

Министерство образования и науки Российской Федерации  
Федеральное агентство по образованию  
Южно-Уральский государственный университет  
Кафедра «Электропривод и автоматизация  
промышленных установок»

621.314(07)  
Г322

М.В. Гельман

**ПРОЕКТИРОВАНИЕ ТИРИСТОРНЫХ  
ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ДЛЯ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ  
ПОСТОЯННОГО ТОКА**

Учебное пособие

Челябинск  
Издательский центр ЮУрГУ  
2012

УДК 621.314(07)  
Г322

*Одобрено  
учебно-методической комиссией энергетического факультета.*

*Рецензенты:*  
А.Г. Возмилов, Б.Ю. Сидоренко

Г322      Проектирование тиристорных преобразователей для электроприводов постоянного тока: учебное пособие / М.В. Гельман. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2012. – 91 с.

Учебное пособие предназначено для студентов высших учебных заведений при выполнении курсовой работы по курсам «Преобразовательная техника», «Силовая электроника», «Промышленная электроника», а также при дипломном проектировании студентами специальности 140604 – «Электропривод и автоматизация промышленных установок и технологических комплексов» и 140609 – «Электрооборудование летательных аппаратов».

В учебном пособии рассмотрены вопросы расчета параметров и выбора трансформаторов, тиристоров, предохранителей, реакторов, а также расчета и согласования характеристик. При расчете характеристик применяется ЭВМ. Предусмотрены элементы исследования.

УДК 621.314(07)

## 1. ВВЕДЕНИЕ

Учебное пособие "Проектирование тиристорных преобразователей для электроприводов постоянного тока" предназначено для студентов, обучающихся по специальности "Электропривод и автоматика технологических процессов и комплексов" и может быть использовано при выполнении курсовой работы по курсу "Электронные, микропроцессорные и преобразовательные устройства", а также при дипломном проектировании. Учебное пособие может быть полезно студентам других электротехнических специальностей при изучении курсов "Промышленная электроника" и "Преобразовательная техника".

Цель курсовой работы - закрепление и систематизация знаний в области важного раздела промышленной электроники - преобразовательной техники путем самостоятельного (при помощи консультанта) решения комплексной задачи проектирования тиристорного преобразователя для электропривода постоянного тока.

Учебное пособие предусматривает два типа курсовых работ: первый тип - проектирование однокомплектного рекуперирующего тиристорного преобразователя, второй - проектирование двухкомплектного реверсивного тиристорного преобразователя. Второй тип работы предназначен для студентов, обучающихся по программе с более углубленным изучением преобразовательной техники.

Для облегчения работы студентов приведен пример, который иллюстрирует применение всех методик расчета. С целью удобства усвоения материала пример разбит на части в соответствии с изложенными методиками расчета отдельных элементов. Для ускорения расчетов и закрепления навыков работы на ЭЦВМ расчет внешних, регулировочных и энергетических характеристик ориентирован на использование персональных компьютеров. Применение компьютеров позволяет студенту легко исследовать влияние различных факторов на вид характеристик.

Сравнение результатов расчетов, выполненных на ЭЦВМ более сложными, но более точными методами, с расчетами по приближенным формулам, позволяет студенту оценить степень точности приближенных методов и возможную область их применения.

Так как при выполнении курсовой работы приходится пользоваться различными литературными источниками, в которых приняты разные обозначения, то в учебном пособии приведены рекомендуемые общие обозначения. Именно они использованы в тексте. В связи с тем, что

учебное пособие издается на ряд лет, а изделия, выпускаемые промышленностью, непрерывно обновляются, студентам рекомендуется знакомиться также с новыми промышленными каталогами, в которых могут появиться более эффективные элементы.

## 2. ЗАДАНИЕ

2.1. Задание может быть двух типов: задание первого типа предусматривает проектирование однокомплектного рекуперирующего тиристорного преобразователя, задание второго типа - проектирование двухкомплектного реверсивного тиристорного преобразователя.

2.2. Задание первого типа - спроектировать однокомплектный рекуперирующий тиристорный преобразователь, работающий на якорь электродвигателя постоянного тока, предназначенного для привода подъемного механизма.

Механизм производит подъем груза и его спуск; при подъеме преобразователь работает в выпрямительном режиме, обеспечивая разгон двигателя и его вращение с требуемой частотой; торможение при подъеме осуществляется при запертом преобразователе за счет массы груза; при спуске двигатель разгоняется под действием массы груза (якорь вращается в другую сторону, двигатель переходит в генераторный режим, а преобразователь - в инверторный); после разгона двигателя до требуемой частоты вращения преобразователь в инверторном режиме пропускает заданный ток; торможение осуществляется резким увеличением инвертируемого тока.

Таким образом, преобразователь работает в режиме повторно-кратковременной нагрузки. График нагрузки для заданного варианта выбирается в соответствии с табл. 2.1 и рис. 2.1а.

2.3. Задание второго типа - спроектировать двухкомплектный реверсивный тиристорный преобразователь, работающий на якорь двигателя постоянного тока, предназначенного для привода тележки. Тележка осуществляет движение вперед-назад между двумя станциями. При движении вперед тележка загружена, при движении назад она идет порожняком. При движении вперед комплект вентиляей "Вперед" преобразователя работает в выпрямительном режиме, обеспечивая разгон тележки, а затем и равномерное движение. Торможение осуществляется при работе комплекта "Назад" в инверторном режиме.

При обратном движении тележки процессы происходят аналогично для соответствующих комплектов.

Режим нагрузки повторно-кратковременный; для заданного варианта график нагрузки определяется табл. 2.1 и рис. 2.1б.

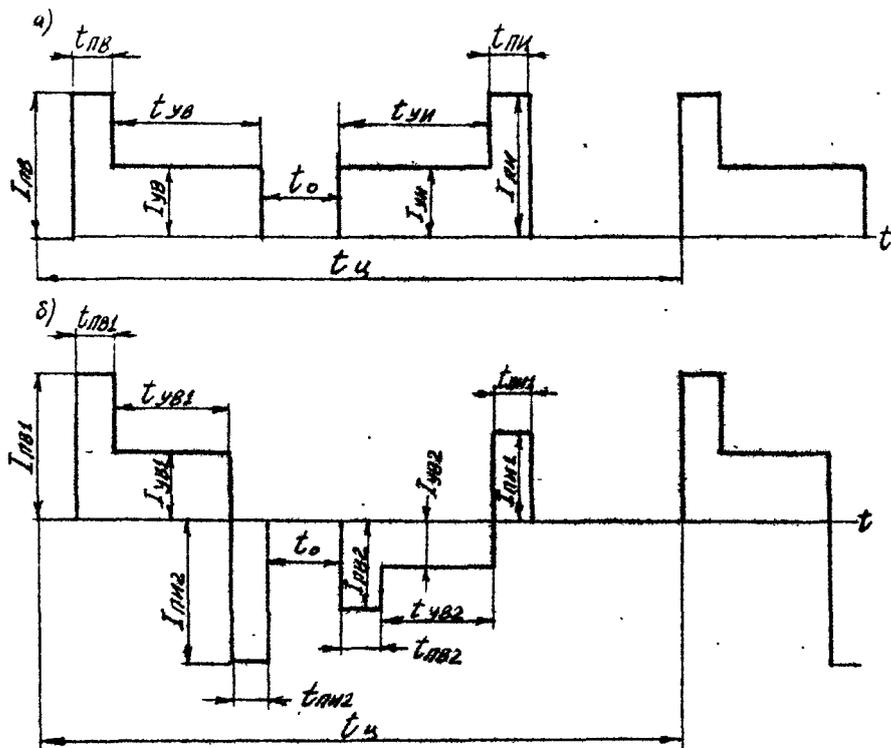


Рис.2.1. Графики нагрузки: а) для однокомплектного преобразователя; б) для двухкомплектного преобразователя;

$I_{пв}$ ,  $I_{пн}$  - токи перегрузки соответственно в выпрямительном и инверторном режимах;  $I_{ув}$ ,  $I_{ун}$  - установившиеся токи в выпрямительном и инверторном режимах;  $t_{пв}$ ,  $t_{пн}$  - длительности перегрузок в выпрямительном и инверторном режимах;  $t_{ув}$ ,  $t_{ун}$  - длительности установившихся нагрузок в выпрямительном и инверторном режимах;  $t_ц$  - время цикла;  $t_0$  - время паузы в нагрузке; индексы 1 относятся к комплекту "Вперед", а 2 - к комплекту "Назад" двухкомплектного преобразователя

Таблица 2.1

Номер вари- анта	Тип дви- гате- ля	P <sub>н</sub> , кВт	U <sub>н</sub> , В	График нагрузки					
				t <sub>ц</sub> , с	t <sub>п</sub> , с	t <sub>у</sub> , с	t <sub>о</sub> , с	I <sub>п</sub> /I <sub>н</sub>	I <sub>у</sub> /I <sub>н</sub>
1	Д 41	16	220	50	2.0	10	5	2.0	1.0
2	Д 808	37	220	50	1.5	12	6	2.5	0.9
3	Д 810	55	440	45	2.0	10	7	2.1	1.0
4	Д 812	75	220	45	2.0	12	5	2.0	0.8
5	Д 816	150	220	40	1.5	10	6	2.2	1.0
6	Д 818	186	440	45	2.0	11	7	2.0	1.1
7	Д 32	12	220	50	1.5	12	5	2.2	0.8
8	Д 806	22	220	45	1.5	10	6	2.0	0.9
9	Д 41	15	440	50	2.0	11	7	2.0	1.1
10	Д 41	16	220	40	2.0	9	5	2.0	0.8
11	Д 806	22	220	50	2.0	12	6	2.4	0.9
12	Д 806	32	220	40	1.5	10	7	2.1	0.9
13	Д 808	37	220	50	2.5	11	5	2.0	0.8
14	Д 808	37	440	50	2.0	12	6	2.1	0.9
15	Д 810	55	220	40	1.5	9	7	2.3	1.0
16	Д 808	47	220	50	2.0	10	5	2.0	0.9
17	Д 810	55	440	45	2.0	9	5	2.5	0.9
18	Д 810	55	220	50	2.5	10	5	2.0	1.1
19	Д 812	75	220	45	2.0	10	7	2.1	1.0
20	Д 812	70	440	45	2.0	12	5	2.2	1.0
21	Д 814	110	220	40	2.5	10	6	2.0	0.9
22	Д 814	110	440	45	2.0	11	7	2.0	1.0
23	Д 816	150	220	50	1.5	10	6	2.0	1.0
24	Д 816	150	440	45	1.5	10	5	2.0	1.1
25	Д 818	185	220	50	2.5	10	6	2.5	0.9
26	Д 818	185	440	50	1.5	12	6	1.9	0.9
27	Д 32	12	220	45	1.5	10	7	2.2	0.8
28	Д 806	12	220	50	2.0	10	5	1.9	1.0
29	Д 812	75	220	45	1.5	9	7	2.0	0.8
30	Д 814	110	440	40	1.0	9	5	2.0	0.8
31	Д 41	16	220	50	1.5	10	6	2.5	0.8
32	Д 808	37	440	40	1.5	10	5	2.0	0.9
33	Д 810	55	220	50	1.0	10	7	2.2	0.8
34	Д 812	70	440	50	2.0	12	5	2.0	0.9
35	Д 816	150	220	40	1.5	10	5	2.0	0.8
36	Д 818	185	440	50	2.5	10	7	2.0	0.9
37	Д 32	12	220	45	2.0	10	6	2.4	0.8
38	Д 806	32	220	50	1.0	10	5	2.0	0.9
39	Д 808	37	220	40	1.5	8	5	2.4	0.8
40	Д 808	37	440	45	2.0	9	5	2.0	0.9
41	Д 810	55	220	50	2.0	10	6	2.0	1.0
42	Д 812	75	220	50	1.5	9	5	2.0	0.7
43	Д 812	70	440	45	2.0	10	5	2.0	0.8
44	Д 814	110	220	45	1.5	11	6	2.4	0.8
45	Д 814	110	440	45	2.0	10	5	1.9	0.9
46	Д 810	55	440	50	1.5	10	6	2.0	0.9

Номер варианта	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$U_H$ , В	График нагрузки					
				$t_{ц'}$ с	$t_{п'}$ с	$t_{у'}$ с	$t_{о'}$ с	$I_{п'}/I_H$	$I_{у'}/I_H$
47	Д 808	47	220	40	1.5	9	5	2.3	0.9
48	Д 812	75	220	50	2.0	10	5	2.0	0.8
49	Д 816	150	440	45	2.0	10	6	1.9	0.8
50	Д 818	185	220	50	2.0	11	7	2.0	0.8

## Примечания:

1. Для упрощения расчетов принято:  $I_{пв} = I_{пи} = I_{п}; I_{ув} = I_{уи} = I_{у}; I_{пв1} = I_{пи2} = I_{п}; I_{ув1} = I_{у}; I_{пв2} = I_{пи1} = 0,6I_{п}; I_{у2} = 0,6I_{у}$ .  
 $t_{пв} = t_{пи} = t_{п}; t_{пв1} = t_{пв2} = t_{пи1} = t_{пи2} = t_{п};$   
 $t_{ув} = t_{уи} = t_{у}; t_{ув1} = t_{ув2} = t_{у}$ . Токи  $I_{п}, I_{у}$  заданы относительно номинального тока двигателя  $I_H$ .

2. Для нечетных вариантов принять опорное напряжение в системе управления линейным (пилообразным), для четных - косинусоидальным.

Перегрузки при разгоне (пуске) и торможении предусмотрены для ускорения этих процессов. Токи при движении назад меньше, т.к. тележка движется порожняком.

2.4. Тип двигателя, его номинальная мощность  $P_H$  и номинальное напряжение  $U_H$  приведены в табл. 2.1, а его параметры - номинальный ток  $I_H$ , сопротивление якорной цепи  $r_{я}$ , индуктивность якорной цепи  $L_{я}$  и номинальная частота вращения  $n$  - в табл. 2.2 [1].

2.5. Проектирование преобразователя выполнить при следующих технических условиях:

- номинальное линейное напряжение сети  $U_{сн} = 380$  В;
- колебания напряжения сети  $\pm 10\%$ ;
- номинальное напряжение на двигателе должно быть обеспечено при установившемся токе нагрузки  $I_{у}$  и допустимых колебаниях напряжения сети;
- схема выпрямления - трехфазная мостовая;
- коэффициент пульсаций тока  $q$  при токе установившейся нагрузки  $I_{у}$  не более 2%;
- температура окружающей среды  $T_a = +40^{\circ}$  С; охлаждение

воздушное (естественное и принудительное);

ж) амплитуда опорного напряжения в системе импульсно-фазового управления 10 В.

Таблица 2.2

Номер по порядку	Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$U_H$ , В	$I_H$ , А	$r_{я}$ , Ом	$L_{я}$ , мГн	$n$ , об/мин
1	Д 32	12	220	65	0,2650	13,1	740
2	Д 41	16	220	86	0,1610	10,9	670
3	Д 41	15	440	40	0,6720	45,3	695
4	Д 806	22	220	116	0,1140	8,56	635
5	Д 806	32	220	165	0,0532	3,9	980
6	Д 808	37	220	192	0,0593	5,81	565
7	Д 808	47	220	240	0,0348	3,41	770
8	Д 808	37	440	96	0,2170	23,2	565
9	Д 810	55	220	280	0,0388	4,17	540
10	Д 810	55	440	140	0,1540	16,4	550
11	Д 812	75	220	380	0,0239	3,32	500
12	Д 812	70	440	176	0,1030	4,0	510
13	Д 814	110	220	550	0,0147	2,39	490
14	Д 814	110	440	274	0,0572	9,39	490
15	Д 816	150	220	740	0,0099	1,81	470
16	Д 816	150	440	370	0,0370	7,1	480
17	Д 818	185	220	920	0,0076	1,56	440
18	Д 818	185	440	460	0,0293	6,29	440

### 3. СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

3.1. Выбор силового трансформатора.

3.1.1. Расчет параметров и выбор силового трансформатора.

3.1.2. Проверка выбранного силового трансформатора.

3.2. Выбор элементов вентильной части преобразователя.

3.2.1. Предварительный выбор тиристоров.

3.2.2. Проверка тиристоров по нагреву и уточнения выбора тиристоров.

3.2.3. Проверка тиристоров на токи короткого замыкания и выбор предохранителей.

3.3. Выбор сглаживающего реактора.

3.4. Расчет и исследование характеристик преобразователя.

3.4.1. Расчет и построение внешних характеристик при номинальном напряжении сети для пяти значений угла управления  $\alpha$

(при помощи ЭЦВМ). Расчет и построение внешних характеристик приближенным способом (для одного значения  $\alpha$ ).

3.4.2. Расчет и построение ограничительной характеристики с помощью ЭЦВМ и приближенным способом.

3.4.3. Расчет и построение регулировочных характеристик преобразователя при номинальном напряжении сети для  $I_d = I_{d \min}$ ,  $I_d = I_y$ ,  $I_d = I_{II}$  и  $I_d = I_{d \text{ грmax}}$ .

3.4.4. Расчет и построение энергетических характеристик в функции напряжения на двигателе  $U$  (при помощи ЭЦВМ). Рассчитываются зависимости коэффициента несинусоидальности тока  $\nu$ ,  $\cos \phi$ , коэффициента мощности  $\chi$  и КПД  $\eta$  при токе  $I_y$  и номинальном напряжении сети.

3.4.5. Расчет и построение энергетических характеристик в функции тока двигателя  $I$  при номинальном напряжении сети. Рассчитываются зависимости для  $\nu$ ,  $\cos \phi$ ,  $\chi$  и  $\eta$  при двух значениях угла управления.

3.4.6. Анализ вида характеристик и исследование влияния на характеристики различных факторов (глубины регулирования, тока нагрузки, индуктивности рассеяния трансформатора, индуктивности в цепи якоря, напряжения сети и т.д.). Круг исследуемых факторов определяется преподавателем индивидуально для каждого студента.

3.5. Расчет и построение регулировочных характеристик системы управления и преобразователя вместе с системой управления. Выбор начального угла управления  $\alpha_0$  и согласование характеристик для двухкомплектного преобразователя.

3.5.1. Выбор угла  $\alpha_0$  по регулировочным характеристикам преобразователя.

3.5.2. Расчет и построение регулировочной характеристики системы управления и регулировочных характеристик преобразователя вместе с системой управления для  $I_d = I_{d \min}$ ,  $I_d = I_{d \text{ гр.max}}$ ,  $I_d = I_y$  и  $I_d = I_{II}$ .

3.5.3. Исследование влияния выбора угла  $\alpha_0$  на согласование регулировочных характеристик комплектов двухкомплектного преобразователя.

3.6. Построение временных диаграмм для вторичных ЭДС  $e_2$ , вторичных напряжений  $u_2$ , вторичного тока  $i_2$ , выпрямленного напряжения  $u_d$ , выпрямленного тока  $i_d$ , напряжения на вентиле  $u_B$ , анодного тока  $i_a$  при  $I = I_y$ , номинальном напряжении сети и угле  $\alpha$ , соответствующем  $0,5 U_H$  для нечетных вариантов и  $-0,5 U_H$  для четных.

- 3.7. Выполнение принципиальной электрической схемы.  
 3.8. Составление спецификации.  
 3.9. Заключение. Оценка соответствия разработанного преобразователя требованиям задания. Составление таблицы энергетических показателей для режима установившейся нагрузки.

#### 4. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОР СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

4.1. Выбор трансформатора производится по расчетным значениям первичного и вторичного токов ( $I_1$ ,  $I_2$ ), фазных напряжений ( $U_1$ ,  $U_2$ ) и типовой мощности  $S_T$ .

4.2. Трансформатор совместно с преобразователем должен обеспечивать номинальное значение напряжения на якоре двигателя при допустимых колебаниях напряжения сети и заданном установившемся токе нагрузки  $I_y$ . Поэтому вторичное напряжение силового трансформатора рассчитывается для минимального напряжения сети  $U_{o\min}$ . Расчетное значение фазного напряжения вторичной обмотки трансформатора [8]

$$U_2 = \frac{K_R}{K_U K_{o\min}} U_H, \quad (4.1)$$

где  $K_R$  - коэффициент, учитывающий падение напряжения за счет коммутации и активных сопротивлений трансформатора, вентилей, сглаживающего реактора; предварительно

$$K_R = 1,05;$$

$K_U$  - коэффициент схемы (для трехфазной мостовой схемы  $K_U = 2,34$ );

$K_{o\min}$  - коэффициент, учитывающий допустимое понижение напряжения сети до  $U_{o\min}$ .

$$K_{o\min} = \frac{U_{o\min}}{U_{oH}}, \quad (4.2)$$

В каталогах на трансформаторы обычно указывается линейное вторичное напряжение  $U_{2л} = \sqrt{3} U_2$ . Тогда расчетный коэффициент трансформации при схеме соединения трансформатора "звезда-звезда"

$$K_T = \frac{U_{1Л}}{U_{2Л}}. \quad (4.3)$$

4.3. Расчетное значение тока вторичной обмотки при токе нагрузки  $I_d$

$$I_2 = K_I I_d, \quad (4.4)$$

где  $K_I$  - коэффициент схемы, характеризующий отношение токов  $I_2/I_d$  в идеальном выпрямителе при  $x_d = \infty$  (для трехфазной мостовой

$$K_I = \sqrt{\frac{2}{3}}).$$

При расчете токов можно предварительно принять, что номинальный ток выпрямителя  $I_d$  равен установившемуся току  $I_y$ .

4.4. Расчетное значение тока первичной обмотки

$$I_1 = \frac{I_2}{K_T}. \quad (4.5)$$

4.5. Расчетное значение типовой мощности трансформатора

$$S_T = \frac{3(U_1 I_1 + U_2 I_2)}{2}. \quad (4.6)$$

4.6. По расчетным данным с помощью каталогов [19, 20,] или Приложения III выбирается силовой трансформатор, имеющий параметры, удовлетворяющие условиям:

$$U_{1ЛН} = U_{сн}; S_{тн} > S_T; U_{2Н} > U_2; I_{2Н} > I_2. \quad (4.7)$$

Для дальнейших расчетов должны быть известны также следующие параметры трансформатора:

- потери холостого хода  $P_{хх}$  при  $U_{сн}$ ;
- потери короткого замыкания  $P_{кз}$  при  $I_{1Н}$ ;
- напряжение короткого замыкания  $u_k$  %;
- ток холостого хода  $I_{хх}$  %;
- величина и длительность допустимых перегрузок.

4.7. Пример расчета.

4.7.1. В соответствии с вариантом 00 задан двигатель с параметрами, приведенными в табл. 4.1. и требуется спроектировать однокомплектный рекуперирующий тиристорный преобразователь.

Таблица 4.1

Тип двигателя	$P_H$ , кВт	$U_H$ , В	$I_H$ , А	$r_{Я}$ , Ом	$L_{Я}$ , мГн	$n$ , об/мин
Д 816	150	220	740	0,0099	1,81	470

## 4.7.2. Задан график нагрузки (табл. 4.2 и рис. 2.1 а)

Таблица 4.2

Номер варианта	$t_{Ц}$ , с	$t_{П}$ , с	$t_{У}$ , с	$t_{О}$ , с	$I_{П}/I_H$	$I_{У}/I_H$
00	50	2	10	6	2,0	0,8

4.7.3. Расчетные вторичные напряжения трансформатора (фазное и линейное) в соответствии с формулой (4.1)

$$U_2 = \frac{K_R U_H}{2,34 K_o \min} = \frac{1,05 \cdot 220}{2,34 \cdot 0,9} = 109 \text{ В;}$$

$$U_{2Л} = \sqrt{3} \cdot 109 = 188,6 \text{ В.}$$

## 4.7.4. Установившийся ток нагрузки

$$I_{У} = 740 \cdot 0,8 = 592 \text{ А.}$$

4.7.5. Расчетный вторичный ток трансформатора при токе нагрузки  $I_{У}$  в соответствии с формулой (4.4)

$$I_2 = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot 592 = 483 \text{ А.}$$

#### 4.7.6. Расчетный коэффициент трансформации

$$K_T = \frac{U_{CH}}{U_{2Л}} = \frac{380}{188,6} = 2,02.$$

#### 4.7.7. Расчетный первичный ток трансформатора

$$I_1 = \frac{I_2}{K_T} = \frac{483}{2,02} = 239 \text{ А.}$$

#### 4.7.8. Расчетная типовая мощность трансформатора согласно (4.6)

$$S = \frac{3(U_1 I_1 + U_2 I_2)}{2} = \frac{3(220 \cdot 239 + 109 \cdot 483)10^{-3}}{2} = 158 \text{ кВт.}$$

4.7.9. Выбираем по каталогу или Приложению III трансформатор типа ТСЗПМ-200/0,7 с параметрами, приведенными в табл. 4.3.

Таблица 4.3

$S_{ТН}$ , кВА	$U_{1ЛН}$ , В	$U_{2ЛН}$ , В	$I_{2Н}$ , А	$u_k$ , %	$I_{хх}$ , %	$P_{хх}$ , Вт	$P_{кз}$ , Вт
182,5	380	205	514	5,5	1,5	800	3100

Допустимые перегрузки в соответствии с примечанием I в Приложении III,

4.7.10. Из сопоставления табл. 4.3 и предыдущего расчета видно, что  $U_{1ЛН} = U_{CH}$ ;  $S_{ТН} > S_T$ ;  $U_{2ЛН} > U_{2Л}$ ;  $I_{2Н} > I_2$ .

Таким образом, предварительно можно сделать вывод, что трансформатор выбран правильно. Однако необходимо еще выполнить дополнительную проверку.

## 5. ПРОВЕРКА ВЫБРАННОГО ТРАНСФОРМАТОРА

5.1. При проверке трансформатора необходимо выяснить,

обеспечивает ли он нужное напряжение на выходе выпрямителя, выдерживает ли заданные перегрузки и удовлетворяет ли условиям допустимости нагрева.

5.2. Зная потери и напряжение короткого замыкания трансформатора, можно найти [8] активное, полное и индуктивное сопротивление рассеяния фазы трансформатора, приведенные ко вторичной стороне. Активное, полное и индуктивное сопротивления рассеяния фазы трансформатора, приведенные ко вторичной стороне:

$$r_a = \frac{P_{кз}}{3 I_{2H}^2} . \quad (5.1)$$

$$Z_a = \frac{U_k \% \cdot U_{2H}}{100 I_{2H}} , \quad (5.2)$$

$$X_a = \sqrt{Z_a^2 - r_a^2} . \quad (5.3)$$

5.3. Выпрямленное напряжение на зажимах двигателя при угле управления  $\alpha = 0$  с учетом максимального понижения напряжения сети, падения напряжения на трансформаторе, вентиллях и сглаживающем реакторе (для трехфазной мостовой схемы)

$$U = 2,34 K_c \min U_{2H} - 2U_{T(то)} - \left(\frac{3}{\pi} X_a + 2r_a + r_L + 2r_T\right) I_d , \quad (5.4)$$

Здесь  $U_{T(то)}$ ,  $r_T$  - пороговое напряжение и дифференциальное сопротивление тиристора в открытом состоянии;

$r_L$  - активное сопротивление сглаживающего реактора.

При расчете вместо  $I_d$  следует подставить значение  $I_y$ . Поскольку при первичном расчете трансформатора еще не выбраны тиристоры и сглаживающий реактор, целесообразно воспользоваться упрощенной формулой:

$$U = 2,34 K_c \min U_{2H} - 2U_{TM} - \left(\frac{3}{\pi} X_a + 2r_a\right) I_y , \quad (5.5)$$

где  $U_{TM}$  - импульсное напряжение в открытом состоянии тиристора (можно предварительно принять  $U_{TM} = 2B$ ).

Формула (5.5) не учитывает падения напряжения на активном сопротивлении сглаживающего реактора, поэтому рассчитанное напряжение должно быть выше  $U_H$  хотя бы на 3...15 В, причем требуемый запас растет с уменьшением мощности и ростом номинального напряжения.

5.4. Если рассчитанное напряжение окажется недостаточным, то нужно выбрать трансформатор большей мощности (или с большим напряжением) и повторить проверку.

5.5. После этого необходимо также проверить, выдерживает ли трансформатор предусмотренные перегрузки. Допустимые перегрузки для трансформаторов указаны в Приложении I. Вторичный ток трансформатора при перегрузке определяется в соответствии с формулой (4.4).

5.6. Трансформатор считается удовлетворяющим требованиям по нагреву, если он выдерживает указанные выше перегрузки, а среднеквадратичное значение тока при циклических нагрузках (с временем цикла меньшим времени усреднения, заданного для данного типа трансформатора) не превышает номинальный ток. Среднеквадратичное значение вторичного тока трансформатора  $I_{2скв}$  определяется за цикл по значениям вторичных токов во время установившихся нагрузок и перегрузок, соответствующих графикам нагрузки рис. 2.1. Для однокомплектного преобразователя

$$I_{2скв} = \sqrt{\frac{I}{t_{\Sigma}} \left( I_{пв}^2 t_{пв} + I_{ув}^2 t_{ув} + I_{уи}^2 t_{уи} + I_{пн}^2 t_{пн} \right)}, \quad (5.6)$$

для двухкомплектного преобразователя

$$I_{2скв} = \sqrt{\frac{I}{t_{\Sigma}} \left( \frac{I_{пв1}^2 t_{пв1}}{2} + \frac{I_{ув1}^2 t_{ув1}}{2} + \frac{I_{пв2}^2 t_{пв2}}{2} + \frac{I_{ув2}^2 t_{ув2}}{2} + \frac{I_{пн1}^2 t_{пн1}}{2} \right)}. \quad (5.7)$$

5.7. Если указанные проверки трансформатора подтверждают его пригодность, то выбор трансформатора можно считать законченным.

Если при проверке выявляются большие запасы, то целесообразно проверить возможность применения трансформатора меньшей мощности.

5.8. Пример расчета.

5.8.1. Номинальное вторичное фазное напряжение

$$U_{2H} = \frac{U_{2ЛН}}{\sqrt{3}} = \frac{205}{\sqrt{3}} = 118,4 \text{ В.}$$

5.8.2. Активное, полное и индуктивное сопротивление рассеяния фазы трансформатора, приведенные ко вторичной стороне, в соответствии с формулами (5.1)...(5.3):

$$r_a = \frac{P_{кз}}{3I_{2H}^2} = \frac{3100}{3 * 514^2} = 0,0039 \text{ Ом ;}$$

$$Z_a = \frac{u_k \% * U_{2H}}{100 I_{2H}} = \frac{5,5 * 118,4}{100 * 514} = 0,0127 \text{ Ом ;}$$

$$X_a = \sqrt{Z_a^2 - r_a^2} = \sqrt{0,0127^2 - 0,0039^2} = 0,0121 \text{ Ом .}$$

5.8.3. Напряжение на двигателе (без учета падения напряжения на сглаживающем реакторе) при токе  $I_y$  и напряжении  $U_{\text{omin}}$ , определенное по формуле (5.5),

$$\begin{aligned} U &= 2,34 K_{\text{о min}} U_{2H} - \left( \frac{3}{\pi} X_a + 2r_a \right) I_y - 2U_{\text{TM}} = \\ &= 2,34 * 0,9 * 118,4 - \left( \frac{3}{\pi} 0,0121 + 2 * 0,0039 \right) 592 - \\ &\quad - 2 * 2 = 233,9 \text{ В.} \end{aligned}$$

$U > U_H$  на 13,9 В, следовательно выбранный трансформатор обеспечивает необходимое напряжение на двигателе.

5.8.4. Ток, потребляемый двигателем при максимальной перегрузке,

$$I_{II} = I_H \frac{I_{II}}{I_H} = 740 * 2,0 = 1480 \text{ А.}$$

5.8.5. Вторичный ток трансформатора при заданной перегрузке в течение 2 с

$$I_{2П} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{П} = \sqrt{\frac{2}{3}} I_{480} = 1209 \text{ А} .$$

Допустимый вторичный ток трансформатора в течение 10 с при перегрузке 150%

$$I_{2цдоп} = 2,5 I_{2Н} = 2,5 \cdot 517 = 1285 \text{ А} .$$

Трансформатор выдержит, т.к. ток перегрузки (1209 А) и время его действия (2 с) ниже допустимых значений (1209 А < 1285 А; 2 с < 10 с).

5.8.6. Среднеквадратичный ток, потребляемый от трансформатора, с учетом формулы (5.6)

$$I_{2скв} = \sqrt{\frac{I}{t_{ц}} \left( I_{2пв}^2 t_{пв} + I_{2ув}^2 t_{ув} + I_{2уи}^2 t_{уи} + I_{2пи}^2 t_{пи} \right)} =$$

$$= \sqrt{\frac{I}{50} \left( 1209^2 \cdot 2 + 483^2 \cdot 10 + 483^2 \cdot 10 + 1209^2 \cdot 2 \right)} = 459 \text{ А} .$$

Среднеквадратичный ток  $I_{2скв}$  меньше номинального  $I_{2Н}$  (459 А < 514 А). Таким образом, трансформатор удовлетворяет всем требованиям. Переход на трансформатор меньшей мощности невозможен, так как ток перегрузки близок к предельному значению.

## 6. ВЫБОР ТИРИСТОРОВ

6.1. Максимальная величина обратного напряжения, прикладываемого к тиристорам,  $U_{амак}$  определяется при максимальном напряжении сети  $U_{смак}$ . Для трехфазной мостовой схемы

$$U_{амак} = K_{омак} \sqrt{6} U_{2Н} . \quad (6.1)$$

где

$$K_{c \max} = \frac{U_{c \max}}{U_{CH}} .$$

Импульсное рабочее напряжение тиристора в закрытом состоянии  $U_{DRM}$  и импульсное рабочее обратное напряжение  $U_{RRM}$  должны быть больше  $U_{amax}$  (условие 1). Значения  $U_{DRM}$  и  $U_{RRM}$  связаны с повторяющимся импульсным напряжением в закрытом состоянии  $U_{DRM}$  и повторяющимся импульсным обратным напряжением  $U_{RRM}$  соотношениями [21]:

$$U_{DRM} = 0,8 U_{DRM}; \quad U_{RRM} = 0,8 U_{RRM}. \quad (6.2)$$

6.2. Перенапряжения, возникающие при коммутации вентилях, могут превосходить импульсное рабочее напряжение в закрытом состоянии и импульсное рабочее обратное напряжение, но они должны быть меньше повторяющегося импульсного напряжения в закрытом состоянии и повторяющегося импульсного обратного напряжения. Для ограничения этих перенапряжений тиристоры шунтируют RC-цепочками. Расчет этих элементов в курсовой работе не предусмотрен. Выбор их описан в [10].

6.3. При сгорании предохранителей, защищающих тиристоры, на них возникают перенапряжения, которые прикладываются к тиристорам. В соответствии с [10] максимальное напряжение на тиристоре  $U_{aper}$  при этом достигает  $(1,5...2) U_{amax}$ .

Неповторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии  $U_{DSM}$  и неповторяющееся импульсное обратное напряжение  $U_{RSM}$  должны с коэффициентом запаса  $K_s = (1,2...1,4)$  превышать напряжение  $U_{aper}$  (условие 2):

$$U_{DSM} = U_{RSM} = (1,5...2) K_s U_{a \max} . \quad (6.3)$$

Значения неповторяющихся импульсных напряжений  $U_{DSM}$  и  $U_{RSM}$  связаны со значениями повторяющихся импульсных напряжений  $U_{DRM}$  и  $U_{RRM}$  коэффициентами, определяемыми заводами-изготовителями:

$$U_{DSM} = K_{неп} U_{DRM}; \quad U_{RSM} = K_{неп} U_{RRM} . \quad (6.4)$$

При выполнении курсовой работы можно принять  $K_{неп} = 1,12$  для нелавинных приборов и  $K_{неп} = 1,2$  для лавинных [21].

6.4. Перенапряжения возникают в тиристорных преобразователях и

при отключении трансформаторов на холостом ходу. Для защиты от них на входе тиристорного моста со стороны переменного напряжения включаются дополнительные RC-цепочки или вентильно-конденсаторные схемы. Этот вид перенапряжений в рамках курсовой работы не рассматривается. Выбор этих элементов рассмотрен в [10].

6.5. Поскольку в курсовой работе при расчете учитываются только напряжения по пп. 6.1 и 6.3, то в соответствии с условиями 1 и 2 окончательно определяется класс тиристоров. Выбирается большее значение.

6.6. Тип тиристоров определяется по току. Поскольку допустимые перегрузки тиристоров весьма кратковременные, то в повторно-кратковременных режимах тип тиристоров обычно выбирается по максимальному току перегрузки. Если режим работы длительный, а перегрузки очень редкие и кратковременные, то возможен выбор тиристоров по длительному току. Окончательно тип тиристора принимается после его проверки на нагрев.

6.7. Максимально допустимый средний ток характеризует нагрузочную способность тиристоров. В зависимости от условий работы различают:

а) предельный ток  $I_{TAVm}$  (максимально допустимый средний ток при заданной температуре корпуса  $T_c$ ) - среднее за период значение прямого тока, протекающего через тиристор, работающий в однофазной однополупериодной схеме выпрямления с активной нагрузкой при частоте 50 Гц, синусоидальной форме тока с углом проводимости  $180^\circ$ , когда при установившемся тепловом состоянии температура корпуса  $T_c$  равна заданному значению, а температура перехода  $T_j$  равно максимально допустимой  $T_{jm}$ ; этот ток определяет тип тиристора;

б) максимально допустимый средний ток при заданных условиях работы. Максимально допустимый средний ток при заданных условиях работы  $I_{TAV}$  связан с предельным током  $I_{TAVm}$  рядом коэффициентов, учитывающих эти условия:

$$I_{TAV} = K_\lambda K_f K_T K_v I_{TAVm} \quad (6.5)$$

$K_\lambda$  - коэффициент, учитывающий отличие угла проводимости от  $180$  град. эл. и отличие формы тока от синусоидальной; при прямоугольной и трапециевидальной форме тока с углом проводимости, близким  $120$  град. эл., можно принять

$$K_\lambda = 0,8;$$

- $K_f$  - коэффициент, учитывающий влияние частоты; при частоте 50 Гц  $K_f = 1$ ;
- $K_T$  - коэффициент, учитывающий температуру окружающей среды  $T_a$ ; при  $T_a < 40^\circ\text{C}$  можно принять  $K_T = 1$ ;
- $K_v$  - коэффициент, учитывающий скорость охлаждающего воздуха; при номинальной скорости  $K_v = 1$ , при естественном охлаждении без обдува  $K_v$  снижается до 0,25...0,4.

Зная требуемый ток тиристора в режиме перегрузки, можно, используя указанные коэффициенты, найти предельный ток  $I_{TAVM}$  и предварительно выбрать тип тиристора. В реверсивном преобразователе имеется 2 комплекта вентиляей. При различной нагрузке комплектов расчет выполняется для более загруженного.

6.8. Если тиристоры на заданные параметры отсутствуют, то приходится идти на последовательное и параллельное соединение тириستоров. Для улучшения распределения напряжений по последовательно включенным тиристорам применяют шунтирующие элементы: сопротивления и RC-цепочки [10, 21]. Неравномерность деления напряжения характеризуется коэффициентом  $K_H$ . Для улучшения распределения токов по параллельно включенным тиристорам устанавливают делители тока, реакторы или применяют подбор тиристоров. Неравномерность деления токов характеризуется коэффициентом  $K_B$ . При хороших делителях  $K_B = 1,05...1,1$ .

При параллельном соединении  $n_B$  вентиляей ток через вентиль

$$I'_a = K_B \frac{I_a}{n_B} . \quad (6.6)$$

Средства для распределения напряжений и токов в курсовой работе не выбираются и не рассчитываются.

6.9. Пример расчета.

6.9.1. Максимальное обратное напряжение в соответствии с (6.1)

$$U_{a \max} = K_c \max \sqrt{6} U_{2H} = 1,1 \sqrt{6} \cdot 118,4 = 319 \text{ В} .$$

6.9.2. Импульсное рабочее напряжение тиристора в закрытом состоянии и импульсное рабочее обратное напряжение должны быть больше  $U_{a \max}$ :

$$U_{DWM} = U_{RWM} > 319 \text{ В} .$$

Тогда повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии и повторяющееся импульсное напряжение в соответствии с формулой (6.2)

$$U_{DRM} = U_{RRM} = \frac{319}{0,8} = 399 \text{ В.}$$

Таким образом, по условию I можно выбрать тиристоры четвертого класса.

6.9.3. Неповторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии и неповторяющееся импульсное обратное напряжение в соответствии с формулой (6.3) для условия 2

$$U_{DSM} = U_{RSM} = (1,5 \dots 2) K_a U_a \max = 2 * 1,3 * 319 = 829 \text{ В.}$$

Тогда по формуле (6.4) повторяющееся импульсное напряжение для нелавинных приборов

$$U_{DRM} = U_{RRM} = \frac{829}{1,12} = 740 \text{ В.}$$

Округлив это значение в большую сторону, с учетом условий I и 2 по таблице [2I, с.121] или по Приложению П2 окончательно примем тиристоры восьмого класса.

6.9.4. Средний ток вентиля при перегрузке

$$I_{\text{вп}} = \frac{I_{\text{п}}}{3} = \frac{1480}{3} = 493 \text{ А.}$$

6.9.5. Требуемый предельный ток с учетом формулы (6.5)

$$I_{TAVm} = \frac{I_{\text{вп}}}{K_{\lambda} K_{\tau} K_t K_v} = \frac{493}{0,8 * 1 * 1 * 1} = 617 \text{ А.}$$

6.9.6. Предварительно по [2I, с.205] или по Приложению П2 выбираем тиристор типа Т143-630-8 с охладителем типа О243-150, имеющий параметры, приведенные в табл. 6.1.

Таблица 6.1

Наименование параметра и обозначение	Единица измерения	Значение
Предельный ток $I_{TAVm}$ (температура корпуса $T_c=85^\circ\text{C}$ , угол проводимости $\lambda=180$ град., $f=50$ Гц)	А	630
Ударный неповторяющийся ток в открытом состоянии $I_{TSM}$ при максимально допустимой температуре перехода $T_{jm}$	кА	12
Максимально допустимая температура перехода $T_{jm}$	$^\circ\text{C}$	125
Пороговое напряжение $U_T(t_0)$	В	1,0
Дифференциальное сопротивление в открытом состоянии $r_T$	МОм	0,43
Ток удержания $I_n$ , не более	мА	300

## 7. ПРОВЕРКА ТИРИСТОРОВ ПО НАГРЕВУ

7.1. Допустимая нагрузка тиристорov по току определяется как электрическим режимом, так и условиями охлаждения. При различных схемах выпрямления, углах регулирования и видах нагрузки длительность и форма тока, протекающего через тиристор, различны. Преобразователи могут работать в длительном, кратковременном и повторно-кратковременном режимах. Поэтому при одинаковых средних значениях тока потери в вентилях будут различны, что определяет различный нагрев полупроводниковой структуры при одинаковых условиях отвода тепла. Отвод тепла определяется тепловыми параметрами тиристорov и их охладителей, а также температурой окружающей среды. Таким образом, после предварительного выбора типа тиристора необходима его проверка на нагрев.

7.2. Потери в тиристорах делятся на основные и дополнительные. Основные обусловлены прохождением рабочего тока и определяются падением напряжения на вентиле. Дополнительные - суммируются из потерь в цепи управления, коммутационных потерь и потерь от токов утечки. При частоте до 200 Гц они не превышают 5...10% от основных, и при расчете ими можно пренебречь. Тогда средняя мощность потерь в тиристоре при кусочно-линейной аппроксимации прямой ветви

вольтамперной характеристики может быть определена по формуле [21]

$$P_T = U_{T(ТО)} I_a + K_{\Phi}^2 r_T I_a^2, \quad (7.1)$$

где  $U_{T(ТО)}$  - пороговое напряжение;

$I_a$  - среднее значение анодного тока;

$r_T$  - дифференциальное сопротивление тиристора в открытом состоянии;

$K_{\Phi}$  - коэффициент формы анодного тока, равный отношению действующего значения тока к среднему. Для трехфазной мостовой схемы в режиме

непрерывного тока можно принять  $K_{\Phi} = \sqrt{3}$ .

При параллельном соединении тиристоров нужно учесть коэффициент неравномерности распределения тока  $K_B$ .

7.3. Потери, выделяемые в полупроводниковой структуре, через корпус и охладитель передаются в окружающую среду (воздух, вода).

Теплопередача характеризуется тепловым сопротивлением. Тепловое сопротивление переход - среда  $R_{thja}$  - это отношение разности температуры перехода и температуры окружающей среды к мощности потерь в приборе в установившемся режиме.

Рассматривая путь теплового потока через конструктивные элементы, можно констатировать, что в установившемся режиме тепловое сопротивление между переходом и охлаждающей средой

$$R_{thja} = R_{thjc} + R_{thch} + R_{thha}. \quad (7.2)$$

Здесь  $R_{thjc}$  - тепловое сопротивление переход-корпус прибора;

$R_{thch}$  - тепловое сопротивление корпус прибора-контактная поверхность охладителя (контактное тепловое сопротивление);

$R_{thha}$  - тепловое сопротивление контактная поверхность охладителя - окружающая среда.

Температура перехода  $T_j$  при постоянной нагрузке и температуре окружающей среды  $T_a$  (в установившемся тепловом режиме)

$$T_j = T_a + P_T R_{thja}. \quad (7.3)$$

Уменьшение  $R_{thja}$  позволяет увеличить нагрузочную способность тиристора, однако для тиристора заданного типа можно изменить только  $R_{thch}$  и  $R_{thha}$ , изменяя условия охлаждения.

7.4. В переходном тепловом режиме тепловое состояние тиристора определяется переходными тепловыми сопротивлениями переход-корпус  $Z_{(th)tjc}$  и переход-окружающая среда  $Z_{(th)tja}$ .

Переходное тепловое сопротивление переход-среда - это отношение изменения разности в конце интервала времени  $t$  между температурой перехода  $T_{jt}$  и температурой окружающей среды  $T_a$  к скачкообразному изменению мощности потерь  $P_T$  в начале того же интервала времени, вызывающему изменение температуры:

$$Z_{(th)tja} = \frac{T_{jt} - T_a}{P_T} . \quad (7.4)$$

Переходное тепловое сопротивление переход-корпус - это отношение изменения разности в конце интервала времени  $t$  между температурой перехода  $T_{jt}$  и температурой корпуса  $T_{ct}$  к скачкообразному изменению мощности потерь  $P_T$  в начале того же интервала, вызывающему изменение температуры:

$$Z_{(th)tjc} = \frac{T_{jt} - T_{ct}}{P_T} . \quad (7.5)$$

Зависимости  $Z_{(th)tjc} = f(t)$  для конкретных типов тиристорov приводятся в справочнике [21]. Зависимости  $Z_{(th)tja} = f(t)$  также имеются в [21], причем они относятся к конкретному типу охладителя.

На рис.7.1 приведен пример характеристик для переходных тепловых сопротивлений переход-окружающая среда при различных скоростях охлаждающего воздуха. Если тиристор работает в сборе с другим типом охладителя, то переходное тепловое сопротивление переход-среда

$$Z_{(th)tja} = Z_{(th)tjc} + Z_{(th)tha} + R_{thch} . \quad (7.6)$$

При этом допускается, что контактное тепловое сопротивление постоянно во времени. Переходное тепловое сопротивление конкретного охладителя  $Z_{(th)tha}$  приводится в [21]. При использовании  $Z_{(th)tha}$  в

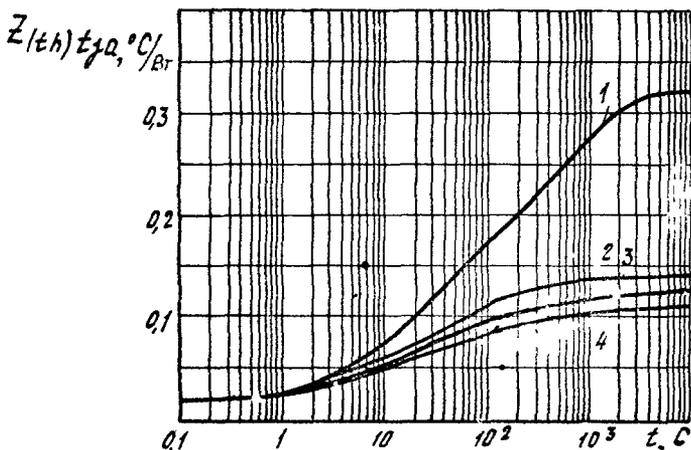


Рис.7.1 Переходные тепловые сопротивления переход-среда при скоростях охлаждающего воздуха: 0 м/с (1), 3 м/с (2), 6 м/с (3), 12 м/с (4) для тиристоров Т143-400, Т143-500, Т143-630 (охладитель О243-150)

качестве составляющей  $Z_{(th)tjA}$  необходимо суммировать его с контактным сопротивлением  $R_{thch}$  для расчетных значений времени  $t > 1$  с.

В установившемся тепловом режиме

$$Z_{(th)tjA} = R_{thjA} \cdot \quad (7.7)$$

Температура перехода в момент  $t$  при известном значении средней мощности потерь  $P_T$  может быть рассчитана по формуле

$$T_{jt} = T_a + P_T Z_{(th)tjA} \cdot \quad (7.8)$$

7.5. При частоте 50 Гц и допустимых токах изменение температуры структуры за период не превышает  $5^\circ\text{C}$ , поэтому им можно пренебречь. Тогда можно считать, что импульс средней мощности  $P_T$ , определенный по формуле (7.1), действует в течение периода. Если ток проходит через тиристор в течение нескольких периодов, то можно представлять выделяемую мощность в виде непрерывного импульса.

7.6. Часто тиристоры работают в циклических (повторно-

кратковременных) режимах. Чтобы выполнить расчет для такого режима, рассмотрим вначале, как изменяется температура  $T_{jt}$  после прохождения одного импульса (рис.7.2).

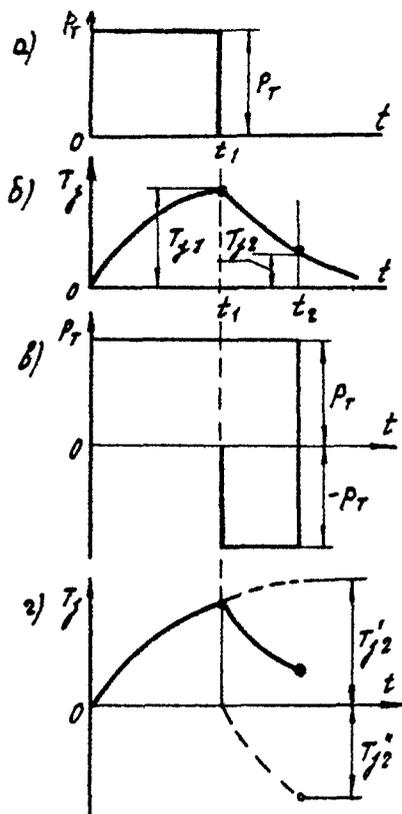


Рис. 7.2. Изменение температуры перехода (б) под действием прямоугольного импульса мощности (а) и построение графиков мощности (в) и температуры (г) методом суперпозиции

Для определения температуры перехода  $T_{j2}$  в момент  $t_2$  применим метод наложения (суперпозиции). Процесс охлаждения на участке  $t_1 - t_2$  представим как наложение двух равных по амплитуде импульсов мощности  $+P_T$  и  $-P_T$ . Импульс мощности  $P_T$  (рис.7.2. в) вызывает превышение температуры в момент  $t_2$  до величины (рис.7.2. г)

$$T_{j2}' = P_T Z_2, \quad (7.9)$$

где  $Z_2$  - переходное тепловое сопротивление  $Z_{(th)t_{ja}}$  в момент  $t_2$ .

Под действием отрицательного импульса мощности температура в момент  $t_2$  понизится на величину

$$T_{j2}'' = P_T Z_{2-1}, \quad (7.10)$$

где  $Z_{2-1}$  - значение переходного теплового сопротивления  $Z_{(th)t_{ja}}$  за время  $\Delta t = t_2 - t_1$ , определенное по рис.7.1.

Превышение температуры перехода тиристора в момент  $t_2$  от одновременного действия импульсов

$$T_{j2} = T_{j2}' - T_{j2}'' = P_T (Z_2 - Z_{2-1}). \quad (7.11)$$

7.7. Если форма импульса отличается от прямоугольной, то реальный импульс для упрощения может быть заменен прямоугольным, имеющим ту же амплитуду и среднее значение [19].

На рис.7.3 показана замена импульса ступенчатой формы (рис.7.3, а) на эквивалентный прямоугольный (рис.7.3, б) с длительностью  $t_d$ .

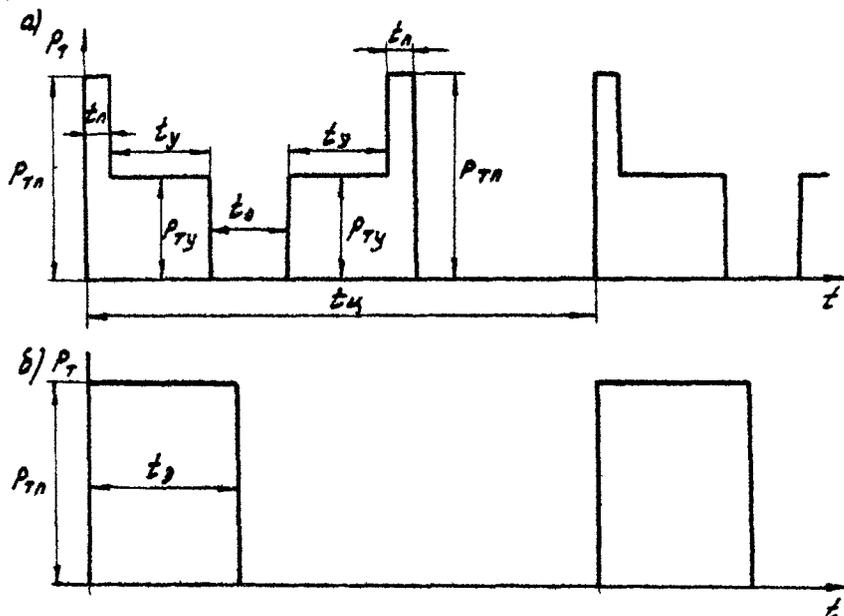


Рис.7.3. Замена импульса мощности произвольной формы эквивалентным

$$t_3 = \frac{P_{тп}t_{тп} + P_{ту}t_{ту} + P_{ту}t_{ту} + P_{тп}t_{тп}}{P_{тп}} \quad (7.12)$$

Все обозначения указаны на рисунке. При указанной замене рассчитанная температура всегда превышает фактическую.

В двухкомплектном реверсивном преобразователе определение эквивалентного прямоугольного импульса должно быть произведено для каждого комплекта. Расчет теплового режима производится для более нагруженного комплекта.

7.8. При ступенчато изменяющейся нагрузке возможен и более точный расчет, при котором так же, как и при расчете нагрева под действием одиночного импульса используется метод суперпозиции. Превышение температуры в момент времени  $t_n$  определяется, как сумма воздействий ряда ступеней нагрузки. Расчетные формулы приведены в [4]. Расчет по ним весьма трудоемок, поэтому часто применяется описанная ранее замена импульса произвольной формы эквивалентным.

При расчете электропривода нагрузка чаще всего принимается циклической.

При циклическом характере нагрузки (рис.7.4) максимальную температуру перехода  $T_{jm}$  в квазиустановившемся режиме (в конце интервала проводимости при достаточно длинной серии импульсов) можно определить путем бесконечного повторения суперпозиций до выхода на установившийся процесс.

Таким образом, в [21] получена формула

$$T_j = T_a + P_{тп} \left[ \frac{t_3}{t_{ц}} R_{thja} + \left( 1 - \frac{t_3}{t_{ц}} \right) Z_{(тц+t_3)} - Z_{тц} + Z_{т_3} \right], \quad (7.13)$$

где  $Z_{(тц+t_3)}$ ,  $Z_{тц}$ ,  $Z_{т_3}$  - значения переходного теплового сопротивления  $Z_{(th)t_{ja}}$  в соответствующие моменты времени  $(t_{ц} + t_3)$ ,  $t_{ц}$ ,  $t_3$  (рис. 7.1).

Значения переходных тепловых сопротивлений для конкретных моментов могут быть взяты для выбранного тиристора по кривой переходного теплового сопротивления  $Z_{(th)t_{ja}}$  для заданных условий охлаждения, например в [21].

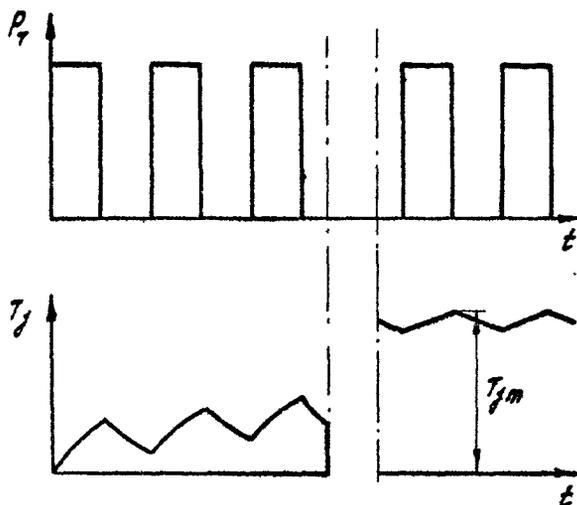


Рис. 7.4. Изменение температуры перехода при циклической нагрузке

7.9. Расчет по формуле (7.13) с применением эквивалентного импульса мощности дает завышенные значения температуры перехода. В [4] С.П.Лоховым разработан метод расчета, позволяющий получить более точные результаты, при этом переходные тепловые сопротивления представляются численными коэффициентами, что позволяет все расчеты выполнить на ЭЦМ для реального графика нагрузки без замены на эквивалентный импульс мощности.

7.10. Максимальная температура структуры  $T_j$  ни в каких технологических режимах не должна превышать максимально допустимую температуру полупроводниковой структуры  $T_{jm}$ . Она может быть превышена только в аварийных режимах.

7.11. Пример расчета.

7.11.1. Анодные токи вентилях при перегрузке и в установившемся режиме:

$$I_{ап} = \frac{I_{п}}{3} = \frac{1480}{3} = 493 \text{ A} ;$$

$$I_{ay} = \frac{I_y}{3} = \frac{592}{3} = 197 \text{ A} .$$

7.II.2. Мощность потерь в режиме перегрузки и в рабочем режиме с учетом формулы (7.I):

$$P_{тп} = U_{т(то)} I_{ап} + K_{\Phi}^2 I_{ап}^2 r_T = 1,0 \cdot 493 + \left[ \sqrt{3} \right]^2 \cdot 493^2 \cdot 0,43 \cdot 10^{-3} = 806 \text{ Вт} ;$$

$$P_{ту} = U_{т(то)} I_{ay} + K_{\Phi}^2 I_{ay}^2 r_T = 1,0 \cdot 197 + \left[ \sqrt{3} \right]^2 \cdot 197^2 \cdot 0,43 \cdot 10^{-3} = 247 \text{ Вт} ;$$

7.II.3. Длительность эквивалентного прямоугольного импульса по формуле (7.I2)

$$t_a = \frac{P_{тп} t_{п} + P_{ту} t_y + P_{ту} t_y + P_{тп} t_{п}}{P_{тп}} = \frac{806 \cdot 2 + 247 \cdot 10 + 247 \cdot 10 + 806 \cdot 2}{806} = 10 \text{ с} .$$

7.II.4. Максимальная температура перехода при скорости охлаждающего воздуха 6 м/с, определенная по формуле (7.I3),

$$T_j = T_a + P_{тп} \left[ \frac{t_a}{t_{п}} R_{thja} + \left[ 1 - \frac{t_a}{t_{п}} \right] Z_{(t_{п} + t_a)} - Z_{t_{п}} + Z_{t_a} \right] = 40 + 806 \left[ \frac{10}{50} 0,125 + \left[ 1 - \frac{10}{50} \right] 0,08 - 0,075 + 0,06 \right] = 99,6^{\circ}\text{C} .$$

Сопротивления  $Z_{(t_{п} + t_a)}$ ,  $Z_{t_{п}}$ ,  $Z_{t_a}$  определены по кривой рис.7.I. По ней же определено  $R_{thja}$ , т.к.  $R_{thja}$  равно установившемуся значению  $Z_{(th)tja}$ .

Поскольку полученная температура перехода далека от максимально допустимой ( $T_{jm} = 125^{\circ}\text{C}$ ), то проверим возможность работы тиристора при меньшей скорости охлаждающего воздуха (3 м/с). По расчету  $T_j = 107^{\circ}\text{C}$ , следовательно, тиристор может работать при меньшей скорости охлаждающего воздуха. При естественном охлаждении, как показал расчет, тиристор нагревается до недопустимой температуры  $T_j = 139^{\circ}\text{C}$ .

Поэтому окончательно принимаем, что при скорости охлаждающего воздуха 3 м/с тиристор выбранного типа не перегревается.

Полученные результаты свидетельствуют о возможности перехода на другой тип тиристора с меньшим предельным током  $I_{TAVm}$ . Однако при выполнении курсовой работы новый расчет делать не требуется.

## 8. ВЫБОР ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ И ПРОВЕРКА ТИРИСТОРОВ НА ТОКИ КСРОТКОГО ЗАМЫКАНИЯ

8.1. Аварийные режимы в преобразователях, характеризующиеся протеканием больших токов, делятся на внешние аварии, вызванные короткими замыканиями (КЗ) в нагрузке, внутренние аварии, обусловленные повреждениями отдельных вентилях, и опрокидывания инвертора, происходящие из-за неправильного выбора угла управления или нарушения нормальной работы системы управления [5].

8.2. Для защиты преобразователей от аварийных режимов применяют защитную аппаратуру - быстродействующие автоматические выключатели и быстродействующие плавкие предохранители [5, 10].

Для защиты от внешних КЗ и опрокидываний инвертора чаще всего применяют автоматические выключатели, устанавливаемые на стороне переменного и постоянного тока. В рамках курсовой работы выбор автоматических выключателей не производится, но на принципиальной схеме их следует показать. Для защиты от внутренних КЗ, вызванных повреждениями вентилях, последовательно с вентилями устанавливают плавкие предохранители. В маломощных установках плавкие предохранители могут устанавливаться также для защиты от внешних КЗ вместо автоматических выключателей (рис.8.1).

8.3. Наибольшие аварийные токи возникают при внутренних КЗ,

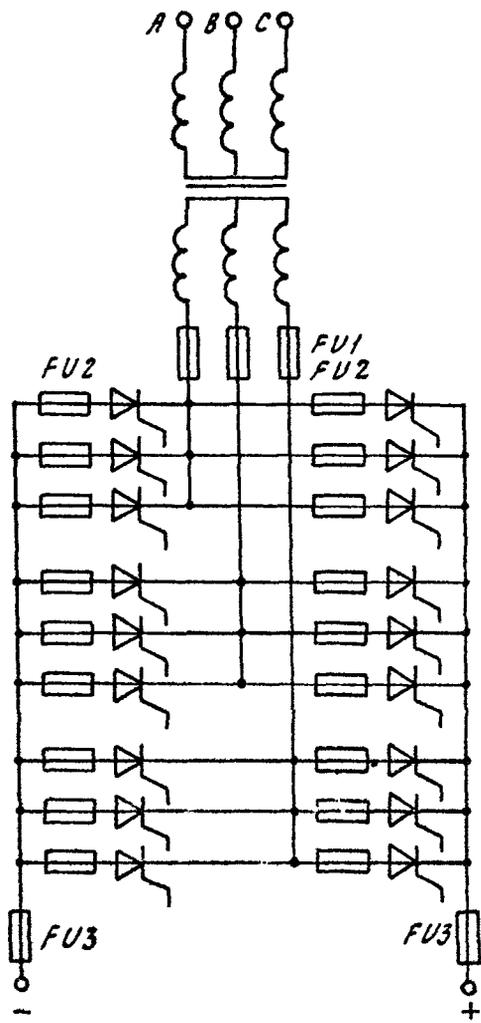


Рис.8.1. Схема трехфазного мостового преобразователя с предохранителями для защиты от внутренних (FU2) и внешних КЗ (FU1; FU3)

поэтому в курсовой работе ограничимся выбором предохранителей, защищающих тиристоры от внутренних КЗ.

8.4. При расчете аварийных токов обычно используют относительные единицы, принимая за базу амплитуду установившегося тока трехфазного короткого замыкания  $I_m$ :

$$I_m = \frac{K_{c \max} U_{2m}}{Z_a}, \quad (8.1)$$

где  $K_{c \max}$  учитывает возможное повышение напряжения в сети.

При внутреннем коротком замыкании из-за наличия аperiodической составляющей амплитуда тока короткого замыкания (ТКЗ) в первый полупериод может существенно превысить значение  $I_m$ . На рис. 8.2, приведена зависимость

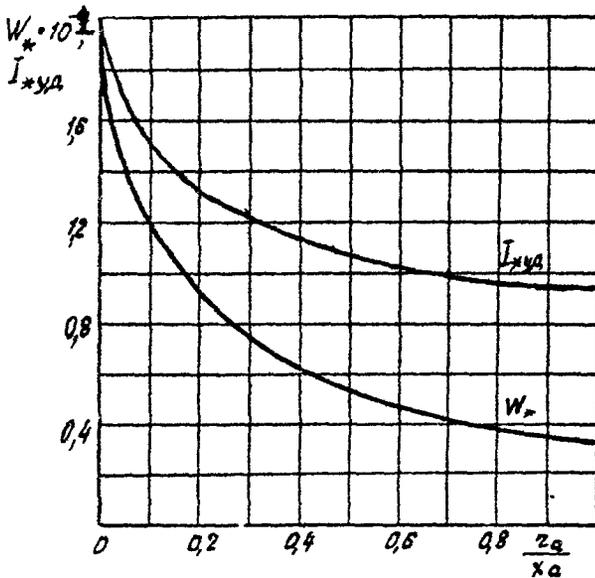


Рис.8.2. Амплитуда ударного тока и интеграл предельной нагрузки в относительных единицах при внутреннем КЗ тиристорного преобразователя по трехфазной мостовой схеме

относительного значения амплитуды ударного тока  $I_{*уд}$  при внутреннем коротком замыкании от параметров трансформатора [17]. Амплитуда ТКЗ

$$I_{уд} = I_{*уд} I_m . \quad (8.2)$$

Тепловое воздействие на вентили преобразователя характеризуется интегралом предельной нагрузки  $W = \int i_{*уд}^2 dt$ . Аварийный режим должен быть ликвидирован за одну полуволну напряжения сети (0,01 с).

На рис.8.2 приведена зависимость интеграла предельной нагрузки от параметров трансформатора [10].

(в относительных единицах)  $W_* = \int_0^{0,01} i_{*уд}^2 dt$  от параметров трансформатора [10].

Интеграл предельной нагрузки

$$W = I_m^2 W_* . \quad (8.3)$$

Зависимости на рис.8.2 построены для наиболее тяжелого случая - внутреннего замыкания при  $\alpha = 0$ . С ростом угла управления  $\alpha$  аварийные токи падают.

8.5. В справочных данных на тиристоры (Приложение П2) приводятся значения ударного неповторяющегося тока в открытом состоянии  $I_{TSM}$ , а по ним может быть определен защитный показатель  $W_T = \int i^2 dt$  - значение интеграла от квадрата ударного прямого тока синусоидальной формы за время полупериода напряжения сети:

$$W_T = \int_0^{0,01} I_{TSM}^2 \sin^2 \omega t dt = 0,005 I_{TSM}^2 . \quad (8.4)$$

Эти величины характеризуют перегрузочную способность тиристора при аварийных токах. Для надежной работы тиристоров необходимо, чтобы значения ударного тока  $I_{TSM}$  и защитного показателя  $W_T$  не превышались ни в каких режимах.

8.6. Обычно значения ударного неповторяющегося тока и защитного показателя тиристоров существенно меньше, чем

амплитуда ТКЗ  $I_{уд}$  и интеграл предельной нагрузки  $W$ . Следовательно, уже при длительности аварийного тока 0,01 с тиристоры выйдут из строя. Поэтому быстродействующие плавкие предохранители должны в течение одного полупериода ограничить амплитуду тока и его тепловое воздействие, характеризуемое величиной  $\int i_{уд}^2 dt$ .

8.7. Для обеспечения селективности отключения поврежденных характеристики автоматических выключателей и предохранителей в разных цепях должны быть согласованы между собой. Например, при внутренних повреждениях должны срабатывать только предохранители П2 и не срабатывать П1, П3, а при внешних не должны срабатывать предохранители П2 (рис.8.1).

При существующих предохранителях при внутренних коротких замыканиях возможно селективное отключение поврежденного вентилля только при числе параллельных вентиллей, большем двух. При этом предохранитель в цепи "здорового" вентилля не должен начать плавиться. Чтобы предохранители не сгорели при внешних коротких замыканиях, на стороне постоянного тока ставится быстродействующий автоматический выключатель и реактор, ограничивающий скорость нарастания тока. Иногда ставится только сетевой автоматический выключатель на стороне переменного тока.

В курсовой работе при выборе предохранителей вопросы селективности отключения не рассматриваются.

8.8. Выбор предохранителей по напряжению производится в соответствии с линейным напряжением на вторичной стороне трансформатора по каталогу [11] или по Приложению ПЗ.

8.9. Выбор номинального тока плавкой вставки производится в соответствии с действующим значением тока через тиристор при установившейся нагрузке

$$I_{ауд} = \sqrt{3} I_{ау} . \quad (8.5)$$

Плавкая вставка выбирается из условия, что номинальный ток плавкой вставки

$$I_{пл.н} > I_{ауд} . \quad (8.6)$$

Если не удастся выполнить условие (8.6), то следует перейти на параллельное соединение тиристоров с установкой плавкой

вставки в цепи каждого тиристора. Дальнейшие расчеты тогда ведутся для случая параллельной работы тиристоров. После завершения расчетов целесообразно было бы вновь проверить тепловой режим тиристоров, перейдя, например, на естественное охлаждение или применить тиристор на меньший предельный ток. Однако, в курсовой работе повторные расчеты производить не требуется.

При параллельной работе тиристоров с учетом неравномерного распределения токов, учитываемого коэффициентом  $K_B$ , действующее значение тока через тиристор при рабочей нагрузке

$$I'_{аду} = \frac{K_B I_{аду}}{n_B} \quad (8.7)$$

Выбор номинального тока плавкой вставки вновь производится с учетом неравенства (8.6). После выбора номинального тока плавкой вставки необходимо проверить по времятоковым характеристикам (Приложение ПЗ), выдержит ли она перегрузки. Действующее значение тока перегрузки, протекающего через тиристор, при одиночном включении

$$I_{адп} = \sqrt{3} I_{ап} \quad (8.8)$$

и при параллельной работе

$$I'_{адп} = \frac{K_B I_{адп}}{n_B} \quad (8.9)$$

Если предохранитель не выдерживает перегрузки, то плавкая вставка выбирается из условия обеспечения режима перегрузки.

8.10. Параметром предохранителя, характеризующим его до образования дуги, является интеграл плавления  $W_{пл}$ , определяемый количеством энергии, необходимым для расплавления плавкой вставки за время  $t$ , меньшее 10 мс [5]. Значение  $W_{пл}$  характеризует свойство самой плавкой вставки и не зависит от параметров аварийной цепи.

После расплавления предохранителей возникает дуга, через которую продолжает проходить ток, нагревающий неповрежденные вентили. Тепловое воздействие за время горения дуги характеризуется интегралом дуги  $W_d$ , зависящим от параметров аварийного контура. Общее тепловое воздействие за время прохождения

аварийного тока по цепи с предохранителем и защищаемым вентилем характеризуется полным интегралом отключения  $W_{пр}$  и равно сумме интегралов плавления и дуги. В информационных материалах приводятся зависимости  $W_{пр}$  от действующего значения первой полувольты ТКЗ в аварийном контуре  $I_{уд.д}$  (Приложение ПЗ и ПП):

$$I_{уд.д} = \frac{I_{уд}}{\sqrt{2}} \quad (8.10)$$

Быстродействующие предохранители имеют определенный разброс значений  $W_{пл}$ ,  $W_{д}$ ,  $W_{пр}$ . Поэтому при расчетах используют верхние или нижние значения из допустимой области разброса в зависимости от решаемой задачи.

Важным параметром предохранителя является его токоограничивающая характеристика. Она определяет зависимость предельного тока, ограниченного предохранителем,  $I_{пр}$  от действующего значения первой полувольты ТКЗ (Приложение ПЗ и ПП). Зная значение  $I_{уд.д}$  по этой характеристике можно определить максимальную амплитуду тока  $I_{пр}$ .

8.11. Для обеспечения защиты "здоровых" тиристоров при внутреннем коротком замыкании необходимо выполнение двух условий:

а) максимальная амплитуда аварийного тока через "здоровый" тиристор, которая ограничивается предохранителем, не должна превышать допустимый ударный ток  $I_{TSM}$ :

$$I_{TSM} > I_{пр} ; \quad (8.11)$$

б) максимально возможный ограниченный предохранителем интеграл тока через любой неповрежденный тиристор должен быть меньше его защитного показателя:

$$W_T > W_{пр} . \quad (8.12)$$

При проверке выполнения условий (8.11) и (8.12) необходимо учитывать количество параллельно включенных вентилях  $n_B$  и коэффициента неравномерности распределения токов по вентилям  $K_B$ . При этом должны выполняться условия:

$$I_{TSM} > \frac{K_B I_{пр}}{n_B} . \quad (8.13)$$

$$W_T > \frac{K_B^2 W_{пр}}{r_B^2} \quad (8.14)$$

При выполнении неравенств (8.11)...(8.14) необходимо иметь запас не менее 1,2 [5].

8.12. Пример расчета.

8.12.1. Амплитуда базового тока согласно формуле (8.1)

$$I_m = \frac{K_c \min U_{2m}}{Z_a} = \frac{1,1 * 118,4 * \sqrt{2}}{0,0121} = 14480 \text{ А}.$$

8.12.2. Определение ударного ТКЗ и интеграла предельной нагрузки. Параметр трансформатора

$$\frac{r_a}{X_a} = \frac{0,0039}{0,0121} = 0,322.$$

По рис.8.2  $I_{уд} = 1,2; \quad W_a = 0,74 * 10^{-2}.$

В абсолютных единицах

$$I_{уд} = 1,2 * 14480 = 17376 \text{ А};$$

$$W = 0,74 * 10^{-2} * 14480^2 = 1,55 * 10^6 \text{ А} * \text{с}.$$

8.12.3. Ударный неповторяющийся ток тиристора в открытом состоянии (в соответствии с табл.6.1)  $I_{ТSM} = 12 * 10^3 \text{ А}.$   
Защитный показатель

$$W_T = 0,005 I_{ТSM}^2 = 0,005 * 12^2 * 10^6 = 0,72 * 10^6 \text{ А} * \text{с}.$$

Из сравнения с п.8.12.2 видно, что тиристоры не выдерживают ударный ток:  $I_{ТSM} < I_{уд}; \quad W_T < W.$  Необходима установка предохранителей.

8.12.4. Проведем предварительный выбор предохранителя. Номинальное линейное напряжение на вторичной стороне трансформатора  $U_{2лн} = 205 \text{ В}.$

По приложению ПЗ и каталогу [II] видно, что можно выбрать предохранитель типа ПП-57 на напряжение 220 В.

Действующее значение тока через тиристор при токе  $I_y$

$$I_{аду} = \sqrt{3} I_{ay} = \sqrt{3} * 197 = 341 \text{ А} .$$

Наибольший номинальный ток плавких вставок на номинальное напряжение 220 В - 250 А, поэтому нужно параллельное соединение двух тиристоров. При этом

$$I_{аду} = \frac{K_B I_{адр}}{n_B} = \frac{1,1 * 341}{2} = 188 \text{ А} .$$

Выбираем предохранитель типа ПП-57-3427 на номинальное напряжение переменного тока 220 В, номинальный ток 250 А с плавкой вставкой на номинальный ток 250 А.

8.12.5. Проверка плавкой вставки на перегрузку. При перегрузке действующее значение тока через тиристор при параллельном соединении

$$I_{аду} = \frac{K_B \sqrt{3} I_{ап}}{n_B} = \frac{1,1 * \sqrt{3} * 493}{2} = 496 \text{ А} .$$

По времятоковым характеристикам (Приложение ПЗ) плавкая вставка выдерживает эту перегрузку в течение = 10 мин, что значительно больше заданного времени (2 с). Можно убедиться, что плавкая вставка на ближайший меньший номинальный ток (160 А) выдержит перегрузку только в течение 0,5 с. Таким образом, выбранная плавкая вставка обеспечивает работу преобразователя при заданных нагрузках.

8.12.6. Проверка условий защиты тиристора. Действующее значение первой полуволны ТКЗ при внутреннем КЗ

$$I_{уд.д} = \frac{I_{уд}}{\sqrt{2}} = \frac{17376}{\sqrt{2}} = 12306 \text{ А} .$$

Тогда по характеристикам для интеграла отключения и тока, ограниченного предохранителем (Приложение ПЗ или [II]), найдем  $I_o = I_{уд.д}$  и

$$W_{\text{пр}} = 2,8 * 10^5 \text{ A}^2\text{c}, \quad I_{\text{пр}} = 10 \text{ кА} .$$

Тогда

$$\frac{K_B I_{\text{пр}}}{n_B} = \frac{1,1 * 10 * 10^3}{2} = 5,5 * 10^3 \text{ A} < 12 * 10^3 ;$$

$$\frac{K_B^2 W_{\text{пр}}}{n_B^2} = \frac{1,1^2 * 2,8 * 10^5}{2^2} = 0,847 * 10^5 \text{ A}^2\text{c} < 7,2 * 10^5 \text{ A}^2\text{c} .$$

Условия защиты выполняются с большим запасом, следовательно, при выходе из строя одного из тиристорov предохранитель обеспечивает защиту остальных.

Теперь можно считать, что тиристоры и предохранители выбраны окончательно.

## 9. РАСЧЕТ ПАРАМЕТРОВ И ВЫБОР СГЛАЖИВАЮЩЕГО РЕАКТОРА

9.1. Сглаживающий реактор выполняет три функции (IО, IБ): сглаживает пульсации выпрямленного тока, уменьшает зону прерывистых токов и ограничивает скорость нарастания аварийного тока через тиристоры при коротком замыкании на стороне выпрямленного тока.

Рассчитав необходимую индуктивность для выполнения каждой из этих функций, следует принять максимальную. Поскольку требования к зоне прерывистых токов и к ограничению ТКЗ в задании не сформулированы, то рассчитаем только индуктивность, требуемую для сглаживания. В дальнейшем при расчете внешних характеристик определим зону прерывистых токов.

9.2. При расчете индуктивности сглаживающего реактора исходят из допустимого уровня пульсаций выпрямленного тока при установившейся нагрузке и номинальном напряжении на двигателе. В настоящее время отсутствуют достаточно обоснованные данные по допустимой амплитуде пульсаций выпрямленного тока. Обычно действующие значения основной гармоники пульсаций выбираются в пределах 2...15% номинального тока двигателя

В зависимости от мощности, диапазона регулирования скорости и допустимого сужения зоны темной коммутации [1, 8, 17]. В курсовой работе коэффициент пульсации определен заданием.

9.3. Первая гармоника пульсаций имеет максимальную величину и хуже всего фильтруется, поэтому остальные гармоники не рассматриваются. Амплитуда первой гармоники пульсаций при заданном номинальном напряжении на двигателе  $U_H$  определяется углом управления  $\alpha$ , который можно определить, преобразовав уравнение внешней характеристики:

$$\cos \alpha = \frac{U_H + \left[ \frac{3}{\pi} X_a + 2r_a + 2r_T \right] I_y + 2U_T(\cos \alpha)}{U_{d0}} \quad (9.1)$$

В формуле не учтено падение напряжения на активном сопротивлении реактора, т.к. оно еще не известно. Допускаемая погрешность мала, и ею можно пренебречь.

В трехфазной мостовой схеме амплитудное значение первой гармоники выпрямленного напряжения  $U_{dm(1)}$  связано с его средним значением  $U_{d0}$  и углом  $\alpha$  соотношением [10]

$$U_{dm(1)} = \frac{2 \cos \alpha}{m^2 - 1} \sqrt{1 + m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha} U_{d0} \quad (9.2)$$

В формулах (9.1) и (9.2) правильное подставлять максимальное значение  $U_{d0 \max}$  при максимальном напряжении в сети:

$$U_{d0 \max} = 2,34 K_c \max U_{2H} \quad (9.3)$$

9.4. Необходимая индуктивность цепи выпрямленного тока  $L_d$  может быть определена по напряжению  $U_{dm(1)}$  и заданному коэффициенту пульсаций  $q$ :

$$L_d = \frac{U_{dm(1)}}{\pi \omega q I_y} \quad (9.4)$$

Если рассчитанная индуктивность меньше индуктивности якоря  $L_y$ , то установка реактора не нужна. Если больше, то требуется дополнительный реактор с индуктивностью

$$L > L_d - L_y \quad (9.5)$$

Номинальный ток реактора  $I_{LH}$  должен быть больше тока  $I_y$ .

Реактор можно выбрать по каталогам [12, 13] или по Приложению 4 в соответствии с током  $I_y$ .

Реактор необходимо проверить на допустимость перегрузок:

$$I_{II} < 2,5 I_{IIH} ; \quad t_{II} < t_{IIH} . \quad (9.6)$$

После этого уточняются суммарная индуктивность и суммарное индуктивное сопротивление  $X_d$  в цепи выпрямленного тока.

9.5. Поскольку теперь выбраны все элементы, можно окончательно проверить, дает ли выпрямитель на выходе заданное напряжение  $U_H$  при токе двигателя  $I_y$  и минимальном напряжении сети:

$$U = 2,34K_o \min U_{2H} - \left[ \frac{3}{\pi} X_d + 2r_a + 2r_T + r_L \right] I_y - 2U_T(\text{то}), \quad (9.7)$$

9.6. Пример расчета.

9.6.1. Выпрямленное напряжение при максимальном напряжении в сети

$$U_{d\text{сmax}} = 2,34K_o \max U_{2H} = 2,34 * 1,1 * 118,4 = 305 \text{ В} .$$

9.6.2. Определим угол  $\alpha$  при номинальном напряжении на двигателе  $U_H$ , токе  $I_y$  и максимальном напряжении сети (падение напряжения на активном сопротивлении реактора пока неизвестно, но оно мало, и им можно пренебречь. Вместо  $r_T$  подставим половинное значение, т.к. два тиристора включены параллельно:

$$\cos \alpha = \frac{U_H + \left[ \frac{3}{\pi} X_d + 2r_a + 2r_T \right] I_y + 2U_T(\text{то})}{U_{d\text{сmax}}} =$$

$$= \frac{220 + \left[ \frac{3}{\pi} 0,0121 + 2 * 0,0039 + 2 * 0,000215 \right] 592 + 2 * 1,0}{305} = 0,7661$$

$\alpha = 40$  град.эл.

9.6.3. Амплитуда первой гармоники пульсаций напряжения

$$U_{d\text{m}(1)} = \frac{2 \cos \alpha}{m^2 - 1} \sqrt{1 + m^2 \text{tg}^2 \alpha} U_{d\text{сmax}} =$$

$$= \frac{2 * 0,766}{6^2 - 1} \sqrt{1 + 6^2 * 0,838^2} * 305 = 68,4 \text{ В} .$$

#### 9.6.4. Необходимая индуктивность в цепи выпрямленного тока

$$L_d = \frac{U_{dm(1)}}{\pi \omega I_y} = \frac{68,4}{6 * 314 * 0,02 * 592} = 3,06 * 10^{-3} \text{ Гн} .$$

#### 9.6.5. Расчетная индуктивность сглаживающего реактора

$$L = L_d - L_{я} = 3,06 * 10^{-3} - 1,81 * 10^{-3} = 1,25 * 10^{-3} \text{ Гн} .$$

9.6.6. По каталогу [13] или по Приложению П4 выбираем сглаживающий реактор типа ФРОС-1000/0,5 на номинальный ток 800 А с индуктивностью  $L_L = 2,3$  мГн и активным сопротивлением обмотки  $r_L = 4,7$  мОм.

9.6.7. Допустимый ток реактора в течение 10 с при перегрузке 150%

$$I_{пдоп} = 2,5 I_{LN} = 2,5 * 800 = 2000 \text{ А} .$$

Реактор выдержит перегрузку, т.к. ток перегрузки двигателя ( $I_{II} = 1480$  А) меньше по величине и по длительности.

#### 9.6.8. Общая индуктивность в цепи выпрямленного тока

$$L_d = L_{я} + L_L = 1,81 * 10^{-3} + 2,3 * 10^{-3} = 4,11 * 10^{-3} \text{ Гн} ,$$

а индуктивное сопротивление

$$X_d = \omega L_d = 314 * 4,11 * 10^{-3} = 1,29 \text{ Ом} .$$

9.6.9. Напряжение на двигателе при минимальном напряжении сети и токе  $I_y$

$$U = 2,34 K_c \min U_{2н} - \left( \frac{3}{\pi} X_a + 2r_a + 2r_r + r_L \right) I_y - 2U_{r(то)} =$$

$$= 2,34 * 0,9 * 116,4 - \left( \frac{3}{\pi} 0,0121 + 2 * 0,0039 + 2 * \right.$$

$$\left. * 0,000215 + 0,0047 \right) * 592 - 2 * 1,0 = 232,9 \text{ В} .$$

Напряжение  $U > U_M$ , следовательно, выпрямитель обеспечивает заданный режим.

## 10. ВНЕШНИЕ, РЕГУЛИРОВОЧНЫЕ И ЭНЕРГЕТИЧЕСКИЕ ХАРАКТЕРИСТИКИ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

10.1. Внешняя характеристика преобразователя - это зависимость напряжения на зажимах постоянного тока от тока нагрузки при постоянном угле управления  $U_d = f(I_d)$  при  $\alpha = \text{const}$ . При работе преобразователя на двигатель интерес представляет напряжение непосредственно на его зажимах, поэтому под внешней характеристикой будем понимать зависимость  $U = f(I_d)$  при  $\alpha = \text{const}$ . Эти две характеристики отличаются на небольшую величину падения напряжения на активном сопротивлении обмотки сглаживающего реактора.

Внешняя характеристика имеет различный характер в режиме непрерывного и прерывистого тока.

10.2. Для режима непрерывного тока внешняя характеристика  $U = f(I_d)$  с достаточной точностью выражается уравнением

$$U = U_{d0} \cos \alpha - p_T U_T(\text{то}) - \left[ \frac{m}{2\pi} X_a + p_T (\gamma_a + \gamma_T) + \gamma_L \right] I_d. \quad (10.1)$$

Здесь  $p_T$  - число групп вентилях (в трехфазной мостовой схеме  $p_T = 2$ , а в трехфазной нулевой  $p_T = 1$ );

$$U_{d0} = K_U E_2, \quad (10.2)$$

где  $E_2$  - ЭДС на вторичной стороне трансформатора,  $E_2 = U_2$  на холостом ходу,  $K_U$  - коэффициент схемы. Для трехфазных схем

$$K_U = \sqrt{2p_T - 1} \frac{\sqrt{2} \sin \frac{\pi}{m}}{\frac{\pi}{m}}, \quad (10.3)$$

откуда для трехфазной нулевой схемы  $K_U = 1,17$  а для трехфазной мостовой -  $K_U = 2,34$ .

При расчете внешней характеристики может потребоваться построить ее так, чтобы при токе  $I_d$  напряжение  $U$  было равно заданному значению  $U_d$ . В этом случае, подставив  $U = U_d$ , можно из формулы (10.1) найти угол  $\alpha_d$ , для которого и строится нужная характеристика.

10.3. В режиме прерывистого тока уравнение внешней характеристики может быть получено на основе решения системы

трансцендентных уравнений [2]. Эта система справедлива при углах проводимости  $\lambda > 0$  для углов запаздывания  $\alpha > \alpha_{\min}$ . При подаче узкого управляющего импульса с углом  $\alpha < \alpha_{\min}$ , когда мгновенное значение ЭДС трансформатора меньше противо-ЭДС и напряжение на аноде тиристора отрицательно, включение невозможно. При подаче широких управляющих импульсов с углом  $\alpha < \alpha_{\min}$  тиристоры будут включаться при угле  $\alpha_{\min}$ .

Система уравнений для расчета внешней характеристики в режиме прерывистого тока для  $m$ -пульсной схемы:

$$\left. \begin{aligned} E_3 &= E_m \cos \theta \frac{\sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \theta + \lambda\right) - \sin\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} - \theta\right) e^{-\lambda \frac{r_L}{X_L}}}{I - e^{-\lambda \frac{r_L}{X_L}}} \\ I_d &= \frac{m}{2\pi} \frac{E_m}{r_L} \left[ \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m}\right) - \cos\left(\alpha + \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} + \lambda\right) \right] - \frac{E_3 \lambda}{E_m} \end{aligned} \right\} \quad (10.4)$$

Решив систему трансцендентных уравнений (10.4) можно найти  $E_3$  для заданного значения  $I_d$  и рассчитать внешние характеристики:

$$U_d = E_3 - n_T U_T(\tau_0) + (r_A + r_L) I_d, \quad (10.5)$$

или 
$$U = E_3 - n_T U_T(\tau_0) + r_A I_d. \quad (10.6)$$

Формулы справедливы как при выпрямлении при  $\alpha > \alpha_{\min}$ , так и при инвертировании

$$\alpha_{\min} = \arcsin \frac{E_3}{E_m} - \left( \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{m} \right). \quad (10.7)$$

В формулах (10.3)...(10.7)

$E_3$  - эквивалентная ЭДС нагрузки;

$E_m$  - амплитуда ЭДС на вторичной стороне трансформатора;

$r_L$  - суммарное активное сопротивление в цепи преобразователя;

$X_L$  - суммарное индуктивное сопротивление в цепи преобразователя при частоте 50 Гц.

При этом

$$E_3 = E + n_T U_T(\tau_0); \quad (10.8)$$

$$E_m = \left\{ \begin{array}{l} E_2 \sqrt{6} \quad \text{для трехфазной мостовой схемы;} \\ E_2 \sqrt{2} \quad \text{для трехфазной нулевой схемы;} \end{array} \right\} \quad (10.9)$$

$$r_{\Gamma} = n_{\Gamma}(r_a + r_T) + r_L + r_R; \quad (10.10)$$

$$X_{\Gamma} = n_{\Gamma}X_a + X_d; \quad (10.11)$$

$$\theta = \operatorname{arctg} \frac{X_{\Gamma}}{r_{\Gamma}}. \quad (10.12)$$

Здесь  $E$  - противо-ЭДС двигателя.

При переходе от непрерывного к прерывистому режиму уменьшается угол проводимости вентилей  $\lambda$ . В трехфазной мостовой схеме при переходе от непрерывного к прерывистому режиму импульс тока через вентиль распадается на два отдельных импульса, разделенных паузой (рис. 10.1). В дальнейшем под  $\lambda$  будем понимать угол, в течение которого ток проходит через вентиль не прерываясь.

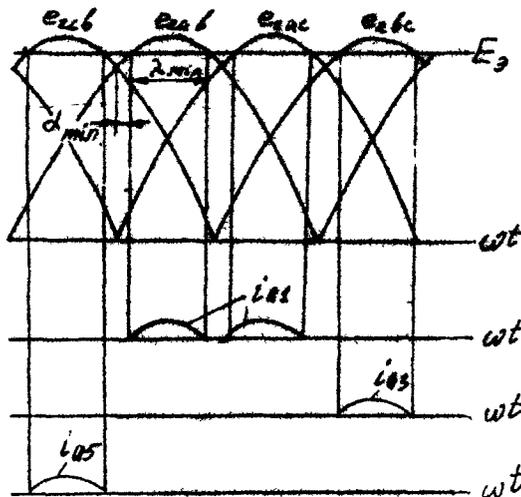


Рис.10.1 Диаграммы линейных ЭДС и токов вентилях при работе трехфазной мостовой схемы выпрямления на противо-ЭДС  $E_2$  в режиме прерывистого тока при отсутствии индуктивности в цепи нагрузки

При таком понимании  $\lambda$  его граничное значение определяется формулой

$$\lambda_{гр} = \frac{2\pi}{m}. \quad (10.13)$$

Область существования  $\lambda$  в соответствии с рис.10.1:

$$\left. \begin{aligned} \lambda_{min} < \lambda < \frac{2\pi}{m} & \quad \text{при } \alpha < \alpha_{min} \\ 0 < \lambda < \frac{2\pi}{m} & \quad \text{при } \alpha > \alpha_{min} \end{aligned} \right\} \quad (10.14)$$

При этом согласно рис.10.1  $\lambda_{min} = 2 \left[ \frac{\pi}{m} - \alpha_{min} \right]$ .

На холостом ходу при  $\alpha > \alpha_{min}$  угол  $\lambda = 0$  и в уравнениях (10.4) появляются неопределенности. Поэтому для тока холостого хода расчет ведется по формуле

$$U = E_m \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{m} \right) - n_T U_T(t_0) \quad \text{при } \frac{\pi}{m} < \alpha < \pi. \quad (10.15)$$

При  $\alpha < \alpha_{min}$  и коротких управляющих импульсах, как видно из рис.10.1 холостой ход невозможен и на внешней характеристике появляется минимально возможных ток  $I_{dmin}$ . Этот ток может быть найден при решении системы трансцендентных уравнений (10.4).

Граничный ток  $I_{dгр}$  определяется при подстановке в уравнения (10.3), (10.4) значения  $\lambda = \lambda_{гр} = \frac{2\pi}{m}$ .

10.4. В мощных преобразователях можно проводить расчет внешних характеристик приближенным способом, пренебрегая активными сопротивлениями. При этом для режима непрерывного тока применимо уравнение внешней характеристики (10.1) при подстановке  $r_a = 0$ ,  $r_T = 0$ ,  $r_L = 0$ .

Граничный ток  $I_{dгр}$  можно определить по приближенной формуле, приведенной в работе [18].

$$I_d = \frac{U_{dc}}{X_C} \left[ 1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right] \sin \alpha, \quad (10.16)$$

где  $U_{dc}$  - напряжение идеального холостого хода.

Напряжение, соответствующее граничному току, определяется по

уравнению внешней характеристики для режима непрерывного тока.

Расчет внешних характеристик в режиме прерывистого тока при  $\alpha > \alpha_{\min} = \frac{\pi}{m}$  можно выполнить приближенным способом по двум точкам. Напряжение на холостом ходу определяется по формуле (10.15), а вторая точка соответствует граничному току.

При  $\alpha < \frac{\pi}{m}$  и широких управляющих импульсах можно приближенно принимать  $I_{d\min} = 0$  и напряжение на холостом ходу определяется по формуле (18)

$$U = E_m - n_T U_T(\alpha_0). \quad (10.17)$$

При выполнении курсовой работы расчет внешней характеристики приближенным способом выполняется для двух значений угла  $\alpha$  (для выпрямительного и инверторного режима). Результаты приближенного упрощенного расчета и расчета по более точным формулам, сделанного с помощью ЭЦВМ, нужно сравнить.

10.5. В инверторном режиме следует определить максимально-допустимый по условиям коммутации угол управления  $\alpha_{\max}$  и рассчитать ограничительную характеристику:

$$\alpha_{\max} = \arccos \left[ \frac{2X_a I_d}{\sqrt{6} E_2} - \cos \delta_{\min} \right]. \quad (10.18)$$

где  $\delta_{\min}$  - минимально-допустимый угол выключения, определяемый как временем выключения тиристора, так и несинусоидальностью напряжения сети, его колебаниями, несимметрией управляющих импульсов и запасом, требуемым по условиям надежности. В курсовой работе следует принять  $\delta_{\min} = 15^\circ$ .

Уравнение ограничительной характеристики, полученное из формул (10.1), (10.2), (10.18), для общего случая трехфазной схемы преобразователя

$$U_{\max} = -U_{d0} \cos \delta_{\min} - n_T U_T(\alpha_0) - \left[ \left( \frac{I}{2} - \sqrt{\frac{2n_T - I}{3}} \right) \frac{m}{\pi} + X_a + n_T (r_a + r_T) + r_L \right] I_d. \quad (10.19)$$

Для частного случая трехфазной мостовой схемы ( $m = 6$ ,  $n_T = 2$ ) уравнение (10.19) приводится к виду

$$U_{\max} = -U_{d0} \cos \delta_{\min} - n_T U_T(\tau_0) + \left[ \frac{m}{2\pi} X_a - n_T(r_a + r_T) - r_L \right] I_d. \quad (10.20)$$

В мощных преобразователях при приближенном расчете и допущении  $r_a = 0$ ,  $r_T = 0$ ,  $r_L = 0$  формула (10.20) соответственно упрощается [15].

При выполнении курсовой работы необходимо рассчитать ограничительную характеристику по приближенным формулам и результаты расчета нанести на графики, полученные с помощью ЭЦВМ.

10.6. Регулировочная характеристика преобразователя  $U = f(\alpha)$  при  $I_d = \text{const}$  может быть построена для непрерывного режима по уравнению (10.1), а для прерывистого - путем решения системы трансцендентных уравнений (10.4). При  $\alpha > \frac{\pi}{m}$  она может быть построена для любых токов, а при  $\alpha < \frac{\pi}{m}$  только при токах  $I_d > I_{d\min}$ . Регулировочная характеристика может частично проходить в области непрерывного и частично прерывистого режима. Если  $I_d > I_{d\text{грmax}}$ , вся характеристика проходит в области непрерывного режима.

10.7. Регулировочные характеристики системы управления  $\alpha = f(U_{\text{упр}})$  могут быть рассчитаны и построены по уравнениям [16] для косинусоидального опорного напряжения

$$\alpha = \arccos \frac{U_{\text{упр}} - U_{\text{см}}}{U_{\text{оп max}}}, \quad (10.21)$$

для линейного опорного напряжения с длительностью рабочего участка равной  $\pi$

$$\alpha = \frac{\pi}{2} - \frac{\pi}{2U_{\text{оп max}}} (U_{\text{упр}} - U_{\text{см}}), \quad (10.22)$$

Здесь  $U_{\text{упр}}$  - напряжение управления;

$U_{\text{см}}$  - напряжение смещения обеспечивающее выбор величины начального угла  $\alpha_0$ , то есть угла управления  $\alpha$  соответствующего нулевому напряжению управления. Для идеального преобразователя в непрерывном режиме  $\alpha_0 = 90^\circ$ , при этом  $U_{\text{см}} = 0$ .

Регулировочные характеристики преобразователя вместе с системой управления  $U = f(U_{\text{упр}})$  могут быть построены для непрерывного режима по уравнениям (10.21) или (10.22) и (10.1), а для прерывистого по уравнениям (10.21) или (10.22) и (10.4). Однако,

такие расчеты целесообразно проводить только с применением ЭЦВМ. Студенту представляется возможность построить приближенную характеристику, учитывая уравнение регулировочной характеристики идеального преобразователя для непрерывного режима ( $U = U_{d0} \cos \alpha$ ) и сравнить ее с рассчитанными с помощью ЭЦВМ, нанеся ее на те же графики.

10.8. В двухкомплектном реверсивном преобразователе при раздельном управлении все характеристики, комплектов аналогичны характеристикам однокомплектного, но располагаются в других квадрантах (13, 181. Особое значение при этом имеет согласование регулировочных характеристик комплектов преобразователя  $U = f(\alpha)$  и регулировочных характеристик комплектов преобразователя вместе с системой управления  $U = f(U_{упр})$  (9, 181). Для правильного согласования необходимо выбрать начальный угол  $\alpha_0$  и соответственно напряжение смещения  $U_{см}$  таким образом, чтобы при  $U_{упр} = 0$ , напряжение  $U$  на якоре двигателя было мало и, протекающий под его влиянием ток  $I$  не вызывал вращения (трогания) якоря. Ток трогания  $I_{тр}$  можно выбрать в пределах  $0,01 \dots 0,05 I_{н}$ . Тогда напряжение, при котором происходит трогание

$$U_{тр} = (0,01 \dots 0,05) I_{н} R_{я} . \quad (10.23)$$

По этому напряжению, пользуясь регулировочной характеристикой преобразователя для соответствующего тока  $I_{тр}$  можно выбрать  $\alpha_0$ , а затем по регулировочной характеристике системы управления  $U_{см}$ .

При выборе угла  $\alpha_0$  необходимо также учитывать, что если  $\alpha_0 = 90^\circ$ , то в режиме непрерывного тока характеристики комплектов практически совпадают, что обеспечивает высокое качество регулирования. Однако, в режиме прерывистого тока характеристики неоднозначны (рис.10.2). Если, например, ток нагрузки комплекта "В" был равен 0 (точка а на рис.10.2, а) и произошло переключение комплектов, то при неизменном напряжении управления группа "Н" откроется с углом  $\alpha = 60^\circ$  и произойдет скачек тока под действием напряжения равного половине напряжения холостого хода. При  $\alpha_0 = 105^\circ$  бросок тока практически будет отсутствовать (рис.10.2, в). Расширение зоны нечувствительности затягивает время пререклечения, ухудшает динамику.

Поэтому угол начального согласования нужно выбрать из компромиссных соображений. В системах с повышенными требованиями к качеству регулирования устанавливает  $\alpha_0 = 95 \dots 100^\circ$ , а в массовом электроприводе  $\alpha_0 = 105 \dots 115^\circ$  [9].

10.9. Расчет энергетических характеристик преобразователя требует определения коэффициента полезного действия (КПД)  $\eta$ , коэффициента несинусоидальности тока  $\nu$ ,  $\cos \phi$  и коэффициента мощности  $\chi$ .

КПД преобразователя может быть определен по формулам [15]:  
в выпрямительном режиме

$$\eta = \frac{P_{\text{я}}}{P_{\text{я}} + \Delta P}, \quad (10.24)$$

в инверторном режиме

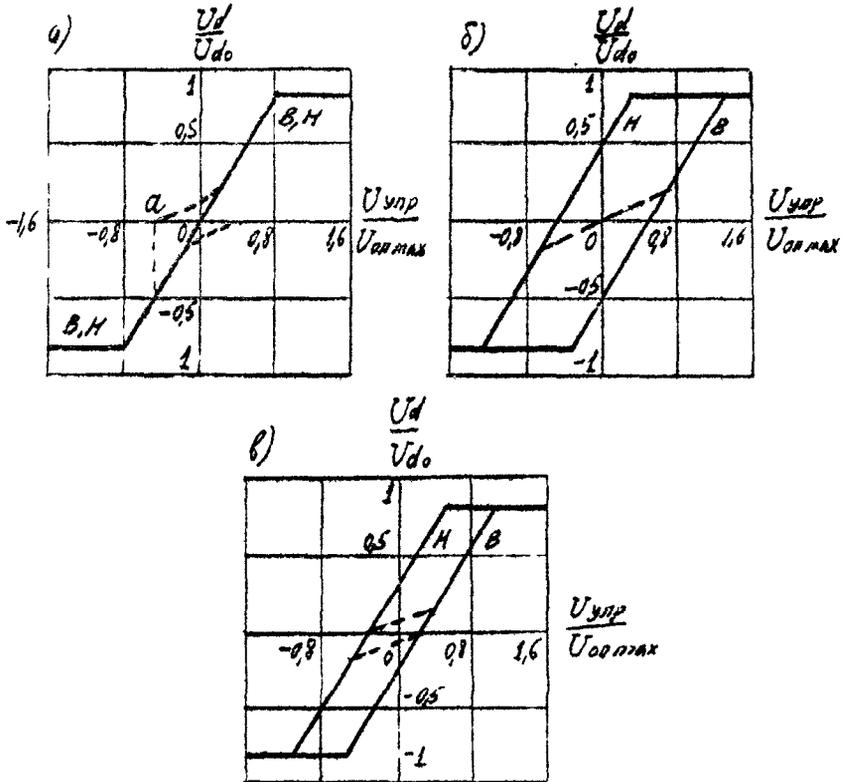


Рис.10.2. Регулировочные характеристики двухкомплектного реверсивного преобразователя (вместе с системой управления) при различных начальных углах согласования: а)  $\alpha_0 = 90^\circ$ ; б)  $\alpha_0 = 120^\circ$ ; в)  $\alpha_0 = 105^\circ$  [9].

$$\eta = \frac{P_{\text{я}} - \Delta P}{P_{\text{я}}}, \quad (10.25)$$

где  $P_{\text{я}}$  - мощность, подводимая или снимаемая с якоря электрической машины;

$\Delta P$  - суммарные потери в преобразователе и трансформаторе.

После преобразований получены расчетные формулы для режима выпрямления:

$$\eta = \frac{UI_d}{\left[ U + n_{\Gamma} U_{\Gamma}(t_0) \right] I_d + \left[ n_{\Gamma} (r_a + r_{\Gamma}) + r_L \right] I_d^2 + P_{\text{xx}}}; \quad (10.26)$$

для режима инвертирования

$$\eta = \frac{\left[ |U| - n_{\Gamma} U_{\Gamma}(t_0) \right] I_d - \left[ n_{\Gamma} (r_a + r_{\Gamma}) + r_L \right] I_d^2 - P_{\text{xx}}}{|U| I_d}. \quad (10.27)$$

Расчет коэффициента искажений  $v$ ,  $\cos \varphi$ , коэффициента мощности  $\chi$  можно выполнить по формулам [10].

Угол сдвига между первыми гармониками тока и напряжения

$$\varphi \cong \alpha + \frac{\gamma}{2}, \quad (10.28)$$

$$\cos \varphi \cong \left| \cos \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \right|, \quad (10.29)$$

где угол коммутации  $\gamma$  определяется по формуле

$$\gamma = \arccos \left[ \cos \alpha - \frac{2X_a I_d}{E_2 \sqrt{6}} \right] - \alpha. \quad (10.30)$$

Коэффициент искажений  $v$  можно определить по формуле

$$v = \frac{m}{\pi} \sin \left( \frac{\pi}{m} \right) \cdot \frac{I}{\sqrt{I - 2m \sin^2 \left( \frac{\pi}{m} \right) + P(\gamma, \alpha)}}, \quad (10.31)$$

где

$$F(\gamma, \alpha) = \left\{ \gamma \sin^2 \frac{\gamma}{2} - (\gamma - \sin \gamma) \left[ 1,5 - \sin^2 \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \right] \right\};$$

$$: \left[ 4\pi \sin^2 \frac{\gamma}{2} - \sin^2 \left( \alpha + \frac{\gamma}{2} \right) \right]. \quad (10.32)$$

Коэффициент мощности

$$\chi = v \cos \varphi. \quad (10.33)$$

10.10. На основе математического описания, приведенного в п.п. 10.1...10.9 разработана программа расчета внешних, регулировочных, энергетических и ограничительных характеристик преобразователя. При этом программа обеспечивает:

- 1) Расчет и построение внешних и ограничительной характеристик  $U = f(I)$  при постоянстве угла управления  $\alpha$ . Угол  $\alpha$  может быть задан непосредственно, либо может быть задано требуемое напряжение  $U_3$  при определенном токе, для которого отыскивается требуемый угол  $\alpha$ ;
- 2) Расчет и построение регулировочных характеристик преобразователя  $U = f(\alpha)$  при постоянстве тока нагрузки  $I$ ;
- 3) Расчет и построение регулировочных характеристик, системы управления преобразователя и регулировочных характеристик преобразователя вместе с системой управления для различных форм спорных напряжений при заданных токах нагрузки  $I$  для однокомплектного и двухкомплектного преобразователей;
- 4) Расчет и построение энергетических характеристик преобразователя  $\eta = f(I)$ ;  $v = f(I)$ ;  $\cos \varphi = f(I)$ ;  $\chi = f(I)$  при постоянстве угла управления  $\alpha$  (либо при задании напряжения при определенном токе);
- 5) Расчет и построение энергетических характеристик преобразователя  $\eta = f(U)$ ;  $v = f(U)$ ;  $\cos \varphi = f(U)$ ;  $\chi = f(U)$  при постоянстве тока  $I$ .

Инструкция для пользователей приведена в Приложении ПБ.

10.11. При построении внешних характеристик рекомендуется произвести расчеты и построения для пяти значений угла управления  $\alpha$ , соответствующих заданному напряжению на двигателе  $U_3$ , а также значениям  $0,5U_3, 0, -0,5U_3, -U_3$ . Для лучшего представления внешние характеристики могут быть построены в разных масштабах для начального участка (зона прерывистых токов) и остальной области.

Регулировочные характеристики нужно построить для заданного тока  $I_y$ , тока перегрузки  $I_{II}$ , минимально допустимого тока  $I_{dmin}$  и максимального значения граничного тока  $I_{dгрmax}$ . Минимально допустимый ток  $I_{dmin}$  должен быть больше тока удержания тиристора.

Энергетические характеристики для КПД в функции тока  $\eta = f(I)$  строятся для тех же заданных значений напряжений при токе  $I_y$ , что и внешние характеристики.

Энергетические характеристики для КПД, коэффициента мощности  $\lambda$ , коэффициента несинусоидальности тока  $\gamma$ ,  $\cos \phi$  в функции тока строятся на общем графике для угла  $\alpha$ , соответствующего номинальному напряжению на двигателе при токе  $I_y$  или для угла  $\alpha$ , заданного преподавателем.

Энергетические характеристики для этих же показателей в функции напряжения строятся при постоянном токе равном  $I_y$ .

Для двухкомплектного преобразователя регулировочные характеристики преобразователя вместе с системой управления строятся для двух значений  $\alpha_0$  (например для  $\alpha_0 = 90^\circ$  и  $\alpha_0$ , соответствующего рассчитанному напряжению трогания).

10.12. На основании проведенных расчетов следует составить таблицу напряжений и энергетических показателей при токе  $I_y$  для выпрямительного и инверторного режима и оценить соответствие преобразователя заданию.

10.13. При выполнении работы с помощью ЭВМ может быть проведено исследование влияния изменения параметров на вид характеристик преобразователя. Например, можно исследовать: как изменятся внешние, ограничительная, регулировочные и энергетические характеристики, если а) убрать сглаживающий реактор; б) увеличить индуктивность рассеяния трансформатора; в) изменить напряжение в сети на  $\pm 10\%$ ; г) применить трехфазную нулевую схему (одновременно увеличив вдвое вторичное напряжение) и т.д. Исследование выполняется по индивидуальному заданию преподавателя.

10.14. Пример расчета.

10.14.1. Расчет характеристик выполняется в основном с помощью ЭЦВМ. Расчеты выполнены для следующих исходных данных:

Печать данных и их изменение	
Выбрана схема:	Трехфазная мостовая
Параметры трансформатора:	$U_1=220.00$ В $R_{\text{хл}}=800.00$ Вт $X_{\text{л}}=0.0121$ Ом $K_{\text{т}}=1.8500$ $R_{\text{а}}=0.0039$ Ом
Параметры вентиля:	$U_0=1.00$ В $R_{\text{т}}=0.00021$ Ом $D=15.0$ гр
Параметры реактора:	$L_{\text{р}}=0.0023$ Гн $R_{\text{р}}=0.0047$ Ом
Параметры нагрузки:	$L_{\text{я}}=0.00181$ Гн $R_{\text{я}}=0.0099$ Ом $I_{\text{y}}=572.0$ А $K_{\text{п}}=2.5$
Параметры системы управления:	$U_{\text{сн}}=0.00$ В $U_{\text{опмакс}}=10.00$ В, осциллоидальное опорное напряжение

10.14.2. Расчеты внешних характеристик выполнены для углов  $\alpha = \text{const}$ , обеспечивающих при номинальном напряжении в сети и потребляемом двигателем токе  $I_y$  напряжение на двигателе  $U_3$  220, 110, 0, -110 и -220 В. В табл.10.1 приведена распечатка полученных результатов для одного значения  $U_3$ .

Таблица 10.1

Внешние и ограничительная характеристики при  $U_3 = 220.0$  В,  $A = 31.81$  гр

N	Ток, А	Напр. преобр., В	Напр. двиг., В	Напр.огран., В	Макс. угол, гр.
1	0.01	267.71	267.70	-270.79	164.988
2	1.49	267.40	267.39	-270.79	164.973
3	2.98	258.92	258.91	-270.79	164.959
4	4.47	252.46	252.44	-270.79	164.944
5	5.95	247.08	247.05	-270.79	164.929
6	7.44	242.37	242.33	-270.80	164.915
7	8.92	238.13	238.09	-270.80	164.900
8	10.40	234.26	234.21	-270.80	164.885
9	10.41	234.25	234.20	-270.80	164.885
10	220.35	230.10	229.07	-271.09	162.935
11	430.29	225.95	223.93	-271.37	161.181
12	640.23	221.80	218.79	-271.66	159.572
13	850.17	217.65	213.65	-271.95	158.076
14	1060.12	213.50	208.51	-272.23	156.672
15	1270.06	209.35	203.38	-272.52	155.343
16	1480.00	205.19	198.24	-272.81	154.078

Графические зависимости приведены на рис.10.3, 10.4 с разными масштабами тока. Видны области прерывистого и непрерывного тока. Граничный ток при  $U_3 = 220$  В равен 10,4 А. На рис.10.3, 10.4 приведена также ограничительная характеристика.

10.14.3. Расчет участка внешней и ограничительной характеристик приближенным методом при пренебрежении активными сопротивлениями.

Для напряжения  $U_3$ , равного 220 В, расчетом с помощью ЭЦВМ определен угол  $\alpha = 31,8$  град.эл. Для этого угла произведен расчет.

Напряжение на холостом ходу в прерывистом режиме с учетом формул (10.9 и 10.15)

$$U = E_m \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{m}\right) - n_T U_T(\tau_0) = 118,4 \sqrt{6} \cos(31,8^\circ - 30^\circ) - 2 \cdot I = 288 \text{ В.}$$

Напряжение на холостом ходу в идеальном выпрямителе в непрерывном режиме

$$U_{до} = 2,34 U_2 = 2,34 \cdot 118,4 = 277 \text{ В.}$$

Тогда граничный ток в соответствии с формулой (10.16)

Внешние и ограничительная характеристики

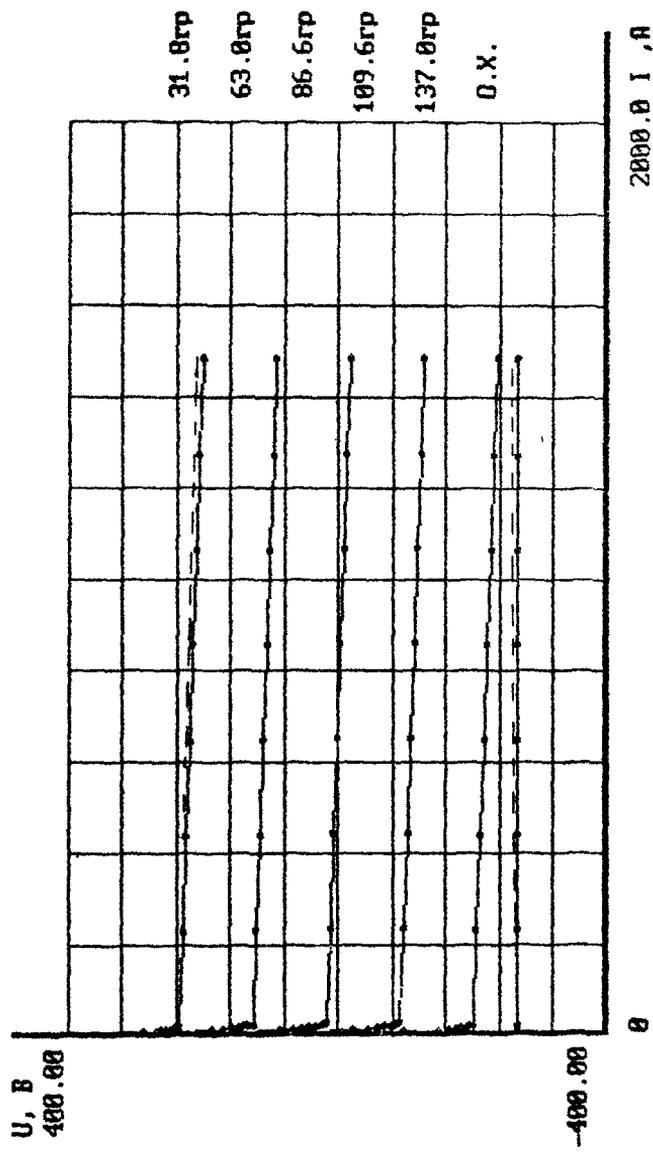


Рис. 10.3 Внешние и ограничительная характеристики, построенные с помощью ЭЦМ и полученные приближенным расчетом

Внешние и ограничительная характеристики

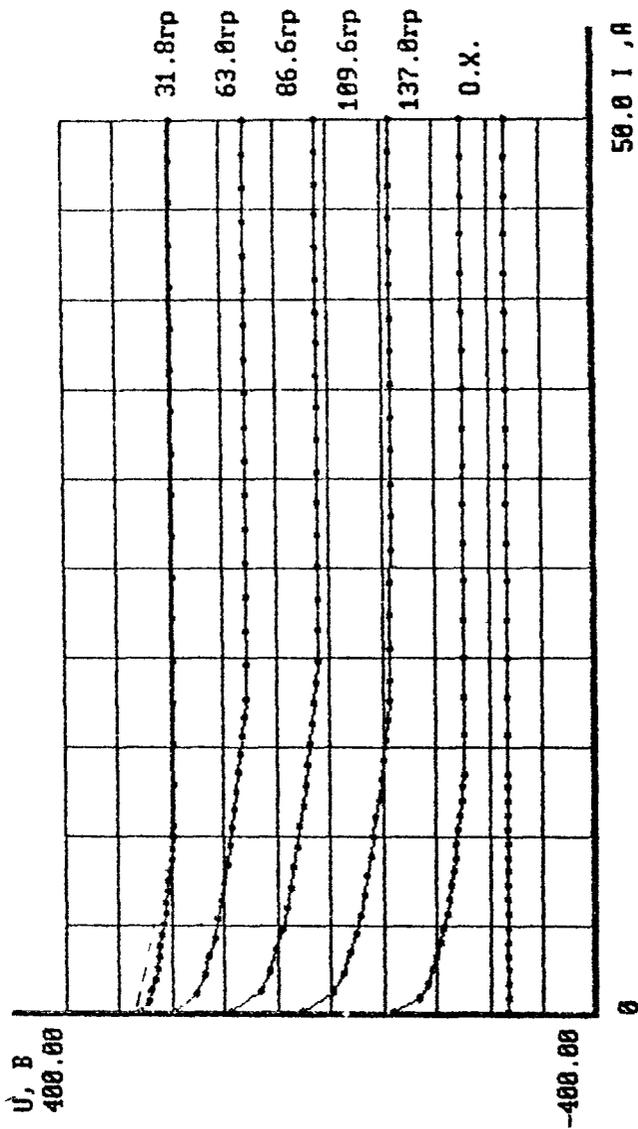


Рис. 10.4 Внешние и ограничительная характеристики, полученные с помощью ЭЦМ в большем масштабе по току и приближенная внешняя характеристика в области прерывистого тока

$$I_{dгр} = \frac{U_{dо}}{X_{\Sigma}} \left\{ 1 - \frac{\pi}{m} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m} \right\} \sin \alpha =$$

$$= \frac{277 \left[ 1 - \frac{\pi}{6} \operatorname{ctg} 30^{\circ} \right]}{1,29 + 2 * 0,0121} * 0,516 = 10,2 \text{ А} .$$

Уравнение внешней характеристики в непрерывном режиме с учетом формул (10.1)...(10.3) при пренебрежении активными сопротивлениями

$$U = 2,34U_{2H} \cos \alpha - 2U_{T(ТО)} - \frac{3X_a}{\pi} I_d .$$

тогда при  $I_d = I_{dгр}$

$$U = 2,34 * 118,4 * 0,85 - 2 * I - \frac{3 * 0,0121}{\pi} * 10,2 = 233,4 \text{ В};$$

при  $I_d = I_y$

$$U = 2,34 * 118,4 * 0,85 - 2 * I - \frac{3 * 0,0121}{\pi} * 592 = 226,7 \text{ В} .$$

Уравнение ограничительной характеристики при пренебрежении активными сопротивлениями с учетом формулы (10.20)

$$U_{max} = -2,34U_{2H} \cos \delta_{min} - 2U_{T(ТО)} + \frac{3}{\pi} X_a I_d .$$

тогда при  $I_d = 0$

$$U_{max} = -2,34 * 118,4 * 0,966 - 2 * I = -269,6 \text{ В};$$

при  $I_d = I_y$

$$U_{max} = -2,34 * 118,4 * 0,966 - 2 * I + \frac{3 * 0,0121}{\pi} * 592 = -262,8 \text{ В} .$$

На рис.10.3,10.4 штриховой линией показаны характеристики, построенные приближенным методом. Их сравнение с характеристиками, построенными более точным методом, позволяет оценить погрешность и допустимость применения приближенных расчетов.

10.14.4. Расчеты регулировочных характеристик преобразователя выполнены для четырех значений тока  $I_d$ :  $I_d = I_{dmin} = 5 \text{ А}$ ,  $I_d = I_{dгрmax}$ ,  $I_d = I_y$ ,  $I_d = I_{II}$ . За  $I_{dmin}$  можно принять ток в несколько раз больший тока удержания тиристора или ток трогания якоря двигателя. Распечатка результатов, полученных при расчете

регулирующей характеристики при  $I_d = I_y$  приведена в табл.10.2, а графические зависимости на рис.10.5.

Результаты расчета регулирующей характеристики системы управления при косинусоидальном опорном напряжении приведены в табл.10.3.

Расчеты регулировочных характеристик преобразователя вместе с системой управления  $U = f(U_{упр})$  выполнены для тех же значений тока  $I_d$ , что и характеристики преобразователя, напряжение смещения  $U_{см}$  принято равным 0. Результаты расчетов при  $I_d = I_y$  приведены в виде графических зависимостей для всех токов на рис.10.6.

10.14.5. Расчет энергетических характеристик для КПД в функции нагрузки выполнен для тех же значений заданного напряжения  $U_3$ , что и внешние характеристики. Графические зависимости приведены на рис.10.7.

Расчет энергетических характеристик КПД,  $\cos \phi$ ,  $\nu$  и  $\chi$  в функции тока выполненной для заданного напряжения. Распечатка результатов расчета при  $U_3 = 220$  В приведена в табл.10.4, графические зависимости на рис.10.8.

Расчет энергетических характеристик в функции глубины регулирования напряжения на двигателе выполнен для тока  $I_d = I_y$ . Распечатка результатов расчета приведена в табл.10.5, а графические зависимости на рис.10.9.

В таб. 10.4, 10.5 приведены также значения углов коммутации  $\gamma$ .

10.14.6. Были рассчитаны регулировочные характеристики двухконтурного преобразователя вместе с системой управления для тех же параметров схемы, что и одноконтурного при раздельном управлении при тех же значениях тока  $I_d$  и трех значениях угла  $\alpha_0$ . Полученные результаты приведены на рис.10.10, 10.11 и 10.12.

10.14.7. В табл.10.6 приведены результаты расчетов для выпрямительного и инверторного режима при токе  $I_y$  для номинального напряжения на якоре. Эти данные могут быть получены из таблиц и графиков, либо точнее расчетом энергетических показателей для заданных напряжений  $U$  и тока  $I_y$  при коэффициенте перегрузки  $K_{II} = 1$ . Тогда эти точки будут приведены в таблице.

В преобразователе обеспечивается номинальное напряжение на нагрузке при установившемся токе в выпрямительном и инверторном режиме. Следовательно, он удовлетворяет требованиям задания.

Таблица 10.2

Регулировочная характеристика при  $I_d = 592.00$  А

N	Угол управ. град.	Напр. преобр., В	Напр. двиг., В	Макс. угол, град.
1	0.00	264.56	261.73	156.445
2	10.00	260.34	257.55	156.445
3	20.00	247.73	245.00	156.445
4	30.00	227.27	224.49	156.445
5	40.00	199.45	196.66	156.445
6	50.00	165.14	162.36	156.445
7	60.00	125.40	122.61	156.445
8	70.00	81.43	78.64	156.445
9	80.00	34.57	31.78	156.445
10	90.00	-13.76	-16.54	156.445
11	100.00	-62.09	-64.87	156.445
12	110.00	-108.94	-111.73	156.445
13	120.00	-152.91	-155.69	156.445
14	130.00	-192.64	-195.42	156.445
15	140.00	-226.33	-229.71	156.445
16	150.00	-254.74	-257.52	156.445
17	156.44	-268.83	-271.61	156.445

Таблица 10.3

Регулировочная характеристика системы управления при  
 $I_d = 592.00$  А  $U_{сн} = 0.00$  В  $U_{опмакс} = 10.00$  В  
 косинусоидальное опорное напряжение

N	Напряжение управления	Угол управления град.
1	10.00	0.00
2	9.85	10.00
3	9.40	20.00
4	8.66	30.00
5	7.66	40.00
6	6.43	50.00
7	5.00	60.00
8	3.42	70.00
9	1.73	80.00
10	-0.00	90.00
11	-1.74	100.00
12	-3.42	110.00
13	-5.00	120.00
14	-6.43	130.00
15	-7.66	140.00
16	-8.66	150.00
17	-9.17	156.44

Регулировочные характеристики в функции угла управления  
 для однокомплектного преобразователя  
 (косинусоидальное опорное напряжение)

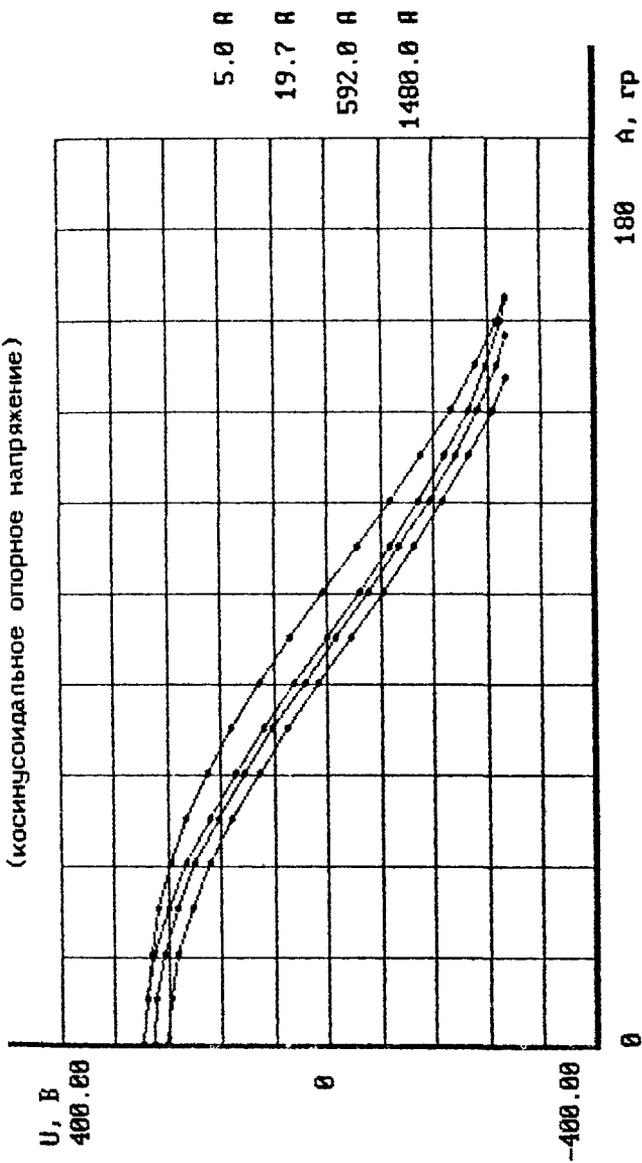


Рис. 10.5 Регулировочные характеристики преобразователя  $U = f(\alpha)$ ,  
 полученные с помощью ЭЦМ

Регулировочные характеристики в функции напряжения управления  
 для однокомплектного преобразователя  
 (косинусоидальное опорное напряжение)

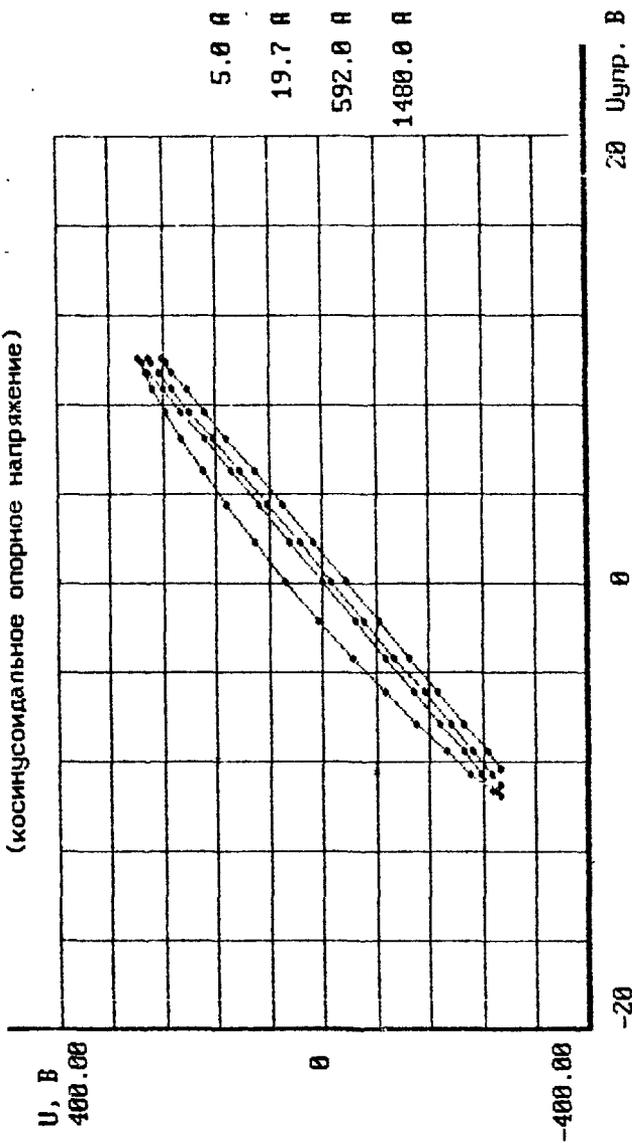


Рис. 10.6 Регулировочные характеристики преобразователя  $U = i(U_{упр})$ , построенные с помощью ЭЦВМ (при  $U_{см} = 0$ )

Энергетические характеристики КПД = f(I)

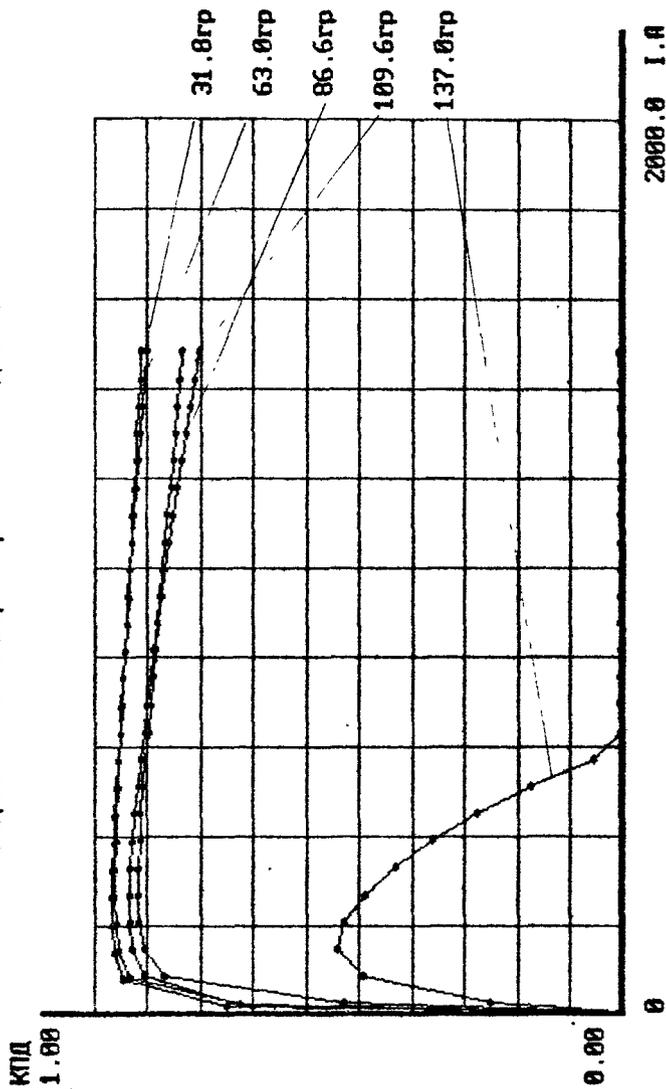


Рис. 10.7 Энергетические характеристики  $\eta = f(I_d)$  для разных заданных напряжений, полученные с помощью ЭВМ

Таблица 10.4

G, cos F, V, X = f(I) при U зад = 220.0 В, A = 31.81 гр

N	Ток, А	Напр. двиг., В	КПД	G, гр	cos F	V, гр	X, гр
1	0.00	287.70	0.000	0.0	0.850	0.955	0.811
2	10.41	234.20	0.748	0.1	0.849	0.955	0.811
3	96.85	232.09	0.953	0.9	0.846	0.956	0.809
4	183.30	229.97	0.963	1.6	0.842	0.957	0.806
5	269.75	227.86	0.964	2.4	0.839	0.958	0.804
6	356.19	225.74	0.962	3.1	0.835	0.959	0.801
7	442.64	223.63	0.959	3.8	0.832	0.960	0.798
8	529.09	221.51	0.955	4.5	0.828	0.961	0.796
9	615.53	219.39	0.951	5.2	0.825	0.962	0.794
10	701.98	217.28	0.947	5.9	0.822	0.963	0.791
11	788.43	215.16	0.942	6.5	0.818	0.964	0.789
12	874.87	213.05	0.937	7.2	0.815	0.965	0.786
13	961.32	210.93	0.933	7.9	0.812	0.965	0.784
14	1047.77	208.82	0.928	8.5	0.808	0.966	0.781
15	1134.21	206.70	0.923	9.1	0.805	0.967	0.779
16	1220.66	204.58	0.917	9.7	0.802	0.968	0.776
17	1307.11	202.47	0.912	10.4	0.799	0.969	0.774
18	1393.55	200.35	0.907	11.0	0.795	0.970	0.771
19	1480.00	198.24	0.901	11.6	0.792	0.971	0.769

Таблица 10.5

КПД, G, cos F, V, X = f(U) при Iз = 592.0 А

N	A, гр	Напр. двиг., В	КПД	G, гр	cos F	V, гр	X, гр
1	0.00	261.76	0.960	18.1	0.988	0.975	0.963
2	10.00	257.55	0.959	10.7	0.964	0.969	0.935
3	20.00	245.00	0.957	7.1	0.917	0.964	0.884
4	30.00	224.49	0.953	5.2	0.842	0.962	0.810
5	40.00	196.66	0.947	4.2	0.742	0.961	0.713
6	50.00	162.36	0.937	3.6	0.618	0.960	0.593
7	60.00	122.61	0.918	3.2	0.475	0.959	0.456
8	70.00	78.64	0.877	3.0	0.317	0.959	0.304
9	80.00	31.78	0.743	2.9	0.149	0.959	0.143
10	86.60	0.00	0.000	2.8	0.034	0.959	0.033
11	88.87	-11.00	0.000	2.8	0.005	0.959	0.005
12	90.00	-16.54	0.335	2.8	0.025	0.959	0.024
13	100.00	-64.87	0.830	2.9	0.199	0.959	0.190
14	110.00	-111.73	0.902	3.0	0.367	0.959	0.352
15	120.00	-155.69	0.929	3.3	0.525	0.959	0.504
16	130.00	-195.42	0.944	3.8	0.668	0.960	0.641
17	140.00	-229.71	0.952	4.6	0.792	0.961	0.761
18	150.00	-257.52	0.957	6.3	0.892	0.963	0.859
19	156.44	-271.61	0.960	8.6	0.944	0.966	0.912

Энергетические характеристики КПД,  $\cos \phi$ ,  $\nu$ ,  $X = f(I)$   
 при  $A = 31.8$  гр

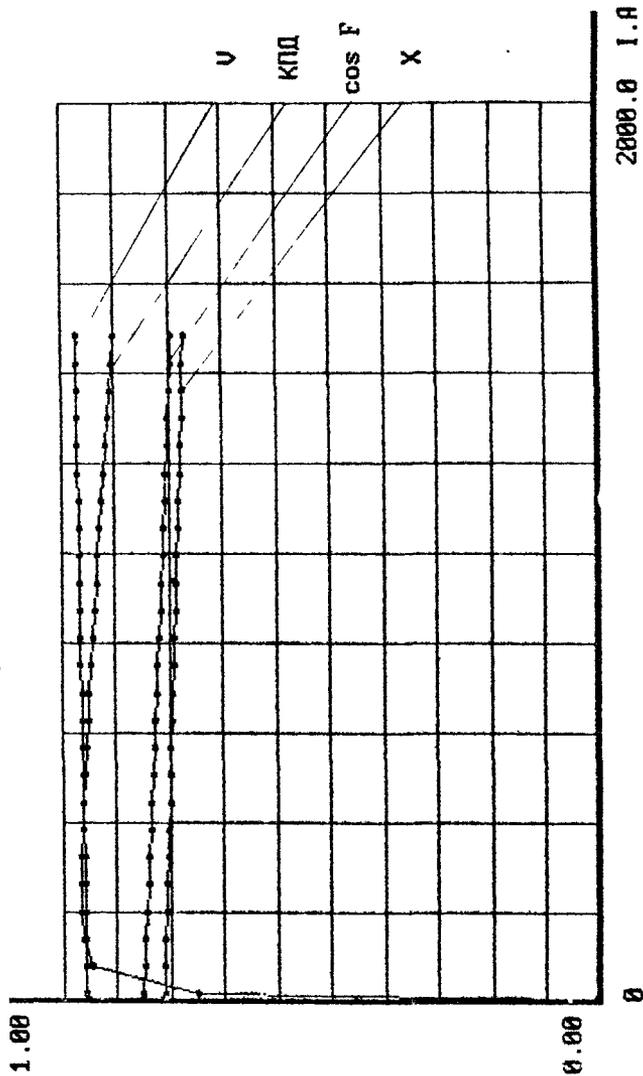


Рис. 10.8 Энергетические характеристики при изменении тока нагрузки, полученные с помощью ЭЦМ

Энергетические характеристики КПД,  $\cos \Phi$ ,  $\nu$ ,  $X = f(\omega)$   
 при  $I_3 = 592.0$  А

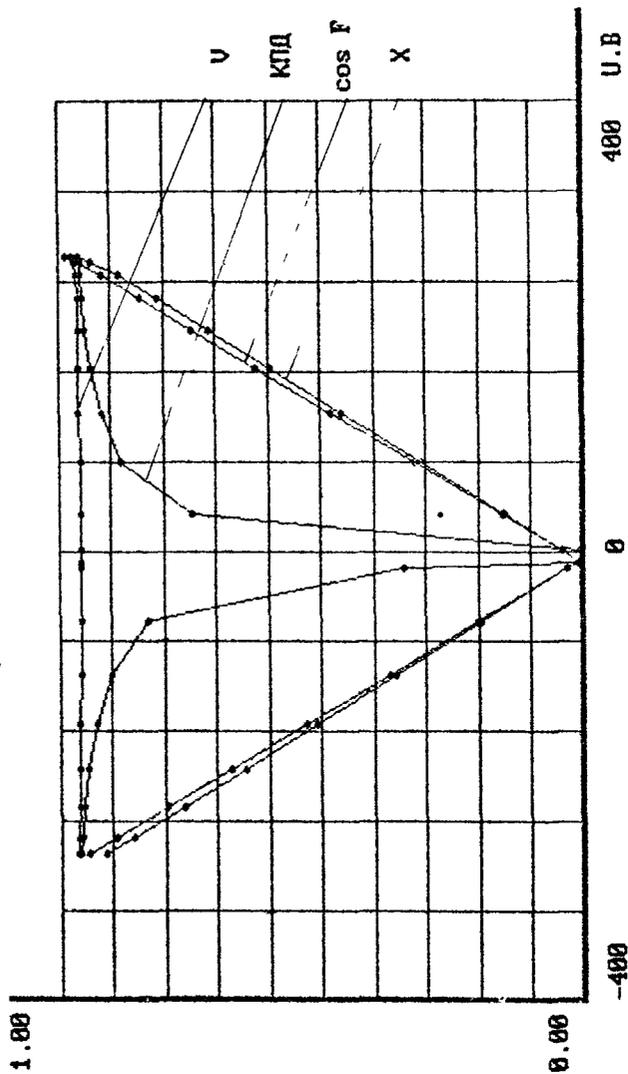


Рис. 10.9 Энергетические характеристики при регулировании напряжения на якоре двигателя, полученные с помощью ЭЦВМ

Регулировочные характеристики в функции напряжения  
 для двухкомплектного преобразователя  
 (косинусоидальное опорное напряжение)

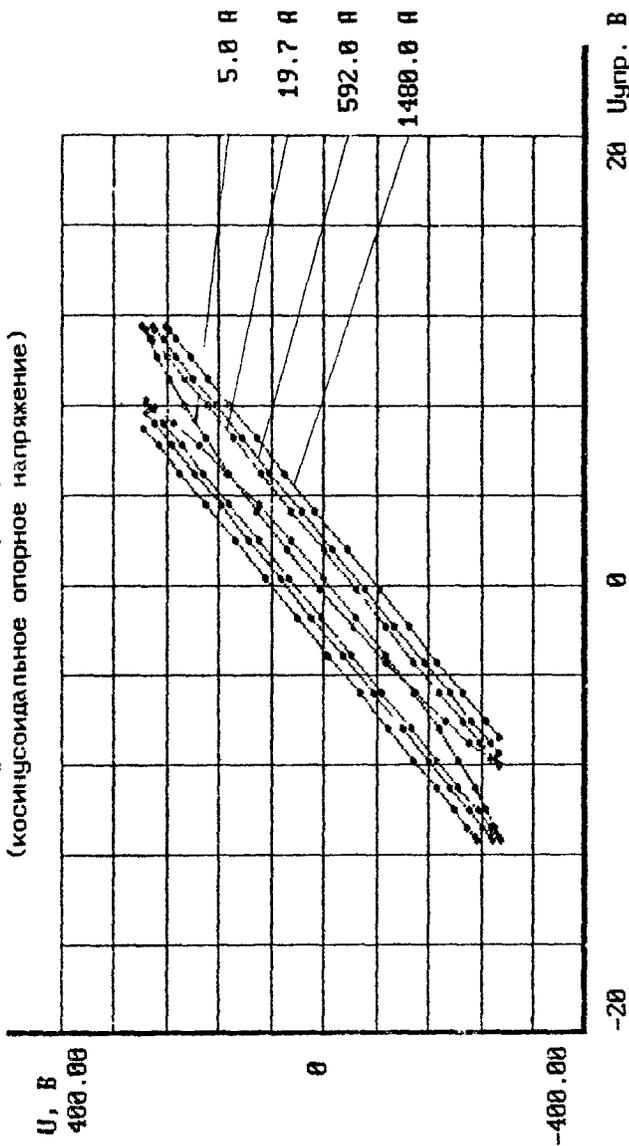


Рис. 10.10 Регулировочные характеристики двухкомплектного реверсивного преобразователя  $U = I(U_{упр})$  при  $U_{см} = 1,5$  В;  $\alpha_0 = 98^\circ$

Регулировочные характеристики в функции напряжения управления  
 для двухкомплектного преобразователя  
 (косинусоидальное опорное напряжение)

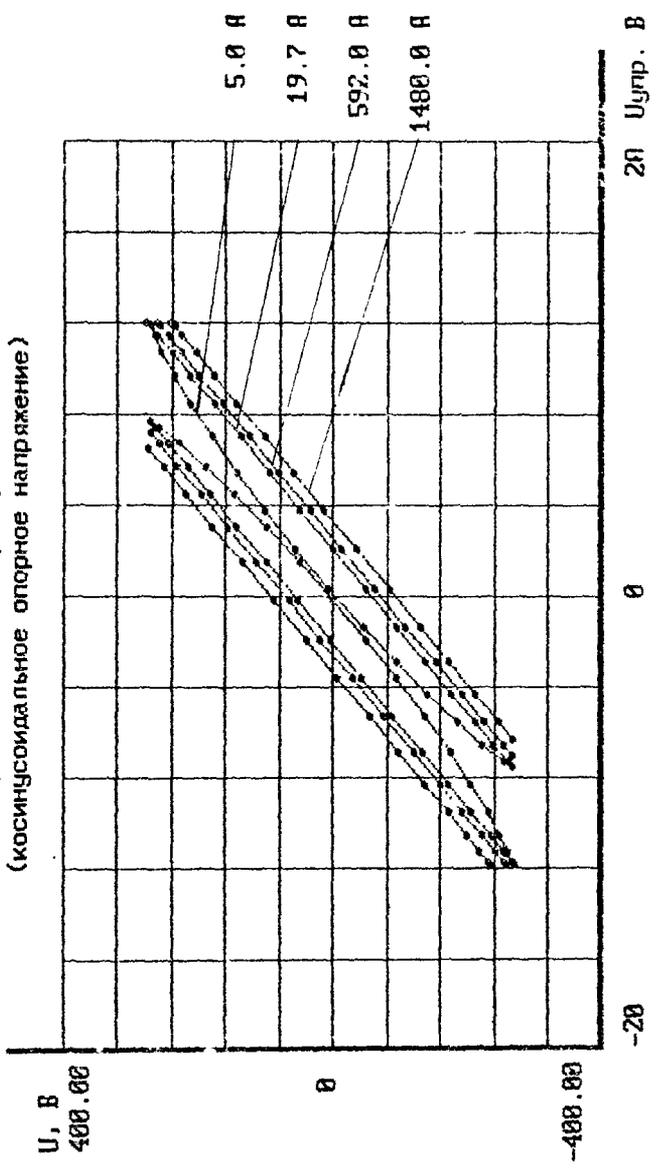


Рис. 10.11 Регулировочные характеристики двухкомплектного реверсивного преобразователя  $U = f(U_{упр})$  при  $U_{см} = 2 В$ ;  $\alpha_0 = 101^\circ$

Регулировочные характеристики в функции напряжения управления  
 для двухкомплектного преобразователя  
 (косинусоидальное опорное напряжение)

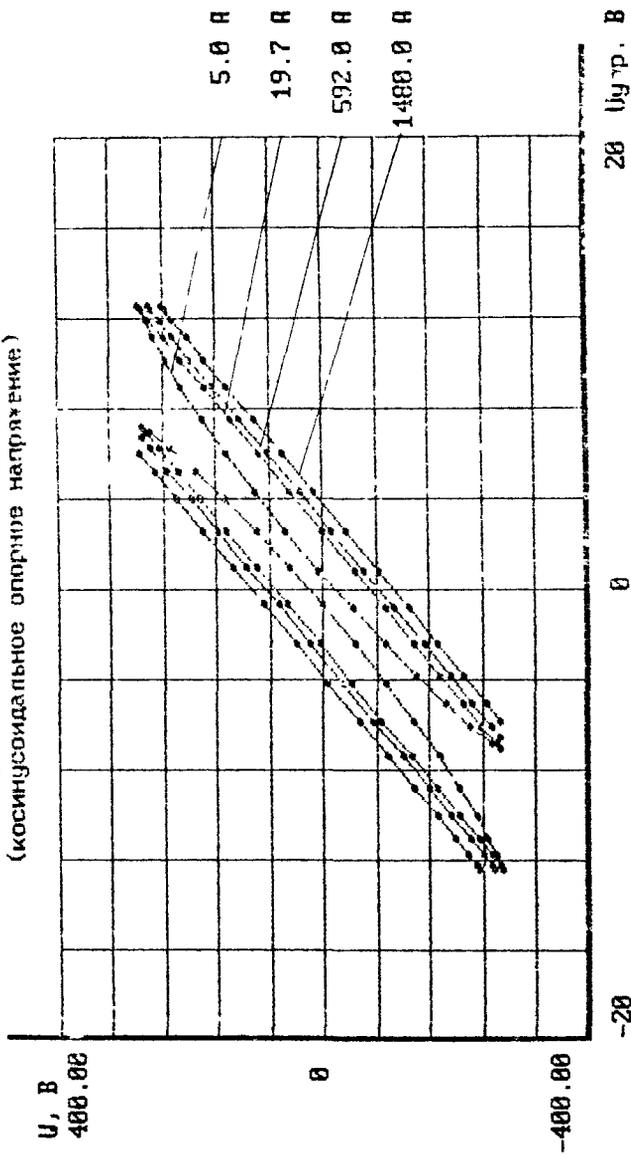


Рис. 10.12 Регулировочные характеристики двухкомплектного реверсивного преобразователя  $U = f(U_{упр})$  при  $U_{см} = 2,5 В$ ;  $\alpha_0 = 104^\circ$

Таблица 10.6

Режимы	U, В	$\eta$	$\cos \varphi$	$\chi$	$\nu$
Выпрямительный	220	0,952	0,826	0,79	0,962
Инверторный	220	0,947	0,79	0,76	0,961

## II. ПОСТРОЕНИЕ ВРЕМЕННЫХ ДИАГРАММ

II.1. Построение временных диаграмм производится при номинальном напряжении сети для угла  $\alpha$ , обеспечивающего при токе  $I_y$  напряжение на нагрузке, равное  $\pm 0,5 U_d$ . Этот угол  $\alpha$  определен при расчете внешних характеристик. Соответствующий этим условиям угол можно найти из распечатки расчета регулировочных и энергетических характеристик.

II.2. Все построения выполняются в масштабе.

II.3. Временные диаграммы токов и напряжений наиболее удобно располагать в порядке, указанном на рис. II.1 [3].

II.4. На диаграммах фазных ЭДС за нуль принят потенциал нуля трансформатора. На диаграммы наносятся ординаты, соответствующие углам  $\alpha$  и  $\gamma$  для анодной и катодной групп вентиляей. На участке коммутации вторичное напряжение идет по кривой, делящей ординаты между фазными ЭДС, участвующими в коммутации, пополам.

II.5. При построении диаграммы выпрямленного напряжения за нуль принят потенциал общего анода (нижняя жирная линия кривой фазных ЭДС). Относительно нулевой линии строятся ординаты диаграмм фазных ЭДС, из которых формируется выпрямленное напряжение, заключенное между нижней и верхней жирными кривыми.

II.6. При построении токов принимается, что  $L_d = \infty$  и межкоммутационные участки горизонтальны.

II.7. При построении напряжения на вентиле (например, на первом) принимается, что потенциал катода равен нулю и потенциал анода относительно катода на участке прохождения тока  $i_a$  также равен нулю. На остальных участках форма кривой определяется напряжением фазы относительно потенциала общего катода.

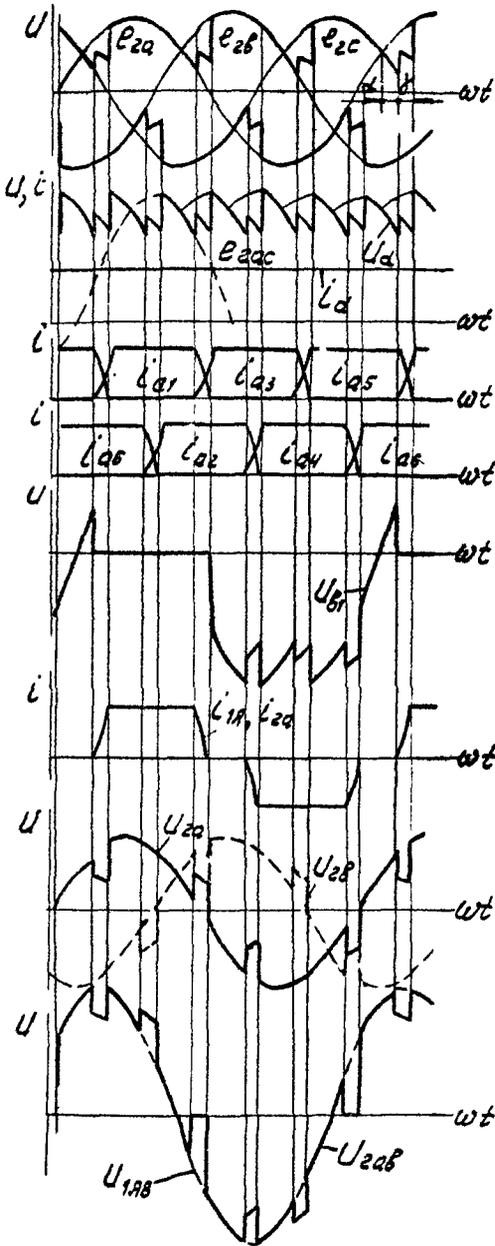


Рис. II.1 Временные диаграммы токов и напряжений в трехфазной мостовой схеме

## 12. ОФОРМЛЕНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

12.1. Курсовая работа представляется в виде расчетно-пояснительной записки объемом 15–20 страниц. В записке должны быть обоснованы все принятые решения, указаны методы расчета, приведены все расчетные формулы и соотношения, а также список использованной литературы, на которую должны быть сделаны ссылки в тексте.

12.2. Должна быть дана нумерация пунктов и подпунктов выполняемого задания, приведена принципиальная схема спроектированного выпрямителя, спецификация, графики и диаграммы, выполненные на координатной бумаге.

12.3. Оформление расчетно-пояснительной записки должно соответствовать требованиям ЕСКД.

## 13. ЗАЩИТА КУРСОВОЙ РАБОТЫ

13.1. После проверки курсовой работы преподавателем и исправлений (если это требуется) студент должен защитить курсовую работу.

13.2. При защите студент должен уметь обосновывать принятые решения, объяснять диаграммы, характеристики, схемы, формульные зависимости, знать теоретические разделы курса, использованные в работе.

13.3. Примеры вопросов, которые могут быть заданы на защите, приведены ниже:

1. Какие факторы и как влияют на вид внешней характеристики?
2. От чего зависит ширина зоны прерывистых токов?
3. Какие факторы влияют на вид регулировочной характеристики?
4. Как производится выбор трансформатора, тиристоров, предохранителей, реактора?
5. Какие изменения произойдут на временной диаграмме при изменении тока нагрузки, изменении параметров трансформатора, вентилей, реактора?
6. Для чего вводятся ограничения в регулировочной характеристике системы управления и в регулировочной характеристике всего преобразователя вместе с системой управления?

7. Каковы пути уменьшения нагрева тиристора?
8. Зачем проводится проверка трансформатора по току перегрузки и среднеквадратичному току?
9. Каков порядок величины падения напряжения на тиристор?
10. На какие напряжения выпускаются тиристоры?
11. Для чего применяется последовательное и параллельное соединение тиристоров?
12. Что такое селективность защиты?
13. Какие повреждения возможны в преобразователе?
14. Какими основными параметрами характеризуется тиристор?
15. Как и почему производится согласование регулировочных характеристик двухкомплектного преобразователя?
16. На что влияет форма опорного напряжения в системе управления?

#### 14. ПРИНЯТЫЕ ОБОЗНАЧЕНИЯ

- $E$  - противо-ЭДС двигателя;
- $e$  - мгновенное значение ЭДС;
- $I_{ад}$  - действующее значение анодного тока;
- $I_d$  - ток якоря двигателя (среднее значение выпрямленного тока);
- $I_{дгр}$  - граничное значение выпрямленного тока;
- $i$  - мгновенное значение тока;
- $I_{ТАУ}$  - максимально-допустимый средний ток тиристора при заданных условиях работы;
- $I_{ТАУm}$  - предельный ток тиристора;
- $I_{хх}$  - ток холостого хода трансформатора;
- $I_m$  - амплитудное значение установившегося тока трехфазного короткого замыкания;
- $I_o$  - ожидаемый ток короткого замыкания (действующее значение первой полуволны);
- $I_{пр}$  - предельный ток, ограниченный предохранителем;
- $I_{уд}, I_{уд}, I_{уд.д}$  - мгновенное, амплитудное и действующее значение первой полуволны ударного тока при внутреннем КЗ;
- $K_\lambda, K_T, K_t, K_V$  - коэффициенты, учитывающие влияние факторов, снижающих допустимый ток тиристора;

- $K_B$  - коэффициент неравномерности распределения тока по вентильям;  
 $K_H$  - коэффициент неравномерности распределения напряжения по вентильям;  
 $K_{неп}$  - коэффициент запаса по неповторяющемуся напряжению;  
 $K_{Ф}$  - коэффициент формы кривой входного тока;  
 $K_R$  - коэффициент, учитывающий падение напряжения на элементах схемы;  
 $K_{сmin}, K_{сmax}$  - коэффициенты, учитывающие допустимые снижения и повышения напряжения сети;  
 $K_T$  - коэффициент трансформации;  
 $K_U, K_I$  - коэффициенты схемы по напряжению и току;  
 $K_{угр}$  - коэффициент передачи системы управления;  
 $L$  - индуктивность;  
 $m$  - кратность пульсаций (пульсность);  
 $n$  - частота вращения;  
 $n_T$  - число групп вентиляей в схеме выпрямления;  
 $n_B$  - число параллельно соединенных вентиляей;  
 $P$  - мощность;  
 $P_T$  - мощность потерь в тиристоре;  
 $P_{хх}$  - мощность потерь холостого хода трансформатора;  
 $P_{кз}$  - мощность потерь короткого замыкания трансформатора;  
 $P_{я}$  - мощность, подводимая или снимаемая с якоря электрической машины;  
 $P_{\Sigma}$  - суммарная мощность потерь в преобразователе и трансформаторе;  
 $q$  - допустимый (заданный) коэффициент пульсаций тока двигателя;  
 $R_{thja}$  - тепловое сопротивление переход-охлаждающая среда;  
 $R_{thjc}$  - тепловое сопротивление переход-корпус;  
 $R_{thch}$  - тепловое сопротивление корпус прибора-контактная поверхность охладителя;  
 $R_{thha}$  - тепловое сопротивление контактная поверхность охладителя-охлаждающая среда;  
 $r$  - сопротивление (активное);  
 $r_T$  - дифференциальное сопротивление в открытом состоянии тиристора;  
 $r_{\Sigma}$  - суммарное активное сопротивление в цепи преобразователя;

- $S_T$  - типовая мощность трансформатора;  
 $T_C$  - температура корпуса тиристора;  
 $T_A$  - температура окружающей среды;  
 $T_m$  - максимальный перегрев перехода по отношению к окружающей среде;  
 $T_{jt}, T_{jm}$  - установившаяся и максимально-допустимая температуры перехода;  
 $T_{jt}, T_{ct}$  - температура перехода и корпуса в конце интервала  $t$ ;  
 $t_{ц}$  - время цикла;  
 $t_y$  - время установившейся (длительной) нагрузки;  
 $t_{п}$  - время перегрузки;  
 $t_o$  - время паузы между выпрямительным и инверторным режимом;  
 $t_{э}$  - длительность эквивалентного импульса;  
 $t_{пл}$  - время плавления;  
 $U$  - напряжение (среднее или действующее значение);  
 $u$  - мгновенное значение напряжения;  
 $u_a$  - мгновенное значение напряжения на вентиле (анодного напряжения);  
 $U_{TM}$  - импульсное напряжение в открытом состоянии тиристора;  
 $U_T(t_0)$  - пороговое напряжение;  
 $U_{amax}$  - максимальное напряжение на вентиле;  
 $U_{анер}$  - максимальное напряжение на вентиле с учетом перенапряжений;  
 $U_{DRM}, U_{RRM}$  - импульсное рабочее напряжение тиристора и импульсное рабочее обратное напряжение;  
 $U_{DRM}, U_{RRM}$  - повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии и повторяющееся импульсное обратное напряжение;  
 $U_{DSM}, U_{RSM}$  - неповторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии и неповторяющееся импульсное обратное напряжение;  
 $u_k$  - напряжение короткого замыкания трансформатора;  
 $U_c$  - напряжение сети (линейное);  
 $U_{dc}$  - среднее значение выпрямленного напряжения идеального выпрямления;  
 $U_{dm}(t)$  - амплитуда первой гармоники пульсации;  
 $U_{упр}$  - напряжение управления;  
 $W$  - интеграл предельной нагрузки;

- $W_T$  - защитный показатель тиристора;
- $W_{ПЛ}$  - интеграл плавления;
- $W_D$  - интеграл дуги;
- $W_{пр}$  - полный интеграл отключения предохранителя;
- $X_a$  - анодное индуктивное сопротивление;
- $X_d$  - индуктивное сопротивление в цепи выпрямленного тока;
- $X_{\Sigma}$  - суммарное индуктивное сопротивление в цепи преобразователя;
- $Z_{(th)tja}$  - переходное тепловое сопротивление переход-среда;
- $Z_{(th)tjc}$  - переходное тепловое сопротивление переход-корпус;
- $Z_{(th)tha}$  - переходное тепловое сопротивление охладителя;
- $\alpha$  - угол управления;
- $\alpha_{min}$  - минимальный угол управления, при котором возможно включение тиристора, при работе на противо-ЭДС;
- $\alpha_{max}$  - максимально допустимый угол управления по условиям коммутации в инверторном режиме;
- $\gamma$  - угол коммутации;
- $\delta_{min}$  - минимально-допустимый угол выключения;
- $\eta$  - КПД;
- $\lambda$  - угол проводимости;
- $\nu$  - коэффициент несинусоидальности тока;
- $\tau$  - постоянная времени нагрева;
- $\varphi$  - угол сдвига;
- $\chi$  - коэффициент мощности;
- $\omega$  - угловая частота.

### И н д е к с ы

- I - для первичной стороны трансформатора;
- Z - для вторичной стороны трансформатора;
- c - сетевое;
- л - линейное;
- a - анодное (приведенное к стороне вентиляй);
- d - выпрямленное (для тока и напряжения двигателя индекс опускается);
- я - якоря;
- L - реактора;
- n - номинальное значение;
- y - значение, соответствующее установившейся нагрузке;

## БИБЛИОГРАФИЧЕСКИЙ СПИСОК

1. Алексеев, Ю.В. Краново-металлургические и экскаваторные двигатели постоянного тока: справочник / Ю.В. Алексеев, А.А. Рабинович. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 168 с.
2. Булгаков, А.А. Новая теория управляемых выпрямителей / А.А. Булгаков. – М.: Наука, 1970. – 320 с.
3. Гельман, М.В. Преобразовательная техника: учебное пособие / М.В. Гельман, М.М. Дудкин, К.А. Преображенский. – Челябинск: Издательский центр ЮУрГУ, 2009. – 425 с.
4. Гельман, М.В. Проектирование тиристорных преобразователей для электроприводов постоянного тока: учебное пособие / М.В. Гельман. – Челябинск: Изд-во ЧГТУ, 1996. – 91 с.
5. Глух, Е.М. Защита полупроводниковых преобразователей / Е.М. Глух, В.Е. Зеленев. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 153 с.
6. Горбачев, Г.Н. Промышленная электроника: учебник для вузов / Г.Н. Горбачев, Е.Е. Чаплыгин. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 320 с.
7. Забродин, Ю.С. Промышленная электроника: учебник для вузов / Ю.С. Забродин. – М.: Альянс, 2008. – 496 с.
8. Зимин, Е.Н. Электроприводы постоянного тока с вентильными преобразователями / Е.Н. Зимин, В.Л. Кацевич, С.К. Козырев. – М.: Энергоатомиздат, 1981. – 192 с.
9. Перельмутер, В.М. Системы управления тиристорнымк электроприводами постоянного тока / В.М. Перельмутер, В.А. Сидоренко. – М.: Энергоатомиздат, 1988. – 304 с.
10. Полупроводниковые выпрямители / под ред. Ф.И. Ковалева и Г.П. Мостковсй. – М.: Энергия, 1978. – 447 с.
11. Предохранители плавкие серии ПП57: каталог 07.04.07–84. Электротехника ОСОР. – М.: Информэлектро, 1985. – 12 с.
12. Реакторы серии СРОС: каталог 03.81.06–89. Электротехника СССР. – М.: Информэлектро, 1989. – 4 с.
13. Реакторы серии ФРОО: каталог 03.82.01–94. Электротехника СССР. – М.: Информэлектро, 1994. – 4 с.
14. Розанов, Ю.К. Силовая электроника: учебник для вузов / Ю.К. Розанов, М.В. Рябчицкий, А.А. Кваснюк. – М.: Издательский дом МЭИ, 2007. – 632 с.
15. Руденко, В.С. Основы преобразовательной техники / В.С. Руденко, В.И. Сенько, И.М. Чиженко. – М.: Высш. школа, 1980. – 424 с.
16. Справочник по автоматизированному электроприводу / под ред. В.А. Елисеева и А.В. Шинянского. – М.: Энергоатомиздат, 1983. – 616 с.
17. Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими режимами / под ред. В.И. Кру-

повича, Ю.Г. Барыбина, М.Л. Салювера. – М.: Энергоатомиздат, 1982. – 340 с.

18. Терехов, В.М. Элементы автоматизированного электропривода / В.М. Терехов. – М.: Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.

19. Трансформаторы сухие ТСПМ и ТСЗПМ мощностью 160, 250, 400 кВт: каталог 03.34.14–91. Электротехника СССР. – М.: Информэлектро, 1991. – 6 с.

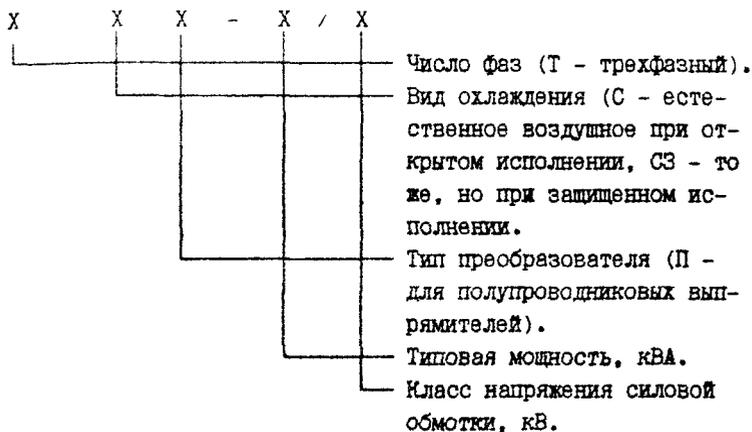
20. Трансформаторы серии ГСП, ТСЗП для питания комплектных тиристорных преобразователей и электроприводов: каталог 03.34.07–89. Электротехника СССР. – М.: Информэлектро, 1989. – 8 с.

21. Чебовский, О.Г. Силовые полупроводниковые приборы: справочник / О.Г. Чебовский, Л.Г. Моисеев, Р.П. Недошивин. – М.: Энергоатомиздат, 1985. – 401 с.

## ПРИЛОЖЕНИЯ

### ПРИЛОЖЕНИЕ III. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СИЛОВЫХ ТРАНСФОРМАТОРОВ ДЛЯ ТИРИСТОРНЫХ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЕЙ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА СРЕДНЕЙ МОЩНОСТИ

III.1. Структура условного обозначения:



III.2. Основные параметры сухих трансформаторов средней мощности [19, 20] приведены в табл. III.1.

Таблица III.1

Тип трансформатора	Номинальная мощность, кВА	Номинальное напряжение, В			Номинальный ток, А		Напряжение КЗ $U_k, \%$	Ток XX, %	Потери, Вт	
		силов. обмотки	вентильной обмотки	преобразователя	переменный вентильной обмотки	выпрямленный преобразователя			XX	КЗ
ТСП-10/0,7	7,3	380	205	230	20,5	25	4,7	14	115	320
ТСП-16/0,7	14,6	380	205	230	41,0	50	5,2	8	120	550
			410	460	40,5	25				
ТСП-25/0,7	29,1	380	205	230	82,0	100	5,5	6	190	1100
			410	460	41,0	50				

Тип трансформатора	Номинальная мощность кВА	Номинальное напряжение, В			Номинальный ток, А		Напряжение КЗ $U_{к.к.}, \%$	Ток XX, %	Потери, Вт	
		силовых обмотки	вентильных обмотки	преобразовательные	переменный ток	выпрямленный преобразователя			XX	КЗ
ТСП-63/0,7	58	380	205	230	164	200	5,5	5	300	1900
		380	410	460	82	100				
ТСП-100/0,7	93	380	205	230	262	320	5,8	4	400	2300
ТСП-125/0,7	117	380	410	460	164	200	5,8	3	470	2700
ТСЗПМ-160/0,7	143	380	202	230	408	500	4,7	5,2	625	2550
ТСЗПМ-160/0,7	147	380	416	460	204	250	4,7	5,2	625	2550
ТСЗПМ-200/0,7	182	380	205	230	514	630	5,5	1,5	800	3100
ТСЗПМ-200/0,7	206	380	410	460	290	350	5,75	1,5	800	3200
ТСЗПМ-250/0,7	235	380	208	230	653	800	4,5	3,4	750	3800
ТСЗПМ-250/0,7	235	380	416	460	326	400	4,5	3,4	750	3700

Примечания: I. В соответствии с ГОСТ 16772-77 трансформаторы и реакторы для электропривода должны выдерживать следующие перегрузки: 75% - I мин, 100% - 15 с, 150% - 10 с.

2. При циклических нагрузках среднеквадратичное значение тока не должно превышать номинальный ток. Время усреднения - 10 мин.

#### ПРИМЕЧАНИЕ II 2. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ ТИРИСТОРОВ

II.1. Основные предельно-допустимые и характеризующие электрические параметры низкочастотных тиристоров приведены в табл. II.1 [21].

Таблица II.1

Тип тиристора	$I_{TAVM}$	$U_{DRM}$ $U_{RRM}$	$I_{TSM}$ при $T_J = T_{SM},$ KA	$U_T$ (то) не более, В	$r_T$ не более, МОм
	А	В			
Т112-16	16	100-1200	0,20	1,20	11,9
Т132-16	16	1300-2000	0,22	1,4	23,9

Окончание табл. П2.1

Тип тиристора	$I_{TAVm}$	$U_{DRM}$ $U_{RRM}$	$I_{TSM}$ при $T_J = T_{Jm}$ , КА	$U_{T(To)}$ не более, В	$\Gamma_T$ не более, МОМ
	А	В			
TI22-20	20	100-1200	0,30	1,15	17,2
TI32-25	25	1300-2000	0,33	1,3	11,5
TI22-25	25	100-1200	0,35	1,10	10,9
TI42-32	32	1300-2000	0,38	1,25	9,5
TI32-40	40	100-1200	0,75	1,05	5,6
TI42-40	40	1300-2000	0,70	1,25	7,6
TI32-50	50	100-1200	0,80	1,03	4,6
TI42-50	50	1300-2000	0,75	1,20	6,4
TI42-63	63	100-1200	1,20	0,95	4,1
TI52-63	63	1300-2000	1,10	1,15	5,3
TI42-80	80	100-1200	1,35	0,93	3,3
TI52-80	80	1300-2000	1,20	1,1	4,1
TI51-100	100	300-1600	2,0	1,15	2,54
TI61-125	125	300-1600	2,5	1,15	1,80
TI61-160	160	300-1600	4,0	1,15	1,40
TI71-200	200	300-1600	5,0	1,15	1,0
TI23-200	200	400-1600	3,3	1,1	1,5
TI71-250	250	300-1600	6,0	1,1	0,83
TI23-250	250	400-1200	4,5	1,0	1,08
TI71-320	320	300-1600	7,0	1,05	0,55
TI23-320	320	400-800	5,0	0,95	0,75
TI33-320	320	900-2000	6,0	1,2	1,1
TI33-400	400	400-1600	7,0	1,05	0,68
TI33-400	400	1800-2400	8,0	1,2	0,95
TI43-500	500	400-1600	10,0	1,1	0,57
TI43-630	630	400-1200	12,0	1,0	0,43
TI53-630	630	1300-2400	14,0	1,25	0,55
TI53-800	800	1000-1800	16,0	1,15	0,34
T253-800	800	2000-2400	16,0	1,2	0,44
T253-1000	1000	1000-1800	20,0	1,0	0,25
T253-1250	1250	400-1200	26,0	1,0	0,14

Примечания:  $I_{TAVm}$  - максимально-допустимый средний ток в открытом состоянии ( $T_c = 85^\circ\text{C}$ , ток однополупериодный синусоидальный, угол проводимости  $180^\circ$ , частота 50 Гц).

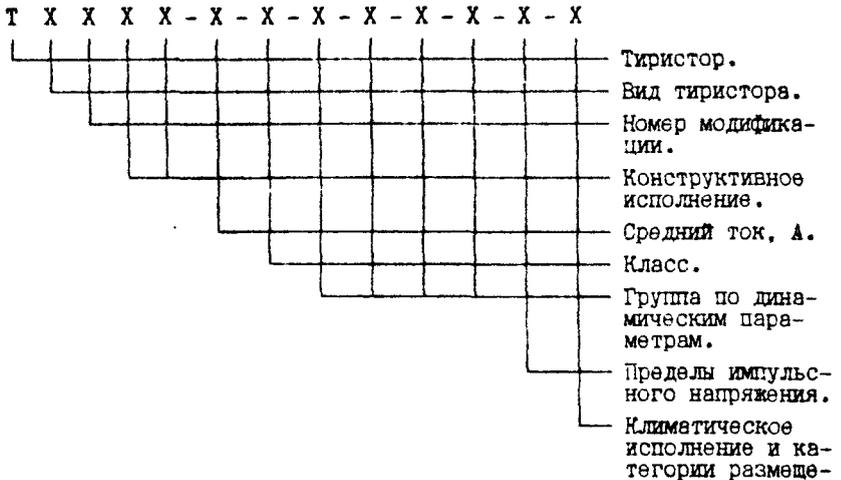
2.  $U_{DRM}$  и  $U_{RRM}$  - повторяющееся импульсное напряжение в закрытом состоянии и повторяющееся импульсное обратное напряжение при максимальной температуре перехода  $T_{Jm}$ , частоте 50 Гц и разомкнутой цепи управления.

3.  $I_{TSM}$  - ударный повторяющийся ток в открытом состоянии при  $T_{Jm}$  (однополупериодный синусоидальный одиночный импульс длительностью 10 мс).

4.  $U_{T(To)}$  - пороговое напряжение.

5.  $r_T$  - дифференциальное сопротивление в открытом состоянии.

П2.2. Структура условного обозначения тиристоров [21]:



ПРИЛОЖЕНИЕ ПЗ. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ И ХАРАКТЕРИСТИКИ  
БЫСТРОДЕЙСТВУЮЩИХ ПЛАВКИХ ПРЕДОХРАНИТЕЛЕЙ

ПЗ.1. Назначение - защита полупроводниковых преобразовательных агрегатов при внутренних коротких замыканиях в цепях переменного или пульсирующего тока частоты 50 Гц и в цепях постоянного тока. В настоящее время основное применение находят предохранители типа ППБ7 [11].

ПЗ.2. Структура условного обозначения

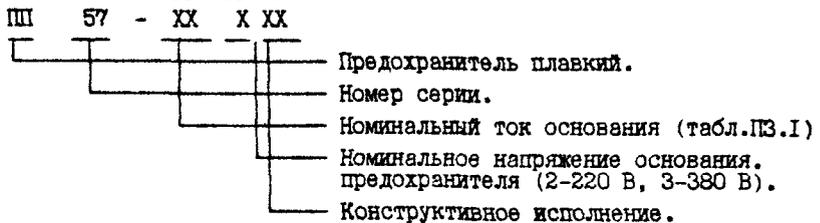


Таблица ПЗ.1

Условный ток основания, А	100	250	400	630	800
Условное обозначение	3I	34	37	39	40

ПЗ.3. Классификация предохранителей на напряжения 220 и 380 В приведена в табл. ПЗ.2.

ПЗ.4. Технические данные предохранителей:

Плавкие элементы не плавятся в течение одного часа при протекании условного тока неплавления, равного 1,3 номинального, и плавятся в течение 15 мин при протекании условного тока плавления, равного 2,3 номинального.

Таблица ПЗ.2

Тип предохранителя	Номинальный ток предохра- нителя, А	Номинальные токи плавких вставок, А	Номиналь- ное напря- жение пере- менного то- ка, В	Наибольшее допустимое напряжение постоянного тока, В
ПНБ7-3127	100	25,40,63,100	220	200
ПНБ7-3427	250	160,250		160
ПНБ7-3137	100	40,63,100		
ПНБ7-3427	250	160,250	380	440
ПНБ7-3737	400	315,400		
ПНБ7-3937	630	500,630		
ПНБ7-4038	800	800		

Примечание: Предельный ток отключения предохранителей 100 кА.

Характеристики для минимального времени плавления  $t_{пл}$ , полного интеграла отключения  $W_{II}$  и предельного тока, ограниченного предохранителем,  $I_{пр}$  в зависимости от ожидаемого тока короткого замыкания  $I_{о}$  (действующего значения) при температуре окружающего воздуха  $25 \pm 10^\circ\text{C}$  приведены на рис.ПЗ.1 - ПЗ.3.

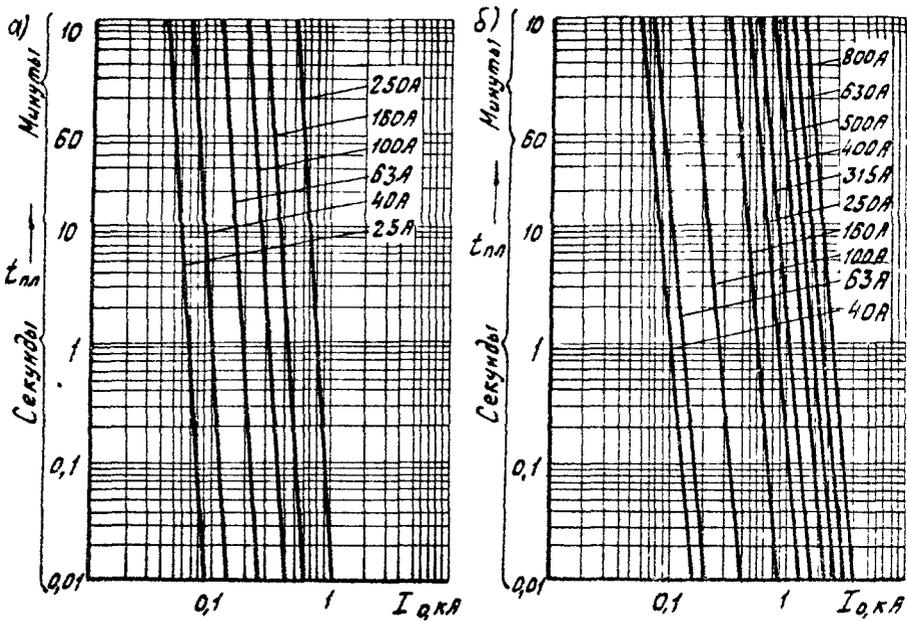
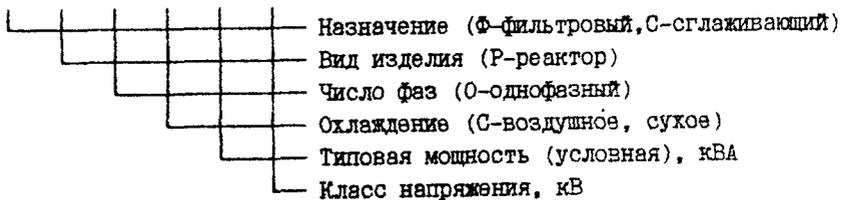


Рис.ПЗ.1. Характеристики минимального времени плавления в зависимости от действующего значения тока отключения для предохранителей с номинальным напряжением переменного тока 220 В (а) и 380 (б).

ПРИЛОЖЕНИЕ П4. ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ СГЛАЖИВАЮЩИХ РЕАКТОРОВ ДЛЯ ТИРИСТОРНЫХ ЭЛЕКТРОПРИВОДОВ ПОСТОЯННОГО ТОКА

П4.1. Структура условного обозначения:

X X X X - X / X



П4.2. Основные параметры реакторов с воздушным охлаждением [I2, I3] приведены в табл.П4.1.

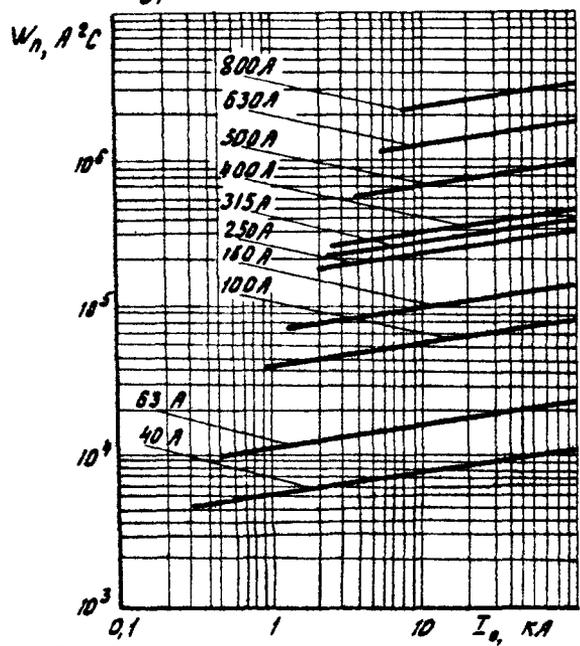
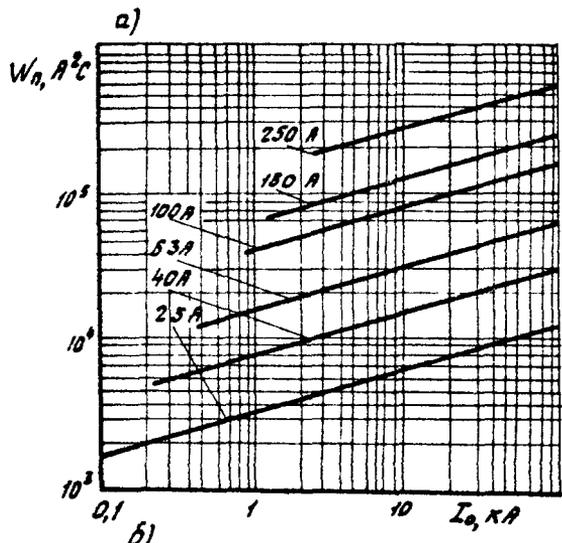


Рис.ПЗ.2. Характеристики полного интеграла отключения предохранителей с номинальным напряжением переменного тока 220 В (а) и 380 В (б).

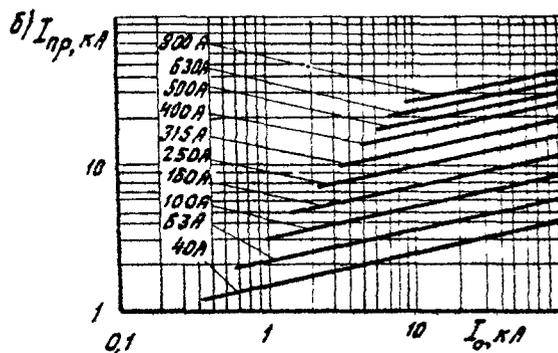
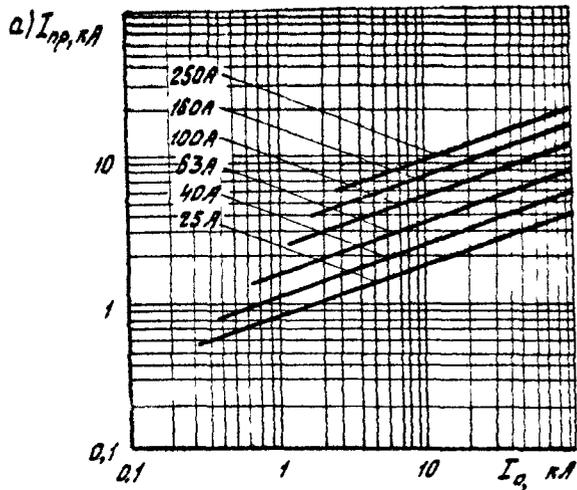


Рис.ПЗ.3. Характеристики пропускаемого переменного тока предохранителей с номинальным напряжением переменного тока 220 В (а) и 380 В (б).

Таблица П4.1

Тип	Номинальный постоянный ток,	Номинальная индуктивность,	Сопротивление обмотки постоян- ному току при 40°C не более, МОм
	А	мГн	
ФРОС 65/0,5	250	1,5	6,8
ФРОС 65/0,5	320	1,0	4,5
ФРОС 125/0,5	500	0,75	3,0
ФРОС 250/0,5	250	6,5	17,6
ФРОС 250/0,5	320	4,2	11,5
ФРОС 250/0,5	800	0,6	1,7
ФРОС 250/0,5	1000	0,35	1,1
ФРОС 500/0,5	500	3,25	7,5
ФРОС 1000/0,5	800	2,3	4,7
ФРОС 1000/0,5	1000	1,6	3,1
СРОС-63/0,5	100	16,0	40,0
СРОС-63/0,5	200	4,0	10,0
СРОС-100/0,5	160	9,0	36,0
СРОС 100/0,5	320	2,25	6,0
СРОС-200/0,5	100	60,0	80,0
СРОС-200/0,5	200	15,0	20,0
СРОС-400/0,5	200	30,0	30,0
СРОС-400/0,5	400	7,5	7,5

Примечания: 1. Величины сопротивлений для реакторов серии СРОС даны ориентировочно.

2. Допустимые перегрузки в соответствии с примечанием к табл. П4.1.

ПРИЛОЖЕНИЕ ПБ. ИНСТРУКЦИЯ ДЛЯ ПОЛЬЗОВАНИЯ ПРОГРАММОЙ РАСЧЕТА  
ВНЕШНИХ, ЭНЕРГЕТИЧЕСКИХ, РЕГУЛИРОВОЧНЫХ И ОГРАНИЧИТЕЛЬНЫХ  
ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ (wgrx-c)\*

ПБ.1. Назначение программы

Программа предназначена для расчета на ЭВМ, совместимых с IBM, внешних, регулировочных, ограничительных и энергетических характеристик ведомого однокомплектного и двухкомплектного преобразователя, работающего на якорь двигателя постоянного тока.

По данной программе могут быть выполнены расчеты для трехфазной мостовой и трехфазной нулевой схем.

\* Алгоритмы и программа разработаны совместно с инж. Степановым А.Д.

## ПБ.2. Выполняемые функции

Программа позволяет рассчитать внешнюю характеристику либо для заданного угла управления, либо для заданного напряжения на двигателе ( $U_3$ ) при заданном токе. Расчет выполняется для непрерывного и прерывистого режима. На печать выводится напряжение на выходе преобразователя (напр.преобр) и напряжение после сглаживающего реактора на якоре двигателя (напр.двиг). Одновременно с расчетом внешней характеристики рассчитывается ограничительная (напр.огр) и максимально допустимый угол управления (макс.угол).

При расчете внешней характеристики для заданного напряжения на двигателе программа определяет соответствующий угол управления и выводит его на печать.

Расчет может быть выполнен одновременно для 5-ти значений углов управления или заданных напряжений  $U_3$ .

Рассчитанные характеристики для напряжения на якоре двигателя  $U = f(I)$  выводятся в виде графиков. Предусмотрена возможность изменения масштаба по оси токов для лучшего изображения области прерывистого тока.

Программа позволяет выполнить расчет энергетических характеристик в непрерывном режиме.

Расчет КПД в функции тока нагрузки выполняется для заданного угла управления или заданного напряжения на нагрузке. Расчет может быть выполнен одновременно для 5-ти значений углов  $\alpha$  или заданных напряжений  $U_3$ . Имеется возможность расчета всех энергетических показателей в функции тока нагрузки для одного значения угла  $\alpha$  или заданного напряжения  $U_3$ . При расчете определяются и выводятся на печать коэффициент мощности ( $\chi$ ), коэффициент сдвига ( $\cos \varphi$ ), коэффициент несинусоидальности тока ( $v$ ), коэффициент полезного действия (КПД), а также угол коммутации  $\gamma$ .

Рассчитанные характеристики  $\eta = f(I_d)$ ,  $\chi = f(I_d)$ ,  $\cos \varphi = f(I_d)$ ,  $v = f(I_d)$  выводятся в виде графиков. На графиках и в таблицах приняты обозначения:  $\eta$  - КПД,  $\chi$  -  $X$ ,  $\cos \varphi$  -  $\cos F$ ,  $v$  -  $V$ ,  $\gamma$  -  $G$ .

Если при расчете заданное напряжение при заданном токе не реализуется, то на дисплее появляется сообщение: "Уменьшите заданное напряжение".

Программа позволяет выполнить расчет регулировочных характеристик преобразователя в непрерывном и прерывистом режимах. При

этом на печать выводятся напряжение на выходе преобразователя (до реактора) и на якоре двигателя. На печать выводится также максимально-допустимый угол управления (АМАХ). Предусмотрен вывод графиков  $U = f(\alpha)$  для 4-х значений токов.

Программа позволяет рассчитать и вывести в виде таблицы регулировочные характеристики системы управления  $\alpha = f(U_{\text{упр}})$  при косинусоидальном и пилообразном опорном напряжении при заданном напряжении смещения  $U_{\text{см}}$ .

Программа позволяет рассчитать и вывести в виде графиков регулировочные характеристики преобразователя вместе с системой управления  $U = f(U_{\text{упр}})$  для тех же токов, что и регулировочные характеристики преобразователя  $U = f(\alpha)$ .

Предусмотрен расчет регулировочных характеристик  $U = f(U_{\text{упр}})$  двухкомплектного преобразователя.

Программа позволяет рассчитать энергетические характеристики в функции угла управления только для непрерывного режима. При этом могут быть получены те же энергетические показатели, что и в функции тока.

При расчете энергетических характеристик в функции угла управления задается значение тока. Если при этом возникает прерывистый режим, то на дисплее появляется сообщение: "Режим прерывистого тока". Необходимо увеличить заданный ток, чтобы он превысил "макс. граничный ток".

Энергетические показатели, а также угол коммутации выводятся на печать в функции угла управления в виде таблицы. Графические зависимости строятся в функции напряжения на якоре двигателя.

Все величины вводятся и рассчитываются для токов в амперах (А), для напряжений в вольтах (В), для мощностей в ваттах (Вт), для сопротивлений в омах (Ом), для индуктивностей в генри (Гн), для углов в градусах электрических (гр).

### ПБ.3. Подготовка исходных данных

Для работы на ЭВМ необходимо составить таблицу исходных данных. Например:

Заданная схема: трехфазная мостовая

Параметры трансформатора:  $U_1 = 220 \text{ В}$ ,  $P_{\text{кх}} = 800 \text{ Вт}$ ,  $K_T = 1,85$ ,  
 $X_{\text{а}} = 0,121 \text{ Ом}$ ,  $R_{\text{а}} = 0,039 \text{ Ом}$ .

Параметры вентиляей:  $U_{T(ТО)} = 1,0 \text{ В}$ ;  $R_T = 0,00021 \text{ Ом}$ ;  $\delta = 15^\circ$ .

Параметры реактора:  $L_p = 0,0023 \text{ Гн}$ ;  $R_p = 0,0047 \text{ Ом}$ .

Параметры нагрузки:  $L_n = 0,0181 \text{ Гн}$ ;  $R_n = 0,0099 \text{ Ом}$ .

Установившийся ток:  $I_y = 592 \text{ А}$ .

Кратность перегрузки:  $K_{II} = 2,5$ .

Амплитуда опорного напряжения  $U_{опmax} = 10 \text{ В}$ .

Форма опорного напряжения - косинусоидальная.

Заданные значения напряжения при номинальном токе (заданные углы) для расчета внешних характеристик и энергетических характеристик в функции тока:

$220 \text{ В}$ ,  $110 \text{ В}$ ,  $0 \text{ В}$ ,  $-110 \text{ В}$ ,  $-220 \text{ В}$ .

Заданные значения тока, для которых ведется расчет регулировочных характеристик:

$I_{min} > I_{удерж}$ ;  $I_y = 592 \text{ А}$ ;  $I_{II} = K_{II} I_y$ ;  $I_{гр max}$

#### ПБ.4. Работа с программой

Загрузка программы осуществляется запуском файла `wegx-c.exe`. Оператор в диалоговом режиме в ответ на запрос программы с помощью клавиш управления курсором выбирает позицию и набирает исходные данные. С помощью клавиши "Enter" производится ввод исходных данных и переход к следующему кадру. Программа позволяет вернуться к предыдущему кадру нажатием клавиши "Esc". Вывод на печать таблиц осуществляется с помощью клавиши "Print Screen". Для вывода на печать графиков необходимо перейти к черно-белому режиму экрана нажатием клавиши "F5" и затем клавиши "Print Screen".

После изображения графиков программой предоставляется возможность изменить (при необходимости) исходные данные и перейти к расчету других характеристик.

В программе также используются функциональные клавиши "F1" (Help) и "F10" (Quit).

## ОГЛАВЛЕНИЕ

Введение.....	3
1. Задание .....	4
2. Содержание курсовой работы .....	8
3. Расчет параметров и выбор силового трансформатора .....	10
4. Проверка выбранного трансформатора .....	13
5. Выбор тиристорov .....	17
6. Проверка тиристорov по нагреву .....	22
7. Выбор предохранителей и проверка тиристорov на токи короткого замыкания .....	31
8. Расчет параметров и выбор сглаживающего реактора .....	40
9. Внешние, регулировочные и энергетические характеристики преобразователя .....	44
10. Построение временных диаграмм .....	70
11. Оформление курсовой работы .....	72
12. Защита курсовой работы .....	72
13. Принятые обозначения .....	73
Библиографический список .....	77
Приложения	
Приложение П1. Основные параметры силовых трансформаторов для тиристорных преобразователей электроприводов постоянного тока средней мощности .....	79
Приложение П2. Основные параметры тиристорov .....	80
Приложение П3. Основные параметры и характеристики быстродействующих плавких предохранителей .....	82
Приложение П4. Основные параметры сглаживающих реакторов для тиристорных электроприводов постоянного тока .....	84
Приложение П5. Инструкция для пользования программой расчета внешних, регулировочных, ограничительной и энергетических характеристик преобразователя (« <i>wex-c</i> ») .....	87