



Федеральное агентство по образованию

Государственное образовательное учреждение
высшего профессионального образования

САМАРСКИЙ ГОСУДАРСТВЕННЫЙ ТЕХНИЧЕСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ

Кафедра "Электропривод и промышленная автоматика"

РАСЧЕТ ОДНОФАЗНЫХ УПРАВЛЯЕМЫХ ВЫПРЯМИТЕЛЕЙ

Задания и методические указания
по выполнению контрольных работ
по дисциплине «Силовая электроника»

САМАРА 2013 г.

Составители: КУЗНЕЦОВ П.К., СЕМАВИН В.И., ЧАБАНОВ Ю.А

УДК 621.314

Расчет однофазных управляемых выпрямителей Методические указания/ Самар. гос. техн. ун-т.;
Сост. Кузнецов П.К., Семавин В.И., Чабанов Ю.А. Самара, 2013. 27 с.

Методические указания по курсу "Силовая электроника" посвящено расчету однофазных управляемых выпрямителей с активно-индуктивной нагрузкой.

Рассчитано на студентов специальностей 140604 и других родственных специальностей заочного обучения.

Табл. 3. Библиогр.: 8 назв.

1 ЗАДАНИЕ

По курсу "Преобразовательная техника" для студентов специальности 140604 предусмотрена самостоятельная работа, посвященная расчету однофазных управляемых выпрямителей (УВ). Нагрузкой таких выпрямителей является обмотка возбуждения двигателя постоянного тока с независимым возбуждением (активно-индуктивная нагрузка). Задание на самостоятельную работу содержит пять вопросов и задачу.

Вопросы

- 1 Область применения УВ.
- 2 Варианты построения однофазных УВ. Достоинства и недостатки рассмотренных вариантов однофазных УВ.
- 3 Принципы построения систем импульсно-фазового управления.
- 4 Преимущества УВ перед другими преобразователями переменного напряжения в постоянное.
- 5 Недостатки УВ.

Задача

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

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

При подготовке к ответам на вопросы и к решению задачи рекомендуется воспользоваться литературой [1-3].

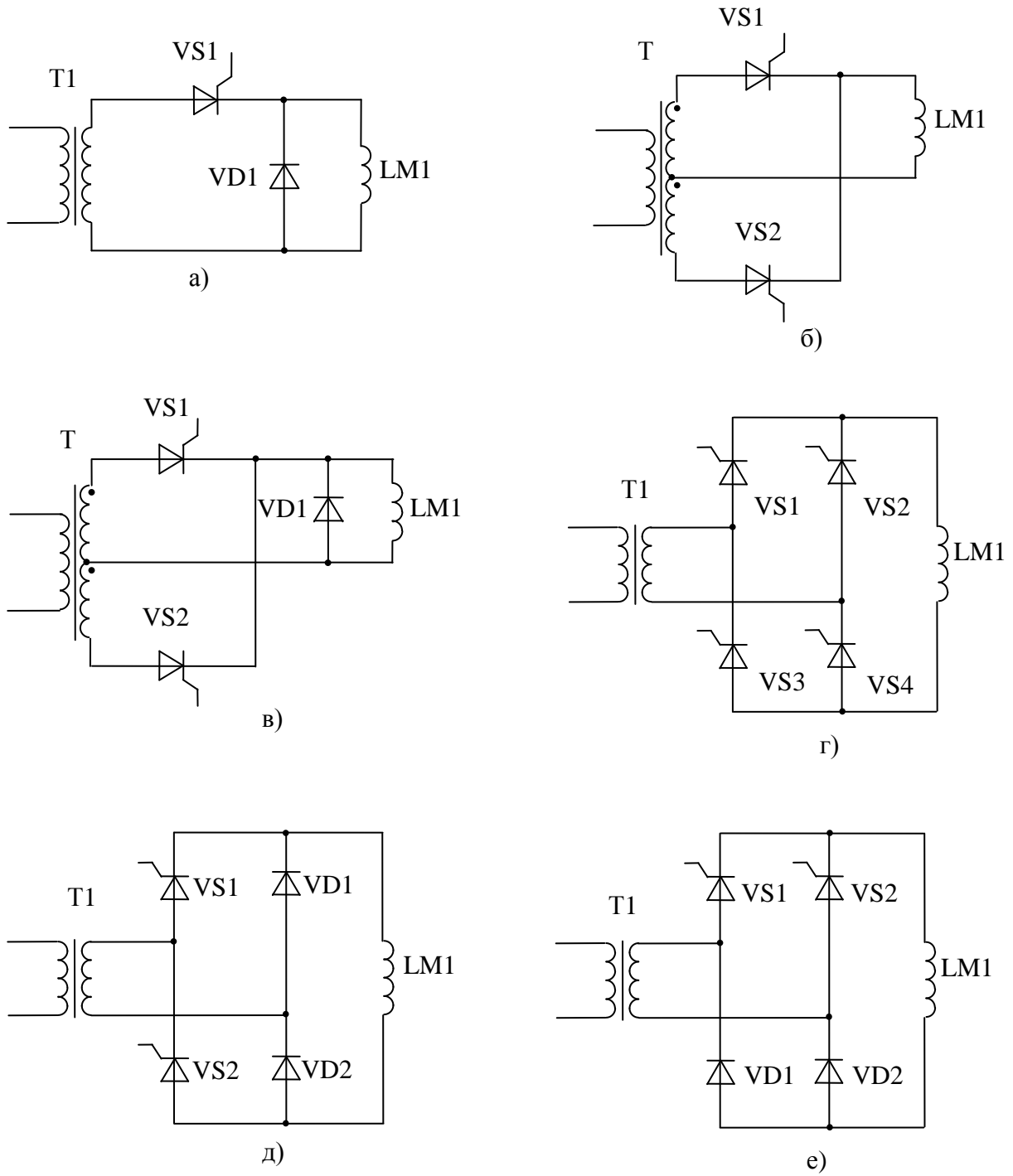
Ответы на вопросы должны быть четкими и конкретными. Ответы, переписанные целиком из учебных пособий или обходящие существо вопроса, будут рассматриваться как неудовлетворительные. При ответе на второй и третий вопросы должны быть приведены электрические принципиальные рассматриваемых управляемых выпрямителей и систем импульсно-фазового управления.

Варианты задания

Таблица 1

| № варианта | Вариант силовой схемы | Параметры обмотки возбуждения | | Диапазон регулирования тока возбуждения |
|---------------|-----------------------------|----------------------------------|----------|--|
| | | $U_{LM \text{ ном}}$ | R_{LM} | $I_{LM \text{ ном}}/I_{LM \text{ мин}}$ |
| | | [В] | [Ом] | |
| 1 | Рис. 1а | 110 | 30 | 2 |
| 2 | Рис. 1а | 110 | 35 | 2,5 |
| 3 | Рис. 1а | 110 | 40 | 3 |
| 4 | Рис. 1а | 110 | 45 | 3,5 |
| 5 | Рис. 1а | 110 | 20 | 4 |
| 6 | Рис. 1б | 220 | 25 | 2 |
| 7 | Рис. 1б | 220 | 30 | 3 |
| 8 | Рис. 1б | 220 | 35 | 4 |
| 9 | Рис. 1б | 110 | 40 | 5 |
| 10 | Рис. 1б | 110 | 45 | 6 |
| 11 | Рис. 1в | 220 | 22 | 3 |
| 12 | Рис. 1в | 220 | 27 | 4 |
| 13 | Рис. 1в | 220 | 32 | 5 |
| 14 | Рис. 1в | 110 | 40 | 6 |
| 15 | Рис. 1в | 110 | 45 | 7 |
| 16 | Рис. 1г | 220 | 26 | 2 |
| 17 | Рис. 1г | 220 | 33 | 3 |
| 18 | Рис. 1г | 220 | 38 | 4 |
| 19 | Рис. 1г | 110 | 25 | 5 |
| 20 | Рис. 1г | 110 | 30 | 6 |
| 21 | Рис. 1д | 220 | 20 | 3 |
| 22 | Рис. 1д | 220 | 24 | 4 |
| 23 | Рис. 1д | 220 | 27 | 5 |
| 24 | Рис. 1д | 110 | 22 | 6 |
| 25 | Рис. 1д | 110 | 19 | 7 |
| 26 | Рис. 1е | 220 | 26 | 2 |
| 27 | Рис. 1е | 220 | 29 | 3 |
| 28 | Рис. 1е | 220 | 30 | 4 |
| 29 | Рис. 1е | 110 | 21 | 5 |
| 30 | Рис. 1е | 110 | 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 однополупериодный УВ с нулевым диодом;
 б – однофазный УВ с нулевым выводом;
 в – однофазный УВ с нулевым выводом и нулевым диодом;
 г – однофазный симметричный мостовой УВ;
 д – однофазный несимметричный мостовой УВ;
 е – однофазный несимметричный мостовой УВ.

Рисунок 1 – Варианты схем однофазных УВ

При решении задачи необходимо:

а) начертить схему электрическую принципиальную заданного УВ (с учетом требований ГОСТа) и привести описание ее работы;

б) 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, t с – время, $f_c = 50$ Гц – частота сетевого напряжения);

в) описать назначение элементов схемы и работу УВ;

г) определить: действующее значение напряжения U_2 на вторичной обмотке силового трансформатора, требуемый коэффициент передачи 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;

д) 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 – $I_{VDd}(\alpha)$;

е) 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 большая (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.

Кроме того, УВ применяются в регулируемых источниках питания, в преобразователях частоты с автономными инверторами напряжения и тока для получения постоянного напряжения в звене постоянного тока и пр.

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

2.1 Силовые полупроводниковые вентили

Одним из важнейших параметров УВ является коэффициент полезного действия, который характеризуется отношением активной мощности, отдаваемой в нагрузку, к полной активной мощности, потребляемой выпрямителем от сети. Для увеличения коэффициента полезного действия необходимо уменьшать потери мощности в силовых регулирующих элементах, что достигается использованием ключевого режима работы этих элементов. В качестве регулирующих элементов в УВ используются полупроводниковые вентили – тиристоры и диоды.

При работе в ключевом режиме вентили могут находиться в двух состояниях – открытом и закрытом. В открытом состоянии падение напряжения на вентилях в 10^2 - 10^4 раз меньше, чем максимально допустимое напряжение в закрытом состоянии (например, в открытом состоянии среднее значение падения напряжения на тиристоре и диоде не более 1-2 В). Ток, протекающий через вентили в закрытом состоянии, в 10^4 - 10^5 раз меньше максимально допустимого тока в открытом состоянии. Это позволяет при анализе электромагнитных процессов в управляемом выпрямителе считать полупроводниковые вентили 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. Длительность управляющего импульса должна быть достаточной 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 отпираания тиристорov, включенных последовательно между источником переменного напряжения и нагрузкой. Для иллюстрации фазового способа рассмотрим работу однофазного УВ с активной нагрузкой (рис. 2).

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

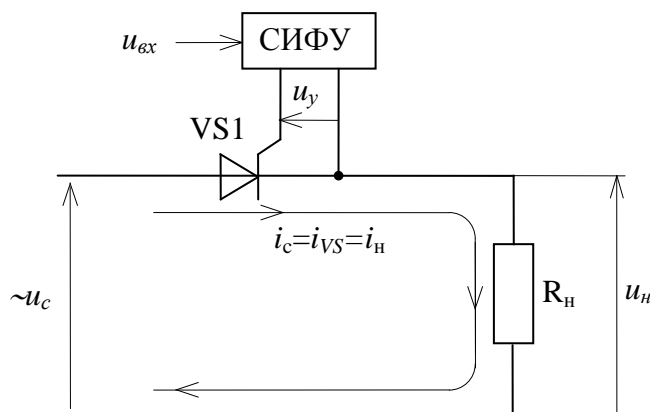


Рисунок 2 – Однофазный однополупериодный управляемый выпрямитель

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 $u_{вх}$ СИФУ. Частота импульсов должна быть равной частоте напряжения, прикладываемого к аноду тиристора, а длительность – достаточной для надежного отпирания тиристора.

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

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

$$u_c = U_m \sin \nu,$$

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 – $u_n(\nu)$, тока нагрузки – $i_n(\nu)$, и падения напряжения на тиристоре – $u_{VS}(\nu)$.

Рассмотрим работу управляемого выпрямителя на отдельных интервалах.

Интервал $0 \leq \nu < \alpha$

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

Интервал $\alpha \leq \nu < \pi$

При $\nu = \alpha$ на управляющий электрод тиристора подается управляющий импульс u_y и тиристор открывается. При этом ток анода тиристора $i_{VS} = i_n$ 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 $u_{VS}(\nu)$ практически равно нулю, напряжение на нагрузке практически равно сетевому напряжению – $u_n(\nu) \approx u_c(\nu)$, а ток нагрузки – $i_n(\nu) = u_n(\nu)/R_n$.

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

Интервал $\pi \leq \nu < 2\pi + \alpha$

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

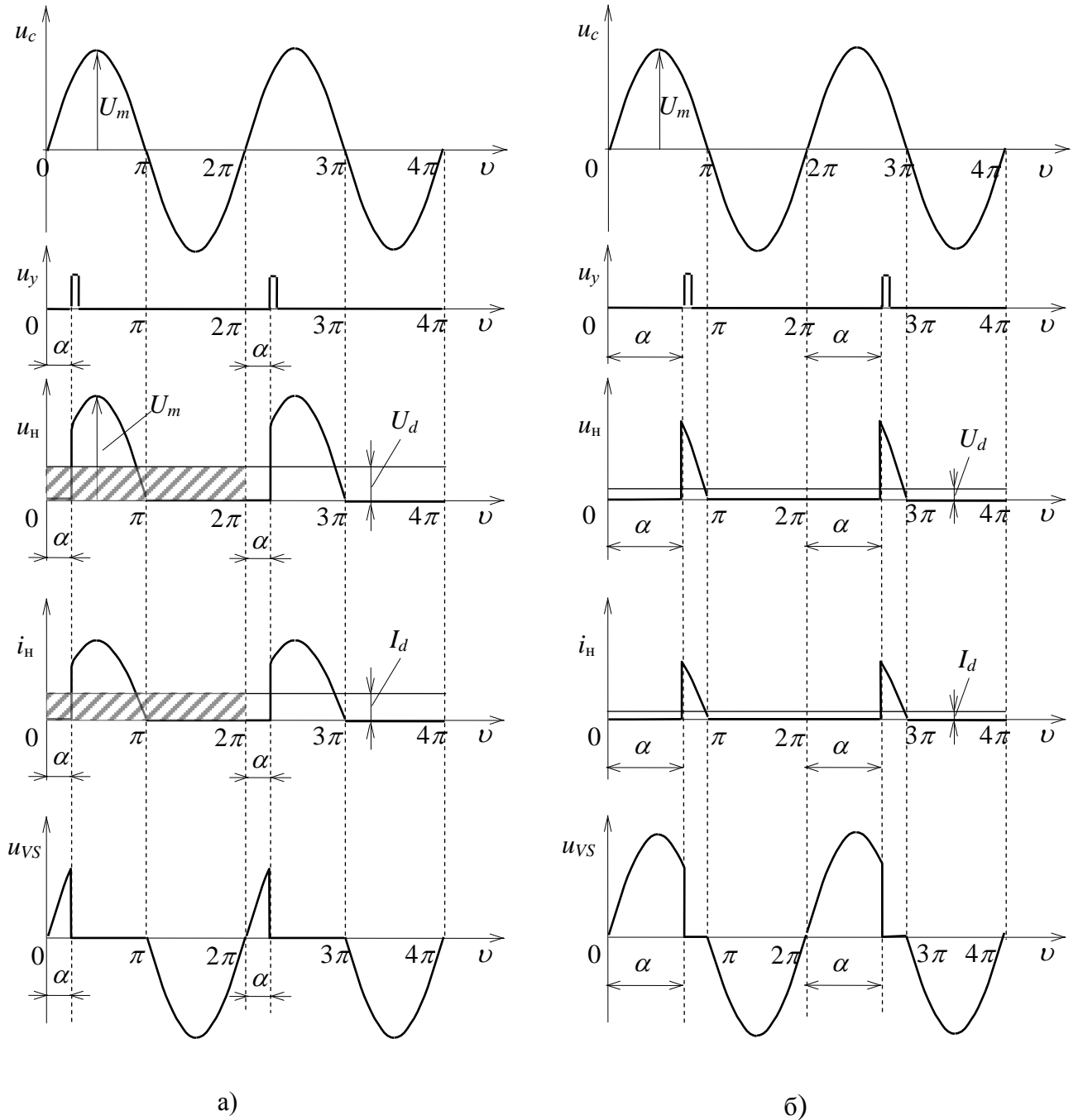


Рисунок 3 – Временные диаграммы к схеме рис. 2

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

На рис. 3б 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 $u_n(\alpha)$ при открытом тиристоре равно сетевому напряжению $u_c(\alpha)$ 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 (диаграмма 3 на рис. 3а). Высота полученного прямоугольника будет равна среднему (за период 2π) значению 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 $U_{d0} = \frac{\sqrt{2}U_c}{\pi} = 0,45U_c$ – 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 $0,45U_c \leq U_d \leq 0$ и уменьшается с увеличением угла регулирования. Последнее иллюстрируется значениями U_d на рис. 3а и 3б.

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.

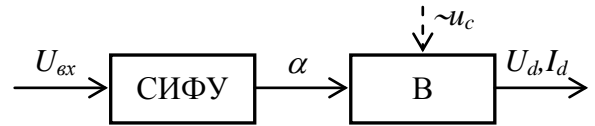


Рисунок 4 – Структурная схема УВ

На рис. 4 приведена структурная схема УВ, в которой В – силовые вентили.

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. При этом первая (основная) гармоника сетевого тока отстает от синусоидального сетевого напряжения приблизительно на угол α . Фазовый сдвиг между сетевым напряжением и током свидетельствует о том, что УВ потребляет из сети помимо активной мощности, равной $U_d I_d$, также реактивную мощность.

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

Для уменьшения отрицательного воздействия УВ на питающую сеть применяют следующие меры:

- для уменьшения влияния высших гармонических на входе УВ включают фильтры;
- для уменьшения потребляемой реактивной мощности к силовому 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 [8]. Так, например, в условных обозначениях обмоток трансформатора и обмотки независимого возбуждения 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 $u=0$) состояний вентиля, а также начальных значений токов и напряжений. Затем следует описывать работу схемы на отдельных интервалах угла u в радианах или в электрических градусах. Каждый из интервалов характеризуется неизменным состоянием (закрытом или открытом) вентиля. После изменения состояния одного из вентиля 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 индуктивностей. 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 (4π) 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_H/R_H) стремится к бесконечности.

3.2.1 Расчет параметров управляемых выпрямителей

Номинальный $I_{LM\text{ном}}$ и минимальный $I_{LM\text{мин}}$ средние значения токов обмотки возбуждения находятся из выражений:

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

$$I_{LM\text{мин}} = \frac{I_{LM\text{ном}}}{I_{LM\text{ном}} / I_{LM\text{мин}}}, \quad (4)$$

где $U_{LM\text{ном}}$, R_{LM} и $I_{LM\text{ном}}/I_{LM\text{мин}}$ выбираются из табл. 1 для заданного варианта задания.

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

Минимальный ток обмотки возбуждения $I_{LM \text{ мин}}$ формируется при максимальном значении угла регулирования $\alpha_{\text{макс}}$, которое для схем рис. 1а, 1в и 1е определяется из выражения

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

а для схем рис. 1б и 1г - из выражения:

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

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

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

Основные параметры управляемых выпрямителей

Таблица 2

| Параметры | Схемы управляемых выпрямителей | | |
|---|---|---|---|
| | Рис. 1а | Рис. 1б | Рис. 1в |
| Максимально возможный диапазон изменения угла регулирования | $0 \leq \alpha \leq \pi$ | $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ | $0 \leq \alpha \leq \pi$ |
| Среднее значение выпрямленного напряжения | $U_d = U_{d0} \frac{1 + \cos\alpha}{2}$ $U_{d0} = \frac{\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,45U_2$ | $U_d = U_{d0} \cos\alpha$ $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,9U_2$ | $U_d = U_{d0} \frac{1 + \cos\alpha}{2}$ $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,9U_2$ |
| 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 | $I_{Vsd} = I_d \frac{\pi - \alpha}{2\pi}$ | $I_{Vsd} = \frac{I_d}{2}$ | $I_{Vsd} = I_d \frac{\pi - \alpha}{2\pi}$ |
| Среднее значение тока диода | $I_{VDd} = I_d \frac{\pi + \alpha}{2\pi}$ | ————— | $I_{VDd} = I_d \frac{\alpha}{\pi}$ |
| Максимальное значение обратного напряжения на тиристоре | $U_{V\text{Смакс}} = 3,14U_{d0}$ | $U_{V\text{Смакс}} = 3,14U_{d0}$ | $U_{V\text{Смакс}} = 3,14U_{d0}$ |
| Максимальное значение обратного напряжения на диоде | $U_{V\text{Смакс}} = 3,14U_{d0}$ | ————— | $U_{V\text{Смакс}} = 1,17U_{d0}$ |

| Параметры | Схемы управляемых выпрямителей | |
|---|--|--|
| | Рис. 1г | Рис. 1д |
| Максимально возможный диапазон изменения угла регулирования | $0 \leq \alpha \leq \frac{\pi}{2}$ | $0 \leq \alpha \leq \pi$ |
| Среднее значение выпрямленного напряжения | $U_d = U_{d0} \cos \alpha$ $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,9U_2$ | $U_d = U_{d0} \frac{1 + \cos \alpha}{2}$ $U_{d0} = \frac{2\sqrt{2}U_2}{\pi} = 0,9U_2$ |
| Среднее значение выпрямленного тока | $I_d = \frac{U_d}{R_{LM}}$ | $I_d = \frac{U_d}{R_{LM}}$ |
| Среднее значение тока тиристора | $I_{Vsd} = \frac{I_d}{2}$ | $I_{Vsd} = I_d \frac{\pi - \alpha}{2\pi}$ |
| Среднее значение тока диода | _____ | $I_{VDd} = I_d \frac{\pi}{2\pi}$ |
| Максимальное значение обратного напряжения на тиристоре | $U_{V\text{Смакс}} = 3,14U_{d0}$ | $U_{V\text{Смакс}} = 3,14U_{d0}$ |
| Максимальное значение обратного напряжения на диоде | _____ | $U_{V\text{Смакс}} = 3,14U_{d0}$ |

Действующее значение напряжения U_2 на вторичной обмотке трансформатора находится из формулы для определения среднего значения выпрямленного напряжения $U_{cp0} = U_{RLном}$ (табл. 2, строка 2).

Коэффициент передачи трансформатора $k_{тр}$, необходимый для получения заданного номинального напряжения на обмотке возбуждения определяются из выражения:

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

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 вентиляей

Выбор полупроводниковых вентиляей осуществляется по максимально допустимым значениям тока и напряжения.

В паспортных данных на тиристоры указывается максимально допустимое среднее за период (предельное) значение тока $I_{п}$, 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., синусоидальном токе тиристора, максимально допустимой температуре полупроводниковой структуры и максимально допустимой температуре корпуса. При расчете предельного значения тока тиристора для приведенных в задании схем необходимо учитывать, несинусоидальность кривой тока тиристора, нестабильность сетевого напряжения и условия охлаждения тиристора.

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

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

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 $k_{\phi}=0,9$);

$k_{охл}$ – коэффициент, учитывающий условия охлаждения тиристорков (при стандартном радиаторе, воздушном охлаждении и скорости охлаждающего воздуха $V_{охл}=0$ $k_{охл} \approx 2,5$, а при $V_{охл}=12$ м/с $k_{охл} \approx 1$);

$I_{LMном}$ – определяется из выражения (3).

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

$$I_{п} \geq I_{пр} \quad (10)$$

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

$$U_{\text{пр}} = k_{\text{зи}} k_{\text{с2}} U_{\text{VSмакс}} \quad (11)$$

где $U_{\text{VSмакс}}$ – максимальное значение обратного напряжения на тиристоре (6 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 $k_{\text{с}}$ принимается равным 1,15, что соответствует увеличению напряжения на 15% от номинального значения);

По расчетному значению повторяющегося напряжения $U_{\text{пр}}$ находится паспортное значение повторяющегося напряжения U_{n} из условия:

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

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

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

Выбранный тиристор должен одновременно удовлетворять условиям (10, 12). Тип тиристорov выбирается из справочников [4,5,7].

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

Максимальное (предельное) значение напряжения, прикладываемого к диоду, определяется из (11) при подстановке $U_{\text{VDмакс}}$ вместо $U_{\text{VSмакс}}$ (строка 7 табл. 2).

Выбранные диоды должны 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;
- номинальное напряжение на обмотке возбуждения – $U_{LM\text{ ном}}=90\text{ В}$;
- сопротивление обмотки возбуждения – $R_{LM}=20\text{ Ом}$;
- диапазон регулирования тока возбуждения – $I_{LM\text{ ном}}/I_{LM\text{ мин}}=2$;
- действующее значение напряжения питающей сети – $U_1=220\text{ В}$;
- частота питающей сети – 50 Гц ;
- нестабильность сетевого напряжения – $-10\% \div +15\%$.

Требуется:

- привести описание работы схемы;
- рассчитать требуемое действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора, коэффициент передачи трансформатора, номинальный и минимальный токи обмотки возбуждения, диапазон изменения угла регулирования СИФУ, частоту пульсаций напряжения и тока нагрузки;
 - построить расчетные кривые зависимостей среднего значения напряжения на обмотке возбуждения от угла регулирования, тока обмотки возбуждения, тока тиристора и 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).

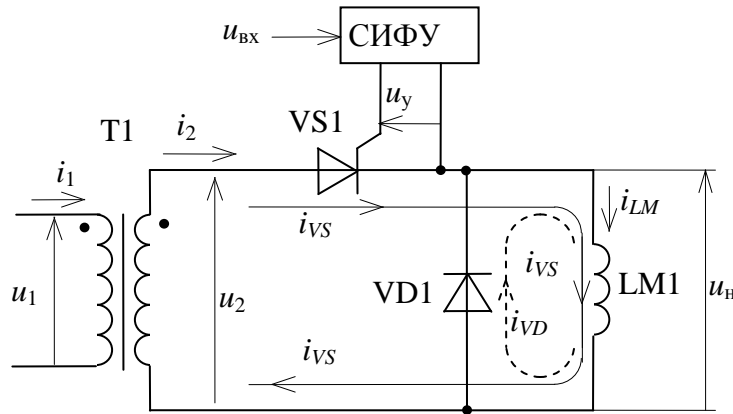


Рисунок 5 – Однофазная нереверсивная схема управляемого выпрямителя

Трансформатор Т1 служит для получения требуемого действующего значения переменного напряжения на вторичной обмотке, определяющее 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 для устранения отрицательных выбросов напряжения на обмотке возбуждения LM1 и катоде тиристора (относительно анода) в момент его запираения.

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;

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

С вторичной обмотки трансформатора снимается напряжение u_2 :

$$u_2 = k_{\text{тр}} u_1,$$

где $k_{\text{тр}} = \omega_2 / \omega_1 = u_2 / u_1$ – коэффициент передачи трансформатора (ω_1 и ω_2 – число витков соответственно первичной и вторичной обмоток трансформатора).

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

$$u_2 = U_{m2} \sin \nu = k_{mp} U_{m1} \sin \nu,$$

где u_2 – мгновенное значение напряжения на вторичной обмотке;

$U_{m2} = \sqrt{2}U_2$ – амплитудное (максимальное) значение напряжения на вторичной обмотке (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 $u_{вх}$ 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; $u_{VS}(\nu)$ – напряжение на аноде (относительно катода) тиристора и $u_{VD}(\nu)$ – напряжение на аноде (относительно катода) диода. В данной схеме нагрузка (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 $e_L = L \times di_L/dt$, препятствующая изменению тока.

Работы схемы описывается в установившемся режиме на отдельных интервалах.

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

За счет э.д.с. самоиндукции индуктивности 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} возрастает скачком от нуля до значения $u_2(\alpha)$. 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 LM1 $i_{LM}(v)=i_{VS}(v)$ протекает в направлении, указанном на схеме сплошной линией. На большей части интервала $\alpha \leq v < \pi$ ток $i_{LM}(v)$ возрастает во времени ($di/dt > 0$), в электромагнитном поле индуктивности обмотки возбуждения запасается энергия, а э.д.с. самоиндукции индуктивности обмотки

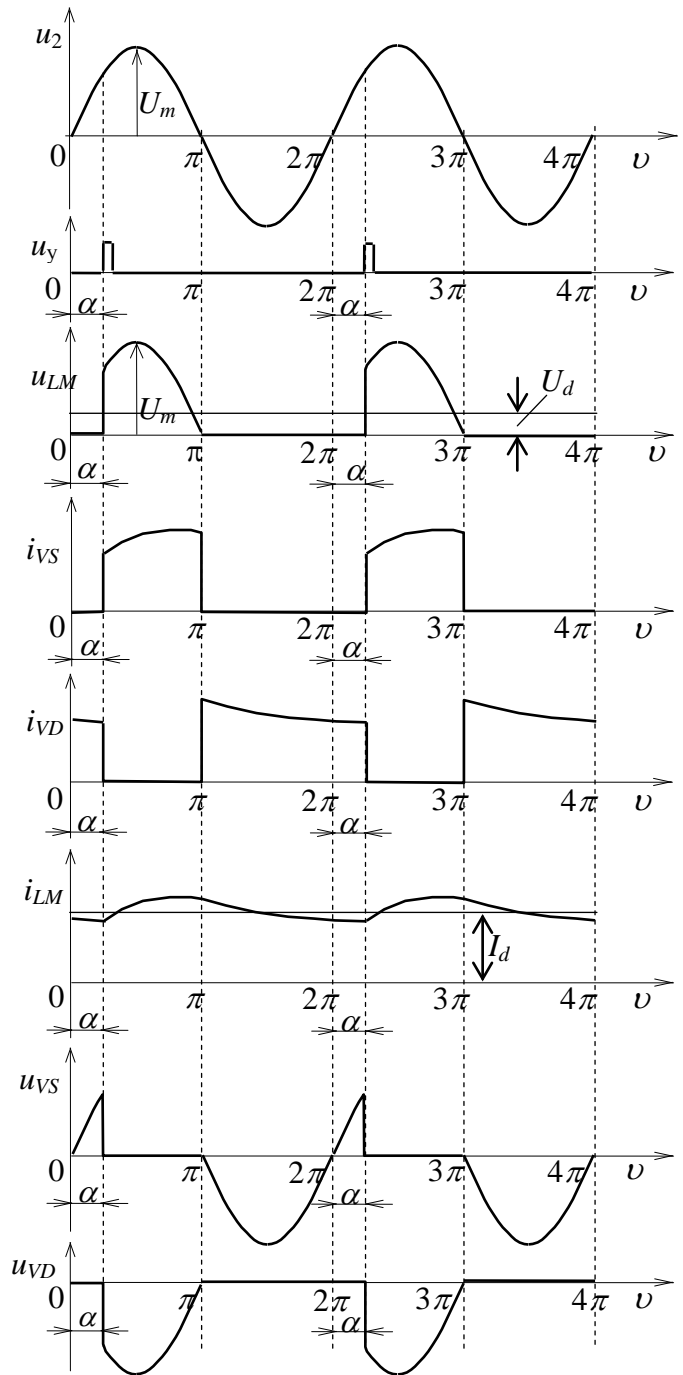


Рисунок 6 – Временные диаграммы к рис. 5

возбуждения направлена встречно напряжению на вторичной обмотке трансформатора u_2 .

При $\pi \approx \nu$ ток $i_{LM}(\nu)$ обмотки возбуждения LM1 начинает уменьшаться ($di/dt < 0$) 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 $\pi \leq \nu < 2\pi + \alpha$

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

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

Как видно из рис. 6 напряжение $u_d(\nu)$ на обмотке возбуждения LM1 имеет вид однополярных почти прямоугольных импульсов, частота которых равна частоте питающей сети. Величина напряжения $u_d(\nu)$ при открытом тиристоре VS1 равна напряжению $u_2(\nu)$ 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_{BX} на входе СИФУ приводит к изменению угла регулирования α и, следовательно, к изменению среднего за период напряжения U_{cp} на обмотке возбуждения LM1.

Как следует из диаграмм максимальное значение обратного напряжения на аноде тиристора равно амплитудному значению сетевого напряжения U_m .

4.3 Расчет параметров управляемого выпрямителя

Номинальный $I_{LM\text{ном}}$ и минимальный $I_{LM\text{мин}}$ средние значения токов обмотки возбуждения находятся из (3) и (4):

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

$$I_{LM\text{мин}} = \frac{I_{LM\text{ном}}}{I_{LM\text{ном}} / I_{LM\text{мин}}} = \frac{4,5\text{А}}{2} = 2,25\text{А}, \quad (15)$$

где $I_{LM\text{ном}} / I_{LM\text{мин}} = 2$ – заданный диапазон регулирования тока возбуждения.

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

$$\alpha_{\text{макс}} = \arccos\left(\frac{2I_{LM\text{мин}}}{I_{LM\text{ном}}} - 1\right) = \arccos\left(\frac{2}{2} - 1\right) = \arccos(0) = 1,57\text{рад}, \quad (16)$$

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

$$\Delta\alpha = \alpha_{\text{макс}} - \alpha_{\text{мин}} = 1,7\text{рад}, \quad (17)$$

где $\alpha_{\text{мин}}$ – минимальное значение угла регулирования СИФУ ($\alpha_{\text{мин}} = 0$ рад).

По формуле, приведенной во второй строке табл. 2 определим требуемое действующее значение напряжения на вторичной обмотке трансформатора исходя из величины номинального напряжения на обмотке возбуждения 90 В:

$$U_2 = \frac{U_{d0}}{0,45} = \frac{90\text{ В}}{0,45} = 199,93\text{ В}. \quad (18)$$

Коэффициент передачи трансформатора определим из выражения:

$$k_{\text{тр}} = \frac{\omega_2}{\omega_1} = \frac{U_2}{\eta \times K_{c1} U_c} = \frac{199,93\text{В}}{0,98 \times 0,9 \times 220\text{В}} = 1,03, \quad (19)$$

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

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

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

Кривые зависимостей средних значений напряжения на обмотке возбуждения $U_{cp}(\alpha)$ (регулирующая характеристика), тока обмотки возбуждения $I_{cp}(\alpha)$, тока тиристора $I_{VScp}(\alpha)$ и тока диода $I_{VDcp}(\alpha)$ от угла регулирования α рассчитываются по формулам таблицы 2 для заданной схемы рис. 1а:

$$U_d = 0,45U_2 \frac{1 + \cos\alpha}{2}; \quad I_d = \frac{U_d}{R_{LM}}; \quad I_{Vsd} = I_d \frac{180^\circ - \alpha}{360^\circ}; \quad I_{VDd} = I_d \frac{180^\circ + \alpha}{360^\circ}. \quad (20)$$

Расчеты проводились при максимальном диапазоне изменения угла регулирования $0 \leq \alpha \leq 180^\circ$ (π радиан соответствует 180°) с шагом 10° ($\pi/18$ радиан). Результаты расчетов сведены в таблицу 3. По результатам расчетов построены кривые указанных выше зависимостей, приведенные на рис. 7 и рис. 8.

Результаты расчетов

Таблица 3

| α | эл. гр. | 0 | 10 | 20 | 30 | ... | 170 | 180 |
|------------|---------|------|-------|-------|-------|-----|------|-----|
| U_{cp} | В | 90 | 89,32 | 87,29 | 83,97 | ... | 0,68 | 0 |
| I_{cp} | А | 4,5 | 4,47 | 4,36 | 4,2 | ... | 0,03 | 0 |
| I_{VScp} | А | 2,25 | 2,11 | 1,94 | 1,75 | ... | 0,00 | 0 |
| I_{VDcp} | А | 2,25 | 2,36 | 2,42 | 2,45 | ... | 0,03 | 0 |

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

$$I_{пр} = k_{zi} k_{\phi} k_{охл} I_{LM ном} = 1,3 \times 0,9 \times 2,5 \times 4,5 A = 13,2 A, \quad (21)$$

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 $V_{охл} = 0$);

$I_{LM ном} = 4,5 A$ – определяется из (14).

Максимальное значение напряжения на тиристоре определяется из выражения, приведенного в табл. 2 (строка 6):

$$U_{Vc макс} = 3,14 U_{d0} = 3,14 \times 0,45 \times U_2 = 3,14 \times 0,45 \times 200 B = 282,6 B, \quad (22)$$

где $U_{d0} = 0,45 \times U_2 = 90 B$ – среднее значение напряжения на обмотке возбуждения при $\alpha = 0$ (формула из табл.2 строка2).

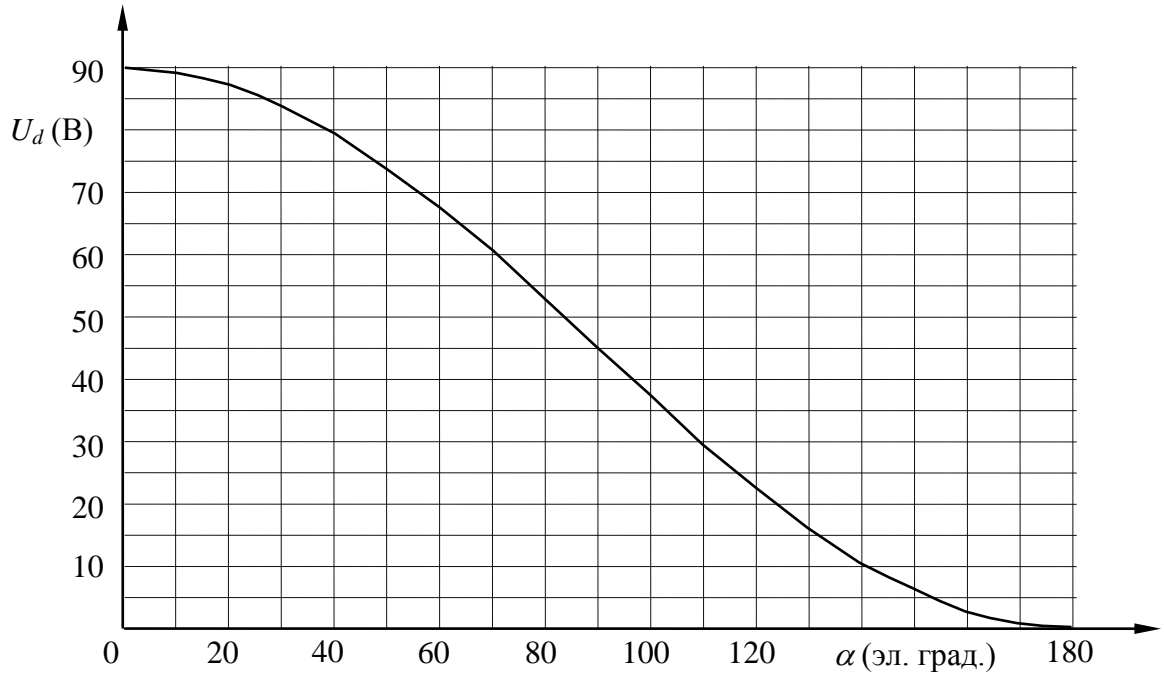


Рисунок 6 – Регулировочная характеристика управляемого выпрямителя

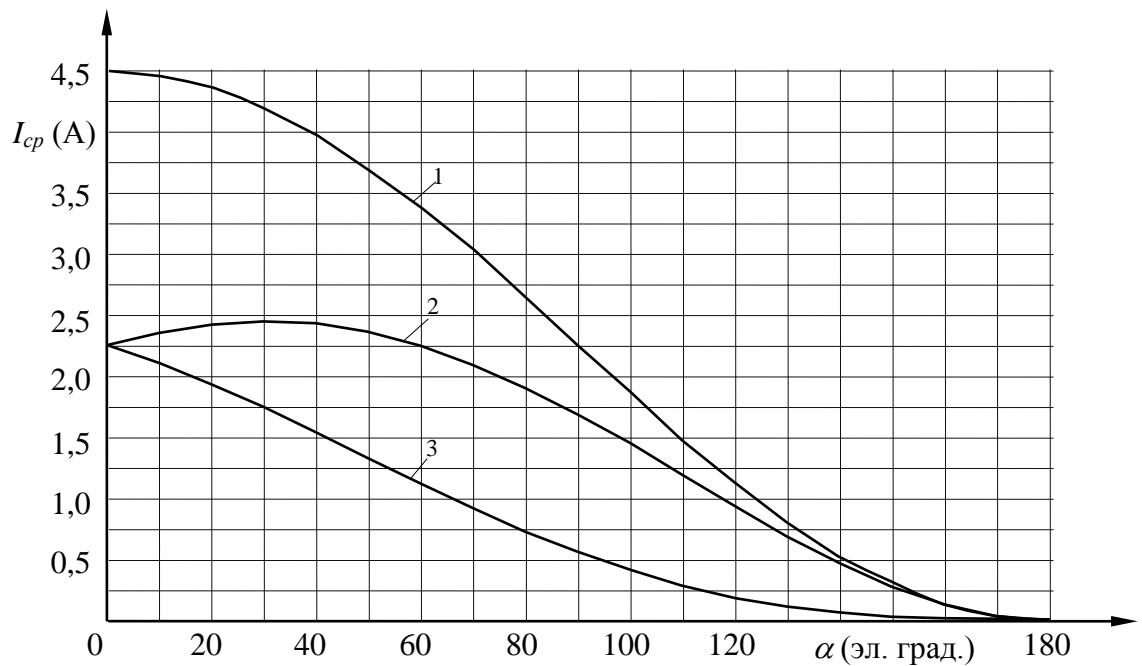


Рисунок 7 – Кривые зависимостей средних значений токов нагрузки (1), диода (2) и тиристора (3) от угла регулирования α

Расчетное значение повторяющегося напряжения U_n определяется из (11):

$$U_{np} = k_{zu} k_{c2} U_{d0} = 1,5 \times 1,15 \times 282,6 \text{ В} = 487,5 \text{ В} \quad (23)$$

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

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

Тиристор выбирается из условий (10, 12): $I_n \geq 13,2$ А и $U_n \geq 487,5$ В. Данным условиям удовлетворяет тиристор Т112-16 5-го класса, с максимально допустимым током – 16 А [4].

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, строка 7), равно предельному значению напряжения, прикладываемого к тиристор, и равно 487,5 В. Данным условиям удовлетворяет диод Д112-16-9 [6], допускающий обратное напряжение 540 В и максимальный ток 16А.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Забродин Ю.С. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1982. – 496 с.
2. Горбачев Г.Н., Чаплыгин Е.Е. Промышленная электроника: Учебник для вузов. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
3. Руденко В.С., Сенько В.И., Чиженко И.М. Основы преобразовательной техники. Учебник для вузов. – М.: Высш. школа, 1980. – 424 с.
4. Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Петухов В.М. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: Справочник. – М.: Радио и связь, 1987. – 576 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.
7. Тиристоры: Справочник /О.П. Григорьев, В.Я. Замятин, Б.В. Кондратьев, С.Л. Пожидаев, – М.: Радио и связь, 1990, – 272 с.
8. Усатенко С.Т., Каченюк Т.К., Терехова М.В. Выполнение электрических схем по ЕСКД: Справочник. М.: Изд. Стандартов, 1989, – 325 с.

ОГЛАВЛЕНИЕ

| | | |
|-----|---|----|
| 1 | Задание | 3 |
| 2 | Управляемые выпрямители | 7 |
| 2.1 | Силовые полупроводниковые вентили | 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 | 19 |
| 4 | Пример расчета однофазного управляемого выпрямителя | 19 |
| 4.1 | Задание к примеру | 19 |
| 4.2 | Описание работы управляемого выпрямителя | 17 |
| 4.3 | Расчет параметров управляемого выпрямителя | 24 |
| | Список использованных источников | 27 |