

Федеральное агентство железнодорожного транспорта

Федеральное государственное образовательное учреждение высшего образования
ПЕТЕРБУРГСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ УНИВЕРСИТЕТ ПУТЕЙ СООБЩЕНИЯ
ИМПЕРАТОРА АЛЕКСАНДРА I

Кафедра «Электроснабжение железных дорог»

РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Задание и методические указания по выполнению курсовой работы по
дисциплине «Электроника»

Санкт-Петербург 2016 г.

СОДЕРЖАНИЕ

1	ЗАДАНИЕ	3
2	УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ.....	7
2.1	Силовые полупроводниковые приборы.....	7
2.2	Фазовый способ регулирования выпрямленного напряжения.....	8
2.3	Недостатки управляемых выпрямителей	12
3	МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ	13
3.1	Общие указания.....	13
3.2	Расчет однофазных управляемых выпрямителей.....	14
4	ПРИМЕР РАСЧЕТА ОДНОФАЗНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ	19
4.1	Задание	19
4.2	Описание работы управляемого выпрямителя	19
4.3	Расчет параметров управляемого выпрямителя	24
	СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ	27

1 ЗАДАНИЕ

Курсовая работа по дисциплине «Электроника» посвящена расчету однофазных управляемых выпрямителей (УВ). Нагрузкой таких выпрямителей является обмотка возбуждения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (активно-индуктивная нагрузка).

В табл. 1 приведены номера вариантов курсовой работы. Для каждого варианта заданы:

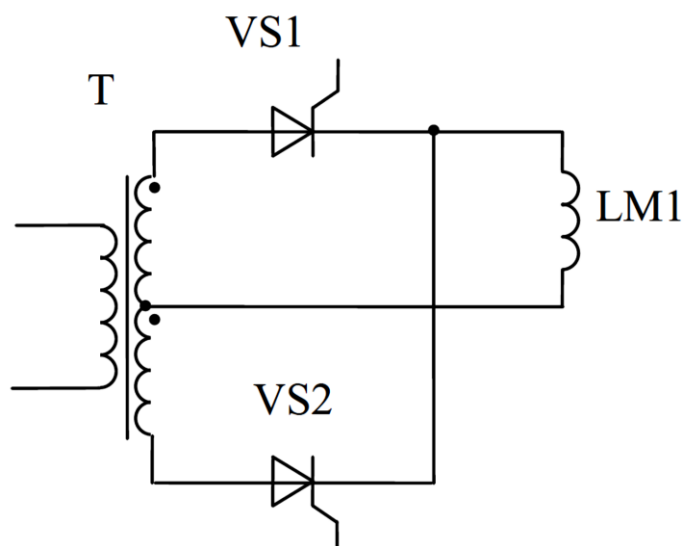
- схема УВ;
- $U_{LMном}$ – номинальное напряжение, подаваемое на обмотку возбуждения;
- R_{LM} – сопротивление обмотки возбуждения;
- $I_{LMном}$ и $I_{LMмин}$ – соответственно номинальное и минимальное значения тока обмотки возбуждения.

При подготовке к выполнению курсовой работы рекомендуется воспользоваться литературой [1].

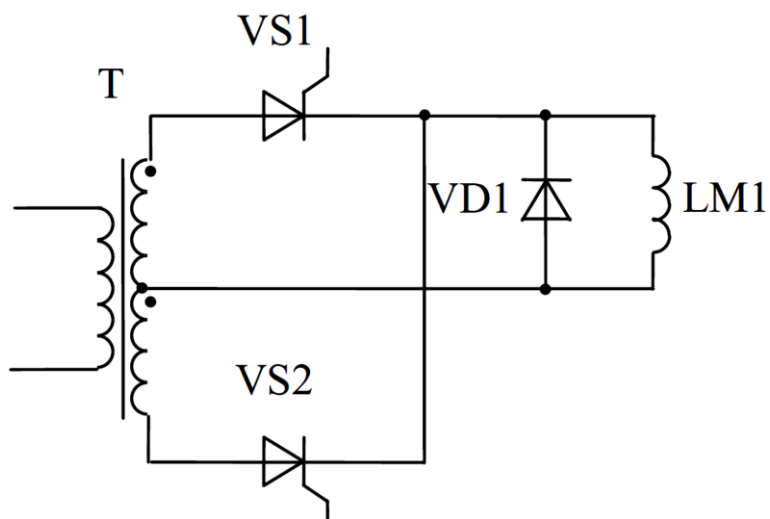
Таблица 1 – Варианты задания

№ варианта	Вариант силовой схемы	Параметры обмотки возбуждения		Диапазон регулирования тока возбуждения
		$U_{LMном}, В$	$R_{LM}, Ом$	$I_{LMном} / I_{LMмин}$
1.	Рис. 1, а	110	30	2
2.	Рис. 1, а	110	35	2,5
3.	Рис. 1, а	110	40	3
4.	Рис. 1, а	110	45	3,5
5.	Рис. 1, б	110	20	4
6.	Рис. 1, б	110	25	2
7.	Рис. 1, б	110	30	3
8.	Рис. 1, в	110	35	4
9.	Рис. 1, в	110	40	5
10.	Рис. 1, в	110	45	6
11.	Рис. 1, а	127	22	3
12.	Рис. 1, а	127	27	4
13.	Рис. 1, а	127	32	5
14.	Рис. 1, б	127	40	6
15.	Рис. 1, б	127	45	7
16.	Рис. 1, б	127	26	2
17.	Рис. 1, б	127	33	3
18.	Рис. 1, в	127	38	4
19.	Рис. 1, в	127	25	5
20.	Рис. 1, в	127	30	6
21.	Рис. 1, а	220	20	3
22.	Рис. 1, а	220	24	4
23.	Рис. 1, а	220	27	5
24.	Рис. 1, б	220	22	6
25.	Рис. 1, б	220	19	7
26.	Рис. 1, б	220	26	2
27.	Рис. 1, в	220	29	3
28.	Рис. 1, в	220	30	4
29.	Рис. 1, в	220	21	5
30.	Рис. 1, в	220	25	6

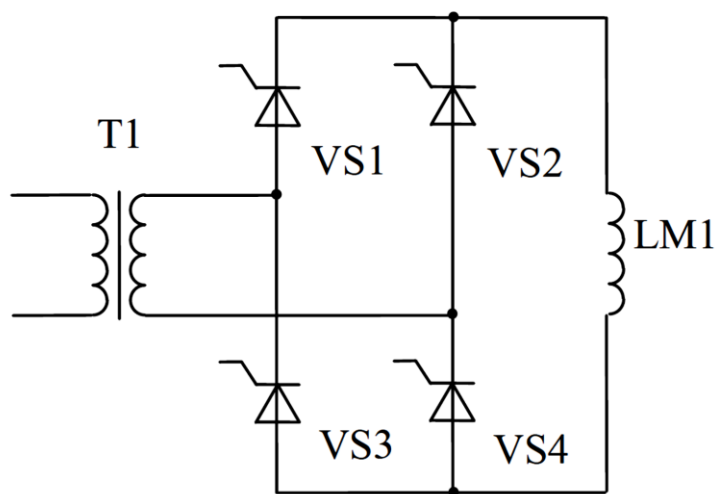
Примечания: Во всех вариантах задания действующее значение напряжения питающей сети, подаваемое на первичную обмотку трансформатора, $U_1=220 В$, нестабильность сетевого напряжения – $-10\% \div +15\%$, а частота питающей сети – $f_c=50 Гц$.



а) однофазный УВ с нулевым выводом



б) однофазный УВ с нулевым выводом и нулевым диодом



в) однофазный симметричный мостовой УВ

Рисунок 1 – Варианты схем однофазных УВ

При выполнении курсовой работы необходимо:

1. Дать описание принципа регулирования скорости двигателя постоянно-го тока при последовательном и параллельном возбуждении (с соответствующими схемами включения двигателя, формулами и графиками зависимостей).
2. Начертить схему электрическую принципиальную заданного УВ (с учетом требований ГОСТа) и привести описание ее работы;
3. Выполнить расчёт параметров заданного УВ;
4. Построить совмещенные (по углу ν) временные диаграммы мгновенных значений напряжений: на первичной $u_1(\nu)$ и вторичной (вторичных) $u_2(\nu)$ обмотках трансформатора, на управляющих электродах тиристоров – $u_y(\nu)$, на обмотке возбуждения – $u_{LM}(\nu)$, на тиристорах – $u_{VS}(\nu)$, на диодах – $u_{VD}(\nu)$, а также мгновенных значений токов: обмотки возбуждения – $i_{LM}(\nu)$, тиристоров – $i_{VS}(\nu)$, диодов – $i_{VD}(\nu)$, сетевого тока $i_I(\nu)$ для угла регулирования $\alpha \approx 0,5\Delta\alpha$, где $\Delta\alpha$ – максимальный диапазон изменения угла регулирования (здесь и далее $\nu = \omega t$ радиан, ($\omega = 2\pi f_c$ рад/с – угловая частота, t с – время, $f_c = 50$ Гц – частота сетевого напряжения));
5. Описать назначение элементов схемы и работу УВ;
6. Определить: действующее значение напряжения U_2 на вторичной обмотке силового трансформатора, требуемый коэффициент трансформации трансформатора $k_{тр}$, номинальный и минимальный токи обмотки возбуждения – $I_{LMном}$ и $I_{LMмин}$, диапазон изменения угла регулирования $\Delta\alpha$, частоту пульсаций напряжения и тока нагрузки;
7. Построить для максимального диапазона изменения угла регулирования $\Delta\alpha$ кривые зависимостей от угла регулирования α : среднего значения напряжения на обмотке возбуждения – $U_d(\alpha)$, среднего значения тока обмотки возбуждения – $I_d(\alpha)$, среднего значения тока тиристора – $I_{VSd}(\alpha)$ и среднего значения тока диода – $I_{VDd}(\alpha)$;
8. Выбрать тиристоры и диоды.

2 УПРАВЛЯЕМЫЕ ВЫПРЯМИТЕЛИ

В электродвигателях постоянного тока с независимым возбуждением применяется однозонное и двухзонное регулирование частоты вращения. Однозонное регулирование обеспечивается изменением напряжения на обмотке якоря электродвигателя, а двухзонное – изменением тока обмотки возбуждения. Характерными особенностями обмоток возбуждения двигателей постоянного тока является более высокая (относительно якоря) постоянная времени, небольшая потребляемая мощность и небольшой диапазон изменения тока возбуждения. Потребляемая мощность составляет десятые доли – единицы процента от номинальной мощности электродвигателя, а диапазон регулирования тока возбуждения не превышает 10. В связи с этим для регулирования тока возбуждения чаще всего применяются нереверсивные однофазные УВ. Большая постоянная времени обмотки возбуждения и малый диапазон регулирования тока возбуждения приводят к тому, что УВ работают в области непрерывных токов.

Основными элементами УВ являются силовые полупроводниковые приборы (СПП) и система импульсно-фазового управления (СИФУ).

2.1 Силовые полупроводниковые приборы

В качестве регулирующих элементов в УВ используются управляемые СПП – тиристоры. Наряду с тиристорами в УВ в качестве выпрямляющих элементов могут применяться неуправляемые СПП – диоды. Указанные СПП работают в УВ в ключевом режиме.

При работе в ключевом режиме СПП могут находиться в двух устойчивых состояниях – открытом и закрытом. В открытом состоянии падение напряжения на СПП в $10^2 - 10^4$ раз меньше, чем максимально допустимое напряжение на СПП в закрытом состоянии (например, в открытом состоянии среднее значение падения напряжения на силовом тиристоре или диоде составляет не более 1 – 2 В). Ток, протекающий через СПП в закрытом состоянии, в $10^4 - 10^5$ раз меньше максимально допустимого тока СПП в открытом состоянии. Это позволяет при анализе электромагнитных процессов в УВ считать СПП идеальными ключами и пренебрегать падениями напряжения на них в открытом состоянии и их обратными токами.

Полупроводниковый диод находится в открытом состоянии при положительном напряжении на его аноде (относительно катода) и в закрытом – при отрицательном.

Для переключения тиристора в открытое состояние необходимо при положительном (относительно катода) напряжении на аноде подать на его

управляющий электрод (относительно катода) положительный управляющий импульс. Величина и длительность управляющего импульса должны быть достаточными для того, чтобы за время его действия ток анода тиристора стал больше тока выключения тиристора. Для запираания тиристора необходимо при отсутствии управляющего импульса уменьшить ток анода до величины тока выключения или приложить к его аноду обратное (отрицательное относительно катода) напряжение. Ток выключения тиристоров в $10^3 - 10^4$ раз меньше его номинального прямого тока, поэтому при анализе работы схем можно считать, что тиристор закрывается при нулевом значении тока анода.

2.2 Фазовый способ регулирования выпрямленного напряжения

Фазовый способ регулирования выпрямленного напряжения основан на управлении моментом отпирания тиристорov, включенных последовательно между источником переменного напряжения и нагрузкой. Для иллюстрации фазового способа рассмотрим работу однофазного УВ с активной нагрузкой (рис. 2).

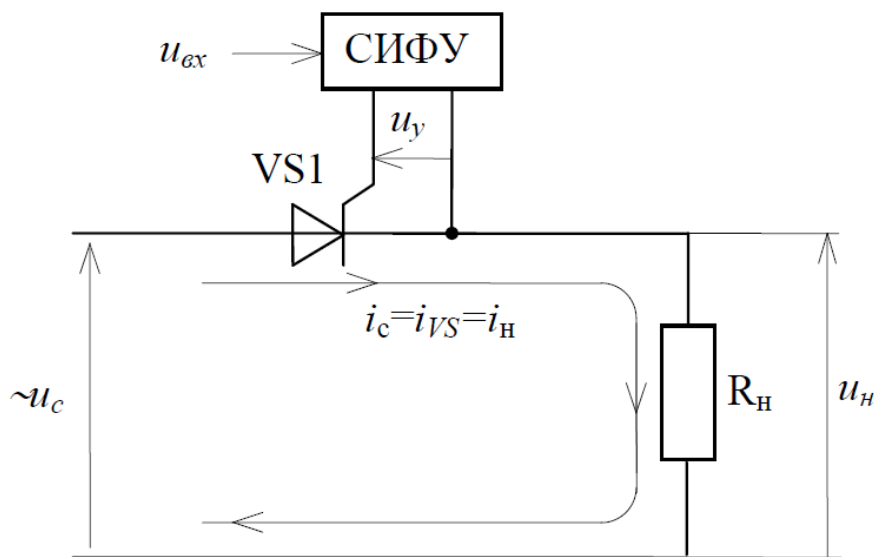


Рисунок 2 – Однофазный однополупериодный управляемый выпрямитель

В этой схеме приведены: u_c – переменное сетевое напряжение; VS1 – тиристор; СИФУ – система импульсно фазового управления; R_n – сопротивление нагрузки, u_n – напряжение на нагрузке, i_c – сетевой ток, i_{VS} – ток, протекающий через тиристор, i_n – ток нагрузки.

Тиристор служит для выпрямления и регулирования выпрямленного напряжения на нагрузке, а СИФУ – для управления моментом отпирания тиристора.

С СИФУ на управляющий электрод тиристора подаются управляющие импульсы u_y , угол запаздывания которых относительно начала положительной полуволны напряжения на аноде тиристора (угол регулирования α) определяется величиной входного напряжения u_{ex} СИФУ. Частота импульсов должна быть равной частоте напряжения, прикладываемаемого к аноду тиристора, а амплитуда и длительность – достаточными для надежного отпирания тиристора.

Диаграммы, поясняющие работу схемы при $\alpha = \pi/6$ радиан, приведены на рис. 3, а.

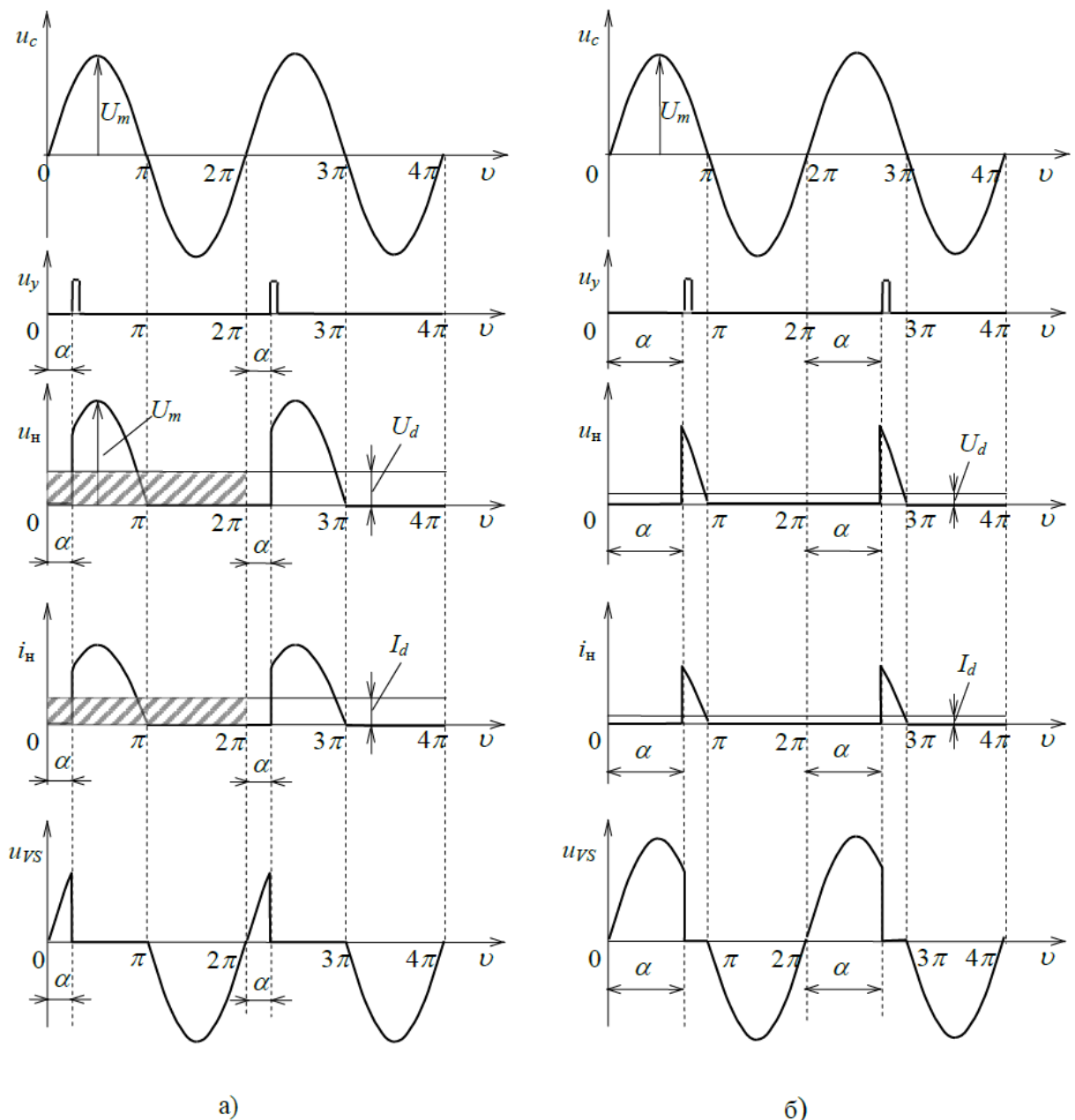


Рисунок 3 – Временные диаграммы к схеме на рис.2

На первой диаграмме приведена зависимость сетевого напряжения u_c от угла v . Напряжение u_c изменяется по синусоидальному закону с периодом 2π :

$$u_c = U_m \sin v,$$

где U_m – амплитудное значение сетевого напряжения ($U_m = \sqrt{2}U_c$; U_c – действующее значение сетевого напряжения).

На второй диаграмме приведены управляющие импульсы u_y прямоугольной формы, сдвинутые по фазе на угол α относительно сетевого напряжения.

На третьей, четвертой и пятой диаграммах приведены зависимости мгновенных значений соответственно напряжения на нагрузке – $u_n(v)$, тока нагрузки – $i_n(v)$ и падения напряжения на тиристоре – $u_{VS}(v)$.

Рассмотрим работу управляемого выпрямителя на отдельных интервалах.

Интервал $0 \leq v < \alpha$.

На этом интервале тиристор закрыт, ток тиристора $i_{VS}(v)$ и напряжение на нагрузке $u_n(v)$ практически равны нулю, а напряжение на аноде тиристора равно сетевому напряжению $u_{VS}(v) = u_c(v)$.

Интервал $\alpha \leq v < \pi$.

При $v = \alpha$ на управляющий электрод тиристора подается управляющий импульс u_y и тиристор открывается. При этом ток анода тиристора $i_{VS}(v) = i_n(v)$ практически мгновенно возрастает и оказывается больше тока выключения, поэтому после окончания управляющего импульса тиристор удерживается в открытом состоянии.

На этом интервале тиристор открыт, падение напряжения на тиристоре $u_{VS}(v)$ практически равно нулю, напряжение на нагрузке практически равно сетевому напряжению – $u_n(v) = u_c(v)$, а ток нагрузки – $i_n(v) = u_n(v)/R_n$.

При $v \approx \pi$ ток анода тиристора оказывается меньше тока выключения и тиристор закрывается.

Интервал $\pi \leq v < 2\pi + \alpha$.

На этом интервале тиристор закрыт, а состояние схемы будет таким же, как и на интервале $0 < v < \alpha$.

На интервалах $2\pi \leq v < 4\pi$; $4\pi \leq v < 6\pi$; ... , $2i\pi \leq v < 2(i+1)\pi$, где $i = 3, 4, 5, \dots$, работа схемы идентична работе на интервале $0 \leq v < 2\pi$.

На рис. 3, б приведены диаграммы для случая, когда угол регулирования $\alpha = 2\pi/3$.

Как видно из рис. 3 напряжение на нагрузке имеет вид положительных импульсов, частота которых равна частоте сетевого напряжения. Мгновенное значение напряжения на нагрузке $u_n(v)$ при открытом тиристоре равно сетевому напряжению $u_c(v)$ и равно нулю при закрытом тиристоре.

Среднее за период значение выпрямленного напряжения (постоянную составляющую выпрямленного напряжения) геометрически можно определить следующим образом. Строится прямоугольник длиной 2π , площадь которого равна площади фигуры, ограниченной кривой мгновенного напряжения на нагрузке u_n (3-я сверху диаграмма на рис. 3, а). Высота полученного прямоугольника будет равна среднему (за период 2π) значению выпрямленного напряжения U_d на нагрузке. Таким образом, среднее значение напряжения пропорционально площади фигуры, ограниченной кривой мгновенного напряжения на нагрузке и, следовательно, зависит от угла регулирования α .

Аналитически среднее значение напряжения на нагрузке определяется из выражения:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_m \sin v \, dv = \frac{U_m}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = \frac{\sqrt{2}U_c}{2\pi} (1 + \cos \alpha) = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}, \quad (1)$$

где $U_{d0} = \frac{\sqrt{2}U_c}{\pi} \approx 0,45U_c$ – среднее значение выпрямленного напряжения при угле регулирования $\alpha = 0$.

Выражение (1) представляет зависимость среднего значения напряжения на нагрузке от угла регулирования – $U_d(\alpha)$ и описывает регулировочную характеристику УВ.

Из (1) видно, что при изменении угла α в пределах $0 \leq \alpha \leq \pi$, среднее значение напряжения на нагрузке $U_d(\alpha)$ изменяется в пределах $0,45U_c \leq U_d < 0$ и уменьшается с увеличением угла регулирования α . Последнее иллюстрируется значениями U_d на рис. 3, а и 3, б.

При активной нагрузке выполняется: $u_n(v) = R_n i_n(v)$. Поэтому среднее значение тока нагрузки и среднее значение напряжения на нагрузке связаны соотношением:

$$I_d = \frac{U_d}{R_n}. \quad (2)$$

Таким образом, фазовый способ регулирования среднего за период значения напряжения и тока нагрузки заключается в изменении угла регулирования α , которое обеспечивается изменением входного напряжения $u_{вх}$ СИФУ.

На рис. 4 приведена структурная схема УВ, в которой В – это выпрямляющие СПП.

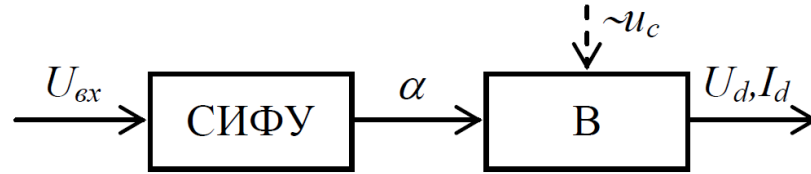


Рисунок 4 – Структурная схема УВ

2.3 Недостатки управляемых выпрямителей

Из рис. 2 и 3 следует, что сетевой ток i_c равен току нагрузки i_n , несинусоидален, и, следовательно, содержит высшие гармонические составляющие. При этом первая (основная) гармоника сетевого тока отстает от синусоидального сетевого напряжения приблизительно на угол α . Фазовый сдвиг между сетевым напряжением и током (на угол α) свидетельствует о том, что УВ потребляет из сети помимо активной мощности, равной $U_d I_d$, также реактивную мощность.

Нелинейные искажения сетевого тока i_c при отличном от нуля сопротивлении источника сетевого напряжения приводят к появлению нелинейных искажений сетевого напряжения u_c , что отрицательно сказывается на работе других потребителей, подключенных к этому же источнику. Потребление реактивной мощности и присутствие в кривой сетевого тока высших гармонических составляющих приводят к увеличению действующего (эффективного) значения тока сети и росту потерь при передаче энергии к УВ.

Для уменьшения отрицательных воздействий УВ на питающую сеть, связанных с искажением формы тока и потреблением реактивной мощности, применяют следующие меры:

- для уменьшения влияния высших гармонических на входе УВ включают фильтры;
- для уменьшения потребляемой реактивной мощности ко входу УВ подключают компенсаторы реактивной мощности, например синхронные компенсаторы или конденсаторы.

3 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

3.1 Общие указания

В процессе выполнения задания рекомендуется считать диоды и тиристоры идеальными ключами, поэтому падение напряжения на открытых диодах и тиристорах, обратные токи в закрытом состоянии, а также время переключения можно считать равными нулю. Такая идеализация позволяет упростить анализ работы УВ и часто применяется во многих учебных пособиях по преобразовательной технике.

Схема электрическая принципиальная УВ должна быть выполнена в соответствии с требованиями ГОСТа [2]. Так, например, в условных обозначениях обмоток трансформатора и обмотки независимого возбуждения электродвигателя диаметр полуокружностей должны быть равными $3 \div 5$ мм, количество полуокружностей не оговаривается, но, исходя из удобства чтения чертежей, должно быть не менее 3 для обмоток трансформатора и равным 4 для обмотки возбуждения. В условных обозначениях диода и тиристора треугольник выполняется равносторонним с длиной стороны $5 \div 6$ мм. Условные буквенные обозначения трансформатора – Т, тиристора – VS, диода – VD, обмотки возбуждения – LM. После буквенного обозначения должен идти порядковый номер элемента, например, VS1, VS2, VS3, ... , VD1, VD2, ... , и т.д. Нумерация элементов в схеме должна идти слева направо и сверху вниз. Если в схеме присутствует только один элемент, его можно не нумеровать. Буквенные обозначения должны располагаться рядом с условным обозначением элемента. Все элементы схемы и электрические связи между ними должны быть выполнены линиями одинаковой толщины. На линиях с разветвлением должна стоять точка в месте их соединения.

В схеме должны быть приведены направления токов и напряжений, ссылки на которые даются в описании работы схемы.

Описание схемы должно включать назначение схемы, назначение элементов схемы и описание работы схемы.

Описание работы схемы должно проводиться для установившегося режима работы и начинаться с начальных (при $v = 0$) состояний СПП, а также начальных значений токов и напряжений. Затем следует описывать работу схемы на отдельных интервалах угла и в радианах или в электрических градусах. Каждый из интервалов характеризуется неизменным состоянием (закрытом или открытом) СПП. После изменения состояния одного из СПП следует переходить к описанию работы схемы на следующем интервале.

На каждом из таких интервалов рассматриваемую схему можно считать состоящей из линейных элементов – источников э.д.с., резисторов и индук-

тивностей. Описание достаточно провести на одном периоде (2π) сетевого напряжения, при этом конечное состояние УВ должно совпадать с начальным. Описание работы схемы должно сопровождаться ссылками на схему электрическую принципиальную УВ, диаграммы напряжений и токов, а также литературные источники.

Диаграммы должны отражать изменения мгновенных значений заданных напряжений и токов в функции угла ν на интервале не менее двух периодов (2π) сетевого напряжения. Диаграммы строятся для значения угла регулирования $\alpha \approx 0,5\Delta\alpha$. Расчет $\Delta\alpha$ приведен ниже.

При построении диаграмм токов, протекающих через тиристоры, диоды и обмотку возбуждения, можно считать, что УВ работает в области непрерывных токов, а форма токов, протекающих через тиристоры, диоды и обмотку возбуждения, близка к прямоугольной.

3.2 Расчет однофазных управляемых выпрямителей

Основные формулы, необходимые для расчета УВ, приведены в табл. 2. Они верны для случая, когда постоянная времени нагрузки (L_n/R_n) стремится к бесконечности.

3.2.1 Расчёт параметров управляемых выпрямителей

Номинальное $I_{LMном}$ и минимальное $I_{LMмин}$ значения средних токов обмотки возбуждения находятся из выражений:

$$I_{LMном} = \frac{U_{LMном}}{R_{LM}}; \quad (3)$$

$$I_{LMмин} = \frac{I_{LMном}}{\frac{I_{LMном}}{I_{LMмин}}}, \quad (4)$$

где $U_{LMном}$, R_{LM} и $I_{LMном}/I_{LMмин}$ выбираются из табл. 1 для заданного варианта задания.

Номинальный ток обмотки возбуждения $I_{LMном}$ формируется при минимальном значении угла регулирования $\alpha_{мин}$, которое для схем, представленных на рис. 1, равно нулю.

Минимальный ток обмотки возбуждения $I_{LMмин}$ формируется при максимальном значении угла регулирования $\alpha_{макс}$, которое для схемы на рис. 1, б определяется из выражения:

$$\alpha_{\text{макс}} = \arccos \left(\frac{2}{\frac{I_{LM\text{ном}}}{I_{LM\text{мин}}}} - 1 \right), \quad (5)$$

а для схем на рис. 1, а и 1, в – из выражения:

$$\alpha_{\text{макс}} = \arccos \left(\frac{1}{\frac{I_{LM\text{ном}}}{I_{LM\text{мин}}}} \right). \quad (6)$$

Максимальный диапазон изменения угла регулирования СИФУ $\Delta\alpha$, необходимый для регулирования тока обмотки возбуждения в заданном диапазоне, находится из выражения:

$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{макс}} - \alpha_{\text{мин}} = \alpha_{\text{макс}}. \quad (7)$$

Таблица 2 – Расчётные соотношения для основных параметры УВ

Параметры	Схема УВ		
	Рис. 1, а	Рис. 1, б	Рис. 1, в
Максимально возможный диапазон изменения угла регулирования	$0 \leq \alpha \leq \pi/2$	$0 \leq \alpha \leq \pi$	$0 \leq \alpha \leq \pi/2$
Среднее значение выпрямленного напряжения	$U_d = U_{d0} \cos \alpha$ $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,9U_2$	$U_d = U_{d0} \frac{1+\cos \alpha}{2}$ $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,9U_2$	$U_d = U_{d0} \cos \alpha$ $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,9U_2$
Среднее значение выпрямленного тока	$I_d = \frac{U_d}{R_{LM}}$	$I_d = \frac{U_d}{R_{LM}}$	$I_d = \frac{U_d}{R_{LM}}$
Среднее значение тока тиристора	$I_{Vsd} = \frac{I_d}{2}$	$I_{Vsd} = I_d \frac{\pi - \alpha}{2\pi}$	$I_{Vsd} = \frac{I_d}{2}$
Среднее значение тока диода	—	$I_{VDd} = I_d \frac{\alpha}{\pi}$	—
Максимальное значение обратного напряжения на тиристоре	$U_{VS\text{макс}} = 3,14U_{d0}$	$U_{VS\text{макс}} = 3,14U_{d0}$	$U_{VS\text{макс}} = 3,14U_{d0}$
Максимальное значение обратного напряжения на диоде	—	$U_{VD\text{макс}} = 1,17U_{d0}$	—

Действующее значение напряжения U_2 на вторичной обмотке трансформатора находится из формулы для определения среднего значения выпрямленного напряжения (табл. 2).

При заданном напряжении питающей сети U_1 (см. табл.1) для получения необходимого значения U_2 , обеспечивающего номинальное значение напряжения на обмотке возбуждения, трансформатор должен иметь коэффициент трансформации $k_{тр}$, который определяется из выражения:

$$k_{тр} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1 \eta k_{c1}}{U_2}, \quad (8)$$

где ω_1 и ω_2 – соответственно число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора;

η – коэффициент полезного действия трансформатора ($\eta \approx 0,98$);

k_{c1} – коэффициент, учитывающий возможное понижение напряжения сети на 10% ($k_{c1} = 0,9$).

3.2.2 Выбор силовых полупроводниковых приборов

Выбор силовых полупроводниковых приборов осуществляется по максимально допустимым значениям тока и напряжения.

В паспортных данных на тиристоры указывается максимально допустимое среднее за период (предельное) значение тока I_p , длительно протекающего через тиристор. Это значение тока дается для классификационной схемы, в качестве которой выбрана схема однофазного однополупериодного УВ с активной нагрузкой.

Предельное значение тока для классификационной схемы определяется при частоте питающей сети 50 Гц, угле проводимости $\lambda = 180$ эл. гр., синусоидальной форме тока, максимально допустимой температуре полупроводниковой структуры и максимально допустимой температуре корпуса. При расчете предельного значения тока тиристора для приведенных в задании схем необходимо учитывать возможную несинусоидальность кривой тока тиристора, нестабильность сетевого напряжения и условия охлаждения тиристора.

Расчетное значение максимально допустимого среднего за период (предельного) тока $I_{пр}$ тиристора определяется из выражения:

$$I_{пр} = k_{zi} k_{\phi} k_{охл} I_{LMном}, \quad (9)$$

где k_{zi} – коэффициент запаса по току, который исходя из надежности работы тиристора устанавливается равным $1,25 \div 1,4$;

k_{ϕ} – коэффициент, учитывающий несинусоидальность кривой тока (для схем, приведенных в задании $k_{\phi} = 0,9$);

$k_{\text{охл}}$ – коэффициент, учитывающий условия охлаждения тиристорov (при стандартном радиаторе, воздушном охлаждении и скорости охлаждающего воздуха $V_{\text{охл}} = 0$ $k_{\text{охл}} \approx 2,5$, а при $V_{\text{охл}} = 12$ м/с $k_{\text{охл}} \approx 1$);
 $I_{LM\text{ном}}$ – определяется из выражения (3).

По расчетному предельному значению тока $I_{\text{пр}}$ выбирается тиристор так, чтобы паспортное значение предельного значения тока тиристора $I_{\text{п}}$ было не меньше $I_{\text{пр}}$.

$$I_{\text{п}} \geq I_{\text{пр}}. \quad (10)$$

В паспортных данных на тиристоры указывается повторяющееся напряжение $U_{\text{п}}$, определяемое как максимально допустимое мгновенное значение напряжения, прикладываемое к тиристору. Расчетное значение повторяющегося напряжения $U_{\text{пр}}$ зависит от номинального напряжения на нагрузке и выбирается с некоторым запасом:

$$U_{\text{пр}} = k_{\text{зи}} k_{\text{с2}} U_{V\text{Смакс}}, \quad (11)$$

где $U_{V\text{Смакс}}$ – максимальное значение обратного напряжения на тиристоре (табл. 2);

$k_{\text{зи}}$ – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможное перенапряжение на тиристорах (обычно $k_{\text{зи}} = 1,3 \div 1,5$);

$k_{\text{с2}}$ – коэффициент, учитывающий возможное повышение напряжения сети переменного тока (численное значение коэффициента $k_{\text{с2}}$ принимается равным 1,15, что соответствует увеличению напряжения на 15% от номинального значения).

По расчетному значению повторяющегося напряжения $U_{\text{пр}}$ выбирается тиристор так, чтобы паспортное значение повторяющегося напряжения $U_{\text{п}}$ удовлетворяло условию:

$$U_{\text{п}} \geq U_{\text{пр}}. \quad (12)$$

Часто в справочных данных на тиристоры указывается класс тиристора. Требуемый класс тиристора находится из условия:

$$\text{Класс} = \text{Ближайшее целое большее } (U_{\text{п}} / 100 \text{ В}). \quad (13)$$

Выбранный тиристор должен одновременно удовлетворять условиям (10, 12). Тип тиристорov выбирается из справочников [3, 4, 5].

Максимальное (предельное) значение тока диода приблизительно равно максимальному значению тока тиристора.

Максимальное (предельное) значение напряжения, прикладываемого к диоду, определяется из (11) при подстановке $U_{VD\text{макс}}$ вместо $U_{VS\text{макс}}$ (табл. 2).

Выбранные диоды должны также удовлетворять условиям (10, 12). Тип диодов выбирается из справочников [5, 6].

4 ПРИМЕР РАСЧЕТА ОДНОФАЗНОГО УПРАВЛЯЕМОГО ВЫПРЯМИТЕЛЯ

4.1 Задание

Дано:

- схема УВ – однофазная однополупериодная с нулевым диодом (рис.5);
- номинальное напряжение на обмотке возбуждения – $U_{LMном} = 90$ В;
- сопротивление обмотки возбуждения – $R_{LM} = 20$ Ом;
- диапазон регулирования тока возбуждения – $I_{LMном} / I_{LMмин} = 2$;
- действующее значение напряжения питающей сети – $U_1 = 220$ В;
- частота питающей сети – 50 Гц;
- нестабильность сетевого напряжения – $-10\% \div +15\%$.

Требуется:

- привести описание работы схемы (с построением временных диаграмм), оценить частоту пульсаций напряжения и тока обмотки возбуждения;
- рассчитать номинальный и минимальный токи обмотки возбуждения, диапазон изменения угла регулирования СИФУ, требуемое действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент трансформации трансформатора;
- построить расчетные кривые зависимостей от угла регулирования средних значений: напряжения на обмотке возбуждения, тока обмотки возбуждения, тока тиристора и тока диода;
- выбрать тиристор и диод.

4.2 Описание работы управляемого выпрямителя

Описываемый УВ предназначен для регулирования тока возбуждения двигателя постоянного тока и, следовательно, для регулирования частоты его вращения вверх от номинальной.

На рис. 5 приведена упрощенная схема электрическая принципиальная однофазного однополупериодного УВ с нулевым диодом.

На схеме приведены: Т1 – силовой трансформатор, VS1 – тиристор, СИФУ – система импульсно-фазового управления, VD1 – нулевой диод и LM1 – обмотка возбуждения. Точками на первичной и вторичной обмотках трансформатора показаны их одноименные выводы (начало или конец).

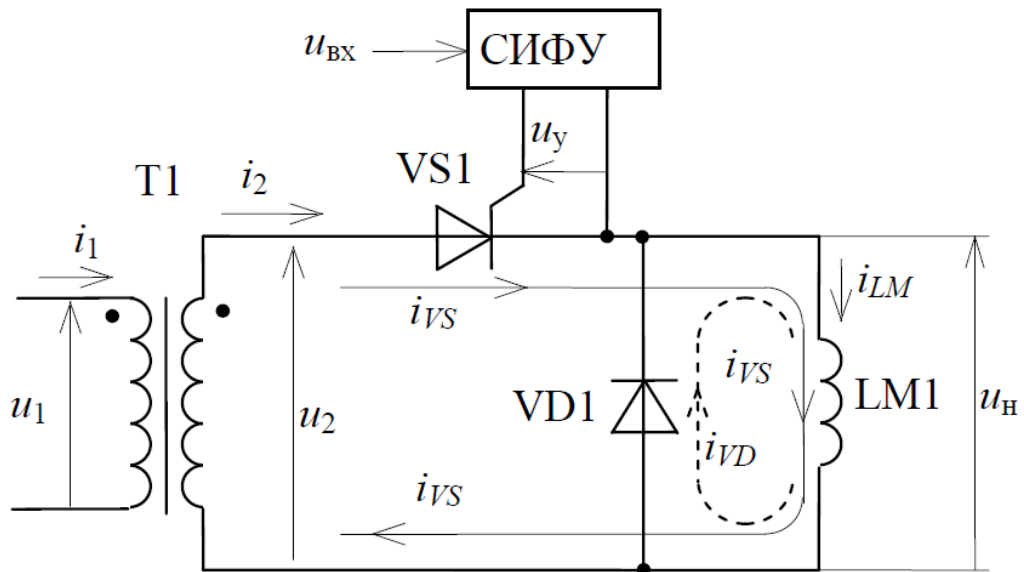


Рисунок 5 – Однофазная неперверсивная схема управляемого выпрямителя

Трансформатор Т1 служит для получения требуемого действующего значения переменного напряжения на вторичной обмотке, определяющего максимальное значение напряжения на обмотке возбуждения LM1, а также для гальванической развязки между сетью и нагрузкой. Тиристор VS1 служит для выпрямления и регулирования среднего (за период) значения выпрямленного напряжения на обмотке возбуждения LM1. СИФУ управляет работой тиристора VS1. Нулевой диод VD1 предназначен для увеличения среднего значения выпрямленного напряжения и тока обмотки возбуждения, а также для устранения отрицательных выбросов напряжения на обмотке возбуждения LM1 и катоде тиристора (относительно анода) в момент его за-пира-ния.

На первичную обмотку трансформатора Т1 подается переменное сетевое напряжение u_1 , изменяющееся по синусоидальному закону:

$$u_1 = U_{m1} \sin \nu ,$$

где u_1 – мгновенное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора (сетевое напряжение);

U_{m1} – амплитудное значение напряжения на первичной обмотке трансформатора;

$\nu = \omega t$ [рад] ($\omega = 2\pi f$ [рад/с]; $f = 50$ Гц – частота питающей сети; t [с] – время).

Со вторичной обмотки трансформатора снимается напряжение u_2 :

$$u_2 = u_1 / k_{тр} ,$$

где $k_{тр}$ – коэффициент трансформации трансформатора.

Напряжение u_2 , так же как и u_1 , изменяется по синусоидальному закону:

$$u_2 = U_{m2} \sin \nu = \frac{U_{m1}}{k_{\text{тр}}} \sin \nu,$$

где u_2 – мгновенное значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора;

U_{m2} – амплитудное значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора (U_2 – действующее значение напряжения на вторичной обмотке).

Тиристор VS1 работает в ключевом режиме. Он открывается при прямом (положительном относительно катода) напряжении на аноде в момент подачи управляющего импульса u_y , сформированного СИФУ. Управляющий импульс имеет прямоугольную форму и сдвинут относительно начала положительной полуволны напряжения u_2 на угол регулирования α , величина которого определяется входным напряжением $u_{\text{вх}}$ СИФУ. Амплитуда и длительность управляющего импульса выбираются из условий надежного отпирания тиристора.

В дальнейшем, для простоты описания работы схемы, прямое падение напряжения на аноде тиристора и диода, ток выключения тиристора и ток анода закрытого тиристора будем считать равными нулю, т.к. указанные величины имеют пренебрежимо малое значение.

Работа схемы в установившемся режиме на отдельных интервалах времени поясняется временными диаграммами, приведенными на рис. 6. На этом рисунке приведены зависимости от угла ν мгновенных значений: $u_2(\nu)$ – напряжения на вторичной обмотке трансформатора; $u_y(\nu)$ – напряжения на управляющем электроде тиристора; $u_{LM}(\nu)$ – напряжения на обмотке возбуждения; $i_{VS}(\nu)$ – тока тиристора; $i_{VD}(\nu)$ – тока диода; $i_{LM}(\nu)$ – тока обмотки возбуждения; $u_{VS}(\nu)$ – напряжения на аноде (относительно катода) тиристора и $u_{VD}(\nu)$ – напряжения на аноде (относительно катода) диода. В данной схеме (обмотка возбуждения) носит активно-индуктивный характер.

Электромагнитное поле индуктивности обмотки возбуждения является аккумулятором электромагнитной энергии. При подаче на обмотку возбуждения положительного импульса напряжения в электромагнитном поле ее индуктивности будет запасаться энергия, а ток через обмотку возбуждения будет плавно возрастать. По окончании импульса энергия, запасенная в электромагнитном поле, будет отдаваться, а ток при этом будет уменьшаться, не изменяя своего направления. В обоих случаях на индуктивности будет наводиться э.д.с. самоиндукции, препятствующая изменению тока:

$$e_L = -L \frac{di_L}{dt}.$$

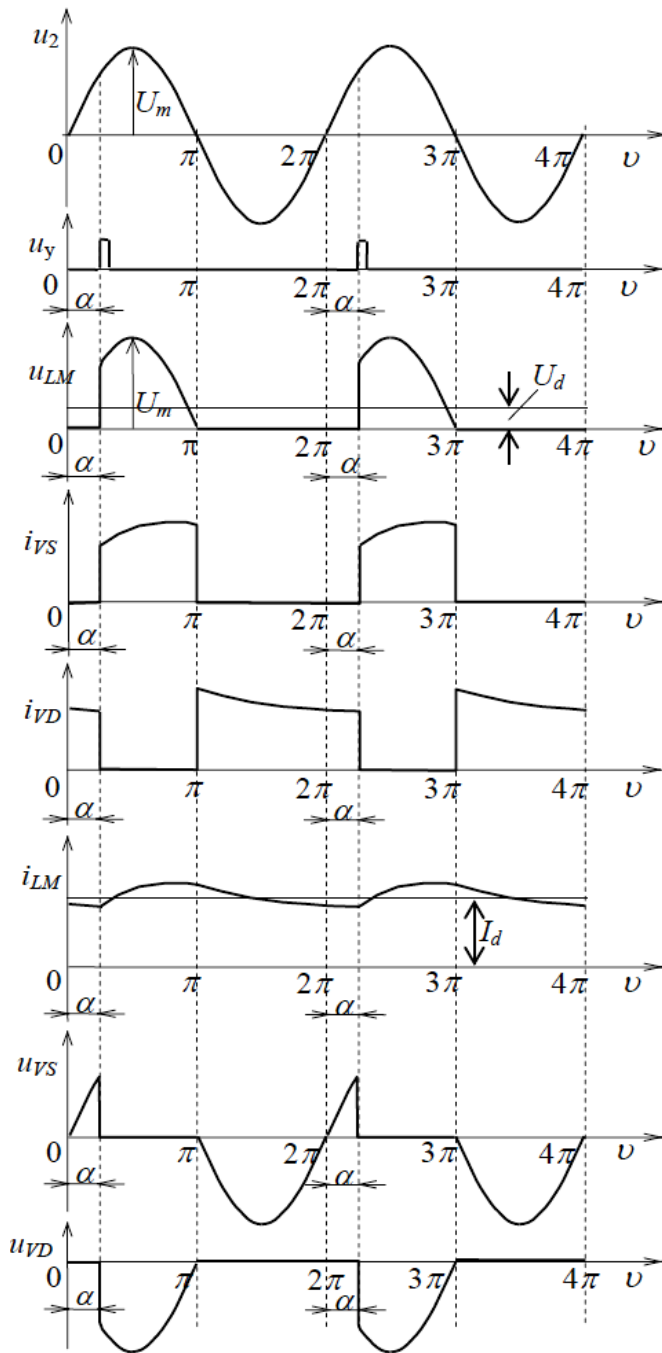


Рисунок 6 – Временные диаграммы к рис.5

Работа схемы описывается в установившемся режиме на отдельных интервалах.

Интервал $0 \leq v < \alpha$.

В исходном состоянии ($v = 0$) тиристор закрыт. На этом интервале ток анода тиристора $i_{VS}(v)$ равен нулю, а обмотка возбуждения оказывается отключенной от вторичной обмотки трансформатора.

За счет э.д.с. самоиндукции обмотки возбуждения LM1 диод VD1 удерживается в открытом состоянии. Ток обмотки возбуждения $i_{LM}(v) = i_{VD}(v)$ протекает в направлении, указанном на схеме пунктирной линией, и уменьшается во времени по экспоненциальной зависимости. Напряжение $u_{LM}(v)$ на обмотке возбуждения LM1 равно прямому падению напряжения $u_{VD}(v)$ на диоде VD1, которое практически равно нулю. Напряжение на закрытом тиристоре VS1 $u_{VS}(v) = u_2(v) - u_{LM}(v) \approx u_2(v)$.

Интервал $\alpha \leq v < \pi$.

При $v = \alpha$ на управляющий электрод тиристора с СИФУ подается управляющий импульс, тиристор открывается, а напряжение на обмотке возбуждения $u_{LM}(v)$ возрастает скачком от нуля до значения $u_2(v)$. Под действием напряжения u_2 диод VD1 закрывается и не оказывает влияния на работу схемы. После снятия управляющего импульса тиристор удерживается в открытом состоянии, т.к. ток анода оказывается больше тока выключения тиристора.

Следовательно, на интервале $\alpha \leq v < \pi$ тиристор VS1 находится в открытом состоянии, диод VD1 закрыт, а напряжение на обмотке возбуждения $u_{LM}(v)$ равно напряжению $u_2(v)$ на вторичной обмотке трансформатора.

Ток обмотки возбуждения $i_{LM}(v) = i_{VS}(v)$ протекает в направлении, указанном на схеме сплошной линией. На большей части интервала $\alpha \leq v < \pi$ ток $i_{LM}(v)$ возрастает ($di_{LM}/dt > 0$), в электромагнитном поле индуктивности обмотки возбуждения запасается энергия, а э.д.с. самоиндукции обмотки возбуждения направлена встречно напряжению на вторичной обмотке трансформатора u_2 .

При $v \approx \pi$ ток $i_{LM}(v)$ обмотки возбуждения LM1 начинает уменьшаться ($di_{LM}/dt < 0$), в результате чего э.д.с. самоиндукции индуктивности обмотки возбуждения изменяет свой знак. В результате этого открывается диод VD1, а к аноду тиристора VS1 прикладывается обратное напряжение и тиристор закрывается.

Интервал $\pi \leq v < 2\pi + \alpha$.

На данном интервале тиристор VS1 закрыт, а диод VD1 удерживается в открытом состоянии. Напряжение $u_{LM}(v)$ на обмотке возбуждения LM1 равно прямому падению напряжения $u_{VD}(v)$ на диоде VD1, т.е. практически равно нулю. Напряжение $u_{VS}(v)$ на аноде тиристора равно напряжению $u_2(v)$ на вторичной обмотке трансформатора T1. Ток $i_{VS}(v)$ через закрытый тиристор VS1 равен нулю, а ток $i_{LM}(v)$ обмотки возбуждения LM1 под действием энергии, накопленной ее индуктивностью на интервале $\alpha \leq v < \pi$, протекает через диод и уменьшается по экспоненциальной зависимости.

На последующих интервалах $2\pi + \alpha \leq v < 3\pi$, $4\pi + \alpha \leq v < 5\pi$ и т.д. работа управляемого выпрямителя совпадает с описанной ранее работой на интервале $\alpha \leq v < \pi$, а на интервалах $3\pi \leq v < 4\pi + \alpha$, $5\pi \leq v < 6\pi + \alpha$ и т.д. — с работой на интервале $\pi \leq v < 2\pi + \alpha$.

Как видно из рис. 6 напряжение $u_{LM}(v)$ на обмотке возбуждения LM1 имеет вид однополярных импульсов, частота которых равна частоте питающей сети. Величина напряжения $u_{LM}(v)$ при открытом тиристоре VS1 равна напряжению $u_2(v)$ на вторичной обмотке трансформатора, и равна нулю при закрытом тиристоре. Среднее за период (2π) значение напряжения U_d (постоянная составляющая напряжения) на обмотке возбуждения LM1 зависит от угла регулирования α . Например, оно максимально при $\alpha = 0$ и равно нулю при $\alpha = \pi$. Таким образом, изменение напряжения $u_{вх}$ на входе СИФУ приводит к изменению угла регулирования α и, следовательно, к изменению среднего за период напряжения U_d на обмотке возбуждения LM1.

Как следует из диаграмм, максимальное значение обратного напряжения на аноде тиристора равно амплитудному значению напряжения на вто-

ричной обмотке трансформатора U_{m2} , а частота пульсаций напряжения и тока в обмотке возбуждения будет равна частоте напряжения питающей сети.

4.3 Расчет параметров управляемого выпрямителя

Номинальный $I_{LMном}$ и минимальный $I_{LMмин}$ средние значения токов обмотки возбуждения находятся из (3) и (4):

$$I_{LMном} = \frac{U_{LMном}}{R_{LM}} = \frac{90 \text{ В}}{20 \text{ Ом}} = 4,5 \text{ А}; \quad (14)$$

$$I_{LMмин} = \frac{I_{LMном}}{I_{LMном}/I_{LMмин}} = \frac{4,5 \text{ А}}{2} = 2,25 \text{ А}. \quad (15)$$

Максимально возможное значение угла регулирования СИФУ с учетом возможного повышения напряжения питающей сети на 15% определяется по формуле (5):

$$\alpha_{\max} = \arccos \left(\frac{2}{I_{LMном}/I_{LMмин}} - 1 \right) = \arccos \left(\frac{2}{2} - 1 \right) = \arccos(0) = 1,57 \text{ эл. рад.} \quad (16)$$

Максимальный диапазон угла регулирования СИФУ вычисляется по формуле (7):

$$\Delta\alpha = \alpha_{\max} - \alpha_{\min} = 1,57 \text{ эл. рад.}, \quad (17)$$

где α_{\min} – минимальное значение угла регулирования СИФУ ($\alpha_{\min} = 0$).

По формуле, приведенной в табл. 2, определим требуемое действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора исходя из величины номинального напряжения на обмотке возбуждения 90 В. Для схемы на рис.5:

$$U_2 = \frac{U_{d0}}{0,45} = \frac{90 \text{ В}}{0,45} = 200 \text{ В}. \quad (18)$$

Коэффициент трансформации трансформатора определим из выражения (8):

$$k_{\text{тр}} = \frac{U_1 \eta k_{\text{cl}}}{U_2} = \frac{220 \text{ В} \cdot 0,98 \cdot 0,9}{200 \text{ В}} = 0,97. \quad (19)$$

Кривые зависимостей средних значений напряжения на обмотке возбуждения $U_d(\alpha)$ (регулирующая характеристика), тока обмотки возбуждения $I_d(\alpha)$, тока тиристора $I_{Vsd}(\alpha)$ и тока диода $I_{VDd}(\alpha)$ от угла регулирования α рассчитываются по формулам таблицы 2. Для схемы, представленной на рис.5:

$$U_d = 0,45U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}; I_d = \frac{U_d}{R_{LM}}; I_{Vsd} = I_d \frac{\pi - \alpha}{2\pi}; I_{VDd} = I_d \frac{\pi + \alpha}{2\pi}. \quad (20)$$

Расчеты по формулам (20) проведены при максимальном диапазоне изменения угла регулирования $0 < \alpha < \pi$ (π рад. соответствует 180°) с шагом 10° ($\pi/18$ рад.). Результаты расчетов сведены в таблицу 3.

Таблица 3 – Результаты расчетов

α	эл. град.	0	10	20	30	...	170	180
U_d	В	90	89,3	87	84,0	...	0,68	0
I_d	А	4,50	4,47	4,36	4,20	...	0,03	0
I_{Vsd}	А	2,25	2,11	1,94	1,75	...	0,0009	0
I_{VDd}	А	2,25	2,36	2,42	2,45	...	0,03	0

По результатам расчетов построены кривые зависимостей, приведенные на рис. 7 и рис. 8.

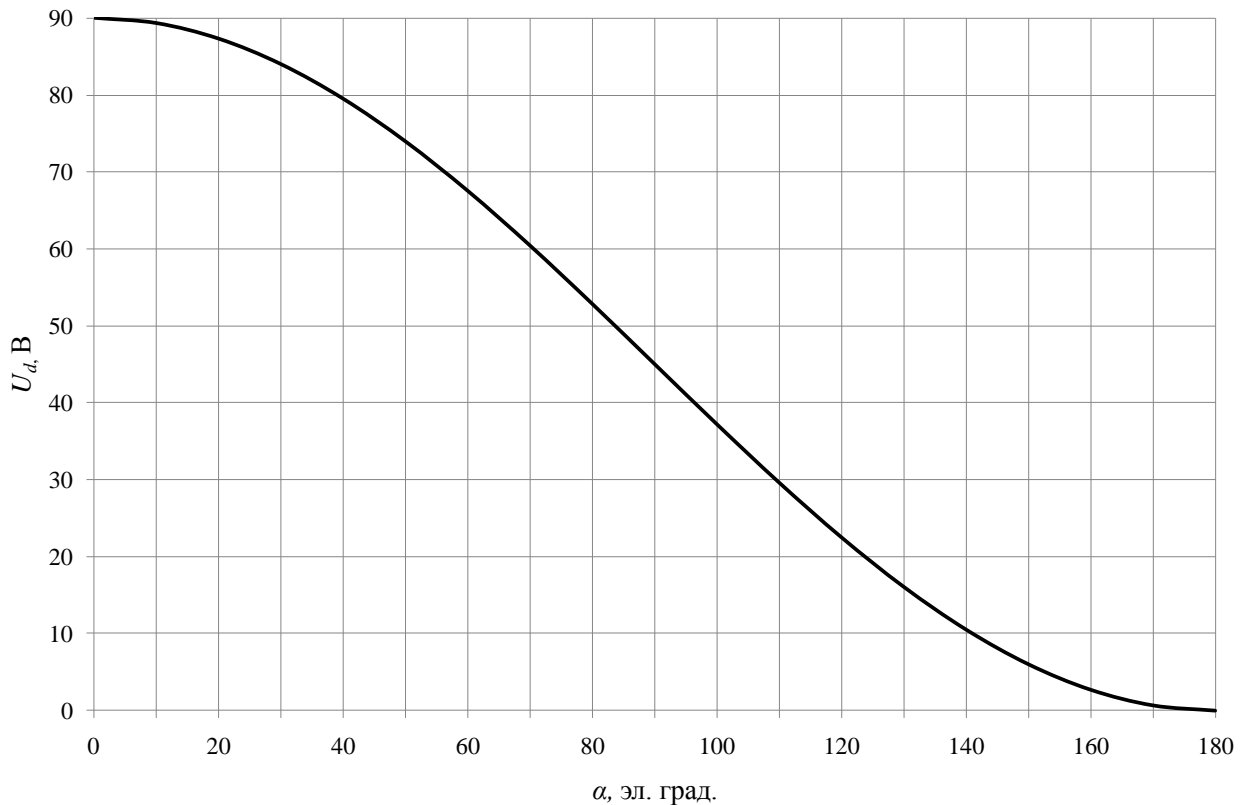


Рисунок 7 – Регулирующая характеристика УВ

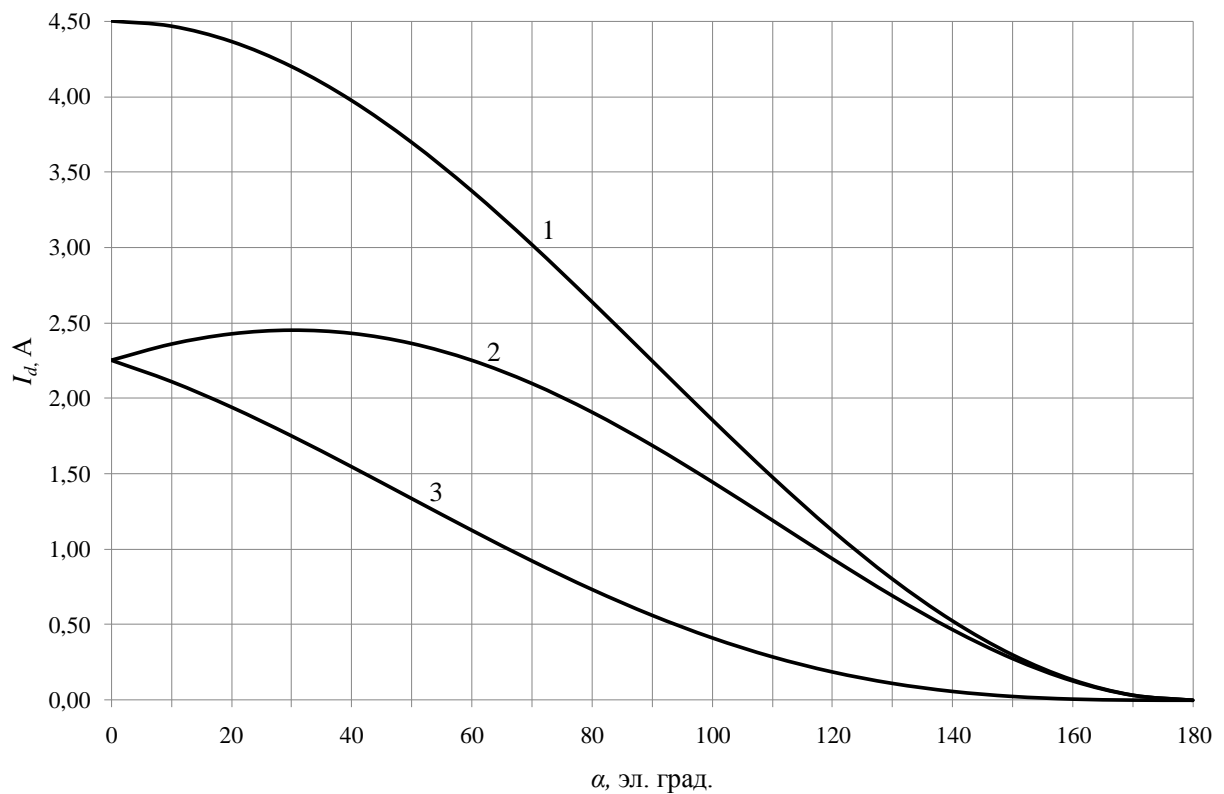


Рисунок 8 – Кривые зависимостей средних значений токов нагрузки (1), диода (2) и тиристора (3) от угла регулирования α

Расчетное значение максимально допустимого среднего за период (предельного) тока $I_{пр}$ тиристора определяется из выражения (9):

$$I_{пр} = k_{zi} \cdot k_{\phi} \cdot k_{охл} \cdot I_{LMном} = 1,3 \cdot 0,9 \cdot 2,5 \cdot 4,5 = 13,2 \text{ А}, \quad (21)$$

где $k_{zi} = 1,3$ – коэффициент запаса по току;

$k_{\phi} = 0,9$ – коэффициент, учитывающий несинусоидальность кривой тока;

$k_{охл} = 2,5$ – коэффициент, учитывающий условия охлаждения тиристорov (при стандартном радиаторе, воздушном охлаждении и скорости охлаждающего воздуха $V_{охл} = 0$);

$I_{LMном} = 4,5 \text{ А}$ – определено из выражения (14).

Максимальное значение напряжения на тиристоре определяется из выражения, приведенного в табл. 2:

$$U_{VSмакс} = 3,14 U_{d0} = 3,14 \cdot 0,45 \cdot U_2 = 3,14 \cdot 0,45 \cdot 200 = 282,6 \text{ В}, \quad (22)$$

где $U_{d0} = 0,45 \cdot U_2 = 90 \text{ В}$ – среднее значение напряжения на обмотке возбуждения при $\alpha = 0$.

Расчетное значение повторяющегося напряжения $U_{пр}$ определяется из (11):

$$U_{пр} = k_{zu} \cdot k_{c2} \cdot U_{VSмакс} = 1,5 \cdot 1,15 \cdot 282,6 = 487,5 \text{ В}, \quad (23)$$

где $k_{zu} = 1,5$ – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможное перенапряжение на тиристорах;

$k_{c2} = 1,15$ – коэффициент, учитывающий возможное повышение напряжения сети переменного тока.

Тиристор выбирается из условий (10, 12): $I_{п} > 13,2$ А и $U_{п} > 487,5$ В. Данным условиям удовлетворяет тиристор Т112-16 5-го класса, с максимально допустимым током – 16 А [3].

Максимальное (предельное) значение тока диода приблизительно равно максимальному значению тока тиристора, которое равно 13,2 А. Максимальное (предельное) значение напряжения, прикладываемого к диоду (табл. 2), равно предельному значению напряжения, прикладываемого к тиристорам, и равно 487,5 В. Данным условиям удовлетворяет диод Д112-16-9 [6], допускающий обратное напряжение 540 В и максимальный ток 16А.

СПИСОК РЕКОМЕНДУЕМЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Бурков А.Т. Электроника и преобразовательная техника: учебник: в 2 т. – М.: ФГБОУ «Учебно-методический центр по образованию на железнодорожном транспорте», 2015. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с.
2. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник. – М.: Изд. Стандартов, 1989. – 325 с.
3. Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Петухов В.М. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1987. – 576 с.
4. Тиристоры: Справочник / О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, С.Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
5. Чебовский А.Г., Моисеев Л.Г., Сахаров Ю.В. Силовые полупроводниковые приборы: Справочник. М., Энергия, 1975. – 511 с.
6. Диоды: Справочник / О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, С.Л. Пожидаев. – М.: Радио и связь, 1990. – 336 с.