

## Установочная лекция по силовой электронике Часть 1

### 1. Изучить теоретический материал материал:

- В Моодл;

- В.Д. Кулик Полупроводниковые преобразователи, часть 1, Выпрямители, инверторы тока, ведомые сетью. Учебное пособие, С-Пб, 2005г., С-ПбГУРП., 87 стр.

- В.Д. Кулик Силовая электроника. Автономные инверторы, активные преобразователи., Учебное пособие, С-Пб, 2010г., С-ПбГУРП., 88 стр.

### 2.Перечень вопросов к зачету

#### Перечень вопросов к зачету

№ п/п	Формулировка вопросов
1	Силовые полупроводниковые приборы, их классификация.
2	Однополупериодный неуправляемый выпрямитель с активной и активно-индуктивной нагрузкой. Принцип действия, основные соотношения, временные диаграммы.
3	Однополупериодный неуправляемый выпрямитель с шунтирующим диодом и его временные диаграммы.
4	Однофазный мостовой выпрямитель с активной нагрузкой. Расчёт и характеристики.
5	Расчет и характеристики двухполупериодного однофазного выпрямителя с нулевым выводом трансформатора и активной нагрузкой.
6	Однофазный мостовой выпрямитель с активно-индуктивной нагрузкой. Расчет и характеристики.
7	Однофазный выпрямитель с нулевым выводом трансформатора и активно-индуктивной нагрузкой.
8	Однофазный двухполупериодный неуправляемый выпрямитель при активно-емкостной нагрузке.
9	Принцип действия и характеристики однофазного двухполупериодного управляемого выпрямителя на однооперационных тиристорах с RL-нагрузкой.
10	Принцип действия и характеристики двухполупериодного управляемого выпрямителя с RL-нагрузкой и противоЭДС.

11	Коммутационные процессы и внешние характеристики однофазного управляемого выпрямителя.
12	Принцип действия и характеристики однофазных полууправляемых выпрямителей.
13	Неуправляемый трехфазный выпрямитель с нулевым выводом трансформатора.
14	Принцип действия и расчет трехфазного мостового неуправляемого выпрямителя.
15	Принцип действия и расчет трехфазного мостового управляемого выпрямителя. Внешние характеристики.
16	Принцип действия и расчет трехфазных мостовых полууправляемых выпрямителей (несимметричный).

3. По курсу Силовая электроника предусмотрена контрольная работа, посвященная расчету однофазных управляемых выпрямителей.

### **Задание на контрольную работу по «Силовой электронике»**

#### Расчет однофазных управляемых выпрямителей.

Самостоятельная работа посвящена расчету однофазных управляемых выпрямителей (УВ), нагрузкой их является обмотка возбуждения двигателя постоянного тока (ДПТ) с независимым возбуждением (активно индуктивная нагрузка) и состоит из двух разделов:

- теоретическая часть (вопросы);

- практическая часть (задача).

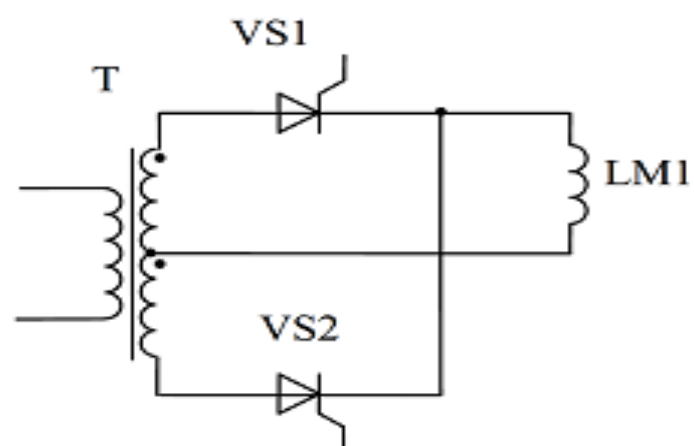
#### **Вопросы:**

1. Область применения УВ;
2. Варианты построения однофазных УВ. Достоинства и недостатки рассмотренных вариантов однофазных УВ;
3. Преимущества УВ перед другими преобразователями переменного напряжения в постоянное;
4. Недостатки УВ

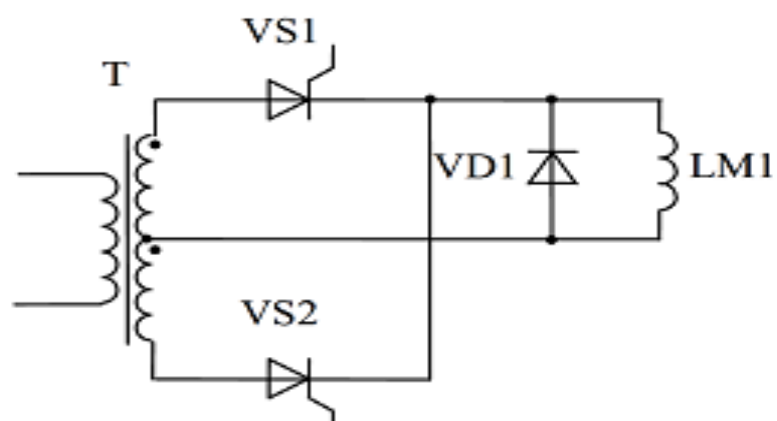
**Задача 1:** В таблице 1 приведены номера вариантов задачи, заданы:

- 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.

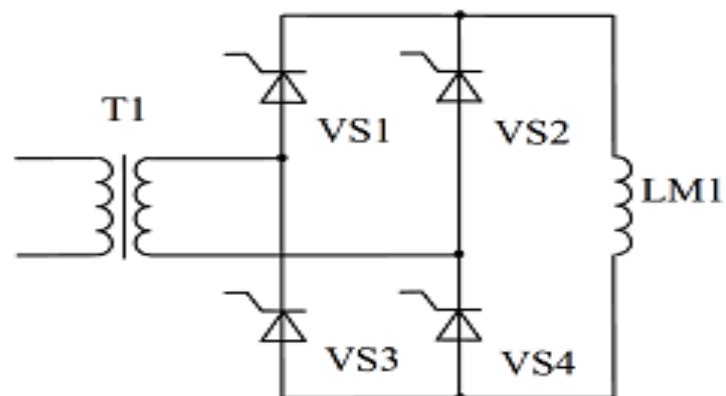
Ответы на вопросы должны быть четкими и конкретными. Ответы, переписанные целиком из учебных пособий или обходящие суть вопроса, будут рассматриваться как неудовлетворительные. При ответе на второй вопрос должны быть приведены схемы электрические принципиальные рассматриваемых УВ.



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

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 –  $-10\% + 15\%$ , а частота питающей сети –  $f_c=50$  Гц.

При решении задачи необходимо:

1. Начертить схему электрическую принципиальную заданного УВ (с учетом требований ГОСТа) и привести описание ее работы;
2. Выполнить расчёт параметров заданного УВ;
3. Построить совмещенные (по углу  $\nu$ ) временные диаграммы мгновенных значений напряжений: на первичной  $u_1(\nu)$  и вторичной (вторичных)  $u_2(\nu)$  обмотках трансформатора, на управляющих электродах тиристоров –  $u_{\nu}(\nu)$ , 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  $i_1(\nu)$  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);

4. Описать назначение элементов схемы и работу УВ;
5. Определить: действующее значение напряжения  $U_2$  на вторичной обмотке силового трансформатора, требуемый коэффициент трансформации трансформатора  $k_{tr}$ , номинальный и минимальный токи обмотки возбуждения –  $I_{LMном}$  и  $I_{LMмин}$ , диапазон изменения угла регулирования  $\Delta\alpha$ , частоту пульсаций напряжения и тока нагрузки;
6. Построить для максимального диапазона изменения угла регулирования  $\Delta\alpha$  кривые зависимостей от угла регулирования  $\alpha$ : 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 –  $I_{VDd}(\alpha)$ ;

7. Выбрать тиристоры и диоды.

## 4 МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ

### 4.1 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 силовой электронике (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  $\nu = 0$ ) 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 индуктивностей. Описание достаточно провести на одном периоде ( $2\pi$ ) 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  $\nu$  на интервале не менее двух периодов ( $2\pi$ ) 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.

#### 4.2 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:

Максимальный диапазон изменения угла регулирования СИФУ  $\Delta\alpha$ , необходимый для регулирования.

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

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

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

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	$U_{Vsd\text{макс}} = 3,14U_{d0}$	$U_{Vsd\text{макс}} = 3,14U_{d0}$	$U_{Vsd\text{макс}} = 3,14U_{d0}$
Максимальное значение обратного напряжения на диоде	—	$U_{VDd\text{макс}} = 1,17U_{d0}$	—

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:

$$k_{тр} = \frac{\omega_1}{\omega_2} = \frac{U_1 \eta k_{с1}}{U_2}, \quad (8)$$

где  $\omega_1$  и  $\omega_2$  – соответственно число витков первичной и вторичной обмоток трансформатора;  $\eta$  – коэффициент полезного действия трансформатора ( $\eta \approx 0,98$ );  $k_{с1}$  – коэффициент, учитывающий возможное понижение напряжения сети на 10% ( $k_{с1} = 0,9$ ).

#### 4.2.2 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:

$$I_{пр} = k_{з1} k_{ф} k_{охл} I_{LMном}, \quad (9)$$

где  $k_{з1}$  – коэффициент запаса по току, который исходя из надежности работы тиристора устанавливается равным  $1,25 \div 1,4$ ;

$k_f$  – коэффициент, учитывающий несинусоидальность кривой тока (для схем, приведенных в задании  $k_f = 0,9$ );

$k_{охл}$  – коэффициент, учитывающий условия охлаждения тиристорov (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  $I_n$  было не меньше  $I_{пр}$ .

$$I_n \geq I_{пр}. \quad (10)$$

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

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

где  $U_{VSмакс}$  – максимальное значение обратного напряжения на тиристоре (табл. 2);

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

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

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

$$U_n \geq U_{пр}. \quad (12)$$

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  $U_{\text{VDмакс}}$  вместо  $U_{\text{VSмакс}}$  (табл. 2).

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

**Задача 2.1** Рассчитать трехфазный мостовой выпрямитель, схема которого показана на рис.1.1. Исходные данные для расчета указаны в табл. 1.1. Изобразить график временных диаграмм токов и напряжений при работе выпрямителя на активную нагрузку. Определить: тип диодов, мощность трансформатора.

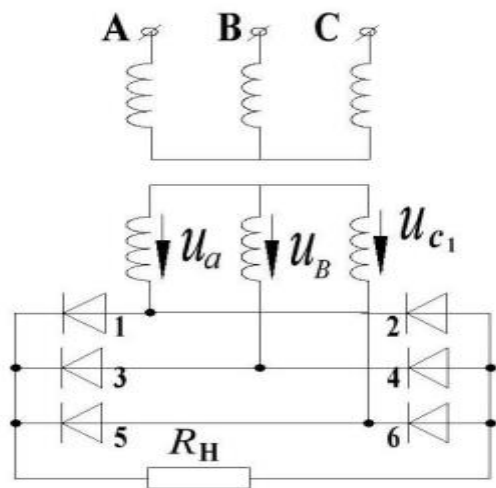


Рис.1.1 Трехфазный выпрямитель

Исходные данные Таблица 1.1

Вариант	$U_n$	$I_n$	$U_1$	$f$
	В	А	В	Гц
0	160	0,8	380	50
1	250	1	380	50
2	80	2	220	50
3	70	20	220	50
4	150	12	380	50
5	240	0,75	380	50
6	80	1,1	220	50
7	270	1,8	380	50
8	200	82,2	380	50
9	220	8	380	50

Примечание: В задаче №2 номер варианта выбираете по последней цифре номера зачетной книжки

## 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.