \cdot P_k}{T_{tm}^{\circ} - T_{cpm}^{\circ} - P_k \cdot R_{mt}}, \quad (1.30)$$

где S_{ox} — площадь поверхности охлаждающего радиатора;

P_k — мощность, выделяемая на транзисторе;

$T_{tm}^{\circ} = 150^{\circ}\text{C}$ — наибольшая допустимая температура коллекторного перехода;

$T_{cpm}^{\circ} = 4 \text{ } 0^{\circ}\text{C}$ — наибольшая возможная температура окружающей среды;

R_{mt} — тепловое сопротивление.

$$\text{Для КТ837А из справочника } R_{mt} = 1 \frac{\text{C}^{\circ}}{\text{Вт}},$$

$$S_{ox} = \frac{(1200 \div 1500) \cdot 61}{150 - 40 - 61 \cdot 1} = 1618 \text{ см}^2.$$

э) Находим емкость C_{ex} по формуле (1.31)

$$C_{ex} = \frac{10}{2 \cdot \pi \cdot f_n \cdot R_{2exx}}, \quad (1.31)$$

где C_{ex} — входная емкость;

f_n — нижняя граничная частота усилителя;

R_{2exx} — общее сопротивление,

$$C_{ex} = \frac{10}{2 \cdot 3,14 \cdot 70 \cdot 3,75} = 0,006 \Phi = 6000 \text{ мк}\Phi.$$

2 РАСЧЕТ МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ С ФИЛЬТРОМ

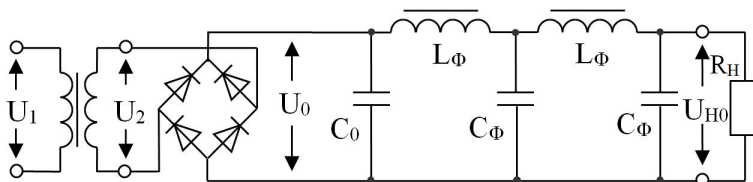
Исходными данными для расчета выпрямителя являются:

$U_{но}$ — среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке;

I_o — среднее значение выпрямленного тока;

$U1$ — напряжение сети;

$K_{пвых}$ — коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения на нагрузке. [1]



$U1$ — напряжение сети; $U0$ — обратное напряжение на вентиле; $U2$ — напряжение на вторичной обмотки трансформатора; $C0$ — емкость конденсатор на входе фильтра; C_{Φ}, L_{Φ} — емкость и индуктивность фильтра; R_n — сопротивление нагрузки; $U_{но}$ — среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке

Рисунок 2.1 – Принципиальная электрическая 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. [1]

Дано: $U_{но} = 4 \text{ В}$; $I_o = 2 \text{ А}$; $U_l = 220 \text{ В}$; $K_{пвых} = 2\%$.

Порядок расчета:

а) Для выбора типа диодов, определяем обратное напряжение на вентиле по формуле (2.1) [1]

$$U_{обр} = 1,5 \cdot U_0, \quad (2.1)$$

где $U_{обр}$ — обратное напряжение на вентиле;

U_0 – напряжение на входе сглаживающего фильтра, которое должно быть больше напряжения на нагрузке, т.к. учитываются потери напряжения на фильтре, может быть определено по формуле (2.2) [1]

$$U_0 = 1,2 \cdot U_{но}, \quad (2.2)$$

где U_0 – напряжение на входе сглаживающего фильтра;

$U_{но}$ – среднее значение выпрямленного напряжения на нагрузке

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

Средний ток через вентиль

$$I_{аср} = 0,5 \cdot I_o, \quad (2.3)$$

где $I_{аср}$ – средний ток через вентиль;

I_o – среднее значение выпрямленного тока

$$I_{аср} = 0,5 \cdot 2 = 1 \text{ А}.$$

Выбор диода производится по двум параметрам $I_{аср}$ и $U_{обр}$, из таблицы Б.3 [1], выписываем максимальное обратное напряжение, средний ток и внутреннее сопротивление вентиля R_i . Выбираем диод Д303 с параметрами $I_{ср} = 3 \text{ А}$; $U_{обр\max} = 50 \text{ В}$. [1]

При падении напряжения на кремниевом диоде $U_\delta = 0,7 \text{ В}$ величина сопротивления вентиля [1]

$$R_i = \frac{U_\delta}{I_{аср}}, \quad (2.4)$$

где R_i – сопротивление вентиля;
 U_0 – падение напряжения на кремниевом диоде;
 $I_{аср}$ – средний ток через ventиль,

$$R_i = \frac{0,7}{1} = 0,7 \text{ Ом.}$$

б) Расчет трансформатора при $U_0=4,8 \text{ В.}$ [1]
 Определяем сопротивление трансформатора

$$R_{mp} = \frac{830 \cdot U_0}{I_0 \cdot (U_0 \cdot I_0)^{1/4}}, \quad (2.5)$$

где R_{mp} – сопротивление трансформатора;
 I_0 – среднее значение выпрямленного тока;
 U_0 – напряжение на входе сглаживающего фильтра,

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

Напряжение на вторичной обмотке трансформатора [1]

$$U_2 = 0,75 \cdot U_0 + \frac{I_0 \cdot (2 \cdot R_i + R_{mp})}{530}, \quad (2.6)$$

где U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора;
 U_0 – напряжение на входе сглаживающего фильтра;
 I_0 – среднее значение выпрямленного тока;
 R_i – сопротивление вентиля;
 R_{mp} – сопротивление трансформатора,

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

Токи обмоток определяются по формулам (2.7), (2.8) [1]

$$I_2 = 1,41 \cdot I_0 + \frac{16,6 \cdot U_0}{2 \cdot R_i + R_{mp}}, \quad (2.7)$$

где I_2 – ток во вторичной обмотке;
 I_0 – среднее значение выпрямленного тока;
 U_0 – напряжение на входе сглаживающего фильтра;
 R_i – сопротивление вентиля;
 R_{mp} – сопротивление трансформатора,

$$I_1 = \frac{1,2 \cdot U_2 \cdot I_2}{U_1}, \quad (2.8)$$

где I_1 – ток в первичной обмотке;

U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора;

I_2 – ток во вторичной обмотке;

U_1 – напряжение сети,

$$I_2 = 1,41 \cdot 2 + \frac{16,6 \cdot 4,8}{2 \cdot 0,75 + 1132} = 2,9 \text{ A},$$

$$I_1 = \frac{1,2 \cdot 11,5 \cdot 2,9}{220} = 0,18 \text{ A}.$$

в) Вычисляем габаритную мощность трансформатора, которая для двухполупериодной схемы определяется выражением [1]

$$P_e = 1,7 \cdot U_2 \cdot I_2, \quad (2.9)$$

где P_e — габаритная мощность трансформатора;

U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора;

I_2 – ток во вторичной обмотке,

$$P_e = 1,7 \cdot 2,9 \cdot 11,5 = 57 \text{ BA}.$$

г) Находим произведение площади сечения сердечника трансформатора Q_c на площадь окна сердечника Q_0 , которое в зависимости от марки провода обмотки равно, см⁴: [1]

- $Q_c \cdot Q_0 = 1,6 \cdot P_e$ для провода марки ПЭЛ,

- $Q_c \cdot Q_0 = 2,0 \cdot P_e$ для провода марки ПЭШО,

- $Q_c \cdot Q_0 = 2,4 \cdot P_e$ для провода марки ПШД,

где Q_c — площадь сечения сердечника трансформатора;

Q_0 — площадь окна сердечника;

P_e — габаритная мощность трансформатора.

Для провода ПЭЛ

$$Q_c \cdot Q_0 = 1,6 \cdot P_e = 1,6 \cdot 57 = 91 \text{ см}^2,$$

где Q_c — площадь сечения сердечника трансформатора;

Q_0 — площадь окна сердечника;

P_e — габаритная мощность трансформатора.

Из таблицы А.1, в которой приведены основные данные типовых Ш-образных пластин, по значению $Q_c \cdot Q_0$ выбирают тип пластины и выписывают все ее параметры. [1]

Выбираем пластины УШ-30 $a=3$ см; $b=1,9$ см; $h=5,3$ см;
 $Q_0=b \cdot h=10,1$ см. При этом получаем [1]

$$Q_c = \frac{Q_c \cdot Q_0}{Q_0}, \quad (2.10)$$

где Q_c — площадь сечения сердечника трансформатора;
 Q_0 — площадь окна сердечника

$$Q_c = \frac{91}{10,1} = 9 \text{ см}^2.$$

Необходимая толщина пакета пластин [1]

$$c = \frac{Q_c}{a} = \frac{9}{3} = 3 \text{ см},$$

где c — необходимая толщина пакета пластин;
 Q_c — площадь сечения сердечника трансформатора;
 a — ширина среднего стержня.

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

д) Определяем число витков w и толщину провода d первичной и вторичной обмоток трансформатора при плотности

тока в обмотках $j = 3 \frac{A}{\text{мм}^2}$ [1]

$$d = 1,13 \cdot \left(\frac{I}{j}\right)^{1/2} = 0,651(I)^{1/2}, \quad (2.11)$$

где d — толщина провода;
 j — плотность тока в обмотках;
 I — ток в обмотках,

$$wI = \frac{48 \cdot U_1}{Q_c}, \quad (2.12)$$

где wI — число витков первичной обмотки;
 U_1 — напряжение сети;
 Q_c — площадь сечения сердечника трансформатора,

$$d_1 = 0,65(I_1)^{1/2}, \quad (2.13)$$

где d_1 — толщина провода первичной обмотки;

I_1 – ток в первичной обмотки,

$$w_2 = \frac{54 \cdot U_2}{Q_c}, \quad (2.14)$$

где w_2 – число витков вторичной обмотки;

U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора;

Q_c — площадь сечения сердечника трансформатора,

$$d_2 = 0,65(I_2)^{1/2}, \quad (2.15)$$

где d_2 – толщина провода вторичной обмотки;

I_1 – ток во вторичной обмотки,

$$w_1 = \frac{48 \cdot 220}{9} = 1173 \text{ вит},$$

$$w_2 = \frac{54 \cdot 11,5}{9} = 69 \text{ вит},$$

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

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

е) Расчет фильтра. Емкость конденсатор на входе фильтра [1]

$$C_0 = 30 \cdot I_0 \cdot U_0 = 30 \cdot 2 \cdot 4,8 = 288 \text{ мкФ},$$

где C_0 — емкость конденсатора на входе фильтра;

I_0 – среднее значение выпрямленного тока;

U_0 – напряжение на входе сглаживающего фильтра.

Выбираем электролитические конденсаторы по величине емкости и номинальному напряжению, при чем $U_c \geq 1,2 \cdot U_0 B$.

[1]

Коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения на выходе фильтра [1]

$$K_{nex} = \frac{300 \cdot I_0}{U_0 \cdot C_0}, \quad (2.16)$$

где K_{nex} – коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения на выходе фильтра;

C_0 – емкость конденсатора на входе фильтра;

I_0 – среднее значение выпрямленного тока;

U_0 – напряжение на входе сглаживающего фильтра,

$$K_{nex} = \frac{300 \cdot 2}{4,8 \cdot 288} = 0,43\%.$$

Необходимый коэффициент сглаживания фильтра [1]

$$q = \frac{K_{nex}}{K_{пвых}}, \quad (2.17)$$

где q – необходимый коэффициент сглаживания фильтра;

$K_{пex}$ – коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения на выходе фильтра;

$K_{пвых}$ – коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения на нагрузке,

$$q = \frac{0,43}{2} = 0,215.$$

В данной схеме выбран двухзвенный LC - фильтр. Коэффициент сглаживания одного звена [1]

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

где $q_{зв}$ — коэффициент сглаживания одного звена;

q – необходимый коэффициент сглаживания фильтра.

Определяем произведение $L\phi \cdot C\phi$ по формуле

$$L_{\phi} \cdot C_{\phi} = 2,5 \cdot (q_{зв} + 1), \quad (2.18)$$

где L_{ϕ} — индуктивность дросселя фильтра;

C_{ϕ} — емкость конденсатора фильтра;

$q_{зв}$ — коэффициент сглаживания одного звена,

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

Задаемся емкостью C_{ϕ} так, чтобы индуктивность дросселя фильтра не превышала 5 — 10 Гн и определяют индуктивность дросселя. Принимаем $L_{\phi} = 7$ Гн, тогда [1]

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

Находим сечение сердечника Q_c , число витков w и диаметр провода d обмотки дросселя [1]

$$Q_c = \frac{L_{\phi} \cdot I_0^2}{2}, \quad (2.19)$$

где Q_c – сечение сердечника дросселя;

L_ϕ — индуктивность дросселя фильтра;
 I_o — среднее значение выпрямленного тока,

$$w = \frac{4 \cdot 10^2}{I_o}, \quad (2.20)$$

где w — число витков обмотки дросселя;
 I_o — среднее значение выпрямленного тока,

$$d = 0,65 \cdot I_o^2, \quad (2.21)$$

где d — диаметр провода обмотки дросселя;
 I_o — среднее значение выпрямленного тока,

$$Q_c = \frac{7 \cdot 2^2}{2} = 14 \text{ см}^2,$$

$$w = \frac{4 \cdot 100}{2} = 200 \text{ вит},$$

$$d = 0,65 \cdot 2^2 = 2,6 \text{ мм}.$$

Сечение обмотки определяется по формуле (2.22)

$$Q_w \frac{w \cdot d^2}{100}, \quad (2.22)$$

где Q_w — сечение обмотки дросселя;
 w — число витков обмотки дросселя;
 d — диаметр провода обмотки дросселя,

$$Q_w \frac{200 \cdot 2,6^2}{100} = 13,52 \text{ см}^2,$$

$$Q_c \cdot Q_w = 14 \cdot 13,52 \approx 189 \text{ см}^4.$$

По произведению $Q_c \cdot Q_w$ из таблицы А.1 [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.

[1]

Выбираем пластины Ш-25 с $a=2,5$ см; $b=3,15$ см; $h=5,8$ см;
 $Q_o=b \cdot h=18,3$ см.

ж) Проверяем значение выпрямленного напряжения на нагрузке, для чего определяют среднюю длину витка обмотки l_w и сопротивление провода обмотки R_w [1]

$$l_w = \pi \cdot (a + b) = 3,14 \cdot (2,5 + 3,15) = 17,73 \text{ см},$$

где l_w — средняя длина витка обмотки;

a — ширина среднего стержня;

b — ширина окна,

$$R_w = \frac{2 \cdot w \cdot l_w}{10^4 \cdot d^2}, \quad (2.23)$$

где R_w — сопротивление провода обмотки;

w — число витков обмотки дросселя;

d — диаметр провода обмотки дросселя,

$$R_w = \frac{2 \cdot 200 \cdot 17,73}{10^4 \cdot 2,6^2} = 0,11 \text{ Ом}.$$

При этом падение напряжение на двухзвенном фильтре

$$U_\phi = R_w \cdot I_0 = 0,11 \cdot 2 = 0,22 \text{ В},$$

где U_ϕ — падение напряжения на двухзвенном фильтре;

R_w — сопротивление провода обмотки;

I_0 — среднее значение выпрямленного тока.

Напряжение на нагрузке,

$$U_{но} = U_0 - U_\phi = 4,8 - 0,22 = 4,58 \text{ В},$$

где $U_{но}$ — напряжение на нагрузке;

U_0 — напряжение на входе сглаживающего фильтра;

U_ϕ — падение напряжения на двухзвенном фильтре.

Если напряжение на нагрузке получается меньше заданного, то необходимо провести корректировочный расчет. Простейшим является увеличение диаметра провода обмотки дросселя. Увеличение диаметра провода приведет к уменьшению сопротивления обмотки R_w и уменьшению падения напряжения на фильтре U_ϕ . При этом необходимо проверить, может ли новый провод разместиться в окне выбранного сердечника дросселя фильтра. [1]

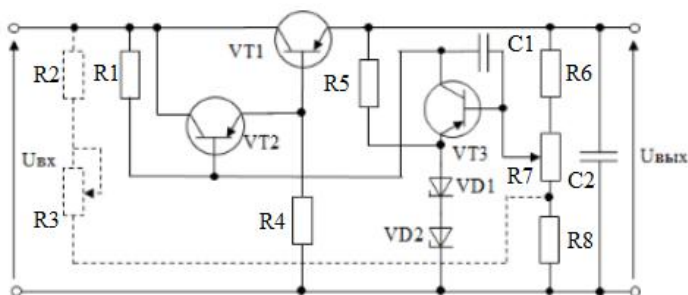
3 РАСЧЕТ КОМПЕНСАЦИОННОГО СТАБИЛИЗАТОРА ПОСТОЯННОГО НАПЯЖЕНИЯ

Схема на рисунке 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. [1]

Собственно регулирующим элементом является транзистор $VT1$, а транзистор $VT2$ является согласующим элементом между большим выходным сопротивлением усилителя постоянного тока и малым входным сопротивлением регулирующего транзистора $VT1$. [1]

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 $R7$. [1]



$VT1, VT2, VT3$ – транзисторы; $R1, R2, R3, R4, R5, R6, R8$ – резисторы; $R7$ – реостат; $VD1, VD2$ – стабилитроны; $C1, C2$ – конденсатор; $U_{вх}, U_{вых}$ – входное и выходное напряжения

Рисунок 3.1 – Принципиальная электрическая схема компенсационного стабилизатора напряжения

Собственно регулирующим элементом является транзистор $VT1$, а транзистор $VT2$ является согласующим элементом между большим выходным сопротивлением усилителя постоянного тока и малым входным сопротивлением регулирующего транзистора $VT1$. [1]

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 $R7$. [1]

Исходными данными для расчета стабилизатора являются:

[1]

- $U_{\text{ВЫХ}}$ – выходное напряжение, В;
- $\Delta U_{\text{ВЫХ}}$ – пределы регулирования выходного напряжения, В;
- $I_{\text{Н}}$ – ток нагрузки, А;
- $\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}}$ – допустимое относительное изменение входного напряжения,
- r – коэффициент стабилизации.

Порядок расчета

Дано: $U_{\text{вых}} = 8 \text{ В}$; $\Delta U_{\text{ВЫХ}} = 5 \text{ В}$; $I_{\text{Н}} = 3 \text{ А}$; $\frac{\Delta U_{\text{ВЫХ}}}{U_{\text{ВХ}}} = 0,4$.

3.1 Выбор типа регулирующего транзистора и его режима

Минимальное входное напряжение рассчитывается по формуле [1]

$$U_{\text{ex min}} = U_{\text{вых}} + \Delta U_{\text{вых}} + U_{\text{кэ min}}, \quad (3.1)$$

где $U_{\text{ex min}}$ – минимальное входное напряжение;

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

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

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

$$U_{\text{ex min}} = 8 + 5 + 2 = 15 \text{ В}.$$

С учетом допустимых изменений входного напряжения определяют его номинальное U_{ex} и максимальное $U_{\text{ex max}}$ значения по формулам [1]

$$U_{\text{вх}} = \frac{U_{\text{вх min}}}{\left(1 - \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}}\right)}, \quad (3.2)$$

где $U_{\text{вх}}$ — номинальное значение входного напряжения;

$U_{\text{вх min}}$ — минимальное входное напряжение;

$\frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}}$ — допустимое относительное изменение входного

напряжения,

$$U_{\text{вх max}} = U_{\text{вх}} \cdot \left(1 + \frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}}\right), \quad (3.3)$$

где $U_{\text{вх max}}$ — максимальное значение входного напряжения;

$U_{\text{вх}}$ — номинальное значение входного напряжения;

$\frac{\Delta U_{\text{вх}}}{U_{\text{вх}}}$ — допустимое относительное изменение входного

напряжения,

$$U_{\text{вх max}} = 25 \cdot (1 + 0,4) = 35B,$$

$$U_{\text{вх}} = \frac{15}{(1 - 0,4)} = 25B.$$

Находят максимальное напряжение $U_{\text{кэ макс}}$ и максимальную мощность, рассеиваемую на регулирующем транзисторе по формулам [1]

$$U_{\text{кэ max}} = U_{\text{вх max}} - U_{\text{вх}}, \quad (3.4)$$

где $U_{\text{кэ макс}}$ — максимальное напряжение между эмиттером и коллектором транзистора VTI ;

$U_{\text{вх max}}$ — максимальное значение входного напряжения;

$U_{\text{вых}}$ — выходное напряжение,

$$U_{\text{кэ max}} = 35 - 8 = 27B,$$

$$P_{\text{к max}} = U_{\text{кэ max}} \cdot I_{\text{н}}, \quad (3.5)$$

где $P_{\text{к max}}$ — максимальная мощность, рассеиваемая на регулирующем транзисторе;

$U_{\text{кэ макс}}$ — максимальное напряжение между эмиттером и коллектором транзистора VTI ;

I_n - ток нагрузки;

$$P_{к\max} = 27 \cdot 3 = 81 \text{ Вт}.$$

По этим двум величинам из справочника выбираем подходящий транзистор, для которого выписывают $P_{к\max}$, $I_{к\max}$, h_{21} , $U_{кэ\max}$. [1]

Выбираем транзистор p-n-p КТ818ВМ с параметрами $P_{к\max} = 100$ Вт; $I_{к\max} = 20$ А; $U_{кэ\max} = 60$ В; $h_{21} = 20$. [1]

3.2 Выбор типа согласующего транзистора и его режима

Коллекторный ток транзистора VT_2 рассчитывается по формуле [1]

$$I_{к2} \approx I_{э2} = I_{б1} + I_{р4} = \frac{I_n}{h_{21}} + I_{р4}, \quad (3.6)$$

где $I_{к2}$ – коллекторный ток транзистора VT_2 ;

$I_{э2}$ – эмиттерный ток транзистора VT_2 ;

$I_{б1}$ — ток базы;

I_n - ток нагрузки;

$I_{р4}$ - дополнительный ток, протекающий через резистор R_4 .

Для маломощных транзисторов, используемых в качестве согласующего элемента, дополнительный ток выбирают в пределах 1...2 мА. [1]

$$I_{к2} \approx \frac{3}{20} + 0,002 = 0,152 \text{ А}.$$

Определяем максимальные значения напряжения $U_{кэ2\max}$ и мощности $P_{к2}$ согласующего транзистора [1]

$$U_{кэ2\max} \approx U_{кэ1\max} = 27 \text{ В},$$

где $U_{кэ2\max}$ – максимальное значение напряжения согласующего транзистора;

$U_{кэ1\max}$ — максимальное напряжение между эмиттером и коллектором транзистора VT_1 ,

$$P_{к2} = I_{к2} \cdot U_{кэ2\max} = 0,152 \cdot 27 = 4,1 \text{ Вт},$$

где $P_{к2}$ – мощность согласующего транзистора;

$I_{к2}$ – коллекторный ток транзистора VT_2 ;

$U_{кэ2max}$ – максимальное значение напряжения согласующего транзистора.

Согласующий транзистор выбирают по двум параметрам $U_{кэ2max}$ и $P_{к2}$, при этом должно соблюдаться неравенство $I_{кmax} > I_{к2}$. [1]

Выбираем в качестве VT2 из таблицы Б.1 [1] транзистор p-n-p КТ814Г параметрами $P_{кmax}=10$ Вт; $I_{кmax}=1,5$ А; $U_{кэmax}=80$ В; $h2I=30$. [1]

Сопротивление на резисторе

$$R4 = \frac{U_{вх}}{I_{r4}} = \frac{8}{2} = 4 \text{ кОм},$$

где $R4$ – сопротивление резистора;

$U_{вх}$ - выходное напряжение;

I_{r4} - дополнительный ток, протекающий через резистор R4.

3.3 Выбор усилительного транзистора и его режима

В качестве усилительного транзистора обычно выбирают маломощный транзистор, который должен быть низко или среднечастотным с подходящим напряжением и соответствующей структурой. [1]

Выбираем из таблицы Б.1 [1] транзистор p-n-p КТ104Б с параметрами:

$P_{кmax}=0,15$ Вт; $I_{кmax}=50$ мА; $U_{кэmax}=15$ В; $h2I=60$.

Задаваясь напряжением

$$U_{кэ3} = (0,1 \div 0,5) \cdot U_{вх} = 0,3 \cdot 8 = 2,4 \text{ В},$$

где $U_{кэ3}$ — напряжение коллектор — эмиттер усилительного транзистора;

$U_{вх}$ - выходное напряжение.

Определяем опорное напряжение по формуле (3.7)

$$U_{он} = U_{вх} - U_{кэ3}, \quad (3.7)$$

где $U_{он}$ — опорное напряжение;

$U_{вх}$ - выходное напряжение;

$U_{кэ3}$ — напряжение коллектор — эмиттер усилительного транзистора,

$$U_{он} = 8 - 2,4 = 5,6 \text{ В}.$$

Исходя из полученного опорного напряжения, из справочника подбираем один или несколько стабилитронов, как правило, малой мощности, обеспечивающих заданное опорное напряжение. Для выбранного стабилитрона выписываем напряжение стабилизации и максимальный и минимальный токи стабилизации. [1]

Выбираем из таблицы Б.4 [1] стабилитрон КС156А с параметрами

$$I_{cm\max}=55 \text{ мА, и } U_{cm}=5,6 \text{ В.}$$

Задаемся рабочим током стабилитрона I_{cm} в пределах возможного изменения этого тока и определяем ограничивающее «балластное» сопротивление $R5$. Примем $I_{cm}=10$ мА, коллекторный ток усилительного транзистора $I_{кз}$ выбираем в пределах 1...1,5 мА [1]

$$R5 = \frac{U_{вых} - U_{он}}{I_{cm} - I_{кз}} = \frac{8 - 5,6}{10 - 1,2} = 0,27 \text{ кОм,}$$

где $R5$ – «балластное» сопротивление;

$U_{он}$ — опорное напряжение;

$U_{вых}$ - выходное напряжение;

I_{cm} — рабочий ток стабилитрона;

$I_{кз}$ — коллекторный ток усилительного транзистора.

Затем находим сопротивление резистора $R1$

$$I_{\beta 2} = \frac{2,15}{30} = 0,071 \text{ А,}$$

где $I_{\beta 2}$ — ток базы согласующего транзистора;

$I_{к2}$ – коллекторный ток транзистора $VT2$;

$h21$ – коэффициент усиления,

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

где $U_{кэ1}$ — номинальное напряжение коллектор — эмиттер;

$U_{кэ1\max}$ — максимальное напряжение между эмиттером и коллектором транзистора $VT1$;

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

$$R1 = \frac{U_{кэ1}}{I_{кэ} + I_{\beta 2}} = \frac{22}{1,2 + 0,071} = 17,3 \text{ Ом,}$$

где $R1$ — сопротивление резистора;

$U_{кэ1}$ — номинальное напряжение коллектор — эмиттер;
 $I_{б2}$ — ток базы согласующего транзистора;
 $I_{кз}$ — коллекторный ток усилительного транзистора.

3.4 Расчет делителей напряжения

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

$$\text{при } I_{бз} = \frac{I_{кз}}{h_{21}} = \frac{1,2}{60} = 0,02 \text{ мА},$$

где $I_{бз}$ — ток базы усилительного транзистора;
 $I_{кз}$ — коллекторный ток усилительного транзистора;
 h_{21} — коэффициент усиления

$$I_{дел} = (20 \div 70) \cdot I_{бз} = 60 \cdot 0,02 = 1,2 \text{ мА},$$

где $I_{дел}$ — ток делителя;

$I_{бз}$ — ток базы усилительного транзистора;

Задаемся величиной $R8$ в пределах $(0,5 \dots 3)$ кОм, $R8=3$ кОм

[1]

$$R7 = \frac{(U_{он} - I_{дел} \cdot R8)}{0,5 \cdot I_{дел}} = \frac{(5,6 - 1,2 \cdot 3)}{0,5 \cdot 1,2} = 3,3 \text{ кОм},$$

где $R7$ — сопротивление резистора делителя напряжения;

$U_{он}$ — опорное напряжение;

$I_{дел}$ — ток делителя;

$R8$ — сопротивление резистора,

$$R6 = \frac{(U_{вых} - U_{он} - 0,5 \cdot I_{дел} \cdot R7)}{I_{дел}} = \frac{(8 - 5,6 - 0,5 \cdot 1,2 \cdot 3,3)}{1,2} = 0,35 \text{ кОм},$$

где $R6$ — сопротивление резистора делителя напряжения;

$U_{вых}$ - выходное напряжение;

$U_{он}$ — опорное напряжение;

$I_{дел}$ — ток делителя;

$R7$ — сопротивление резистора делителя напряжения.

3.5 Выбор конденсаторов

Емкость конденсатора $C1$, включаемого для предотвращения возбуждения стабилизатора, подбирают экспериментально.

Обычно берут $C1$ в пределах $0,5 \div 1$ мкФ. Емкость конденсатора $C2$, включение которого приводит к незначительному уменьшению пульсации выходного напряжения и заметному уменьшению выходного сопротивления стабилизатора по переменному току, выбираем в пределах $1000 \div 2000$ мкФ. [1]

4 РАСЧЕТ УПРАВЛЯЕМОГО ТИРИСТОРНОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Исходные данные:

а) Принципиальная электрическая схема управляемого тиристорного выпрямителя показана на рисунке 4.1. Пунктирным прямоугольником выделен силовой выпрямитель. Конкретная схема силового выпрямителя задается преподавателем (рисунки 4.4 – 4.7); [1]

б) I_{cp} – среднее значение выпрямленного тока при полностью открытых тиристорах $VS1$ и $VS2$; [1]

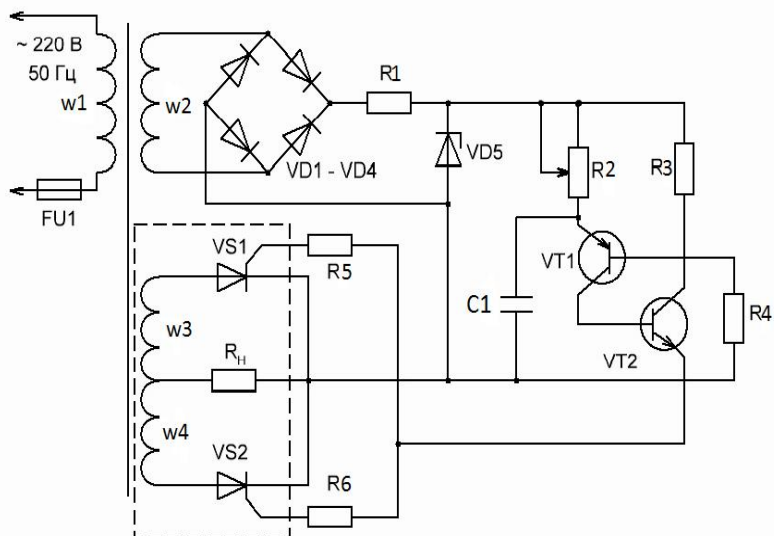
в) U_{cp} – среднее значение выпрямленного напряжения при полностью открытых тиристорах $VS1$ и $VS2$; [1]

г) α – угол открытия тиристорov. [1]

Принцип работы схемы

Переменное напряжение с обмотки трансформатора $w2$ (рисунок 4.2, а), выпрямленное мостом $VD1$ - $VD4$ (рисунок 4.2, б), через резистор $R1$ поступает на стабилитрон $VD5$, который отсекает верхушки импульсов синусоид на уровне напряжения стабилизации: $устvd5$. В результате на стабилитроне формируется напряжение, форма которого изображена на рисунке 4.2, в. [1]

От этого напряжения через $R2$ за время $t1$ (рисунок 4.3) заряжается конденсатор $C1$ до напряжения включения аналога диода $u_{г4}$, собранного на транзисторах $VT1$ и $VT2$. Величина напряжения включения определяется падением напряжения на резисторе $R4$. [1]

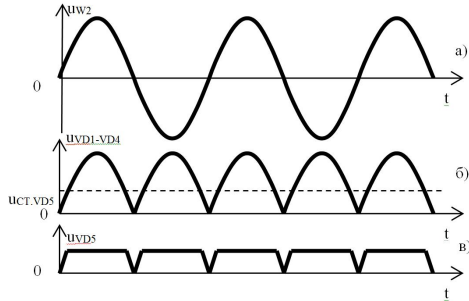


$VD1-VD4$ – выпрямительный мост; $w1, w2, w3, w4$ – витки трансформатора; $VD5$ – стабилитрон; $VS1, VS2$ – тиристоры; $R1, R3, R4, R5, R6, R7, R8$ – резисторы; $R2$ – реостат; $C1$ – конденсатор; R_n – сопротивление нагрузки; $FU1$ – предохранитель плавкий

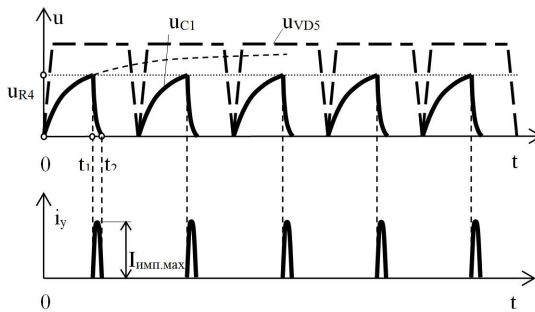
Рисунок 4.1 – Принципиальная электрическая схема выпрямителя

Принцип работы схемы

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 $C1(i_y)$ подводится к управляющим электродам тиристоров $VS1$ и $VS2$ и тем меньше будет напряжение на нагрузке силового выпрямителя резисторе R_n . [1]



а) напряжение на обмотке w_2 ;
 б) напряжение на выходе выпрямителя $VD1-VD4$;
 в) напряжение на стабилитроне $VD5$
 Рисунок 4.2 – Форма напряжения



u_{vd5} - напряжение на стабилитроне;
 u_{c1} - напряжение на конденсаторе $C1$;
 u_{r4} - напряжение на резисторе $R4$;
 i_y - управляющие токи тиристоров $VS1$ и $VS2$

Рисунок 4.3 – Формы напряжений и токов

а) Найти мощность, потребляемую нагрузкой (R_n) [1]

$$P_n = U \cdot I, \tag{4.1}$$

где P_n — мощность, потребляемая нагрузкой;

I – ток, протекающий через нагрузку;

U – напряжение на нагрузке .

Это исходный параметр для расчета трансформатора.

б) Определить амплитудное значение напряжения на w_3

$$U_{3\max} = U_3 \cdot \sqrt{2}, \quad (4.2)$$

где $U_{3\max}$ – амплитудное значение напряжения на $w3$;

U_3 – напряжение на нагрузке

в) С учетом $U_{3\max}$ и среднего значения тока через каждый тиристор выбрать по справочнику тиристоры $VS1$ и $VS2$. Из таблицы Б.2[1] определяем также ток управления I_{ynp} и время включения тиристоров $t_{вык}$. [1]

г) Определение величины $R5$ и $R6$. [1]

Чтобы выровнять токи управляющих электродов тиристоров, падение напряжения на этих резисторах принимаем равным [1]

$$U_{r5} = U_{r6} = 5 \cdot \Delta U_{ynp}, \quad (4.3)$$

где U_{r5} – падение напряжения на резисторе $R5$;

U_{r6} – падение напряжения на резисторе $R6$;

$\Delta U_{ynp} \approx 0,7$ В – падение напряжения в управляющей цепи тиристора. [1]

Тогда получаем

$$R5 = R6 = \frac{5 \cdot \Delta U_{ynp}}{I_{ynp}}, \quad (4.4)$$

где $R5, R6$ – сопротивление резисторов;

ΔU_{ynp} – падение напряжения в управляющей цепи тиристора;

I_{ynp} – ток управления.

д) Рассчитываем напряжение на $C1$ [1]

$$U_{c1} = U_{r5} + \Delta U_{ynp} + \Delta U_{vt1} + \Delta U_{vt2}, \quad (4.5)$$

где U_{c1} – напряжение на $C1$;

U_{r5} – падение напряжения на резисторе $R5$;

ΔU_{ynp} – падение напряжения в управляющей цепи тиристора;

$\Delta U_{vt1} + \Delta U_{vt2}$ – падение напряжения на транзисторах $VT1$ и $VT2$

в режиме насыщения. Для кремниевых транзисторов

$$\Delta U_{vt1} + \Delta U_{vt2} = U_{бэ} + U_{кэнас} = 0,7 + U_{кэнас}, \quad (4.6)$$

где $\Delta U_{vt1} + \Delta U_{vt2}$ – падение напряжения на транзисторах $VT1$ и $VT2$ в режиме насыщения;

$U_{кэнас}$ – напряжение коллектор-эмиттер в режиме насыщения для транзисторов типа КТ315 и КТ361 принимаем равным 0,4 В.

е) Далее находим емкость конденсатора $C1$ из условия, что за время $t_{вкл}$ конденсатор разрядится на величину U_{r5} [1]

$$C1 = \frac{I_{упр} \cdot t_{вкл}}{U_{r5}}, \quad (4.7)$$

где $C1$ – емкость конденсатора;

$I_{упр}$ — ток управления;

$t_{вкл}$ — время включения тиристором;

U_{r5} – падение напряжения на резисторе $R5$.

ж) Величину $R2$ находим из постоянной времени заряда $C1$ [1]

$$R2 = \frac{\tau}{C1}, \quad (4.8)$$

где $R2$ — сопротивление резистора;

$C1$ – емкость конденсатора;

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

з) Определяем напряжение на $R4$ и его величину. Разряд $C1$ через аналог динистора на $VT1$ и $VT2$ начинается при [1]

$$U_{r4} = U_{c1} + U_{бэvt1}, \quad (4.9)$$

где U_{r4} – напряжение на резисторе $R4$;

U_{c1} – напряжение на $C1$;

$U_{бэvt1} \approx 0,4$ В – падение напряжения на переходе база-эмиттер транзистора $VT1$. [1]

и) Ток резистора $R4$ должен быть в несколько десятков раз больше обратного тока коллектора $VT2$. Последний обычно не превышает нескольких микроампер. Поэтому ток через $R4$ можно принять равным $I_{r4}=1$ мА, тогда [1]

$$R4 = \frac{U_{r4}}{I_{r4}} = 1000 \cdot U_{r4}, \quad (4.10)$$

где $R4$ – сопротивление резистора;

U_{r4} – напряжение на резисторе $R4$;

I_{r4} – ток через $R4$.

к) Находим величину $R3$

$$R3 = \frac{U_{cm} - U_{r4}}{I_{r4}} = \frac{U_{cm} - U_{r4}}{10^{-3}}, \quad (4.11)$$

где $R3$ — сопротивление резистора;

U_{cm} – напряжение стабилизации стабилитрона $VD5$, которое целесообразно выбрать в пределах $(1,5 \dots 1,8)U_{r4}$;

U_{r4} – напряжение на резисторе $R4$;

I_{r4} – ток через $R4$.

л) Определяем величину $R1$

$$R1 = \frac{U_{2\max}}{I_{номр}}, \quad (4.12)$$

где $R1$ — сопротивление резистора;

$I_{номр}$ — ток, который определяется по формуле (4.14);

$U_{2\max}$ – амплитуда переменного напряжения обмотки $w2$, которое должно быть в 2,5...3 раза больше напряжения U_{cm} .

$I_{cm\min}=3$ мА и $I_{cm\max}$ – минимальный и максимальный токи стабилизации стабилитрона $VD5$ из таблицы Б.4 [1]. Ток в резисторе $R2$ определяем по формуле (4.13)

$$I_{r2} = \frac{U_{cm}}{R_2}, \quad (4.13)$$

где I_{r2} – ток в резисторе $R2$;

U_{cm} – напряжение стабилизации стабилитрона $VD5$;

$R2$ — сопротивление резистора,

$$I_{номр} = I_{r2} + I_{r4} + \frac{I_{cm\min} + I_{cm\max}}{2}, \quad (4.14)$$

где $I_{номр}$ — ток потребителя;

I_{r2} – ток в резисторе $R2$;

I_{r4} – ток через $R4$;

$I_{cm\min}$ – минимальный ток стабилизации стабилитрона;

$I_{cm\max}$ — максимальный ток стабилизации стабилитрона.

м) Диоды выпрямительного моста $VD1$ - $VD4$ выбираются из условия[1]

$$I_{cp} > \frac{I_{номр}}{2}; \quad U_{обр\max} > U_{2\max}. \quad (4.15)$$

у) Зная $I_{номр}$ и $U_{2\max}$, определяем действующие значения тока и напряжения на обмотке $w2$, считая $I_{номр}$ средним значением переменного тока этой обмотки. [1]

Действующее значение тока

$$I_{w2} = 1,11 \cdot I_{номр} \quad (4.16)$$

где I_{w2} – действующее значение тока в обмотке $w2$;

$I_{номр}$ — среднее значение переменного тока это обмотки.

Действующее значение напряжения [1]

$$U_{w2} = \frac{U_{2max}}{\sqrt{2}}, \quad (4.17)$$

где U_{w2} – действующее значение напряжения на обмотке;

U_{2max} – амплитуда переменного напряжения обмотки $w2$.

По данным пункта 2 и 12 рассчитать трансформатор.

Построить в масштабе кривую напряжения на нагрузке (угол открытия тиристоров α). [1]

Построить в масштабе кривую напряжения заряда конденсатора $C1$ при величине сопротивления $R2$ равном $\frac{R2}{2}$ (расчет переходного процесса: заряд конденсатора через резистор от источника постоянного напряжения, учесть при этом напряжение на $R4$). [1]

Расчет управляемых тиристорных выпрямителей производится по методике расчета выпрямителей на диодах. [1]

4.1 Схемы силовой цепи управляемых выпрямителей

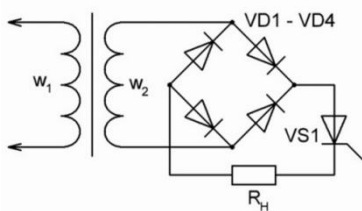


Рисунок 4.4 – Схема 1

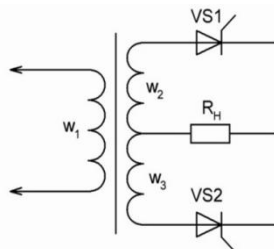


Рисунок 4.5 – Схема 2

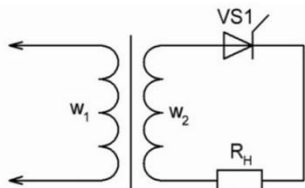


Рисунок 4.6 – Схема 3

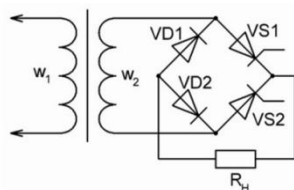


Рисунок 4.7 – Схема 4

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 (электровакуумные диоды, кенотроны), ионными (газонаполненные лампы: тиратроны, газотроны), полупроводниковыми (полупроводниковые диоды и диодные сборки). Последние практически полностью вытеснили другие вентили. [1]

В большинстве случаев для питания электронных схем применяют следующие выпрямители: [1]

- однополупериодные;
- 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. [1]

5.1 Однополупериодный выпрямитель

Его схема показана на рисунке 5.1, *а*. Первичная обмотка трансформатора питания соединена с сетью, и напряжение U_1 обычно составляет 220 В. Мгновенное напряжение на вторичной обмотке выразим формулой, приняв начальный фазовый угол нулевым [1]

$$u_2 = U_m \sin(\omega t), \quad (5.1)$$

где u_2 - мгновенное напряжение на вторичной обмотке;
 U_m - пульсирующее напряжение.

Ток через вентиль и нагрузку с сопротивлением R_n протекает только в положительный полупериод напряжения на вторичной обмотке. Напряжение, действующее на нагрузке, графически представлено на рисунке 5.1, *б*. Отрицательный полупериод

напряжения u_2 не пропускается, диод закрыт. Длительность полупериодов при частоте 50 Гц составляет 10 мс. [1]

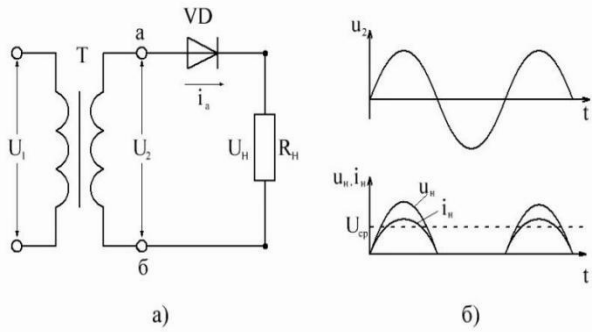


Рисунок 5.1 – Однофазный однополупериодный выпрямитель

Среднее значение пульсирующего напряжения в π раз меньше амплитуды подводимого к выпрямителю напряжения U_m [1]

$$U_{cp} = U_0 = \frac{U_m}{\pi}, \quad (5.2)$$

где U_{cp} - среднее значение пульсирующего напряжения;

U_0 - напряжение на выходе выпрямителя;

U_m - пульсирующее напряжение.

Отметим, что U_0 вдвое меньше среднего значения за полупериод, поскольку ток через нагрузку течет только в течение положительного полупериода. [1]

Найдем соотношение между действующим напряжением вторичной обмотки трансформатора U_2 и средним выпрямленным напряжением [1]

$$U_2 = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi U_{cp}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi U_0}{\sqrt{2}}, \quad (5.3)$$

где U_{cp} - среднее значение пульсирующего напряжения;

U_0 - напряжение на выходе выпрямителя;

U_{2m} – амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке;

U_2 — напряжение вторичной обмотки трансформатора.

Максимальное обратное напряжение на вентиле во время отрицательного полупериода (когда клапан закрыт) равно амплитудному значению напряжения вторичной обмотки [1]

$$U_{обр\max} = U_{2m} = \pi U_0, \quad (5.4)$$

где U_{2m} — амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке;

U_0 — напряжение на выходе выпрямителя;

$U_{обр\max}$ — максимальное обратное напряжение на вентиле.

Заметим, что если параллельно нагрузке подключить емкостной фильтр, то напряжение на нем будет оставаться во время отрицательного полупериода и 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 $2U_{2m}$. [1]

Действующее значение тока выпрямителя определяется как среднеквадратичное за период (ток течет только в течение одного полупериода и интегрирование ведется от 0 до $\frac{T}{2}$) [1]

$$I_2^2 = \frac{1}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i^2 dt = \frac{I_{2m}^2}{4}, \quad (5.5)$$

где I_2 — действующее значение тока вентиля;

I_{2m} — действующее значение тока выпрямителя,

$$I_2 = \frac{I_{2m}}{2}, \quad (5.6)$$

где I_2 — действующее значение тока вентиля;

I_{2m} — действующее значение тока выпрямителя.

Таким образом, амплитудное значение тока вдвое больше действующего. [1]

Среднее значение тока определяется так же, как было ранее определено среднее значение напряжения. Соотношение между средним и амплитудным значениями тока [1]

$$I_{cp} = \frac{I_{2m}}{\pi}, \quad (5.7)$$

где I_{cp} – среднее значение тока;

I_{2m} – действующее значение тока выпрямителя.

Рассчитать мощность вторичной обмотки трансформатора можно как произведение действующих значений напряжения и тока. [1]

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} U_{cp} \cdot I_{cp} = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} \cdot P_0 = 3,48 \cdot P_0, \quad (5.8)$$

где P_2 — мощность вторичной обмотки трансформатора;

U_2 — напряжение вторичной обмотки трансформатора;

I_2 – действующее значение тока вентиля;

U_{cp} - среднее значение пульсирующего напряжения;

I_{cp} – среднее значение тока;

P_0 — мощность на выходе усилителя.

Оказывается, 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. [1]

Габаритная мощность трансформатора (без учета КПД) равна полусумме мощностей первичной и вторичной обмоток. При $P_1 = P_2$ [1]

$$P_e = 3,48P_0, \quad (5.9)$$

где P_e - габаритная мощность;

P_0 — мощность на выходе усилителя.

5.2 Двухполупериодный выпрямитель

Выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (рисунок 5.2).

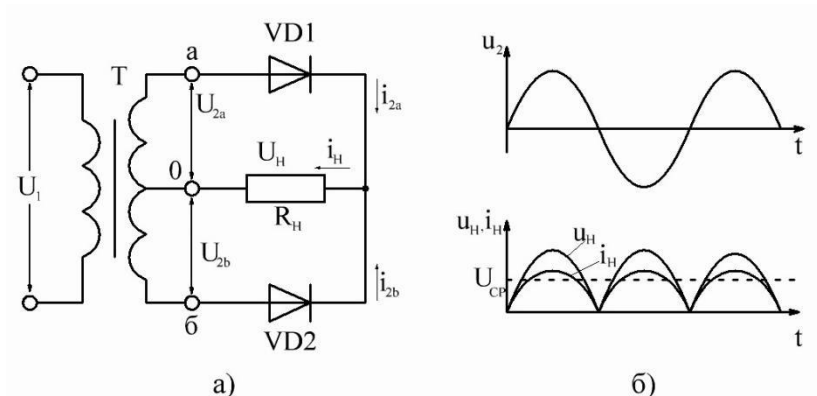


Рисунок 5.2 – Однофазный выпрямитель с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора

В двухполупериодном выпрямителе в течение одной половины периода переменного напряжения ток протекает через вентиль *VD1*, а в течение другой половины периода – через вентиль *VD2* (рисунок 5.2, *а*). Трансформатор выполнен с двумя вторичными обмотками, имеющими общий (нулевой) вывод. Каждый вентиль питается от своего участка вторичной обмотки трансформатора. Поскольку напряжения на крайних выводах вторичной обмотки одинаковы и противофазны, этот выпрямитель иногда называют двухфазным. Напряжение на нагрузке этого выпрямителя – однополярное, кусочносинусоидальное пульсирующее (рисунок 5,2, *б*). Таким же является и ток в нагрузке. [1]

Среднее напряжение на нагрузке определяется формулой

$$U_{cp} = U_0 = \frac{2U_{2m}}{\pi}, \quad (5.10)$$

где U_{cp} - среднее значение пульсирующего напряжения;

U_0 - напряжение на выходе выпрямителя;

U_{2m} – амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке.

Действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора (на ее одной половине) [1]

$$U_{cp} = \frac{U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi U_{cp}}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi U_0}{2\sqrt{2}}, \quad (5.11)$$

где U_{cp} - среднее значение пульсирующего напряжения;
 U_{2m} - амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке.

U_0 - напряжение на выходе выпрямителя.

Максимальное обратное напряжение каждого вентиля составит

$$U_{обр\max} = 2U_{2m} = \pi U_{cp} = \pi U_0, \quad (5.12)$$

$U_{обр\max}$ — максимальное обратное напряжение на вентиле;

U_{2m} - амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке;

U_{cp} - среднее значение пульсирующего напряжения;

U_0 - напряжение на выходе выпрямителя.

Аналогично определяется среднее значение тока в нагрузке за период

$$I_{cp} = \frac{2}{T} \int_0^{\frac{T}{2}} i \, dt = \frac{2I_{2m}}{\pi}, \quad (5.13)$$

где I_{cp} - среднее значение тока;

I_{2m} - действующее значение тока выпрямителя.

Действующее значение тока, протекающего через каждый вентиль, определяем как среднеквадратичное значение тока за период [1]

$$I_2 = I_6 = \frac{I_{2m}}{2}, \quad (5.14)$$

где I_2 - действующее значение тока вентиля;

I_6 - ток, протекающий через вентиль;

I_{2m} - действующее значение тока выпрямителя.

Подставляя значение I_2 для двухполупериодного выпрямителя, получаем [1]

$$I_2 = I_6 = \frac{I_{2m}}{2} = \frac{\pi I_{cp}}{4} = \frac{\pi I_0}{4}, \quad (5.15)$$

где I_2 - действующее значение тока вентиля;

I_6 - ток, протекающий через вентиль;

I_{2m} – действующее значение тока выпрямителя;

I_{cp} – среднее значение тока;

I_0 – ток в выходной цепи выпрямителя.

При расчете диаметра провода вторичной обмотки следует использовать полученное значение тока I_2 . В нагрузке ток вдвое больше, поскольку токи двух вентилях суммируются. [1]

Расчетную мощность вторичной обмотки трансформатора можно представить в виде удвоенного произведения напряжения $2U_2$ и тока I_2 на вторичной обмотке [1]

$$P_2 = 2 \cdot U_2 \cdot I_2 = \frac{\pi}{\sqrt{2}} \cdot U_0 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot I_0 = \frac{\pi^2}{4\sqrt{2}} \cdot P_0 = 1,74 \cdot P_0, \quad (5.16)$$

где P_2 — мощность вторичной обмотки трансформатора;

U_2 — напряжение вторичной обмотки трансформатора;

I_2 – действующее значение тока вентиля;

U_0 - напряжение на выходе выпрямителя;

P_0 — мощность на выходе усилителя;

I_0 – ток в выходной цепи выпрямителя.

Также можно перемножить напряжение фазы U_2 на суммарный ток $2I_2$ или взять произведение фазных тока и напряжения и результат удвоить. Во всех случаях мы получим один и тот же результат. [1]

Далее определяют расчетную мощность первичной обмотки трансформатора, принимая КПД = 1 [1]

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 = U_2 \cdot I_2, \quad (5.17)$$

где P_1 - мощность первичной обмотки трансформатора;

U_1 — напряжение первичной обмотки трансформатора;

I_1 – действующее значение тока выпрямителя;

U_2 — напряжение вторичной обмотки трансформатора;

I_2 – действующее значение тока выпрямителя,

$$I_2 = \frac{I_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi I_{cp}}{2\sqrt{2}}, \quad (5.18)$$

где I_2 – действующее значение тока выпрямителя;

I_{2m} – действующее значение тока выпрямителя;

I_{cp} – среднее значение тока,

$$U_2 = \frac{\pi U_{cp}}{2\sqrt{2}}, \quad (5.19)$$

где U_2 — напряжение вторичной обмотки трансформатора;
 U_{cp} — среднее значение пульсирующего напряжения,

$$P_2 = \frac{\pi U_{cp}}{2\sqrt{2}} \cdot \frac{\pi I_{cp}}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi^2}{8} \cdot P_{cp} = \frac{\pi^2}{8} \cdot P_0 = 1,23 \cdot P_0, \quad (5.20)$$

где P_2 — мощность вторичной обмотки трансформатора;
 U_{cp} — среднее значение пульсирующего напряжения;
 I_{cp} — среднее значение тока;
 P_0 — мощность на выходе усилителя;
 P_{cp} — средняя мощность трансформатора.

Затем находят отношение мощности вторичной обмотки к мощности первичной

$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{1,74}{1,23} = 1,41.$$

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

Габаритная мощность трансформатора (без учета КПД) равна полусумме мощностей первичной и вторичной обмоток [1]

$$P_2 = \frac{P_1 + P_2}{2} = \frac{P_0(1,23 + 1,74)}{2} = 1,49 \cdot P_0, \quad (5.21)$$

где P_2 - габаритная мощность;

P_1 - мощность первичной обмотки трансформатора;

P_2 - мощность вторичной обмотки трансформатора;

P_0 — мощность на выходе усилителя.

Коэффициент пульсаций для двухполупериодного выпрямителя так же, как и для многофазных выпрямителей, находят по формуле [1]

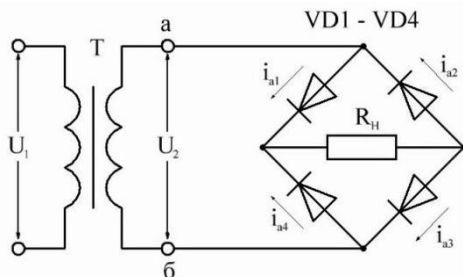
$$K_p = \frac{2}{(m2 - 1)}, \quad (5.22)$$

где K_p - коэффициент пульсации;

m — число импульсов тока в нагрузке за период. Для двухфазного выпрямителя $m = 2$ и $K_p = \frac{2}{3} \approx 0,67$.

5.3 Однофазный мостовой выпрямитель

Его схема показана на рисунке 5.3. Форма напряжения и тока в нагрузке совпадает с аналогичными формами для двухполупериодного выпрямителя с выводом средней точки вторичной обмотки трансформатора (рисунок 5.2, б). Хотя в этом выпрямителе только одна вторичная обмотка трансформатора (поэтому он и называется однофазным), в нагрузке выделяются обе полуволны тока, следовательно, выпрямитель двухполупериодный. [1]



T – трансформатор; U_1 – напряжение на первичной обмотке трансформатора; U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора; $i_{a1}, i_{a2}, i_{a3}, i_{a4}$ — токи на соответствующих вентелях; $VD1-VD4$ – диодный мост; R_n – сопротивление нагрузки

Рисунок 5.3 –Принципиальная электрическая схема однофазного мостового выпрямителя

Среднее и действующее напряжение на нагрузке определяют по таким же формулам, как и для двухполупериодного выпрямителя [1]

$$U_{cp} = U_0 = \frac{2U_{2m}}{\pi}, \quad (5.23)$$

где U_{cp} – среднее значение пульсирующего напряжения;
 U_0 — напряжение на выходе выпрямителя;

U_{2m} – амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке,

$$U_{cp} = \frac{2U_{2m}}{\sqrt{2}} = \frac{\pi U_{cp}}{2\sqrt{2}} = \frac{\pi U_0}{2\sqrt{2}} \int_2^5 4546 p, \quad (5.24)$$

где U_{cp} – среднее значение пульсирующего напряжения;

U_0 – напряжение на выходе выпрямителя;

U_{2m} – амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке.

Обратное напряжение на вентелях определяется по формулам

$$U_{обр\max} = U_{2m} = \frac{\pi U_{cp}}{2} = \frac{\pi U_0}{2}, \quad (5.25)$$

где $U_{обр\max}$ – максимальное обратное напряжение на вентеле;

U_{2m} – амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке;

U_{cp} – среднее значение пульсирующего напряжения;

U_0 – напряжение на выходе выпрямителя,

$$U_{обр\max} = \frac{\pi \cdot U_{cp}}{2} = \frac{\pi \cdot 7}{2}.$$

Среднее значение тока соответствует значению для двухполупериодного выпрямителя [1]

$$I_{cp} = I_0 = \frac{2 \cdot I_{2m}}{\pi}, \quad (5.26)$$

где I_{cp} – среднее значение тока;

I_{2m} – действующее значение тока выпрямителя;

I_0 – ток в выходной цепи выпрямителя.

Действующее значение тока через вентиль

$$I_6 = \frac{\pi \cdot I_0}{4} A, \quad (5.27)$$

где I_6 – действующее значение тока вентиля;

I_0 – ток в выходной цепи выпрямителя.

Действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора

$$I_2 = \frac{\pi \cdot I_0}{2\sqrt{2}}, \quad (5.28)$$

где I_2 – действующее значение тока во вторичной обмотке трансформатора;

I_0 – ток в выходной цепи выпрямителя.

Рассчитать мощность вторичной обмотки трансформатора можно как произведение действующих значений напряжения и тока [1]

$$P_2 = U_2 \cdot I_2 = \frac{\pi^2}{2\sqrt{2}} U_{cp} \cdot I_{cp} = 1,23 \cdot P_0, \quad (5.29)$$

где P_2 — мощность вторичной обмотки трансформатора;

U_2 — напряжение вторичной обмотки трансформатора;

I_2 – действующее значение тока выпрямителя;

I_{cp} – среднее значение тока;

U_{cp} — среднее значение пульсирующего напряжения;

P_0 — мощность на выходе усилителя.

5.4 КПД выпрямителей

Теперь определим условный КПД для каждого из трех рассмотренных выпрямителей, как отношение полезной мощности в нагрузке к расчетной мощности вторичной обмотки трансформатора. [1]

Однополупериодный выпрямитель

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

где η - КПД;

P_2 — мощность вторичной обмотки трансформатора;

P_0 — мощность на выходе усилителя.

Выпрямитель с выводом средней точки трансформатора

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

где η - КПД;

P_2 — мощность вторичной обмотки трансформатора;

P_0 — мощность на выходе усилителя.

Однофазный мостовой выпрямитель

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

где η - КПД;

P_2 — мощность вторичной обмотки трансформатора;

P_0 — мощность на выходе усилителя.

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 условный КПД. К недостаткам мостового выпрямителя относится большое число вентилях. [1]

6 РАСЧЕТ 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. [1]

6.1 Конструктивные особенности трансформаторов

Как правило, простейший трансформатор имеет две изолированные обмотки, помещенные на стальном магнитопроводе. Обмотка, включенная в сеть источника электрической энергии, называется первичной, обмотка, от которой энергия подается к приемнику – вторичной. [1]

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. [1]

Протекающий по первичной обмотке переменный ток создает в магнитопроводе сердечника переменный магнитный поток Φ . 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 [1]

$$P_1 = U_1 \cdot I_1 \cdot \cos \varphi_1, \quad (6.1)$$

где P_1 — активная мощность первичной обмотки, потребляемая трансформатором из сети;

U_1 — напряжение сети;

I_1 — ток в сети;

φ_1 — угол между U_1 и I_1 .

Активная мощность вторичной обмотки, отдаваемая потребителю [1]

$$P_2 = P_n = U_2 \cdot I_2 \cdot \cos \varphi_2, \quad (6.2)$$

где P_2 — активная мощность вторичной обмотки, отдаваемая потребителю;

U_2 — напряжение на вторичной обмотке;

I_2 — ток вторичной обмотки;

φ_2 — угол между U_2 и I_2 .

Если не учитывать потери в трансформаторе (КПД трансформаторов большой мощности 97 - 99), то приближенно можно считать $P_1 = P_2$. [1]

При обычной работе трансформаторов фазовые сдвиги первичной и вторичной цепей равны $\varphi_1 \approx \varphi_2$, а напряжения первичной и вторичной обмоток мало отличаются от ЭДС этих обмоток, поэтому можно записать [1]

$$U_1 \cdot I_1 \approx U_2 \cdot I_2, \quad (6.3)$$

где U_1 — напряжение сети;

I_1 — ток в сети;

U_2 — напряжение на вторичной обмотке;

I_2 — ток вторичной обмотки

$$K = \frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_1}{I_2} \approx \frac{E_1}{E_2}, \quad (6.4)$$

где K — коэффициент трансформации, показывающий во сколько раз трансформатор повышает или понижает напряжение;

U_1 — напряжение сети;

I_1 — ток в сети;

U_2 — напряжение на вторичной обмотке;

I_2 — ток вторичной обмотки.

На каждом трансформаторе помещается табличка с указанием на них номинальных значений величин. К ним относятся: [1]

- 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). [1]

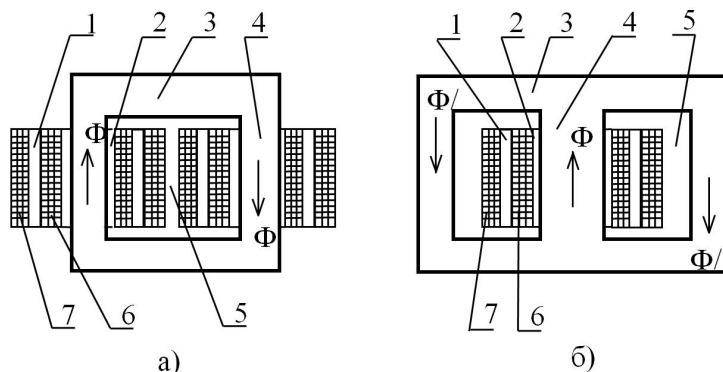
Рассмотрим конструктивное выполнение однофазных трансформаторов наиболее используемых в практике. [1]

6.2 Магнитопроводы трансформаторов

Для уменьшения потерь на вихревые токи магнитопроводы трансформаторов низкой частоты навиваются из полос или набираются из пластин, штампованных из электротехнической стали или железоникелевых сплавов. Применяют также магнитопроводы из ферритов. [1]

Штампованные пластины чаще всего бывают Ш-образной и П-образной формы. Пластины П-образной формы используются в мощных трансформаторах. Наиболее распространенными являются Ш-образные пластины. Обычная толщина пластин 0,5 или 0,35мм. Если материал сердечника должен иметь толщину меньше 0,3мм, то сердечник изготавливают не из пластин, а из ленты. [1]

На рисунке 6.1 представлена конструкция магнитопровода трансформатора.



а) однофазный стержневой;

б) однофазный броневой.

1 – изоляция между обмотками; 2 – каркас; 3 – ярмо;
4 – стержни; 5 – окно; 6 – обмотки ВН; 7 – обмотки НН

Рисунок 6.1 – Конструкция магнитопровода трансформатора

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. [1]

По расположению обмоток на сердечнике различают стержневые (рисунок 6.1, а) и броневые (рисунок 6.1, б) трансформаторы. Те части сердечника, на которых размещены обмотки, называются стержнями, те части, которые соединяют между собой стержни и служат для замыкания магнитной цепи, называют ярмами. Пространства между стержнями и ярмами, через которое проходят обмотки, называются окнами сердечника. [1]

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. [1]

Самыми лучшими свойствами обладают тороидальные магнитопроводы, использование которых приводит к уменьшению уровня помех и взаимных связей в трансформаторах вследствие меньшего потока рассеяния. При

одинаковой величине ампер / виток индукция тороидальных магнитопроводов больше, чем в броневых и стержневых. Это позволяет уменьшать размеры и вес трансформатора. В трансформаторах с тороидальными магнитопроводами лучше условия охлаждения обмоток, поскольку витки распределяются по тороиду. При этом уменьшается длина витка и расход провода, повышается КПД трансформатора. [1]

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, броневого, Ш-образные и П-образные сердечники. [1]

6.3 Каркасы

Каркасы служат для наматывания провода обмоток трансформатора, 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). [1]

6.4 Обмотка трансформатора

Обмоткам трансформаторов придают преимущественно форму цилиндрических (круглых) катушек, концентрически намотанных на стержень магнитопровода. При такой форме обмотки лучше противостоят механическим усилиям, возникающим во время работы трансформатора. [1]

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). [1]

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). [1]

6.5 Методика расчета трансформатора

Расчет трансформатора - это определение размеров магнитопровода, диаметра проводов и числа витков обмоток при известных трансформируемых напряжениях и мощностях. [1]

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. [1]

Типовой расчет сетевого трансформатора

Исходные данные для расчёта трансформатора (Приложение В, таблица В.5) – напряжения U_1 первичной и U_2 вторичной обмоток и мощность P_2 вторичной обмотки, т.е. мощность нагрузки. [1]

Расчет однофазного трансформатора с учетом частоты напряжения сети

В основу расчета положен геометрический фактор Γ_{ϕ} – это произведение площади окна сердечника S_0 , на площадь сечения сердечника (стержня) S_c , т. е. $S_0 \cdot S_c$. [1]

а) Определение расчетного геометрического фактора

$$\Gamma_{\phi_{расч}} = (S_0 \cdot S_c)_{расч} = \frac{P_2 \cdot 10^2}{2 \cdot \eta \cdot f \cdot \sigma \cdot \delta \cdot B_m}, \quad (6.5)$$

где $\Gamma_{\phi_{расч}}$ — расчетный геометрический фактор;

$S_0 \cdot S_c$ – это произведение площади окна сердечника Q_0 , на площадь сечения сердечника (стержня) Q_c ;

$P_2 = P_n$ – мощность, потребляемая нагрузкой;

η – КПД трансформатора из таблицы 6.1 [1];

f – частота Гц;

$\sigma = 0,3$ - коэффициент заполнения окна медью;

δ - плотность тока в обмотке;

B_m - максимальное значение индукции в сердечнике (для трансформаторной стали B_m берется из таблицы А.3 [1]).

б) По величине $\Gamma_{\phi_{расч}}$, из таблицы А.2 [1], путем перемножения S_0 на S_c подбирается сердечник трансформатора, таким образом, чтобы выполнялось условие [1]

$$\Gamma_{\phi_{реальное}} \geq \Gamma_{\phi_{расч}}, \quad (6.6)$$

где $\Gamma_{\phi_{расч}}$ — расчетный геометрический фактор;

$\Gamma_{\phi_{реальное}}$ — реальный геометрический фактор.

Из марки выбранного сердечника выписываются величины y_1 и y , которые проверяют на соотношение: [1]

$$\frac{y_1}{y} = 1 \dots 2.$$

в) Расчет числа витков на обмотках силового трансформатора

$$w_i = \frac{U_i \cdot 10^4}{4,44 \cdot f \cdot S_c \cdot B_m}, \quad (6.7)$$

где w_i - число витков на соответствующей обмотке трансформатора;

U_i – напряжение на данной обмотке;

B_m - максимальное значение индукции в сердечнике;

f – частота Гц;

S_c – площадь сечения сердечника (стержня).

г) Выбор проводов обмоток:

- Расчет тока в каждой обмотке

$$I_1 = \frac{P_1}{U_1}, \quad (6.8)$$

где I_1 – ток в первой обмотке;

P_1 — активная мощность первичной обмотки, потребляемая трансформатором из сети;

U_1 — напряжение сети,

$$I_2 = \frac{P_2}{U_2},$$

где I_2 – ток во вторичной обмотке;

P_2 — активная мощность вторичной обмотки, отдаваемая потребителю;

U_2 — напряжение на вторичной обмотке.

Расчет сечения проводов на обмотках

$$S_{np1} = \frac{I_1}{\delta}, \quad (6.9)$$

где S_{np1} — сечение провода на первичной обмотке;

I_1 – ток в первичной обмотке;

δ – плотность тока,

$$S_{np2} = \frac{I_2}{\delta},$$

где S_{np2} — сечение провода на вторичной обмотке;

I_2 – ток во вторичной обмотке;

δ – плотность тока.

Расчет диаметра проводов обмоток

$$d_{1np} = \sqrt{\frac{4 \cdot I_1}{\pi \cdot \delta}}, \quad (6.10)$$

где d_{1np} — диаметр провода первичной обмотки;

I_1 – ток в первичной обмотке;

δ – плотность тока,

$$d_{2np} = \sqrt{\frac{4 \cdot I_2}{\pi \cdot \delta}},$$

где d_{2np} — диаметр провода вторичной обмотки;

I_2 – ток во вторичной обмотке;

δ – плотность тока.

Из стандартного ряда выбирают провод с ближайшим диаметром (таблица А.4 [1]), ориентируясь в сторону увеличения, и выписывают расшифровку марки провода и его паспортные данные. [1]

д) Проверка заполняемости окна сердечника медью [1]

$$\frac{w1 \cdot S'_{np1} + w2 \cdot S'_{np2} + \dots}{0,3} \leq S_{ореал}, \quad (6.11)$$

где $w1$; $w2$ — числа витков первичной и вторичной обмотки;

$S'_{np1} \geq S_{np1}$, $S'_{np2} \geq S_{np2}$ – площади сечения проводов

первичной и вторичной обмоток, выбирают по стандартному ряду (таблица А.4 [1]), в соответствии с выбранными диаметрами. Если это условие выполняется, то данный сердечник можно использовать для трансформатора. [1]

6.6 Методика расчета трансформатора, работающего в составе выпрямителя

На рисунке 6.2 представлена принципиальная электрическая схема выпрямителя.

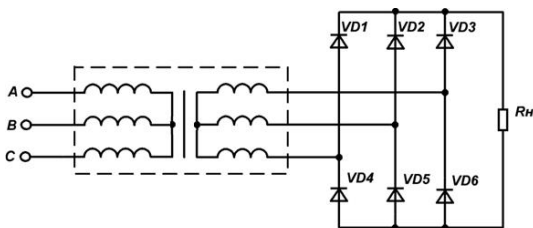


Рисунок 6.2 - Принципиальная электрическая схемы выпрямителя

Исходные данные для расчёта трансформатора, работающего в составе выпрямителя (Приложение В, таблица В.5): [2]

а) $U_H = 35,5\text{В}$ - напряжение на нагрузке,

б) $P_H = 2\text{Вт}$ - мощность нагрузки,

- в) $U_1 = 220$ В - напряжение первичной обмотки,
 г) $U_2 = 40$ В - напряжение вторичной обмотки.

Порядок расчета:

- а) Определяем ток нагрузки [2]

$$I_n = \frac{P_n}{U_n} = \frac{2}{35,5} = 0,06 \text{ A}, \quad (6.12)$$

где I_n - ток нагрузки;

U_n - напряжение на нагрузке;

P_n - мощность нагрузки.

- б) Вычисляем ток вторичной обмотки трансформатора [2]

$$I_2 = 0,79 \cdot I_n = 0,79 \cdot 0,06 = 0,05 \text{ A}, \quad (6.13)$$

где I_2 - ток вторичной обмотки трансформатора;

I_n - ток нагрузки .

- в) Находим мощность, потребляемую выпрямителем от вторичной обмотки [2]

$$P_2 = 1,11 \cdot U_n \cdot I_2 = 1,11 \cdot 35,5 \cdot 0,05 = 2 \text{ Вт}, \quad (6.14)$$

Где P_2 - мощность, потребляемую выпрямителем от вторичной обмотки;

U_n - напряжение на нагрузке;

I_2 - ток вторичной обмотки трансформатора.

- г) Вычисляем мощность трансформатора [2]

$$P_m = 0,85 \cdot P_2 = 0,85 \cdot 2 = 1,7 \text{ Вт}, \quad (6.15)$$

где P_m - мощность первичной обмотки;

P_2 - мощность, потребляемую выпрямителем от вторичной обмотки.

- д) Находим мощность первичной обмотки [2]

$$P_1 = 2 \cdot P_m - P_2 = 2 \cdot 1,7 - 2 = 1,4 \text{ Вт}, \quad (6.16)$$

где P_1 - мощность первичной обмотки ;

P_m - мощность первичной обмотки;

P_2 - мощность, потребляемую выпрямителем от вторичной обмотки.

- е) Определяем ток первичной обмотки [2]

$$I_1 = \frac{P_m}{U_1} = \frac{1,7}{220} = 0,008A, \quad (6.17)$$

где I_1 – ток первичной обмотки трансформатора;

P_m - мощность первичной обмотки;

U_1 - напряжение первичной обмотки.

ж) Вычисляем площадь сечения сердечника [2]

$$S = 1,3 \cdot P_m = 1,3 \cdot 1,7 = 2,21 \text{ см}^2, \quad (6.18)$$

где S - площадь сечения сердечника;

P_m - мощность первичной обмотки.

и) Определяем диаметр первой обмотки [2]

$$d_1 = 0,002 \cdot I_1 = 0,002 \cdot 0,008 = 0,000061 \text{ см}, \quad (6.19)$$

где d_1 - диаметр первой обмотки;

I_1 – ток первичной обмотки трансформатора.

к) Находим диаметр второй обмотки [2]

$$d_2 = 0,002 \cdot I_2 = 0,002 \cdot 0,05 = 0,0001 \text{ см}, \quad (6.20)$$

где d_2 - диаметр второй обмотки;

I_2 – ток вторичной обмотки трансформатора.

л) Определяем число витков первичной обмотки [2]

$$n_1 = 50 \cdot \frac{U_1}{S} = 50 \cdot \frac{220}{2,21} = 4977, \quad (6.21)$$

где n_1 - число витков первичной обмотки;

U_1 - напряжение первичной обмотки;

S - площадь сечения сердечника .

м) Находим число витков вторичной обмотки [2]

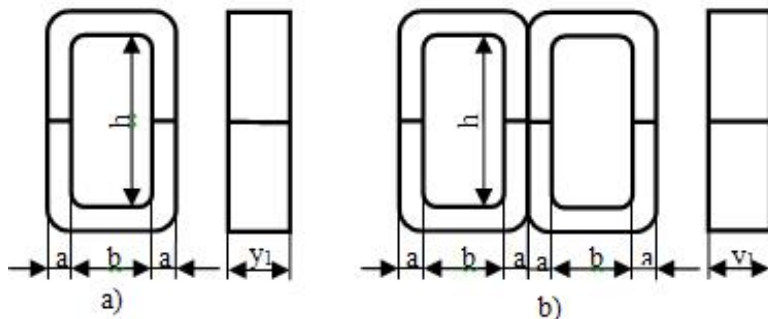
$$n_2 = 55 \cdot \frac{U_2}{S} = 50 \cdot \frac{40}{2,21} = 980, \quad (6.22)$$

где n_2 - число витков вторичной обмотки;

U_2 - напряжение вторичной обмотки;

S - площадь сечения сердечника.

6.7 Справочный материал



- а) – стержневой магнитопровод;
 б) – броневой магнитопровод;
 a – толщина навивки;
 y_1 – ширина ленты;
 b – ширина окна;
 h – высота окна.

Рисунок 7.1 – Ленточные магнитопроводы

Броневой сердечник составляют из двух стержневых, размеры которых приведены в таблице А.2. [1]

7 РАСЧЕТ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ ТОКА

Исходные данные для расчёта трансформатора, работающего в составе выпрямителя (Приложение В, таблица В.6): [2]

$R_d=10$ Ом — Активная нагрузка;

$U_s=220$ В - Напряжение вентильных обмоток

трансформатора.

На рисунке 7.1 представлена Преобразовательная принципиальная электрическая схема 3Ф1НЗП

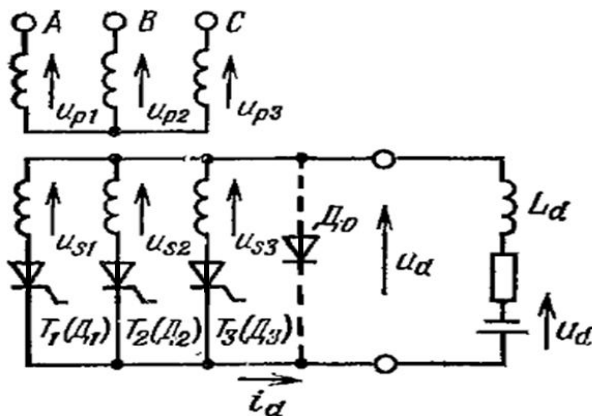


Рисунок 7.1 - Преобразовательная принципиальная электрическая схема 3Ф1НЗП

Порядок расчета

а) Определяем среднее напряжение на нагрузке.

$$U_{dcp} = \frac{3}{2\pi} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} \sqrt{2}U_s \sin \omega t d\omega t = \frac{3}{2\pi} \sqrt{2} \cdot 220 = 148,5B, \quad (7.1)$$

где U_{dcp} - среднее напряжение на нагрузке;

U_s – активная нагрузка.

б) Вычисляем среднее значение тока нагрузки [2]

$$I_{dcp} = \frac{U_{dcp}}{R_d} = \frac{148,5}{10} = 14,85A, \quad (7.2)$$

где I_{dcp} - среднее значение тока нагрузки;

U_{dcp} - среднее напряжение на нагрузке;

R_d - активная нагрузка.

в) Находим среднее значение тока тиристора [2]

$$I_{mcp} = \frac{I_{dcp}}{3} = \frac{14,85}{3} = 4,95A, \quad (7.3)$$

где I_{mcp} - реднее значение тока тиристора;

I_{dcp} - среднее значение тока нагрузки.

г) Определяем действующее значение тока тиристора [2]

$$I_m = \frac{\sqrt{\frac{3}{2\pi}} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} (\sqrt{2}U_s \sin\alpha d\alpha)^2 d\alpha}{\sqrt{3}R_d} = \frac{\sqrt{\frac{3}{2\pi}} \int_{\frac{\pi}{2}}^{\pi} (\sqrt{2} \cdot 220 \sin\alpha d\alpha)^2 d\alpha}{\sqrt{3} \cdot 10} = 11A,$$

(7.4)

где I_m - действующее значение тока тиристора;

U_s - активная нагрузка,

R_d - активная нагрузка.

д) Находим средние значения токов вентилей в неповрежденных фазах [2]

$$I_{\partial 1cp} = I_{\partial 2cp} = \frac{I_{\partial cp}}{2} = \frac{14,85}{2} = 7,4A, \quad (7.5)$$

где $I_{\partial 1cp}$ - среднее значение тока вентилей первичной обмотки в неповрежденных фазах;

$I_{\partial 2cp}$ - среднее значение тока вентилей вторичной обмотки в неповрежденных фазах;

$I_{\partial cp}$ - среднее значение тока нагрузки.

е) Вычисляем максимальное обратное напряжение диодов [2]

$$U_{обр\max} = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot U_s = \sqrt{3} \cdot \sqrt{2} \cdot 220 = 538,9B, \quad (7.8)$$

где $U_{обр\max}$ - максимальное обратное напряжение диодов;

U_s - активная нагрузка.

ж) Определяем наибольший ток нагрузки

$$I_{d\max} = pI_{\partial cp} = 3 \cdot 14,85 = 44,5A, \quad (7.7)$$

где $I_{d\max}$ - наибольший ток нагрузки;

$I_{\partial cp}$ - среднее значение тока нагрузки.

и) Находим наибольшее значение выпрямленного напряжения [2]

$$U_{d\max} = \sqrt{2}U_s \frac{\pi}{p} \sin \frac{\pi}{p} = \sqrt{2} \cdot 220 \cdot \frac{\pi}{3} \sin \frac{\pi}{3} = 280,1B, \quad (7.8)$$

где U_{dmax} - наибольшее значение выпрямленного напряжения;

U_s – активная нагрузка.

к) Вычисляем наибольшую мощность нагрузки [2]

$$P_{dmax} = I_{dmax} U_{dmax} = 44,5 \cdot 280,1 = 12,46 \text{ кВт}, \quad (7.9)$$

где P_{dmax} - наибольшая мощность нагрузки;

I_{dmax} - наибольший ток нагрузки;

U_{dmax} - наибольшее значение выпрямленного напряжения.

л) Принимаем, что $\alpha' = \pi/2$, $\alpha'_{выкл} = \pi$ и находим среднее значение тока вентильной обмотки трансформатора

$$I_{ср} = I_{dср} \frac{\alpha'_{выкл} - \alpha'}{2\pi} = 14,85 \frac{\pi - \frac{\pi}{2}}{2\pi} = 3,71 \text{ А}, \quad (7.10)$$

где $I_{ср}$ - среднее значение тока вентильной обмотки трансформатора;

$I_{dср}$ - среднее значение тока нагрузки,

$\alpha'_{выкл}$ - фазный угол выключения,

α' - фазный угол управления.

м) Определяем действующее значение тока вентильной обмотки трансформатора [2]

$$I_s = I_{dср} \sqrt{\frac{\alpha'_{выкл} - \alpha'}{2\pi}} = 14,85 \sqrt{\frac{\pi - \frac{\pi}{2}}{2\pi}} = \frac{14,85}{2} = 7,43 \text{ А}, \quad (7.11)$$

где I_s - действующее значение тока вентильной обмотки трансформатора;

$I_{dср}$ - среднее значение тока нагрузки;

$\alpha'_{выкл}$ - фазный угол выключения;

α' - фазный угол управления.

н) Вычисляем среднее значение тока шунтирующего диода [2]

$$I_{dср} = I_{dср} \frac{\alpha' - \left(\frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{3}\right)}{\frac{2\pi}{3}} = I_{dср} \frac{\frac{\pi}{6}}{\frac{2\pi}{3}} = 14,85 \frac{1}{4} = 3,71 \text{ А}, \quad (7.12)$$

где $I_{dср}$ - среднее значение тока шунтирующего диода;

I_{dcp} - среднее значение тока нагрузки.

п) Находим действующее значение тока шунтирующего диода [2]

$$I_o = I_{dcp} \sqrt{\frac{\frac{\pi}{6}}{\frac{2\pi}{3}}} = \frac{14,85}{2} = 7,43 \text{ A}, \quad (7.13)$$

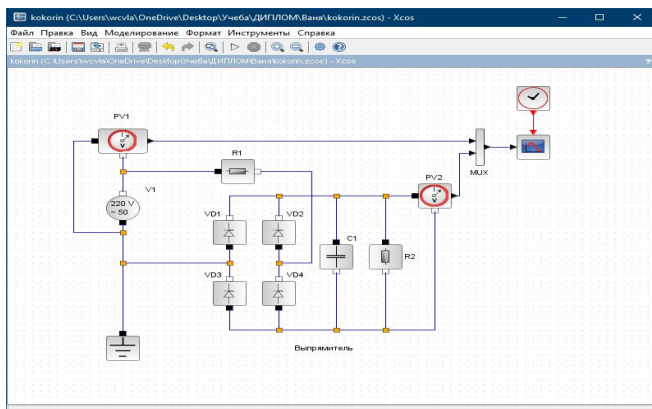
где I_o - действующее значение тока шунтирующего диода;

I_{dcp} - среднее значение тока нагрузки.

8 ПРИМЕР ИСПОЛЬЗОВАНИЯ SCILAB ПРИ РАСЧЕТЕ ОДНОФАЗНОГО МОСТОВОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

Scilab - это программный пакет, с помощью которого можно производить визуальное моделирование электронных схем при помощи стандартных блоков, что позволяет производить расчет этих схем.

На рисунке 3.3 представлена модель принципиальной электрической схемы однофазного мостового выпрямителя.



PV1, PV2 - вольтметры, R1, R2 - резисторы, V1 - источник питания, VD1, VD2, VD3, VD4 - диоды, C1 - конденсатор

Рисунок 8.1 - Модель принципиальной электрической схемы однофазного мостового выпрямителя

С помощью Scilab 5.5.2 (32-битного) на примере однофазного мостового выпрямителя, методика расчета которого присутствует в курсовом проекте, покажем как именно производят моделирование упомянутой схемы. На рисунке 8.1 представлена принципиальная электрическая схема однофазного мостового выпрямителя, разработанная с помощью программы моделирования принципиальных электрических схем Xcos пакета Scilab.

Принципиальная электрическая схема состоит из компонентов, находящихся в окне Электрические блоки Палитры блоков. (Рисунок 8.2)

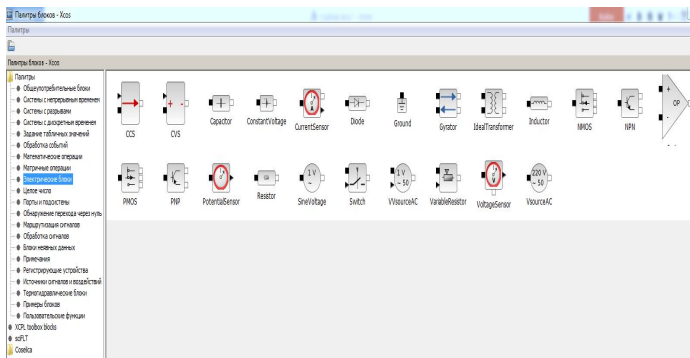


Рисунок 8.2 - Окно Электрические блоки Палитры блоков пакета Scilab

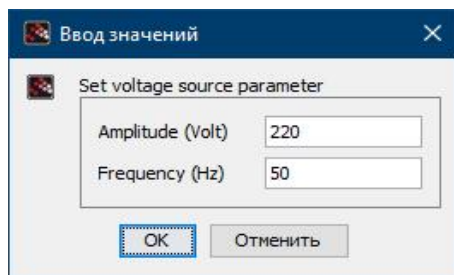
Пиктограмма источника питания VD1 представлен на рисунке 8.3. Он генерирует переменное напряжение с заданным параметрами.



Рисунок 8.3 - Пиктограмма источника питания VD1

На рисунке 8.4 представлено меню параметров блока VD1, в котором можно задать исходные значения напряжения и частоты.

На рисунке 8.5 представлена пиктограмма вольтметра, который производит измерение напряжения в схеме.



Set voltage source parameter - задайте источника питания, Amplitude - амплитуда (В), Frequency - частота (Гц)

Рисунок 8.4 - Меню параметров блока VD1 (источника переменного напряжения)

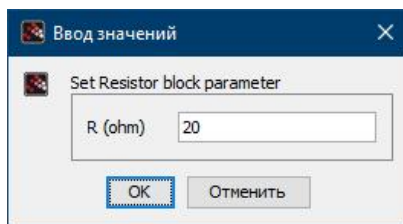


Рисунок 8.5 - Пиктограмма вольтметра PV1

На рисунке 8.6 представлена пиктограмма резистора, который служит для задания сопротивления в схеме.



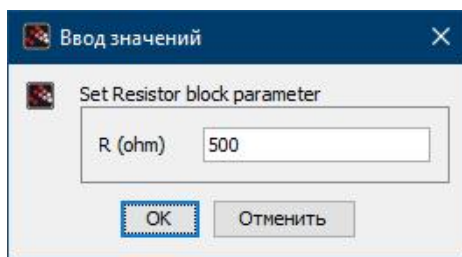
Рисунок 8.6 - Пиктограмма резистора R1



Set Resistor block parameter - задайте параметры резистора,
R - значение сопротивления резистора (Ом)

Рисунок 8.7 - Окно параметров резистора R1

На рисунках 8.7 и 8.8 представлены окна параметров резисторов, в которых можно задать необходимое исходное значение сопротивления.



Set Resistor block parameter - задайте параметры резистора,
R - значение сопротивления резистора (Ом)

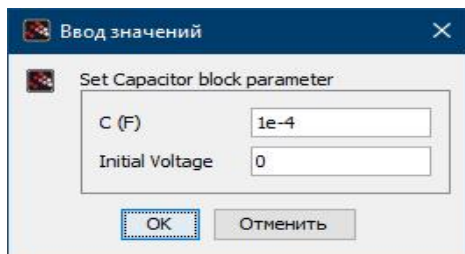
Рисунок 8.8 - Окно параметров резистора R2

На рисунке 8.9 представлена пиктограмма конденсатора, который используется для необходимого значения емкости.



Рисунок 8.9 - Пиктограмма конденсатора C1

На рисунке 8.10 представлено окно параметров конденсатора, в котором можно задать исходное значение емкости и начального напряжения.



Set Capacitor block parameter - задайте параметры конденсатора, C - значение емкости конденсатора (Ф), Initial Voltage - Начальное напряжение

Рисунок 8.10 - Окно параметров конденсатора C1

На рисунке 8.11 представлена пиктограмма диода, необходимого для правильного функционирования схемы однофазного мостового выпрямителя.

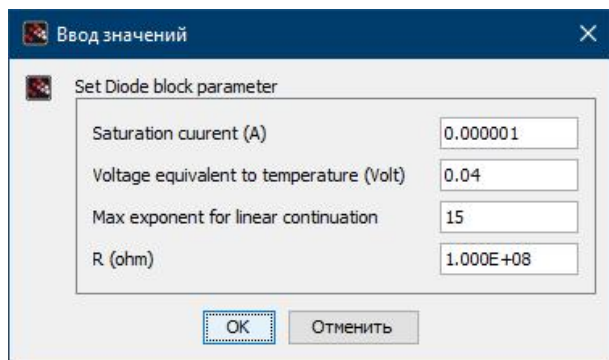


Рисунок 8.11 - Пиктограмма диода VD1

На рисунке 8.12 представлено окно параметров диодов, в котором можно задать исходные значения тока насыщения, напряжение эквивалентной температуры, максимальный показатель для линейного продолжения, значение сопротивления диода.

На рисунке 8.13 представлена пиктограмма заземления.

На рисунке 8.14 представлена пиктограмма MUX, которая необходима для одновременного вывода полученных значений на вольтметрах.



Set Diode block parameter - задайте параметры диода, Saturation current - ток насыщения (A), Voltage equivalent to temperature - напряжение эквивалентной температуры (В), Max exponent for linear continuation - максимальный показатель для линейного продолжения, R - значение сопротивления диода (Ом)
 Рисунок 8.12 - Окно параметров диодов VD1, VD2, VD3, VD4

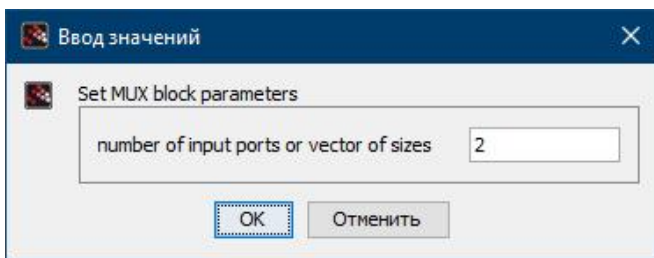


Рисунок 8.13 - Пиктограмма заземления



Рисунок 8.14 - Пиктограмма MUX

На рисунке 8.15 представлено окно параметров пиктограммы MUX, в котором можно задать число входных портов.



Set MUX block parameter - задайте параметры MUX, number of input ports or vector of sizes - число входных портов или размер вектора

Рисунок 8.15 - Окно параметров пиктограмма MUX

На рисунке 8.16 представлена пиктограмма осциллографа, который необходим для вывода результата вычисления в виде графика.

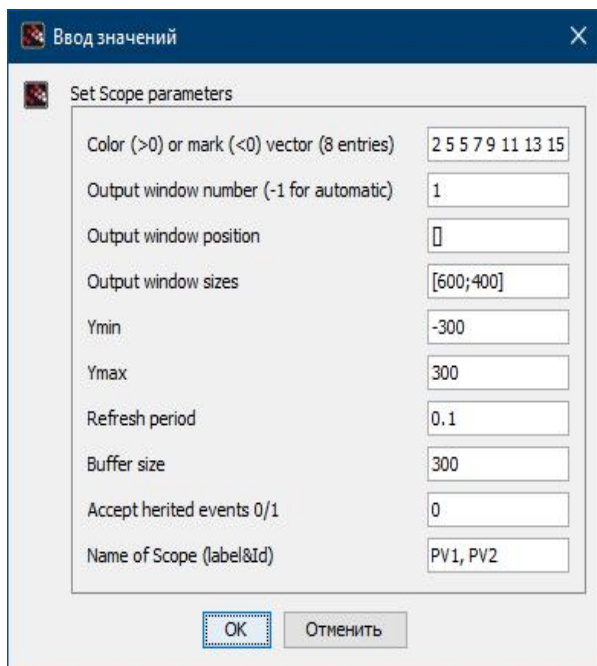


Рисунок 8.16 - Пиктограмма осциллографа

На рисунке 8.17 представлено окно параметров осциллографа, в котором можно задать графические параметры полученных результатов вычислений.

На рисунке 8.18 представлена пиктограмма задатчика времени, который необходим определения четкости прорисовки осциллограммы и начала времени прорисовки.

На рисунке 8.19 представлено окно параметров задатчика времени, в котором можно задать частоту выполнения вычислений и начальное время измерений.

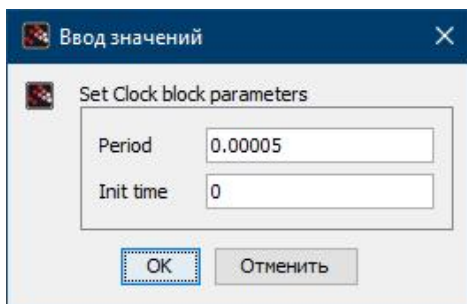


Set Scope parameter - задайте параметры осциллографа, Color or mark vector - цвет или вид вектора, Output window number - вывод номера окна, Output window position - вывод позиции окна, Output window sizes - вывод размера окна, Ymin - минимальная длина графика по оси Y, Ymax - максимальная длина графика по оси Y, Refresh period - период обновления, Buffer size - размер буфера, Name of Scope - название рамки.

Рисунок 8.17 - Окно параметров осциллографа



Рисунок 8.18 - Пиктограмма задатчика времени



Set Clock block parameter - задайте параметры задатчика времени, Period - период, Init time - начальное время

Рисунок 8.19- Окно параметров задатчика времени

На рисунке 8.20 представлено информационное окно, в котором описывается количество постоянных входов и выходов, а также краткая информация об способах аналитического вычисления.

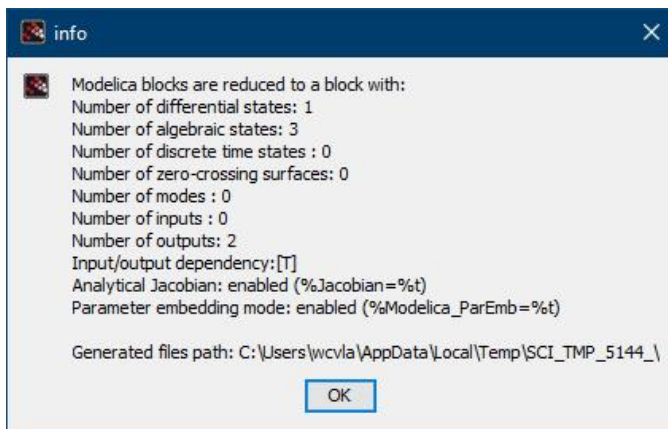


Рисунок 8.20 - Информационное окно

На рисунке 8.21 представлена графическая визуализация результатов моделирования в виде синусоидального сигнала на входе модели (синим цветом) и выпрямленного сигнала (красным цветом), на котором видны остаточные пульсации от не совсем качественного выпрямления напряжения.

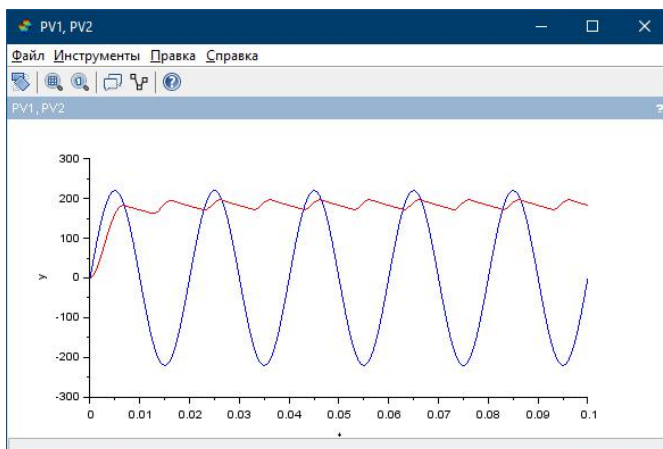


Рисунок 8.21 - Визуализация результатов вычислений в Xcos Scilab 5.5.2

На основе рисунка 8.21 можно получить информацию о численных значениях напряжения на входе модели и выпрямленного сигнала, что позволяет использовать модель для расчета однофазного мостового выпрямителя. Так напряжение на входе модели равно 220 В, а на выпрямленного сигнала - 180 В. Аналогичным образом могут быть получены и другие параметры выпрямителя.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В курсовом проекте рассчитаны элементы силовой электроники: однотактный усилитель мощности, мостовой выпрямитель с фильтром, компенсационный стабилизатор постоянного напряжения, управляемый тиристорный выпрямитель, выпрямитель источника питания, трансформатор, преобразователь тока.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1) Титов Е.В. Методические указания к выполнению курсового проекта [текст][Электронный ресурс]/ Е.В Титов, Н.П. Воробьев. - Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – 66 с. – Доступ из ЭБС «Лань».

2) Воробьев Н.П. Методические указания к практическим занятиям по дисциплине «Силовая электроника»[текст][Электронный ресурс] / Н.П. Воробьев. - Алт. гос. техн. ун-т им. И.И. Ползунова. – Барнаул: Изд-во АлтГТУ, 2015. – 67 с. – Доступ из ЭБС «Лань».

3) Фролов А.Н. Общая электротехника и электроника, : учеб. пособие А.Н. Фролов, В.М. Бурков; Иван. гос. хим.-технол. ун-т.- Иваново, 2007,- 48 с.

4) Марченко, А. Л. Основы электроники [Электронный ресурс] : учебное пособие для вузов / А. Л. Марченко. – Москва : ДМК Пресс, 2010. – 296 с. – Доступ из ЭБС «Лань».

Рег, Дж. Промышленная электроника [Электронный ресурс] : Дж. А. Рег. – Москва : ДМК Пресс, 2011. – 1136 с. – Доступ из ЭБС «Лань».

5) Ермуратский, П. В. Электротехника и электроника [Электронный ресурс] : учебник / П. В. Ермуратский, Г.П. Лычкина, Ю.Б. Минкин. – Москва : ДМК Пресс, 2011. –416 с. – Доступ из ЭБС «Лань».

6) Семенов, Б. Ю. Силовая электроника: профессиональные решения [Текст] / Б. Ю. Семенов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2011. – 416 с.

7) Силовая электроника : примеры и расчеты [Текст] / Ф. Чаки, И. Герман, И. Ипшич [и др.] ; пер. с англ. – Москва : Энергоиздат, 1982. – 384 с.

8) Кулик, В. Д. Силовая электроника: автономные инверторы, активные преобразователи [Текст] : учебное пособие / В. Д. Кулик. – Санкт-Петербург : СПбГТУРП, 2010. – 90 с.

9) Семенов, Б. Ю. Силовая электроника: от простого к сложному [Текст] / Б. Ю. Семенов. – Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. – 416 с.

10) Рекус, Г. Г. Основы электротехники и промышленной

электроники в примерах и задачах с решениями [Текст] : учебное пособие / Г. Г. Рекус. – Москва : Высшая школа, 2005. – 343 с.

11) Алиев, И. И. Справочник по электротехнике и электрооборудованию [Текст] / И. И. Алиев. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2004. – 480 с.

ПРИЛОЖЕНИЕ А

Справочные данные для расчета трансформаторов

Таблица А.1 – Выбор типа пластин для сердечника [1]

Тип пластины	Размеры				Пределы $Q_c Q_0$, см ⁴
	ширина среднего стержня a , см	ширина окна b , см	высота окна h , см	площадь окна $Q_0 = b h$, см ²	
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

Таблица А.2 – Магнитопровод ПЛ (П – образный, ленточный) [1]

Типоразмер магнитопровода	a , мм	y_1 , мм	b , мм	h , мм	S_c , см ²	$S_{ок}$, см	$S_c S_{ок}$, см ⁴	$l_{ср}$, см
ПЛ6,5x12,5x8	6,5	12,5	8	8	0,813	0,64	0,5203	5,2
ПЛ6,5x12,5x10				10		0,8	0,6504	5,6
ПЛ6,5x12,5x12,5				12,5		1	0,813	6,1
ПЛ6,5x12,5x16				16		1,28	1,0406	6,8
ПЛ8x12,5x12,5	8	12,5	10	12,5	1	1,25	1,25	7
ПЛ8x12,5x16				16		1,6	1,6	7,7
ПЛ8x12,5x20				20		2	2	8,5
ПЛ8x12,5x25				25		2,5	2,5	9,5
ПЛ10x12,5x20	10	12,5	12,5	20	1,25	2,5	3,125	9,6
ПЛ10x12,5x25				25		3,12	3,9	10,6
ПЛ10x12,5x32				32		4	5	12
ПЛ10x12,5x40				40		6,25	7,812	13,6
ПЛ12,5x16x25	12,5	16	16	25	2	4	8	12,1
ПЛ12,5x16x32				32		5,12	10,24	13,5
ПЛ12,5x16x40				40		6,4	12,8	15,1
ПЛ12,5x16x50				50		8	16	17,1
ПЛ12,5x25x32	12,5	25	20	32	3,125	6,4	20	14,3
ПЛ12,5x25x40				40		8	25	15,9
ПЛ12,5x25x50				50		10	31,25	17,9
ПЛ12,5x25x60				60		12	37,5	19,9

Окончание таблицы А.2

Типоразмер магнитопровода	a , мм	y_1 , мм	b , мм	h , мм	S_c , см ²	$S_{ок}$, см	$S_c S$, см ⁴	l_{cp} , см
ПЛ16х32х40	16	32	25	40	5,12	10	51,2	14
ПЛ16х32х50				50		12,5	64	20
ПЛ16х32х65	16	32	25	65	5,12	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
ПЛ20х40х0				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

Таблица А.3 – Данные для расчета силового трансформатора [1]

Мощность трансформатора S_l , В·А	Амплитуда магнитной индукции в сердечнике B_m , Тл	КПД η , %	Плотность тока в обмотках δ , А/мм ²
≤ 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

Таблица А.4 – Основные данные обмоточных проводов [1]

Диаметр без изоляции, мм	Сечение меди, мм ²	Сопротивление 1 м при 20 °С, Ом	Допустимая нагрузка при плотности тока 2 А/мм ² , А	ПЭЛ, ПЭТ		ПЭЛШО	
				Диаметр с изоляцией, мм	Вес 100 м с изоляцией	Диаметр с изоляцией, мм	Вес 100 м с изоляцией
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

Продолжение таблицы А.4

Диаметр без изоляции, мм	Сечение меди, мм ²	Сопротивление 1 м при 20 °С, Ом	Допустимая нагрузка при плотности тока 2 А/мм ² , А	ПЭЛ, ПЭТ		ПЭЛШО	
				Диаметр с изоляцией, мм	Вес 100 м с изоляцией, г	Диаметр с изоляцией, мм	Вес 100 м с изоляцией, г
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

Окончание таблицы А.4

Диаметр без изоляции, мм	Сечение меди, мм ²	Сопротивление 1 м при 20 °С, Ом	Допустимая нагрузка при плотности тока 2 А/мм ² , А	ПЭЛ, ПЭТ		ПЭЛШО	
				Диаметр с изоляцией, мм	Вес 100 м с изоляцией, г	Диаметр с изоляцией, мм	Вес 100 м с изоляцией, г
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	—	—

Таблица А.5 – Характеристика изоляции обмоточных проводов [1]

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 Б

Справочные данные для расчета трансформаторов

Таблица Б.1 – Параметры транзисторов [1]

Тип прибора	$I_{кmax},$ А	$U_{кmax},$ В	$P_{кmax},$ Вт	$h_{21э}$	$f,$ МГц	$U_{нас},$ В	Тип
КТ203Б	0,01	30	0,15	30...150	5	1	p-n-p
ПЗ07Б	0,015	80	0,25	50...150	20	0,5	n-p-n
КТ206А	0,02	20	0,01 5	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	500	0,5	p-n-p
КТС3103А	0,02	15	0,3	40...200	600	0,6	p-n-p
ГТ109Д	0,02	6	0,03	20...70	3	0,5	p-n-p
КТ201Г	0,02	10	0,15	70...210	10	0,5	n-p-n
КТ3127А	0,025	20	0,15	25...150	600	0,5	p-n-p
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	20	0,1	30...250	250	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	30	0,25	10...100	250	0,1	n-p-n
ГТ108Б	0,05	5	75	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	90	1,2	p-n-p
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

Продолжение таблицы Б.1

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	0,1	50...350	250	0,4	n-p-n
КТ315Р	0,1	35	0,1	150...350	250	0,4	n-p-n
КТ375А	0,1	60	0,2	10...100	250	0,4	p-n-p
КТ375Б	0,1	30	0,2	50...280	250	0,4	p-n-p
КТ3102Б	0,1	50	0,25	200...500	150	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	25	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	350	0,6	p-n-p
КТ503Е	0,15	80	0,35	40...120	350	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
КТ503А	0,15	25	0,35	15...100	350	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	40	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	400	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	60	0,3	40...200	200	0,5	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	100	60	20...125	5	2	n-p-n

Продолжение таблицы Б.1

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
КТ350А	0,6	15	0,3	20...200	100	0,4	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
КТ660А	0,8	45	0,5	110...220	200	0,05	n-p-n
КТ683А	1	150	0,5	40...120	50	0,45	n-p-n
КТ826Б	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
КТ814Г	1,5	80	10	30	3	0,6	p-n-p
КТ639Г	1,5	60	1	40...100	80	0,5	p-n-p
КТ814В	1,5	60	10	40	3	0,6	p-n-p
КТ851Б	2	250	25	20...200	20	1	p-n-p
КТ887А	2	600	75	20...120	15	1,4	p-n-p
КТ932А	2	80	20	5...80	40	1,5	p-n-p
КТ804Б	2,5	400	15	10...100	5	1	n-p-n
КТ817А	3	40	25	25	3	0,6	n-p-n
КТ835А	3	30	25	10...100	1	2,5	p-n-p
КТ816Г	3	90	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
КТ962В	4	50	66	20...200	750	1	n-p-n
КТ828А	5	800	50	2,25	4	3	n-p-n
КТ805АМ	5	160	30	15	60	2	n-p-n
КТ837А	7,5	60	30	10...40	1	2,5	p-n-p
ГТ217Г	7,5	60	24	15...40	0,1	1	p-n-p
КТ812В	8	300	50	10...125	3	2,5	n-p-n
КТ808ВМ	10	80	60	20...125	10	2	n-p-n
КТ819ГМ	15	10	100	12	3	2	n-p-n
ГТ804Б	10	140	15	20...150	10	0,5	p-n-p
КТ803А	10	80	60	10...70	20	5	n-p-n
КТ908Б	10	60	50	20	30	4	n-p-n
КТ818ВМ	15	70	100	20	3	1	p-n-p
КТ819БМ	15	50	100	20	3	5	n-p-n

Окончание таблицы Б.1

КТ827В	20	60	125	750...18000	4	2	n-p-n
2Т825А	20	80	125	500...18000	4	2	p-n-p
КТ867А	25	200	100	12...100	6,9	1	n-p-n
2Т878Б	25	600	100	12...50	10	1,5	n-p-n
2Т878А	25	800	100	12...50	10	1,5	n-p-n
КТ878Б	30	600	100	12...50	10	1,5	n-p-n
КТ878Б	30	800	100	12...50	10	1,5	n-p-n
КТ879Б	50	150	250	10...40	10	2,5	n-p-n
2Т879А	50	200	250	20...80	10	1,5	n-p-n

Таблица Б.2 – Тиристоры [1]

Тип прибора	Средний выпрямленный прямой ток, $I_{пр}$, А	Максимальное обратное напряжение, $U_{обрmax}$, В	Ток управления, I_y , мА	Время включения, $t_{вкл}$, мкс
КУ109А	1	50	100	6
КУ201Б	2	25	50	10
КУ220(Г, Д)	4	50	4	0,3
КУ202М	10	300	200	10
Т25	25	50...1200	200	10
Т132-40-1	40	100	100	10
Т50	50	50...1200	300	10
Т100	100	50...1200	300	10
Т161-125	125	300...1200	200	25
ТС161-160	160	200...1200	400	15
Т171-200	200	300...1600	200	25
Т123-250	250	400...1200	200	25
Т133-320	320	900...2000	300	30
Т133-400	400	400...1600	200	25

Окончание таблицы Б.2

Т143-500	500	400...1600	250	25
Т143-630	600	400...1200	250	25

Таблица Б.3 – Параметры диодов [1]

Тип прибора	Средний выпрямленный прямой ток $I_{пр.}$, А	Максимальное обратное напряжение $U_{обрmax}$, В	f_p , кГц
Д10А	0,016	10	100
ГД107А	0,02	15	50
ГД402Б	0,03	15	10
Д104	0,03	100	150
КД103А	0,03	30	20
КД401Б	0,03	75	150
КД102Б	0,05	300	20
Д206	0,1	400	1
Д207	0,4	200	1
Д208	0,4	300	1
2Д237В	0,3	100	300
Д7Ж	0,3	400	2,4
КД105Г	0,3	800	1
КД106А	0,3	100	1
Д202	0,4	100	20
Д203	0,4	200	20
Д204	0,4	300	20
Д205	0,4	400	20
Д302	1	200	1
КД226Д	1,7	800	50
КД130АС	3	50	200
КД248В	3	800	100
Д303	5	100	1

Окончание таблицы Б.3

Д245Б	5	300	1,1
Д304	5	150	1
КД202Ж	5	300	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	1
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	100	200
В50	50	100...1000	1
В100	100	100...1000	1
КД805А	200	75	1000
КДС111В	200	300	20
Д7А	300	50	2,4
Д7Б	300	100	2,4
Д7Г	300	200	2,4
Д7Д	300	300	2,4
Д7Ж	300	400	2,4
Д205	400	400	20
КД205А	500	500	5
КЦ402Ж	600	600	5
КД205Л	700	200	5
КД209А	700	400	1
КЦ405Д	1000	200	5
КЦ405В	1000	400	5
КЦ405А	1000	600	5

Таблица Б.4 – Параметры стабилизаторов [1]

Тип	Напряжение стабилизации и $U_{ст}$, В	Максимальный ток стабилизации $I_{ст}$, мА	Дифференциальное сопротивление, R_d , Ом	Температурный коэффициент напряжения, % / град.
КС133А	3,3	81	65	0,11
КС139А	3,3	79	60	0,1
Д815И	4,7	1400	0,9	0,056
КС147А	4,7	58	56	0,09
Д815А	5,6	1400	0,6	0,045
КС156 А	5,6	55	46	0,05
Д815Б	6,8	1150	0,8	0,05
КС168А	6,8	45	23	0,06
Д815В	8,2	950	1	0,088
Д818А	9	33	70	0,02
Д818Б	9	33	18	0,02
Д818В	9	33	18	±0,01
Д818Г	9	33	18	±0,005
Д818Д	9	33	18	±0,002
Д818Е	9	33	18	±0,001
Д815Г	10	800	1,8	0,08
Д815Д	12	650	2	0,9
Д815Е	15	550	2,5	0,1
Д815Ж	18	450	5	0,11
Д816А	22	230	7	0,12
Д816Б	27	180	8	0,12
Д816В	33	150	10	0,12

Окончание таблицы Б.4

Д816Г	39	130	12	0,12
Д816Д	47	110	15	0,12
Д817А	56	90	35	0,14
Д817Б	68	75	40	0,14
Д817В	82	60	45	0,14
Д817Г	100	50	50	0,14
КС620А	120	42	150	0,1
КС630А	130	38	180	0,2
КС650А	150	33	270	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	350	0,095
Д814Д	11,5 – 14	24	18	0,095
Д814А	7 – 8,5	40	6	0,07
Д808	7 – 8,5	33	12	0,07
Д809	8 – 9,5	29	18	0,08
Д814Б	8 – 9,5	36	10	0,08
Д810	9 – 10,5	26	25	0,09
Д814В	9 – 10,5	32	12	0,09

Таблица Б.5 – Номинальный ряд резисторов [1]

10	11	12	13	15	16	18	20
22	24	27	30	33	36	39	43
47	5	56	62	68	75	82	91

Таблица Б.6 – Буквенные коды элементов [1]

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры видов элементов	Двухбуквенный код
А	Устройства (общее обозначение)	Усилители, приборы телеуправления, лазеры, мазеры	
В	Преобразователи неэлектрических величин в электрические (кроме генераторов и источников питания) или наоборот, аналоговые или многоуровневые преобразователи или датчики для указания или измерения	Громкоговоритель	ВА
		Магнитострикционный элемент	ВВ
		Детектор ионизирующих излучений	ВД
		Сельсин-приемник	ВЕ
		Телефон (капсюль)	ВФ
		Сельсин-датчик	ВС
		Тепловой датчик	ВК
		Фотоэлемент	ВЛ
		Микрофон	ВМ
		Датчик давления	ВП
		Пьезоэлемент	ВQ
		Датчик частоты вращения (тахогенератор)	ВR
		Звукосниматель	BS
Датчик скорости	BV		
С	Конденсаторы		
D	Схемы интегральные, микросборки	Схема интегральная аналоговая	DA
		Схема интегральная цифровая, логический элемент	DD
		Устройства хранения информации	DS
		Устройство задержки	DT

Продолжение таблицы Б.6

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры видов элементов	Двухбуквенный код
Е	Элементы разные (осветительные устройства, нагревательные элементы)	Нагревательный элемент	ЕК
		Лампа осветительная	ЕL
		Пиропатрон	ЕТ
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, пускатели	Реле токовое	KA
		Реле указательное	KN
		Реле электротепловое	KK
		Пускатель	KM
		Реле времени	KT
		Реле напряжения	KV

Продолжение таблицы Б.6

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры видов элементов	Двухбуквенный код
L	Катушки индуктивности, дроссели	Дроссель люминесцентного освещения	LL
M	Двигатели постоянного и переменного тока		
P	Приборы, измерительное оборудование	Амперметр	PA
		Счетчик импульсов	PC
	Примечание	Частотомер	PF
	Сочетание PE применять не допускается.	Счетчик активной энергии	PI
		Счетчик реактивной энергии	PK
		Омметр	PR
		Регистрирующий прибор	PS
		Часы, измеритель времени действия	PT
	Вольтметр	PV	
	Ваттметр	PW	
Q	Выключатели и разъединители в силовых цепях (энергоснабжение, питание оборудования и т. д.)	Выключатель автоматический	QF
		Короткозамыкатель	QK
		Разъединитель	QS
R	Резисторы	Терморезистор	RK
		Потенциометр	RP
		Шунт измерительный	RS
		Варистор	RU

Продолжение таблицы Б.6

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры видов элементов	Двухбукв енный код
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
температуры	SK		
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, выпрямитель	UZ
V	Приборы электровакуумные и полупроводниковые	Диод, стабилитрон	VD
		Прибор электровакуумный	VL
		Транзистор	VT
		Тиристор	VS

Окончание таблицы Б.6

Первая буква кода (обязательная)	Группа видов элементов	Примеры видов элементов	Двухбуквенный код
W	Линии и элементы СВЧ	Ответвитель	WE
		Короткозамыкатель	WK
		Вентиль	WS
W	Антенны	Трансформатор, неоднородность, фазовращатель	WT
		Аттенуатор	WU
		Антенна	WA
X	Соединения контактные	Токосъемник, контакт скользящий	XA
		Штырь	XP
		Гнездо	XS
		Соединение разборное	XT
		Соединитель высокочастотный	XW
Y	Устройства механические с электромагнитным приводом	Электромагнит	YA
		Тормоз с электромагнитным приводом	YB
		Муфта с электромагнитным приводом	YC
		Электромагнитный патрон или плита	YH
Z	Устройства оконечные, фильтры	Ограничитель	ZL
		Фильтр кварцевый	ZQ
	Ограничители		

ПРИЛОЖЕНИЕ В

Исходные данные к выполнению курсового проекта

Таблица В.1 - Расчет однотактного усилителя мощности [1]

Вариант	$P_{\text{вых}}$, Вт	R_n , Ом	f_n - $f_в$, кГц	f_n , Гц	M_n	E_n , В
1	3	5	3	70	1,2	27
2	2	7	5,1	200	1,3	18
3	1,5	9	10	200	1,25	9
4	1,7	5	8	100	1,15	9
5	1,2	15	3,6	90	1,28	27
6	1,8	5	7	90	1,3	27
7	1	3	9	50	1,25	9
8	0,9	10	1,8	120	1,12	12
9	2,5	4	12	160	1,18	12
10	0,1	20	14	140	1,26	27
11	4	9	0,8	20	1,25	9
12	1,5	18	7	160	1,25	24
13	2	13	2,5	180	1,15	12
14	5	10	12	70	1,2	12
15	2	5	6	100	1,25	24
16	6	8	20	120	1,15	9
17	10	4	6	70	1,1	20
18	15	7	24	160	1,3	16
19	4	6	10	90	1,25	8
20	2,2	19	3,6	130	1,22	6
21	17	8	4	150	1,4	10
22	4	28	5	200	1,13	20
23	6	32	7	200	1,2	16
24	5	30	6	190	1,16	14
25	9	25	11	160	1,18	8
26	4	8	5	70	1,25	9

Окончание таблицы В.1

Вариант	$P_{\text{вых}}, \text{Вт}$	$R_H, \text{Ом}$	$f_H - f_{\text{в}}, \text{кГц}$	$f_H, \text{Гц}$	M_H	$E_H, \text{В}$
27	1,3	8	3	180	1,4	16
28	3	14	4	100	1,13	8
29	0,8	20	4,6	200	1,5	12
30	1,5	6	5	40	1,2	20

Таблица В.2 - Расчет мостового выпрямителя с фильтром [1]

Вариант	$U_{\text{но}}, \text{В}$	$I_o, \text{А}$	$U_I, \text{В}$	$K_{\text{пвых}}, \%$
1	20	4	110	5
2	14	0.3	220	2
3	32	3	190	7
4	18	1.5	230	12
5	38	2	120	3
6	26	5	380	4
7	15	10	220	8
8	21	7	250	5
9	30	0.8	340	3
10	27	3	290	11
11	12	1	170	9
12	18	1.2	160	7
13	14	6	180	5
14	8	4	220	3
15	16	8	380	2
16	15	6	340	4
17	12	2	250	5
18	17	7	220	3
19	20	8	380	7
20	19	8	320	12
21	16	4	260	9
22	24	3	190	11

Окончание таблицы В.2

Вариант	$U_{но}, В$	$I_o, А$	$U_l, В$	$K_{пвых}, \%$
23	12	5	280	4
24	13	11	160	8
25	11	2	220	3
26	35	0,6	340	4
27	16	2	220	2
28	34	5	240	9
29	27	0,3	300	11
30	14	7	110	7

Таблица В.3 - Расчет компенсационного стабилизатора постоянного напряжения [1]

Вариант	$U_{вых}, В$	$\Delta U_{вых}, В$	$I_H, А$	$\Delta U_{вх}/U_{вх}$
1	10	10	10	0,8
2	5	10	2	0,4
3	8	10	1,8	0,5
4	6,3	10	30	0,3
5	9	6	0,9	0,8
6	10	14	2,3	0,9
7	8	4	21	0,6
8	15	12	1,5	0,35
9	12	8	2,8	0,3
10	14	9	1,5	0,5
11	7	10	20	0,8
12	10	9	0,75	0,7
13	13	10	0,8	0,6
14	16	10	0,8	0,4
15	10	5	6	0,5
16	12	8	2,5	0,4

Окончание таблицы В.3

Вариант	$U_{вых}, В$	$\Delta U_{вых}, В$	$I_H, А$	$\Delta U_{вых}/U_{вых}$
17	15	10	0,75	0,6
18	13	9	0,5	0,7
19	4	2	4	0,4
20	6	9	2,2	0,5
21	9	8	21	0,3
22	12	10	4	0,25
23	8	9	15	0,8
24	13	8	10	0,4
25	11	10	16	0,65
26	8	12	15	0,3
27	9	12	5	0,4
28	15	10	23	0,6
29	8	14	18	0,35
30	12	10	15	0,8

Таблица В.4 - Расчет управляемого тиристорного выпрямителя [1]

Вариант	$I_{cp}, А$	$U_{cp}, В$	№ рисунка
1	16	10	4.7
2	2	16	4.4
3	14	12	4.5
4	10	2	4.7
5	2	18	4.4
6	20	9	4.7
7	4	24	4.6
8	10	17	4.5
9	8	28	4.6
10	24	12	4.4

Окончание таблицы В.4

Вариант	I_{cp} , А	U_{cp} , В	№ рисунка
11	40	8	4.7
12	6	30	4.5
13	8	9	4.6
14	25	13	4.7
15	3	22	4.4
16	14	8	4.5
17	18	7	4.6
18	2	14	4,4
19	4	28	4,5
20	26	10	4,4
21	16	22	4,7
22	10	18	4,5
23	32	8	4,4
24	24	14	4,5
25	12	29	4,6
26	24	5	4,7
27	32	10	4,7
28	16	10	4,6
29	2	9	4,5
30	16	24	4,6

Таблица В.5 - Расчет трансформаторов [1]

Вариант	P_2 , Вт	U_1 , В	U_2 , В	U_n , В	P_n , Вт
1	25	180	6	220	98
2	220	40	10	115	93
3	210	525	5	45	165
4	70	525	15	58	188
5	60	400	10	12	221

Окончание таблицы В.5

Вариант	P_2 , Вт	U_1 , Ом	U_2 , Ом	U_n , В	P_n , Вт
6	38	200	10	67	49
7	250	270	22	126	68
8	60	180	12	245	78
9	10	200	6	150	40
10	150	320	18	110	112
11	120	270	8	90	173
12	14	230	4	186	125
13	180	525	10	65	138
14	50	180	6	32	63
15	220	20	10	300	183
16	110	280	10	40	141
17	50	410	12	112	124
18	140	330	20	218	155
19	30	190	8	314	216
20	50	220	7	84	175
21	120	80	14	23	126
22	180	260	18	346	136
23	220	340	22	32	111
24	340	50	6	68	95
25	30	300	12	294	94
26	220	60	10	63	184
27	100	180	7	35	173
28	85	200	18	267	217
29	24	40	6	35	208
30	150	230	20	126	182

Таблица В.6 - Расчет преобразователя тока [1]

Вариант	R_d , Ом	U_s , В
1	10	220
2	2	80

Окончание таблицы В.6

Вариант	R_d , Ом	U_s , В
3	12	260
4	18	340
5	8	50
6	4	300
7	5	60
8	8	180
9	15	200
10	17	40
11	2	230
12	17	320
13	9	270
14	18	230
15	9	155
16	2	260
17	20	146
18	16	150
19	14	153
20	15	253
21	5	354
22	7	241
23	13	332
24	16	250
25	4	170
26	15	205
27	7	148
28	9	124
29	20	134
30	13	245