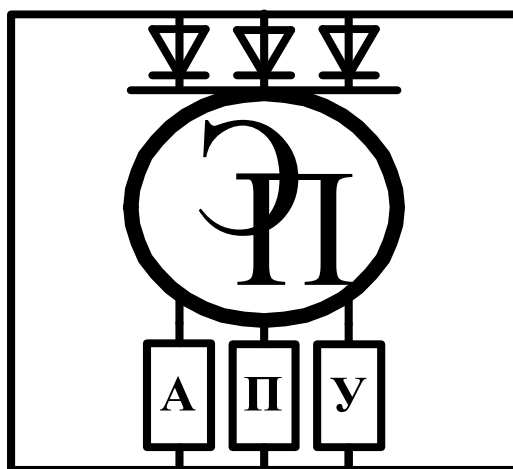


МЕЖГОСУДАРСТВЕННОЕ ОБРАЗОВАТЕЛЬНОЕ УЧРЕЖДЕНИЕ
ВЫСШЕГО ОБРАЗОВАНИЯ
«БЕЛОРУССКО-РОССИЙСКИЙ УНИВЕРСИТЕТ»

Кафедра «Электропривод и АПУ»

СИЛОВАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

*Методические рекомендации к курсовому проектированию
для студентов специальности
1-53 01 05 «Автоматизированные электроприводы»
очной и заочной форм обучения*



Могилев 2024

УДК 621.314
ББК 31.264.5
С36

Рекомендовано к изданию
учебно-методическим отделом
Белорусско-Российского университета

Одобрено кафедрой «Электропривод и АПУ» «14» декабря 2023 г.,
протокол № 5

Составитель ст. преподаватель Г. В. Бочкарев

Рецензент канд. техн. наук, доц. С. В. Болотов

В методических рекомендациях изложены необходимые сведения для выполнения курсовых проектов по дисциплине «Силовая преобразовательная техника». Приведены справочные данные на конструктивные компоненты для различного вида проектируемых силовых преобразователей электромеханических систем.

Учебное издание

СИЛОВАЯ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Ответственный за выпуск	А. С. Коваль
Корректор	А. А. Подошевка
Компьютерная верстка	Е. В. Ковалевская

Подписано в печать . Формат 60×84/16. Бумага офсетная. Гарнитура Таймс.
Печать трафаретная. Усл. печ. л. . Уч.-изд. л. . Тираж 56 экз. Заказ №

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

© Белорусско-Российский
университет, 2024

Содержание

1 Пояснительная записка.....	4
2 Графическая часть проекта.....	4
3 Методические указания по выбору исходных данных.....	5
4 Технические данные электродвигателей.....	9
5 Общие сведения о классификации преобразователей.....	15
6 Анализ вариантов технических решений.....	15
6.1 Общие вопросы анализа вариантов технических решений.....	15
7 Разработка схемы электрической принципиальной силовой части преобразователя.....	20
8 Разработка схемы электрической функциональной для системы управления преобразователя.....	22
9 Расчет и выбор элементов силовой части преобразователей.....	22
9.1 Общие вопросы расчета выбора элементов силовой части.....	22
9.2 Расчет и выбор элементов силовой части УВ и инверторов, ведомых сетью.....	23
9.3 Расчет и выбор элементов силовой части широтно-импульсных преобразователей и автономных инверторов.....	33
Список литературы.....	44
Приложение А.....	47

1 Пояснительная записка

При выполнении пояснительной записки обязательному рассмотрению и отражению подлежат следующие разделы.

Введение (1–2 листа).

1 Анализ вариантов технических решений по силовой части преобразователя, расчёт элементов.

1.1 Краткая классификация преобразователей по заданному типу (3–4 листа).

1.2 Анализ вариантов технических решений (3–4 листа).

1.3 Разработка схемы электрической принципиальной силовой части преобразователя (3–4 листа).

1.4 Разработка схемы электрической функциональной системы управления (3–4 листа).

1.5 Расчёт и выбор элементов силовой части преобразователя (3–4 листа).

2 Математическое моделирование силовой части преобразователя

2.1 Разработка эквивалентной схемы замещения силовой части преобразователя, математическое описание ((3–4 листа).

2.2 Разработка математического описания силовой части преобразователя (3–4 листа).

2.3 Разработка математической модели и расчёт электромагнитных процессов (3–4 листа).

3 Расчёт регулировочной и внешних характеристик преобразователя.

3.1 Расчёт регулировочной характеристики (3–4 листа).

3.2 Расчёт внешних характеристик (3–4 листа).

4 Расчёт энергетических характеристик преобразователя (3–4 листа).

Заключение (1–2 листа).

Список литературы (1–2 листа).

Приложения (3–4 листа).

Рекомендуемый объем пояснительной записки – 45–50 листов, из расчета, что записка отпечатана на принтере, шрифт **Courier New 14**, допускается применение других шрифтов. Рекомендуемый объем по отдельным вопросам пояснительной записки приведен в скобках.

Пояснительная записка выполняется на листах формата А4, оформление – в соответствии с рекомендациями и требованиями [1].

2 Графическая часть проекта

Графическая часть проекта выполняется на двух листах формата А1.

На первом листе выполняются следующие виды схем:

1) схема электрическая принципиальная силовой части преобразователя;

2) схема электрическая функциональная системы управления преобразователя;

3) обобщённая схема замещения силовой части преобразователя;

4) схемы замещения силовой части преобразователя.

На втором листе выполняются следующие графики:

- 1) графики электромагнитных процессов;
- 2) график регулировочной характеристики;
- 3) графики внешних характеристик;
- 4) графики энергетических характеристик.

Для оптимального использования полезного места форматов допускается другое распределение схем и графиков. Оформление – в соответствии с рекомендациями и требованиями [1].

3 Методические указания по выбору исходных данных

Исходные данные для проектирования силового преобразователя выбираются по таблицам 1–6.

Внимание!

1 Для проектирования управляемых выпрямителей (УВ) выбор исходных данных необходимо производить по таблицам 1–4 и 6.

2 Для проектирования широтно-импульсных преобразователей (ШИП) выбор исходных данных необходимо производить по таблицам 1–3, 5 и 6.

3 Для проектирования автономных инверторов (АИ) выбор исходных данных необходимо производить по таблицам 1–3, 5 и 6.

Выбор исходных данных производится по шифру зачетной книжки.

Календарный график выполнения работ по проектам определяется соответствующими деканатами и руководителем проекта.

Выбор необходимо начинать с таблицы 1. В основных ячейках таблицы 1 представлена следующая информация (сверху вниз):

- тип преобразователя;
- тип электродвигателя;
- частота вращения.

При этом приняты следующие обозначения:

- ШИП (1) – номинальное напряжение электродвигателя 110 В;
- ШИП (2) – номинальное напряжение электродвигателя 220 В;
- для преобразователя типа УВ – номинальное напряжение электродвигателя принимается равным 220 В.

Таблица 1 – Выбор типа преобразователя, типа двигателя и частоты вращения

Предпо- следняя цифра шифра	Последняя цифра шифра зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	УВ ПБСТ-22 3000	АИ 4АА50А2У3 3000	ШИП (1) ПБСТ-22 3000	УВ ПБСТ-23 3000	АИ 4АА56А2У 3000	ШИП (1) ПБСТ-23 3000	УВ ПБСТ-32 3000	АИ 4АА56В2У3 3000	ШИП (1) ПБСТ-22 2200	УВ ПБСТ-33 3000
1	АИ 4АА50А4У3 1500	ШИП (1) ПБСТ-23 2200	УВ ПБСТ-22 2200	АИ 4АА56А4У3 1500	ШИП (1) ПБСТ-32 2200	УВ ПБСТ-23 2200	АИ 4АА56В4У3 1500	ШИП (1) ПБСТ-22 1500	УВ ПБСТ-32 2200	АИ 4ААБ3А4У3 1500
2	ШИП (1) ПБСТ-23 1500	УВ ПБСТ-22 1500	АИ 4ААБ3А6У3 1000	ШИП (1) ПБСТ-32 1500	УВ ПБСТ-23 1500	АИ 4АА63В6У3 1000	ШИП (1) ПБСТ-33 1500	УВ ПБСТ-32 1500	АИ 4А71А6У3 1000	ШИП (1) ПБСТ-42 1500
3	УВ ПБСТ-22 1000	АИ 4А63А2У3 3000	ШИП (1) ПБСТ-22 1000	УВ ПБСТ-23 1000	АИ 4А63В2У3 3000	ШИП (1) ПБСТ-23 1000	УВ ПБСТ-32 1000	АИ 4А71А2У3 3000	ШИП (1) ПБСТ-32 1000	УВ ПБСТ-38 1000
4	АИ 4А71В4У3 1500	ШИП (1) ПБСТ-33 1000	УВ ПБСТ-42 3000	АИ 4А80А4У3 1500	ШИП (1) ПБСТ-42 1000	УВ ПБСТ-43 3000	АИ 4А80В4У3 1500	ШИП (1) ПБСТ-43 1000	УВ ПБСТ-52 3000	АИ 4А90 4У3 1500
5	ШИП (2) ПБСТ-22 1000	УВ ПБСТ-33 2200	АИ 4А71В6У3 1000	ШИП (2) ПБСТ-23 1000	УВ ПБСТ-42 2200	АИ 4А80А6У3 1000	ШИП (2) ПБСТ-32 1000	УВ ПБСТ-43 2200	АИ 4А80В6У3 1000	ШИП (2) ПБСТ-33 1000
6	УВ ПБСТ-33 1500	АИ 4А71В2У3 3000	ШИП (2) ПБСТ-22 1500	УВ ПБСТ-42 1500	АИ 4А80А2У3 3000	ШИП (2) ПБСТ-23 1500	УВ ПБСТ-43 1500	АИ 4А80В2У3 3000	ШИП (2) ПБСТ-32 1500	УВ ПБСТ-52 1500
7	АИ 4А100 4У3 1500	ШИП 2ПБ-90МГ 3000	УВ ПБСТ-42 1000	АИ 4А100 4У3 1500	ШИП 2ПБ-90МГ 2200	УВ ПБСТ-43 1000	АИ 4А112М4У3 1500	ШИП 2ПБ-90МГ 1500	УВ ПБСТ-52 1000	АИ 4А132 4У3 1500

Окончание таблицы 1

Предпослед- няя цифра шифра	Последняя цифра шифра зачетной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
8	ШИП ПГТ-2 3000	УВ ПБСТ-53 3000	АИ 4А90 6У3 1000	ШИП ПГТ-4 3000	УВ ПБСТ-62 3000	АИ 4А100 6У3 1000	ШИП ПГТ-6 3000	УВ ПБСТ-52 2200	АИ 4А112МА6У3 1000	ШИП ПГТ-9 3000
9	УВ ПБСТ-53 2200	АИ 4А90 2У3 3000	ШИП 2ПБ-90МГ 1000	УВ ПБСТ-53 1500	АИ 4А100 2У3 3000	ШИП (2) ПБСТ-22 2200	УВ ПБСТ-62 1500	АИ 4А100 2У3 3000	ШИП (2) ПБСТ-23 2200	УВ ПБСТ-63 1500

Таблица 2 – Выбор исполнения преобразователя (реверсивный, нереверсивный)

Третья цифра справа номера шифра зачётной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Исполнение преобразователя	Н	Р	Н	Р	Н	Р	Н	Р	Н	Р
<i>Примечание</i> – Н – нереверсивный; Р – реверсивный										

Таблица 3 – Выбор способа управления группами вентилей для реверсивных преобразователей

Последняя цифра шифра зачётной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Способ управления группами вентилей	Р	С	Р	С	Р	С	Р	С	Р	С
<i>Примечания</i> 1 Р – раздельный; С – совместный 2 Для однофазных УВ и ШИП принимать раздельный способ управления										

Таблица 4 – Выбор схемы силовой части

Предпоследняя цифра шифра зачётной книжки	Последняя цифра шифра зачётной книжки									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О
1	ТН	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О
2	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ
3	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН
4	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О
5	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ
6	ТМ	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН
7	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О
8	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ
9	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН	О	ТМ	ТН
<i>Примечание</i> – О – однофазная; ТН – трёхфазная с нулевым выводом; ТМ – трёхфазная мостовая										

Таблица 5 – Выбор типа элементов силовой части ШИП и АИ

Последняя цифра шифра зачётной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип элементов силовой части	ТИ	ТР	ТИ	ТР	ТИ	ТР	ТИ	ТР	ТИ	ТР
<i>Примечания</i> 1 ТИ – тиристорная схема 2 ТР – транзисторная 3 Для ШИП и АИ мощностью более 1 кВт разрабатывать тиристорную схему										

Таблица 6 – Выбор коэффициентов допустимой перегрузки по току силовой части преобразователя

Предпоследняя цифра шифра зачётной книжки	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K_3	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5	2,0	2,5	1,5

4 Технические данные электродвигателей

Исходными данными (номинальными) для проектирования силового преобразователя являются технические данные электродвигателя.

Технические данные для электродвигателей серии 4А (допускается использование двигателей более современных серий) необходимо взять из справочной литературы.

Технические данные для электродвигателей постоянного тока необходимо взять из справочной литературы либо из таблиц 7–12.

Таблица 7 – Электродвигатели серии ПБСТ на 110 В

Характеристика	2200 об/мин			3000 об/мин	
	ПБСТ-22	ПБСТ-23	ПБСТ-32	ПБСТ-22	ПБСТ-23
Мощность P_H , кВт	0,85	1,15	1,5	1,0	1,3
Ток I_H , А	9,6	12,6	16	11	14,4
Момент M_H , Н·м	3,8	5,1	6,64	3,24	4,23
КПД η , %	78,0	80,5	82,5	79,5	80,3
Максимальная частота вращения при ослаблении поля $n_{\max}$, об/мин	4000	4000	4000	4000	4000
Маховой момент GD^2 , кгс·м ²	0,048	0,055	0,100	0,048	0,055
Допустимая кратность пускового тока I_{Π}/I_H	4	4	4	4	4
Число полюсов $2p$	4	4	4	4	4
Число витков обмотки якоря $w_{\text{я}}$	378	315	230	294	231
Сопротивление обмотки якоря при 15 °С $R_{\text{д}}$, Ом	0,44	0,31	0,148	0,255	0,17
Число параллельных ветвей $2a$	2	2	2	2	2
Сопротивление добавочных полюсов при 15 °С $R_{\text{л}}$, Ом	0,31	0,266	0,105	0,19	0,148
Число витков параллельной обмотки $w_{\text{ш}}$	2100	1800	1700	2100	2100
Сопротивление параллельной обмотки при 15 °С $R_{\text{ш}}$, Ом	240	210	186	240	290

Таблица 8 – Электродвигатели серии ПБСТ на 220 В

Характеристика	Частота вращения 1000 об/мин									
	ПБСТ-22	ПБСТ-23	ПБСТ-32	ПБСТ-33	ПБСТ-42	ПБСТ-43	ПБСТ-52	ПБСТ-53	ПБСТ-62	ПБСТ-63
Мощность P_H , кВт	0,40	0,55	0,80	1,00	1,40	1,90	2,50	3,30	4,70	5,40
Ток I_H , А	2,4	3,2	4,5	5,4	7,7	10,7	13,2	16,6	24	27
Момент M_H , Н·м	3,9	5,37	7,8	9,75	13,6	18,5	24,4	32,2	46,6	52,7
КПД η , %	70,5	70,0	75,0	79,0	78,0	80,4	82,7	86,5	87,0	88,0
Максимальная частота вращения при ослаблении поля n_{max} , об/мин	2500	2500	2500	2500	3000	3000	3000	3000	3000	3000
Маховой момент GD^2 , кгс·м ²	0,048	0,055	0,100	0,130	0,185	0,230	0,440	0,520	1,030	1,230
Допустимая кратность пускового тока $I_{\text{п}}/I_H$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Число полюсов $2p$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Число витков обмотки якоря $w_{\text{я}}$	1512	1176	920	690	725	550	468	312	351	324
Сопrotивление обмотки якоря при 15 °С $R_{\text{д}}$, Ом	6,4	4,32	2,4	1,68	1,7	0,98	0,72	0,44	0,344	0,154
Число параллельных ветвей $2a$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Сопrotивление добавочных полюсов при 15 °С $R_{\text{л}}$, Ом	4,75	2,77	1,6	0,94	0,84	0,676	0,32	0,172	0,114	0,061
Число витков параллельной обмотки $w_{\text{ш}}$	4200	2700	3100	2750	2600	2900	2300	1800	2800	2000
Сопrotивление параллельной обмотки при 15 °С $R_{\text{ш}}$, Ом	960	490	600	600	380	600	300	226	326	206

Таблица 9 – Электродвигатели серии ПБСТ на 220 В

Характеристика	Частота вращения 1500 об/мин											
	ПБСТ-22	ПБСТ-23	ПБСТ-32	ПБСТ-33	ПБСТ-42	ПБСТ-43	ПБСТ-52	ПБСТ-53	ПБСТ-62	ПБСТ-63		
Мощность P_H , кВт	0,6	0,85	1,20	1,60	2,10	2,80	4,10	4,8	7,2	7,8		
Ток I_H , А	3,4	4,75	6,5	8,5	11,0	14,5	20,8	24,2	36	38		
Момент (M_H) , Н·м	3,9	5,52	7,8	10,4	13,6	18,3	26,6	31,2	46,8	50,6		
КПД η , %	76,0	77,0	79,8	82,0	83,5	85,5	87,2	88,0	90,0	91,0		
Максимальная частота вращения при ослаблении поля n_{max} , об/мин	3750	3750	3750	3750	3750	3750	3600	3600	3600	3600		
Маховой момент GD^2 , кгс·м ²	0,048	0,055	0,100	0,130	0,185	0,230	0,440	0,520	1,030	1,230		
Допустимая кратность пускового тока $I_{п}/I_H$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Число полюсов $2p$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Число витков обмотки якоря $w_{я}$	1092	861	644	506	475	350	312	234	234	154		
Сопротивление обмотки якоря при 15 °С $R_{д}$, Ом	3,43	2,34	1,2	0,92	0,62	0,42	0,378	0,21	0,152	0,077		
Число параллельных ветвей $2a$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
Сопротивление добавочных полюсов при 15 °С $R_{л}$, Ом	2,18	1,6	0,81	0,47	0,39	0,28	0,138	0,106	0,064	0,0302		
Число витков параллельной обмотки $w_{ш}$	4200	3100	3100	2750	2600	2400	2300	2000	2800	2000		
Сопротивление параллельной обмотки при 15 °С $R_{ш}$, Ом	960	654	600	600	380	404	300	278	326	206		

Таблица 10 – Электродвигатели серии ПБСТ на 220 В

Характеристика	Частота вращения 2200 об/мин											
	ПБСТ-22	ПБСТ-23	ПБСТ-32	ПБСТ-33	ПБСТ-42	ПБСТ-43	ПБСТ-52	ПБСТ-53	ПБСТ-62	ПБСТ-63		
Мощность P_H , кВт	0,85	1,15	1,50	2,10	2,90	3,80	5,50	6,30	10,0	11,0		
Ток I_H , А	4,8	6,3	8,0	11,0	15,0	19,5	27,8	31,2	50,0	54,0		
Момент M_H , Н·м	3,8	5,1	6,64	9,3	12,8	16,8	24,4	28	44,4	48,7		
КПД η , %	77,0	80,0	81,7	84,7	86,5	87,2	88,5	90,0	90,0	91,5		
Максимальная частота вращения при ослаблении поля n_{max} , об/мин	4000	4000	4000	4000	4000	4000	3600	3600	3600	3600		
Маховой момент GD^2 , кгс·м ²	0,048	0,055	0,100	0,130	0,185	0,230	0,440	0,520	1,030	1,230		
Допустимая кратность пускового тока I_p/I_H	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Число полюсов $2p$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Число витков обмотки якоря $w_{\text{я}}$	756	609	437	368	400	275	234	156	156	117		
Сопротивление обмотки якоря при 15 °С $R_{\text{д}}$, Ом	1,76	1,23	0,55	0,5	0,47	0,245	0,18	0,11	0,066	0,046		
Число параллельных ветвей $2a$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
Сопротивление добавочных полюсов при 15 °С $R_{\text{л}}$, Ом	1,1	0,97	0,416	0,264	0,244	0,162	0,0734	0,042	0,0242	0,0186		
Число витков параллельной обмотки $w_{\text{ш}}$	4200	3100	3100	3000	3300	2900	2700	2000	2800	2200		
Сопротивление параллельной обмотки при 15 °С $R_{\text{ш}}$, Ом	960	634	600	750	666	600	402	278	326	248		

Таблица 11 – Электродвигатели серии ПБСТ на 220 В

Характеристика	Частота вращения 3000 об/мин										
	ПБСТ-22	ПБСТ-23	ПБСТ-32	ПБСТ-33	ПБСТ-42	ПБСТ-43	ПБСТ-52	ПБСТ-53	ПБСТ-62		
Мощность P_H , кВт	1,00	1,30	1,75	2,35	3,40	4,30	6,50	8,00	11,30		
Ток I_H , А	5,6	7,2	9,5	12,5	17,6	22,0	33,0	39,4	56,0		
Момент M_H , Н·м	3,24	4,23	5,5	7,6	11	14	21,2	26,0	36,6		
КПД η , %	78,5	80,3	81,5	83,7	86,5	88,0	88,5	91,0	91,0		
Максимальная частота вращения при ослаблении поля $n_{\max}$, об/мин	4000	4000	4000	4000	4000	4000	3600	3600	3600		
Маховой момент GD^2 , кгс·м ²	0,048	0,055	0,100	0,130	0,185	0,230	0,440	0,520	1,030		
Допустимая кратность пускового тока I_{Π}/I_H	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Число полюсов $2p$	4	4	4	4	4	4	4	4	4		
Число витков обмотки якоря $w_{\text{я}}$	588	462	368	276	325	250	195	117	117		
Сопротивление обмотки якоря при 15 °С R_d , Ом	1,02	0,68	0,415	0,28	0,39	0,222	0,135	0,0525	0,04		
Число параллельных ветвей $2a$	2	2	2	2	2	2	2	2	2		
Сопротивление добавочных полюсов при 15 °С $R_{\text{л}}$, Ом	0,75	0,52	0,21	0,142	0,15	0,124	0,05	0,0254	0,0254		
Число витков параллельной обмотки $w_{\text{ш}}$	4200	4200	3400	3000	3500	3300	3200	2000	2800		
Сопротивление параллельной обмотки при 15 °С $R_{\text{ш}}$, Ом	960	1120	780	760	840	810	570	278	326		

Таблица 12 – Электродвигатели серии ПБСТ на 110 В

Характеристика	Частота вращения, 1000 об/мин						Частота вращения 1500 об/мин				
	ПБСТ-22	ПБСТ-23	ПБСТ-32	ПБСТ-33	ПБСТ-42	ПБСТ-43	ПБСТ-22	ПБСТ-23	ПБСТ-32	ПБСТ-33	ПБСТ-42
Мощность P_H , кВт	0,4	0,55	0,8	1,0	1,4	1,9	0,6	0,85	1,2	1,6	2,1
Ток I_H , А	4,8	6,4	9,0	10,8	15,5	21,0	7,0	9,2	13,0	17,0	22
Момент M_H , Н·м	3,9	5,37	7	9,75	13,6	18,5	3,9	5,52	7,8	10,4	13,6
КПД η , %	70	71,3	74,7	79,2	79,0	80,4	74,0	80,5	79,5	82,4	84,5
Максимальная частота вращения при ослаблении поля $n_{\max}$, об/мин	2500	2500	2500	2500	3000	3000	3750	3750	3750	3750	4000
Маховой момент GD^2 , кгс·м ²	0,048	0,055	0,100	0,130	0,185	0,230	0,048	0,055	0,100	1,030	1,185
Допустимая кратность пускового тока $I_{п}/I_H$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Число полюсов $2p$	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4	4
Число витков обмотки якоря $wя$	756	588	460	345	375	275	546	441	322	253	250
Сопроотивление обмотки якоря при 15 °С R_d , Ом	1,76	1,18	0,6	0,42	0,44	0,245	0,82	0,594	0,3	0,23	0,188
Число параллельных ветвей $2a$	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2	2
Сопроотивление добавочных полюсов при 15 °С $R_{л}$, Ом	1,1	0,66	0,44	0,24	0,23	0,162	0,67	0,367	0,187	0,11	0,098
Число витков параллельной обмотки $wш$	2100	1550	1500	1450	1550	1500	2100	1800	1500	1450	1550
Сопроотивление параллельной обмотки при 15 °С $R_{ш}$, Ом	240	156	140	160	180	162	240	216	146	160	130

5 Общие сведения о классификации преобразователей

Необходимо определить положение заданного типа преобразователя в составе общей классификационной схемы, при этом раскрыть основные классификационные признаки. Завершением данного подраздела является классификация заданного типа преобразователя по возможным схмотехническим решениям силовой части и алгоритмам работы системы управления.

Классификация преобразователей приведена:

- управляемые выпрямители – в [7, 9, 16, 20];
- импульсные преобразователи постоянного тока – в [14,15];
- преобразователи частоты переменного тока (инверторы) – в [9,16,17].

6 Анализ вариантов технических решений

6.1 Общие вопросы анализа вариантов технических решений

Первоначально необходимо выполнить структурный анализ построения силовой части заданного типа преобразователя для определения последовательности преобразования электрической энергии.

При выполнении данного анализа необходимо обосновать применение тех звеньев обобщенной структуры преобразователя, которые позволяют сформировать лучшие общетехнические показатели и характеристики при приемлемых энергетических характеристиках либо наоборот. Таким образом, принимается определенный критерий для выполнения задач проектирования.

Последующий этап анализа выполняется для двух, трех схем силовой части заданного типа преобразователя. Основными критериями при выполнении анализа вариантов являются технические показатели и характеристики, по качественному составу которых формируются экспертные оценки для выбора схмотехнического решения силовой части проектируемого преобразователя.

К общим техническим показателям преобразователей различных типов можно отнести следующие:

- диапазон регулирования выходных координат;
- быстродействие (дискретность);
- количество управляемых и неуправляемых вентиляей;
- промежуточное преобразование электрической энергии;
- габариты, массу и т. д.

К техническим характеристикам преобразователей относятся следующие:

- регулировочные;
- внешние;
- динамические;
- энергетические.

6.1.1 Анализ вариантов технических решений для УВ. При выполнении структурного анализа УВ необходимо рассмотреть следующие вопросы:

- применение силового согласующего трансформатора либо токоограничивающих реакторов;
- необходимость применения устройств, позволяющих улучшить коэффициент мощности $\cos\varphi$ УВ либо его вентильной группы;
- применение фильтрующих устройств в цепи постоянного тока.

Применение силового трансформатора позволяет решить следующие задачи при проектировании УВ:

- выполнить согласование напряжения питающей сети с напряжением нагрузки (электродвигателя);
- выполнить ограничение скорости нарастания прямого тока тиристоров (диодов) и тока короткого замыкания вентильной группы.

В случае проектирования однофазных УВ для управления электродвигателями с номинальным напряжением питания 220 В и трехфазных мостовых УВ для управления электродвигателями с номинальным напряжением питания 440 В рекомендуется применять бестрансформаторные схемы, поскольку первая функция, выполняемая силовым трансформатором, может быть исключена. Для ограничения скорости нарастания прямого тока тиристоров и тока короткого замыкания вентильной группы на допустимом уровне, т. е. для выполнения второй функции силового трансформатора, для таких схем УВ применяются токоограничивающие реакторы.

Управляемые выпрямители, у которых при регулировании напряжения достигается повышение коэффициента мощности, по способу коммутации вентилей можно подразделить на два основных класса:

- 1) управляемые выпрямители с искусственной или емкостной коммутацией и опережающими углами управления;
- 2) управляемые выпрямители с естественной коммутацией и отстающими углами управления.

В УВ первого класса коммутация вентилей происходит при опережающих углах управления вентильных групп, для чего в силовые цепи преобразователей вводятся конденсаторы. Возможность использования таких установок в качестве генераторов реактивной мощности является их большим преимуществом, однако они более сложные, чем обычные преобразователи, т. к. содержат дополнительные сильноточные элементы, которые необходимы для коммутации [7, 10, 11, 23].

УВ второго класса наиболее просты, содержат минимальное количество силовых элементов, обеспечивают сколь угодно глубокое регулирование выходного напряжения и плавный переход из выпрямительного режима в инверторный, обладают высокой надежностью. Принципы построения УВ второго класса рассмотрены в [7, 16, 20].

Наиболее распространенным фильтрующим устройством в цепи постоянного тока УВ при питании якоря электродвигателя является сглаживающий дроссель. Использование в силовой структуре УВ сглаживающего дросселя связано с выполнением нескольких функций [9, 12, 20]:

- уменьшение зоны прерывистого тока нагрузки;
- уменьшение пульсаций выпрямленного тока;

- ограничение скорости нарастания аварийных токов при коротких замыканиях на стороне постоянного тока;
- ограничение максимального мгновенного значения напряжения на зажимах электродвигателя.

В соответствии с перечисленными функциями анализируется целесообразность применения сглаживающего дросселя.

Таким образом, структурный анализ позволяет идентифицировать ряд параметров и характеристик УВ в относительной форме с целью определения наиболее оптимальной структуры силовой части.

С целью определения наиболее приемлемых технических параметров и характеристик, выбранных в результате структурного анализа, структуры УВ, необходимо выполнить анализ технических решений для основных ее звеньев.

При наличии силового трансформатора необходимо проанализировать варианты схем соединения обмоток трансформатора. Для УВ применяются три варианта схем соединения обмоток трансформатора:

- 1) «звезда–звезда»;
- 2) «треугольник–звезда»;
- 3) «звезда–зигзаг».

Для трехфазных выпрямителей с нулевым выводом трансформатора при первых двух схемах в сердечнике трансформатора возникает поток вынужденного намагничивания, пропорциональный току, равному $I_d/3$. Действие потока вынужденного намагничивания приводит к сильному повышению магнитной индукции и, следовательно, к необходимости увеличения сечения сердечника трансформатора, т. е. к завышению его установленной мощности. При соединении обмоток трансформатора по схеме «звезда–зигзаг» намагничивающие силы, создаваемые первичными обмотками трансформатора, оказываются уравновешенными, и поток однонаправленного намагничивания практически не возникает. Однако при таком исполнении трансформатора повышается расход меди. Расчеты и практическая реализация УВ с нулевым выводом трансформатора [11, 12] показывают, что только у трансформаторов мощностью более 30 кВ·А при соединении обмоток в «зигзаг» получается выигрыш в стоимости. Информация о конструктивном исполнении силовых трансформаторов, применяемых в УВ, приведена в [2, 21].

Анализ вариантов схемотехнических решений вентильных групп УВ нереверсивного и реверсивного исполнения производится относительно дискретных свойств. При анализе нереверсивных УВ необходимо рассматривать схемы с нулевым вентилем и без нулевого вентиля [17, 9, 16, 20] с точки зрения формируемых энергетических, регулировочных и внешних характеристик. Для мостовых схем нереверсивных УВ необходимо произвести оценку целесообразности применения симметричных либо несимметричных схем вентильных групп [7, 20]. Для реверсивных УВ с отдельным и совместным управлением должны быть проанализированы различные варианты схем включения вентильных групп:

- встречно-параллельные схемы;
- перекрестные;
- Н-схемы.

Анализ данных схем приведен в [9]. Для реверсивных УВ с совместным управлением необходимо произвести оценку и выбор способа согласования регулировочных характеристик вентильных групп.

6.1.2 Анализ вариантов технических решений для импульсных преобразователей постоянного тока. При выполнении структурного анализа импульсных преобразователей (ИП) необходимо рассмотреть следующие вопросы:

- необходимость применения блока питания, обеспечивающего рекуперацию энергии в питающую сеть в режимах торможения электродвигателя;
- применение фильтрующих устройств цепи питания ИП;
- применение общего либо раздельного питания силовой части и коммутирующего устройства тиристорных ИП.

Разработка ИП, обеспечивающего рекуперацию энергии в питающую сеть, связана с применением в качестве блока питания реверсивных УВ, что в значительной степени усложняет в целом ИП. Поэтому, в общем случае, блок питания ИП выполняется на базе неуправляемых выпрямителей. В зависимости от применяемой схемы неуправляемого выпрямителя должно быть определено наличие либо отсутствие фильтрующего устройства. Для ИП с цепями рекуперации электромагнитной энергии коммутирующих устройств и нагрузки необходимо применять фильтрующие конденсаторы в качестве приемников энергии [14, 15].

Для тиристорных ИП при номинальном напряжении двигателя 110 В допускается применение общего питания силовой части и коммутирующего устройства, при номинальном напряжении 220 В питание должно быть раздельным.

Анализ вариантов схемотехнических решений нереверсивных транзисторных ИП выполняется для схем с однонаправленным и двунаправленным протеканием тока нагрузки. Анализ вариантов схемотехнических решений реверсивных транзисторных ИП выполняется для нулевых и мостовых схем.

Для тиристорных ИП необходимо рассмотреть способы параллельной последовательной коммутации силовых тириستоров. Согласно [15] ИП с последовательной коммутацией имеют лучшие регулировочные, внешние и энергетические характеристики по отношению к ИП с параллельной коммутацией. Последующий анализ вариантов схемотехнических решений тиристорных ИП выполняется для коммутирующих устройств [15].

Для транзисторных ИП и тиристорных ИП с последовательной коммутацией наиболее приемлемым является способ широтно-импульсного регулирования (ШИР) выходного напряжения. В реверсивных схемах широтно-импульсных преобразователей могут быть обеспечены симметричный и несимметричный способы формирования выходного напряжения. При симметричном способе достигается максимальное быстродействие регулирования выходных координат электродвигателя, однако формирование знакопеременного напряжения приводит к повышенным пульсациям тока, что является существенным недостатком.

6.1.3 Анализ вариантов технических решений для АИ. Основные вопросы и последовательность выполнения структурного анализа преобразователей частоты (ПЧ), выполненных на базе автономных инверторов (АИ), аналогичны

структурному анализу реверсивных ИП постоянного тока, поскольку последние при симметричном способе формирования выходного напряжения адекватны по структурам построения с ПЧ с однофазными АИ. Отличительной особенностью является анализ структур построения ПЧ для различных способов регулирования выходного напряжения. В частности при амплитудном способе регулирования напряжения в состав ПЧ могут входить либо управляемые выпрямители, либо неуправляемые выпрямители в составе с импульсными прерывателями.

По характеру протекания электромагнитных процессов в силовой части АИ подразделяются на следующие группы:

- инверторы напряжения;
- инверторы тока;
- инверторы резонансные.

Характер электромагнитных процессов АИ определяется схмотехническими решениями и параметрами фильтрующих устройств (С, L либо LC). При анализе вариантов технических решений фильтрующих устройств необходимо учитывать, что АИ напряжения применяются в составе электроприводов, преимущественно работающих в режиме стабилизации выходной координаты, а АИ тока – в составе электроприводов, преимущественно работающих в режимах задания.

Одним из важных этапов анализа для АИ является обоснование выбора способа регулирования выходного напряжения [17]:

- амплитудное регулирование;
- широтно-импульсное регулирование на основной частоте;
- широтно-импульсное регулирование на несущей частоте;
- широтно-импульсное регулирование по синусоидальному закону;
- комбинированное регулирование.

Для широтно-импульсного способа регулирования напряжения на несущей частоте необходимо произвести оценку симметричного и несимметричного способов формирования напряжения.

Использование амплитудного регулирования напряжения с помощью управляемого выпрямителя приводит к увеличению габаритов и веса сглаживающего LC-фильтра, условия работы которого в системе «преобразователь частоты – асинхронный двигатель» неблагоприятны [16,17,19].

Для АИ с широтно-импульсным регулированием напряжения на основной частоте характерна зависимость гармонического состава выходного напряжения от кратности изменения частоты и напряжения. При этом КПД. электроприводов, выполненных на базе таких инверторов, будет существенно уменьшаться в зоне низких частот и нагрузок, близких к номинальной, поэтому данный способ регулирования напряжения имеет весьма ограниченное применение в преобразовательных установках [17].

При выборе регулирования выходного напряжения обоснованно принимается схема включения обмоток электродвигателя (треугольник либо звезда) и закон переключения полупроводниковых приборов силовой части АИ (закон переключения $\alpha = 180^\circ$ либо $\alpha = 120^\circ$). Необходимо учитывать, что схема управления трехфазным инвертором при $\alpha = 120^\circ$ сложнее, т. к. требуется формирование

несимметричного шестифазного напряжения.

Анализ вариантов схемотехнических решений силовой части транзисторных и тиристорных АИ выполняется для схем управления трехфазными асинхронными электродвигателями:

- от трех (независимых) однофазных АИ;
- от трехфазных мостовых АИ.

Последующий анализ вариантов схемотехнических решений тиристорных АИ производится для коммутирующих устройств (коммутационных узлов) КУ. Схемы КУ, используемых в автономных инверторах напряжения (АИН), основаны на тех же принципах, что и в ИП постоянного тока. Применительно к трехфазной мостовой схеме АИН рассматривается шесть видов включения КУ и в соответствии с этим шесть видов схем АИН [16–18]:

- 1) схемы с повентильным включением КУ (индивидуальная коммутация);
- 2) схемы с межвентильным включением КУ (межфазная коммутация);
- 3) схемы с пофазным включением КУ (пофазная коммутация);
- 4) схемы с межфазным включением КУ;
- 5) схемы с групповым включением КУ (групповая коммутация);
- 6) схемы с общим включением КУ (общая коммутация).

Схема КУ определяет показатели и характеристики тиристорных преобразователей, поэтому выбор оптимальной схемы КУ для каждого конкретного случая имеет очень важное значение.

7 Разработка схемы электрической принципиальной силовой части преобразователя

Исходным материалом для разработки схемы электрической принципиальной являются общая структура преобразователя и схематические решения отдельных ее звеньев, полученные в результате проведенного анализа вариантов технических решений.

Для обеспечения работоспособности проектируемого преобразователя необходимо разработать (выбрать) электрооборудование (элементы, устройства), с помощью которого осуществляются следующие функции:

- 1) подключение силовой части преобразователя к промышленной сети переменного тока;
- 2) защита от токов длительных перегрузок;
- 3) дистанционное включение и отключение преобразователя;
- 4) защита силовых полупроводниковых приборов от токов короткого замыкания;
- 5) защита силовых полупроводниковых приборов от перенапряжений.

При выборе средств защиты силовых полупроводниковых приборов производится оценка их быстродействия. Для защиты силовых полупроводниковых приборов от *токовременных* перегрузок и *токов короткого замыкания* используются следующие виды защиты [12]:

- запиранием;
- с помощью выключателей автоматических;
- с помощью предохранителей;
- комбинированная защита.

Защита запиранием силовых полупроводниковых приборов осуществляется системой управления в виде токовой отсечки либо путем прекращения подачи отпирающих импульсов. Для УВ наиболее эффективной по быстродействию является защита путем прекращения подачи отпирающих импульсов в сочетании с принудительным гашением тиристорov. Недостатком такой защиты является ее сложность. Наиболее просто такой вид защиты применяется в ИП постоянного тока и АИ.

Для защиты полупроводниковых приборов от **токов короткого замыкания** необходимо применять специальные быстродействующие предохранители типа ПНБ, ПНБМ, ПБВ, ПБФ. Защитная **токовременная** характеристика быстродействующего предохранителя должна быть согласована с перегрузочной характеристикой силового полупроводникового прибора (тиристора, транзистора и т. д.) таким образом, чтобы время «плавления и отключения» предохранителя были меньше того времени, в течение которого наступает разрушение полупроводниковой структуры [9].

При проектировании средств защиты силовых полупроводниковых приборов от перенапряжений необходимо проанализировать причины их возникновения, которые могут иметь внутренний и внешний характер [12]:

- 1) коммутация тока при переходе вентиля от проводящего к запертому состоянию;
- 2) отключение питающих трансформаторов со стороны первичной обмотки, особенно при холостом ходе;
- 3) отключение выключателя автоматического и/или срабатывание (перегорание) предохранителя в цепи выпрямленного тока при индуктивной нагрузке;
- 4) резонансные явления при включении трансформатора;
- 5) перенапряжения в питающей сети и т. д.

Наиболее распространенным видом защиты как от внешних, так и внутренних перенапряжений является применение RC-цепочек. Для компенсации внутренних перенапряжений RC-цепочки устанавливают параллельно силовой структуре вентиля, а для компенсации внешних перенапряжений – на стороне переменного тока [9,13].

Защита силовых полупроводниковых приборов также может осуществляться с помощью нелинейных резисторов – варисторов, тиректоров. Защитное действие данных элементов основано на резком уменьшении сопротивления с увеличением приложенного напряжения [12].

Во многих случаях при наличии в преобразователе внутренних перенапряжений целесообразно использовать лавинные вентили (диоды, тиристоры), которые могут эксплуатироваться без шунтирующих RC-цепочек.

При описании схемы электрической принципиальной необходимо определить возможные режимы работы, согласно которым рассматриваются основные состояния преобразователя. Описание режимов работы преобразователя и его состояний

выполняется по временным диаграммам электромагнитных процессов, которые должны быть приведены для полного цикла работы. В результате описания схемы формируется алгоритм управления вентилями, на основании которого разрабатывается схема электрическая функциональная для системы управления.

8 Разработка схемы электрической функциональной для системы управления преобразователя

Разработка схемы электрической функциональной для системы управления должна производиться с учетом ее последующей реализации на определенной элементной базе:

- 1) аналоговой;
- 2) цифровой;
- 3) микропроцессорной техники;
- 4) комбинированной.

Оформление схемы электрической функциональной для системы управления производится в соответствии с требованиями и рекомендациями [1].

Состав функциональных блоков и узлов схемы должен обеспечивать требуемый алгоритм управления вентилями.

Оформление схемы алгоритма для системы управления производится в соответствии с требованиями и рекомендациями [1].

При описании схемы электрической функциональной для системы управления должно быть выполнено следующее:

- описание работы всех блоков;
- описание работы всех узлов;
- описание всех протоколов обмена данными;
- описание организации для всех линий связи.

Все описания функциональных блоков и схемы должны сопровождаться диаграммами.

9 Расчет и выбор элементов силовой части преобразователей

9.1 Общие вопросы расчета выбора элементов силовой части

Методики расчета и выбора элементов силовой части преобразователей во многом определяются способом коммутации силовых вентилях. В целом рассматривают естественную и искусственную коммутацию. К преобразователям с естественной коммутацией относятся управляемые выпрямители, инверторы, ведомые сетью. К преобразователям с искусственной коммутацией относятся импульсные преобразователи постоянного тока, автономные инверторы.

В преобразователях с естественной коммутацией и тиристорных преобразователях с искусственной коммутацией параметры элементов определяются параметрами устройств согласования с питающей сетью и параметрами нагрузки.

В тиристорных преобразователях с искусственной коммутацией основные параметры элементов, кроме параметров устройств согласования и нагрузки, определяются параметрами коммутирующих устройств. Поэтому начальным этапом при расчете и выборе элементов силовой части преобразователей является расчет и выбор элементов устройств согласования и устройств коммутации.

При использовании той или иной методики расчета необходимо приводить принятые допущения.

При выборе элементов силовой части необходимо указывать их основные паспортные данные.

9.2 Расчет и выбор элементов силовой части УВ и инверторов, ведомых сетью

Основными элементами силовой части УВ являются следующие:

- 1) силовые согласующие трансформаторы;
- 2) токоограничивающие реакторы;
- 3) тиристоры;
- 4) диоды;
- 5) сглаживающие дроссели;
- 6) уравнительные дроссели.

Методики расчета перечисленных элементов приведены в [9,16,20]. Согласно данных методик должна обеспечиваться следующая последовательность расчета и выбора элементов силовой части УВ:

- 1) силовой трансформатор;
- 2) вентили;
- 3) токоограничивающие реакторы;
- 4) уравнительные дроссели;
- 5) сглаживающий дроссель;
- 6) элементы защиты.

Состав элементов в приведенной последовательности расчета определяется согласно схеме электрической принципиальной силовой части УВ.

9.2.1 Расчет параметров и выбор силового трансформатора.

Исходными данными для расчета силового трансформатора являются номинальные средние значения выпрямленного напряжения и тока, определяемые по паспортным данным электродвигателя.

Действующие значения ЭДС фазы вторичной обмотки силового трансформатора необходимо рассчитывать с учетом падений напряжения в контурах тока нагрузки, возможного снижения напряжения питающей сети, схемотехнического решения УВ. Максимальные значения ЭДС вентильного преобразователя при угле управления $\alpha = 0$ рассчитываются, в общем случае, по выражению

$$E_{dc} = k_c (U_{дн} + \Delta U_{cd} + \Delta U_{y\partial} + \Delta U_{mp} + \Delta U_k + U_B), \quad (1)$$

где k_c – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможное снижение напряжения сети на 10 %, $k_c = 1,1$;

$U_{дн}$ – номинальное напряжение электродвигателя, $U_{дн} = U_{ян}$;

$\Delta U_{сд}$ – падение напряжения на сглаживающем дросселе, $\Delta U_{сд} = (0,005...0,01) U_{дн}$;

$\Delta U_{yд}$ – падение напряжения на уравнивательных реакторах (дросселях) для реверсивных схем, $\Delta U_{yд} = (0,005...0,01) U_{дн}$;

ΔU_{mp} – падение напряжения на активном сопротивлении силового трансформатора.

Для трехфазных нулевых схем выпрямления $\Delta U_{mp} = (0,015...0,025) U_{дн}$.

Для трехфазных мостовых схем выпрямления $\Delta U_{mp} = (0,02...0,03) U_{дн}$;

ΔU_k – коммутационное падение напряжения,

$$\Delta U_k = A \frac{U_k}{100} U_{дн};$$

A – коэффициент, определяемый схемой выпрямителя (для трехфазных нулевых схем выпрямления $A = 0,87$; для мостовых схем выпрямления $A = 0,5$);

U_k – напряжение короткого замыкания силового трансформатора, $U_k = 5 \%...7 \%$;

ΔU_B – падение напряжения на вентилях (для нулевых схем выпрямления $\Delta U_B = 0,5...1$ В; для мостовых схем выпрямления $\Delta U_B = 1,5...2$ В).

В реверсивных УВ с совместным согласованным управлением группами вентилях требуется ограничение минимального угла управления $\alpha_{\min}$ для существования контура уравнительного тока, поэтому необходимо формирование запаса напряжения на трансформаторе, учитывающее неполное отпирание тиристоров УВ. Максимальное значение ЭДС для таких УВ определяется согласно выражению

$$E_{do}' = k_\alpha E_{do}, \quad (2)$$

где k_α – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий неполное отпирание параметров при максимальном управляющем сигнале, $k_\alpha = 1,1...1,2$.

Действующее значение ЭДС фазы вторичной обмотки силового трансформатора рассчитывается по выражению

$$E_{2\phi} = k_{cx} E_{do}, \quad (3)$$

где k_{cx} – коэффициент схемы (таблица 13); для реверсивных схем с совместным управлением группами

$$E_{2\phi} = k_{cx} E_{do}'. \quad (4)$$

Таблица 13 – Расчетные коэффициенты силовых схем

Номер схемы	Коэффициент						
	m	m_n	α	k_{cx}	k_{11}	k_{12}	k_0
1	1	2	1	1,11	1,0	1,0	2,82
2	1	2	1	1,11	1,0	1,0	1,41
3	1	2	1	1,11	$\sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$	$\sqrt{\frac{\pi - \alpha}{\pi}}$	1,41
4	3	3	1	0,855	0,82	0,58	2,41
5	3	6	2	0,428	0,82	0,82	1,41
6	3	6	2	0,428	0,82	0,82	1,41
					$\alpha < \pi / 3$	$\alpha < \pi / 3$	
7	3	6	0,5	0,855	0,71	0,29	2,45
Примечания 1 – однофазная нулевая двухполупериодная схема; 2 – однофазная мостовая симметричная схема; 3 – однофазная мостовая несимметричная схема; 4 – трехфазная нулевая схема; 5 – трехфазная мостовая симметричная схема; 6 – трехфазная мостовая несимметричная схема; 7 – трехфазная нулевая шестипульсная схема с уравнительным ротором							

Действующее значение линейного тока вторичной обмотки $I_{2л}$, А, рассчитывается по формуле

$$I_{2л} = k_i \cdot k_{I2} \cdot I_{di} \quad , \quad (5)$$

где k_i – коэффициент непрямоугольности тока в обмотках силового трансформатора, $k_i = 1,05 \dots 1,1$;

k_{I2} – коэффициент тока вторичной обмотки (см. таблицу 13).

Действующее значение линейного тока первичной обмотки силового трансформатора

$$I_1 = \frac{k_i \cdot k_{I1}}{k_{mp}} \cdot I_{di} \quad , \quad (6)$$

где k_{I1} – коэффициент тока первичной обмотки (см. таблицу 13);

k_{mp} – коэффициент трансформации,

$$k_{mp} = \frac{A_{1\phi}}{A_{2\phi}} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} \quad . \quad (7)$$

При соединении обмоток трехфазного трансформатора по схеме «звезда» линейный ток равен фазному, т. е.

$$\begin{cases} I_{1л} = I_{1ф}; \\ I_{2л} = I_{2ф}. \end{cases} \quad (8)$$

Расчетное значение мощности первичной и вторичной обмоток трансформатора S_1 и S_2 , кВт·А, определяют по формуле

$$\begin{cases} S_1 = m \cdot I_{1ф} \cdot U_{1ф}; \\ S_2 = m \cdot I_2 \cdot U_{2ф}, \end{cases} \quad (9)$$

где m – число фаз трансформатора.

Расчетная (типовая) мощность силового трансформатора

$$S_n = \frac{S_1 + S_2}{2}. \quad (10)$$

По полученному значению расчетной мощности выбирают силовой трансформатор. При этом должны быть соблюдены следующие условия:

$$S_n \leq S_2; \quad U_{2н} \leq U_{2фн}; \quad I_{2н} \leq I_{2фн}, \quad (11)$$

где S_n , $U_{2фн}$, $I_{2фн}$ – номинальные значения полной мощности, фазных напряжений и тока выбранного трансформатора соответственно.

Активное сопротивление фазы вторичной обмотки трансформатора

$$R_{фтр} = \frac{P_{\kappa}}{3I_{2фн}^2}, \quad (12)$$

где P_{κ} – потери короткого замыкания, Вт.

Индуктивность фазы вторичной обмотки

$$L_{2фн} = \frac{X_{2фн}}{2\pi \cdot f}. \quad (13)$$

Индуктивное сопротивление фазы

$$X_{фтр} = \sqrt{Z_{фтр}^2 - R_{фтр}^2}, \quad (14)$$

где $Z_{фтр}$ – полное сопротивление фазы трансформатора, Ом.

$$Z_{\phi mp} = \frac{U_{2\phi n} \cdot U_{\kappa} \%}{I_{2\phi n} \cdot 100 \%}, \quad (15)$$

где U_{κ} – напряжение короткого замыкания трансформатора (в процентах от номинального).

Значения активного сопротивления и индуктивности трансформатора, приведенные к цепи выпрямленного тока, находят по формуле

$$\begin{cases} R_{mp} = \alpha \cdot R_{\phi mp}; \\ L_{mp} = \alpha \cdot L_{\phi mp}, \end{cases} \quad (16)$$

где α – число обмоток трансформатора, обтекаемых рабочим током (см. таблицу 13).

9.2.2 Расчет и выбор тиристоров и диодов.

Тиристоры выбирают по допустимым значениям тока и напряжения, учитывая способ и эффективность охлаждения.

Наиболее часто используют воздушное (естественное или принудительное) и водяное охлаждения. Водяное охлаждение эффективнее воздушного, но его применение связано с рядом технических сложностей (повышенные требования к воде, усложнение конструкции вентильных блоков, наличие устройств, обеспечивающих принудительную циркуляцию воды). Поэтому применение такого способа охлаждения оправдано в вентильных преобразователях большой мощности.

Требуемая величина тока тиристора (среднее значение) I_{im} , А, вычисляется по формуле

$$I_{im} = \frac{I_{dn} \cdot k_{zi} \cdot k_{охл}}{m}, \quad (17)$$

где I_{dn} – номинальный ток нагрузки;

k_{zi} – коэффициент запаса по току, учитывающий пусковой ток двигателя, $k_{zi} = 2 \dots 2,5$;

m – число фаз;

$k_{охл}$ – коэффициент, учитывающий условия охлаждения.

При скорости охлаждающего воздуха $v_{охл} = 12$ м/с $k_{охл} = 1$, при $v_{охл} = 6$ м/с $k_{охл} = 1,4$, а при естественном охлаждении $v_{охл} = 0$ м/с $k_{охл} = 2,5$.

Номинальный ток тиристора

$$I_{Tн} \geq I_{ан}. \quad (18)$$

Выбранный тиристор проверяют на устойчивость при внешнем коротком замыкании:

$$I_{Tн} = \frac{I_{\kappa}}{15}, \quad (19)$$

где I_{κ} – ток короткого замыкания,

$$I_{\kappa} = \frac{100}{U_{\kappa}} \cdot I_{2фн}. \quad (20)$$

Максимальное значение напряжения (прямого и обратного) на тиристоре в вольтах

$$U_{np\max} = U_{обр\max} = k_o \cdot U_{2фн}, \quad (21)$$

где k_o – коэффициент прямого и обратного напряжения (см. таблицу 13).

Расчетное напряжение тиристора в вольтах

$$U_{Tp} = k_{зи} \cdot U_{обр\max}, \quad (22)$$

где $k_{зи}$ – коэффициент запаса по напряжению, учитывающий возможное перенапряжение, $k_{зи} = 1,3...1,5$.

Класс тиристора, характеризующий величину рабочего напряжения, определяют делением U_{Tp} на 100.

Повторяющееся напряжение выбранного тиристора должно быть не менее расчетного. Выбор тиристоров и охладителей выполняется по таблицам А.1 и А.2.

9.2.3 Расчет параметров и выбор токоограничивающих реакторов.

Расчет токоограничивающих реакторов производится из того условия, чтобы за время действия защиты тиристоры не успели выйти из строя. При этом реакторы ограничивают ток короткого замыкания (т. к. з.) по амплитуде, а защита по управляющему электроду ограничивает длительность протекания аварийного тока.

Выражения для мгновенных значений т. к. з. из-за наличия апериодических слагающих достаточно сложны и непосредственное определение величины индуктивности и токоограничивающего реактора L_p затруднительно. В самых грубых ориентировочных расчетах пренебрегают отличием действительной формы кривой т. к. з. от формы тока в однополупериодной однофазной схеме выпрямителя с активной нагрузкой, для которой в каталогах дается максимальное допустимое значение амплитуды тока в течение одного полупериода $I_{удон}$, и требуемую величину сопротивления контура короткого замыкания определяют из соотношения

$$Z_k \geq \frac{U_{м.ф}}{I_{удон}}, \quad (23)$$

где $U_{м.ф}$ – амплитудное значение фазного (линейного) напряжения.

Если в контуре короткого замыкания (к. з.) нет каких-либо сопротивлений, кроме токоограничивающего реактора (сеть бесконечно большой мощности), то выражение (23) дает требуемое значение полного сопротивления Z_p реактора. Обычно индуктивное сопротивление $X_p = \omega_c \cdot L_p$ реактора значительно больше активного R_p и

$$Z_p = \sqrt{(\omega_c L_p)^2 + R_p^2} \approx \omega_c L_p. \quad (24)$$

$$\text{Тогда из (24) } L_p = \frac{X_p}{\omega_p} = \frac{Z_p}{\omega_c} = \frac{U_{м.ф}}{I_{удон}}.$$

Если в контуре есть другие сопротивления, например при питании преобразователя от трансформатора ограниченной мощности, то индуктивность реактора определится из соотношения

$$L_p = \frac{X_p}{\omega_p} = \frac{\sqrt{Z_k^2 - R_m^2} - X_m}{\omega_n}, \quad (25)$$

где X_m , R_m – соответственно индуктивное и активное сопротивления трансформатора, приведенные ко вторичному напряжению.

Более точный расчет с учетом апериодических сглаживающих т. к. з. может быть произведен путем использования универсальных кривых, приводимых в [9].

Выбор токоограничивающих реакторов производится по величине индуктивности и номинальному току.

9.2.4 Расчет индуктивности и выбор уравнительных дросселей.

Уравнительные дроссели применяют для ограничения уравнительного тока, их расчет производят только для реверсивных схем с совместным управлением группами клапанов.

Индуктивность уравнительного контура, необходимая для ограничения уравнительного тока,

$$L_{ук} = \frac{U_{2м} \cdot k_y}{2\pi \cdot f \cdot I_{уп}}, \quad (26)$$

где U_{2m} – амплитудное значение фазного напряжения вторичной обмотки силового трансформатора для нулевых схем выпрямления, $U_{2m} = \sqrt{2}U_{2\phi m}$;

U_{2m} – амплитудное значение линейного напряжения вторичной обмотки трансформатора для мостовых схем, $U_{2m} = \sqrt{6}U_{2\phi m}$;

k_y – расчетный коэффициент, равный 0,65 для нулевых схем выпрямления и 0,18 – для мостовых;

f – частота питающей сети;

I_{yp} – допустимая величина уравнительного тока, $I_{yp} = (0,05...0,1) \cdot I_{дн}$.

Расчет индуктивности уравнительного контура произведен для угла управления $\alpha = 90^\circ$ (уравнительный ток максимальный).

Индуктивность уравнительных дросселей, необходимая для ограничения уравнительного тока на заданном уровне,

$$L_{y\partial} = L_{yk} - 2\alpha \cdot L_{\phi.mr}. \quad (27)$$

Количество уравнительных дросселей и их исполнение зависят от назначения и схемы реверсивного преобразователя. В реверсивных УВП, собранных по Н-схеме, применяют один насыщающийся рабочим током уравнительный дроссель, включаемый между нулевыми точками вторичных обмоток трансформатора [21]. Индуктивность его определяют по формуле (27).

В реверсивных преобразователях, собранных по перекрестной и нулевой встречно-параллельной схемам, используют два уравнительных дросселя, а в мостовых встречно-параллельных схемах – два не насыщающихся рабочим током или четыре насыщающихся дросселя.

При выборе исполнения дросселей нужно учитывать следующее.

Не насыщающиеся рабочим током уравнительные дроссели дополнительно обеспечивают сглаживание пульсаций тока нагрузки, но имеют худшие массогабаритные показатели по сравнению с насыщающимися.

Индуктивность каждого дросселя определяют по формуле

$$L_{y\partial 1} = L_{y\partial 2} = 0,5L_{y\partial}. \quad (28)$$

Индуктивность насыщающегося рабочим током дросселя

$$L_{y\partial 1} = L_{y\partial 2} = L_{y\partial}. \quad (29)$$

В ряде схем применяют частично насыщающиеся рабочим током уравнительные дроссели [22]. Индуктивность каждого из них

$$L_{y\partial 1} = L_{y\partial 2} \approx 0,7L_{y\partial}. \quad (30)$$

Уравнительные дроссели выбирают по требуемым значениям индуктивности и тока, т. е.

$$\begin{cases} L_{\partial p n} \geq L_{y \partial 1} = L_{y \partial 2}; \\ I_{\partial p n} \geq I_{d n} + I_{y p}, \end{cases} \quad (31)$$

где $L_{\partial p n}$, $I_{\partial p n}$ – номинальные индуктивность и ток дросселя.

9.2.5 Расчет и выбор сглаживающего дросселя.

Пульсации выпрямленного напряжения приводят к пульсациям тока нагрузки, увеличивающим нагрев электродвигателя, и ухудшают его коммутацию. Величина пульсаций тока зависит от схемы выпрямления, угла управления и индуктивности контура нагрузки. С целью уменьшения пульсаций тока и расширения зоны темной коммутации двигателей в цепь нагрузки включают сглаживающие дроссели.

При расчете индуктивности сглаживающего дросселя исходят из допустимого уровня пульсаций тока нагрузки. Например, для компенсированных электрических машин допустимый уровень пульсаций тока якоря i_n (действующее значение) составляет 2 % от номинального, для некомпенсированных – 5 %...7 %, для машин малой мощности – до 15 %.

Требуемая индуктивность цепи выпрямленного тока

$$L_{\alpha} = \frac{e_n \cdot E_{do}}{2\pi\sqrt{2}f \cdot m_n \cdot i_0 \cdot I_{di}}, \quad (32)$$

где e_n – относительная величина действующего значения первой гармоники выпрямленного напряжения при максимальном угле управления (минимальной частоте вращения двигателя);

m_n – число пульсаций выпрямленного напряжения на периоде напряжения сети (см. таблицу 13);

i_0 – относительная величина действующего значения первой гармоники тока нагрузки, $i_0 = 0,02...0,05$.

$$e_n = \frac{2 \cos \alpha_{\max}}{m_n^2 - 1} \sqrt{1 - m_n^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_{\max}}. \quad (33)$$

Максимальное значение угла управления

$$\alpha_{\max} = \arccos \frac{E_{d \max}}{E_{do}}. \quad (34)$$

Минимальная частота вращения двигателя $\omega_{\min}, \text{с}^{-1}$, при номинальном токе якоря

$$\omega_{\min} = \frac{\omega_i}{D}, \quad (35)$$

где D – заданный диапазон регулирования частоты вращения двигателя.

Минимальное значение ЭДС преобразователя при номинальном токе двигателя $E_{d \min}, \text{В}$, вычисляют по формуле

$$E_{d \min} = c\omega_{\min} + \Delta U_{y\partial} + \Delta U_{o\partial} + \Delta U_{mp} + \Delta U_k + \Delta U_d. \quad (36)$$

Здесь $c = c_e \cdot \Phi = c_m \cdot \Phi$ – коэффициент электродвигателя,

$$c = \frac{U_{ян} - R_{я\partial} \cdot I_{ян}}{\omega_i}, \quad (37)$$

где $I_{ян}, U_{ян}$ – номинальные значения тока и напряжения якоря;

$R_{я\partial}$ – сопротивление якорной цепи отдельного двигателя, приведенное к рабочей температуре.

$$R_{я\partial} = \alpha_t (R_{я} + R_{\partial n} + R_{ко}) - R_{щ}, \quad (38)$$

где $R_{я}, R_{\partial n}, R_{ко}$ – значения сопротивлений якоря, дополнительных полюсов и компенсационной обмотки;

$R_{щ}$ – сопротивление щеточного контакта, $R_{щ} = \frac{2}{I_i}$;

α_t – коэффициент, учитывающий изменение сопротивления обмоток при нагреве,

$$\alpha_t = 1 + 0,004(\theta_2 - \theta_1); \quad (39)$$

θ_1 – температура обмоток, при которой указано сопротивление в каталоге (обычно $\theta_1 = 15^\circ \text{C}$);

θ_2 – рабочая температура обмоток (для большинства двигателей $\theta_2 = 75^\circ \text{C}$).

При отсутствии данных о значении сопротивлений обмоток двигателя приближенно сопротивление якорной цепи можно определить по формуле

$$R_{я\partial} = 0,5 \frac{U_{ян}}{I_{ян}} \left(1 - \frac{P_n}{U_{ян} I_{ян}} \right), \quad (40)$$

где P_n – номинальная мощность двигателя, Вт.

Требуемая индуктивность сглаживающего дросселя L_{cd} , Гн, определяется по формуле

$$L_{cd} = L_d - L_{mp} - L_{y0} - L_{я}, \quad (41)$$

где L_d – средний выпрямленный ток;

L_{mp} – индуктивность силового трансформатора, приведенная к цепи выпрямленного тока;

L_{y0} – индуктивность уравнивающего дросселя (в реверсивных схемах с совместным управлением группами клапанов);

$L_{я}$ – индуктивность якорной цепи собственно двигателя,

$$L_{я} = \frac{\gamma \cdot U_{ян}}{\rho \cdot \omega_i \cdot I_{ян}}, \quad (42)$$

γ – коэффициент, учитывающий исполнение двигателя; $\gamma = 0,25$ для компенсированных и $\gamma = 0,6$ для некомпенсированных электродвигателей;

ρ – число пар полюсов.

При выборе уравнивающих и сглаживающего дросселей нужно учитывать следующее. Увеличение индуктивности цепи выпрямленного тока приводит к уменьшению пульсаций тока нагрузки, что обеспечивает уменьшение нагрева двигателя и улучшение коммутации. Но при этом ухудшаются динамические свойства электропривода и увеличиваются массогабаритные показатели.

9.3 Расчет и выбор элементов силовой части широтно-импульсных преобразователей и автономных инверторов

9.3.1 Расчет параметров и выбор силового трансформатора.

Для преобразователей, выполненных на базе ШИП и АИ, силовой трансформатор с выпрямителем необходимо рассматривать как источник питания постоянного тока. В зависимости от режимов работы, формируемых преобразователем, в качестве выпрямителя могут быть использованы неуправляемые (НУВ) и управляемые выпрямители (НВ), а также реверсивные управляемые выпрямители (РУВ).

Силовая часть ШИП или АИ в составе с электродвигателями является нагрузкой для рассматриваемого источника питания, которая имеет условное номинальное напряжение $U'_{дн}$. Условное номинальное напряжение соответствует номинальному напряжению электродвигателя с учетом падения напряжения на элементах ШИП или АИ, вызванного номинальным током, и максимальной длительности импульсов выходного напряжения. Для ШИП величина $U'_{дн}$ рассчитывается согласно выражению (36):

$$U'_{дн} = \frac{U_{ян} + \sum \Delta U_{шшп}(I_n)}{\gamma_{\max}}, \quad (43)$$

где $U_{ян}$ – номинальное напряжение электродвигателя;

$\sum \Delta U_{шшп}(I_n)$ – суммарное падение напряжения на элементах ШИП, соответствующее номинальному току электродвигателя.

$\gamma_{\max}$ – максимальное значение относительной продолжительности включения источника питания; $\gamma_{\max} = 0,95...0,97$ – для транзисторных ШИП; $\gamma_{\max} = 0,92...0,95$ – для тиристорных ШИП.

Для АИ величина $U'_{дн}$ определяется согласно выражению

$$U'_{дн} = \frac{K_{np} U_{фн} + \sum \Delta U_{АИ}(I_n)}{\gamma_{\max}}, \quad (44)$$

где $U_{фн}$ – действующее значение номинального фазного напряжения электродвигателя;

K_{np} – коэффициент приведения действующего значения фазного напряжения АИ к величине среднего значения постоянного напряжения источника питания, $K_{np} = \frac{U_d}{U_{фн}}$;

$\sum \Delta U_{АИ}(I_n)$ – суммарное падение напряжения на элементах АИ, соответствующее номинальному току электродвигателя.

Коэффициент приведения K_{np} зависит от алгоритма управления силовыми транзисторами или тиристорами АИ и схемы соединения обмоток статора электродвигателя. Для трехфазных мостовых АИ формирование симметричного выходного напряжения осуществляется с продолжительностью управления силовыми транзисторами или тиристорами на длительности периода выходного напряжения $\lambda = 180^\circ$ и $\lambda = 120^\circ$. При $\lambda = 180^\circ$ в АИ на любом дискретном интервале одновременно осуществляется управление транзисторами (тиристорами), а при $\lambda = 120^\circ$ – двумя. Обмотки статора электродвигателя могут быть включены по схеме «звезда» либо «треугольник».

Таким образом, возможны четыре варианта формирования выходного напряжения АИ.

При $\lambda = 180^\circ$ и соединении обмоток статора по схеме «звезда» фазное напряжение имеет двухступенчатую форму с амплитудой, равной $U_d/3$ на интер-

валах $0 \leq \cos \alpha \leq \frac{\pi}{3}$ и $\frac{2\pi}{3} \leq \omega t \leq \pi$, с амплитудой, равной $2 \cdot U_d/3$ на интервале

$\frac{\pi}{3} \leq \omega t \leq \frac{2\pi}{3}$. Для данного варианта

$$K_{np} = \frac{2}{\sqrt{2}} \approx 1,41. \quad (45)$$

При $\lambda = 120^\circ$ и соединении обмоток статора по схеме «звезда» фазное напряжение имеет прямоугольную форму с амплитудой, равной $U_d/2$, и длительностью на полупериодах 120° . Для данного варианта

$$K_{np} = 2 - \sqrt{\frac{3}{2}} \approx 2,45. \quad (46)$$

Определив требуемое значение U'_{du} , для расчета и выбора силового трансформатора необходимо воспользоваться методикой, изложенной в п. 9.2.1 методических рекомендаций.

Для реализации бестрансформаторной схемы преобразователя частоты с асинхронным электродвигателем, номинальное фазное напряжение которого $U'_{фн} = 220$ В, можно использовать вариант формирования выходного напряжения при $\lambda = 180^\circ$ и соединения обмоток статора по схеме «звезда».

9.3.2 Расчет параметров и выбор силовых транзисторов и обратных диодов транзисторных ШИП и АИ.

Для реализации транзисторных ШИП и АИ могут быть применены биполярные, MOSFET- и IGBT-транзисторы. Независимо от того, какой тип транзисторов выбран для проектирования преобразователя, необходимо обеспечить их работу в ключевом режиме.

Работа транзисторов в ключевом режиме характеризуется тремя состояниями. Состояние, соответствующее режиму отсечки, характеризуется минимальным током, протекающим через силовую структуру транзистора и нагрузку. При этом почти все напряжение питания приложено к силовой структуре транзистора. Состояние, соответствующее режиму насыщения, характеризуется минимальным сопротивлением силовой структуры транзистора, соответственно, минимальным падением напряжения на ней. При этом почти все напряжение питания приложено к нагрузке. Переход транзистора из режима насыщения в режим отсечки и обратно связан с кратковременным пребыванием его в активной области. При этом в транзисторе за один цикл переключения в интервалы включения и запираания выделяется значительная энергия, получившая название потерь переключения.

Для предварительного выбора транзисторов необходимо рассчитать:

- максимальное значение среднего тока нагрузки, протекающего через силовую структуру транзистора;
- максимальное значение импульсного тока нагрузки;
- максимальное прямое напряжение, формируемое на силовой структуре транзистора.

При выборе транзисторов особое внимание необходимо при оценке таких параметров, как падение напряжения на силовой структуре в насыщенном состоянии, ток утечки через силовую структуру в состоянии отсечки, величина сопротивления силовой структуры в насыщенном состоянии, время включения и выключения, коэффициент усиления по току, допустимое значение рассеиваемой мощности силовой структурой. Правильность выбора транзисторов по перечисленным параметрам во многом определяет положительные результаты проверки по величине рассеиваемой мощности.

Для ШИП максимальное значение среднего тока нагрузки, протекающего через силовую структуру транзистора, определяется по выражению

$$I_{cp.max} = \frac{K_z \cdot I_n}{n}, \quad (47)$$

где K_z – коэффициент допустимой перегрузки по току силовой части преобразователя;

I_n – номинальный ток электродвигателя;

n – количество пульсаций, формируемых многофазным ШИП.

Для АИ максимальное значение среднего тока нагрузки, протекающего через силовую структуру транзистора [18] определяется по выражению

$$I_{cp.max} = K_z \cdot I_{cp.к.э}, \quad (48)$$

где $I_{cp.к.э}$ – среднее значение тока коммутирующих элементов трехфазных инвер-

торов, $I_{cp.к.э} = \frac{I_{эф.ф}}{I'_{эф.ф}} \cdot I'_{cp.к.э}$;

$I_{эф.ф}$ – эффективный (действующий) ток фазы электродвигателя;

$I'_{эф.ф}$, $I'_{cp.к.э}$ – относительные значения эффективного тока фазы нагрузки и среднего значения тока коммутирующих элементов АИ соответственно (определяются [18, таблица 3]).

Для выполнения расчетов необходимо рассматривать номинальное значение действующего тока фазы электродвигателя

$$I_{эф.ср} = I_{ф.н} = \frac{P_{2н}}{\sqrt{3} \cdot U_{ф.н} \cdot \cos \phi_n \cdot \eta_n}, \quad (49)$$

где $P_{2н}$ – номинальная мощность электродвигателя;

$U_{ф.н}$ – действующее значение номинального фазного напряжения электродвигателя;

$\cos \phi_n \cdot \eta_n$ – значение коэффициента мощности и КПД, соответствующие номинальному режиму работы электродвигателя.

Для вариантов формирования выходного напряжения:

1) $\lambda = 180^\circ$, соединение обмоток «треугольник» –

$$I'_{\text{эф.ф}} = 0,815 \cdot I'_{\text{ср.к.э}} = 0,666; \quad (50)$$

2) $\lambda = 180^\circ$, соединение обмоток «звезда» –

$$I'_{\text{эф.ф}} = 0,47 \cdot I'_{\text{ср.к.э}} = 0,222; \quad (51)$$

3) $\lambda = 120^\circ$, соединение обмоток «треугольник» –

$$I'_{\text{эф.ф}} = 0,71 \cdot I'_{\text{ср.к.э}} = 0,5; \quad (52)$$

4) $\lambda = 120^\circ$, соединение обмоток «звезда» –

$$I'_{\text{эф.ф}} = 0,408 \cdot I'_{\text{ср.к.э}} = 0,167. \quad (53)$$

Для ШИП максимальное значение импульсного тока нагрузки может быть рассчитано согласно варианту, для которого задана допустимая величина пульсаций тока нагрузки, и согласно варианту, для которого задана частота коммутации либо рассчитывается оптимальная частота коммутации.

При заданной величине пульсаций тока нагрузки

$$I_{\text{и.макс}} = K_z \cdot I_{\text{н}} + \frac{\Delta I_{\text{н}}}{2}, \quad (54)$$

где $\Delta I_{\text{н}}$ – абсолютное значение пульсаций тока нагрузки, $\Delta I_{\text{н}} = \Delta I' \cdot I_{\text{н}}$;

$\Delta I'$ – относительное значение пульсаций тока.

При заданной частоте коммутации величина пульсаций тока нагрузки [10]

$$\Delta I_{\text{н}} = I_{\text{макс}} - I_{\text{мин}} = \frac{(1 - e^{-\gamma\beta})[1 - e^{-(1-\gamma)\beta}]}{1 - e^{-\beta}} \cdot I_{\text{к}}, \quad (55)$$

где γ – относительная продолжительность включения якоря электродвигателя

в питающую сеть, $\gamma = \frac{t_{\text{и}}}{T}$;

T – период коммутации;

β – коэффициент нагрузки преобразователя, $\beta = \frac{T}{T_{\text{я}}}$;

$T_{\text{я}}$ – электромагнитная постоянная времени силовой цепи якоря, $T_{\text{я}} = L_{\text{я}}/r$;

$L_{\text{я}}$ – индуктивность якорной цепи электродвигателя;

r – суммарное сопротивление силовой цепи якоря;

I_{κ} – ток короткого замыкания силовой цепи якоря, $I_{\kappa} = U_{d \max} / r$;

$U_{d \max}$ – максимальное напряжение, формируемое на якоре.

Для выполнения расчетов ΔI_n принимается $\gamma = 0,5$, соответствующая максимальному значению пульсаций тока.

Для АИ с широтно-импульсным регулированием выходного напряжения на несущей частоте максимальное значение импульсного тока нагрузки рассчитывается в соответствии с вариантами формирования выходного напряжения. Для вариантов $\lambda = 180^\circ$, соединение обмоток электродвигателя «треугольник», $\lambda = 120^\circ$, соединение обмоток «звезда» [18].

$$I_{\text{я. max}} = K_3 \cdot L'_{\text{max. n}} \cdot I_{\kappa} = K_3 \cdot I_{\kappa} \frac{1 - e^{-\beta_0 \cdot \gamma'}}{1 - e^{-\beta_0}} \cdot \left[1 - \frac{1 + e^{-\beta_0 (N - N')}}{1 + e^{-\beta_0 \cdot N}} \cdot e^{-\beta_0 \cdot h} \right]; \quad n = 1, 2, \dots, N', \quad (56)$$

где I_{κ} – базовый ток фазы нагрузки, $I_{\kappa} = U_{d \max} / r_{\text{э}}$;

$r_{\text{э}}$ – эквивалентное активное сопротивление фазы электродвигателя;

β_0 – приведенный коэффициент нагрузки, $\beta_0 = \beta / N$;

β – коэффициент нагрузки, $\beta = \frac{T}{\tau_n} = \frac{r_{\text{э}}}{L_{\text{э}}} \cdot \frac{1}{2f}$;

$L_{\text{э}}$ – эквивалентная индуктивность фазы электродвигателя, $L_{\text{э}} = \frac{X_{\text{э}}}{2\pi \cdot f}$;

f, T – основная частота и период;

N – число периодов несущей частоты в одном полупериоде основной частоты, $N = T / T_n = f_n / 2f$;

f_n, T_n – несущая частота и период;

N' – число импульсов питающего напряжения за один полупериод основной частоты T ;

γ' – относительная продолжительность включения нагрузки к источнику питания на длительности периода несущей частоты, $\gamma' = \frac{t_4}{T_0}$;

γ – относительная продолжительность включения каждой фазы нагрузки в цепь источника питания, $\gamma = \frac{t_1}{T} = \frac{N'}{N}$.

При выполнении расчетов необходимо принимать максимальное значение относительной продолжительности включения нагрузки к источнику питания на длительности периода несущей частоты $\gamma' = \gamma'_{\max} = 0,95 \dots 0,97$.

Для выполнения расчетов необходимо также определить эквивалентное активное $r_{\text{э}}$ и индуктивное $X_{\text{э}}$ сопротивления фазы электродвигателя.

Согласно паспортным данным электродвигателя [25] рассматривается:

- индуктивное сопротивление X_μ ;
- активное сопротивление обмотки статора R_1' ;
- индуктивное сопротивление обмотки статора X_1' ;
- приведенное к обмотке статора активное сопротивление ротора R_2'' ;
- приведенное к обмотке статора индуктивное сопротивление ротора X_2'' .

Рассчитываются абсолютные значения X_1 и R_1 согласно следующим выражениям [25]:

$$X_1 = 2 \cdot X_1' \cdot \frac{X_\mu}{[X_\mu + \sqrt{(X_\mu)^2 + 4 \cdot X_1' \cdot X_\mu}]}; \quad (57)$$

$$R_1 = R_1' \cdot \frac{X_1}{X_1'}. \quad (58)$$

Для перехода к эквивалентным значениям X_μ , R_1' , X_1' , R_2'' , X_2'' необходимо рассчитать коэффициент перехода:

$$K_\Pi = \frac{U_{\phi.n}}{I_{\phi.n}}; \quad (59)$$

$$X_{\mu\pi} = K_\Pi \cdot X_\mu; \quad R_{1\pi}' = K_\Pi \cdot R_1'; \quad X_{1\pi}' = K_\Pi \cdot X_1'; \quad R_{2\pi}'' = K_\Pi \cdot R_2''; \quad X_{2\pi}'' = K_\Pi \cdot X_2''. \quad (60)$$

В квазиустановившемся номинальном режиме работы электродвигатель можно представить как эквивалентную схему замещения в виде R_π - и L_π -цепи, параметры которой определяются по Z_π -сопротивлению нагрузки, представленному в комплексной форме:

$$Z_\pi = \frac{[R_{1\pi}' + i(X_1 + X_{\mu\pi})][R_{1\pi}' + \frac{R_{2\pi}''}{S_\pi} + i(X_{1\pi}' + X_{2\pi}'')] }{R_1 + R_{1\pi}' + \frac{R_{2\pi}''}{S_\pi} + i(X_1 + X_{\mu\pi} + X_{1\pi}' + X_{2\pi}'')}, \quad (61)$$

где S_π – номинальное скольжение электродвигателя.

После выполнения расчетов и преобразований выражение (61) должно быть приведено к виду

$$Z_\pi = R_\pi + i \cdot X_\pi. \quad (62)$$

Для вариантов $\lambda = 180^\circ$ соединение обмоток электродвигателя «звезда» и $\lambda = 120^\circ$ соединение обмоток «треугольник».

Выполняется формирование двухступенчатого выходного напряжения АИ, поэтому расчет $I_{u.\max}$ по формуле (56) осуществляется методом наложения, согласно которому расчеты производятся для двух значений напряжения (соответственно, двух значений базового тока I_κ), а затем результаты суммируются.

Максимальное прямое напряжение, формируемое на силовой структуре транзисторов ШИП и АИ рассчитывается согласно выражению

$$I_{np.\max} = K_u \cdot E_{d\max}, \quad (63)$$

где K_u – коэффициент учитывающий коммутационные перенапряжения в схеме, $K_u = 1, 2 \dots 1, 25$;

$E_{d\max}$ – максимальное значение ЭДС блока питания (силовой трансформатор и выпрямитель), соответствующее параметрам выбранного силового трансформатора.

После выбора транзисторов осуществляется проверка по величине рассматриваемой мощности согласно выражению

$$P_\Sigma = \gamma_{\max} \cdot P_{нас} + (1 - \gamma_{\max}) \cdot P_{отс} + P_{пер}, \quad (64)$$

где $\gamma_{\max}$ – максимальное значение относительной продолжительности включения (для АИ $\gamma_{\max}^I$), $\gamma_{\max} = 0,95 \dots 0,97$,

$P_{нас}$ – статические потери мощности в транзисторе в режиме насыщения;

$P_{отс}$ – статические потери мощности в транзисторе в режиме отсечки;

$P_{пер}$ – потери мощности в транзисторе при переключении.

Статические потери в биполярных и IGBT-транзисторах в режиме насыщения определяются как

$$P_{нас} = \Delta U_{э-к}^I \cdot I_{\kappa\max}, \quad (65)$$

где $\Delta U_{э-к}^I$ – падение напряжений на транзисторе в режиме насыщения;

$I_{\kappa\max}$ – максимальный ток коллектора транзистора, $I_{\kappa\max} = I_{ср.\max}$.

Статические потери в режиме отсечки определяются по выражению

$$P_{отс} = \Delta U_{эк}^I \cdot I_{ко}, \quad (66)$$

где $\Delta U_{эк}^I$ – падение напряжений на транзисторе в режиме отсечки;

$I_{ко}$ – ток утечки силовой структуры транзистора.

При выполнении расчетов с небольшой погрешностью можно принять

$$\Delta U'_{эк} = U'_{дн}. \quad (67)$$

Необходимо помнить, что в данном случае $U'_{дн}$ должно быть рассчитано с учетом параметров выбранного силового трансформатора.

При переключении с частотой f потери мощности силовых транзисторов

$$P_{пер} = U'_{дн} \cdot I_{ср.макс} \cdot f \cdot \frac{t_+ + t_-}{2}, \quad (68)$$

где t_+ , t_- — длительности переднего и заднего фронтов переключения (при выполнении расчетов можно принять рекомендуемое время включения и выключения транзистора).

Условием проверки выбранных транзисторов является

$$P_{\Sigma} \leq P_{\kappa}, \quad (69)$$

где P_{κ} — частотное значение рассеиваемой мощности на транзисторе.

В случае, если условие (25) не выполняется, выбор транзистора необходимо повторить с учетом коррекции основных параметров.

При расчете и выборе обратных диодов ШИП и АИ необходимо рассматривать режимы работы, при которых формируются максимальное среднее значение тока и максимальное обратное напряжение. Максимальное среднее значение тока соответствует минимальному значению относительной продолжительности включения $\gamma_{\min}$ (для АИ $\gamma'_{\min}$) и равно максимальному среднему значению транзисторов $I_{ср.макс}$. Максимальное обратное напряжение диодов равно максимальному значению прямого напряжения транзисторов, т. к. они включены встречно-параллельно:

$$U_{обр.макс.д} = U_{пр.макс}. \quad (70)$$

9.3.3 Расчет параметров и выбор тиристоров и диодов тиристорных ШИП и АИ. Тиристоры и диоды силовой части тиристорных ШИП и АИ выбирают по величине максимального среднего тока и максимального обратного напряжения, учитывая время выключения (восстановления запирающих свойств).

Для надежной коммутации тока тиристоры ШИП и АИ должны отвечать ряду требований, которые учитываются при проектировании [10].

1 Необходимо ограничить возможную скорость нарастания тока в вентиле в соответствии с его динамическими характеристиками, что обычно достигается включением дросселей насыщения последовательно с тиристором.

2 Схема преобразователя должна обеспечивать необходимое ограничение скорости нарастания прямого напряжения на тиристорах.

3 Должна быть исключена возможность даже кратковременных перенапряжений на тиристорах, превышающих напряжение переключения при максимальной рабочей температуре структуры и максимальных возможных скоростях изменения анодного напряжения в схеме.

4 Целесообразно запира́ть силовые тиристоры импульсами обратного напряжения достаточной величины $U_{обр} = 20...100$ В. При этом стоит ограничить амплитуду обратного тока.

5 Принятое при проектировании коммутирующих цепей расчетное время выключения тиристора $k_{зан} \cdot \tau_g$ ($k_{зан}$ – коэффициент запаса; τ_g – время выключения) соответствовать реальным условиям запира́ния, существующим в рассматриваемой схеме в наиболее тяжелом режиме работы преобразователя.

Расчет максимального значения среднего тока тиристоров и диодов соответствует расчету тока транзисторов по выражениям (47) и (48).

Величина максимального обратного напряжения определяется величиной максимального напряжения, формируемого на коммутирующем конденсаторе, способом коммутации (параллельная, последовательная), схемой коммутирующего устройства.

Величина максимального обратного напряжения рассчитывается в соответствии с выражениями, представленными в [10, таблица 4-3; 18, таблица 10] для ШИП и АИ соответственно. Относительные значения максимального напряжения на коммутирующем конденсаторе X_{m3} определяются по характеристикам $X_{m3} = f(\bar{I}_n)$, приведенным в [10, 18].

При выборе тиристоров и диодов необходимо оценивать их динамические свойства. Предпочтение следует отдавать частотным, частотно-импульсным и быстродействующим тиристорам и диодам.

9.3.4 Расчет параметров и выбор элементов коммутирующих устройств ШИП и АИ. Параметры коммутирующих устройств ШИП и АИ должны определяться из условия обеспечения устойчивой коммутации силовых тиристоров, которое определяется временем формирования на их силовой структуре обратного напряжения $t_{обр}$.

$$t_{обр} = \frac{t_{обр}'}{\omega_{он}} = k_{зан} \cdot \tau_b, \quad (71)$$

где $t_{обр}'$ – угол действия обратного напряжения;

ω_{on} – угловая частота контура на n -м расчетном интервале, $\omega_{on} = \frac{1}{\sqrt{L_n \cdot C}}$;

$k_{зан}$ – коэффициент запаса, учитывающий разброс параметров тиристоров, $k_{зан} = 1,1 \dots 1,15$;

τ_b – время выключения тиристора.

Задача расчета коммутирующего устройства преобразователя не решается однозначно. Она может быть подчинена различным требованиям: обеспечить минимальные коммутационные потери или минимальную установленную мощность коммутационного оборудования и силовых элементов, получить определенный коэффициент использования источника питания при выбранной частоте коммутации и т. д. [10].

Во многих практических случаях провести на минимум коммутационных потерь мощности, что обычно незначительно расходится со случаем проектирования на минимум установленных мощностей элементов выходного каскада.

Условие сохранения устойчивой коммутации (71) может быть выполнено при различных соотношениях между индуктивностью L_n и емкостью C коммутирующего конденсатора, т. е. при различных величинах угловой частоты ω_{on} или относительного тока нагрузки преобразователя

$$\bar{I}_{H \max} = I_{H \max} \cdot \frac{\rho_n}{U_k}, \quad (72)$$

где ρ_n – волновое сопротивление контура, $\rho_n = \sqrt{\frac{L_n}{C}}$;

U_k – напряжение источника питания коммутирующего устройства.

Величина емкости коммутирующего конденсатора, необходимая для устойчивой коммутации, может быть представлена в виде

$$C = \frac{k_{зан} \cdot \tau_b \cdot I_{H \max}}{U_k} \cdot \frac{1}{t_{обр} \cdot \bar{I}_n} = \frac{k_{зан} \cdot \tau_b \cdot I_{H \max}}{U_k} \cdot \bar{C}, \quad (73)$$

где $\bar{C}$ – безразмерная емкость зависит от схемы коммутирующих цепей преобразователя и от относительного тока нагрузки, $\bar{C} = \frac{1}{(t_{обр} \cdot \bar{I}_n)}$.

В [10,18] приведены функциональные зависимости $\bar{C} = f(\bar{I}_n)$ при фиксированных значениях коэффициентов затухания контуров $D_n = \text{const}$:

$$D_n = \frac{r_n}{2 \cdot \rho_n} \quad (74)$$

и относительного напряжения питания силовой цепи $k_u = \text{const}$:

$$k_u = \frac{U_n}{U_\kappa}. \quad (75)$$

В случае выбора критерия оптимальности, соответствующего минимуму относительных приведенных коммутационных потерь мощности $\overline{P}_{\text{ком}}^j$, необходимо определить величину $\overline{I}_n$ по функциональным зависимостям $\overline{P}_{\text{ком}}^j = f(\overline{I}_n)$, приведенным в [10,18] для фиксированных значений D_n .

Для выбранного значения $\overline{I}_n$ по функциональным зависимостям $\overline{C} = f(\overline{I}_n)$ определяется $\overline{C}$.

Для найденного значения $\overline{C}$ по (73) рассчитывается емкость коммутирующего конденсатора C .

Расчет требуемых значений индуктивностей L_n контуров перезаряда конденсатора выполняется по выражению

$$L_n = C \cdot \rho_n^2. \quad (76)$$

Величина волнового сопротивления ρ_n для контуров определяется по (72):

$$\rho_n = \frac{U_R \cdot \overline{I}_{H \max}}{I_{H \max}}. \quad (77)$$

Расчет параметров тиристорных и диодных коммутирующих устройств выполняется согласно [10, таблица 4-3; 18, таблица 10].

Список литературы

- 1 **Съянов, С. Ю.** Силовая и преобразовательная техника : учебное пособие / С. Ю. Съянов, Н. Ю. Лакалина. – Москва ; Вологда : Инфра-Инженерия, 2023. – 108 с.
- 2 **Розанов, Ю. К.** Силовая электроника : учебник и практикум для академ. бакалавриата / Ю. К. Розанов, М. Г. Лепанов ; под ред. Ю. К. Розанова. – Москва : Юрайт, 2018. – 206 с.
- 3 **Онищенко, Г. Б.** Силовая электроника. Силовые полупроводниковые преобразователи для электропривода и электроснабжения : учебное пособие / Г. Б. Онищенко, О. М. Соснин. – Москва : ИНФРА-М, 2016. – 122 с.
- 4 **Фролов, В. Я.** Устройства силовой электроники и преобразовательной техники с разомкнутыми и замкнутыми системами управления в среде MATLAB-Simulink : учебное пособие / В. Я. Фролов, В. В. Смородинов. – Санкт-Петербург ; Москва ; Краснодар : Лань, 2017. – 332 с.

5 **Петушков, М. Ю.** Основы преобразовательной техники : учебное пособие для вузов / М. Ю. Петушков. – Москва : Юрайт, 2024. – 95 с.

6 **Башарин, А. В.** Примеры расчетов автоматизированного электропривода / А. В. Башарин, Ф. Н. Голубев, Б. Г. Кашперман. – Ленинград : Энергия, 1990. – 512 с.

7 **Замятин, В. Я.** Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры: справочник / В. Я. Замятин, Б. В. Кондратьев, В. М. Петухов. – Москва : Радио и связь, 1987. – 576 с.

8 **Электротехнический справочник** : в 2 т. / Под ред. И. Н. Орлова. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – Т. 2. – 616 с. : ил.

9 **Резисторы, конденсаторы, трансформаторы, дроссели, коммутационные устройства РЭА** : справочник / Н. Н. Акимов [и др.]. – Минск : Беларусь, 1994. – 590 с. : ил.

10 **Предохранители быстродействующие.** Промышленный каталог «Информэлектро». – Москва : Энергоатомиздат, 1999. – 56 с.

11 **Руденко, В. С.** Преобразовательная техника / В. С. Руденко, В. Н. Сенько, И. М. Чиженко. – Киев : Вища школа, 1978. – 430 с. : ил.

12 **Маевский, О. А.** Энергетические показатели вентильных преобразователей / О. А. Маевский. – Москва : Энергия, 1978. – 320 с.

13 **Дьяков, В. Н.** Типовые расчёты по электрооборудованию: практическое пособие / В. Н. Дьяков. – Москва : Высшая школа, 1990. – 163 с.

14 **Крупович, В. И.** Справочник по проектированию автоматизированного электропривода и систем управления технологическими процессами : справочник / В. И. Крупович, Ю. Г. Бабин, М. Л. Салювер. – Москва : Энергоатомиздат, 1982. – 416 с. : ил.

15 **Глазенко, Т. А.** Полупроводниковые преобразователи в электроприводах постоянного тока / Т. А. Глазенко. – Ленинград : Энергия, 1973. – 304 с. : ил.

16 **Терехов, В. М.** Элементы автоматизированного электропривода / В. М. Терехов. – Москва : Энергоатомиздат, 1987. – 224 с.

17 **Анхимюк, В. Л.** Проектирование систем автоматического управления электроприводами / В. Л. Анхимюк, О. П. Ильин. – Минск : Высшая школа, 1971. – 336 с. : ил.

18 **Борисов, В. А.** Управление вентильными электроприводами постоянного тока / В. А. Борисов. – Иваново : Ивановский гос. ун-т, 1978. – 100 с.

19 **Евзеров, И. Х.** Комплектные тиристорные электроприводы : справочник / И. Х. Евзеров, А. С. Городец, Б. Н. Мошкович ; под ред. В. М. Перельмутера. – Москва : Энергоатомиздат, 1988. – 319 с. : ил.

20 **Глазенко, Т. А.** Тиристорные ШИП для систем ЭП постоянного тока / Т. А. Глазенко. – Ленинград : ЛДНТП, 1968. – 38 с. : ил.

21 **Герман-Галкин, С. Г.** Широтно-импульсные преобразователи / С. Г. Герман-Галкин. – Ленинград : Энергия, 1979. – 96 с. : ил.

22 **Руденко, В. С.** Основы преобразовательной техники / В. С. Руденко. – Ленинград : Высшая школа, 1980. – 421 с.

23 **Глазенко, Т. А.** Полупроводниковые преобразователи частоты в электроприводах / Т. А. Глазенко, Р. Б. Гончаренко. – Ленинград : Энергия, 1969. – 184 с. : ил.

24 **Алексеева, Н. Н.** Тиристорные регулируемые электроприводы постоянного тока / Н. Н. Алексеева, Г. И. Андреев, Ю. Я. Морговский. – Москва : Энергия, 1970. – 136 с.

25 **Бедфорд, Б.** Теория автономных инверторов / Б. Бедфорд, Р. Хофт. – Москва : Энергия, 1969. – 286 с. : ил.

26 **Руденко, В. С.** Основы промышленной электроники / В. С. Руденко, В. И. Сенько, В. В. Трифонюк. – Киев : Вища школа, 1985. – 420 с. : ил.

27 Справочник по преобразовательной технике / Под ред. И. М. Чиженко. – Киев : Техника, 1978. – 447 с. : ил.

28 Электроприводы с полупроводниковым управлением. Системы постоянного тока на тиристорах / В. А. Найдис [и др.]. – Москва : Высшая школа, 1966. – 104 с.

29 **Попков, О. З.** Основы преобразовательной техники: учебное пособие / О. З. Попков. – 2-е изд., стереот. – Москва: МЭН, 2007. – 200 с.: ил.

30 Справочник по электрическим машинам: в 2 т. / Под ред. И. П. Копылова. – Москва: Энергоатомиздат. – Т. 1–2.

31 Основы силовой электроники / А. И. Белоус [и др.]. – Москва: Техносфера, 2019. – 424 с.

32 Силовая преобразовательная техника: электронное учебно-методическое пособие по учебной дисциплине СПТ для специальности 2-530105 «Автоматизированные электроприводы» / Сост. Н. М. Улащик. – Минск: БНТУ, 2013. – 388 с.

Приложение А (справочное)

Таблица А.1 – Выпрямительные диоды штывровой конструкции. Металлостеклянный корпус (малогабаритная серия)

Тип Type	V_{RRM} , $V_{обр.и.п.}$ В	I_{RRM} , $I_{обр.и.п.}$ мА	$I_{F(FV)}$, (T_c , °C), $I_{пр.ср.}$ А	$I_{F(RMS)}$, $I_{пр.ср.}$ А	I_{FSM} , $I_{пр.уд.}$ кА	P_t , $10^3 \cdot A^2 \cdot c$	V_{FM}/I_{FM} , $V_{пр.и.}/I_{пр.и.}$ В/А	V_{TO} , $V_{пор.}$ В	$T_{j\max}$, $T_{н\max}$, °C	R_{thja} , R_{thnf} , °C/Вт	M , Н	Корпус	Рекомендуе- мый охлади- тель
Д212-10	100...1600	3	10(150)	15	0,25	0,31	1,35/31	0,94	190	2,700	0,9...1,1	SD1	0111
Д212-10Х	100...1600	3	16(150)	25	0,27	0,36	1,35/50	0,84	190	2,700			
Д212-16	100...1600	3	25(150)	39	0,34	0,58	1,35/78	0,78	190	1,150			
Д212-25	100...1600	3	25(150)	50	0,46	1,06	1,35/100	0,86	190	1,000	1,4...1,8	SD2	0121; 0221
Д212-25Х	100...1600	5	32(150)	62	0,55	1,51	1,35/125	0,80	190	0,800			
Д222-32	100...1600	5	40(150)	78	1,20	7,20	1,35/157	0,92	190	0,600	5,0...6,2	SD3	0131; 0231; 0331
Д222-32Х	100...1600	6	50(150)	98	1,40	9,80	1,35/198	0,82	190	0,500			
Д232-40	100...1600	6	63(150)	125	1,50	11,25	1,35/250	0,76	190	0,400			
Д232-40Х	100...1600	6	30(150)										
Д232-50	100...1600	6	50(150)	78	1,20	7,20	1,35/157	0,92	190	0,600	5,0...6,2	SD3	0131; 0231; 0331
Д232-50Х	100...1600	6	63(150)	98	1,40	9,80	1,35/198	0,82	190	0,500			
Д232-63	100...1600	6	30(150)	125	1,50	11,25	1,35/250	0,76	190	0,400			
Д232-63Х	100...1600	6	30(150)	125	1,50	11,25	1,35/250	0,76	190	0,400			
Д232-80	100...1600	6	30(150)	125	1,50	11,25	1,35/250	0,76	190	0,400			
Д232-80Х	100...1600	6	30(150)	125	1,50	11,25	1,35/250	0,76	190	0,400			

Таблица А.2 – Тиристоры низкочастотные штыревого исполнения. Металлостеклянный корпус (малогабаритная серия)

Тип Type	V_{RRM} , $V_{обр.и.н}$ В	I_{RRM} , $I_{обр.и.н}$ мА	$I_{F(FV)}$, (T_c °C), $I_{пр.ср}$ А	$I_{F(PMS)}$, $I_{пр.д}$ А	I_{FSM} , $I_{пр.д}$ кА	$\hat{I}^2 t$, 10^3 , $A^2 \cdot c$	V_{FM}/I_{FM} , $V_{пр.д}/I_{пр.д}$ В/А	V_{TO} , $V_{пр.д}$ В	$(di/dt)_{min}$, А/мс	t_{fr} , $t_{вос.пр}$ мс	$(du/dt)_{min}$, В/мс	V_{GT} , $V_{пр.д}$ В	I_{GT} , $I_{пр.д}$ мА	T_j , $T_{n \max}$, °C	R_{thja} , $R_{thjф}$, °C/В	M , Н	Кор- пус	Реко- мен- дуе- мый охла- ди- тель
T212-10	100...1300	3	10(85)	15,7	0,15	0,11	1,83/31	1,25	125	63	50...1000	3,0	40	125	1,80	0,9...1,1	ST1	0111
T212-16	100...1300	3	16(85)	25,2	0,25	0,31	1,80/50	1,20	125	63	50...1000	3,0	40	125	1,50			
T222-20	100...1300	3,5	20(85)	31,4	0,30	0,45	1,75/63	1,15	125	63	50...1000	3,0	60	125	0,90	0,4...1,8	ST2	0121; 0221
T222-25	100...1300	3,5	25(85)	39,2	0,35	0,61	1,75/78	1,10	125	63	50...1000	3,0	60	125	0,80			
T232-20	1200...1600	9	20(85)	31,4	0,22	0,24	2,20/63	1,10	125	160	50...1000	3,5	100	125	1,00	5,0...6,2	ST3	0131; 0231; 0331
T232-25	1200...1600	9	25(85)	39,2	0,33	0,48	2,20/78	1,10	125	160	50...1000	3,5	100	125	0,80			
T232-20	100...1300	5	40(85)	62,8	0,75	2,81	1,75/125	1,05	125	63	50...1000	4,0	100	125	0,62			
T232-50	100...1300	5	50(85)	78,5	0,80	3,20	1,75/157	1,03	125	63	50...1000	4,0	100	125	0,50			
T242-40	1200...1600	15	40(85)	62,8	0,70	2,45	2,10/125	1,25	125	160	50...1000	3,5	120	125	0,50	9,0...11	ST4	0141; 0142; 0541
T242-50	1200...1600	15	50(85)	78,5	0,85	3,50	2,10/157	1,20	125	160	50...1000	3,5	120	125	0,40			
T242-63	100...1300	7	63(85)	98,9	0,30	8,45	1,65/198	1,95	125	63	50...1000	4,0	150	125	0,40			
T242-80	100...1300	7	80(85)	125,6	0,50	11,25	1,63/250	0,93	125	63	50...1000	4,0	150	125	0,30			