

Министерство образования и науки Российской Федерации

Федеральное государственное бюджетное образовательное
учреждение высшего образования
«Оренбургский государственный университет»

Кафедра технической эксплуатации и ремонта автомобилей

А.В. Пузаков, А.М. Федотов

РАСЧЁТ ОДНОФАЗНЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Рекомендовано к изданию Редакционно-издательским советом федерального государственного бюджетного образовательного учреждения высшего образования «Оренбургский государственный университет» в качестве методических указаний для студентов, обучающихся по программам высшего образования по направлению подготовки 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов

Оренбург
2016

УДК 629.33(075.8)
ББК 39.33-04я73
П 88

Рецензент – доцент, кандидат технических наук Р.Х. Хасанов

Пузаков, А.В.

П-88 Расчёт однофазных выпрямителей: методические указания /
А.В. Пузаков, А.М. Федотов; Оренбургский гос. ун-т. –
Оренбург: ОГУ, 2016. – 74 с.

Методические указания по выполнению расчётно-графического задания предназначены для студентов, обучающихся по программе высшего образования по направлению подготовки 23.03.03 Эксплуатация транспортно-технологических машин и комплексов при изучении дисциплины «Электротехника и электрооборудование транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования».

УДК 629.33(075.8)
ББК 39.33-04я73

© Пузаков А.В.,
Федотов А.М., 2016
© ОГУ, 2016

Содержание

Введение.....	4
1 Исходные данные к расчёту.....	5
2 Краткие сведения из теории однофазных выпрямителей.....	8
2.1 Характеристики и параметры диодов.....	9
2.2 Однополупериодный выпрямитель.....	11
2.3 Двухполупериодные выпрямители.....	14
3 Сглаживающие фильтры.....	19
4 Магнитопроводы дросселей и трансформаторов.....	21
5 Порядок расчёта выпрямителя.....	24
5.1 Расчёт однофазных выпрямителей.....	25
5.2 Конструктивный расчёт трансформатора.....	30
5.3 Выбор элементов и составление схемы.....	40
Список использованных источников.....	43
Приложение А Параметры полупроводниковых диодов.....	45
Приложение Б Магнитопроводы дросселей и трансформаторов.....	47
Приложение В Провода обмоточные медные.....	50
Приложение Г Ряд номинальных значений сопротивлений и ёмкостей	52
Приложение Д Сопротивления проволочные.....	53
Приложение Е Конденсаторы.....	54
Приложение Ж Пример выполнения расчёта.....	55

Введение

Целью расчётно-графического задания по курсу «Электротехника и электрооборудование транспортных и транспортно-технологических машин и оборудования» является получение навыков расчёта и выбора элементов электрических цепей и конструктивного расчёта трансформатора.

Расчётно-графическое задание оформляется на сброшюрованных листах писчей бумаги формата А4. На первой странице (титульном листе) указывается тема расчётно-графического задания, кафедра, фамилия руководителя, номер группы и номер варианта, фамилия студента, год и место выполнения РГЗ. Далее следует поместить исходные данные к расчёту в соответствии с номером варианта. Работа должна быть аккуратно оформлена: страницы и рисунки пронумерованы; при выполнении всех расчётов обязательно вначале записывать расчётную формулу, в которую затем следует подставить цифровые значения входящих в нее величин. В конце работы приводится список использованных источников.

1 Исходные данные к расчёту

Варианты заданий задаются четырехзначным числом. Две последние цифры варианта соответствуют двум последним цифрам студенческого билета (учебного шифра). Две первые цифры задаются преподавателем каждому студенту индивидуально. Согласно варианту задания, из таблиц 1, 2, 3 выписываются данные, необходимые для выполнения РГЗ.

Первая цифра задания означает тип выпрямителя (номер таблицы): 1 – однополупериодный, 2 – двухполупериодный нулевой, 3 – двухполупериодный мостовой. Вторая цифра означает номер строки в соответствующей таблице.

Таблица 1 – Данные для расчёта однополупериодного выпрямителя

	Выпрямленное напряжение, В										Кп, %	U1, В
	3	6	9	12	18	24	36	48	72	96		
	Последние цифры номера студенческого билета											
	01	15	66	86	50	80	37	51	81	21	30	110
	02	14	67	87	49	79	38	52	82	22	25	127
	03	13	68	88	48	78	39	53	83	23	20	220
	04	12	69	89	47	77	40	54	84	24	15	380
	05	11	70	90	46	76	60	31	85	25	12	110
	26	10	45	00	61	95	71	32	59	16	10	220
	27	09	44	99	62	94	72	33	58	17	8	127
	28	08	43	98	63	93	73	34	57	18	5	380
	29	07	42	97	64	92	74	35	56	19	3	220
	30	06	41	96	65	91	75	36	55	20	1	127
1	0,4	0,8	1,2	1,6	3,2	5,6	12,8	24,0	52,0	92,0	Rн, Ом	
2	0,5	1,0	1,5	2,0	4,0	7,0	16,0	30,0	64,0	112		
3	0,6	1,2	1,8	2,4	4,8	8,4	19,2	36,0	78,0	136		
4	0,8	1,6	2,4	3,2	6,4	11,2	25,6	48,0	104	184		
5	1,2	2,4	3,6	4,8	9,6	16,8	38,4	72,0	156	276		

Например, номер варианта 3145 означает, что исходные данные к РГЗ следующие: U1 = 220 В; U2 = 36 В; Кп = 25 %; Rн = 12,8 Ом.

Задание. Согласно варианту задания, рассчитать требуемую схему однофазного выпрямителя: однополупериодную, двухполупериодные нулевую или мостовую и выполнить конструктивный расчёт трансформатора.

Таблица 2 – Исходные данные для расчёта двухполупериодного выпрямителя с нулевой точкой

	Выпрямленное напряжение, В										Кп, %	U1, В
	3	6	9	12	18	24	36	48	72	96		
	Последние цифры номера студенческого билета											
	37	50	80	51	01	21	66	86	15	81	1	110
	38	49	79	52	02	22	67	87	14	82	5	127
	39	48	78	53	03	23	68	88	13	83	10	220
	40	47	77	54	04	24	69	89	12	84	12	380
	60	46	76	31	05	25	70	90	11	85	3	110
	95	61	00	71	32	10	59	16	45	26	15	220
	94	62	99	72	33	09	58	17	44	27	25	127
	93	63	98	73	34	08	57	18	43	28	8	380
	92	64	97	74	35	07	56	19	42	29	20	220
	91	65	96	75	36	06	55	20	41	30	30	127
1	0,4	0,8	1,6	3,2	6,4	11,2	25,6	48,0	104	184	Rн, Ом	
2	0,6	1,0	2,0	4,0	8,0	14,0	32,0	60,0	128	224		
3	0,8	1,2	2,4	4,8	9,6	16,8	38,4	72,0	156	272		
4	1,0	1,6	3,2	6,4	12,8	22,4	51,2	96,0	208	368		
5	1,2	2,4	4,8	9,6	19,2	33,6	76,8	144	312	552		

Таблица 3 – Исходные данные для расчёта двухполупериодного мостового выпрямителя

	Выпрямленное напряжение, В										Кп, %	U1, В
	3	6	9	12	18	24	36	48	72	96		
	Последние цифры номера студенческого билета											
	66	86	81	37	80	51	50	21	01	15	15	110
	67	87	82	38	79	52	49	22	02	14	10	127
	68	88	83	39	78	53	48	23	03	13	12	220
	69	89	84	40	77	54	47	24	04	12	30	380
	70	90	85	60	76	31	46	25	05	11	8	110
	32	71	59	10	26	16	45	95	61	00	25	220
	33	72	58	09	27	17	44	94	62	99	20	127
	34	73	57	08	28	18	43	93	63	98	1	380
	35	74	56	07	29	19	42	92	64	97	5	220
	36	75	55	06	30	20	41	91	65	96	3	127
1	0,2	0,4	0,8	1,6	3,2	5,6	12,8	24,0	52,0	92,0	Rн, Ом	
2	0,3	0,5	1,0	2,0	4,0	7,0	16,0	30,0	64,0	112		
3	0,4	0,6	1,2	2,4	4,8	8,4	19,2	36,0	78,0	136		
4	0,5	0,8	1,6	3,2	6,4	11,2	25,6	48,0	104	184		
5	0,6	1,2	2,4	4,8	9,6	16,8	38,4	72,0	156	276		

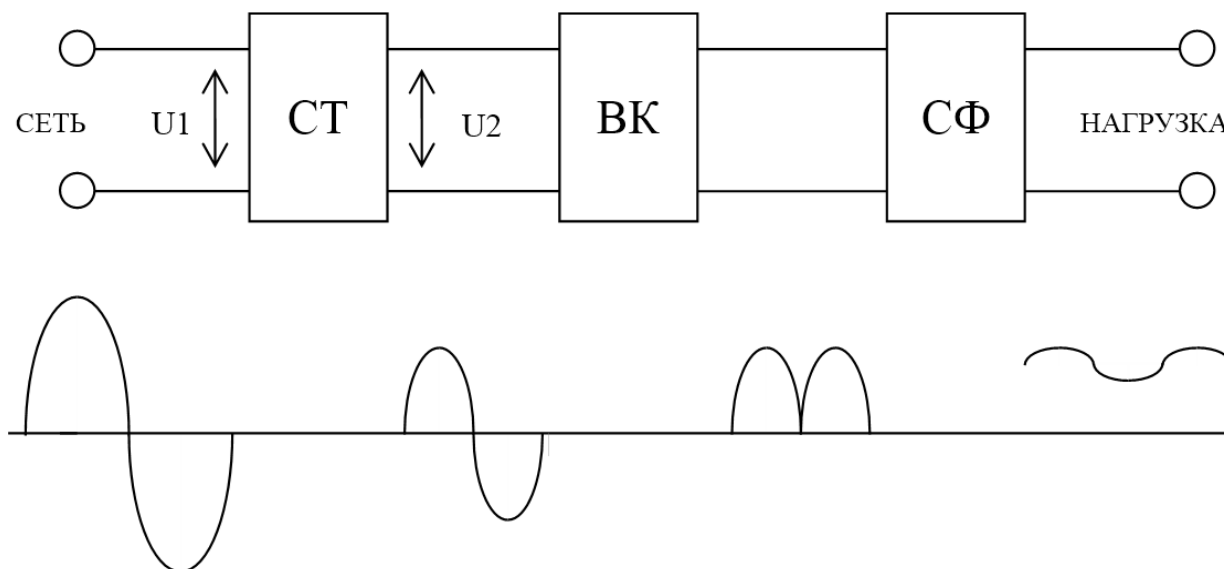
2 Краткие сведения из теории однофазных выпрямителей

Значительная часть элементов электронных устройств потребляет электрическую энергию в виде постоянного тока. Наиболее распространенным источником постоянного тока является выпрямитель.

Выпрямителем называют электротехническую систему, предназначенную для преобразования переменного тока в постоянный. Выпрямитель в большинстве случаев состоит из следующих элементов (см. рисунок 1):

- силового трансформатора, служащего для получения необходимого напряжения U_2 на вторичной обмотке при заданном напряжении сети U_1 ;

- вентильного комплекта, служащего для преобразования переменного тока в ток одного направления;
- сглаживающего фильтра, уменьшающего пульсацию выпрямленного напряжения.



СТ – силовой трансформатор, ВК – вентильный комплект, СФ – сглаживающий фильтр

Рисунок 1 – Структурная схема выпрямителя и временные диаграммы на примере двухполупериодной схемы

Во многих устройствах, где предъявляются повышенные требования к постоянству выпрямленного напряжения, а также при значительных колебаниях напряжения сети в сочетании с выпрямителями применяют стабилизаторы постоянного и переменного напряжения. В схему выпрямителя, кроме этих основных элементов, могут входить различные вспомогательные устройства, предназначенные для регулирования выпрямленного напряжения, включения и выключения выпрямителя, защиты выпрямителя от повреждений при нарушениях нормального режима работы, контрольно-измерительные приборы и т.д.

Для питания различных узлов электронной аппаратуры часто применяются выпрямители, рассчитанные на небольшие мощности и

работающие от однофазной сети переменного тока. Такие выпрямители называют однофазными. Они делятся на:

- однополупериодные, в которых ток через вентиль проходит только в течение одного полупериода переменного напряжения;
- двухполупериодные, в которых ток через вентиль проходит в течение обоих полупериодов.

2.1 Характеристики и основные параметры выпрямительных диодов

Полупроводниковым диодом называют полупроводниковый прибор с одним р-п переходом и двумя выводами, в котором используются свойства перехода.

Вольтамперной характеристикой полупроводникового диода называют зависимость тока, протекающего через диод от напряжения, приложенного к диоду. ВАХ диода приведена на рисунке 2.

Прямая ветвь вольтамперной характеристики (участок 1) характеризует режим работы полупроводникового диода, когда к нему приложено прямое напряжение (плюсом – к аноду). В этом режиме через диод могут протекать большие токи, так как его сопротивление крайне мало. Обратная ветвь ВАХ (участок 2) характеризует режим работы полупроводникового диода, когда к нему приложено обратное напряжение (плюсом – к катоду). В этом режиме через диод протекает то утечки (порядка микроампер), созданный неосновными носителями, а сопротивление диода очень велико.

Участок 3 характеризует режим работы полупроводникового диода, который носит название пробой. Пробой бывает двух видов: электрический (обратимый) и тепловой (необратимый). Для большинства диодов этот режим работы является нежелательным.

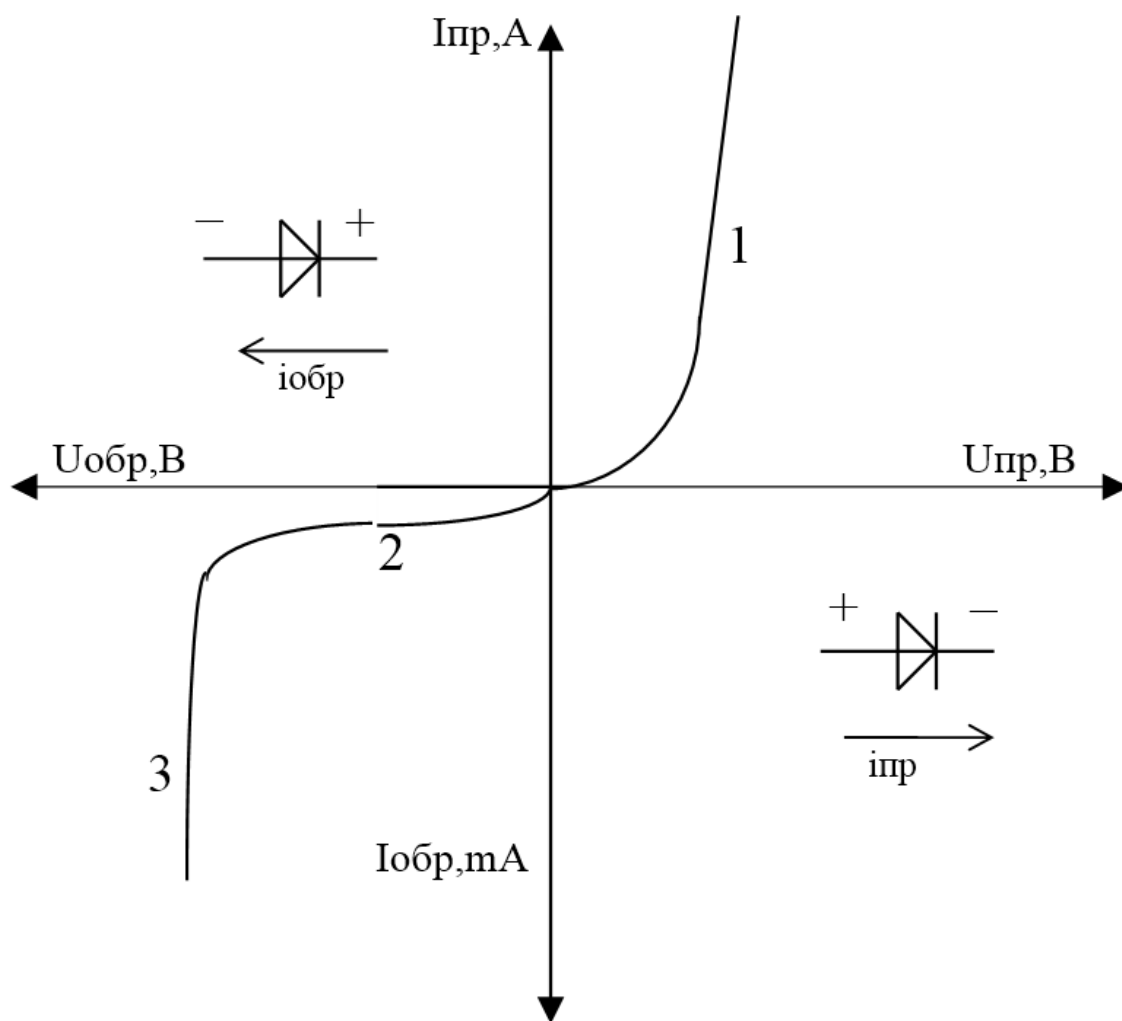


Рисунок 2 – Вольтамперная характеристика диода

Основными параметрами полупроводниковых диодов являются:

- $I_{пр}$ – максимально допустимый постоянный прямой ток;
- $I_{пр.макс.}$ – максимально допустимый импульсный прямой ток;
- $U_{пр}$ – постоянное прямое напряжение, соответствующее заданному току;
- $U_{обр}$ – максимально допустимое обратное напряжение диода;
- $I_{обр}$ – максимально допустимый постоянный обратный ток.

2.2 Однополупериодные выпрямители

Схема однополупериодного выпрямителя с активной нагрузкой приведена на рисунке 3. В этой схеме ток через вентиль и сопротивление нагрузки протекает только в течение половины периода переменного напряжения U_2 действующего на зажимах вторичной обмотки трансформатора, что иллюстрируется временными диаграммами, приведенными на рисунке 4.

Показанная на рисунке 4 постоянная составляющая $U_{ср}$ выпрямленного напряжения определяется по формуле:

$$U_d = \frac{\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 \approx 0,45 \cdot U_2 \quad (2.1)$$

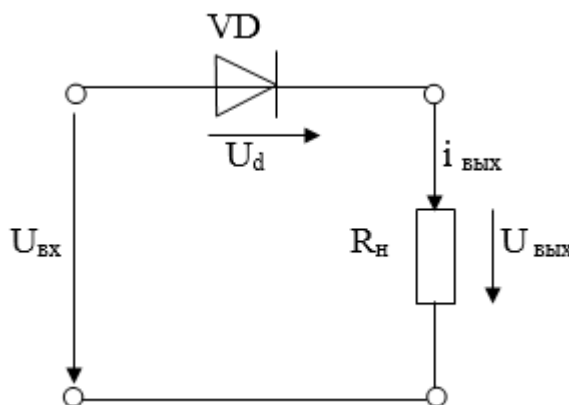


Рисунок 3 – Однополупериодный выпрямитель

Таким образом, постоянная составляющая выпрямленного напряжения U_d на нагрузке значительно меньше действующего напряжения U_2 на зажимах вторичной обмотки трансформатора.

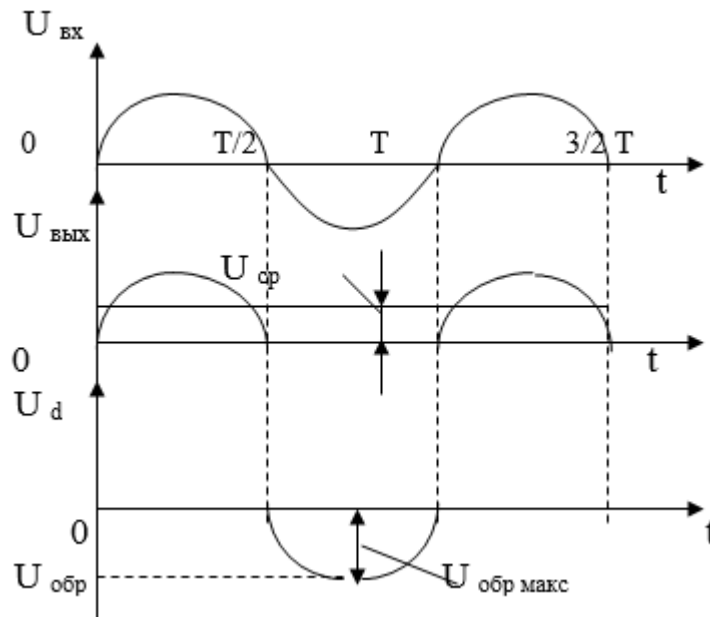


Рисунок 4 – Временные диаграммы однополупериодного выпрямителя

В течение полупериода, соответствующего отрицательным значениям напряжения U_2 , диод находится под напряжением, действующим на зажимах вторичной обмотки трансформатора. Следовательно, наибольшее обратное напряжение, приложенное к диоду, оказывается равным:

$$U_{\text{обр}} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \pi \cdot U_d \quad (2.2)$$

То есть обратное напряжение на диоде более чем в три раза превышает выпрямленное напряжение на нагрузке.

Из рисунка 4 видно, что напряжение на нагрузке $U_{\text{вых}}(t)$ достигает максимума один раз за период. Следовательно, частота пульсаций напряжения на нагрузке в однополупериодной схеме равна частоте сети f_c .

Величина пульсаций выпрямленного напряжения обычно характеризуется коэффициентом пульсаций:

$$K_{\text{п}} = \frac{U_{\text{м}}}{U_{\text{д}}} \quad (2.3)$$

где U_m – амплитуда первой гармоники переменной составляющей выпрямленного напряжения.

Для однополупериодной схемы амплитуда первой гармоники выпрямленного напряжения составляет:

$$U_m = \frac{\pi \cdot U_d}{2} \quad (2.4)$$

Значит, коэффициент пульсаций $K_p=1,57$.

Такая большая величина коэффициента пульсаций является основным недостатком однополупериодной схемы выпрямления. Кроме того, однополупериодный выпрямитель характеризуется крайне низким коэффициентом использования трансформатора, который представляет собой отношение мощности постоянной составляющей выпрямленного тока $P_d = U_d \cdot I_d$ к расчётной мощности трансформатора $P_{тр}$. Следует также иметь в виду, что постоянная составляющая тока вторичной обмотки создает добавочный магнитный поток, насыщающий магнитопровод трансформатора, то есть создает вынужденное намагничивание трансформатора.

Таким образом, однополупериодная схема выпрямления имеет ряд принципиальных недостатков, из-за которых не нашла широкого применения.

2.3 Двухполупериодные выпрямители

2.3.1 Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой (нулевым выводом)

Двухполупериодный выпрямитель со средней точкой представляет собой параллельное соединение двух однополупериодных выпрямителей. Рассматриваемый выпрямитель может использоваться только с трансформатором, имеющим вывод от середины вторичной обмотки (рисунок 5). Данный выпрямитель по существу является двухфазным, вторичная обмотка трансформатора создает два напряжения U_2' и U_2'' , равные по величине, но противоположные по направлению.

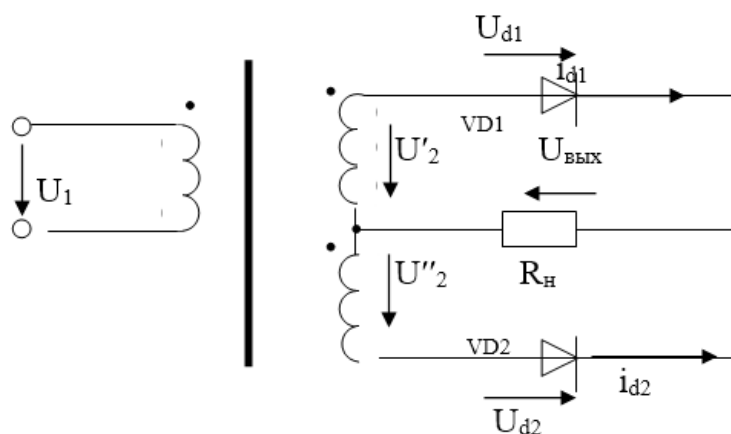


Рисунок 5 – Двухполупериодный выпрямитель.

Вентили VD1 и VD2 пропускают ток поочередно (рисунок 6).

В течение первого полупериода положительный потенциал имеет анод вентиля VD1, поэтому ток проходит через этот вентиль, сопротивление нагрузки R_n и полуобмотку с напряжением U_2' . В течение второго полупериода положительный потенциал имеет анод вентиля VD2, ток проходит по полуобмотке с напряжением U_2'' , через вентиль VD2 и по сопротивлению нагрузки R_n в том же направлении, что и в течение первого полупериода. Таким образом, в отличие от однополупериодного, в

двухполупериодном выпрямителе со средней точкой выпрямленный ток в нагрузке проходит в течение обоих полупериодов переменного тока (но каждая из половин вторичной обмотки трансформатора оказывается нагруженной током только половину периода). Поэтому среднее значение выпрямленного напряжения оказывается в два раза выше, чем в однополупериодном выпрямителе.

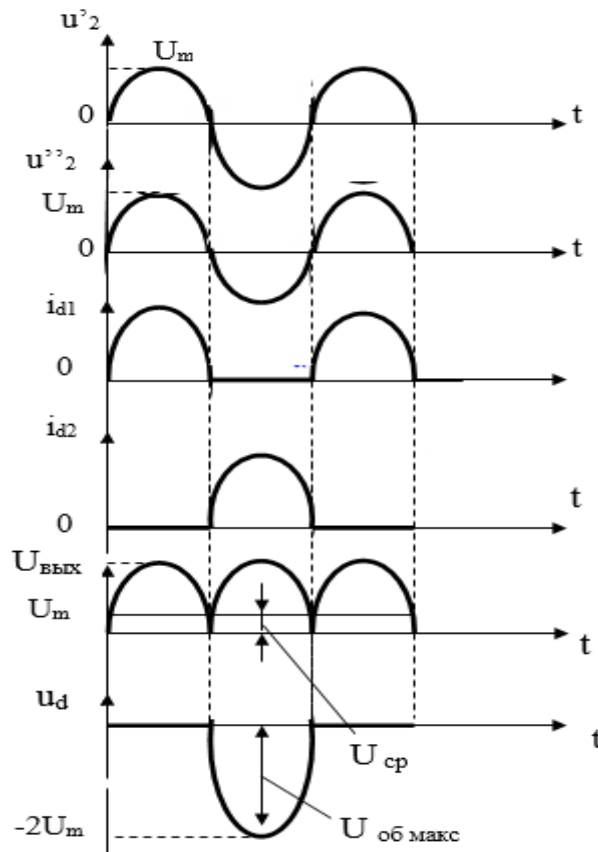


Рисунок 6 – Временные диаграммы двухполупериодного выпрямителя

$$U_d = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 \approx 0,9 \cdot U_2 \quad (2.5)$$

где U_2 – действующее значение напряжения каждой половины вторичной обмотки.

Среднее значение тока в вентиле:

$$I_a = \frac{I_d}{2} \quad (2.6)$$

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле

$$U_{\text{обр}} = 2 \cdot \sqrt{2} \cdot U_2 = \pi \cdot U_d \quad (2.7)$$

Из рисунка 6 видно, что напряжение на нагрузке достигает максимума два раза за период. Следовательно, частота пульсаций напряжения на нагрузке в двухполупериодной схеме равна удвоенной частоте сети.

Для двухполупериодной схемы, работающей на чисто активную нагрузку, коэффициент пульсаций равен $K_p=0,67$.

По сравнению с простейшим однополупериодным выпрямителем в выпрямителе со средней точкой силовой трансформатор используется лучше, выпрямленное напряжение имеет меньше пульсаций, нет вынужденного намагничивания трансформатора, так как постоянные составляющие тока в полубмотках вторичной обмотки протекают в противоположных направлениях. Необходимость осуществления вывода от средней точки является недостатком рассмотренной схемы, так как при этом усложняется трансформатор.

2.3.2 Двухполупериодный мостовой выпрямитель

Двухполупериодная мостовая схема выпрямителя (схема Гретца) приведена на рисунке 7. В схему входят силовой трансформатор и четыре вентиля VD1 – VD4, включенные по схеме моста. К одной диагонали моста присоединена вторичная обмотка трансформатора, а к другой – сопротивление нагрузки R_n . Вентили, катоды которых соединены, образуют

катодную группу вентилях (VD1 и VD3), а вентили с соединенными анодами образуют анодную группу вентилях (VD2 и VD4).

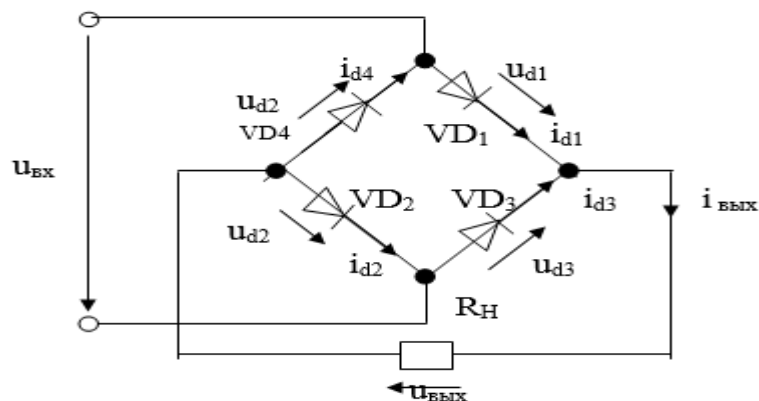


Рисунок 7 – Двухполупериодная мостовая схема

В схеме вентили пропускают ток попарно: VD1, VD2 и VD3, VD4, соединенные между собой и с нагрузкой последовательно. В каждую пару входит один вентиль из катодной группы, а второй – из анодной группы. В схеме пропускает ток та пара вентилях, у которой анод вентиля катодной группы (VD1 или VD3) имеет наиболее высокий положительный потенциал, а катод вентиля анодной группы (VD2 или VD4) – наиболее низкий отрицательный потенциал. Так, например, если потенциал верхнего вывода вторичной обмотки трансформатора станет выше потенциала нижнего вывода (рисунок 8), анод вентиля VD1 будет иметь наиболее высокий, а катод вентиля VD2 – наиболее низкий потенциал. В этом случае ток протекает от верхнего вывода вторичной обмотки трансформатора через вентиль VD1, нагрузку R_H , вентиль VD2 – к нижнему выводу вторичной обмотки трансформатора. С изменением знака U_2 катод вентиля VD4 имеет самый низкий потенциал, а анод вентиля VD3 – наиболее высокий потенциал, поэтому ток будут пропускать вентили VD3 и VD4.

Среднее значение выпрямленного напряжения оказывается таким же, как и в схеме со средней точкой:

$$U_d = \frac{2 \cdot \sqrt{2}}{\pi} \cdot U_2 \approx 0,9 \cdot U_2 \quad (2.8)$$

$$I_a = \frac{I_d}{2} \quad (2.9)$$

Максимальное значение обратного напряжения на вентиле

$$U_{\text{обр}} = \sqrt{2} \cdot U_2 = \frac{\pi}{2} \cdot U_d \quad (2.10)$$

Как видно, обратное напряжение в два раза меньше, чем для схемы со средней точкой.

Так как мостовая схема является двухполупериодной, то частота пульсаций выпрямленного напряжения равна удвоенной частоте сети, а коэффициент пульсаций такой же, как и в схеме со средней точкой равен $K_p=0,67$.

Мостовая схема получила широкое распространение в современных выпрямителях. Сохраняя все достоинства схемы со средней точкой, она имеет следующие преимущества:

- размеры и масса трансформатора меньше вследствие лучшего использования обмоток по току. Эта особенность мостовой схемы основана на том, что ток протекает в течение периода по всей вторичной обмотке трансформатора, а не в одной ее половине;
- конструкция трансформатора проще, так как не требуется специальный вывод от средней точки вторичной обмотки;
- обратное напряжение на вентиле оказывается в два раза меньше.

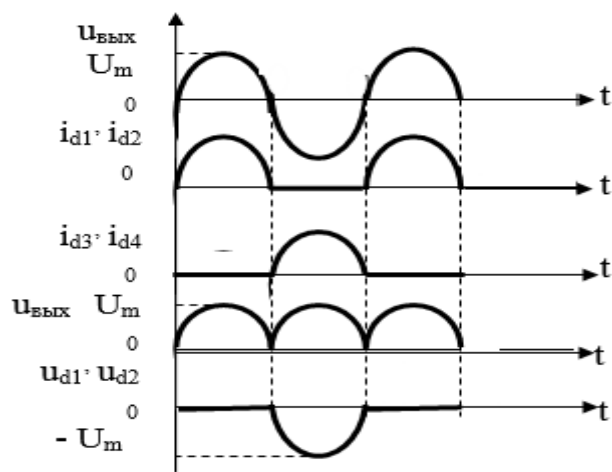


Рисунок 8 – Временные диаграммы двухполупериодной мостовой схемы

3 Сглаживающие фильтры

В большинстве случаев при питании электронной аппаратуры допускается весьма малая пульсация выпрямленного напряжения. Между тем, на выходе основных выпрямительных схем пульсация во много раз превышает допустимую. Для уменьшения пульсации выпрямленного напряжения применяют сглаживающие фильтры.

Любой сглаживающий фильтр должен обеспечивать снижение пульсации выпрямленного напряжения до заданного уровня, то есть должен обладать необходимым коэффициентом сглаживания q , величина которого определяется отношением:

$$q = \frac{K_{п}}{K_{п'}} \quad (2.11)$$

где $K_{п}$ и $K_{п'}$ – коэффициенты пульсации до и после сглаживающего фильтра.

К простейшим сглаживающим фильтрам относят однозвенные L- и C-фильтры. Действие дросселя, как элемента фильтра сводится к тому, что на

нем теряется наибольшая часть переменной составляющей напряжения, так как его сопротивление $X_{L\phi} = \omega \cdot L_{\phi}$ стремятся выбрать значительно больше нагрузочного сопротивления R_H . Для постоянной составляющей выпрямленного тока индуктивное сопротивление дросселя равно нулю. Следовательно, потери постоянной составляющей напряжения на дросселе обусловлены лишь его незначительным активным сопротивлением и в большинстве случаев ими можно пренебречь.

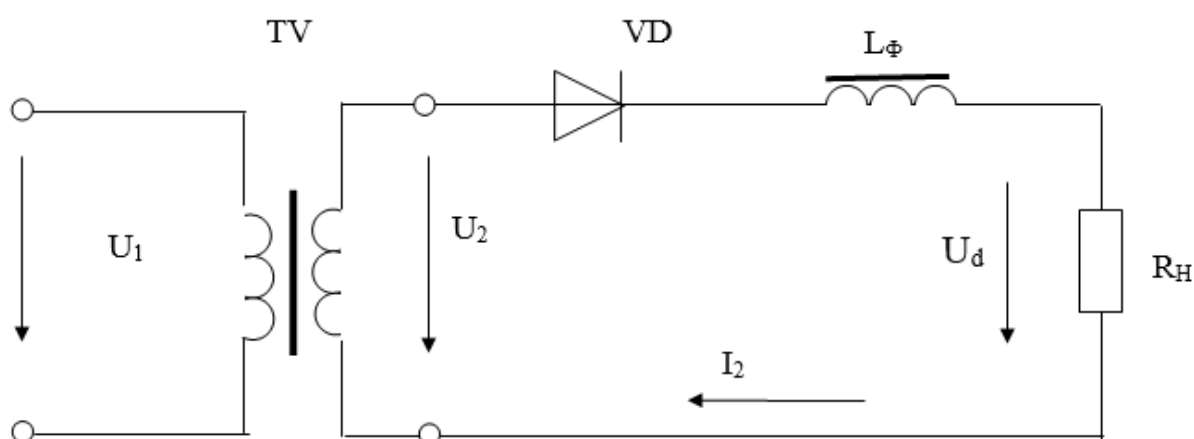


Рисунок 9 – Сглаживающий L-фильтр

Действие конденсатора, как элемента фильтра сводится к тому, что шунтируя сопротивление нагрузки, он пропускает через себя наибольшую долю переменной составляющей выпрямленного тока, так как сопротивление $X_{C\phi} = 1/\omega \cdot C_{\phi}$ стремятся выбрать значительно меньше нагрузочного сопротивления R_H . Для постоянного тока сопротивление $X_{C\phi}$ бесконечно велико, поэтому вся постоянная составляющая выпрямленного тока проходит через сопротивление нагрузки.

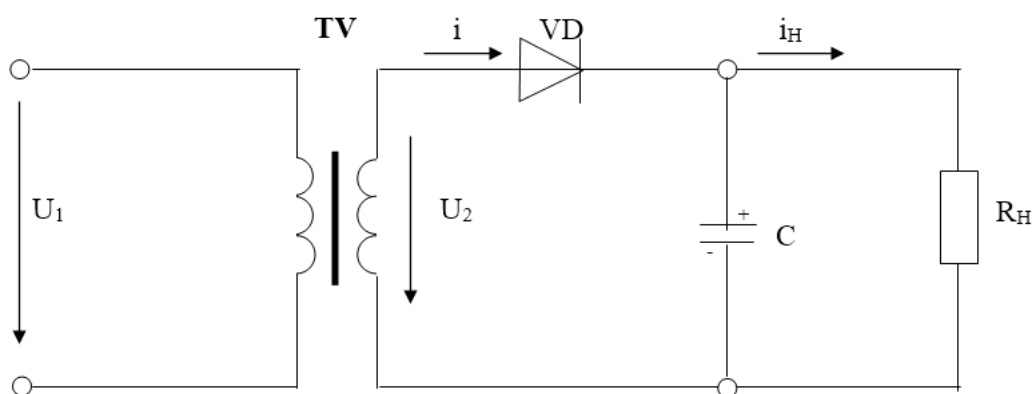


Рисунок 10 – Сглаживающий С-фильтр

Емкостный фильтр наиболее эффективен для малых нагрузок (с большим R_H), а индуктивный фильтр наиболее эффективен в цепях с большой нагрузкой (с малыми значениями R_H).

В случае, когда расчётные значения C_f или L_f получаются слишком большими, применяют Г-образный, или многозвенный фильтр.

4 Магнитопроводы дросселей и трансформаторов

Трансформатором называется элемент радиоэлектронной аппаратуры, предназначенный для получения различных по амплитуде и мощности переменных напряжений.

По виду используемого магнитного сердечника различают трансформаторы с пластинчатым, ленточным и прессованным сердечниками.

Пластинчатый сердечник представляет собой набор штампованных (до 0,65 мм.) одинаковых пластин. Ленточный, с толщиной ленты до 0,1 мм – витую конструкцию. Прессованный сердечник получают из магнитных порошков путем прессования. В последнее время наибольшее применение получили ленточные и прессованные сердечники, позволяющие эффективнее использовать свойства магнитных материалов (отсутствуют стыки, магнитный поток направлен всегда вдоль проката).

По конструктивному исполнению трансформаторы подразделяют на броневые, стержневые и тороидальные (кольцевые).

Магнитопровод броневых трансформаторов выполняется либо из Ш – образных пластин, либо из двух ленточных колец (рисунок 11), все обмотки располагаются на среднем стержне.

Достоинствами этих трансформаторов являются: наличие одной катушки; более высокое заполнение окна магнитопровода, частичная защита катушки от механических повреждений.

Магнитопровод стержневого сердечника выполнен либо из П – образных пластин, либо из одного ленточного кольца.

В этих трансформаторах катушки располагаются на обоих стержнях. При этом на каждом стержне помещается половина витков первичной и вторичной обмоток. Они соединяются между собой последовательно так, чтобы намагничивающие силы этих полуобмоток совпадали по направлению. Недостатком стержневых трансформаторов является наличие двух катушек.

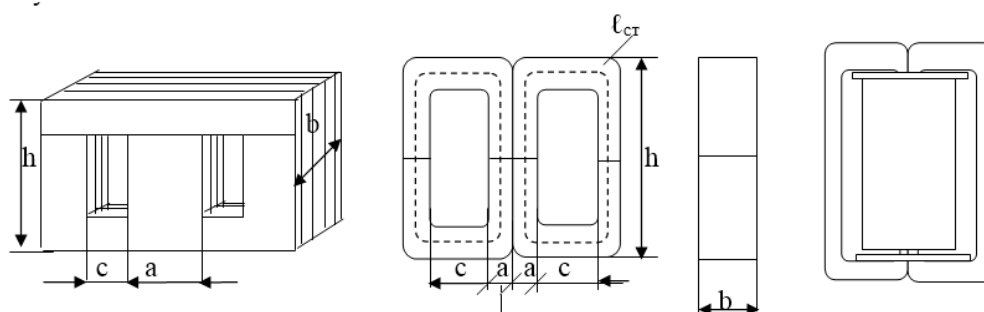


Рисунок 11 – Магнитопровод броневых трансформаторов

В соответствии с рекомендациями ГОСТ 22050-76 магнитопроводы типа ШЛМ применяют в трансформаторах наименьшей массы и стоимости на частоте 50 Гц до мощности порядка 100 В·А, а магнитопроводы ПЛМ – при мощности свыше 100 В·А. Магнитопроводы типа ПЛ целесообразно применять в низковольтных трансформаторах на частотах 50 и 400 Гц мощностью свыше 500 В·А.

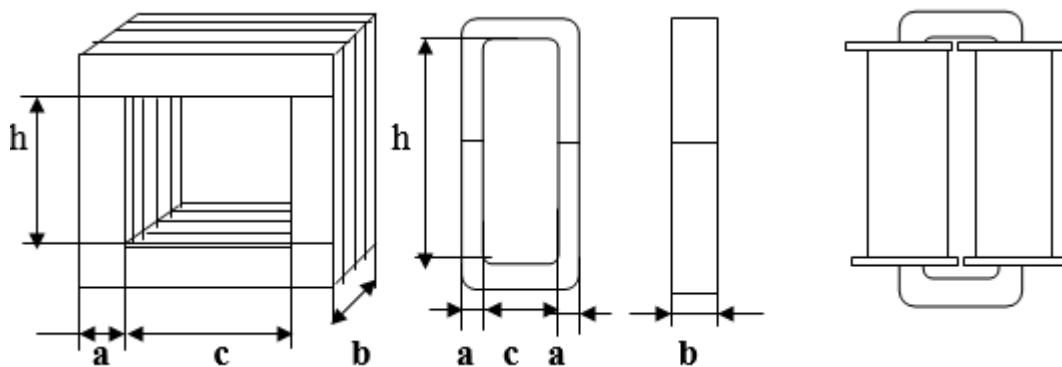


Рисунок 12 – Магнитопровод стержневого сердечника

Магнитопроводы дросселей сглаживающих фильтров почти такие же, как и у трансформаторов. Они отличаются тем, что в них предусматривается «воздушный» зазор на пути прохождения магнитных силовых линий. Практически этот зазор заполняется изоляционной (диэлектрической) прокладкой, чем длина зазора фиксируется.

Электрическая схема обмоток трансформатора или дросселя определяется их назначением. В простейшем случае в дросселе сглаживающего фильтра имеется одна обмотка, а в силовом трансформаторе – две. Практически же обмотки трансформаторов и дросселей могут быть выполнены по одной из схем (рисунок 13).

Для намотки применяются медные провода круглого сечения. Если сечение одного провода оказывается недостаточным, практикуют соединение нескольких проводов параллельно друг другу.

Основными параметрами трансформаторов являются:

- номинальное напряжение первичной обмотки трансформатора U_1 ;
- номинальный ток первичной обмотки трансформатора I_1 ;
- напряжения вторичных обмоток трансформатора U_{2i} ;
- токи вторичных обмоток трансформатора I_{2i} ;

- напряжение холостого хода трансформатора U_0 – напряжение на любой разомкнутой вторичной обмотке при номинальных частоте и напряжении на первичной обмотке;
- номинальная мощность трансформатора P_n – сумма мощностей вторичных обмоток;
- коэффициент трансформации n_i – отношение напряжений на зажимах первичной и вторичных обмоток при холостом ходе;
- частота питающей сети, f_c .

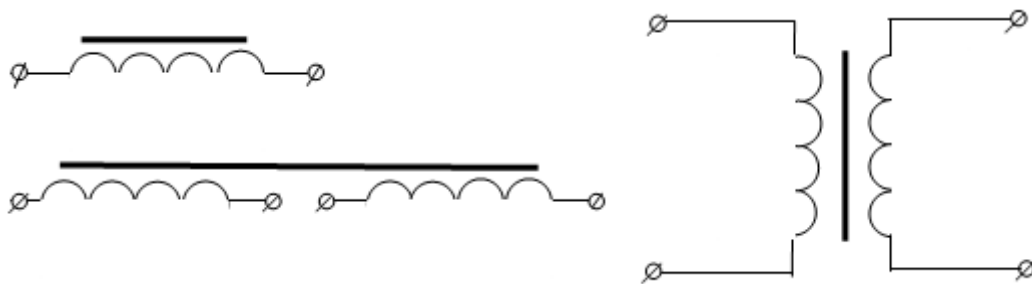


Рисунок 13 – Дроссели и трансформаторы

5 Порядок расчёта выпрямителя

Задача расчёта выпрямителя состоит в том, что необходимо по заданным техническим требованиям к выпрямителю определить параметры элементов схемы выпрямителя.

К требованиям, предъявляемым к выпрямителям, прежде всего относятся:

- выпрямленное напряжение U_d ;
- выпрямленный ток I_d ;
- коэффициент пульсаций K_p ;
- напряжение питания сети U_1 ;
- частота тока питающей сети f_c .

По заданным техническим требованиям необходимо:

- выбрать тип вентиляей;

- рассчитать элементы сглаживающего фильтра;
- выполнить конструктивный расчёт трансформатора;
- составить схему выпрямителя.

Приведенный ниже порядок расчёта, разработанный Б.П. Терентьевым, применим для маломощных однофазных выпрямителей, работающих на активно-емкостную нагрузку.

5.1 Расчёт однофазных выпрямителей

Выпрямленный ток в нагрузке

$$I_d = \frac{U_d}{R_h} \quad (5.1)$$

где R_h - сопротивление нагрузки, Ом;

U_d - выпрямленное напряжение, В.

Ориентировочные значения среднего тока I_a через вентиль и максимального обратного напряжения $U_{обр}$, приложенного к вентилю:

$I_a = I_d$ - для однополупериодной схемы;

$I_a = I_d/2$ - для двухполупериодных схем;

$U_{обр} = 1,57 \cdot U_d$ - для однополупериодной и двухполупериодной мостовой;

$U_{обр} = 3,14 \cdot U_d$ - для двухполупериодной схемы с нулевым выводом.

Из таблицы, приведенной в приложении А, по вычисленным значениям I_a и $U_{обр}$ находят полупроводниковый диод, у которого ток через вентиль и обратное напряжение не меньше вычисленных. (Следует учесть, что обычно $I_{макс} = (3 - 10) I_a$).

Активное сопротивление фазы трансформатора

$$R_{\text{тр}} = \frac{K_r \cdot U_d}{I_d \cdot f_c \cdot 1,2} \cdot \sqrt{\frac{1,2 \cdot n \cdot f_c}{U_d \cdot I_d}} \quad (5.2)$$

где K_r - коэффициент, зависящий от схемы выпрямления. Принимают: для однополупериодной схемы $K_r=2,3$, для двухполупериодной нулевой $K_r=4,7$, для двухполупериодной мостовой $K_r=3,5$;

n - количество стержней магнитопровода трансформатора, имеющих обмотки (для броневого $n=1$, для стержневого $n=2$).

Прямое сопротивление вентиляей

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}'}{I_a} \quad (5.3)$$

где $U_{\text{пр}}'$ - прямое падение напряжения на вентиле, определяют при помощи рисунка 14.

По оси ординат рисунка 14 откладывают относительное значение тока вентиля $I_{\text{пр}}=I_a/I_{\text{макс}}$. Здесь значение $I_{\text{макс}}$ берут из таблицы А. Затем находят точку пересечения с вспомогательной кривой и опуская из этой точки перпендикуляр находят величину $U_{\text{пр}}^*$. Тогда $U_{\text{пр}}'=U_{\text{пр}}^* \cdot U_{\text{пр}}$, где $U_{\text{пр}}$ – табличное значение.

Сопротивление фазы выпрямителя

$$R_{\text{ф}} = R_{\text{тр}} + k_n \cdot R_{\text{пр}} \quad (5.4)$$

где k_n - коэффициент, зависящий от схемы выпрямления, равный $k_n=1$ - для однополупериодной схемы и двухполупериодной нулевой; $k_n=2$ - для двухполупериодной мостовой схемы.

По формуле, приведенной в таблице 4 вычисляют вспомогательный коэффициент А.

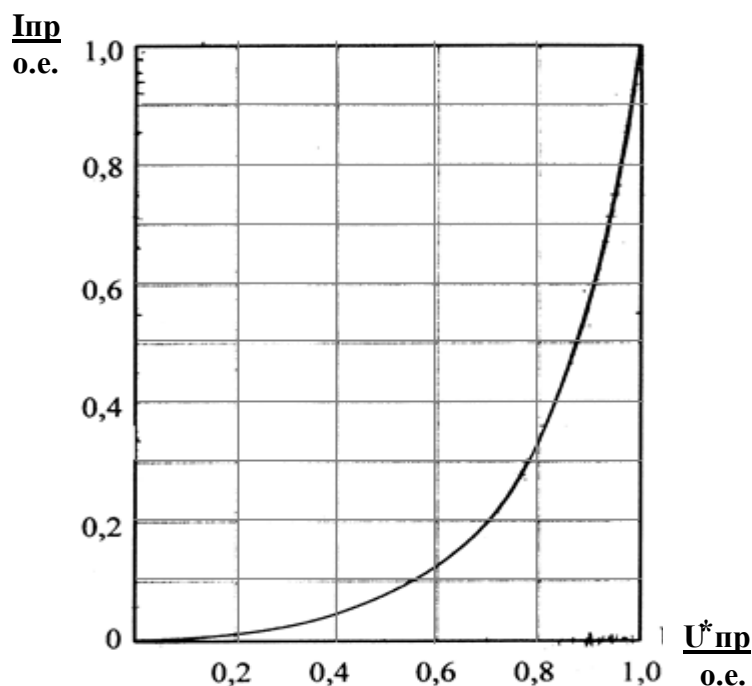


Рисунок 14 – Зависимость падения напряжения от тока вентиля

По рисунку 15 определяют коэффициенты В, F, D.

По формулам, приведенным в таблице 4, вычисляют значения обратного напряжения $U_{обр}$, амплитуду тока через вентиль $I_{макс}$, напряжение U_2 и ток I_2 вторичной обмотки трансформатора.

Производят проверку предварительно выбранного диода по $I_{макс}$ и $U_{обр}$. Если выбранный диод не подходит по этим параметрам, то его нужно заменить другим из таблицы А. При этом, если новый диод имеет другое значение $U_{пр}$, то необходимо пересчитать $R_{пр}$.

Таблица 4 – Расчёт параметров выпрямителя

Схема выпрямителя	A	U ₂ , В	U _{обр} , В	I ₂ , А	I _{макс} , А	К _п
однополупериодная	$\frac{3,2 \cdot R_{\phi} \cdot I_d}{U_d}$	B · U _d	2,8 · U ₂	D · I _d	F · I _d	1,57
двухполупериодная нулевая	$\frac{1,6 \cdot R_{\phi} \cdot I_d}{U_d}$	2 · B · U _d	2,8 · U ₂	0,5 · D · I _d	0,5 · F · I _d	0,67
двухполупериодная мостовая	$\frac{1,6 \cdot R_{\phi} \cdot I_d}{U_d}$	B · U _d	1,4 · U ₂	0,5 · D · I _d	0,5 · F · I _d	0,67

Используя вспомогательный коэффициент A по рисунку 16 находят коэффициент H (кривая 1 - для однополупериодной схемы; кривая 2 - для двухполупериодных схем).

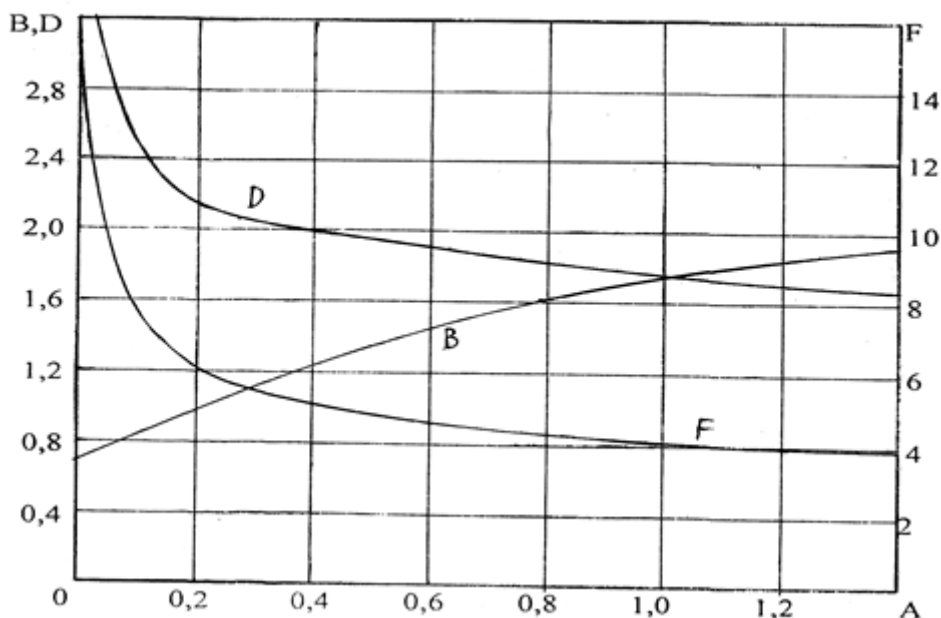


Рисунок 15 – Графическое определение вспомогательных коэффициентов

Емкость конденсатора фильтра по формуле:

$$C_{\phi} = \frac{100 \cdot H}{R_{\phi} \cdot K_{пз}} \quad (5.5)$$

где K_{пз} - коэффициент пульсаций выпрямителя по заданию, %.

Если рассчитанная емкость фильтра окажется больше 1000 мкФ, целесообразно применить Г-образный фильтр. Расчет элементов фильтра выполняется в следующей последовательности.

Коэффициент сглаживания фильтра

$$q = \frac{K_{п}}{K_{пз}} \quad (5.6)$$

где $K_{п}$ - коэффициент пульсаций выпрямленного напряжения заданной схемы выпрямителя при его работе на активную нагрузку. Определяется по таблице 4.

Произведение $L \times C$ фильтра

$$L \cdot C = \frac{10 \cdot (q+1)}{m\pi} \quad (5.7)$$

где $m\pi$ - периодичность выпрямленного напряжения, представляющая собой число пульсаций выпрямленного напряжения за период напряжения сети (для однополупериодной схемы $m\pi=1$; для двухполупериодных схем $m\pi=2$).

Индуктивность фильтра

$$L = \frac{L \cdot C}{C} \quad (5.8)$$

где C - принимаемая емкость фильтра, мкФ. Должна находиться в пределах $C = 300 - 1000$ мкФ.

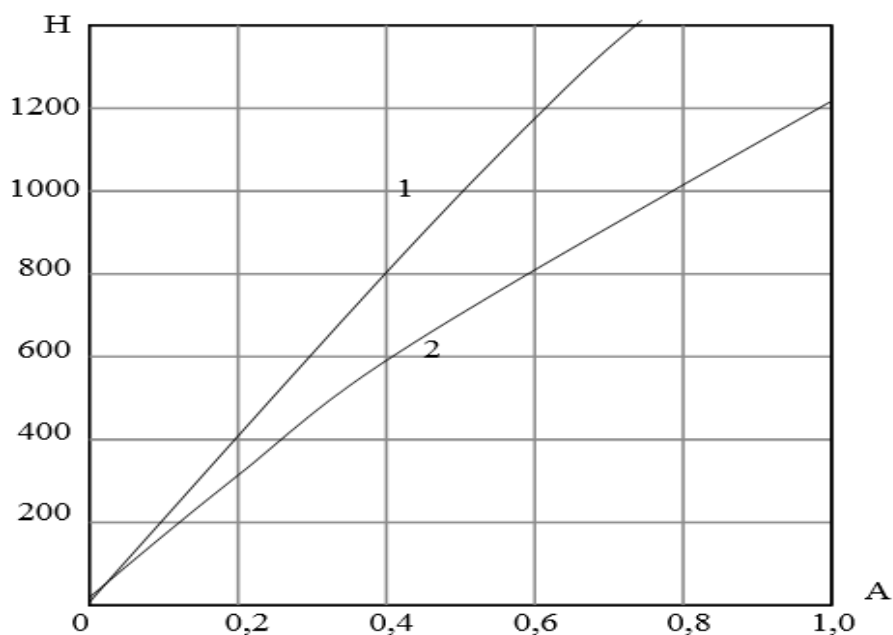


Рисунок 16 – Вспомогательный коэффициент для расчёта сглаживающего фильтра

5.2 Конструктивный расчёт трансформатора

Исходной величиной для расчёта маломощного силового трансформатора является его мощность

$$P_{\text{тр}} = U_2 \cdot I_2 \quad (5.9)$$

где U_2 – напряжение вторичной обмотки, В;

I_2 – ток вторичной обмотки, А.

Выбор максимальной индукции B_m в магнитопроводе трансформатора производят в зависимости от его мощности по таблице 5.

Таблица 5 – Выбор магнитной индукции

$P_{\text{тр}}$, Вт	5 – 15	15 – 50	50 – 150	150 – 300	300 – 500
B_m , Тл	0,8-1,0	1,0- 1,1	1,1-1,3	1,3-1,4	1,4-1,45

Определяется величина $S_{ок} \times S_c$ по рисункам 17, 18. Здесь $S_{ок}$ – площадь окна магнитопровода, в котором размещаются обмотки, $см^2$; S_c – активное сечение стержня магнитопровода, $см^2$.

Пользуясь таблицами Б.1 – Б.3 приложения, выбирают такой магнитопровод промышленного изготовления, у которого $S_{ок} \times S_c$ не меньше определенного по рисунку 17.

Вычисляют ЭДС одного витка по формуле:

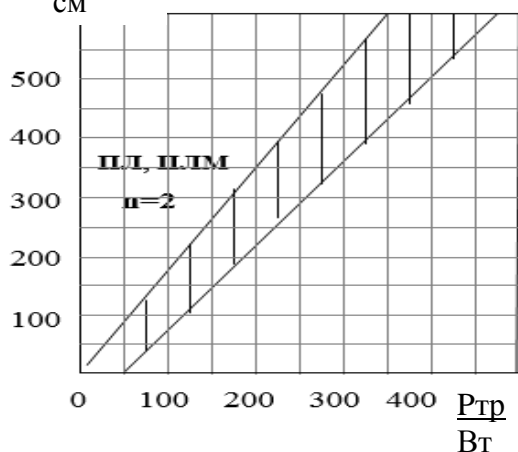
$$e_B = 4,44 \cdot f_c \cdot k_z \cdot 10^{-4} \quad (5.10)$$

где f_c – частота питающей сети. Принять для всех вариантов $f_c=50$ Гц;

k_z – коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью.

Принимаем для ленточных магнитопроводов $k_z=0,9 – 0,95$.

$\frac{S_c \times S_{ок}}{см^4}$



$\frac{S_c \times S_{ок}}{см^4}$

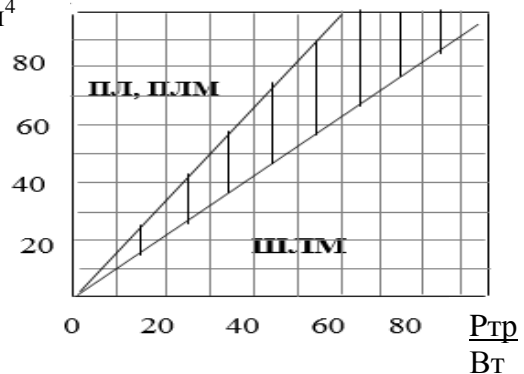


Рисунок 17 – Выбор площади окна магнитопровода

Определяют число витков обмоток трансформатора.

Число витков первичной обмотки

$$\omega_1 = \frac{E_1}{e_B} \quad (5.11)$$

где E_1 – ЭДС первичной обмотки, В.

$$E_1 = U_1 \cdot \left(\frac{1 - \Delta U}{100}\right) \quad (5.12)$$

где U_1 – напряжение первичной обмотки, В;

ΔU – падение напряжения на обмотках при нагрузке трансформатора, %.

Падение напряжения ΔU в процентах определяют по рисунку 18 в зависимости от мощности трансформатора.

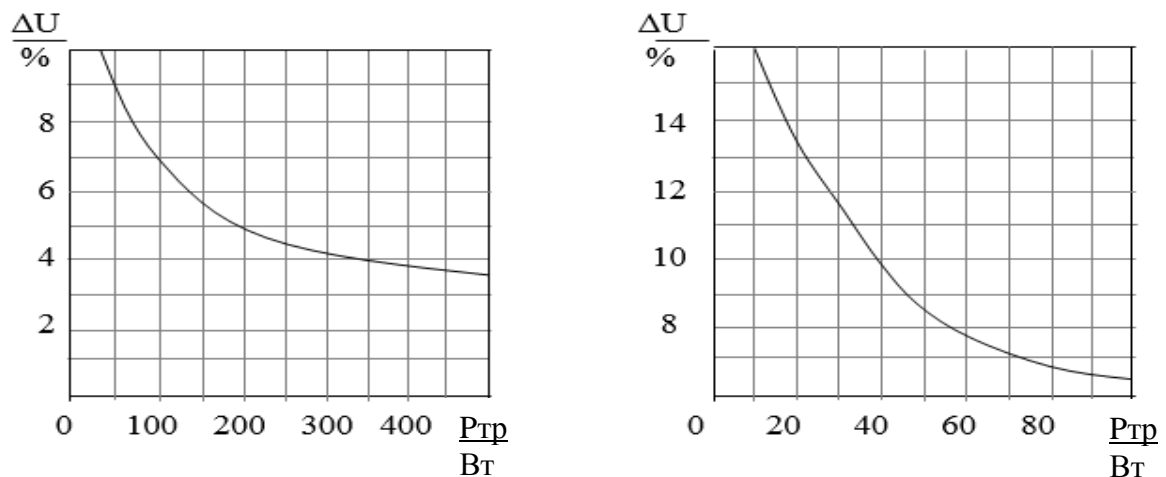


Рисунок 18 – Определение падения напряжения

Число витков вторичной обмотки

$$\omega_2 = \frac{E_2}{e_B} \quad (5.13)$$

где E_2 – ЭДС вторичной обмотки, В.

$$E_2 = U_2 \cdot \left(\frac{1 - \Delta U}{100}\right) \quad (5.14)$$

Ток холостого хода трансформатора

$$I_{xx} = I_{сг} \cdot \left(\frac{1}{\omega_1}\right) \quad (5.15)$$

где H_α – напряженность магнитного поля при выбранной индукции B_m ,
 выражаемая обычно как удельные ампер-витки намагничивания,
 $A \cdot \text{витки}/\text{см}$;

$l_{\text{ст}}$ – средняя длина магнитной силовой линии, определяемая по
 таблицам Б.1 – Б.3.

Напряженность магнитного поля определяют по рисунку 19.

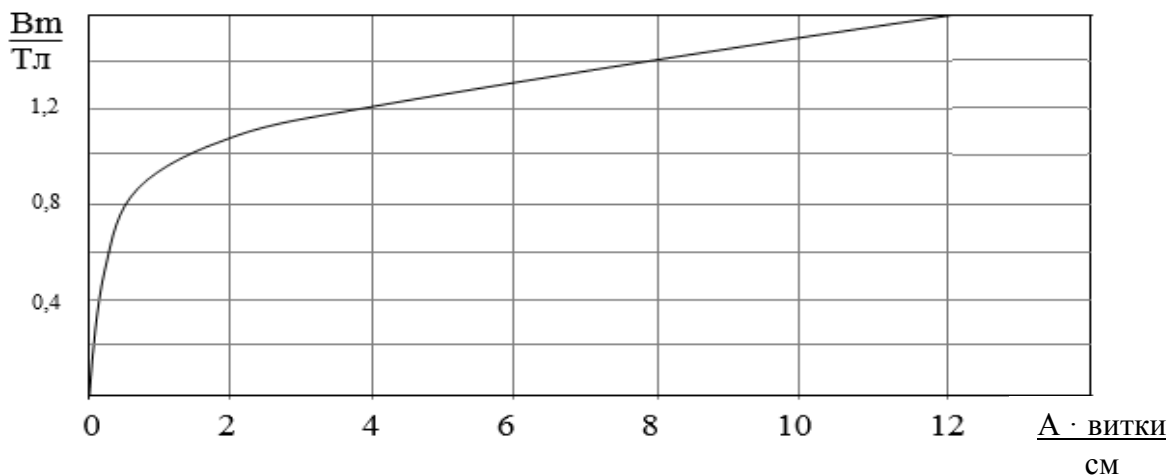


Рисунок 19 – Определение напряженности магнитного поля

Полный ток первичной обмотки

$$I_{д1} = \sqrt{I_1^2 + I_{\text{ХХ}}^2} \quad (5.16)$$

где I_1 – ток вторичной обмотки, приведенный к первичной обмотке, А.

Ток вторичной обмотки, приведенный к первичной

$$I_1 = \frac{P_{\text{ТР}}}{U_1} \quad (5.17)$$

Сечение проводов обмоток определяют по формуле:

$$q_i = \frac{I_i}{J_i} \quad (5.18)$$

где J_i – плотность тока в i -той обмотке, А/мм².

Плотность тока в обмотках трансформатора определяют по рисунку 20.

Далее по полученным значениям сечений проводников подбирают стандартные провода из таблицы В.1 и выписывают соответствующие им диаметры и сопротивления. Для первичной обмотки трансформатора следует принимать провода типа 2, а для вторичной – типа 1.

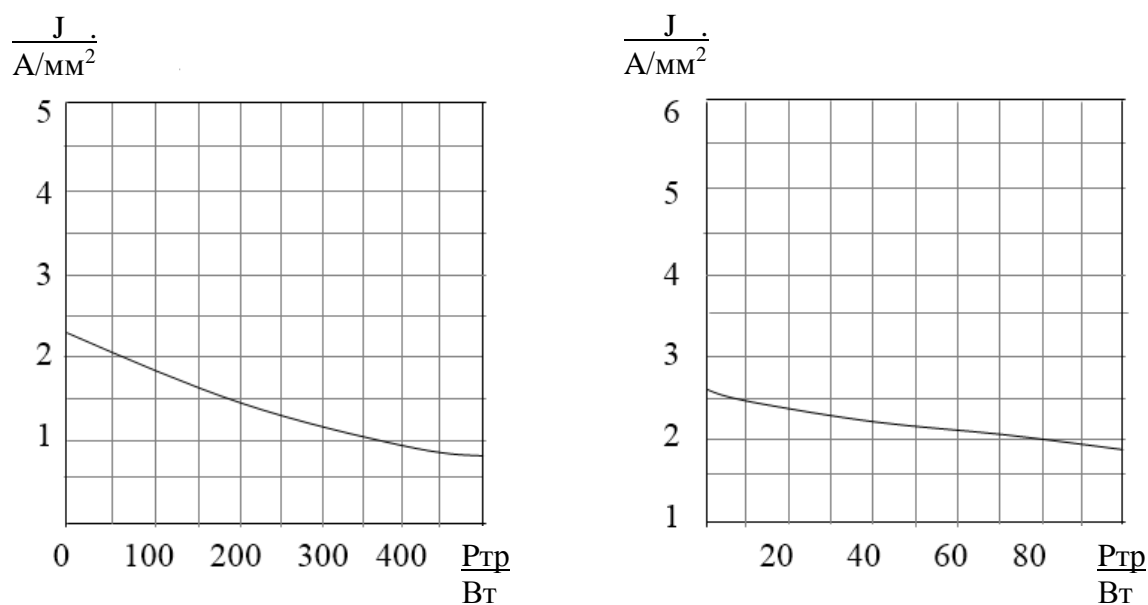


Рисунок 20 – Определение плотности тока в обмотках

Проверка размещения обмоток в окне магнитопровода.

Если трансформатор выполняется на стержневом магнитопроводе типа ПЛ или ПЛМ, то на каждом его стержне размещают катушку, содержащую по половине первичной и вторичной обмоток, соединив последовательно половины обмоток.

Число витков в слое обмотки

$$\omega_{\text{сли}} = \frac{h - 2 \cdot (\delta_{\text{карк}} + 2)}{\alpha \cdot d_i} \quad (5.19)$$

где $\delta_{\text{карк}}$ - толщина материала каркаса, мм. Принимать $\delta_{\text{карк}} = 0,5 - 1,5$ мм;

d_i - диаметр проводника i -той обмотки, мм;

α - коэффициент неплотности, определяемый по таблице 5, в зависимости от диаметра проводника.

Таблица 6 – Определение коэффициента неплотности

Диаметр проводника, мм	Коэффициент неплотности α
0,08 – 0,11	1,30
0,15 – 0,25	1,25
0,35 – 0,41	1,20
0,51 – 0,93	1,10
Более 1,0	1,05

Число слоев

$$n_{\text{сли}} = \frac{\omega_i}{\omega_{\text{сли}}} \quad (5.20)$$

Толщина обмотки

$$\delta_{\text{обм}i} = n_{\text{сли}} \cdot (d + \delta_{\text{из}}) \quad (5.21)$$

где $\delta_{\text{из}}$ - толщина изоляции между слоями, мм. Принимать $\delta_{\text{из}} = 0,05 - 0,1$ мм.

Таким образом подсчитывают толщину обоих обмоток. В результате должно выполняться условие:

$$c \geq \delta_{\text{карк}} + \sum \delta_{\text{обм}} + \delta_{\text{пр}} + \delta_{\text{заз}} \quad (5.22)$$

где $\sum \delta_{\text{обм}}$ – суммарная толщина всех обмоток, мм;

$\delta_{\text{пр}}$ – суммарная толщина прокладок между обмотками, мм. Принимать

$$\delta_{\text{пр}} = 1,0 - 1,5 \text{ мм};$$

$\delta_{\text{заз}}$ – необходимый зазор между двумя катушками стержневого трансформатора, мм. Принимать $\delta_{\text{заз}} = 1,0 - 1,5$ мм; для броневое трансформатора принимать $\delta_{\text{заз}} = 0$ мм.

Если это условие не выполняется, то следует увеличить размеры магнитопровода и выполнить расчёт трансформатора сначала.

Суммарные потери трансформатора

$$\sum P = P_M + P_{\text{ст}} \quad (5.23)$$

где P_M – суммарные потери в меди обмоток трансформатора, Вт;

$P_{\text{ст}}$ – суммарные потери в магнитопроводе (на гистерезис и вихревые токи), Вт.

Суммарные потери в меди обмоток

$$P_M = \sum I_i^2 \cdot R_i \quad (5.24)$$

где R_i – активное сопротивление i -той обмотки, Ом.

Активное сопротивление каждой обмотки трансформатора при нагреве можно определить в виде:

$$R_i = R_{oi} \cdot (1 + \alpha t \cdot \Delta t) \cdot l_{cpi} \cdot \omega_i \quad (5.25)$$

где R_{oi} – сопротивление 1м провода обмотки данного сечения, Ом.

Находится по таблице В.1;

$\alpha t = 0,004$ – температурный коэффициент сопротивления медного провода;

Δt – разность температур нагретой обмотки и температуры окружающей среды, °С. Принимать: для стержневого трансформатора $\Delta t = 80^\circ\text{C}$; для броневоего – $\Delta t = 65^\circ\text{C}$;

l_{cpi} – средняя длина одного витка i-той обмотки трансформатора, м.

Длину витка первичной обмотки вычисляют по формуле:

$$l_{cpr} = 2 \cdot (a + b) + \pi \cdot \delta_{обм1} \quad (5.26)$$

Длину витка вторичной обмотки находят исходя из того, что она наматывается поверх первичной обмотки. Тогда длина витка вторичной обмотки будет равна:

$$l_{cpr} = l_{cp1} + \pi \cdot (\delta_{обм1} + \delta_{обм2}) \quad (5.27)$$

Суммарные потери в магнитопроводе

$$P_{ст} = K_{сб} \cdot P_{ст} \cdot (B_m)^2 \cdot G_{ст} \quad (5.28)$$

где $K_{сб} = 1,1 - 1,3$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в магнитопроводе при сборке;

$G_{ст}$ – масса магнитопровода, кг;

$p_{ст}$ – удельные потери в материале магнитопровода, Вт/кг. Принимать

$p_{ст}=0,8 \dots 1,1$ Вт/кг.

Вес магнитопровода подсчитывают по формуле:

– для однофазного П-образного магнитопровода

$$G_{ст} = S_c \cdot \gamma_{ст} \cdot l_{ст} \cdot K_{сб} \quad (5.29)$$

– для однофазного Ш-образного магнитопровода

$$G_{ст} = 2 \cdot S_c \cdot \gamma_{ст} \cdot l_{ст} \cdot K_{сб} \quad (5.30)$$

где $\gamma_{ст}=7800$ кг/м³ – плотность электротехнической стали;

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_{тр}}{P_{тр} + \Sigma P} \quad (5.31)$$

Определение тепловой напряженности трансформатора

$$Q_0 = \frac{\Sigma P}{S_{охл}} \leq Q_{доп} \quad (5.32)$$

где $S_{охл}$ – поверхность охлаждения обмоток трансформатора, м²;

Q_0 – допустимая тепловая напряженность трансформатора, Вт/м².
Принимают $Q_0=800$ Вт/м² - для стержневых трансформаторов;
 $Q_0=650$ Вт/м² – для броневых трансформаторов.

Поверхность охлаждения определяют по формуле:

$$S_{\text{охл}} = 2\pi \cdot h \cdot \sum \delta_{\text{обм}} \quad (5.33)$$

Если результаты расчёта показывают, что Q_0 превышает допустимое значение более чем на 10 %, то необходимо уменьшить плотность тока в обмотках, выбирая большее сечение проводников. Если же Q_0 меньше допустимого на 25-30 %, то следует наоборот, повысить плотность тока в обмотках. Если при пересчете окажется, что разместить обмотку из новых проводов в окне магнитопровода невозможно, то необходимо выбрать магнитопровод с окном большего сечения и пересчитать трансформатор заново.

Масса трансформатора

$$G_{\text{тр}} = G_{\text{м}} + G_{\text{ст}} \quad (5.34)$$

где $G_{\text{м}}$ – масса меди обмоток трансформатора, кг.

Массу меди обмоток подсчитывают по формуле:

$$G_{\text{м}} = \sum \gamma_{\text{м}} \cdot l_{\text{ср}i} \cdot q_i \cdot \omega_i \quad (5.35)$$

где $\gamma_{\text{м}}=8900$ кг/м³ – плотность медной проволоки.

Определяем КПД выпрямителя

$$\eta_B = \frac{U_d \cdot I_d}{U_d \cdot I_d + \sum P + P_B} \quad (5.36)$$

где P_B – потери в вентилях выпрямителя, Вт.

$$P_B = R_{пр} \cdot I_a^2 \cdot N \quad (5.37)$$

где N – число вентилях в выпрямителе.

5.3 Выбор элементов и составление схемы выпрямителя

В расчётно-графическом задании необходимо подобрать резисторы (по расчётной мощности) и конденсаторы (по номинальной емкости).

Номиналы сопротивлений и емкостей принимают согласно стандартному ряду (см. Приложение Г). Если оказывается невозможно подобрать резистор или конденсатор, то применяют параллельное или последовательное включение резисторов и конденсаторов таким образом, чтобы эквивалентная емкость (или сопротивление) соответствовала расчётной (заданной).

Мощность, рассеиваемую в резисторах, определяют следующим образом:

$$P_R = R_H \cdot I_d^2 \quad (5.38)$$

где R_H – сопротивление резистора, Ом;

I_d – ток резистора, А.

Согласно приложению Д выбирают мощность резистора таким образом, чтобы она была не меньше рассчитанной по формуле (5.40).

Расчётное напряжение конденсаторов выдается в задании на РГЗ. Согласно ему из таблицы приложения Е подбирается номинальное напряжение таким образом, чтобы оно было не меньше расчётного.

Пример составления схемы выпрямителя.

Дано: однофазный однополупериодный выпрямитель, у которого $U_d=96$ В, $R_H=82,6$ Ом, $C_\phi=735$ мкФ.

Рассеиваемая мощность резистора

$$P_R = R_H \cdot I_d^2 = \frac{U_d^2}{R_H}$$

$$P_R = \frac{96^2}{82,6} = 111,6 \text{ Вт}$$

Принимаем мощность резистора $P=100$ Вт.

Сопротивление составим следующим образом:

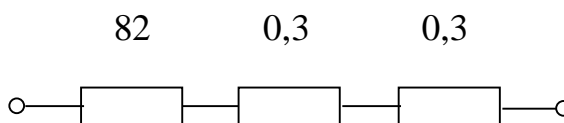


Рисунок 21 – Составление резистора схемы выпрямителя

Номинальное напряжение конденсатора $U_c=100$ В.

Конденсатор составим следующим образом:

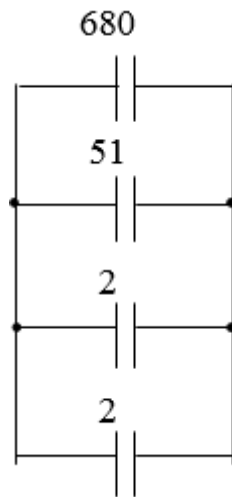


Рисунок 22 – Составление конденсатора схемы выпрямителя

Схема выпрямителя выглядит следующим образом:

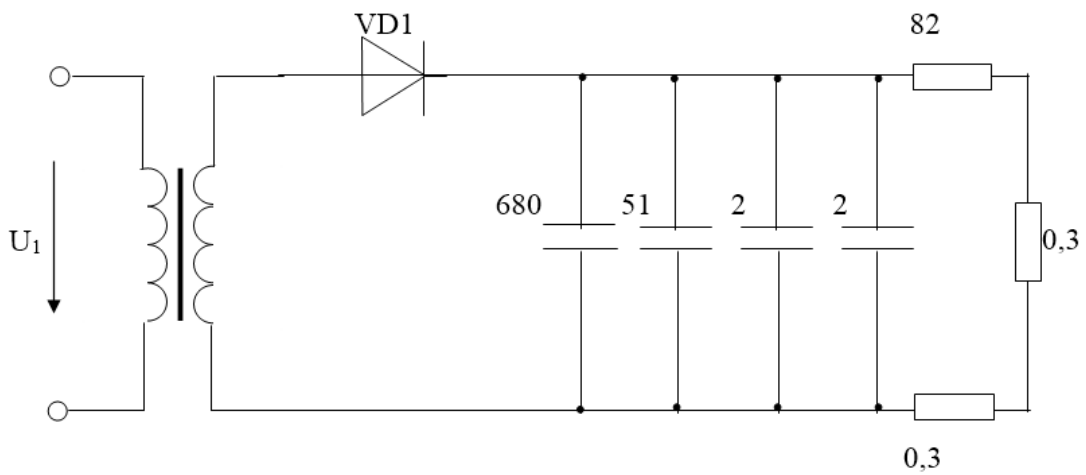


Рисунок 23 – Схема выпрямителя

Список использованных источников

1. Ганский, П.Н. Расчет однофазного выпрямителя малой мощности: метод. указания для студентов к выполнению расчётно – графического задания по курсу “Электротехника и основы электроники”/П.Н. Ганский. – Оренбург, ОрПИ, 1986. – 26 с.
2. Рогинский, В.Ю. Электропитание радиоустройств. /В.Ю. Рогинский - издание 2-е, перераб. – М.: Энергия, 1973. – 332 с.
3. Справочное руководство для радиолюбителей по конструированию радиоэлектронных устройств. В 2-х частях /под редакцией А.А. Четвертакова. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – Ч1-336 с.; Ч2-287 с.
4. Аксенов, А.И. Отечественные полупроводниковые приборы. Справочное пособие. /А.И. Аксенов - издание 2-е, испр. и доп. - М.: Солон-Р, 2000. –498 с.
5. Пузаков А.В. Исследование работы полупроводникового диода: метод. указания к лаб. работе по курсу "Электротехника, электроника и электрооборудование автомобилей" / А.В. Пузаков, А.М. Федотов, Г.П. Дворников. – Оренбург: ОГУ, 2007. – 20 с
6. Основы промышленной электроники: учеб. для вузов /под ред. В.Г. Герасимова. – 3-е изд., доп. и перераб. – М.: Высш. шк., 1986. – 336с.
7. Лачин, В.И. Электроника: учеб. пособие для вузов/В.И. Лачин, Н.С. Савелов. - 4-е изд. – Ростов-на-Дону: Феникс, 2004. – 576с.
8. Дворников, Г.П. Основы электроники: учеб. пособие для вузов /Г.П. Дворников, А.М. Федотов, А.В. Пузаков. – Оренбург: ГОУ ОГУ, 2006. – 128с.
9. Горбачев, Г.Н. Промышленная электроника: учебник для вузов/ Г.Н. Горбачев, Е.Е. Чаплыгин; под ред. В.А. Лабунцова. М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320с.

10. Прянишников В.А. Электроника: полный курс лекций /В.А. Прянишников. - 4-е изд. – СПб.: КОРОНА принт, 2004. – 416с.

11. Дворников, Г.П. Электротехника и электроника: метод. указ. по выполнению расчетно-граф. задания/ Г.П. Дворников, А.В. Пузаков, А.М. Федотов. – Оренбург: ОГУ, 2003. – 40с.

Приложение А

(справочное)

Параметры полупроводниковых диодов

Таблица А.1 – Параметры выпрямительных диодов

Тип диода	I _{макс} , А	U _{пр} , В	U _{обр} , В
1	2	3	4
КД204В	1,0	1,0	50
КД212В	1,0	1,0	100
КД212Г	1,0	1,2	100
КД212А	1,0	1,0	200
КД212Б	1,0	1,2	200
Д302	1,0	0,3	200
КД243Г	1,0	1,1	400
КД247В	1,0	1,3	400
КД243Д	1,0	1,1	600
КД247Г	1,0	1,3	600
КД226А	1,7	1,4	100
КД226Б	1,7	1,4	200
КД226В	1,7	1,4	400
КД226Г	1,7	1,4	600
КД223А	2,0	1,3	200
КД240Б	2,0	1,4	400
КД240В	2,0	1,4	600
Д303	3,0	0,3	150
КД268Г	3,0	0,9	100
КД268Е	3,0	0,9	200
КД268И	3,0	1,0	300
КД268Л	3,0	1,1	400
КД257В	3,0	1,5	600
КД202А	5,0	0,9	50
КД202В	5,0	0,9	100
Д304	5,0	0,3	100
КД269Г	5,0	0,9	150
КД202Д	5,0	0,9	200
Д215Б	5,0	1,5	200
КД202Ж	5,0	0,9	300
Д231Б	5,0	1,5	300
КД202К	5,0	0,9	400
Д232Б	5,0	1,5	400
КД202М	5,0	0,9	500

Продолжение таблицы А.1

1	2	3	4
Д233Б	5,0	1,5	500
КД202Р	5,0	0,9	600
Д234Б	5,0	1,5	600
КД270Б	7,5	0,8	50
КД270Г	7,5	0,9	100
КД270Е	7,5	0,9	200
КД270И	7,5	1,0	300
КД270Л	7,5	1,1	400
Д305	10	0,4	50
КД271Б	10	0,8	50
КД271Г	10	0,9	100
КД244А	10	1,3	100
КД271Е	10	0,9	200
КД244В	10	1,3	200
КД271И	10	1,0	300
Д245	10	1,3	300
КД271Л	10	1,1	400
Д233	10	1,0	500
КД206В	10	1,2	600
КД272Б	15	0,8	50
КД272Г	15	0,9	100
КД272Е	15	0,9	200
КД272И	15	1,0	300
КД272Л	15	1,1	400
КД2988Б	15	1,5	600
КД273Б	20	0,8	50
КД273Г	20	0,9	100
КД273Е	20	0,9	200
КД273И	20	1,0	300
КД273Л	20	1,1	400
КД412В	20	2,0	600
КД2995А	25	1,1	50
КД2995В	25	1,1	100
КД2995Д	25	1,1	200
КД2997В	30	1,0	50
КД2997Б	30	1,0	100
КД2997А	30	1,0	200
КД2996А	50	1,0	50
КД2996В	50	1,0	100
КД2991А	60	0,7	50

Приложение Б

(справочное)

Магнитопроводы дросселей и трансформаторов

Таблица Б.1 - Магнитопроводы типа ШЛ

Типоразмер	a,мм	b,мм	c,мм	h,мм	S _c ,см ²	S _{ок} ,см ²	S _c *S _{ок}	l _{ст} ,см
1	2	3	4	5	6	7	8	9
8x6,5	4	6,5	5	13	0,52	0,65	0,338	4,9
8x8	4	8	5	13	0,64	0,65	0,416	4,9
8x10	4	10	5	13	0,8	0,65	0,52	4,9
8x12,5	4	12,5	5	13	1	0,65	0,65	4,9
8x16	4	16	5	13	1,28	0,65	0,832	4,9
10x8	5	8	6	18	0,8	1,08	0,864	6,4
10x10	5	10	6	18	1	1,08	1,08	6,4
10x12,5	5	12,5	6	18	1,25	1,08	1,35	6,4
10x16	5	16	6	18	1,6	1,08	1,728	6,4
10x20	5	20	6	18	2	1,08	2,16	6,4
12x10	6	10	8	23	1,2	1,84	1,208	8,1
12x12,5	6	12,5	8	23	1,5	1,84	3,078	8,1
12x16	6	16	8	23	1,92	1,84	3,533	8,1
12x20	6	20	8	23	2,4	1,84	4,416	8,1
12x25	6	25	8	23	3	1,84	5,52	8,1
16x12,5	8	12,5	9	26	2	2,34	4,68	9,5
16x16	8	16	9	26	2,56	3,34	5,99	9,5
16x20	8	20	9	26	3,2	2,34	7,488	9,5
16x25	8	25	9	26	4	2,34	9,36	9,5
16x32	8	32	9	26	5,12	2,34	11,981	9,5
20x16	10	16	12	36	3,2	4,32	13,824	12,7
20x20	10	20	12	36	4	4,32	17,28	12,7
20x25	10	25	12	36	5	4,32	21,6	12,7
20x32	10	32	12	36	6,4	4,32	27,648	12,7
20x40	10	40	12	36	8	4,32	34,56	12,7
25x20	12,5	20	15	45	5	6,75	33,75	15,9
25x25	12,5	25	15	45	6,25	6,75	42,187	15,9
25x32	12,5	32	15	45	8	6,75	54	15,9
25x40	12,5	40	15	45	10	6,75	67,5	15,9
25x50	12,5	50	15	45	12,5	6,75	84,375	15,9
32x25	16	25	18	55	8	9,9	79,2	19,6
32x32	16	32	18	55	10,24	9,9	101,38	19,6
32x40	16	40	18	55	12,8	9,9	126,72	19,6
32x50	16	50	18	55	16	9,9	158,4	19,6

Продолжение таблицы Б.1

1	2	3	4	5	6	7	8	9
40x32	20	32	24	72	12,8	17,28	221,18	25,5
40x40	20	40	24	72	16	17,28	276,48	25,5
40x50	20	50	24	72	20	17,28	354,6	25,5
40x64	20	64	24	72	25,6	17,28	442,37	25,5

Таблица Б.2-Магнитопроводы типа ПЛ

Типоразмер	a,мм	b,мм	c,мм	h,мм	S _c ,см ²	S _{ок} ,см ²	S _c *S _{ок}	lст,см
1	2	3	4	5	6	7	8	9
6,5x8	6,5	12,5	8	8	0,813	0,64	0,5203	5,2
6,5x10	6,5	12,5	8	10	0,813	08	0,6504	5,6
6,5x12,5	6,5	12,5	8	12,5	0,813	1	0,813	6,1
6,5x16	6,5	12,5	8	16	0,813	1,28	1,0406	6,8
8x12,5	8	12,5	10	12,5	1	1,25	1,25	7
8x16	8	12,5	10	16	1	1,6	1,6	7,7
8x20	8	12,5	10	20	1	2	2	8,5
8x25	8	12,5	10	25	1	2,5	2,5	9,5
10x20	10	12,5	12,5	20	1,25	2,5	3,125	9,6
10x25	10	12,5	12,5	25	1,25	3,12	3,9	10,6
10x32	10	12,5	12,5	32	1,25	4	5	12
10x40	10	12,5	12,5	40	1,25	6,25	7,812	13,6
12,5x25	12,5	16	16	25	2	4	8	12,1
12,5x32	12,5	16	16	32	2	5,12	10,24	13,5
12,5x32	12,5	25	20	32	3,125	6,4	20	14,3
12,5x40	12,5	16	16	40	2	6,4	12,8	15,1
12,5x40	12,5	25	20	40	3,125	8	25	15,9
12,5x50	12,5	16	16	50	2	8	16	17,1
12,5x50	12,5	25	20	50	3,125	10	31,25	17,9
12,5x60	12,5	25	20	60	3,125	12	37,5	19,9
16x40	16	32	25	40	5,12	10	51,2	14
16x50	16	32	25	50	5,12	12,5	64	20
16x65	16	32	25	65	5,12	16,25	83,2	23
16x80	16	32	25	80	5,12	20	102,4	26
20x50	20	40	32	50	8	16	128	22,6
20x60	20	40	32	60	8	19,2	153,6	24,6
20x80	20	40	32	80	8	25,6	204,8	28,7
20x100	20	40	32	100	8	32	256	32,7
25x65	25	50	40	65	12,5	26	325	28,8
25x80	25	50	40	80	12,5	32	400	31,8

Продолжение таблицы Б.2

1	2	3	4	5	6	7	8	9
25x100	25	50	40	100	12,5	40	500	35,8
25x120	25	50	40	120	12,5	48	600	39,8
32x80	32	64	50	80	20,48	40	819,2	36
32x100	32	64	50	100	20,48	50	1024	40
32x130	32	64	50	130	20,48	65	1331,2	46
32x160	32	64	50	160	20,48	80	1638,4	52
40x100	40	80	64	100	32	64	2048	45,4
40x120	40	80	64	120	32	76,8	2457,6	49,4
40x160	40	80	64	160	32	102,4	3276,8	57,4
40x200	40	80	64	200	32	128	4096	65,4

Таблица Б.3-Магнитопроводы типа ПЛМ

Типоразмер	a,мм	b,мм	c,мм	h,мм	$S_c, \text{см}^2$	$S_{ок}, \text{см}^2$	$S_c * S_{ок}$	lст, см
20x28	20	32	19	28	6,4	5,32	34,048	15,7
20x36	20	32	19	36	6,4	6,84	43,776	17,3
20x46	20	32	19	46	6,4	8,74	55,936	19,3
20x58	20	32	19	58	6,4	11,02	70,528	21,7
25x36	25	40	24	36	10	8,64	86,4	19,8
25x46	25	40	24	46	10	11,04	110,4	21,8
25x58	25	40	24	58	10	13,92	139,2	24,2
25x73	25	40	24	73	10	17,52	175,2	27,2
32x46	32	50	30	46	16	13,8	220,8	25,2
32x58	32	50	30	58	16	17,4	178,4	27,7
32x73	32	50	30	73	16	21,0	350,4	30,6
32x90	32	50	30	90	16	27	432	34

Приложение В

(справочное)

Провода обмоточные медные

Таблица В.1

Номинальный диаметр медной проволоки, мм	Площадь поперечного сечения проволоки, мм ²	Электрическое сопротивление одного метра проволоки, Ом	Максимальный наружный диаметр проводов, мм не более	
			Тип 1	Тип 2
1	2	3	4	5
0,02	0,0003141	54,905	0,025	0,027
0,025	0,0004908	35,139	0,031	0,034
0,032	0,0008042	21,445	0,04	0,043
0,04	0,0012566	13,726	0,05	0,054
0,05	0,0019634	8,7848	0,062	0,68
0,063	0,0031172	5,5331	0,078	0,85
0,071	0,0039591	4,3563	0,088	0,095
0,08	0,0050265	3,4316	0,098	0,105
0,09	0,0063617	2,7113	0,11	0,117
0,1	0,0078539	2,1962	0,121	0,129
0,112	0,009852	1,7508	0,134	0,143
0,125	0,0122718	1,4254	0,149	0,159
0,14	0,0153938	1,1205	0,166	0,176
0,15	0,0176714	0,976	0,176	0,187
0,16	0,0201061	0,85788	0,187	0,199
0,17	0,022698	0,75986	0,198	0,21
0,18	0,0254468	0,67783	0,209	0,222
0,19	0,0283528	0,60831	0,22	0,234
0,2	0,0314159	0,54905	0,23	0,245
0,21	0,034636	0,49796	0,243	0,258
0,224	0,0394081	0,43772	0,256	0,272
0,236	0,0437435	0,39428	0,269	0,285
0,25	0,0490873	0,35139	0,284	0,301
0,265	0,0551545	0,31271	0,3	0,319
0,28	0,0615752	0,28013	0,315	0,334
0,3	0,0706858	0,24400	0,337	0,355
0,315	0,0779311	0,22132	0,352	0,371
0,335	0,0881413	0,19568	0,374	0,393
0,335	0,0989797	0,17434	0,395	0,414
0,38	0,1134114	0,15208	0,421	0,441
0,4	0,1256637	0,13726	0,442	0,462
0,425	0,1418625	0,12158	0,469	0,489

Продолжение таблицы В.1

1	2	3	4	5
0,45	0,1590431	0,10845	0,495	0,516
0,475	0,1772054	0,097329	0,521	0,543
05,	0,1963495	0,87848	0,548	0,569
0,53	0,2206183	0,78177	0,579	0,601
0,56	0,2463008	0,070032	0,611	0,632
0,6	0,2827433	0,061000	0,653	0,676
0,63	0,3117245	0,055328	0,684	0,706
0,67	0,3525652	0,048919	0,726	0,749
0,71	0,3959191	0,043566	0,767	0,79
0,75	0,4417864	0,039044	0,809	0,832
0,8	0,5026548	0,034316	0,861	0,885
0,85	0,5674501	0,30398	0,913	0,937
0,9	0,6361724	0,027113	0,965	0,99
0,95	0,7088218	0,024335	1,017	1,041
1	0,7853981	0,021962	1,068	1,093
1,06	0,8824733	0,019546	1,13	1,155
1,12	0,9852034	0,017508	1,192	1,217
1,18	1,0935883	0,015773	1,254	1,279
1,25	1,2271845	0,014056	1,325	1,351
1,32	1,3684777	0,012605	1,397	1,423
1,4	1,5393803	0,011205	1,479	1,506
1,5	1,7671458	0,009760	1,581	1,608
1,6	2,0106192	0,008579	1,683	1,711
1,7	2,2698006	0,007599	1,785	1,813
1,8	2,5446897	0,006778	1,888	1,916
1,9	2,8352872	0,006084	1,99	2,018
2	3,141592	0,005490	2,092	2,12
2,12	3,5298932	0,004886	2,214	2,243
2,24	3,9408135	0,004377	2,336	2,366
2,36	4,3743535	0,004300	2,459	2,488
2,5	4,9087382	0,003514	2,601	2,631

Приложение Г

(справочное)

Ряд номинальных значений сопротивлений и емкостей

Таблица Г.1

Ряд промежуточных значений			
E3	E6	E12	E24
1	1	1	1
			1,1
		1,2	1,2
			1,3
	1,5	1,5	1,5
			1,6
		1,8	1,8
			2,0
2,2	2,2	2,2	2,2
			2,4
		2,7	2,7
			3,0
	3,3	3,3	3,3
			3,6
		3,9	3,9
			4,3
4,7	4,7	4,7	4,7
			5,1
		5,6	5,6
			6,2
	6,8	6,8	6,8
			7,5
		8,2	8,2
			9,1

Пр и м е ч а н и е - Для получения значений больших или меньших, чем указанные в таблице необходимо данные таблицы умножить на 10 в соответствующей степени. Например: $0,056=5,6 \cdot 10^{-2}$; $820=8,2 \cdot 10^2$ и т.д.

Приложение Д

(справочное)

Сопротивления проволочные

Таблица Д.1

Номинальная мощность, Вт	Диапазон номинальных сопротивлений
Сопротивления С5-35В, ПЭВ (Е12, Е24)	
3	3 – 510 Ом
7,5	1 Ом – 3,3 кОм
10	1,8 Ом – 10 кОм
15	3,9 Ом – 15 кОм
25	10 Ом – 24 кОм
50	18 Ом – 51 кОм
75	47 Ом – 56 кОм
100	47 Ом – 56 кОм
Сопротивления С5-43, ПЭВР	
10	0,068 – 1,0 Ом
16	0,082 – 1,0 Ом
25	0,1 – 1,0 Ом
50	0,22 – 1,0 Ом
75	0,33 – 1,0 Ом
100	0,39 – 1,0 Ом

Приложение Е

(справочное)

Конденсаторы

Таблица Е.1

Напряжение конденсатора, В	Диапазон выпускаемых емкостей, мкФ
6,3	1 – 300000
12,0	1 – 100000
24,0	1 – 60000
36,0	1 – 40000
48,0	1 – 20000
72,0	1 – 8000
100,0	1 – 2000
150,0	1 – 800
250,0	1 – 250
300,0	1 – 100
400,0	1 – 50
500,0	1 – 10
600,0	1 – 5

Приложение Ж

(рекомендуемое)

Пример выполнения расчёта

Ж.1 Исходные данные

Требуется рассчитать схему однофазного двухполупериодного мостового выпрямителя и выполнить конструктивный расчёт трансформатора.

Вариант: 3714

Напряжение питания: $U_1 = 127 \text{ В}$

Выпрямленное напряжение: $U_d = 96 \text{ В}$

Коэффициент пульсаций выпрямителя: $K_{\text{п}} = 10\%$

Сопротивление нагрузки: $R_{\text{н}} = 460 \text{ Ом}$

Ж.2 Расчёт однофазного выпрямителя

Выпрямленный ток в нагрузке

$$I_d = \frac{U_d}{R_{\text{н}}} \quad (\text{Ж.1})$$

$$I_d = \frac{96}{460} = 0,21 \text{ А}$$

Средний ток через вентиль

$$I_a = \frac{I_d}{2} \quad (\text{Ж.2})$$

$$I_a = \frac{0,21}{2} = 0,105$$

Максимальное обратное напряжение, приложенное к вентилю

$$U_{\text{обр}} = 1,57 \cdot U_d \quad (\text{Ж.3})$$

$$U_{\text{обр}} = 1,57 \cdot 96 = 150,7 \text{ В}$$

Из таблицы приложение А, по вычисленным значениям I_a и $U_{\text{обр}}$ подбираем полупроводниковый диод, у которого ток через вентиль и обратное напряжение не меньше вычисленных.

Выбираем предварительно диод КД212А, у которого: $I_{\text{max}} = 1 \text{ А}$,
 $U_{\text{пр}} = 1,0 \text{ В}$, $U_{\text{обр}} = 200 \text{ В}$.

Активное сопротивление фазы трансформатора

$$R_{\text{тр}} = \frac{K_r \cdot U_d}{I_d \cdot f_c \cdot 1,2} \cdot \sqrt{\frac{1,2 \cdot n \cdot f_c}{U_d \cdot I_d}} \quad (\text{Ж.4})$$

где $K_r = 3,5$ - коэффициент, зависящий от схемы выпрямления;

n - количество стержней магнитопровода трансформатора, имеющих обмотки. Принимаем броневой магнитопровод и $n = 1$;

$f_c = 50 \text{ Гц}$ – частота питающей сети.

$$R_{\text{тр}} = \frac{3,5 \cdot 96}{0,21 \cdot 50 \cdot 1,2} \cdot \sqrt{\frac{1,2 \cdot 1 \cdot 50}{96 \cdot 0,21}} = 46 \text{ Ом}$$

Прямое сопротивление вентиляей

$$R_{\text{пр}} = \frac{U_{\text{пр}}'}{I_a} \quad (\text{Ж.5})$$

где $U_{\text{пр}}'$ - прямое падение напряжения на вентиле.

Прямое падение напряжения на вентиле

$$U_{\text{пр}}' = U_{\text{пр}}^* \cdot U_{\text{пр}} \quad (\text{Ж.6})$$

где $U_{\text{пр}}^*$ - относительная величина падения напряжения на вентиле, о.е.

Определяют по рисунку 14, в зависимости от $I_{\text{пр}}$.

Относительное значение тока вентиля

$$I_{\text{пр}} = \frac{I_a}{I_{\text{макс}}} \quad (\text{Ж.7})$$

$$I_{\text{пр}} = \frac{0,105}{1} = 0,105 \text{ о.е.}$$

$$U_{\text{пр}}' = 0,56 \cdot 1,0 = 0,56 \text{ В}$$

$$R_{\text{пр}} = \frac{0,56}{0,105} = 5,33 \text{ Ом}$$

Сопротивление фазы выпрямителя

$$R_{\text{ф}} = R_{\text{тр}} + kn \cdot R_{\text{пр}} \quad (\text{Ж.8})$$

где $k_n = 2$ - коэффициент, зависящий от схемы выпрямления.

$$R_{\phi} = 46 + 2 \cdot 5,33 = 56,66 \text{ Ом}$$

Вспомогательный коэффициент A

$$A = \frac{1,6 \cdot R_{\phi} \cdot I_d}{U_d} \quad (\text{Ж.9})$$

$$A = \frac{1,6 \cdot 56,66 \cdot 0,21}{96} = 0,2$$

Производим проверку предварительно принятого диода

$$I_{\max} = 0,5 \cdot F \cdot I_d \leq I_{\max} \quad (\text{Ж.10})$$

где $F = 4,6$ – коэффициент, выбираемый по рисунку 15 в зависимости от A .

$$I_{\max}' = 0,5 \cdot 6 \cdot 0,21 = 0,63 \leq I_{\max} = 1,0 \text{ А}$$

Следовательно, по максимальному току предварительно выбранный диод подходит.

$$U_{\text{обр}}' = 1,4 \cdot U_2 \leq U_{\text{обр}} \quad (\text{Ж.11})$$

где U_2 – напряжение на вторичной обмотке трансформатора, В.

$$U_2 = B \cdot U_d \quad (\text{Ж.12})$$

где $B = 0,95$ – коэффициент, выбираемый по рисунку 15 в зависимости от коэффициента A .

$$U_2 = 0,95 \cdot 96 = 91,2 \text{ В}$$

$$U_{\text{обр}}' = 1,4 \cdot 91,2 = 127,68 \leq U_{\text{обр}} = 200 \text{ В}$$

Следовательно, по обратному напряжению диод также подходит.

Определяем ток вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = 0,7 \cdot D \cdot I_d \quad (\text{Ж.13})$$

где $D = 2,15$ – коэффициент, выбираемый по рисунку 15 в зависимости от коэффициента A .

$$I_2 = 0,7 \cdot 2,15 \cdot 0,21 = 0,316 \text{ А}$$

Емкость конденсатора фильтра:

$$C_{\phi} = \frac{100 \cdot H}{R_{\phi} \cdot K_{\text{пз}}} \quad (\text{Ж.14})$$

где $H = 300$ – коэффициент, определяемый по рисунку 16 в зависимости от коэффициента A .

$$C_{\phi} = \frac{100 \cdot 300}{56,66 \cdot 10} = 53$$

Так как рассчитанная емкость фильтра оказалась меньше 1000 мкФ, то Г-образный фильтр не нужен.

Ж.3 Конструктивный расчёт трансформатора

Рассчитываем мощность трансформатора

$$P_{\text{тр}} = U_2 \cdot I_2 \quad (\text{Ж.15})$$

$$P_{\text{тр}} = 91,2 \cdot 0,316 = 28,8 \text{ Вт}$$

Так как мощность трансформатора оказалась меньше, чем 100 Вт то выбор броневое магнитопровода оправдан.

Выбираем максимальную индукцию B_m в магнитопроводе трансформатора в зависимости от его мощности по таблице 5.

$$B_m = 1,04 \text{ Тл}$$

Определяем величину $S_{\text{ок}} \times S_c$ в зависимости от мощности трансформатора и типа магнитопровода.

$$S_{\text{ок}} \cdot S_c = 40 \dots 50 \text{ см}^4$$

Пользуясь таблицей Б.1 приложения Б, выбирают такой магнитопровод промышленного изготовления, у которого $S_{\text{ок}} \times S_c$ не меньше определенного.

Выбираем броневой магнитопровод марки ШЛ 25×32, для которого:

– ширина стержня – $a = 12,5$ мм.;

- толщина стержня – $b = 32$ мм.;
- ширина окна – $c = 15$ мм.;
- высота окна – $h = 45$ мм.;
- длина магнитной силовой линии – $l_{ст} = 15,9$ см.;
- площадь сечения стержня магнитопровода – $S_c = 8$ см²;
- площадь окна магнитопровода – $S_{ок} = 6,75$ см²;
- $S_{ок} \times S_c = 54$ см⁴.

Вычисляем ЭДС одного витка:

$$e_B = 4,44 \cdot f_c \cdot S_c \cdot B_m \cdot 10^{-4} \quad (\text{Ж.16})$$

где k_z – коэффициент заполнения пакета магнитопровода сталью.

Принимаем для ленточных магнитопроводов $k_z = 0,95$.

$$e_B = 4,44 \cdot 50 \cdot 8 \cdot 0,95 \cdot 1,05 \cdot 10^{-4} = 0,177 \text{ В}$$

Число витков первичной обмотки

$$\omega_1 = \frac{E_1}{e_B} \quad (\text{Ж.17})$$

где E_1 – ЭДС первичной обмотки, В.

$$E_1 = U_1 \cdot \left(\frac{1 - \Delta U}{100} \right) \quad (\text{Ж.18})$$

где $U_1 = 127$ В – напряжение первичной обмотки;

ΔU – падение напряжения на обмотках при нагрузке трансформатора, %.

Падение напряжения ΔU в процентах определяем по рисунку 18 в зависимости от мощности трансформатора.

$$E_1 = 127 \cdot \left(\frac{1-12}{100}\right) = 111,76 \text{ В}$$

$$\omega_1 = \frac{111,76}{0,177} = 632 \text{ витка}$$

Число витков вторичной обмотки

$$\omega_2 = \frac{E_2}{e_B} \quad (\text{Ж.19})$$

где E_2 – ЭДС вторичной обмотки, В.

$$E_2 = U_2 \cdot \left(\frac{1+\Delta U}{100}\right) \quad (\text{Ж.20})$$

$$E_2 = 91,2 \cdot \left(\frac{1+12}{100}\right) = 102,14 \text{ В.}$$

$$\omega_2 = \frac{102,14}{0,177} = 577 \text{ ВИТКОВ}$$

Ток холостого хода трансформатора

$$I_{\text{ХХ}} = H_a \cdot \left(\frac{1}{\omega_1}\right) \quad (\text{Ж.21})$$

где H_a – напряженность магнитного поля при выбранной индукции Втм,

$A \cdot \text{витки/см}$. $H_a = 2 \text{ A} \cdot \text{витка}$ (по рисунку 19).

$$I_{xx} = 2 \cdot \left(\frac{15,9}{632}\right) = 0,05 \text{ A}$$

Полный ток первичной обмотки

$$I_{д1} = \sqrt{I_1^2 + I_{xx}^2} \quad (\text{Ж.22})$$

где I_1 – ток вторичной обмотки, приведенный к первичной обмотке, А.

Ток вторичной обмотки, приведенный к первичной

$$I_1 = \frac{P_{\text{тр}}}{U_1} \quad (\text{Ж.23})$$

$$I_1 = \frac{28,8}{127} = 0,227 \text{ A}$$

$$I_{д1} = \sqrt{0,227^2 + 0,05^2} = 0,232 \text{ A}$$

Определяем сечение проводов обмоток

$$q_i = \frac{I_i}{J_i} \quad (\text{Ж.24})$$

где J_i – плотность тока в i -той обмотке, А/мм².

Плотность тока в обмотках трансформатора определяем по рисунку 20

$$q_1 = \frac{I_{д1}}{J_1} = \frac{0,232}{1,5} = 0,155 \text{ A/мм}^2$$

$$q_2 = \frac{I_2}{J_2} = \frac{0,316}{1,2} = 0,263 \text{ А/мм}^2$$

По полученным значениям сечений проводников подбираем стандартные провода из таблицы В.1 и выписываем соответствующие им диаметры и сопротивления.

Для первичной обмотки – $d_1 = 0,516$ мм, $q_1 = 0,159$ мм², $R_{o1} = 0,108$ Ом/м.

Для вторичной обмотки – $d_2 = 0,653$ мм, $q_2 = 0,283$ мм², $R_{o2} = 0,061$ Ом/м.

Число витков в слое обмотки

$$\omega_1 = \frac{h - 2 \cdot (\delta_{\text{карк}} + 2)}{\alpha \cdot d_1} \quad (\text{Ж.25})$$

где $\delta_{\text{карк}} = 0,5$ мм - толщина материала каркаса;

d_i – диаметр проводника i -той обмотки, мм;

α – коэффициент неплотности, определяемый по таблице 6, в зависимости от диаметра проводника.

Число слоев

$$n_{\text{сл1}} = \frac{\omega_1}{\omega_{\text{сл1}}} \quad (\text{Ж.26})$$

Толщина обмотки

$$\delta_{\text{обм1}} = n_{\text{сл1}} \cdot (d_1 + d_{\text{из}}) \quad (\text{Ж.27})$$

где $\delta_{\text{из}}$ – толщина изоляции между слоями, мм. Принимаем $\delta_{\text{из}} = 0,05$ мм

$$\omega_{\text{сл1}} = \frac{45 - 2 \cdot (0,5 + 2)}{1,1 \cdot 0,516} = 70 \text{ ВИТКОВ}$$

$$n_{\text{сл1}} = \frac{\omega_1}{\omega_{\text{сл1}}} = \frac{632}{70} = 10 \text{ СЛОЕВ}$$

$$\delta_{\text{обм1}} = n_{\text{сл1}} \cdot (d_1 + d_{\text{из}}) = 10 \cdot (0,516 + 0,05) = 5,66 \text{ ММ}$$

$$\omega_{\text{сл2}} = \frac{45 - 2 \cdot (0,5 + 2)}{1,1 \cdot 0,653} = 55 \text{ ВИТКОВ}$$

$$n_{\text{сл2}} = \frac{\omega_2}{\omega_{\text{сл2}}} = \frac{577}{55} = 11 \text{ СЛОЕВ}$$

$$\delta_{\text{обм2}} = n_{\text{сл2}} \cdot (d_2 + \delta_{\text{из}}) = 11 \cdot (0,653 + 0,05) = 7,73 \text{ ММ}$$

Суммарная толщина обеих обмоток

$$\sum \delta_{\text{обм}} = \delta_{\text{обм1}} + \delta_{\text{обм2}} \quad (\text{Ж.28})$$

$$\sum \delta_{\text{обм}} = 5,66 + 7,73 = 13,39 \text{ ММ}$$

Проверяем выполнение условия:

$$c \geq \delta_{\text{карк}} + \sum \delta_{\text{обм}} + \delta_{\text{пр}} + \delta_{\text{заз}} \quad (\text{Ж.29})$$

где $\delta_{\text{пр}}$ – суммарная толщина прокладок между обмотками, мм. Принимаем

$$\delta_{\text{пр}} = 1,0 \text{ мм};$$

$\delta_{\text{заз}}$ – необходимый зазор между двумя катушками стержневого трансформатора, мм. Принимаем $\delta_{\text{заз}} = 0$ мм для броневое трансформатора.

$$15 \geq 0,5 + 13,39 + 1,0 + 0 = 14,89 \text{ мм}$$

Следовательно, это условие выполняется.

Суммарные потери трансформатора

$$\Sigma P \geq P_{\text{М}} + P_{\text{СТ}} \quad (\text{Ж.30})$$

где $P_{\text{М}}$ – суммарные потери в меди обмоток трансформатора, Вт;

$P_{\text{СТ}}$ – суммарные потери в магнитопроводе (на гистерезис и вихревые токи), Вт.

Суммарные потери в меди обмоток

$$P_{\text{М}} \geq \Sigma I_i^2 \cdot R_i \quad (\text{Ж.31})$$

где R_i – активное сопротивление i -той обмотки, Ом.

Активное сопротивление обмотки трансформатора при нагреве:

$$R_i = R_{\text{oi}} (1 + \alpha t \cdot \Delta t) \cdot l_{\text{ср}i} \cdot \omega_i \quad (\text{Ж.32})$$

где R_{oi} – сопротивление 1 м провода обмотки данного сечения, Ом/м;

$\alpha t = 0,004$ – температурный коэффициент сопротивления медного провода;

Δt – разность температур нагретой обмотки и температуры окружающей среды, °С. Принимаем для броневых трансформатора $\Delta t = 65^\circ\text{C}$;

$l_{\text{ср}i}$ – средняя длина одного витка i -той обмотки трансформатора, м.

Длина витка первичной обмотки

$$l_{\text{ср}1} = 2 \cdot (a + b) + \pi \cdot \delta_{\text{об}1} \quad (\text{Ж.33})$$

$$l_{\text{ср}1} = 2 \cdot (12,5 + 32) \cdot 10^{-3} + \pi \cdot 5,66 \cdot 10^{-3} = 0,107 \text{ м}$$

Длина витка вторичной обмотки

$$l_{\text{ср}2} = l_{\text{ср}1} + \pi \cdot (\delta_{\text{об}1} + \delta_{\text{об}2}) \quad (\text{Ж.34})$$

$$l_{\text{ср}2} = 0,107 + \pi \cdot (5,66 + 7,73) \cdot 10^{-3} = 0,149 \text{ м}$$

$$R_1 = R_{o1} \cdot (1 + \alpha t \cdot \Delta t) \cdot l_{\text{ср}1} \cdot \omega_1$$

$$R_1 = 0,108 \cdot (1 + 0,004 \cdot 65) \cdot 0,107 \cdot 632 = 9,2 \text{ Ом}$$

$$R_2 = R_{o2} \cdot (1 + \alpha t \cdot \Delta t) \cdot l_{\text{ср}2} \cdot \omega_2$$

$$R_2 = 0,061 \cdot (1 + 0,004 \cdot 65) \cdot 0,149 \cdot 577 = 6,6 \text{ Ом}$$

$$P_M = I_{d1}^2 \cdot R_1 + I_2^2 \cdot R_2$$

$$P_M = 0,232^2 \cdot 9,2 \cdot 0,316^2 \cdot 6,6 = 0,495 + 0,659 = 1,154 \text{ Вт}$$

Суммарные потери в магнитопроводе

$$P_{ст} = K_{сб} \cdot p_{ст} \cdot (B_m)^2 \cdot G_{ст} \quad (\text{Ж.35})$$

где $K_{сб} = 1,1$ – коэффициент, учитывающий увеличение потерь в магнитопроводе при сборке;

$G_{ст}$ – масса магнитопровода, кг;

$p_{ст}$ – удельные потери в материале магнитопровода, Вт/кг. Принимаем

$$p_{ст} = 0,8 \text{ Вт/кг.}$$

Масса броневое магнитопровода

$$G_{ст} = 2 \cdot S_c \cdot \gamma_{ст} \cdot l_{ст} \cdot \kappa_3 \quad (\text{Ж.36})$$

где $\gamma_{ст} = 7800 \text{ кг/м}^3$ – плотность электротехнической стали.

$$G_{ст} = 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4} \cdot 7800 \cdot 15,9 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 = 1,88 \text{ кг}$$

$$P_{ст} = 1,1 \cdot 0,8 \cdot (1,05)^2 \cdot 1,88 = 1,82 \text{ Вт}$$

$$\Sigma P = 1,154 + 1,82 = 2,97 \text{ Вт}$$

Коэффициент полезного действия трансформатора

$$\eta = \frac{P_{тр}}{P_{тр} + \Sigma P} \quad (\text{Ж.37})$$

$$\eta = \frac{28,8}{28,8 + 2,97} = 0,9$$

Определение тепловой напряженности трансформатора

$$Q_0 = \frac{\Sigma P}{S_{\text{охл}}} \leq Q_{\text{доп}} \quad (\text{Ж.38})$$

где $S_{\text{охл}}$ – поверхность охлаждения обмоток трансформатора, м^2 ;

$Q_{\text{доп}}$ – допустимая тепловая напряженность трансформатора, $\text{Вт}/\text{м}^2$.

Принимаем $Q_{\text{доп}} = 650 \text{ Вт}/\text{м}^2$ – для броневых трансформаторов.

Поверхность охлаждения

$$S_{\text{охл}} = 2\pi \cdot h \cdot \Sigma \delta_{\text{обм}} \quad (\text{Ж.39})$$

$$S_{\text{охл}} = 2\pi \cdot 45 \cdot 10^{-3} \cdot 13,39 \cdot 10^{-3} = 0,0038 \text{ м}^2$$

$$Q_0 = \frac{2,97}{0,0038} = 782 \leq Q_{\text{доп}} = 650 \text{ Вт}/\text{м}^2$$

Результаты расчёта показывают, что Q_0 превышает допустимое значение более чем на 10 %, однако изменением плотности тока привести Q_0 в допустимые пределы не удастся, так как большую часть потерь составляют потери в стали. Поэтому выбираем окончательно магнитопровод ШЛ 32×25, имеющий окно большего сечения и производим пересчет всех зависимых параметров.

Параметры магнитопровода ШЛ 32×25:

– ширина стержня – $a = 16 \text{ мм}$.;

- толщина стержня – $b = 25$ мм.;
- ширина окна – $c = 18$ мм.;
- высота окна – $h = 55$ мм.;
- длина магнитной силовой линии – $l_{ст} = 19,6$ см.;
- площадь сечения стержня магнитопровода – $S_c = 8$ см²;
- площадь окна магнитопровода – $S_{ок} = 9,9$ см²;
- $S_{ок} \times S_c = 79,2$ см⁴.

$$I_{xx} = 2 \cdot \frac{19,6}{632} = 0,062 \text{ A}$$

$$I_{д1} = \sqrt{0,227^2 + 0,062^2} = 0,235 \text{ A}$$

$$q_1 = \frac{0,235}{1,0} = 0,235 \text{ A/мм}^2$$

$$q_2 = \frac{0,316}{0,75} = 0,421 \text{ A/мм}^2$$

Для первичной обмотки – $d1 = 0,632$ мм, $q1 = 0,246$ мм², $R_{o1} = 0,07$ Ом/м.

Для вторичной обмотки – $d2 = 0,809$ мм, $q2 = 0,442$ мм², $R_{o2} = 0,039$ Ом/м.

$$\omega_{сл1} = \frac{55 - 2 \cdot (0,5 + 2)}{1,1 \cdot 0,632} = 71 \text{ ВИТОК}$$

$$n_{сл1} = \frac{632}{71} = 9 \text{ СЛОЕВ}$$

$$\delta_{обм1} = 9 \cdot (0,632 + 0,05) = 6,14 \text{ ММ}$$

$$\omega_{\text{сЛ2}} = \frac{55 - 2 \cdot (0,5 + 2)}{1,1 \cdot 0,809} = 56 \text{ ВИТКОВ}$$

$$n_{\text{сЛ2}} = \frac{632}{70} = 11 \text{ СЛОЕВ}$$

$$\delta_{\text{обМ2}} = 11 \cdot (0,809 + 0,05) = 9,45 \text{ ММ}$$

$$\sum \delta_{\text{обМ}} = 6,14 + 9,45 = 15,59 \text{ ММ}$$

$$18 \geq 0,5 + 15,59 + 1,0 + 0 = 17,09 \text{ ММ}$$

$$l_{\text{ср1}} = 2 \cdot (16 + 25) \cdot 10^{-3} + \pi \cdot 6,14 \cdot 10^{-3} = 0,101 \text{ М}$$

$$l_{\text{ср2}} = 0,101 + \pi \cdot (6,14 + 9,45) \cdot 10^{-3} = 0,15 \text{ М}$$

$$R_1 = 0,07 \cdot (1 + 0,004 \cdot 65) \cdot 0,101 \cdot 632 = 5,63 \text{ Ом}$$

$$R_2 = 0,039 \cdot (1 + 0,004 \cdot 65) \cdot 0,15 \cdot 577 = 4,25 \text{ Ом}$$

$$P_M = 0,235^2 \cdot 5,63 \cdot 0,316^2 \cdot 4,25 = 0,311 + 0,424 = 0,735 \text{ Вт}$$

$$G_{\text{СТ}} = 2 \cdot 8 \cdot 10^{-4} \cdot 7800 \cdot 19,6 \cdot 10^{-2} \cdot 0,95 = 2,32 \text{ кг}$$

$$P_{\text{СТ}} = 1,1 \cdot 0,8 \cdot (1,05)^2 \cdot 2,32 = 2,25 \text{ Вт}$$

$$\sum P = 0,735 + 2,25 = 2,985 \text{ Вт}$$

$$S_{\text{охл}} = 2\pi \cdot 55 \cdot 10^{-3} \cdot 15,59 \cdot 10^{-3} = 0,0054 \text{ м}^2$$

$$Q_0 = \frac{2,985}{0,0054} = 553 \leq Q_{\text{доп}} = 650 \text{ Вт/м}^2$$

$$\Delta Q = \frac{(Q_{\text{доп}} - Q_0)}{Q_{\text{доп}}} \cdot 100\% = \frac{(650 - 553)}{650} \cdot 100\% = 15\%$$

что допустимо.

Масса трансформатора

$$G_{\text{тр}} = G_{\text{м}} + G_{\text{ст}} \quad (\text{Ж.40})$$

где $G_{\text{м}}$ – масса меди обмоток трансформатора, кг.

Массу меди обмоток подсчитываем по формуле:

$$G_{\text{м}} = \sum \gamma_{\text{м}} \cdot l_{\text{ср}i} \cdot q_i \cdot \omega_i \quad (\text{Ж.41})$$

где $\gamma_{\text{м}} = 8900 \text{ кг/м}^3$ – плотность медной проволоки.

$$G_{\text{м}} = 8900 \cdot (0,101 \cdot 0,246 \cdot 632 + 0,15 \cdot 0,422 \cdot 577) \cdot 10^{-6} = 0,48 \text{ кг}$$

$$G_{\text{тр}} = 0,48 + 2,32 = 2,8 \text{ кг}$$

Определяем КПД выпрямителя

$$\eta_B = \frac{U_d \cdot I_d}{U_d \cdot I_d + \sum P_{P_{pв}}} \quad (\text{Ж.42})$$

где $P_{в}$ – потери в вентилях выпрямителя, Вт.

$$P_{в} = R_{пр} \cdot I_a^2 \cdot N \quad (\text{Ж.43})$$

где N – число вентилях в выпрямителе.

$$P_{в} = 5,33 \cdot 0,105^2 \cdot 4 = 0,235 \text{ Вт}$$

$$\eta_B = \frac{96 \cdot 0,21}{96 \cdot 0,21 + 2,985 + 0,235} = 0,86$$

Ж.4 Выбор элементов и составление схемы выпрямителя

Определяем мощность, рассеиваемую в резисторах:

$$P_R = R_h \cdot I_d^2 \quad (\text{Ж.44})$$

$$P_R = 460 \cdot 0,21^2 = 20,3 \text{ Вт}$$

Согласно приложению Д выбираем мощность резистора таким образом, чтобы она была не меньше рассчитанной по формуле (44).

Принимаем мощность резистора $P = 25 \text{ Вт}$.

Сопротивление составим следующим образом:



Рисунок Ж.1

Номинальное напряжение конденсатора $U_c = 100$ В.

Конденсатор составим следующим образом:

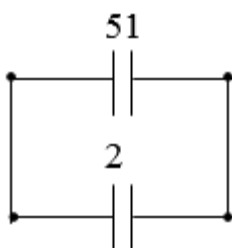


Рисунок Ж.2