

МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Оборудование и технология сварочного производства»

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

*Методические рекомендации к практическим занятиям
для студентов направления подготовки
15.03.01 «Машиностроение» очной формы обучения*

Часть 1



Могилев 2022

УДК 621.7
ББК 30.68
О 22

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Оборудование и технология сварочного производства» «02» февраля 2022 г., протокол № 8

Составитель канд. техн. наук, доц. С. М. Фурманов

Рецензент канд. техн. наук, доц. Е. В. Ильюшина

Методические рекомендации к практическим занятиям по дисциплине «Оборудование для дуговой сварки» предназначены для студентов направления подготовки 15.03.01 «Машиностроение» очной формы обучения.

Учебно-методическое издание

ОБОРУДОВАНИЕ ДЛЯ ДУГОВОЙ СВАРКИ

Часть 1

Ответственный за выпуск

А. О. Коротеев

Корректор

Т. А. Рыжикова

Компьютерная верстка

М. М. Дударева

Подписано в печать 13.09.2022. Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. 2,79. У ч.-изд. л. 2,81 . Тираж 26 экз. Заказ № 780.

Издатель и полиграфическое исполнение:
Межгосударственное образовательное учреждение высшего образования
«Белорусско-Российский университет».
Свидетельство о государственной регистрации издателя,
изготовителя, распространителя печатных изданий
№ 1/156 от 07.03.2019.
Пр-т Мира, 43, 212022, г. Могилев.

© Белорусско-Российский
университет, 2022

Содержание

1 Практическое занятие № 1. Расчет внешней характеристики сварочного трансформатора с повышенным магнитным рассеянием	4
2 Практическое занятие № 2. Расчет конструкции однофазных трансформаторов для дуговой сварки и построение внешних характеристик	13
3 Практическое занятие № 3. Расчет и выбор элементов электрической схемы выпрямления однопостовых сварочных выпрямителей	23
4 Практическое занятие № 4. Расчет конструкции высокочастотных трансформаторов инверторных источников питания для дуговой сварки	31
5 Практическое занятие № 5. Расчет мощности потерь и выбор высокочастотных транзисторов инверторных преобразователей	40
6 Практическое занятие № 6. Расчет дросселя фильтра сварочного тока инверторного источника питания	43
Список литературы	45

1 Практическое занятие № 1. Расчет внешней характеристики сварочного трансформатора с повышенным магнитным рассеянием

Цель работы: изучить принцип работы и устройство трансформаторов для дуговой сварки плавлением; научиться строить векторные диаграммы и внешние вольт-амперные характеристики трансформаторов.

1.1 Общие теоретические сведения

1.1.1 Общие сведения о сварочных трансформаторах. Трансформатором называется статический электромагнитный аппарат, преобразующий переменный ток одного напряжения в переменный ток другого напряжения той же частоты. Сварочный трансформатор преобразует сетевое напряжение 220 или 380 В частотой 50 или 60 Гц в пониженное (меньше 141 В), необходимое для сварки. В массовом порядке выпускаются только однопостовые трансформаторы, предназначенные для ручной дуговой сварки покрытыми электродами и для механизированной сварки под флюсом.

Трансформаторы должны обеспечивать легкое зажигание и устойчивое горение дуги при использовании электродов с высокими стабилизирующими свойствами, предназначенных специально для сварки на переменном токе. Низкая устойчивость горения дуги переменного тока является типичным недостатком сварочных трансформаторов. Другой недостаток трансформаторов – низкая стабильность режима, обусловленная зависимостью от колебаний напряжения сети.

Достоинством трансформаторов является низкая стоимость их изготовления, они в 2 – 4 раза дешевле выпрямителей одинаковой мощности. Они имеют коэффициент полезного действия 0,7...0,9 и низкий удельный расход электроэнергии (около 2...4 кВт·ч на 1 кг расплавленного электродного металла). Трансформаторы проще и дешевле в эксплуатации, легко поддаются ремонту.

В отличие от силовых трансформаторов несварочного назначения, у которых потери магнитных потоков стремятся уменьшить, большая часть сварочных трансформаторов специально разработана с увеличенным магнитным рассеянием. Это достигается размещением первичной и вторичной обмотки на значительном расстоянии друг от друга. Для получения крутопадающей внешней характеристики используют индуктивность рассеяния трансформатора.

Так как обмотки удалены друг от друга, то значительная часть магнитного потока первичной обмотки не связана со вторичной обмоткой. Еще говорят, что у этих трансформаторов увеличенное электромагнитное рассеяние. Индуктивности рассеяния имеют значительную величину, и реактивное сопротивление обмоток оказывает большое влияние на ток трансформатора.

Принцип действия такого трансформатора иллюстрирует рисунок 1.1. Наибольшее распространение получила конструктивная схема трансформатора со стержневым магнитопроводом 3, цилиндрическими первичной 1 и вторичной 2 обмотками, разбитыми каждая на две катушки. Подвижная обмотка (обычно

вторичная) перемещается винтовым приводом 4. Основной поток трансформатора Φ_T замыкается по магнитопроводу, а потоки рассеяния $\Phi_{1\text{PAC}}$ и $\Phi_{2\text{PAC}}$ — по воздуху в пространстве между первичной и вторичной обмотками.

Падающая внешняя характеристика у трансформатора с подвижными обмотками получается благодаря увеличенному магнитному рассеянию, вызванному размещением первичной и вторичной обмоток на значительном расстоянии друг от друга.

Плавное регулирование режима производится благодаря перемещению подвижных обмоток. Ступенчатое увеличение тока осуществляется переключением катушек первичных и вторичных обмоток с последовательного на параллельное соединение. Общая кратность регулирования составляет около 16.

1.1.2 Сварочные трансформаторы с подвижными катушками. Трансформатор марки ТДМ-503 — трансформатор для дуговой сварки с механическим регулированием сварочного тока (рисунок 1.2), используемый для питания электрической дуги при ручной дуговой сварке, резке и наплавке металлов однофазным переменным током частотой 50 Гц. Данные трансформаторы представляют собой передвижные установки в однокорпусном исполнении с естественной вентиляцией.

Трансформатор ТДМ-503 имеет стержневой магнитопровод 2, первичную 6 и вторичную 4 обмотки, переключатель диапазонов тока 12, регулятор тока 1, раму 8, колеса 7 и не показанный на рисунке кожух. Магнитопровод набран из холоднокатаной электротехнической стали толщиной 0,5 мм. Сердечник трансформатора стержневого типа. Первичная и вторичная обмотки имеют по

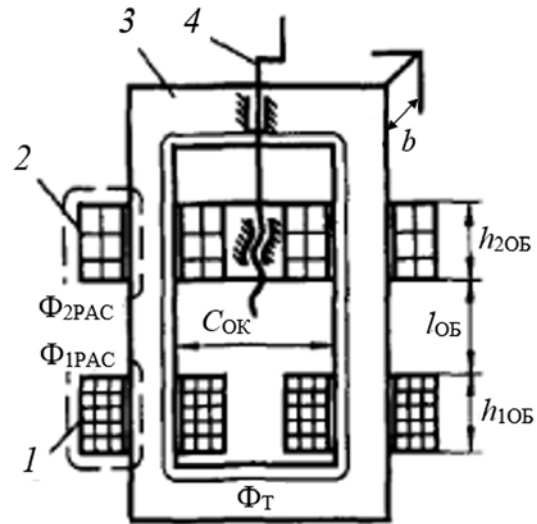


Рисунок 1.1 — Конструктивная схема трансформатора с подвижными обмотками

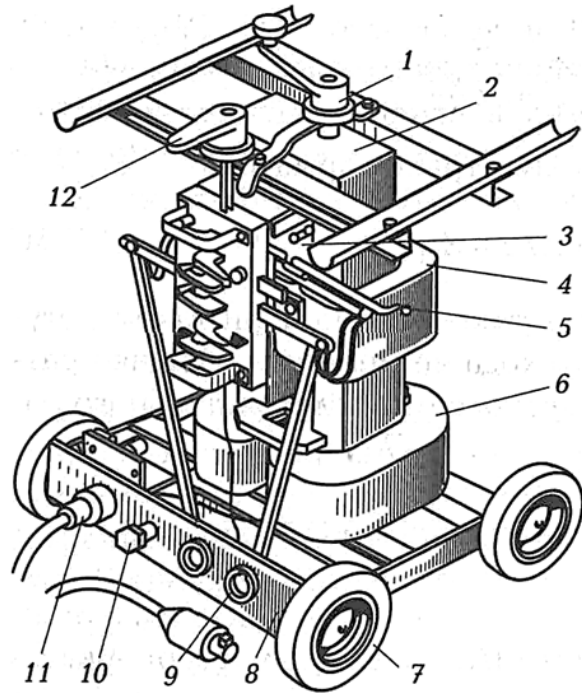


Рисунок 1.2 — Конструкция трансформатора ТДМ-503

две катушки, расположенные попарно на стержнях магнитопровода. Цилиндрические катушки первичной обмотки намотаны алюминиевым проводом со стекловолоконной изоляцией, пропитаны электротехническим лаком, неподвижно закреплены у нижнего ярма. Катушки вторичной обмотки намотаны «на ребро» алюминиевой шиной, изолированы стеклолентой и также пропитаны лаком, они скреплены друг с другом с помощью пластмассовой обоймы 3. Перечисленные обмоточные и изоляционные материалы относятся к классу F, т. е. обеспечивают работоспособность при температуре их нагрева до 155 °С. В обойму впрессована гайка, которая при вращении ходового винта обеспечивает перемещение всего пакета вторичных катушек, т. е. плавное регулирование сварочного тока. К обойме прикреплен также токоуказатель 5, перемещающийся по прорези шкалы на кожухе трансформатора. Ножевым переключателем 12 изменяют соединение друг с другом катушек как первичной, так и вторичной обмоток, получая два диапазона регулирования тока. На раме трансформатора имеются два байонетных разъема 9 для подключения сварочных проводов, сетевой штепсельный разъем 11 и болт заземления 10.

Принципиальная электрическая схема трансформатора приведена на рисунке 1.3, а. Для снижения помех радиоприему трансформатор снабжен емкостным фильтром из конденсаторов С1, С2. На каждом стержне размещено по одной катушке первичной и вторичной обмотки. Каждая первичная катушка состоит из двух секций Т.11, Т.12 и Т.13, Т.14. Переключателем S выполняется последовательное или параллельное соединение катушек как первичной, так и вторичной обмотки. Переключатель S показан в положении, обеспечивающем параллельное соединение катушки первичной обмотки Т.11, Т.12 с катушкой Т.13, Т.14, а также параллельное соединение катушек Т.21, Т.22 вторичной обмотки, что соответствует диапазону больших токов. Крайние внешние характеристики (рисунок 1.3, б) для этого диапазона показаны сплошными линиями, левая соответствует верхнему положению вторичной обмотки, правая – нижнему ее положению, т. е. предельному сближению с первичной обмоткой.

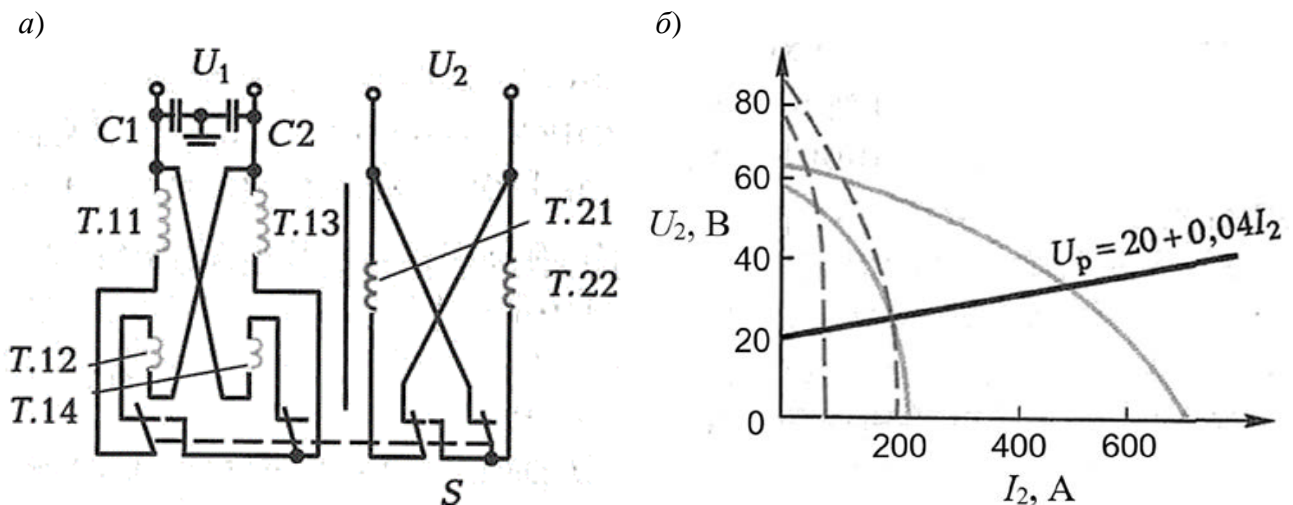


Рисунок 1.3 – Принципиальная схема (а) и внешние характеристики (б) трансформатора ТДМ-503

При другом положении переключателя попарно-последовательно соединяются катушки первичной и вторичной обмотки – секция Т.11 катушки первичной обмотки соединяется последовательно с секцией Т.13, а катушка вторичной обмотки Т.21 последовательно соединяется с катушкой Т.22, что обеспечивает диапазон малых токов. Внешние характеристики для этого случая изображены пунктиром на рисунке 1.3, б. При таком соединении отключаются секции Т.12 и Т.14 первичных катушек, в результате чего напряжение холостого хода повышается, что благоприятно отражается на устойчивости процесса сварки при малых токах. Общая кратность регулирования тока при этом около 7, что вполне достаточно по условиям сварки покрытыми электродами.

1.2 Расчет сварочного трансформатора

Задача. Напишите уравнение и постройте внешнюю характеристику сварочного трансформатора с повышенным рассеянием, соответствующую сварке на максимально допустимом токе.

1.2.1 Исходные данные.

$I_{2Н}$ – номинальный сварочный ток источника питания, А;

$ПН_H$ – номинальная продолжительность нагрузки, %;

U_{20} – напряжение холостого хода, В;

$ПН_P$ – рабочая продолжительность нагрузки, %;

$\cos \varphi_K, \varphi_K$ – сдвиг фаз между напряжением U_{20} и током I_{K3} при коротком замыкании.

Исходные данные к задаче даны в таблице 1.1.

1.2.2 Порядок решения задачи.

Так как $ПН_P$ отличается от $ПН_H$, то определим величину допустимого сварочного тока по формуле

$$I_{2\text{доп}} = I_{2Н} \cdot \sqrt{\frac{ПН_H}{ПН_P}}. \quad (1.1)$$

Напряжение на дуге при токе $I_D = I_{2\text{доп}}$

$$U_{D0} = 20 + 0,04 \cdot I_{2\text{доп}}. \quad (1.2)$$

Строим векторную диаграмму трансформатора (рисунок 1.4). Построение начинаем с вектора U_{D0} (точка А). Выбираем масштаб по напряжению m_H , В/см, тогда длины векторов

$$l_{U_{D0}} = \frac{U_{D0}}{m_H}; \quad l_{U_{20}} = \frac{U_{20}}{m_H}.$$

Таблица 1.1 – Исходные данные к решению задачи

Номер варианта	I_{2H} , А	ПНН, %	U_{20} , В	ПНР, %	$\cos \varphi_K$
1	160	20	60	30	0,22
2	160	25	65	35	0,24
3	160	30	70	40	0,26
4	160	35	75	55	0,28
5	160	40	80	60	0,3
6	250	20	60	40	0,22
7	250	25	65	50	0,24
8	250	30	70	45	0,26
9	250	35	75	55	0,28
10	250	40	80	60	0,3
11	315	55	65	40	0,22
12	315	60	70	70	0,24
13	315	65	75	50	0,26
14	315	70	80	75	0,28
15	315	75	65	80	0,3
16	400	55	70	40	0,32
17	400	60	75	70	0,22
18	400	65	80	50	0,24
19	400	70	65	75	0,26
20	400	75	70	80	0,28
21	500	55	75	40	0,3
22	500	60	80	70	0,32
23	500	65	65	50	0,22
24	500	70	70	75	0,24
25	500	75	75	80	0,26
26	600	55	60	60	0,3
27	600	60	65	70	0,32
28	600	65	70	50	0,34
29	600	70	75	75	0,36
30	600	75	60	80	0,38
31	700	55	65	60	0,34
32	700	60	60	70	0,36
33	700	65	75	55	0,38
34	700	70	70	75	0,4
35	700	75	65	80	0,42

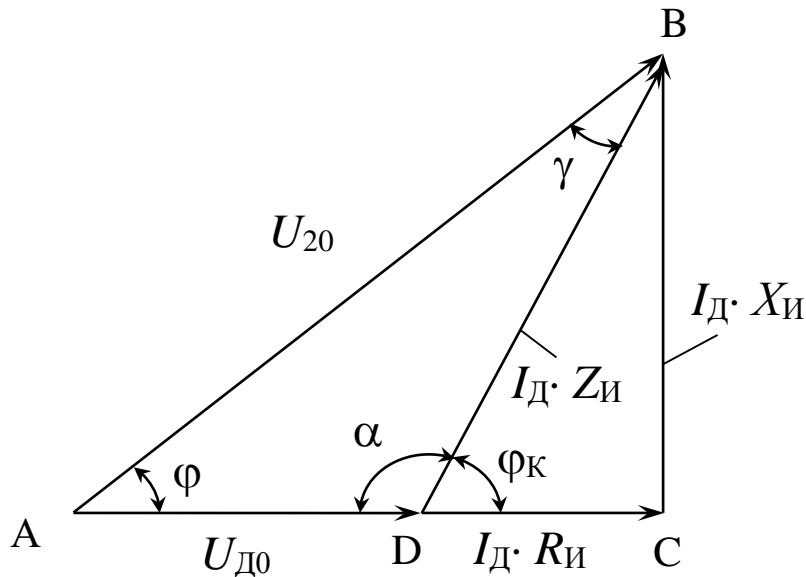


Рисунок 1.4 – Векторная диаграмма трансформатора

Угол $\varphi_k = \arccos(\cos \varphi_k)$.

Угол $\alpha = 180^\circ - \varphi_k$.

От конца вектора $U_{до}$ (точка D) откладываем угол φ_k . Далее от точки A радиусом $R = l_{U_{20}}$ делаем засечку на пересечении с углом φ_k (точка B), от точки B опускаем перпендикуляр до пересечения с продолжением вектора $U_{до}$ (точка C).

По теореме синусов из треугольника ABD

$$\frac{U_{20}}{\sin \alpha} = \frac{U_{до}}{\sin \gamma} = \frac{I_{2доп} \cdot Z_{и}}{\sin \varphi}. \quad (1.3)$$

Найдем $\sin \gamma$:

$$\sin \gamma = \frac{U_{до} \cdot \sin \alpha}{U_{20}}; \quad (1.4)$$

$$\gamma = \arcsin(\sin \gamma);$$

$$\varphi = 180^\circ - (\alpha + \gamma).$$

Найдем активное сопротивление источника питания – трансформатора. Из треугольника BCD видно, что

$$R_{и} = Z_{и} \cdot \cos \varphi_k. \quad (1.5)$$

Из уравнения (1.3) полное $Z_{и}$, Ом, а затем индуктивное $X_{и}$, Ом, сопротивление трансформатора

$$Z_{\text{и}} = \frac{U_{20} \cdot \sin \varphi}{I_{2\text{доп}} \cdot \sin \alpha}; \quad (1.6)$$

$$X_{\text{и}} = \sqrt{Z_{\text{и}}^2 - R_{\text{и}}^2}. \quad (1.7)$$

Из треугольника BCD определим ток короткого замыкания трансформатора:

$$I_{\text{кз}} = \frac{U_{20}}{Z_{\text{и}}}. \quad (1.8)$$

Из треугольника ABC определяем уравнение внешней характеристики трансформатора $U_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$:

$$U_{\text{д}} = \sqrt{U_{20}^2 - (I_{\text{д}} \cdot X_{\text{и}})^2} - I_{\text{д}} \cdot R_{\text{и}}. \quad (1.9)$$

Задаем значения $I_{\text{д}}$ от 0 до $I_{\text{кз}}$ и вычисляем значения $U_{\text{д}}$, данные вычислений заносим в таблицу 1.2 и строим внешнюю характеристику $U_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$.

Таблица 1.2 – Расчет внешней характеристики $U_{\text{д}} = f(I_{\text{д}})$

$I_{\text{д}}, \text{ A}$	0	100	200	300	400	500	...	$I_{\text{кз}}$
$U_{\text{д}}, \text{ В}$								

1.2.3 Пример решения задачи.

Исходные данные представлены в таблице 1.3.

Таблица 1.3 – Исходные данные

$I_{2\text{н}}, \text{ A}$	ПНН, %	$U_{20}, \text{ В}$	ПНР, %	$\cos \varphi_{\text{к}}$
350	50	60	80	0,36

Определим величину допустимого сварочного тока по формуле (1.1):

$$I_{2\text{доп}} = 350 \cdot \sqrt{\frac{50}{80}} = 276,7 \text{ A.}$$

Напряжение на дуге при токе $I_{\text{д}} = I_{2\text{доп}}$ рассчитываем по формуле (1.2):

$$U_{\text{д0}} = 20 + 0,04 \cdot 276,7 = 31,1 \text{ В};$$

$$\varphi_{\text{к}} = \arccos 0,36 = 68,9^\circ;$$

$$\alpha = 180^\circ - 68,9^\circ = 111,1^\circ.$$

Строим векторную диаграмму по представленной выше методике (см. рисунок 1.4). Выбираем масштаб по напряжению $m_H = 10 \text{ В/см}$, тогда длины векторов составят:

$$l_{U_{D0}} = \frac{31,1}{10} \approx 3,1 \text{ см}; \quad l_{U_{20}} = \frac{60}{10} = 6 \text{ см.}$$

Из треугольника ABD по формуле (1.4) найдем $\sin \gamma$:

$$\sin \gamma = \frac{31,1 \cdot \sin 111,1^\circ}{60} = 0,4833;$$

$$\gamma = \arcsin 0,4833 = 28,9^\circ;$$

$$\varphi = 180^\circ - (111,1^\circ + 28,9^\circ) = 40^\circ.$$

Найдем полное сопротивление Z_{II} по формуле (1.6), а затем индуктивное сопротивление X_{II} трансформатора по формуле (1.7):

$$Z_{II} = \frac{60 \cdot \sin 40^\circ}{276,7 \cdot \sin 111,1^\circ} = 0,15 \text{ Ом};$$

$$X_{II} = \sqrt{0,15^2 - 0,054^2} = 0,14 \text{ Ом.}$$

Найдем активное сопротивление R_{II} трансформатора по формуле (1.5):

$$R_{II} = 0,15 \cdot 0,36 = 0,054 \text{ Ом.}$$

Определим ток короткого замыкания трансформатора по формуле (1.8):

$$I_{кз} = \frac{60}{0,15} = 400 \text{ А.}$$

Рассчитываем внешнюю характеристику трансформатора $U_D = f(I_D)$ по формуле (1.9). Задаем значения I_D от 0 до $I_{кз}$ и вычисляем значения U_D . Данные вычислений заносим в таблицу 1.4 и строим внешнюю вольт-амперную характеристику (рисунок 1.5).

Таблица 1.4 – Результаты расчета внешней характеристики $U_D = f(I_D)$

$I_D, \text{ А}$	0	100	200	300	400
$U_D, \text{ В}$	60	53	42,4	27	0,3

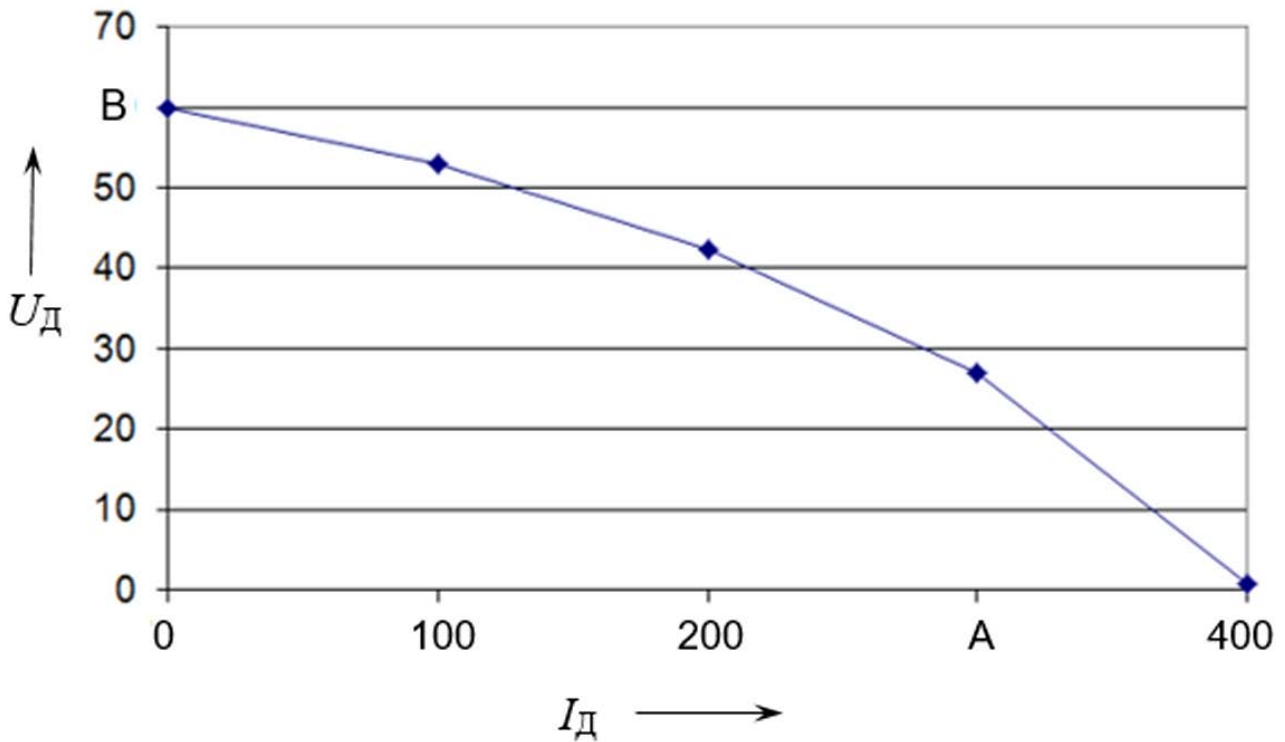


Рисунок 1.5 – Внешняя вольт-амперная характеристика трансформатора

1.3 Порядок выполнения работы

- 1 Выполнить задание по варианту, предложенному преподавателем.
- 2 Нарисовать в масштабе упрощенную векторную диаграмму сварочного трансформатора с повышенным магнитным рассеянием.
- 3 Рассчитать и построить внешнюю вольт-амперную характеристику сварочного трансформатора.
- 4 Сделать выводы по результатам расчетов.

Контрольные вопросы

- 1 Назначение сварочного трансформатора, достоинства и недостатки.
- 2 Принцип действия трансформаторов с увеличенным электромагнитным рассеянием.
- 3 Каким образом осуществляется регулировка сварочного тока в трансформаторах с подвижными обмотками типа ТДМ?
- 4 Какие параметры сварочного трансформатора отображаются на его векторной диаграмме?
- 5 Как формируется падающая внешняя вольт-амперная характеристика трансформатора?

2 Практическое занятие № 2. Расчет конструкции однофазных трансформаторов для дуговой сварки и построение внешних характеристик

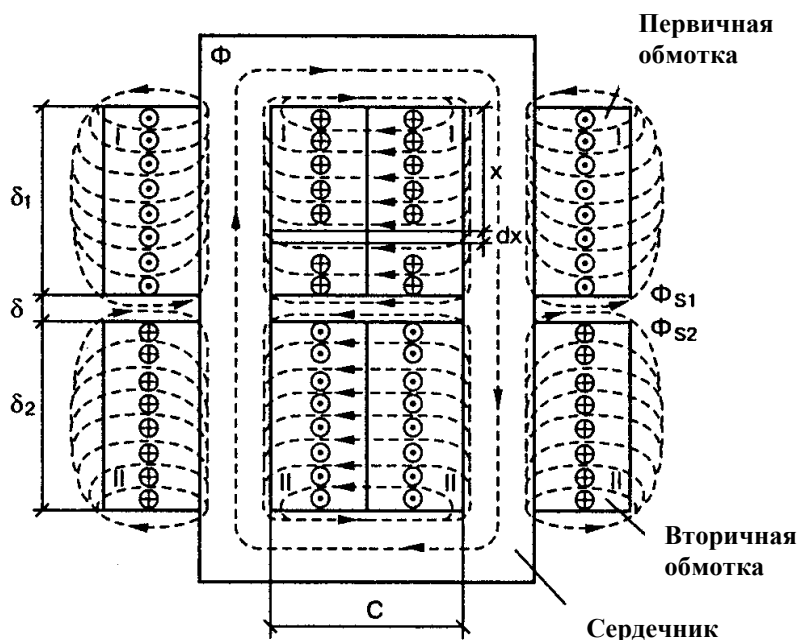
Цель работы: изучить устройство и принцип работы трансформаторов для дуговой сварки, рассчитать их конструкцию и внешние вольт-амперные характеристики.

2.1 Исходные данные к задаче

Рассчитать сварочный трансформатор, предназначенный для работы от сети переменного тока 220/380 В, 50 Гц и обеспечивающий максимальный сварочный ток I_M . Исходные данные к задаче даны в таблице 2.1.

2.2 Общие теоретические сведения

Основным элементом сварочного источника переменного тока является специализированный сварочный трансформатор с падающими внешними вольт-амперными характеристиками [1–3]. Для получения крутопадающей внешней характеристики используют индуктивность рассеяния трансформатора. Для получения требуемой величины индуктивности рассеяния обмотки трансформатора выполняются в виде дисков (рисунок 2.1).



δ_1 – высота первичной обмотки; δ_2 – высота вторичной обмотки; δ – зазор между первичной и вторичной обмотками; C – ширина окна сердечника

Рисунок 2.1 – Картина силовых полей стержневого трансформатора с дисковыми обмотками

Таблица 2.1 – Исходные данные к задаче

Номер задачи	Номинальный (максимальный) сварочный ток I_M , А	Минимальный сварочный ток $I_{СВ\ мин}$, А	Напряжение питающей сети (частота $F = 50$ Гц), В	Номинальная продолжительность нагрузки ПН, %	Напряжение холостого хода $U_{ХХ}$, В
1	100	20	380	30	50
2	100	20	220	40	55
3	100	20	380	50	60
4	100	20	220	60	65
5	125	30	220	30	50
6	125	30	380	40	55
7	125	30	220	50	60
8	125	30	380	60	65
9	160	60	380	30	50
10	160	60	220	40	55
11	160	60	380	50	60
12	160	60	220	60	65
13	200	70	220	30	55
14	200	70	380	40	60
15	200	70	220	50	65
16	200	70	380	60	70
17	250	100	380	30	60
18	250	100	220	40	65
19	250	100	380	50	70
20	250	100	220	60	75
21	280	50	220	45	60
22	280	50	380	50	65
23	280	50	220	55	70
24	280	50	380	60	75
25	315	60	380	45	65
26	315	60	220	50	70
27	315	60	380	55	75
28	315	60	220	60	80
29	400	80	220	45	70
30	400	80	380	50	75
31	400	80	220	55	80
32	400	80	380	60	70
33	500	100	380	45	75
34	500	100	220	50	80
35	500	100	380	55	70
36	500	100	220	60	75
37	630	200	380	50	75
38	630	200	380	55	70
39	630	200	380	60	80
40	630	200	380	65	75

В трансформаторах с дисковыми обмотками одна обмотка удалена от другой, поэтому значительная часть магнитного потока первичной обмотки не связана со вторичной обмоткой. Еще говорят, что у этих трансформаторов увеличенное электромагнитное рассеяние. Индуктивности рассеяния L_{1S} и L_{2S} имеют значительную величину, и их реактивное сопротивление оказывает большое влияние на ток трансформатора.

Используя трансформатор с дисковыми обмотками, можно легко получить необходимую падающую внешнюю характеристику, где рабочий ток составляет примерно 80 % от тока короткого замыкания.

Регулировка сварочного тока обычно достигается изменением расстояния между обмотками, которые выполняются подвижными.

Индуктивность рассеяния трансформатора зависит в основном:

- от взаимного расположения обмоток;
- от конфигурации обмоток;
- от посторонних факторов, таких как близко расположенные к трансформатору предметы из магнитных материалов.

На рисунке 2.1 схематически изображена картина распределения силовых магнитных полей в стержневом трансформаторе с дисковыми обмотками, на которой представлены общий магнитный поток Φ и потоки рассеяния обмоток – Φ_{S1} и Φ_{S2} . Эти потоки возникают благодаря магнитодвижущим силам $F = I \cdot W$, создаваемым обмотками трансформатора [3].

В окне сердечника ток первичной обмотки трансформатора направлен от зрителя, а ток вторичной обмотки – наоборот. Благодаря этому для потоков рассеяния первичная и вторичная обмотки представляют собой своеобразный соленоид с промежутком δ , называемым главным каналом рассеяния.

В этом канале проходят основные потоки рассеяния первичной и вторичной обмоток. Благодаря тому, что обмотки трансформатора не сосредоточены в точке, а определенным образом распределены в пространстве, часть потока рассеяния проходит внутри обмоток.

Потоки рассеяния в канале между катушками, а также внутри катушек суммируются и создают общий поток рассеяния.

Специфика работы сварочного трансформатора заключается в том, что он нагружен не на все 100 % времени своего включения. Степень нагруженности определяется продолжительностью нагрузки:

$$\text{ПН} = \frac{t_p}{t_{\text{ц}}} \cdot 100 \%, \quad (2.1)$$

где t_p – длительность рабочего цикла;

$t_{\text{ц}}$ – общее время цикла, состоящего из рабочего цикла и паузы.

Длительность цикла принимается равной:

- 5 мин – для источников ручной дуговой сварки;
- 10 мин – для источников механизированной сварки [1, 2].

Обычно считается, что ПН сварочного трансформатора не превышает 60 %. Это позволяет за счет увеличения плотности тока в обмотках уменьшить их сечения без значительного ухудшения теплового режима. Плотность тока для любого значения ПН рассчитывается по формуле

$$J_{\text{П}} = \frac{J}{\sqrt{\frac{\text{ПН}}{100}}}, \quad (2.2)$$

где $J_{\text{П}}$ – плотность тока для произвольного значения ПН, А/мм²;
 J – плотность тока для долговременного режима работы [3].

2.3 Пример расчета

1 Исходные данные для расчета:

- а) номинальный (максимальный) сварочный ток $I_{\text{М}} = 125$ А;
- б) минимальный сварочный ток $I_{\text{мин}} = 30$ А;
- в) напряжение питающей сети $U_1 = 380$ В;
- г) частота напряжения питающей сети $f = 50$ Гц;
- д) номинальная продолжительность нагрузки ПН = 20 %;
- е) напряжение холостого хода $U_{\text{ХХ}} = 45$ В.

2 Рассчитываем плотность тока в медных обмотках сварочного трансформатора для ПН = 20 %. При долговременной работе такого трансформатора допустимая плотность тока для меди $J = 3,5$ А / мм², поэтому по формуле (2.2) [3]

$$J_{\text{П}}^{\text{Cu}} = \frac{3,5}{\sqrt{0,2}} = 7,8 \text{ А / мм}^2.$$

Так как алюминий имеет более высокое по сравнению с медью, удельное сопротивление, то для него нужно выбирать плотность тока в 1,6 раза меньше:

$$J_{\text{П}}^{\text{Al}} = \frac{7,8}{1,6} = 4,9 \text{ А / мм}^2.$$

Первичная обмотка выполняется медным проводом, а вторичная – алюминиевым. Рассчитываем плотность тока для медно-алюминиевой обмотки:

$$J_{\text{П}}^{\text{Cu-Al}} = \frac{7,8 + 4,9}{2} = 6,36 \text{ А / мм}^2.$$

3 Рассчитываем максимальное напряжение на дуге, соответствующее максимальному сварочному току, по формуле

$$U_{\text{ДМ}} = 20 + 0,04 \cdot I_{\text{М}} = 20 + 0,04 \cdot 125 = 25 \text{ В}. \quad (2.3)$$

4 Находим габаритную мощность сварочного трансформатора:

$$P_{\Gamma} = I_{\text{M}} \cdot U_{\text{XX}} = 125 \cdot 45 = 5625 \text{ В} \cdot \text{А}. \quad (2.4)$$

5 Определяем произведение площади окна сердечника S_{O} на площадь сечения стержня магнитопровода S_{C} для медно-алюминиевых обмоток:

$$S_{\text{C}} \cdot S_{\text{O}} = \frac{100 \cdot P_{\Gamma}}{2,22 \cdot B_m \cdot J_{\text{II}}^{\text{Cu-Al}} \cdot F \cdot K_{\text{O}} \cdot K_{\text{C}}}, \quad (2.5)$$

где K_{C} – коэффициент заполнения стали, $K_{\text{C}} = 0,95$;

S_{O} – площадь окна сердечника (рисунок 2.2), $S_{\text{O}} = c \cdot h$, см²;

S_{C} – площадь сечения стержня магнитопровода, $S_{\text{C}} = b \cdot a$, см²;

K_{O} – коэффициент заполнения окна сердечника, $K_{\text{O}} = 0,33$;

B_m – максимальная индукция сердечника, $B_m = 1,42$ Тл;

F – частота сетевого напряжения, $F = 50$ Гц.

$$S_{\text{C}} \cdot S_{\text{O}} = \frac{100 \cdot 5625}{2,22 \cdot 1,42 \cdot 6,36 \cdot 50 \cdot 0,33 \cdot 0,95} = 1790 \text{ см}^4.$$

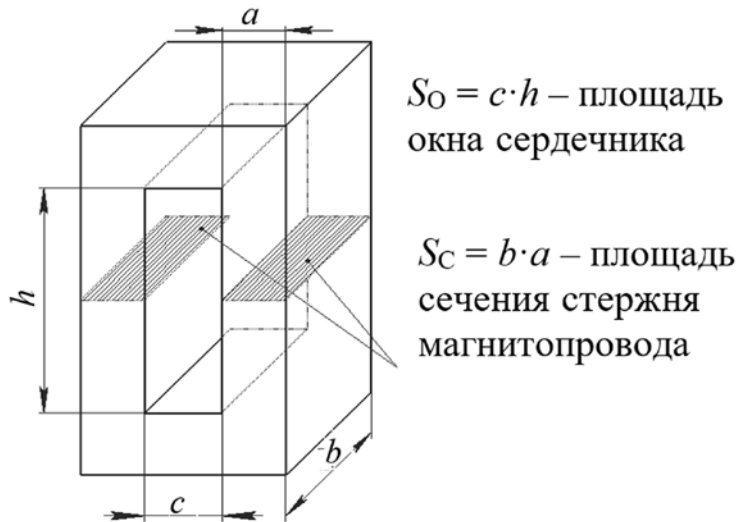


Рисунок 2.2 – Размеры стержневого сердечника трансформатора

6 Рекомендуемые соотношения размеров для стержневых трансформаторов (см. рисунок 2.2):

$$X = \frac{c}{a} = 1,6; \quad Y = \frac{b}{a} = 2; \quad Z = \frac{h}{a} = 2,5 \dots 5 \text{ (принимается равным 4).}$$

Если расписать произведение $S_{\text{O}} \cdot S_{\text{C}}$, то оно будет выглядеть так:

$$S_c \cdot S_o = (c \cdot h) \cdot (b \cdot a) = (1,6 \cdot a \cdot 4 \cdot a) \cdot (2 \cdot a \cdot a) = 12,8 \cdot a^4.$$

Значит, теперь можно найти a и остальные размеры:

$$1790 = 12,8 \cdot a^4 \rightarrow a = \sqrt[4]{\frac{1790}{12,8}} = 3,4 \text{ см.}$$

$$c = 1,6 \cdot a = 1,6 \cdot 3,4 = 5,5 \text{ см; } b = 2 \cdot a = 2 \cdot 3,4 = 6,8 \text{ см; } h = 4 \cdot a = 4 \cdot 3,4 = 13,6 \text{ см.}$$

7 Определяем ЭДС, приходящуюся на один виток трансформатора:

$$E_B = 4,44 \cdot 10^{-4} \cdot B_m \cdot F \cdot S_c \cdot K_c = 4,44 \cdot 10^{-4} \cdot B_m \cdot F \cdot b \cdot a \cdot K_c; \quad (2.6)$$

$$E_B = 4,44 \cdot 10^{-4} \cdot 1,42 \cdot 50 \cdot 6,8 \cdot 3,4 \cdot 0,95 = 0,708 \text{ В/виток.}$$

8 Определяем число витков вторичной обмотки трансформатора:

$$W_2 = \frac{U_{XX}}{E_B} = \frac{45}{0,708} = 64 \text{ витка.} \quad (2.7)$$

9 Находим площадь сечения алюминиевого провода вторичной обмотки:

$$S_2 = \frac{I_M}{J_{\text{Al}}} = \frac{125}{4,9} = 26 \text{ мм}^2. \quad (2.8)$$

10 Определяем число витков первичной обмотки:

$$W_1 = \frac{U_1}{E_B} = \frac{380}{0,708} = 536 \text{ витков.} \quad (2.9)$$

11 Находим максимальный ток первичной обмотки:

$$I_{1M} = I_M \cdot \frac{W_2}{W_1} = 125 \cdot \frac{64}{536} = 14,8 \text{ А.} \quad (2.10)$$

12 Находим площадь сечения медного провода первичной обмотки:

$$S_1 = \frac{I_{1M}}{J_{\text{Cu}}} = \frac{14,8}{7,8} = 1,89 \text{ мм}^2. \quad (2.11)$$

13 Индуктивность L_{SMIN} , требуемую для ограничения сварочного тока до $I_M = 125 \text{ А}$, находим из уравнения внешней характеристики трансформатора:

$$U_2 = \sqrt{U_{XX}^2 - (X_{T \text{ min}} \cdot I_2)^2}, \quad (2.12)$$

где U_2 – максимальное напряжение на дуге, $U_2 = U_{\text{ДМ}} = 25$ В;

$U_{\text{ХХ}}$ – напряжение холостого хода, $U_{\text{ХХ}} = 45$ В;

I_2 – максимальный сварочный ток, $I_2 = I_{\text{М}} = 125$ А;

$X_{\text{T min}}$ – минимальное приведенное индуктивное сопротивление обмотки трансформатора, $X_{\text{T min}} = 2\pi \cdot F \cdot L_{\text{S min}}$, Ом;

$L_{\text{S min}}$ – индуктивность рассеяния, требуемая для ограничения сварочного тока на уровне $I_{\text{М}} = 125$ А.

Выражаем из формулы требуемое значение $L_{\text{S min}}$:

$$U_2^2 = U_{\text{ХХ}}^2 - (X_{\text{T min}} \cdot I_2)^2 \rightarrow (2\pi \cdot F \cdot L_{\text{S min}} \cdot I_2)^2 = U_{\text{ХХ}}^2 - U_2^2 \rightarrow$$

$$L_{\text{S min}} = \frac{\sqrt{U_{\text{ХХ}}^2 - U_2^2}}{2\pi \cdot F \cdot I_2} = \frac{\sqrt{45^2 - 25^2}}{2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 125} = 0,00095 \text{ Гн} \approx 1 \text{ мГн.}$$

Соответственно, находим $X_{\text{T min}}$:

$$X_{\text{T min}} = 2\pi \cdot F \cdot L_{\text{S min}} = 2 \cdot 3,14 \cdot 50 \cdot 0,00095 \approx 0,3 \text{ Ом.} \quad (2.13)$$

14 Фактическую индуктивность рассеяния при данной конфигурации сердечника трансформатора можно найти по формуле

$$L_{\text{S}}^{\text{ФАКТ}} = 0,7 \frac{W_2^2 \cdot p \cdot \mu_0}{c} \left(\delta + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right), \quad (2.14)$$

где W_2 – количество витков вторичной обмотки;

μ_0 – магнитная проницаемость вакуума, $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$;

c – ширина окна сердечника, м;

δ_1 – высота первичной обмотки, м;

δ_2 – высота вторичной обмотки, м;

δ – зазор между первичной и вторичной обмотками, м;

p – периметр зазора, м.

Если зазор между обмотками минимальный ($\delta = 0$), то формулу для минимальной фактической индуктивности рассеяния можно упростить:

$$L_{\text{S min}}^{\text{ФАКТ}} \approx 0,7 \frac{W_2^2 \cdot p \cdot \mu_0}{c} \left(\frac{h}{3} \right). \quad (2.15)$$

Как видно из формулы, индуктивность рассеяния прямо пропорциональна высоте окна h и обратно пропорциональна ширине окна c сердечника. Если обмотки заполняют всю ширину окна сердечника, то периметр зазора можно определить по формуле

$$p \approx 2 \cdot (a + b) + \frac{c \cdot \pi}{2} = 2 \cdot (0,034 + 0,068) + \frac{0,055 \cdot 3,14}{2} = 0,29 \text{ м.}$$

Рассчитываем минимальную фактическую индуктивность рассеяния при данной конфигурации сердечника по формуле (2.15):

$$L_{s \min}^{\text{ФАКТ}} \approx 0,7 \frac{64^2 \cdot 0,29 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,136}{3 \cdot 0,055} = 0,0009 \text{ Гн} \approx 0,9 \text{ мГн.}$$

15 Площадь окна сердечника

$$S_0 = c \cdot h = 5,5 \cdot 13,6 = 74,8 \text{ см}^2.$$

16 Так как полученное фактическое значение индуктивности рассеяния $L_{s \min}^{\text{ФАКТ}}$ меньше расчетного $L_{s \min}$, то окно следует сделать уже и выше (если бы индуктивность рассеяния оказалась больше, чем требуется, то окно следовало бы сделать шире и ниже).

Поэтому несколько изменяем (уточняем) значения h и c : принимаем $h^* = 14,5$ см, $c^* = 5,2$ см.

Для уточненных высоты h^* и ширины c^* окна сердечника пересчитываем периметр p^* и фактическую индуктивность рассеяния:

$$p^* \approx 2 \cdot (a + b) + \frac{c^* \cdot \pi}{2} = 2 \cdot (0,034 + 0,068) + \frac{0,052 \cdot 3,14}{2} = 0,29 \text{ м;}$$

$$L_{s \min}^* \text{ФАКТ} \approx 0,7 \frac{64^2 \cdot 0,29 \cdot 4\pi \cdot 10^{-7} \cdot 0,145}{3 \cdot 0,052} = 0,00097 \text{ Гн} \approx 1 \text{ мГн.}$$

Таким образом, $L_{s \min}^* \text{ФАКТ} = L_{s \min}$ (п.13).

17 Минимальное напряжение дуги при минимальном сварочном токе

$$U_{д \min} = 20 + 0,04 \cdot I_{св \min} = 20 + 0,04 \cdot 30 = 21,2 \text{ В.} \quad (2.16)$$

18 Максимальную индуктивность $L_{s \max}$, требуемую для ограничения сварочного тока на уровне $I_{св \min}$, находим из уравнения внешней характеристики трансформатора:

$$U_2 = \sqrt{U_{xx \min}^2 - (X_{тmax} \cdot I_2)^2}, \quad (2.17)$$

где U_2 – минимальное напряжение на дуге, $U_2 = U_{д \min} = 21,2$ В;

$U_{xx \min}$ – минимальное напряжение холостого хода трансформатора при максимальном удалении первичной и вторичной обмоток, $U_{xx \min} = 0,9U_{xx} = 0,9 \cdot 45 = 40,5$ В;

I_2 – минимальный сварочный ток, $I_2 = I_{св \min} = 30$ А;

$X_{T \max}$ – максимальное приведенное индуктивное сопротивление трансформатора, Ом, $X_{T \max} = 2\pi \cdot F \cdot L_{S \max}$, $L_{S \max}$ – максимальная индуктивность, требуемая для ограничения сварочного тока на уровне $I_{CB \min} = 30$ А.

Выражаем из уравнения (2.17) $X_{T \max}$:

$$U_2^2 = U_{XX \min}^2 - (X_{T \max} \cdot I_2)^2 \rightarrow (X_{T \max} \cdot I_2)^2 = U_{XX \min}^2 - U_2^2 \rightarrow$$

$$X_{T \max} = \frac{\sqrt{U_{XX \min}^2 - U_{д \min}^2}}{I_{CB \min}} = \frac{\sqrt{40,5^2 - 21,2^2}}{30} = 1,15 \text{ Ом.}$$

Требуемая максимальная индуктивность

$$L_{s \max} = \frac{X_{T \max}}{2\pi \cdot F} = \frac{1,15}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,0037 \text{ Гн} \approx 3,7 \text{ мГн.}$$

19 Определяем зазор между первичной и вторичной обмотками δ для увеличения максимального индуктивного сопротивления рассеяния до $X_{T \max}$ из формулы (2.14) для уточненных значений высоты h^* , ширины c^* окна сердечника и периметра канала p^* :

$$L_{s \max} = 0,7 \frac{W_2^2 \cdot p^* \cdot \mu_0}{c^*} \left(\delta + \frac{\delta_1 + \delta_2}{3} \right),$$

где $\delta_1 + \delta_2$ – суммарная высота первичной и вторичной обмоток, $\delta_1 + \delta_2 = h^*$ при отсутствии зазора между обмотками,

$$\delta = \frac{L_{s \max} \cdot c^*}{0,7 W_2^2 \cdot p^* \cdot \mu_0} - \frac{h^*}{3} = \frac{0,0037 \cdot 0,052}{0,7 \cdot 64^2 \cdot 0,29 \cdot 4 \cdot 3,14 \cdot 10^{-7}} - \frac{0,145}{3} = 0,136 \text{ м.}$$

20 Далее требуется построить внешнюю характеристику $U_2 = f(I_2)$ для минимального и максимального зазоров.

При минимальном зазоре $\delta = 0$ напряжение U_2 рассчитывается по формуле (2.12), данные заносим в таблицу 2.2.

$$U_2 = \sqrt{U_{XX}^2 - (X_{T \min} \cdot I_2)^2} = \sqrt{45^2 - (0,3 \cdot I_2)^2}.$$

Таблица 2.2 – Построение внешней характеристики при зазоре $\delta = 0$

$I_2, \text{ А}$	0	50	100	150
$U_2, \text{ В}$	45	42,4	33,5	0

При максимальном зазоре δ напряжение U_2 рассчитывается по формуле (2.17), данные заносим в таблицу 2.3.

$$U_2 = \sqrt{U_{\text{XX min}}^2 - (X_{\text{T max}} \cdot I_2)^2} = \sqrt{40,5^2 - (1,15 \cdot I_2)^2}.$$

Таблица 2.3 – Построение внешней характеристики при максимальном зазоре δ

$I_2, \text{ A}$	0	10	20	30	35,2
$U_2, \text{ В}$	40,5	38,8	33,3	21,2	0

Перед заполнением таблиц необходимо найти токи короткого замыкания. Для этого в уравнении внешней характеристики напряжение U_2 приравнивается к нулю в обоих случаях, т. е.

$$0 = \sqrt{U_{\text{XX}}^2 - (X_{\text{T min}} \cdot I_2)^2} \rightarrow I_{\text{2кз max}} = \frac{U_{\text{XX}}}{X_{\text{T min}}} = \frac{45}{0,3} = 150 \text{ A};$$

$$0 = \sqrt{U_{\text{XX min}}^2 - (X_{\text{T max}} \cdot I_2)^2} \rightarrow I_{\text{2кз min}} = \frac{U_{\text{XX min}}}{X_{\text{T max}}} = \frac{40,5}{1,15} = 35,2 \text{ A}.$$

После этого по точкам в масштабе строим графики.

Для построения нагрузочной характеристики необходимо взять две точки:

$U_{\text{дм}} = 25 \text{ В}$ при $I_{\text{м}} = 125 \text{ А}$ и $U_{\text{д min}} = 21,2 \text{ В}$ при $I_{\text{св min}} = 30 \text{ А}$.

2.4 Порядок выполнения работы

- 1 Выполнить задание по варианту, предложенному преподавателем.
- 2 Рассчитать габаритные размеры сердечника сварочного трансформатора с подвижными обмотками.
- 3 Рассчитать и построить внешнюю и нагрузочную характеристики сварочного трансформатора для минимального и максимального зазора между первичной и вторичной обмотками.
- 4 Сделать выводы по результатам расчетов.

Контрольные вопросы

- 1 Почему сварочный трансформатор должен обладать падающими внешними вольт-амперными характеристиками?
- 2 От каких параметров зависят габаритные размеры сердечника сварочного трансформатора?
- 3 Что такое индуктивность рассеяния сварочного трансформатора и от каких параметров она зависит?

3 Практическое занятие № 3. Расчет и выбор элементов электрической схемы выпрямления однопостовых сварочных выпрямителей

Цель работы: изучить принцип работы и устройство сварочных выпрямителей для дуговой сварки, рассчитать и выбрать элементы силовой электрической схемы выпрямления.

3.1 Исходные данные к задаче

По заданной мощности, соответствующей сварке на номинальном токе, выберите требуемую схему сварочного выпрямителя, рассчитайте ее параметры и выберите силовые полупроводниковые вентили.

Исходные данные к задаче представлены в таблицах 3.1, 3.2, в таблице 3.1 – технические характеристики выпрямителей для ручной дуговой сварки, в таблице 3.2 – технические характеристики выпрямителей для автоматической сварки под флюсом.

Таблица 3.1 – Технические характеристики выпрямителей для ручной дуговой сварки

Номер задачи	Номинальный сварочный ток $I_{dн}$, А	Номинальное рабочее напряжение $U_{dн}$, В	Минимальный сварочный ток $I_{d\min}$, А	Продолжительность нагрузки номинальная ПНн, %	Продолжительность нагрузки рабочая ПНр, %
1	125	25	25	20	20
2				35	30
3				60	40
4	160	26	30	20	20
5				35	30
6				60	40
7	200	28	40	20	20
8				35	30
9				60	40
10	250	30	45	20	20
11				35	30
12				60	40
13	315	32	50	60	20
14	400	36	80	60	30
15	500	40	100	60	40

3.2 Общие теоретические сведения

Сварочный выпрямитель состоит из следующих основных элементов: трансформатора, регулирующего устройства, полупроводниковых вентилей и дросселя, включаемого в цепь постоянного тока для сглаживания пульсаций и обеспечения нормального переноса электродного металла при сварке [4].

Таблица 3.2 – Технические характеристики выпрямителей для автоматической сварки под флюсом

Номер задачи	Номинальный сварочный ток $I_{dн}$, А	Номинальное рабочее напряжение $U_{dн}$, В	Минимальный сварочный ток $I_{d\min}$, А	Продолжительность нагрузки номинальная ПНн, %	Продолжительность нагрузки рабочая ПНр, %
16	500	46	100	50	30
17				60	40
18				70	50
19	630	52	125	50	30
20				60	40
21				70	50
22	1000	56	300	100	50
23				100	70
24				100	90
25	1250	60	300	100	50
26				100	70
27				100	90
28	1600	66	600	100	50
29	1600	66	600	100	70
30	2000	100	800	100	90

Одной из задач, возникающих при проектировании сварочных выпрямителей, является выбор рациональной схемы выпрямления. При этом принимаются во внимание тип и параметры применяемых вентилях, требования к расчетной мощности и конструкции трансформатора, форма внешних характеристик.

подавляющее большинство сварочных выпрямителей выпускается с питанием от трехфазной сети переменного тока с фазным напряжением первичной обмотки трансформатора $U_{1\phi} = 220$ В. Преимуществами таких выпрямителей являются сглаженная форма кривых напряжения и тока, равномерная загрузка сети, более рациональное использование вентилях.

В сварке нашли широкое применение следующие схемы выпрямления: трехфазная мостовая схема, шестифазная схема с уравнительным дросселем и шестифазная кольцевая схема [4].

Сравнение схем выпрямления (таблица 3.3) показывает:

1) расчетная мощность трансформатора наименьшая у трехфазной мостовой схемы и наибольшая – у схемы с уравнительным дросселем. В мостовой схеме наиболее простое и дешевое решение конструкции выпрямителя: нет уравнительного дросселя, трансформатор с тремя вторичными обмотками;

2) использование вентилях наихудшее в трехфазной мостовой схеме и наилучшее в схеме с уравнительным дросселем, двойные падения напряжения в вентилях при прохождении прямого анодного тока в трехфазной мостовой схеме приводят к повышенным потерям в блоке и к снижению КПД выпрямителя;

3) кольцевая схема занимает промежуточное положение как по расчетной мощности оборудования, так и по использованию вентилях.

Таблица 3.3 – Сравнение схем выпрямления

Схема выпрямления	Средний ток вентиля I_{FAVm}/I_d	Действующий ток вентиля I_{FRMS}/I_d	Амплитуда обратного напряжения вентиля U_{RRM}/U_d	Расчетная мощность трансформатора, S_T/P_d
Шестифазная с уравнивающим дросселем	0,17	0,29	2,1	1,26 + 0,07
Шестифазная кольцевая	0,17	0,41	2,1	1,26
Трехфазная мостовая	0,33	0,58	1,05	1,05

3.3 Пример расчета

При расчете схем предполагаем, что вентили идеальны, т. е. их сопротивления в прямом направлении равны нулю, а в обратном – бесконечности; намагничивающая мощность и активные сопротивления обмоток трансформатора равны нулю; индуктивность рассеяния равна нулю [4].

Так как ПВ_р отличается от ПВ_н, то определим величину допустимого выпрямленного сварочного тока по формуле

$$I_d = I_{dH} \cdot \sqrt{\frac{ПН_H}{ПН_P}}. \quad (3.1)$$

При ручной дуговой и автоматической сварке под флюсом выпрямленное напряжение на дуге U_d и сварочный ток I_d связаны зависимостью

$$U_{d0} = 20 + 0,04 \cdot I_d. \quad (3.2)$$

Схема выпрямления выбирается в зависимости от значения тока I_d :

- для токов до 300 А – трехфазная мостовая;
- для токов 400...600 А – шестифазная с уравнивающим дросселем;
- для токов свыше 600 А – шестифазная кольцевая.

3.3.1 Трехфазная мостовая схема.

Трехфазная мостовая схема (рисунок 3.1) состоит из трехфазного двухобмоточного трансформатора и шести вентилях. Вентили V1, V3, V5, имеющие общие катоды, образуют катодную группу; вентили V2, V4, V6 – анодную. Число пульсаций выпрямленного напряжения за период $m = 6$.

На рисунке 3.1 также представлены кривые фазных напряжений u_a, u_b, u_c вторичных обмоток трансформатора (ось 1), выпрямленного напряжения u_d (ось 2), анодных токов i_1-i_6 (ось 3) и фазного тока i_{2a} вторичных обмоток трансформатора (ось 4). Кривые на осях 3, 4 соответствуют активному характеру нагрузки ($x_d \approx 0$), при этом кривая выпрямленного тока по форме совпадает с кривой напряжения u_d (см. рисунок 3.1, оси 2, 3) [4].

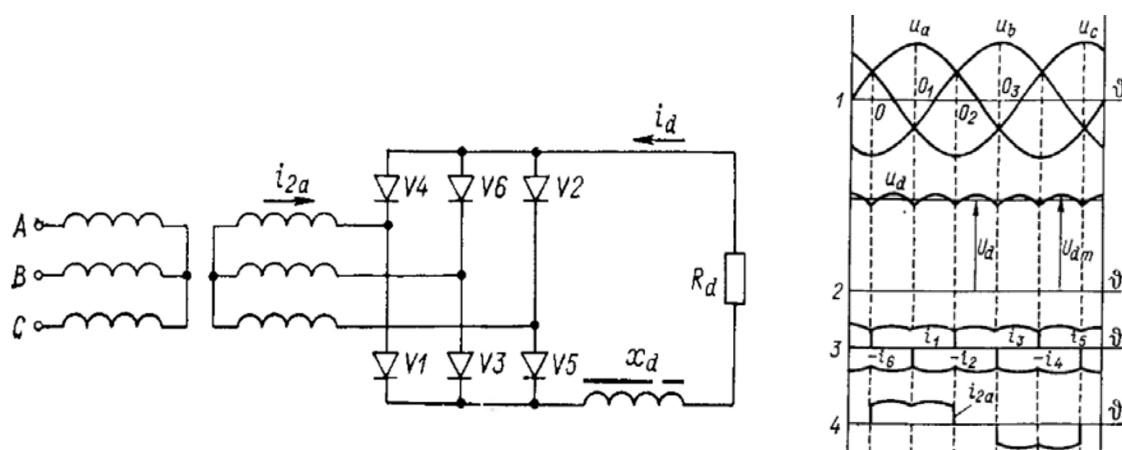


Рисунок 3.1 – Трехфазная мостовая схема на неуправляемых вентилях и линейные диаграммы напряжений и токов

Амплитуда выпрямленного напряжения (см. рисунок 3.1, ось 2)

$$U_{dm} = \sqrt{6} \cdot E_2, \quad (3.3)$$

где E_2 – действующее фазное напряжение вторичных обмоток трансформатора (см. рисунок 3.1, ось 1).

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{3}{\pi} \sqrt{6} \cdot E_2 = 2,34 \cdot E_2; \quad (3.4)$$

$$E_2 = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{U_d}{\sqrt{6}} = 0,428 \cdot U_d. \quad (3.5)$$

Амплитуда анодного и выпрямленного токов

$$I_{dm} = \frac{U_{dm}}{R_d} = \frac{\sqrt{6} \cdot E_2}{R_d} = \frac{\sqrt{6}}{R_d} \cdot \frac{\pi}{3} \cdot \frac{U_d}{\sqrt{6}} = \frac{\pi}{3} \cdot \frac{U_d}{R_d} = 1,045 I_d, \quad (3.6)$$

где R_d – активное сопротивление сварочной дуги, $R_d = \frac{U_d}{I_d}$

Связь между выпрямленным током I_d и действующим фазным током вторичной обмотки трансформатора выражается в виде

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d. \quad (3.7)$$

Ток первичной обмотки трансформатора

$$I_1 = \frac{I_2}{n}, \quad (3.8)$$

где n – коэффициент трансформации, $n = \frac{U_{1\phi}}{E_2}$

$U_{1\phi}$ – фазное напряжение первичной обмотки трансформатора.

Расчетные мощности обеих обмоток трансформатора в данной схеме равны между собой и равны расчетной мощности трансформатора:

$$S_T = S_1 = S_2 = 3 \cdot I_2 \cdot E_2 = 1,05 \cdot P_d, \quad (3.9)$$

где P_d – активная мощность приемника энергии, $P_d = I_d \cdot U_d$.

Расчетная мощность трансформатора незначительно отличается от мощности P_d , что свидетельствует о хорошем использовании трансформатора в схеме.

3.3.2 Шестифазная схема с уравнительным дросселем.

Схема (рисунок 3.2) состоит из трехфазного трансформатора, уравнительного дросселя L и шести вентилях. Трансформатор имеет две группы вторичных обмоток (a', b', c' и a'', b'', c''), каждая из которых соединена в звезду; причем в первой группе нулевая точка звезды образована концами обмоток, а во второй группе – началами. В результате имеем два трехфазных выпрямителя с нулевой точкой, сдвинутые по фазе относительно друг друга на 180° . Уравнительный дроссель выполнен на замкнутом магнитопроводе и имеет две обмотки, включенные между нулевыми точками обеих трехфазных звезд. Дроссель выравнивает мгновенные напряжения трехфазных групп и позволяет осуществить их параллельную работу. Таким образом, выпрямленный ток проходит параллельно через две фазы вторичных обмоток трансформатора, расположенные на разных стержнях трансформатора, и через соответствующие им вентили.

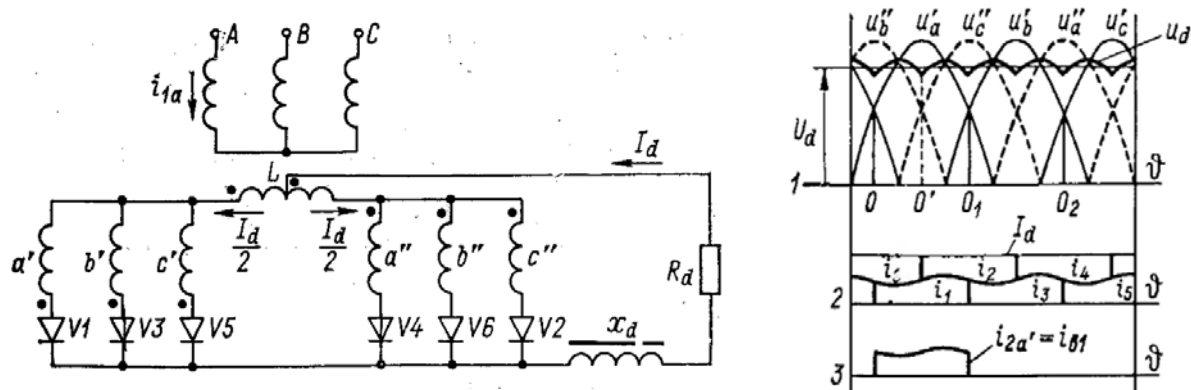


Рисунок 3.2. – Шестифазная схема с уравнительным дросселем и линейные диаграммы напряжений и токов

На рисунке 3.2 представлены кривые фазных напряжений двух групп вторичных обмоток трансформатора $u_{a'}$, $u_{b'}$, $u_{c'}$, $u_{a''}$, $u_{b''}$, $u_{c''}$ и выпрямленного напряжения u_d (ось 1), анодных токов i_1 – i_6 (ось 2) и фазного тока $i_{2a'}$ вторичных обмоток трансформатора (ось 3) [4].

Амплитуда выпрямленного напряжения (см. рисунок 3.2, ось 1)

$$U_{dm} = \sqrt{1,5} \cdot E_2.$$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{1,5} \cdot E_2 = 1,17 \cdot E_2;$$

$$E_2 = 0,855 \cdot U_d,$$

где E_2 – действующее фазное напряжение вторичных обмоток трансформатора (см. рисунок 3.2, ось 1).

Фазный ток вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{I_d}{2\sqrt{3}}.$$

Ток первичной обмотки трансформатора

$$I_1 = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{2} \cdot I_2 = \frac{1}{n} \cdot \frac{1}{\sqrt{6}} \cdot I_d,$$

где n – коэффициент трансформации, $n = \frac{U_{1\phi}}{E_2}$.

Расчетная мощность первичных обмоток трансформатора

$$S_1 = 3I_1 \cdot U_1 = 1,05P_d.$$

Расчетная мощность вторичных обмоток

$$S_2 = 6I_2E_2 = 1,48P_d.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1,26P_d,$$

т. е. на 26 % выше мощности приемника энергии.

Расчетная мощность уравнивающего дросселя

$$S_L = 0,07P_d.$$

3.3.3 Шестифазная кольцевая схема.

Схема состоит из трехфазного трансформатора и шести вентиляей. Трансформатор имеет две группы вторичных обмоток (a', b', c' и a'', b'', c''), соединенных в две звезды; нулевые точки каждой звезды образованы концами обмоток (рисунок 3.3). Блок вентиляей замкнут в «кольцо», причем к точкам соединения анодов вентиляей подсоединены начала обмоток одной группы, а к катодам – начала обмоток другой группы. Выпрямленное напряжение снимается с нулевых точек двух групп вторичных обмоток.

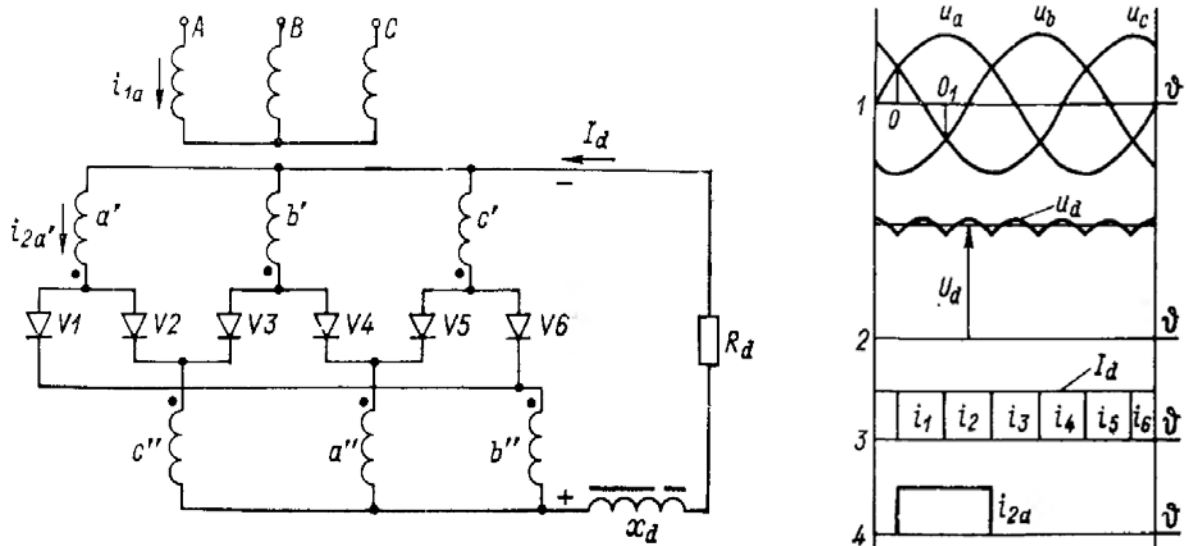


Рисунок 3.3 – Шестифазная кольцевая схема выпрямления и линейные диаграммы напряжений и токов

На рисунке 3.3 представлены кривые фазных напряжений u_a, u_b, u_c (ось 1), выпрямленного напряжения u_d (ось 2), анодных токов i_1-i_6 (ось 3) и фазного тока i_{2a} вторичных обмоток трансформатора (ось 4) [4].

Амплитуда выпрямленного напряжения (см. рисунок 3.3, ось 2)

$$U_{dm} = \sqrt{6}E_2.$$

Постоянная составляющая выпрямленного напряжения

$$U_d = \frac{3}{\pi} \cdot \sqrt{6}E_2 = 2,34E_2;$$

$$E_2 = 0,428U_d,$$

где E_2 – действующее фазное напряжение вторичных обмоток трансформатора (см. рисунок 3.3, ось 1).

Фазный ток вторичной обмотки трансформатора

$$I_2 = \frac{I_d}{\sqrt{3}}.$$

Ток первичной обмотки трансформатора

$$I_1 = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{2} \cdot I_2 = \frac{1}{n} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d,$$

где n – коэффициент трансформации, $n = \frac{U_{1\phi}}{E_2}$.

Расчетная мощность первичных обмоток трансформатора

$$S_1 = 3I_1 \cdot U_1 = 1,05P_d.$$

Расчетная мощность вторичных обмоток

$$S_2 = 6I_2 \cdot E_2 = 1,475P_d.$$

Расчетная мощность трансформатора

$$S_T = \frac{S_1 + S_2}{2} = 1,26P_d,$$

т. е. на 26 % выше мощности приемника энергии.

3.3.4 Выбор полупроводниковых вентиляей.

Выбор типа диода для выпрямительной схемы осуществляется по следующим параметрам: средний ток вентиля I_{FAVm} , действующий ток вентиля I_{FRMS} и амплитуда обратного напряжения вентиля U_{RRM} . Значения этих параметров определяются в зависимости от средней величины сварочного тока I_d для различных схем выпрямления по таблице 3.3.

Типы диодов выбираются из справочной литературы (таблицы 3.4 и 3.5) [6].

Таблица 3.4 – Предельные значения параметров диодов Д112, Д122, Д132

Параметр	Тип диода		
	Д112-10 Д112-16 Д112-25	Д122-32 Д122-40	Д132-50 Д132-63 Д132-80
Повторяющееся импульсное однополупериодное синусоидальное обратное напряжение, В ($t = 10$ мс, $f = 50$ Гц)	100-1400		
Максимально допустимый средний прямой ток I_{FAVm} (ток однополупериодный синусоидальный, $f = 50$ Гц)	10	32	50
	16	40	63
	25		80
Действующий прямой ток I_{FRMS} ($f = 50$ Гц)	15	50	78
	25	62	98
	39		125

Таблица 3.5 – Предельные значения параметров диодов Д141, Д151, Д161, Д171

Параметр	Тип диода		
	Д141-100 Д151-125 Д151-160	Д161-200 Д161-250 Д161-320	Д171-400
Повторяющееся импульсное однополупериодное синусоидальное обратное напряжение, В ($t = 10$ мс, $f = 50$ Гц)	300-1600		
Максимально допустимый средний прямой ток I_{FAVm} (ток однополупериодный синусоидальный, $f = 50$ Гц)	100	200	
	125	250	400
	160	320	
Действующий прямой ток I_{FRMS} ($f = 50$ Гц)	157		
	250	500	630
	250		

3.4 Порядок выполнения работы

- 1 Выполнить задание по варианту, предложенному преподавателем.
- 2 Изучить принцип работы и устройство сварочных выпрямителей для дуговой сварки.
- 3 Выбрать по величине сварочного тока требуемую схему сварочного выпрямителя и рассчитать ее параметры.
- 4 Рассчитать и выбрать силовые полупроводниковые диоды для электрической схемы выпрямления.
- 5 Сделать выводы по результатам расчетов.

Контрольные вопросы

- 1 Объясните устройство и принцип работы сварочных выпрямителей для дуговой сварки.
- 2 Сравните схемы выпрямления: трехфазную мостовую, шестифазную с уравнительным дросселем и шестифазную кольцевую.
- 3 Как производится расчет и выбор силовых полупроводниковых диодов для различных схем выпрямления?

4 Практическое занятие № 4. Расчет конструкции высокочастотных трансформаторов инверторных источников питания для дуговой сварки

Цель работы: изучить устройство высокочастотных сварочных трансформаторов инверторных источников питания для дуговой сварки и рассчитать их конструкцию.

4.1 Исходные данные к задаче

Рассчитать конструкцию высокочастотного сварочного трансформатора инверторного источника питания с прямоходовым преобразователем для ручной дуговой сварки плавящимся электродом.

Исходные данные к задаче представлены в таблице 4.1.

4.2 Общие теоретические сведения

Принципиальные отличия, определяющие возможности и свойства *выпрямителей с инвертором*, относятся в основном к стадии преобразования высокого постоянного напряжения в низкое постоянное с промежуточным звеном высокой частоты, т. е. к конструкции конвертора, включающего в себя инвертор, трансформатор и выходной выпрямительный блок.

Однотактный преобразователь с прямым включением диода показан на рисунке 4.1, а. Общим недостатком однотактных преобразователей является то,

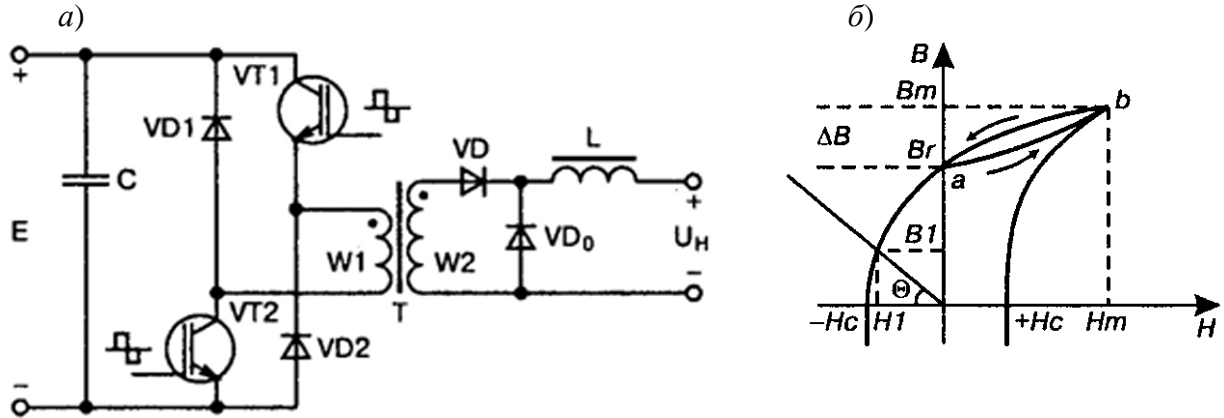
что их трансформаторы работают в условиях с односторонним намагничиванием. Магнитная индукция B трансформаторе с односторонним намагничиванием может изменяться только в пределах от максимальной B_m до остаточной B_r , описывая частную петлю гистерезиса.

Таблица 4.1 – Технические характеристики инверторных выпрямителей для ручной дуговой сварки

Номер задачи	Номинальный сварочный ток $I_{СВ}$, А	Напряжение холостого хода $U_{ХХ}$, В	Частота инвертирования F , кГц	Сетевое напряжение U_C , В	Минимальный сварочный ток $I_{СВ\text{МН}}$, А	Материал магнитопровода
1	125	50	20	220	10	2500НМС1
2	125	50	30	380	10	3000НМС
3	125	60	40	220	10	CF101
4	125	60	20	380	10	CF124
5	125	70	30	220	10	CF196
6	160	70	40	380	10	2500НМС1
7	160	60	30	220	10	3000НМС
8	160	60	40	380	10	CF101
9	160	70	50	380	10	CF124
10	160	70	30	380	10	CF196
11	200	80	80	380	10	2500НМС1
12	200	80	50	380	10	3000НМС
13	200	50	20	220	10	CF101
14	200	50	30	380	10	CF124
15	200	60	20	380	10	CF196
16	250	60	20	380	10	2500НМС1
17	250	50	30	220	10	3000НМС
18	250	70	40	380	10	CF101
19	250	60	40	380	10	CF124
20	250	60	40	380	10	CF196
21	315	55	50	380	10	2500НМС1
22	315	50	30	380	10	3000НМС
23	315	65	40	380	10	CF101
24	315	80	50	380	10	CF124
25	315	50	20	380	10	CF196
26	400	60	30	380	10	2500НМС1
27	400	50	40	380	10	3000НМС
28	400	60	50	380	10	CF101
29	400	50	60	380	10	CF124
30	400	60	70	380	10	CF196

Рассмотрим подробнее процесс перемагничивания магнитопровода трансформатора в схеме двухтранзисторного однотактного прямоходового преобразователя (см. рисунок 4.1, а). Когда транзисторы VT_1 , VT_2 преобразователя открыты, энергия источника питания E через трансформатор T передается в

нагрузку. При этом сердечник трансформатора намагничивается в прямом направлении (участок $a-b$ на рисунке 4.1, б). Когда транзисторы VT_1 , VT_2 закрыты, ток в нагрузке поддерживается за счет энергии, запасенной в дросселе L . При этом ток замыкается через диод VD_0 . В этот момент под действием ЭДС обмотки W_1 открываются диоды VD_1 , VD_2 и через них протекает ток размагничивания сердечника трансформатора в обратном направлении (участок $b-a$ на рисунке 4.1, б).



a – принципиальная электрическая схема; b – процесс перемагничивания сердечника трансформатора

Рисунок 4.1 – Двухтранзисторный одноканальный прямоходовой преобразователь

Из-за остаточной индукции B_r изменение индукции в сердечнике не может превышать $\Delta B = B_m - B_r$, значительно меньшей $\Delta B_{\max} = 2B_r$, возможного для двухтактного преобразователя.

Прирост ΔB можно получить с помощью введения немагнитного зазора в сердечник. При этом остаточная индукция становится меньше B_r . В случае наличия зазора в сердечнике новое значение остаточной индукции находим в точке пересечения прямой, проведенной из начала координат под углом θ к кривой перемагничивания (точка B_1 на рисунке 4.1, б).

4.3 Пример решения

Рассчитать сварочный трансформатор, электромагнитные и силовые полупроводниковые элементы инверторного источника питания с прямоходовым преобразователем для ручной дуговой сварки постоянным током, питающегося от сети переменного тока 220 В, 50 Гц и обеспечивающего диапазон сварочного тока I_{CB} от 5 до 140 А при продолжительности нагрузки ПН = 25 %. Частота инвертирования $F = 40$ кГц. Выходное напряжение холостого хода источника $U_{XX} = 80$ В.

Определим амплитуды первичного U_{1A} и вторичного U_{2A} напряжений и коэффициент трансформации K_{TR} трансформатора.

В режиме холостого хода напряжение на конденсаторе фильтра C (см. рисунок 4.1) равно амплитудному значению сетевого напряжения:

$$U_{CA} = U_{1A} = U_C \cdot \sqrt{2} = 220 \cdot 1,414 = 310 \text{ В.}$$

Амплитуда вторичного напряжения трансформатора должна быть равна значению напряжения холостого хода:

$$U_{2A} = U_{XX} = 80 \text{ В.}$$

Коэффициент трансформации трансформатора

$$K_{TP} = \frac{U_{1A}}{U_{2A}} = \frac{310}{80} = 3,875 \approx 4.$$

Для оценки нагрева обмоток трансформатора необходимо определить действующее или эффективное значение токов в первичной $I_{1Э}$ и вторичной $I_{2Э}$ обмотках. Действующее значение тока во вторичной обмотке

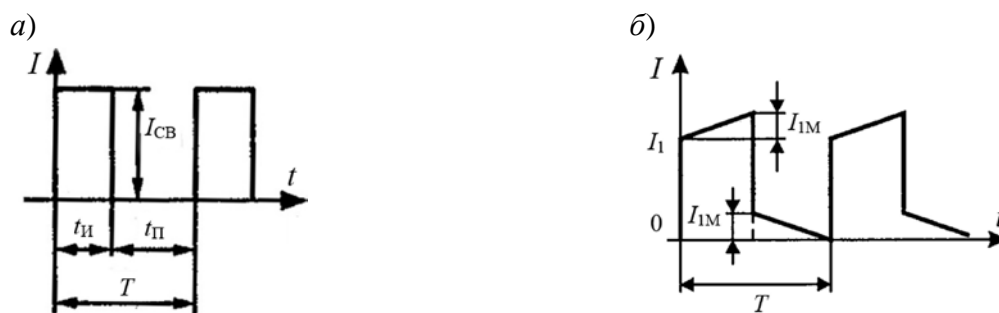
$$I_{2Э} = I_{CB} \cdot \sqrt{D},$$

где D – коэффициент заполнения импульса, $D = \frac{t_{И}}{T}$; $D = 0,5$;

T – период следования импульса тока, $T = t_{И} + t_{П} = \frac{1}{F}$;

$t_{И}$ – время протекания импульса тока;

$t_{П}$ – время паузы (рисунок 4.2, а).



а – сварочный ток во вторичной обмотке трансформатора; б – ток в первичной обмотке

Рисунок 4.2 – Форма тока высокочастотного трансформатора

Для сварочного тока $I_{CB} = 140 \text{ А}$ эффективный ток вторичной обмотки

$$I_{2Э} \approx I_{CB} \cdot \sqrt{0,5} = 140 \cdot 0,7 = 98 \text{ А.}$$

Действующий $I_{1Э}$ и импульсный I_1 токи в первичной обмотке (рисунок 4.2, б)

$$I_{1Э} = \frac{I_{2Э}}{K_{ТР}} = \frac{98}{4} = 24,5 \text{ А};$$

$$I_1 = \frac{I_{СВ}}{K_{ТР}} = \frac{140}{4} = 35 \text{ А}.$$

Для определения параметров сердечника рассчитаем условную мощность трансформатора по формуле

$$P_y = U_{XX} \cdot I_{2Э} = 80 \cdot 98 = 7840 \text{ Вт}.$$

Амплитудное значение ЭДС одного витка обмотки трансформатора

$$E_{BA} = \frac{dF}{dt} = \frac{1 \cdot 10^{-4} \cdot \Delta B \cdot S_C}{t_{И}} = \frac{1 \cdot 10^{-4} \cdot F \cdot \Delta B \cdot S_C}{D},$$

где dF – приращение магнитного потока витка за время dt ;

ΔB – приращение индукции в сердечнике за время действия импульса напряжения длительностью $t_{И}$, Тл;

S_C – сечение сердечника магнитопровода, см²;

F – частота следования импульсов, Гц.

Среднее значение ЭДС одного витка обмотки трансформатора

$$E_B = E_{BA} \cdot D.$$

Количество витков, вмещающихся в окне сердечника,

$$W = \frac{50 \cdot S_O \cdot K_O \cdot J_{П}}{I_{Э}},$$

где S_O – сечение окна сердечника, см²;

K_O – коэффициент заполнения окна сердечника, $K_O = 0,25$;

$I_{Э}$ – эффективный ток в обмотке, А;

$J_{П}$ – допустимая плотность тока в обмоточном проводе, А/мм².

Чтобы рассчитать плотность тока $J_{П}$ для любого требуемого значения продолжительности нагрузки ПН, можно воспользоваться формулой

$$J_{П} = J \cdot \sqrt{\frac{100}{ПН}},$$

где J – плотность тока для продолжительного режима работы (ПН = 100 %), для трансформатора допускается плотность тока $J = 4 \text{ А/мм}^2$.

Вычислим допустимую плотность тока в медных обмотках сварочного трансформатора для ПН = 25 %:

$$J_{\Pi} = 4 \cdot \sqrt{\frac{100}{25}} = 8 \text{ А / мм}^2.$$

Мощность P_y трансформатора находится исходя из среднего значения ЭДС E_B одного витка обмотки, количества витков W и действующего тока I_{Δ} :

$$P_y = E_B \cdot W \cdot I_{\Delta} = 5 \cdot 10^{-3} \cdot F \cdot \Delta B \cdot S_C \cdot S_O \cdot K_O \cdot J_{\Pi}.$$

Найдем произведение $S_C \cdot S_O$:

$$S_C \cdot S_O = \frac{200 \cdot P_y}{F \cdot \Delta B \cdot K_O \cdot J_{\Pi}}.$$

Ферритовые магнитопроводы с немагнитным зазором используются при построении трансформатора или дросселя, работающих в условиях однополярного тока. Это приводит к снижению остаточной магнитной индукции и к увеличению амплитуды напряжённости магнитного поля. Увеличение зазора снижает эффективную магнитную проницаемость собранного сердечника. При использовании Ш-образных ферритовых сердечников из двух половинок суммарный зазор $s = g_1 + g_2$ (рисунок 4.3).

Сердечники трансформаторов и дросселей из марганцево-цинковых ферритов MnZn имеют способность работать в сильных магнитных полях. Об этом свидетельствует наличие индекса С в конце обозначения марки феррита. Силовые MgZn-ферриты для сильных магнитных полей и их характеристики представлены в таблице 4.2.

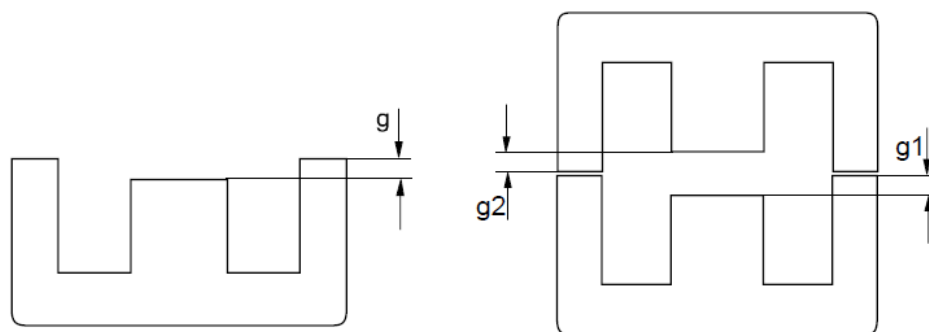


Рисунок 4.3 – Ш-образные ферритовые сердечники трансформаторов с суммарным зазором $s = g_1 + g_2$ в магнитопроводе

Таблица 4.2 – Характеристики ферритов для сильных магнитных полей

Марка феррита	Начальная магнитная проницаемость μ_{iac}	Напряженность магнитного поля H_m , А/м	Температура T , °С	Магнитная индукция B_m , Тл	Магнитная индукция насыщения B_s , Тл	Остаточная магнитная индукция B_r , Тл	Коэрцитивная сила H_c , А/м
2500НМС1	2500	100	20	0,40	0,45	0,10	16
3000НМС	3000	100	20	0,35	0,45	0,10	12
CF101	3000	100	25	0,31	0,50	0,20	15
CF124	2500	100	25	0,34	0,48	0,20	16
CF196	2000	100	25	0,33	0,52	0,21	16

Размеры Ш-образных сердечников из MgZn-ферритов (рисунок 4.4) приведены в таблице 4.3. Тип магнитопровода выбирается согласно расчету его геометрических размеров $S_C \cdot S_O$. Размеры зазоров g Ш-образных ферритовых сердечников могут быть равными 0,1; 0,25; 0,34; 0,5; 1,0 мм.

Например, сердечник ПК40х18 выполнен из MnZn-феррита М3000НМС1 и имеет следующие параметры петли гистерезиса:

- магнитная индукция насыщения $B_s = 0,45$ Тл;
- максимальная магнитная индукция при перемагничивании $B_m = 0,33$ Тл (при $H_m = 100$ А/м и $T = 60$ °С);
- максимальная напряженность магнитного поля при перемагничивании (при $T = 60$ °С) $H_m = 100$ А/м;
- остаточная магнитная индукция $B_r = 0,1$ Тл;
- коэрцитивная сила $H_c = 12$ А/м.

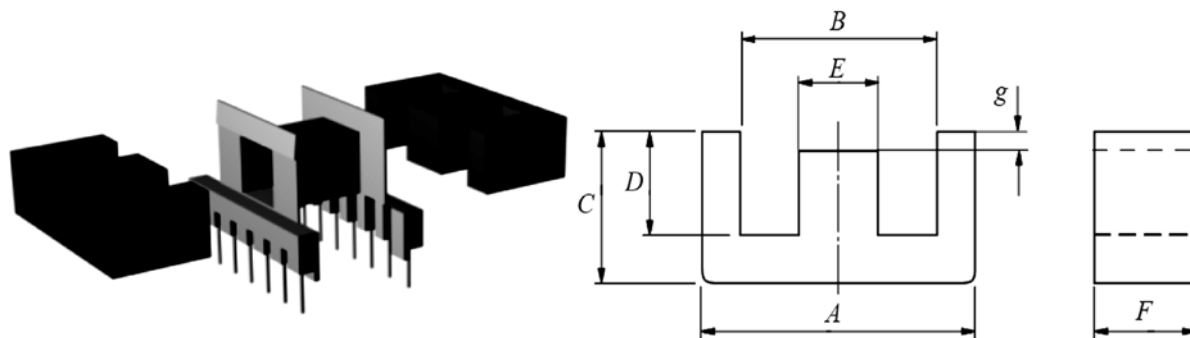


Рисунок 4.4 – Типоразмеры Ш-образных сердечников

Таблица 4.3 – Номинальные размеры Ш-образных сердечников

Тип	Размер, мм						S_O , см ²	S_C , см ²	$S_C \cdot S_O$, см ⁴
	A	B	C	D	E	F			
EE5525	55	37,5	27,8	18,5	17,2	25	3,76	4,3	16,1487
EE6527	66,5	44,2	32,5	22,2	20	27,4	5,37	5,48	29,4408
EE7032	70,5	48	33,2	21,9	22	32	5,69	7,04	40,0858
EE8020	80	60,3	38,1	28,53	19,8	19,8	11,55	3,92	45,2989
EE8527	85	55	88	28,7	27,2	26,5	7,98	7,21	57,5098
EE8532	85	55	88	28,7	27,2	31,5	7,99	8,57	68,3606
EE10028	100,3	73,2	59,5	46,8	27,5	27,6	21,39	7,59	162,3319
EE13020	130	89	63	43	40	20	21,07	8	168,56

Путем введения немагнитного зазора снизим остаточную индукцию в сердечнике до $B_1 = 0,03$ Тл. Снижение остаточной индукции в сердечнике до $0,03$ Тл позволит увеличить изменение индукции до

$$\Delta B = B_m - B_1 = 0,33 - 0,03 = 0,3 \text{ Тл.}$$

Найдем произведение $S_C \cdot S_O$:

$$S_C \cdot S_O = \frac{200 \cdot P_y}{F \cdot \Delta B \cdot K_O \cdot J_{II}} = \frac{200 \cdot 7840}{40000 \cdot 0,3 \cdot 0,25 \cdot 8} = 65,3 \text{ см}^4.$$

По таблице 4.3 выбираем Ш-образный (броневой) сердечник трансформатора типа ЕЕ8532 со следующими параметрами: площадь сечения $S_C = 8,57 \text{ см}^2$, площадь сечения окна $S_O = 7,99 \text{ см}^2$, $S_C \cdot S_O = 68,36 \text{ см}^4$. Для сердечника выбираем длину немагнитного зазора $\delta = 0,1 \text{ мм}$.

Длина средней силовой магнитной линии магнитопровода l_C рассчитывается исходя из размеров выбранного магнитопровода (см. таблицу 4.3):

$$l_C = B - E + 4D + \pi \cdot \frac{E}{2};$$

$$l_C = 55 - 27,2 + 4 \cdot 28,7 + \pi \cdot \frac{27,2}{2} = 185,3 \text{ мм.}$$

В немагнитном зазоре происходит дополнительное падение магнитного напряжения, что приводит к снижению проницаемости сердечника. Напряженность H_δ в зазоре при максимальной индукции B_m :

$$H_\delta = \frac{B_m}{\mu_0} = \frac{0,33}{4 \cdot \pi \cdot 10^{-7}} = 262605 \text{ А/м.}$$

Магнитное напряжение в сердечнике для максимальной индукции

$$I \cdot W = H_\delta \cdot \delta + H_m \cdot l_C = 262605 \cdot 0,1 \cdot 10^{-3} + 100 \cdot 185,3 \cdot 10^{-3} = 44,8 \text{ А.}$$

Найдем амплитудное значение ЭДС одного витка:

$$E_{BA} = \frac{10^{-4} \cdot F \cdot \Delta B \cdot S_C}{D} = \frac{10^{-4} \cdot 40000 \cdot 0,3 \cdot 8,57}{0,5} = 20,57 \text{ В.}$$

Количество витков первичной обмотки

$$W_1 = \frac{U_{1A}}{E_{BA}} = \frac{310}{20,57} = 15 \text{ витков.}$$

Выберем ближайшее, большее найденного и кратное коэффициенту трансформации $K_{\text{ТР}} = 4$, количество витков первичной обмотки трансформатора $W_1 = 16$ витков, тогда

$$W_2 = \frac{W_1}{K_{\text{ТР}}} = \frac{16}{4} = 4 \text{ витка.}$$

Амплитуда тока намагничивания первичной обмотки:

$$I_{1\text{М}} = \frac{IW}{W_1} = \frac{44,8}{16} = 2,8 \text{ А.}$$

Амплитуда тока транзисторов и первичной обмотки трансформатора (см. рисунок 4.2, б) увеличится до значения

$$I_{1\text{А}} = I_1 + I_{1\text{М}} = 35 + 2,8 = 37,8 \text{ А.}$$

Сечение проводов первичной и вторичной обмоток

$$S_1 = \frac{I_1}{J_{\text{П}}} = \frac{37,8}{8} = 4,7 \text{ мм}^2;$$

$$S_2 = \frac{I_{2\text{Э}}}{J_{\text{П}}} = \frac{98}{8} = 12,25 \text{ мм}^2.$$

На частотах в несколько десятков килогерц и выше потери в проводниках увеличиваются за счет вытеснения тока к поверхности проводника, что приводит к уменьшению эффективного сечения проводника. Этот эффект носит название поверхностного эффекта или скин-эффекта.

Для минимизации потерь, возникающих из-за скин-эффекта, применяются проводники особой конструкции, называемые *литцендратом*, которые состоят из большого числа тонких жил, изолированных одна от другой. Для частоты $F = 40$ кГц для этих целей выбираем эмалированный обмоточный провод диаметром не более 0,7 мм.

4.4 Порядок выполнения работы

- 1 Выполнить задание по варианту, предложенному преподавателем.
- 2 Изучить принцип работы электрической схемы однотактного инверторного преобразователя с прямым включением диода.
- 3 Рассчитать конструкцию высокочастотного сварочного трансформатора инверторного источника питания с прямоходовым преобразователем.
- 4 Сделать выводы по результатам расчетов.

Контрольные вопросы

- 1 Для чего предназначен инверторный источник питания?
- 2 Принцип работы электрической схемы однотактного инверторного преобразователя с прямым включением диода.
- 3 Каким образом осуществляется регулировка сварочного тока в инверторном источнике питания?
- 4 От каких параметров зависят габаритные размеры высокочастотного сварочного трансформатора инверторного источника питания?

5 Практическое занятие № 5. Расчет мощности потерь и выбор высокочастотных транзисторов инверторных преобразователей

Цель работы: изучить устройство высокочастотных транзисторов инверторных преобразователей и рассчитать их мощность потерь.

5.1 Исходные данные к задаче

Рассчитать мощности потерь высокочастотных транзисторов инверторных преобразователей инверторного источника питания с прямоходовым преобразователем. Основные параметры транзисторов представлены в таблице 5.1.

Таблица 5.1 – Основные параметры транзисторов

Тип транзистора	IRG4PC50U	IRG4PC50W	IRG4PC50S	IRG4PC50KD	IRG4PSC71K
Максимальное рабочее напряжение V_{CES} , В	600	600	600	600	600
Средний ток коллектора для температуры кристалла 100 °С I_C , А	27	27	41	30	60
Максимальная температура кристалла T_J , °С	150	150	150	150	
Тепловое сопротивление кристалл-корпус $R_{\theta JC}$, °С/Вт	0,64	0,64	0,64	0,64	0,36
Тепловое сопротивление корпус-радиатор $R_{\theta CS}$, °С/Вт	0,24	0,24	0,24	0,24	0,24
Максимальное напряжение коллектор-эмиттер в открытом состоянии $V_{CE(ON)}$, В	1,65	2,3	1,28	1,84	1,83
Суммарные потери выключения E_{OFF} , мДж, при заданном режиме измерения	0,54 $T_J = 25\text{ °С};$ $I_C = 27\text{ А};$ $U_{CC} = 480\text{ В}$	0,32 $T_J = 25\text{ °С};$ $I_C = 27\text{ А};$ $U_{CC} = 480\text{ В}$	8,27 $T_J = 25\text{ °С};$ $I_C = 41\text{ А};$ $U_{CC} = 480\text{ В}$	0,84 $T_J = 25\text{ °С};$ $I_C = 30\text{ А};$ $U_{CC} = 480\text{ В}$	1,98 $T_J = 25\text{ °С};$ $I_C = 30\text{ А};$ $U_{CC} = 480\text{ В}$

5.2 Пример расчета

Для расчета мощности потерь вначале требуется осуществить предварительный выбор транзисторов. Следует убедиться, что эти транзисторы на самом деле можно использовать в преобразователе сварочного источника. Предварительно выбираем транзисторы IRG4PC50U (рисунок 5.1). Основные параметры транзисторов IRG4PC50U представлены в таблице 5.1.

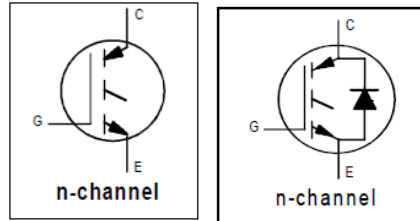


Рисунок 5.1 – Условное обозначение транзисторов IGBT с n -каналом

Потери мощности на транзисторе складываются из потерь проводимости (статические потери) и потерь коммутации (динамические потери):

$$P_C = P_{VT \text{ ПР}} + P_{VT \text{ КОМ}}.$$

У IGBT-транзисторов потери проводимости имеют почти линейную зависимость от тока коллектора I_C :

$$P_{VT \text{ ПР}} = I_C \cdot V_{CE(ON)}.$$

Потери проводимости можно определить, учитывая максимальное заполнение импульса тока D_{MAX} , по формуле

$$P_{VT \text{ ПР}} = D_{\text{MAX}} \cdot I_{C \text{ MAX}} \cdot V_{CE(ON)},$$

где $I_{C \text{ MAX}}$ – максимальный ток коллектора транзистора, который равен амплитудному значению импульсного тока первичной обмотки трансформатора $I_{1A} = 37,8 \text{ A}$;

$$D_{\text{MAX}} \text{ – максимальное заполнение импульса тока, } D_{\text{MAX}} = \frac{U_{\text{Д MAX}}}{U_{2A \text{ min}}}.$$

Определим максимальное напряжение дуги, соответствующее максимальному сварочному току:

$$U_{\text{Д MAX}} = 20 + 0,04 \cdot I_{\text{CB MAX}} = 20 + 0,04 \cdot 140 = 25,6 \text{ В.}$$

Если амплитуда напряжения на вторичной обмотке трансформатора не ниже $U_{2A \text{ min}} = 80 \text{ В}$, то

$$D_{\text{MAX}} = \frac{25,6}{80} = 0,32;$$

$$P_{VT \text{ ПР}} = 0,32 \cdot 37,8 \cdot 1,65 = 20 \text{ Вт.}$$

Потери коммутации транзистора определяются суммарными потерями выключения E_{OFF} [4]. Для транзистора IRG4PC50U при заданном режиме измерения ($T_J = 25 \text{ }^\circ\text{C}$; $I_C = 27 \text{ А}$; $U_{CC} = 480 \text{ В}$) эти потери составляют $E_{OFF} = 0,54 \text{ мДж}$ (см. таблицу 5.1). Текущий режим коммутации отличается от заданного режима измерения: $T_J < 150 \text{ }^\circ\text{C}$; $I_C^* = I_{1A} = 37,8 \text{ А}$; $U_{CC}^* = U_{1A} = 310 \text{ В}$. Скорректируем потери для текущего напряжения и тока коммутации:

$$E_{OFF}^* = E_{OFF} \cdot \frac{U_{CC}^*}{U_{CC}} \cdot \frac{I_C^*}{I_C} = 0,54 \cdot \frac{310}{480} \cdot \frac{37,8}{27} = 0,49 \text{ мДж.}$$

Увеличение температуры кристалла с $25 \text{ }^\circ\text{C}$ до $150 \text{ }^\circ\text{C}$ приведёт к увеличению потерь переключения в 2 раза: $E_{OFF}^* = 2 \cdot 0,49 = 0,98 \text{ мДж}$.

Определим коммутационные потери на частоте 40 кГц :

$$P_{VT \text{ КОМ}} = E_{OFF}^* \cdot F = 0,98 \cdot 10^{-3} \cdot 40000 = 39,2 \text{ Вт.}$$

Рассчитаем суммарные потери:

$$P_C = P_{VT \text{ ПР}} + P_{VT \text{ КОМ}} = 20 + 39,2 = 59,2 \text{ Вт.}$$

Общее тепловое сопротивление на участке кристалл – радиатор

$$R_{\theta JC} + R_{\theta CS} = 0,64 + 0,24 = 0,88 \frac{^\circ\text{C}}{\text{Вт}}.$$

Схема термозащиты сварочного источника не допускает повышение температуры радиатора более $85 \text{ }^\circ\text{C}$. При этом температура кристалла может повыситься до температуры

$$T_{\theta J \text{ max}} = 59,2 \cdot 0,88 + 85 = 137,1 \text{ }^\circ\text{C},$$

что меньше предельной температуры кристалла ($T_J = 150 \text{ }^\circ\text{C}$).

Для снижения коммутационных потерь можно использовать параллельное включение нескольких транзисторов. При этом ток коллектора делится на число транзисторов в одном блоке.

5.3 Порядок выполнения работы

- 1 Выполнить задание по варианту, предложенному преподавателем.
- 2 Изучить принцип работы и устройство высокочастотных транзисторов инверторных преобразователей.
- 3 Рассчитать мощность потерь высокочастотных транзисторов и температуру кристалла.
- 4 Сделать выводы по результатам расчетов.

Контрольные вопросы

- 1 Для чего предназначены высокочастотные транзисторы в инверторных источниках питания?
- 2 От чего зависит мощность потерь высокочастотных транзисторов?
- 3 Каким образом осуществляется проверка правильности выбора высокочастотных транзисторов?

6 Практическое занятие № 6. Расчет дросселя фильтра сварочного тока инверторного источника питания

Цель работы: рассчитать и выбрать дроссель фильтра сварочного тока инверторного источника питания.

6.1 Пример решения задачи

Определим минимальную индуктивность дросселя L , обеспечивающую непрерывность сварочного тока (рисунок 6.1):

$$L_{\min} = \frac{(U_{2A} - U_{д \min}) \cdot U_{д \min}}{2U_{2A} \cdot I_{св \min} \cdot F} = \frac{(80 - 20,2) \cdot 20,2}{2 \cdot 80 \cdot 10 \cdot 40000} = 18,9 \text{ мкГн},$$

где $U_{д \min}$ – напряжение при минимальном сварочном токе,

$$U_{д \min} = 20 + 0,04 \cdot I_{св \min} = 20 + 0,04 \cdot 5 = 20,2 \text{ В}.$$

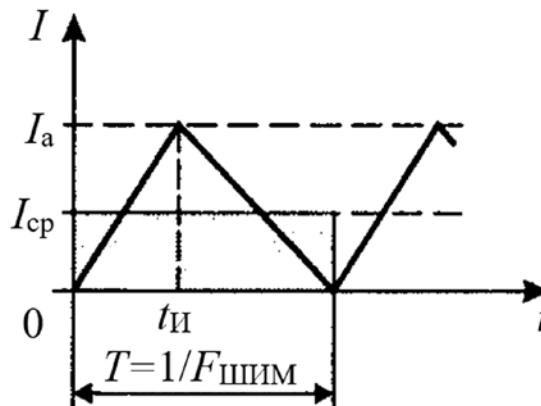


Рисунок 6.1 – Форма тока в дросселе L , соответствующая границе непрерывности

В качестве материала сердечника дросселя используем электротехническую сталь с толщиной листа 0,08 мм. Частотные показатели стали $\alpha = 1,4$ и $\beta = 1,8$.

Предварительно определимся, что индукция в сердечнике для постоянного тока может достигать величины $B_m = 1,42$ Тл, допустимая плотность тока (для ПН = 25 %) $J_{П} = 8 \text{ А/м}^2$ (см. стр. 35), $K_O = 0,25$ и $K_C = 0,9$.

Найдем допустимый размах индукции для частоты $F = 40000$ Гц, который обеспечит такой же уровень потерь, как и на частоте $f_y = 1000$ Гц:

$$\Delta B = 2 \cdot B_m \cdot \left(\frac{F}{f_y} \right)^{-\frac{\alpha}{\beta}} = 2 \cdot 1,42 \cdot \left(\frac{40000}{1000} \right)^{-\frac{1,4}{1,8}} = 0,16 \text{ Тл.}$$

Найдем габаритный размер сердечника:

$$S_O \cdot S_C = \frac{100 \cdot L \cdot I_{CB, \max}^2}{B_m \cdot J_{II} \cdot K_C \cdot K_O} = \frac{100 \cdot 18,9 \cdot 10^{-6} \cdot 140^2}{1,42 \cdot 8 \cdot 0,9 \cdot 0,25} = 14,49 \text{ см}^4.$$

Выберем стандартный Ш-образный сердечник EE6527, для которого $S_C = 5,48 \text{ см}^4$, $S_O = 5,37 \text{ см}^2$ и $S_C \cdot S_O = 29,44 \text{ см}^2$ (см. таблицу 4.3). Определим количество витков дросселя:

$$W = \frac{100 \cdot S_O \cdot K_O \cdot J_{II}}{I_{CB, \max}} = \frac{100 \cdot 5,37 \cdot 0,25 \cdot 8}{140} = 7,7 \approx 8 \text{ витков.}$$

Обмотку дросселя намотаем медной шиной сечением

$$S_{II} = \frac{I_{CB, \max}}{J_{II}} = \frac{140}{8} = 17,5 \text{ мм}^2.$$

Определим немагнитный зазор:

$$\delta = \frac{I_{CB, \max} \cdot W}{796 \cdot B_m} = \frac{140 \cdot 8}{796 \cdot 1,42} = 0,99 \text{ мм.}$$

Рассчитаем результирующую индуктивность:

$$L = \frac{1,25 \cdot 10^{-7} \cdot S_C \cdot K_C \cdot W^2}{\delta} = \frac{1,25 \cdot 10^{-7} \cdot 5,48 \cdot 0,9 \cdot 8^2}{0,99} \approx 40 \text{ мГн} > L_{\min}.$$

Далее следует убедиться, что размах высокочастотной пульсации индукции не превышает $\Delta B = 0,16$ Тл. Максимальный размах индукции в сердечнике дросселя имеет место при максимальном входном напряжении $U_{2A} = 80$ В. Он может быть найден следующим образом:

$$\Delta B = \frac{10000 \cdot U_{2A}}{4 \cdot F \cdot S_C \cdot K_C \cdot W} = \frac{10000 \cdot 80}{4 \cdot 40000 \cdot 5,48 \cdot 0,9 \cdot 8} = 0,126 \text{ Тл,}$$

что не превышает допустимого значения.

6.2 Порядок выполнения работы

- 1 Выполнить задание по варианту, предложенному преподавателем.
- 2 Рассчитать дроссель фильтра сварочного тока инверторного источника питания.
- 3 Сделать выводы по результатам расчетов.

Контрольные вопросы

- 1 Для чего предназначены фильтры сварочного тока в инверторных источниках питания для дуговой сварки?
- 2 От чего зависят габаритные размеры дросселя фильтра сварочного тока?
- 3 Каким образом осуществляется проверка правильности выбора дросселя фильтра сварочного тока?

Список литературы

- 1 **Куликов, В. П.** Технология сварки плавлением и термической резки: учебник / В. П. Куликов. – 3-е изд., стер. – Минск: Новое знание, 2019. – 463 с.
- 2 **Милютин, В. С.** Источники питания для сварки / В. С. Милютин, М. П. Шалимов, С. М. Шанчуров. – Москва: Айрис-пресс, 2007. – 384 с.
- 3 **Милютин, В. С.** Источники питания и оборудование для электрической сварки плавлением / В. С. Милютин, Р. Ф. Катаев. – Москва: Академия, 2013. – 368 с.
- 4 **Володин, В. Я.** Современные сварочные аппараты своими руками / В. Я. Володин. – Санкт-Петербург: Наука и техника, 2008. – 304 с.
- 5 **Закс, М. И.** Сварочные выпрямители / М. И. Закс, Б. А. Каганский. – Ленинград: Энергоатомиздат, 1986. – 136 с.
- 6 **Чебовский, О. Г.** Силовые полупроводниковые приборы: справочник / О. Г. Чебовский, Л. Г. Моисеев, Р. П. Недошивин. – Москва: Энергоатомиздат, 1985. – 400 с.
- 7 **Браткова, О. Н.** Источники питания сварочной дуги / О. Н. Браткова. – Москва: Высшая школа, 1982. – 117 с.