

МИС СССР
ВСЕСОЮЗНЫЙ ЗАОЧНЫЙ ИНСТИТУТ
ИНЖЕНЕРОВ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

Одобрено кафедрой
Энергоснабжения электрических
железных дорог

ЭЛЕКТРОННАЯ
И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Задание на курсовую работу
с методическими указаниями
для студентов IV курса

специальности

ЭЛЕКТРИФИКАЦИЯ ЖЕЛЕЗНОДОРОЖНОГО ТРАНСПОРТА

специализации

СИСТЕМЫ ЭЛЕКТРОСНАБЖЕНИЯ И ИХ АВТОМАТИЗАЦИИ

Москва - 1989

Канд. техн. наук, доценты П.Б. КУЛИКОВ, А.С. НИЗОВ,
асс. А.Н. ШТИН

ЭЛЕКТРОННАЯ И ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНАЯ ТЕХНИКА

Задание на курсовую работу

Редактор	К.А. М а л ы ш е в
Техн. редактор	М.А. К у л и н а
Корректор	Т.А. Ц а р ь к о в а

Тип. зак. 882-89	Изд зак. 159.	Тираж 2000.
Подписано в печать 11.04.1989.	Ротапринт.	Бесплатно.
Печ. л. 2,5	Уч.-изд. л. 2,75.	Формат 60×90, 16.

Редакционно-издат. отдел, типография ВЗИИТа,
125808, Москва, ГСП-47, Часовая ул., 22/2

В В Е Д Е Н И Е

Электроподвижной состав электрифицированных железных дорог является одним из основных потребителей энергии постоянного тока. В связи с этим возникает необходимость преобразования электроэнергии переменного тока, вырабатываемой на электростанциях, в постоянный ток. При торможении поезда электроподвижной состав может вырабатывать электроэнергию на постоянном токе, которую для передачи потребителям переменного тока необходимо преобразовать в переменный ток.

Эти функции выполняют выпрямительные и выпрямительно-инверторные преобразователи.

Выпрямители комплектуются из обычных и лавинных диодов - VD ; управляемые выпрямители и инверторы - из тиристоров (управляемых вентилях) - VS .

В дальнейшем для краткости введем общее название "вентиль" для диодов и тиристоров в разделах, положения и формулы которых справедливы как для VD , так и для VS .

В случае применения только тиристора сохранено название "тиристор".

Выполнению курсовой работы должно предшествовать детальное изучение теории работы заданной схемы в выпрямительном и инверторном режимах, определяемых вариантом задания, методики расчета потребного числа параллельно и последовательно включенных вентилях, методики и порядка выполнения расчетов на ЭВМ.

СОДЕРЖАНИЕ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Целью курсовой работы является: обобщение и углубление теоретических знаний студентов по схемам выпрямления и инвертирования электроэнергии, развитие самостоятельных навыков по выбору вентилях, расчету и разработке силовой схемы преобразователей, анализу характеристик и энергетических показателей преобразователя с использованием ЭВМ.

В курсовой работе студентам предлагается разработать программы расчёта энергетических характеристик преобразователей на языке ФОРТРАН, а затем провести расчёты 10–15 точек каждой характеристики по разработанным программам.

Студенты, не имеющие доступа к ЭВМ на местах, должны рассчитать 2–3 точки каждой характеристики вручную, а расчёты на ЭВМ выполнить во время сессии.

Студенты, имеющие доступ к ЭВМ, не располагающим транслятором с ФОРТРАНА, могут составить программы на другом языке, например, языке БЭЙСИК. Можно также использовать программируемые микрокалькуляторы и персональные ЭВМ.

В пояснительной записке необходимо привести блок-схемы и тексты программ, а также дать пояснения к каждому оператору программы или группе операторов, реализующих каждый блок функциональной схемы.

Расшифровка основных обозначений и единицы измерения их, принятые в курсовой работе, даны в прил. 2.

ЗАДАНИЕ

Для заданной схемы выпрямительно-инверторного преобразователя в соответствии со своими исходными данными необходимо:

1. Рассчитать проектные параметры преобразовательного трансформатора и выбрать бак стандартного трансформатора.
2. Определить количество параллельно включенных вентилях выпрямителя α_B и инвертора $\alpha_{и}$.
3. Определить количество последовательно включенных вентилях выпрямителя S_B и инвертора $S_{и}$.
4. Разработать силовую схему рассчитанного выпрямительно-инверторного преобразователя.
5. Определить стоимость разработанного преобразователя.
6. Рассчитать и построить внешние характеристики выпрямителя. Построить временные диаграммы напряжений и токов для заданного угла регулирования α , считая, что в цепи нагрузки содержится сглаживающий реактор с $X_L \rightarrow \infty$.
7. Рассчитать и построить естественную внешнюю и ограничительную характеристику инвертора.
8. Построить искусственную горизонтальную внешнюю характеристику инвертора на уровне напряжения холостого хода выпрямительного режима.

9. Определить предельно допустимый ток инвертора при работе по естественной и горизонтальной искусственной внешней характеристике.

10. Разработать программы для ЭВМ и рассчитать зависимость коэффициента мощности от тока при работе преобразователя в выпрямительном и инверторном режимах.

Исходные данные

Исходные данные принимаются из табл. 1, 2, 3 в зависимости от комбинации трех последних цифр шифра студента, стоящих после обозначения специальности.

Задаются: схема разрабатываемого преобразователя, тип используемых вентилях и вид охлаждения (скорость охлаждающего потока), номинальные электрические параметры и их отклонение для питающей сети, выпрямителя и инвертора. При переводе в инверторный режим увеличивается число витков и соответственно действующее значение напряжения вентильной обмотки до $U_{2и}$.

Напряжение короткого замыкания трансформатора можно считать одинаковым для обоих режимов и равным $U_{кт}$.

В вариантах с последней цифрой шифра от 0 до 6 (табл. 1) предусматривается разработка выпрямительно-инверторного преобразователя с отдельными выпрямительным и инверторным комплектами аналогично рис. 1.

Выпрямительная часть в зависимости от варианта разрабатывается с неуправляемым или управляемыми вентилями.

В вариантах с последней цифрой шифра от 7 до 9 предусматривается разработка выпрямительно-инверторного преобразователя с общей тиристорной группой аналогично рис. 2.

Длительность управляющих импульсов в мостовых схемах предполагается близкой к 120° .

Требования к оформлению курсовой работы

Курсовая работа состоит из расчетной и графической частей.

Расчетная часть оформляется в виде пояснительной записки чернилами или пастой темного цвета на одной стороне листа бумаги стандартного формата А4.

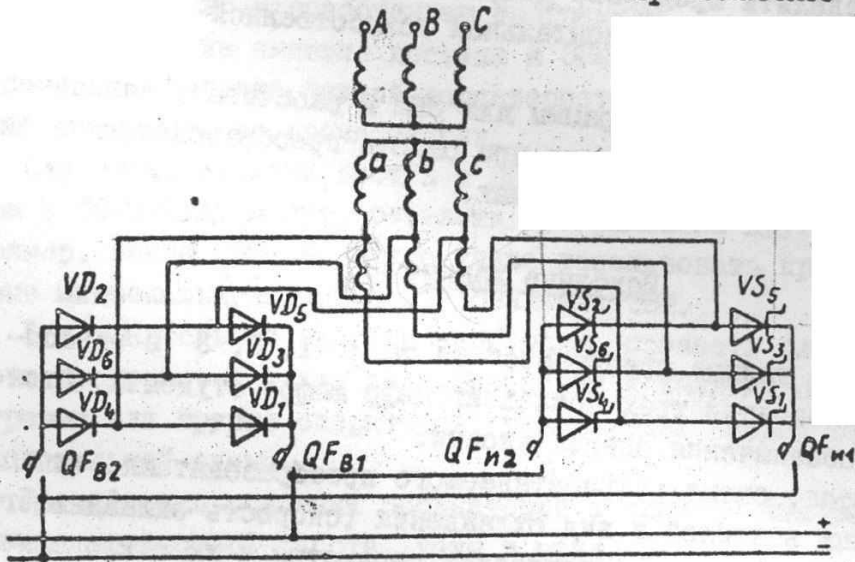


Рис. 1

QF_B - выключатели выпрямительного режима;
 QF_I - инверторного.

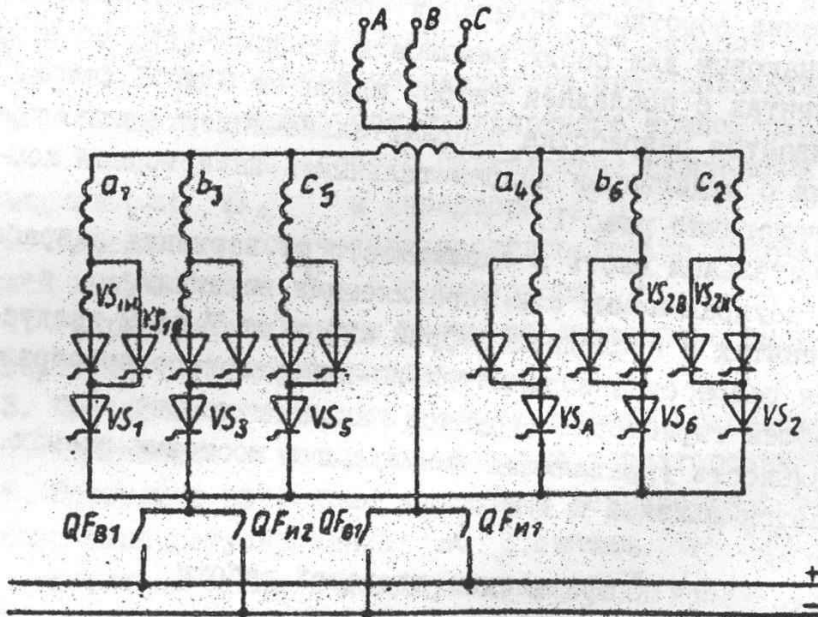


Рис. 2

QF_B - выключатели выпрямительного режима; QF_I - инверторного; $VS_{1...6}$ - общая тиристорная группа; $VS_{1...6B}$ - тиристоры выпрямителя; $VS_{1...6И}$ - инвертора.

Материал пояснительной записки должен располагаться в такой последовательности: титульный лист, задание на проектирование, содержание (оглавление), реферат, введение, основная часть, состоящая из выделенных разделов и подразделов, выводы и предложения, список использованной литературы, приложения.

Все разделы должны иметь краткое и четкое название и нумероваться арабскими цифрами (1, 2, 3 и т.д.). Подразделы также должны иметь название и нумероваться в пределах каждого раздела двумя арабскими цифрами (1.1, 1.2, ..., 4.1, 4.2).

Схемы, графики, рисунки, таблицы должны нумероваться в пределах каждого раздела двумя цифрами (1.1, 1.2, ..., 3.1, 3.2 и т.д.) и иметь четкое название.

Формулы нумеруются в пределах раздела двумя арабскими цифрами (1.1, 1.2 и т.д.).

Графическая часть проекта, включающая временные диаграммы напряжений и токов в элементах схемы, графики внешней и ограничительной характеристик преобразователя, результаты расчетов и анализа КПД и коэффициента мощности, выполняется в масштабе на листе миллиметровой бумаги формата А4.

Силовая схема разработанного преобразователя с детальной расшифровкой одной фазы выполняется на чертежной бумаге формата А2 в соответствии с ЕСКД или на миллиметровке.

МЕТОДИЧЕСКИЕ УКАЗАНИЯ К ВЫПОЛНЕНИЮ КУРСОВОЙ РАБОТЫ

Выполнение курсовой работы следует начинать с детального изучения теории работы, конструкции, характеристик и основных параметров полупроводниковых диодов и тиристоров, особенностей параллельного и последовательного соединения полупроводниковых диодов и тиристоров, теории работы заданной схемы в режиме неуправляемого, а затем управляемого выпрямителя [1, 2, 3, 4, 5, 10].

- *) Следует напомнить, что в электротехнике принято обозначать строчными (малыми) буквами величины-функции времени или фазового угла (мгновенные значения). Прописными буквами обозначаются численные оценки, например, действующие, средние значения.

Таблица 1

Исходные данные для выполнения курсовой работы

Наименование исходных данных	Последняя цифра шифра									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Схема разрабатываемого выпрямительно-инверторного преобразователя	Шестипульсовая мостовая		"Две обратные звезды с уравнительным реактором"		Шестипульсовая мостовая			"Две обратные звезды с уравнительным реактором" и общей тиристорной группой		
Схема выпрямительной части	С неуправляемыми вентилями				С управляемыми вентилями			С управляемыми вентилями		
Угол регулирования выпрямительного режима α , °ЭЛ	0	0	0	0	5	10	15	10	15	20

Таблица 2

Наименование исходных данных	Предпоследняя цифра шифра студента (десятки)									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Отношение амплитуды неповторяющихся перенапряжений к $U_{\text{вmax}}, K_{\text{нл}}$	2,2	2,3	2,4	2,45	2,25	2,2	2,3	2,4	2,45	2,25
Номинальный ток выпрямителя $I_{\text{дн}}, \text{А}$	2000	2000	3000	3200	3500	2200	2600	3200	3400	3600
Коэффициент повышения напряжения при переходе в режим инвентирования $K_{\text{н}} = \frac{U_{2\text{н}}}{U_{2\text{в}}}$	1,15		1,20		1,25			1,30		
Угол опережения инвертора, β , °ЭЛ	$\beta = \arccos \frac{U_{2\text{в}}}{U_{2\text{н}}}$									

Таблица 3

Наименование исходных данных	Сотни в шифре студента									
	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Тип вентиля: а) для управляемого выпрямителя	В8-200	ВЛ-320	В-320	ВЛ-200	В8-200	В8-250	ДЛ-123-320	В-500	ДЛ-133-500	В-800
б) для управляемого выпрямителя, инвертора	Т3-200	ТЛ-250	Т-4-320	ТЛ-200	Т9-200	ТЛ-250	Т-320	Т-500	ТЛ53-630	ТЛ53-800
Скорость потока охлаждающего воздуха $V, м/с$	0	6	12	0	6	12	0	6	12	0
Номинальное напряжение питающей сети (сетевой обмотки) $U_n, кВ$	10	6	35	10	6	35	10	6	35	10
Колебание напряжения в питающей сети $\Delta U_c, \%$	± 3	$\pm 3,5$	± 4	± 5	$\pm 5,5$	± 3	$\pm 3,5$	± 4	$\pm 4,5$	± 5
Мощность короткого замыкания на питающих линиях $S_{кз}, МВ\cdot А$	150	825	175	6600	200	3300	250	6600	300	3300
Номинальное выпрямленное напряжение при $\alpha = 0$ $U_{дн}, В$	3300	825	175	6600	200	3300	250	6600	300	3300
Напряжение к.з. трансформатора $U_{кз}, \%$	6,1	7,10	7,1	8,0	6,5	7,5	8,1	7,2	6,5	7,0
Отношение амплитуды вторичных перемагничиваний к $U_{б\max}, Кп$	1,65	1,75	1,8	1,9	2,0	1,65	1,75	1,8	1,9	2,0

Перед выполнением расчетов для указанных режимов необходимо построить временные диаграммы фазных напряжений вентильной обмотки трансформатора U_2^* , тока управления i_y , подаваемого на управляющие электроды тиристоров, выпрямленного напряжения U_d и тока i_d , токов вентилей i_a и одной фазы вентильной i_2 и сетевой i_1 обмоток преобразовательного трансформатора, напряжения на одном из вентилей U_B .

Эти построения облегчат освоение аналитических зависимостей, приведенных в прил. 2.

Для построения временных диаграмм в качестве исходных принимаются действующее значение напряжения вентильной обмотки U_2 и среднее значение выпрямленного тока I_d .

Освоение материала можно проверить по контрольным вопросам, приведенным в прил. 9.

Аналогично проводится детальное изучение теории работы схемы в инверторном режиме.

При изучении указанных вопросов по рекомендованной литературе следует помнить, что некоторые расчетные величины могут иметь различные буквенные обозначения. Например, мгновенное и действующее значения напряжения обозначаются соответственно u_2 , U_2 , а в других источниках вместо напряжения используется ЭДС e_2 , E_2 . В данном пособии принято первое обозначение.

Расчетную часть курсовой работы рекомендуется выполнить в следующей последовательности.

I. РАСЧЕТ ПРОЕКТНЫХ ПАРАМЕТРОВ ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЬНОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Выпрямительные и выпрямительно-инверторные агрегаты помимо полупроводникового преобразователя содержат специальные преобразовательные трансформаторы. Трансформатор служит для согласования напряжения сети с напряжением на выходе преобразователя и разделения цепи нагрузки от питающей сети.

В курсовой работе необходимо рассчитать проектные параметры трансформатора, которые используются в дальнейших расчетах.

Расчет проектных параметров трансформатора производится

*) См. сноску на с. 5.

для номинального выпрямленного тока I_{dH} при номинальном напряжении в питающей сети U_{1H} .

Используя исходные данные и основные расчетные соотношения схем выпрямления и инвертирования (прил. 2), для выпрямительного режима рассчитываются проектные параметры трансформаторов:

- 1) расчётная мощность выпрямителя $P_{d0} = U_{d0} I_{dH}$, кВт;
- 2) действующее значение фазного напряжения вентильной (вторичной) обмотки U_{2B} , В;
- 3) действующее значение тока вентильной обмотки I_{2H} , А;
- 4) номинальная расчетная мощность вторичной обмотки, кВА;
- 5) действующее значение фазного напряжения сетевой (первичной) обмотки U_1 , В;
- 6) коэффициент трансформации трансформатора K_T ;
- 7) действующее значение тока сетевой обмотки I_{1H} , А;
- 8) номинальная мощность сетевой обмотки S_{1H} , кВА;
- 9) типовая мощность трансформатора S_T , кВА;

По типовой мощности необходимо выбрать бак стандартного трансформатора.

Промышленностью выпускаются следующие стандартные шкалы мощностей трехфазных трансформаторов: 100, 125, 160, 250, 400, 630, 800×10^n кВА,

где $n = 0, 1, 2, 3, \dots$

Так как в курсовой работе проект преобразовательного трансформатора не разрабатывается, то в дальнейших расчетах некоторые его параметры будут задаваться в % от номинальной мощности бака.

В курсовой работе примем, что в выпрямительном и инверторном режимах номинальная мощность трансформатора одинакова:

$$S_{1B} = S_{1H} = S_{1H} \quad (I.1)$$

Это возможно, если номинальный ток инвертора и выпрямителя связаны соотношением

$$I_{1H} = I_{dH} \frac{U_{2B}}{U_{2H}}, \quad (1.2) \text{ где } U_{2H} = K_H U_{2B}. \quad (1.3)$$

В курсовой работе для инверторного режима необходимо рассчитать:

- 1) действующее значение напряжения вентильной обмотки U_{2H} , В;
- 2) номинальный ток инвертора I_{1H} , А;

- 3) действующее значение тока вентиляльной обмотки I_{2H} , А;
- 4) коэффициент трансформации трансформатора K_T ;
- 5) действующее значение тока сетевой обмотки I_{1H} , А.

2. РАСЧЕТ ЧИСЛА ПАРАЛЛЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Число параллельно включенных вентилях зависит от среднего тока вентиляльного плеча I_d , который рассчитывается по формулам прил. 2, и предельного тока, допускаемого вентиляем I_n .

2.1. Определение предельного тока вентиля

Предельный ток вентиля зависит от параметров вентиля, условий охлаждения, схемы преобразователя и может быть рассчитан по формуле [8]:

$$I_n = \frac{\sqrt{U_0^2 + 4 \cdot K_\Phi^2 \cdot R_d \cdot \frac{[\theta]}{R_T}} - U_0}{2 \cdot K_\Phi^2 \cdot R_d} \quad (2.1)$$

где U_0 - пороговое напряжение вентиля, В;
 R_d - динамическое сопротивление, Ом;
 R_T - общее установившееся тепловое сопротивление системы "вентиль-среда" при типовом охладителе, $^{\circ}\text{C}/\text{Вт}$;

K_Φ - коэффициент формы тока (прил. 4);
 $[\theta]$ - допускаемое превышение температуры вентиля над температурой окружающей среды, $^{\circ}\text{C}$.

$$[\theta] = [\theta_{pn}] - \theta_c \quad (2.2)$$

где $[\theta_{pn}]$ - максимальная допустимая температура полупроводниковой структуры вентиля, $^{\circ}\text{C}$ (для диодов - 140°C , для тиристоров - 125°C);

θ_c - максимальная температура окружающей среды.

Численные значения U_0 , R_d , R_T даны в прил. 3, а температуру θ_c принять равной 40°C .

2.2. Определение потребного числа параллельно включенных вентилях

Если окажется, что

$$I_n < I_d \quad (2.3)$$

то применяют параллельное включение вентиляей.

Число параллельно включенных вентиляей по среднему току вентиляльного плеча при номинальной нагрузке Q_1 рассчитывается по следующей формуле:

$$Q_1 = \frac{I_a K_H}{I_n K_V} + Q'_1, \quad (2.4)$$

где K_H - коэффициент, учитывающий неравномерное деление тока между параллельно включенными вентилями ($K_H = 1,1 - 1,2$);

K_V - коэффициент, учитывающий уменьшение скорости охлаждающего потока (принять $K_V = 1$).

Выбранное по условиям нормального режима число параллельно включенных вентиляей Q_1 необходимо проверить по ударному току аварийного режима.

Число параллельно включенных вентиляей по ударному току равно

$$Q_2 = \frac{K_H i_{yг}}{I_{yг}} + Q'_2, \quad (2.5)$$

где $i_{yг}$ - ударный ток вентиляльного плеча при аварийном режиме, А;

$I_{yг}$ - максимально допустимое значение ударного тока заданного вентиля, А (прил. 3);

Q'_1, Q'_2 - число, округляющее расчет до целого.

В результате выбирается вариант с большим значением числа параллельно включенных вентиляей.

2.3. Определение ударного тока аварийного режима

Наиболее тяжелыми аварийными режимами являются режим глухого короткого замыкания на шинах постоянного тока для выпрямителя и режим прорыва для инвертора [1, 2, 3, 4, 5, 10].

Максимальное значение ударного тока в вентиляльном плече выпрямителя равно

$$i_{yгв} = K_y I_m, \quad (2.6)$$

где I_m - амплитудное значение установившегося тока к.з., А.
Ток I_m выпрямителя можно определить по формуле [6]

$$I_m = \frac{\sqrt{6} U_2}{\sqrt{(2x_a)^2 + (2R_a)^2}} \quad (2.7)$$

При прорыве или опрокидывании инвертора аварийный ток складывается из тока короткого замыкания между фазами опрокинувшегося инвертора и параллельно работающего выпрямителя. Для уменьшения величины и скорости нарастания аварийного тока инвертора в его цепь включают дополнительный реактор.

В этом случае максимальный ток аварийного режима [6]

$$i_{ygn} = \frac{K_y \sqrt{6} U_2}{\sqrt{(R_d + 2R_a)^2 + (\chi_d + 2\chi_a)^2}} + \frac{U_d}{R_d + 2R_a} \left(1 - e^{-\frac{R_d + 2R_a}{\chi_d + 2\chi_a} \vartheta}\right) \quad (2.8)$$

В формулах (2.7, 2.8) обозначено:

K_y - ударный коэффициент ($K_y = 1, 2, \dots, 1, 3$);
 χ_a - индуктивное сопротивление трансформатора χ_T и питающей сети χ_c , отнесенное к напряжению вентильной обмотки, Ом;

R_a - активное сопротивление трансформатора R_T и питающей сети R_c , отнесенное к напряжению вентильной обмотки, Ом;

R_d, χ_d - активное и индуктивное сопротивления сглаживающего реактора, Ом (прил. 5).

В курсовой работе рекомендуется взять реакторы $L_d = 4,5$ мГ или $L_d = 11$ мГ.

$\vartheta = \omega t$ - время в радианах,

где t - время отключения аварийного тока быстродействующим выключателем, с. Для применяемых выключателей

$t \approx (0,07 \dots 0,1)$ с.

Численные значения сопротивлений χ_a, χ_c, χ_T и R_a с учетом U_{2B} и U_{2H} могут быть определены по формулам [6]:

$$\chi_a = \chi_c + \chi_T = \frac{3U_2^2}{S_{кз}} 10^{-6} + \frac{3U_2^2 U_{кт} \%}{S_{1H}} 10^{-5} =$$

$$= \frac{3U_2^2}{10^5} \left(\frac{1}{10 S_{кз}} + \frac{U_{кт} \%}{S_{1H}} \right); \quad (2.9)$$

$$R_c \approx 0,15 \chi_c; \quad (2.10)$$

$$R_a = R_c + R_T \approx \frac{3U_2^2}{10^5} \left(\frac{15}{10^5 S_{кз}} + \frac{\Delta P_H}{S_{1H}^2} \right), \quad (2.11)$$

где ΔP_M - потери короткого замыкания преобразовательного трансформатора, кВт.

Ориентировочно можно принять

$$\Delta P_M = (0,6 \dots 0,8) \% S_{1H}$$

Остальные обозначения расшифрованы в прил. 2, причём обратите внимание, что S_{1H} в кВА, а $S_{кз}$ в МВА.

2.4. Порядок расчета числа параллельно включенных вентилях выпрямителя

Рекомендуется следующая последовательность выполнения расчетов:

1. Расчет предельного тока заданного вентиля I_n , А.
2. Расчет среднего тока вентильного плеча $I_{ав}$, А.
3. Расчет числа параллельно включенных вентилях по среднему току Q_{1B} , шт.
4. Расчет индуктивного и активного сопротивлений контура короткого замыкания, приведенных к напряжению U_{2B} вентильной обмотки выпрямителя X_a , R_a , Ом.
5. Расчет амплитудного значения установившегося тока к.з. I_m и ударного тока $i_{уд}$, А.
6. Расчет числа параллельно включенных вентилях по ударному току Q_{2B} , шт.
7. Выбор окончательного варианта числа параллельно включенных вентилях Q_B , шт.

2.5. Расчет числа параллельно включенных тиристоров инвертора

Число параллельно включенных тиристоров инвертора рассчитывается в последовательности пункта 2.4 с учетом формул (1.3, 2.8).

3. РАСЧЕТ ЧИСЛА ПОСЛЕДОВАТЕЛЬНО ВКЛЮЧЕННЫХ ВЕНТИЛЕЙ

Количество последовательно включенных вентилях зависит от максимального обратного напряжения вентильного плеча $U_{b\max}$ (прил. 2) с учетом перенапряжений, возникающих в схеме преобразователя, и от класса К применяемого вентиля (прил. 3)

Класс вентиля выбирается из условия:

$$K \geq \frac{K_n U_{b \max}}{100} \quad (3.1)$$

Вентиль рассматриваемого класса выбирается из выпускаемых промышленностью (прил. 3).

В курсовой работе допускается применение вентиля не выше I5 класса.

Если условие (3.1) не выполняется, то осуществляют их последовательное включение. Потребное число последовательно включенных вентилях рассчитывается по:

- 1) повторяющемуся напряжению;
- 2) неповторяющемуся напряжению.

Потребное число последовательно включенных вентилях находят из следующих выражений:

- а) по повторяющимся напряжениям:

$$S_1 = \frac{K'_n \left(1 + \frac{\Delta U_c}{100}\right) U_{b \max}}{U_n} K_n + S'_1 + S''_2; \quad (3.2)$$

- б) по неповторяющимся напряжениям:

$$S_2 = \frac{K'_n \left(1 + \frac{\Delta U_c}{100}\right) U_{b \max}}{U_{нп}} K_{нп} + S'_2 + S''_2, \quad (3.3)$$

где K'_n = коэффициент, учитывающий неравномерное распределение напряжения между последовательно включенными вентилями ($K'_n = I, I - I, I5$ для нелавинных вентилях);

ΔU_c - колебание напряжения в питающей сети, %;

$K_n, K_{нп}$ - коэффициенты, учитывающие величину перенапряжений, возникающих в разрабатываемом преобразователе;

S'_1, S'_2 - числа, округляющие расчет до целого;

S''_1, S''_2 - число запасных вентилях (применяется I шт.);

$U_n, U_{нп}$ - повторяющееся и неповторяющееся напряжения, допускаемые выбранным вентилем, В.

Численные значения $U_n, U_{нп}$ зависят от класса вентиля [I, 3, 6, 8] и могут быть рассчитаны по данным табл. 3.1.

Зависимость напряжения U_n , $U_{нп}$, U_λ
от класса вентиля К

Параметр	Диоды		Тиристоры	
	нелавинные	лавинные	нелавинные	лавинные
U_n , В	100 К	100 К	100 К	100 К
$U_{нп}$, В	116 К	-	111 К	-
U_λ , В	-	125 К	-	120 К

где U_λ - напряжение лавинообразования.

По результатам расчета S_1 и S_2 выбирается вариант с большим значением.

Если в качестве вентиля заданы лавинные, то расчет ведется только по повторяющемуся напряжению, причём $K_n = 1$. Особенности лавинных вентилях изложены в [1, с.44-46].

3.1. Расчет числа последовательно включенных вентилей выпрямителя

Рекомендуется следующая последовательность выполнения работы:

1. Расчет максимального обратного напряжения вентильного плеча $U_{вmax}$, В.

2. Расчет и выбор класса вентиля и определение допускаемых им повторяющегося U_n и неповторяющегося $U_{нп}$ напряжений, В.

3. Расчет числа последовательно включенных вентилях по повторяющемуся напряжению $S_{1В}$, шт.

4. Расчет числа последовательно включенных вентилях по неповторяющемуся напряжению $S_{2В}$, шт. (для нелавинных).

5. Выбор окончательного варианта числа последовательно включенных вентилях S_B , шт.

3.2. Расчет числа последовательно включенных тиристоров инвертора

Количество последовательно включенных тиристоров инвертора $S_{1И}$, $S_{2И}$, $S_{И}$ выполняется в последовательности п. 3.1.

Напряжение $U_{\text{вн max}}$ рассчитывается с учетом повышения напряжения вентильной обмотки до $U_{2И}$.

3.3. Расчет числа последовательно включенных тиристорov выпрямительно-инверторного преобразователя с общей тиристорной группой

В схеме переключаемого ВП (рис. 1, прил. I) используют общую тиристорную группу, включающую тиристоры VS_1, VS_2, \dots, VS_6 , которые работают как в выпрямительном, так и в инверторном режимах.

Для переключения из выпрямительного режима в инверторный с изменением напряжения вентильной обмотки с $U_{2В}$ до $U_{2И}$ служит инверторная группа, включающая тиристоры $VS_{1И}, VS_{2И}, \dots, VS_{6И}$, которые работают только в инверторном режиме. Выпрямительная группа, включающая тиристоры $VS_{1В}, VS_{2В}, \dots, VS_{6В}$, которые работают только в выпрямительном режиме, служат для переключения в выпрямительный режим.

Рекомендуется следующая последовательность выполнения работы:

1. Расчет максимального обратного напряжения вентильного плеча в выпрямительном и инверторном режимах $U_{\text{в max}}, U_{\text{вн max}}$.

2. Определение суммарного числа последовательно включенных тиристорov $S_{1В}, S_{2В}, S_{6В}$ выпрямительного режима по $U_{\text{в max}}$ в последовательности п. 3.1.

3. Определение суммарного числа последовательно включенных тиристорov $S_{1И}, S_{2И}, S_{6И}$ инверторного режима по $U_{\text{вн max}}$ в последовательности п. 3.1.

4. Распределение суммарного числа тиристорov выпрямительного и инверторного $S_{ИВ}$ режимов на общую S_0 , выпрямительную $S_В$ и инверторные группы $S_И$.

Для выполнения последнего пункта необходимо знать максимальное обратное напряжение, прикладываемое к тиристорам выпрямительной группы (например: $VS_{1В}$ через $VS_{1И}$) или тиристорам инверторной группы (например: $VS_{1И}$ через $VS_{1В}$) от добавочной вентильной обмотки.

Это напряжение равно

$$\Delta U_{\text{в max}} = \sqrt{2}(U_{2И} - U_{2В}). \quad (3.4)$$

Тогда число последовательно включенных тиристорov выпрямительной группы S_B определяется по формулам (3.2), (3.3) с учетом $\Delta U_b \text{ макс}$.

Число последовательно включенных тиристорov в общей группе

$$S_D = S_{BC} - S_B \quad (3.5)$$

Число последовательно включенных тиристорov инверторной группы

$$S_{II} = S_{IC} - S_D \quad (3.6)$$

3.4. Расчет общего числа вентиляей преобразователя

Общее число вентиляей, которое необходимо для комплектования преобразователя, зависит от числа плеч преобразователя и числа последовательно и параллельно включенных вентиляей в плече.

Общее число вентиляей выпрямителя

$$N_B = \Pi a_B S_B \quad (3.7)$$

Общее число тиристорov инвертора

$$S_{II} = \Pi a_{II} S_{II} \quad (3.8)$$

Общее число тиристорov для ВИП с общей тиристорной группой

$$N = \Pi (a_{II} S_{II} + a_B S_B + a_D S_D), \quad (3.9)$$

где Π - число плеч преобразователя;

a_B, a_{II}, a_D - число параллельно включенных вентиляей соответственно в выпрямительной, инверторной и общей группах, шт.;

S_B, S_{II}, S_D - число последовательно включенных вентиляей соответственно в выпрямительной, инверторной и общей группах, шт.

4. РАЗРАБОТКА СИЛОВОЙ СХЕМЫ

Для нормальной работы преобразователя необходимо обеспечить равномерное распределение напряжения между последовательно включенными вентиляями и тока между параллельно включенными вентиляями.

4.1. Расчет и выбор устройств выравнивания напряжения

Из-за расхождения обратных ветвей вольт-амперных характеристик вентилях и прямых вольт-амперных характеристик закрытых тиристоров происходит неравномерное распределение напряжения между последовательно включенными вентилями. Это может привести к пробоем вентильного плеча, начиная с вентиля, имеющего минимальный обратный ток. Неравномерное распределение прямого напряжения между закрытыми тиристорами может привести к самопроизвольному переключению их в проводящее направление.

Для выравнивания распределения напряжения между последовательно включенными вентилями параллельно им включают шунтирующие резисторы $R_{ш}$ и резисторно-емкостные цепи $R_{в} - C_{в}$ [1, 2, 3, 6, 7, 8].

Сопротивление шунтирующего резистора

$$R_{ш} = \frac{S U_{п} - U_{в \max}}{(S-1) \cdot \alpha \cdot I_{о \max} \cdot 10^{-3}} \text{ [Ом]}, \quad (4.1)$$

где $I_{о \max}$ - в мА.

Мощность рассеивания, по которой выбирается шунтирующий резистор,

$$P = I_{о \max} \cdot \alpha \cdot \frac{U_{в \max}}{S} \cdot 10^{-3} \text{ [Вт]}. \quad (4.2)$$

Емкость шунтирующего конденсатора

$$C_{в} = (0,5 \div 1,0) \alpha \text{ [мкФ]}. \quad (4.3)$$

Рабочее напряжение, на которое выбирается шунтирующий конденсатор,

$$U_{с} = 1,5 U_{п}. \quad (4.4)$$

Сопротивление резистора

$$R_{в} = \frac{5 \div 10}{\alpha} \cdot \text{[Ом]}. \quad (4.5)$$

Резистор $R_{в}$ выбирается мощностью 10-15 Вт.

Резистор связи $R_{с}$ выбирается сопротивлением 0,2-0,3 Ом и изготавливается из нихрома $d = 0,8$ мм.

В приведенных выше формулах:

$I_{о \max}$ - максимальное значение обратного тока при $U_{п}$ мА;
 $U_{п}$, $U_{в \max}$ - определены ранее;

$a, S - a_B, S_B$ - для выпрямителя, a_n, S_n - для инвертора.

В качестве резисторов $R_{ш}, R_{г}$ применяются ПЭ или ПЭВ (проволочные эмалированные влагостойкие), технические характеристики которых даны в [8] и прил. 6, 7.

Емкость C_B комплектуется из конденсаторов МБМ, МБП (металлобумажные герметизированные частотные), технические характеристики которых даны в [9] и прил. 8.

Если одного резистора или конденсатора недостаточно, то производится их последовательное, параллельное или последовательно-параллельное включение.

В курсовой работе необходимо выбрать тип резистора, конденсатора и определить потребное их число для выпрямителя и инвертора.

4.2. Выбор устройств выравнивания тока

Несовпадение прямых ветвей вольт-амперных характеристик работающих вентилях приводит к неравномерному распределению тока между параллельно включенными вентилями. Это может привести к перегреву и выходу из строя наиболее нагруженного вентиля.

Одним из наиболее распространенных способов выравнивания тока между параллельно включенными вентилями является применение одновитковых индуктивных делителей тока (ИДТ). Схема включения ИДТ зависит от числа параллельно работающих вентилях. Если число параллельных вентилях менее шести, то целесообразно применять "замкнутую кольцевую схему включения делителей", а при числе параллельных вентилях более шести - схему включения с "задающим вентиляем" [1, 3, 8].

При большом числе последовательно включенных вентилях (более трех) в неуправляемых выпрямителях отклонение токов между параллельными вентиляльными ветвями не превосходит $\pm 10\%$. Это объясняется незначительным отклонением суммарных падений напряжений в каждой вентиляльной ветви. В этом случае ИДТ не применяют, но производят подбор вентилях по одинаковым характеристикам и число параллельно включенных вентилях берут с коэффициентом запаса $K_H = 1,15 \dots 1,25$.

В курсовой работе без расчета выбирается схема включения делителей тока для управляемого выпрямителя и инвертора.

4.3. Разработка силовой схемы

После выполнения расчетов, выбора числа последовательно и параллельно включенных вентилях, устройств для выравнивания напряжения и тока разрабатываются и вычерчиваются на листе формата А2 силовая схема преобразователя и подробная схема одной фазы (вентильного плеча) выпрямителя и инвертора с указанием всех её элементов [1, 2, 3, 6, 7].

Если выпрямители комплектуются из неуправляемых вентилях, то при $\alpha_B > 3$ индуктивные делители тока не применяются.

При комплектации их на лавинных вентилях, кроме того, как правило, не применяют цепи $R_B - C_B$.

В управляемых выпрямителях и инверторах при любых тиристорах необходимо применять устройства для выравнивания напряжения и тока.

4.4. Упрощенный расчет стоимости преобразователя

В курсовой работе рассчитывается стоимость вентильного комплекта без стоимости трансформатора. Она складывается из стоимости вентилях, охладителей, устройств выравнивания напряжения, устройств выравнивания тока.

Цены вентилях и охладителей даны в справочниках и в прил. 3.

Стоимости устройств выравнивания напряжения и тока могут быть приняты ориентировочно соответственно в размерах 10 % и 5 % от стоимости вентильного комплекта.

Результаты расчета оформляются в виде таблицы, в которой указываются тип вентиля и охладителя, цена их, общее потребное число вентилях и охладителей, стоимость комплекта вентилях, охладителей, делителей напряжения, тока и общая стоимость выпрямителя. Аналогичная таблица оформляется для инвертора.

5. РАСЧЕТ ХАРАКТЕРИСТИК ПРЕОБРАЗОВАТЕЛЯ

5.1. Расчет внешней характеристики выпрямителя

Основной характеристикой неуправляемого и управляемого выпрямителей являются внешние характеристики, описывающие зависимости соответственно:

$$U_d = f(I_d) \text{ и } U_{d\alpha} = f(I_d).$$

Внешняя характеристика управляемого выпрямителя, как и неуправляемого, является падающей прямолинейной из-за потери выпрямленного напряжения при коммутации тока с одного вентиля на другой. Угол наклона внешней характеристики зависит от индуктивного сопротивления X_d [1, 2, 3].

При расчете внешних характеристик по формулам прил. 2 необходимо учесть, что

$$U_{кз} = U_{кТ} + U_{кС}, \% , \quad (5.1)$$

где $U_{кС}$ - напряжение короткого замыкания питающей сети, %.

Величина $U_{кС}$ может быть найдена из соотношения

$$U_{кС} = U_{кТ} \frac{X_C}{X_T}, \% . \quad (5.2)$$

В курсовой работе для разработанного выпрямителя необходимо (если задан только угол $\alpha = 0$, то расчёты и построения при $\alpha > 0$ не выполняются):

1. Рассчитать напряжение короткого замыкания питающей сети $U_{кС}$.

2. Определить угол коммутации δ неуправляемого выпрямителя при $I_d = 0,5 I_{dн}$; $I_d = I_{дн}$.

3. Определить угол коммутации управляемого выпрямителя ($\alpha > 0$) при $I_d = 0,5 I_{дн}$; $I_d = I_{дн}$.

4. Рассчитать и построить в масштабе внешнюю характеристику неуправляемого выпрямителя.

5. Рассчитать и построить в масштабе внешнюю характеристику управляемого выпрямителя при заданном значении угла α .

Внешние характеристики могут быть построены по двум точкам при

$I_d = 0$ и $I_{дн}$ в первом квадранте листа А4.

6. Построить в масштабе временные диаграммы: напряжения вентильной обмотки u_2 , выпрямленного напряжения U_d , тока управления i_y , выпрямленного тока i_d , тока вентильной обмотки i_2 , тока сетевой обмотки i_1 , напряжения на одном из вентильных плеч u_b с учетом угла γ при токе $I_{дн}$ для двух режимов работы преобразователя:

- а) в режиме неуправляемого выпрямителя;
 б) в режиме управляемого выпрямителя с заданным углом α (см. [1, с. 170-178; 2, с. 94-97, 134-138]).

7. Объяснить устно вышеперечисленные временные диаграммы и теорию работы выпрямителя.

5.2. Расчет внешней и ограничительной характеристик инвертора

Основными характеристиками инвертора являются: внешняя (входная) $U_{и} = f(I_{и})$ при $\beta = const$ и ограничительная $U_{ог} = f(I_{и})$, которые описываются формулами прил. 2.

Внешняя характеристика инвертора при угле $\beta = const$ является прямолинейной возрастающей в отличие от выпрямителя, у которого она прямолинейно падающая [1, 2, 3, 4, 5].

Ограничительная характеристика, определяющая одно из условий надёжной работы инвертора, - приблизительно прямолинейная падающая.

Для разработанного инвертора необходимо:

1. Определить угол коммутации γ инвертора при $= 0,5 I_{ин} , I_{и} = I_{ин} .$
2. Рассчитать и построить в масштабе внешнюю характеристику инвертора при $\beta = const .$
3. Рассчитать и построить в масштабе ограничительную характеристику инвертора.
4. Построить искусственную горизонтальную стабилизированную внешнюю характеристику инвертора на уровне напряжения холостого хода выпрямительного режима $U_{д0} .$

Внешние и ограничительная характеристики могут быть построены по двум точкам при $I_{и} = 0$ и $I_{и} = I_{ин} .$

Эти характеристики должны быть построены во втором квадранте листа А4 совместно с внешними характеристиками выпрямителя.

5. Определить графически и проверить по расчетным формулам предельно допустимый ток инвертора $I_{и1 max} , I_{и2 max}$ при работе соответственно по естественной и искусственной стабилизированной внешним характеристикам.

6. Объяснить устно перечисленные временные диаграммы и теорию работы инвертора.

Начальный угол опережения инвертора β определяется

из условия равенства напряжений холостого хода выпрямителя и инвертора

$$\cos \beta = \frac{U_{2B}}{U_{2и}} \quad (5.3)$$

Нормальная работа инвертора обеспечивается при условии:

$$\beta = \gamma_{max} + \delta_0 + \tau, \text{ рад}, \quad (5.4)$$

где β - угол опережения, рад;

γ_{max} - угол коммутации при максимальном рабочем токе инвертора $I_{и max}$, рад;

δ_0 - время выключения тиристора в угловых единицах. Для тиристоров время δ_0 дается в справочниках и составляет (50 - 200) мкс или (0,9 - 3,6)⁰эл;

τ - угол запаса, принимаемый 5-10⁰эл при частоте $f = 50$ Гц.

В расчетной формуле $U_{ог} = f(I_{и})$ (прил. 2) обозначено

$$\delta = \delta_0 + \tau \quad (5.5)$$

Если с увеличением тока $I_{и}$, а соответственно и угла коммутации γ , условие (5.4) будет нарушено, то произойдет опрокидывание инвертора, т.е. короткое замыкание системы "электровоз-инвертор".

Величина предельного (максимального) тока инвертора $I_{и max}$, при котором еще сохраняется его устойчивая работа, графически определяется точкой пересечения внешней и ограничительной характеристик.

Аналитический расчет $I_{и max}$ может быть выполнен по формулам прил. 2.

6 РАСЧЕТ КОЭФФИЦИЕНТОВ МОЩНОСТИ

6.1. Коэффициент мощности (к.м.)

Коэффициент мощности X - есть отношение активной мощности P_I , потребляемой из сети, к полной кажушейся мощности S_I .

Для выпрямителей и инверторов величину X можно рассчитать по формуле

$$X = \frac{m_1 U_1 I_1(\lambda) \cos \varphi}{m_1 U_1 I_1} = \frac{I_1(\lambda)}{I_1} \cos \varphi = \nu \cos \varphi, \quad (6.1)$$

где γ - коэффициент искажения тока сетевой обмотки.

Через известные параметры трансформатора и преобразователя с учетом тока холостого хода трансформатора этот коэффициент определяется по формулам [4]:

к.м. выпрямителя

$$X = \gamma \frac{\cos(\alpha + \frac{\gamma}{2})}{\sqrt{1 + (\frac{I_0}{100} \frac{I_d}{I_{dH}})^2 + 2(\frac{I_0}{100} \frac{I_d}{I_{dH}}) \cdot \sin(\alpha + \frac{\gamma}{2})}}; \quad (6.2)$$

к.м. инвертора

$$X = \gamma \frac{\cos(\beta - \frac{\gamma}{2})}{\sqrt{1 + (\frac{I_0}{100} \frac{I_H}{I_{IH}})^2 + 2(\frac{I_0}{100} \frac{I_H}{I_{IH}}) \sin(\beta - \frac{\gamma}{2})}}; \quad (6.3)$$

В упрощенных инженерных расчетах X можно рассчитать по формулам:

к.м. выпрямителя

$$X = \gamma \cos(\alpha + \gamma/2); \quad (6.4)$$

к.м. инвертора

$$X = \gamma \cos(\beta - \gamma/2); \quad (6.5)$$

где m_1 - число фаз сетевой обмотки;

φ_1 - угол сдвига между U_1 и $I_{1(1)}$;

γ - коэффициент искажения тока сетевой обмотки (прил. 2);

I_0 - ток холостого хода преобразовательного трансформатора, %.

Углы α , β , γ - заданы и определены ранее.

В курсовой работе ток холостого хода I_0 принять (0,5...0,6) % I_{IH} ; рассчитать зависимость X от I_d и I_H на ЭВМ по формулам (6.2), (6.3). Сравнить с упрощенным расчётом по (6.4) и (6.5) для номинального тока.

6.2. Расчет коэффициента мощности выпрямителя

Для разработанного выпрямителя необходимо:

1. Рассчитать X неуправляемого выпрямителя при токах нагрузки $I_d = 0,5 I_{dH}$, $I_d = I_{dH}$.

2. Рассчитать X управляемого выпрямителя при заданном угле регулирования α и токах нагрузки $I_d = 0,5 I_{dH}$,

$I_d = I_{dH}$ (если в задании $\alpha > 0$).

3. Выполнить расчет и анализ изменения γ, X неуправляемого и управляемого выпрямителя при токе $0 \leq I_d \leq 1,25 I_{dн}$, используя программу расчета на ЭВМ.

Результаты расчетов оформить в виде графиков $X = f(I_d)$ и $\gamma = f(I_d)$ в масштабе.

6.3. Расчет коэффициента мощности инвертора

Для разработанного ВИП необходимо:

1. Рассчитать X инвертора при работе по естественной внешней (входной) характеристике с углом $\beta = const$ и токах $I_{и} = 0$; $I_{и} = 0,5 I_{ин}$; $I_{и} = I_{ин}$.

2. Выполнить расчет и анализ изменения γ, X инвертора при изменении тока $0 \leq I_{и} \leq 1,25 I_{ин}$, используя программу расчета на ЭВМ.

Результаты расчета оформить в виде графиков $X = f(I_{и})$ и $\gamma = f(I_{и})$ в масштабе на листе миллиметровой бумаги формата А4.

В формулах курсовой работы и прил. 2 обозначено:

U_{d0} - среднее значение выпрямленного напряжения при холостом ходе, В;

$U_1, U_2 (E_2)$ - действующие значения фазного напряжения сетевой и вентиляльной обмоток, В;

$U_{кТ}$ - напряжение короткого замыкания преобразовательного трансформатора, %;

$U_{кв}$ - напряжение короткого замыкания питающей сети, %;

$U_{вmax}$ - максимальное обратное напряжение, прикладываемое к вентиляльному плечу, В;

ΔU_{bo} - скачок обратного напряжения, В;

U_d - среднее значение выпрямленного напряжения при токе I_d , В;

U_{dd} - среднее значение выпрямленного напряжения управляемого выпрямителя при угле регулирования α и токе I_d , В;

$U_{и0}(\beta=0)$ - среднее значение входного напряжения инвертора при условном холостом ходе ($A = 0$), В;

$U_{и0}$ - среднее значение входного напряжения инвертора при холостом ходе ($\beta \neq 0$), В;

Основные соотношения схем выпрямительных и выпрямительно-инверторных преобразователей или $X_d = \infty$

	двухпульсовая		шестипульсовая		двенадцатипульсовая	
	нулевая	мостовая	λ/π	мостовая	последовательная	параллельная
I	2	3	4	5	6	7
I	Общие соотношения					
A	0,7	0,5	0,26			
U_{d0}	$0,9 U_2$	$1,17 U_2$	$2,34 U_2$	$4,68 U_{2\lambda}$	$2,34 U_{2\lambda}$	$2,34 U_{2\lambda}$
$U_{b\max}$	$3,14 U_{d0}$ или $1,57 U_{d0}$ или $1,57 U_{d0}$ или $1,57 U_{d0}$ или	$2,09 U_{d0}$ или $1,045 U_{d0}$ или	$1,045 U_{d0}$ или $0,5225 U_{d0}$ или	$0,5225 U_{d0}$ или $1,045 U_{d0}$ или	$1,045 U_{d0}$ или	$1,045 U_{d0}$ или
$U_{o\max}$	$2\sqrt{2} U_2$	$\sqrt{6} U_2$	$\sqrt{6} U_2$	$\sqrt{6} U_2$	$\sqrt{6} U_{2\lambda}$	$\sqrt{6} U_{2\lambda}$
$U_2(\varepsilon_2)$	$U_{d0}/0,9$	$U_{d0}/1,17$	$U_{d0}/2,34$	$U_{d0}/4,68$	$U_{d0}/2,34$	$U_{d0}/2,34$
I_a	$I_d/2$	$I_d/6$	$I_d/3$	$I_d/3$	$I_d/6$	$I_d/6$
$I_{a\max}$	I_a	$I_d/2$	I_d	I_d	$I_d/2$	$I_d/2$
I_2	$I_d/\sqrt{2}$	I_d	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d$	$\sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d$	$I_{2\lambda} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d$	$I_{2\lambda} = \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot I_d$
(I_1)					$I_{2\Delta} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d$	$I_{2\Delta} = \frac{\sqrt{2}}{3} I_d$
$I_1(I_1)$	$\frac{I_d}{\pi}$	$\frac{I_d}{\pi\sqrt{6}}$	$\frac{I_d}{\pi}$	$\frac{I_d}{\pi}$	$1,577 \cdot \frac{I_d}{\pi}$	$0,789 \cdot \frac{I_d}{\pi}$
I_m	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi \cdot \pi} \cdot \frac{I_d}{\pi}$	$\frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{2\pi\pi}$	$\frac{\sqrt{6}}{\pi\pi} \cdot \frac{I_d}{\pi}$	$\frac{2\sqrt{6}}{\pi\pi} \cdot \frac{I_d}{\pi}$	$\frac{2\sqrt{6}}{\pi\pi} \cdot \frac{I_d}{\pi}$	$\frac{2\sqrt{6}}{\pi\pi} \cdot \frac{I_d}{2\pi\pi}$

I	2	3	4	5	6	7
$I_{d(1)}$	$\frac{2\sqrt{2}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{k_T}$	$\frac{I_d}{k_T}$	$\frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{2k_T}$	$\frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{k_T}$	$\frac{2\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{k_{T\lambda}}$	$\frac{\sqrt{6}}{\pi} \cdot \frac{I_d}{k_{T\lambda}}$
γ	0,9		0,955		0,988	
S_2	1,57 Pd	1,1 Pd	1,48 Pd	1,045 Pd	$S_{2\lambda} = S_{2\sigma} = 0,52 Pd$	
S_1	1,1 Pd		1,05 Pd		1,02 Pd	
S_T	1,34 Pd	1,1 Pd	1,26 Pd	1,05 Pd	1,02 Pd	
p	2		6		12	
гармоники в магнитном поле	$n = k \cdot p$, где $k = 1, 2, 3, \dots, \infty$					
	$2k$		$6k$		$12k$	
	$f_n = f_c \cdot n = f_c \cdot k \cdot p$					
гармоники в токе	$n = k \cdot p \pm 1$, где $k = 0, 1, 2, \dots, \infty$					
	$2k \pm 1$		$6k \pm 1$		$12k \pm 1$	
	$f_n = f_c (k \cdot p \pm 1)$					
	$f_c (2k \pm 1)$		$f_c (6k \pm 1)$		$f_c (12k \pm 1)$	

2. Режим неуправляемого выпрямителя ($\alpha = 0$)

I	2	3	4	5	6	7
U_d	$U_{d0} (1 - A \frac{U_{K3} \cdot I_d}{100 \cdot I_{dH}}) - S_B \cdot e \cdot \Delta U_B$			$U_{d0} (1 - A \frac{U_{K3}}{100} \cdot k_3) - S_B \cdot e \cdot \Delta U_B$		
U_{d0}	$\frac{U_{dH}}{(1-A) \cdot \frac{U_{K3}}{100}}$					
γ	$\arccos(1 - \frac{2 \cdot I_d \cdot x_a}{\sqrt{2} \cdot U_2})$		$\arccos(1 - \frac{I_d \cdot x_a}{\sqrt{6} \cdot U_2})$		$\arccos(1 - \frac{2 \cdot I_d \cdot x_a}{\sqrt{6} \cdot U_2})$	
U_{K3}	$U_{KT} + U_{KC}; U_{KC} = U_{KT} \cdot \frac{x_C}{x_T}$					
x_a	$x_T + x_C$					
x_T	$\frac{U_1}{I_{TH}}$	$\frac{U_{K3}}{100}$	$\frac{1}{k_T^2}$	$\frac{U_1}{I_{TH}}$	$\frac{U_{K3}}{100}$	$\frac{1}{k_T^2}$
ΔU_{B0}	$2\sqrt{2} U_2 \sin \gamma$		$\sqrt{2} U_2 \sin \gamma$		$\sqrt{6} U_{2\lambda} \sin \gamma$	
$\cos \varphi$	$\cos(\gamma/2)$					
γ	0,9		0,955		0,988	
x	$\gamma \cdot \cos(\gamma/2)$					
λ	$\pi + \gamma$		$2\pi/3 + \gamma$			
U_n	$\frac{\sqrt{2}}{(kT)^2 - 1} \cdot U_{d0}$ при $\gamma = 0$					

3 Режим управляемого выпрямителя ($\alpha > 0$)						
1	2	3	4	5	6	7
U_{d0}	$0,9 U_2$		$1,17 U_2$	$2,34 U_2$	$4,68 U_2$	$2,34 U_{2\lambda}$
$U_{d\lambda}$	$U_{d0} (\cos \alpha - A \frac{U_{кз}}{100} \cdot \frac{I_d}{I_{дн}}) - S_B \cdot E \cdot \Delta U_B$ или $U_{d0} (\cos \alpha - A \frac{U_{кз}}{100} \cdot k_3) - S_B \cdot E \cdot \Delta U_B$					
γ	$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{I_d \cdot x_a}{\sqrt{2} \cdot U_2}$		$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{I_d \cdot x_a}{\sqrt{6} \cdot U_2}$	$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2 \cdot I_d \cdot x_a}{\sqrt{6} \cdot U_2}$	$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{2 I_d \cdot x_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2\lambda}}$	$\cos \alpha - \cos(\alpha + \gamma) = \frac{I_d \cdot x_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2\lambda}}$
$\cos \varphi_i$	$\cos(\alpha + \gamma/2)$					
α	$\gamma \cdot \cos(\alpha + \gamma/2)$					
U_n	$\frac{\sqrt{2} \cdot U_{d0} \cdot \cos \alpha}{(kP)^2 - 1} \sqrt{1 + (kP)^2 \operatorname{tg}^2 \alpha}$ при $\gamma = 0$					
4.	Режим инвертирования					
$U_{н(β=0)}$	$0,9 U_{2н}$		$1,17 U_{2н}$	$2,34 U_{2н}$	$4,68 U_{2\lambda н}$	$2,34 U_{2\lambda н}$
$U_{нβ}$	$0,9 U_{2н} \cos \beta$		$1,17 U_{2н} \cos \beta$	$2,34 U_{2н} \cos \beta$	$4,68 U_{2\lambda н} \cos \beta$	$2,34 U_{2\lambda н} \cos \beta$
U_n	$U_{н0} + \Delta U_\gamma + S \cdot E \cdot \Delta U_B$; $U_{н0} (\cos \beta + A \frac{U_{кз}}{100} \cdot \frac{I_n}{I_{нн}}) + S_n \cdot E \cdot \Delta U_B$					
ΔU_γ	$\frac{2 I_n \cdot x_a}{\pi}$		$\frac{3 I_n \cdot x_a}{4 \pi}$	$\frac{3 I_n \cdot x_a}{\pi}$	$\frac{3 I_n \cdot x_a}{\pi}$	$\frac{3 \cdot I_n \cdot x_a}{4 \pi}$

1	2	3	4	5	6	7
γ	$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{I_n \cdot x_a}{\sqrt{2} \cdot U_{2н}}$		$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{I_n \cdot x_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2н}}$	$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{2 \cdot I_n \cdot x_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2н}}$	$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{2 I_d \cdot x_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2\lambda н}}$	$\cos(\beta - \gamma) - \cos \beta = \frac{I_d \cdot x_a}{\sqrt{6} \cdot U_{2\lambda н}}$
$\cos \varphi_i$	$\cos(\beta - \gamma/2)$					
α	$\gamma \cdot \cos(\beta - \gamma/2)$					
$U_{ор}$	$U_{н0(\beta=0)} (\cos \delta - A \frac{U_{кз}}{100} \cdot \frac{I_n}{I_{нн}}) - S_n \cdot E \cdot \Delta U_B$ или $U_{н0(\beta=0)} \cos \delta - \Delta U_\gamma - S_n \cdot E \cdot \Delta U_B$					
$I_{н1max}$	$\frac{100}{U_{кз} \cdot 2 \cdot A} \cdot I_{нн} \left[(\cos \delta - \cos \beta) - \frac{2 \cdot S_n \cdot E \cdot \Delta U_B}{U_{н0(\beta=0)}} \right]$					
$I_{н2max}$	$\frac{100}{U_{кз} \cdot A} \cdot I_{нн} \left[(\cos \delta - \frac{U_{сг} + S_n \cdot E \cdot \Delta U_B}{U_{н0(\beta=0)}}) \right]$					

- $U_{и}$ - среднее значение входного напряжения инвертора при угле опережения β и токе $I_{и}$, В;
- ΔU_f - среднее значение коммутационного падения напряжения, В;
- $U_{ст}$ - выпрямленное напряжение выпрямителя или входное напряжение инвертора при стабилизированной характеристике, В;
- U_n - действующее значение напряжения гармоники n -го порядка, В;
- $\Delta U_B, \Delta U_B'$ - средние падения напряжения в одном вентиле выпрямителя и инвертора, В;
- $I_{дк}$ - номинальный ток выпрямителя, А;
- I_2, I_1 - действующие значения фазных токов вентиляльной и сетевой обмоток, А;
- $I_a, I_{a\max}$ - среднее и максимальное значения тока вентиляльного плеча, А;
- $I_n, I_{1(1)}$ - действующие значения тока n -й и основной гармоник сетевой обмотки, А;
- $I_{ин}$ - номинальный ток инвертора, А;
- $I_{и1\max}$ - максимальный предельный ток инвертора при естественной внешней характеристике, А;
- $I_{и2\max}$ - максимальный предельный ток инвертора при горизонтальной стабилизированной внешней характеристике, А;
- S_2, S_4 - расчетные мощности вентиляльной и сетевой обмоток, кВА;
- $S_{1н}$ - номинальная мощность сетевой обмотки, кВА;
- $S_{тп}$ - типовая мощность трансформатора, кВА;
- $S_{кз}$ - мощность короткого замыкания на сборных шинах питающего напряжения, МВА;
- ρ - число пульсаций выпрямленного напряжения;
- n - номер высшей гармоники;
- f_c - частота питающей сети, Гц;
- f_n - частота гармоники n -го порядка, Гц;
- κ - натуральный ряд чисел;
- $\kappa_T = \frac{U_{10}}{U_2}$ - коэффициент трансформации преобразовательного трансформатора;
- x_a - индуктивное сопротивление фазы трансформатора и

- питающей сети, отнесенное к напряжению вентиля-
ной обмотки, Ом;
- x_T - индуктивное сопротивление преобразовательного
трансформатора, Ом;
- x_0 - индуктивное сопротивление питающей линии, Ом;
- γ - угол коммутации, °эл или (рад);
- α - угол задержки включения (регулирования) управ-
ляемого выпрямителя, °эл или (рад);
- β - угол опережения инвертора, °эл или (рад);
- δ - угол запаса, °эл или (рад);
- λ - время проводимости тока вентилем, °эл или (рад);
- A - коэффициент наклона внешней характеристики;
- $\cos \varphi_{(1)}$ - коэффициент сдвига основной гармоники тока
относительно напряжения;
- ν - коэффициент искажения тока сетевой обмотки;
- X - коэффициент мощности;
- K_3 - коэффициент загрузки;
- S - число последовательно включенных вентилях;
- e - число последовательно работающих плеч преоб-
разователя, шт.;
- Q - число параллельно включенных вентилях.

Приложение 3

Таблица 1

Основные параметры штировых вентилях с типовыми охладителями

Тип вентиля	Класс К	$U_0, В$	$R_A, \text{ Ом} \cdot 10^{-3}$	$R_T, \text{ }^\circ\text{C/Вт}$			$\Delta U_B, В$	$I_{uz}, \text{ кА}$	$I_{отм}, \text{ мА}$	Цена вентиля, руб.	Тип охладителя	Цена охладителя, руб.
				$V=0 \text{ м/с}$	$V=6 \text{ м/с}$	$V=12 \text{ м/с}$						
В3-200	3-16	1,16	0,11	1,23	0,48	0,41	0,8	3,85	10	4,8-12,2	0171-80	1,3
В3-250	3-16	1,16	0,88	1,2	0,45	0,38	0,8	4,4	10	5,2-14,5	0171-80	1,3
В-320	1,5-16	1,09	0,426	0,77	0,35	0,29	0,7	7,2	5	6,75-12,5	0А-016	2,9
Т3-200	6-22	1,2	0,103	0,8	0,31	0,27	0,8	3,3	50	12,1-28,7	0А-016	2,9
Т2-250	3-16	1,134	0,653	0,75	0,26	0,22	0,73	4,4	50	8,1-26,5	0А-016	2,9
Т14-320	3-16	1,05	0,55	0,8	0,35	0,29	0,75	7,7	30	8,9-30,4	0А-019	3,1
В1-200	6-12	1,12	0,7	1,23 0,51	0,48	0,41	0,7	6,0	3	6,3-8,8	0171-80 спец.	1,3 8,8
ВЛ-320	6-12	1,09	0,426	0,77	0,28	0,22	0,7	7,2	5	9,3-11,9	0А-016	2,9
ТЛ-200	4-10	0,9	0,9	1,28 0,57	0,53	0,46	0,75	4,5	20	21,6-41,8	0171-80 спец.	1,3 8,8
ТЛ-250	3-15	1,444	0,392	0,81	0,39	0,33	0,82	4,4	40	19,2-67,8	0А-016	2,9

Примечание. Для вентилях ВЛ-200, ТЛ-200 в числителе даны R_T при работе с охладителем 0171-80, в знаменателе - R_T при естественном воздушном охлаждении со специальным охлаждением.

Приложение 3

Таблица 2

Основные параметры таблеточных вентилях с типовыми охладителями

Тип вентиля	Класс К	$U_0, В$	$R_A, \text{ Ом} \cdot 10^{-3}$	$R_T, \text{ }^\circ\text{C/Вт}$			$\Delta U_B, В$	$I_{uz}, \text{ кА}$	$I_{отм}, \text{ мА}$	Цена вентиля, руб.	Тип охладителя	Цена охладителя, руб.
				$V=0 \text{ м/с}$	$V=6 \text{ м/с}$	$V=12 \text{ м/с}$						
В2-320	1,5-40	1,1	0,78	0,55	0,21	0,18	0,8	7,15	20	11,7-29,1	0А-026	8,8
В-500	1,5-38	1,22	0,58	0,31	0,12	0,1	0,9	9,9	30	18,3-47,7	0243-150	13,4
В-800	1,5-24	1,04	0,29	0,3	0,11	0,09	0,75	16,5	20	18,5-40,0	0243-150	13,4
Д143-630	10-40	1,0	0,65	0,3	0,11	0,09	0,9	11,0	50	22,4-59,5	0243-150	13,4
Д143-1000	4-16	0,9	0,26	0,3	0,11	0,09	0,065	20,0	75	17,8-41,8	0243-150	13,4
Д253-1600	4-20	1,0	0,12	0,3	0,102	0,092	0,65	30,0	100	41,8-135,0	0153-150	14,0
Т9-200	4-22	1,35	0,8	0,71	0,29	0,24	0,83	5,5	40	6,9-30,7	0А-020	4,2
Т9-250	4-16	1,16	0,88	0,71	0,29	0,24	0,8	6,1	40	14,7-23,4	0А-020	4,2
Т-320	1-14	1,3	0,78	0,56	0,21	0,16	0,9	5,5	40	13,1-29,8	0А-026	8,8
Т-500	1-16	1,3	0,5	0,31	0,12	0,098	0,9	7,7	50	17,9-38,2	0243-150	13,4
Т153-630	13-24	1,25	0,56	0,302	0,102	0,087	1,0	15,5	50	89,9-148,2	0153-150	14,0
Т153-800	10-18	1,15	0,34	0,302	0,102	0,087	0,9	17,5	50	72,4-114,2	0153-150	14,0
Т253-1000	10-18	1,1	0,25	0,301	0,101	0,085	0,8	22,0	70	99,8-161,2	0153-150	14,0
Т253-1250	4-12	1,0	0,14	0,301	0,101	0,085	0,8	28,5	70	67,6-156,2	0153-150	14,0
ДП23-320	4-14	0,9	0,63	0,87	0,358	0,236	0,9	6,0	25	14,0-26,7	0123-100	5,6
ДЛП33-500	4-14	1,05	0,5	0,567	0,196	0,157	0,76	8,0	25	16,1-33,9	0143-150	7,6

Приложение 4

Значение коэффициента формы тока вентиля

Коэффициент	Наименование схем		
	двухпульсовые	шестипульсовые (кроме простой 6-фазн)	двенадцатипульсовые
K_{Φ}	$\sqrt{2}$	$\sqrt{3}$	$\sqrt{3}$

Приложение 5

Характеристики сглаживающего реактора РВФД-6500/3250

Номинальный ток I_d, A	Индуктивность $L_d, мГ$	Активное сопротивление $R_d, Ом$	Индуктивное сопротивление $X_d, Ом$
3250	4,5	0,008	2,82
3250	11,0	0,016	6,28
3250	20,0	0,024	12,56
3250	25,0	0,032	15,7

Приложение 6

Шкала номинальных сопротивлений резисторов

$R \cdot 10^n, Ом,$ где $n = 0, 1, 2, \dots, 6$	1,0	1,1	1,2	1,3	1,5	1,6	1,8	2,0	2,2
	2,4	2,7	3,0	3,3	3,6	3,9	4,3	4,7	5,1
	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	9,1			

Приложение 7

Технические характеристики проволочных эмалированных резисторов

Тип резистора	R	Тип резистора	R
ПЭ-15	3,0 Ом ÷ 5,1 кОм	ПЭВ-10	1,8 Ом ÷ 10 кОм
ПЭ-20	2,4 " ÷ 5,1 "	ПЭВ-15	3,9 " ÷ 15 "
ПЭ-25	4,7 " ÷ 5,6 "	ПЭВ-20	4,7 " ÷ 20 "
ПЭ-50	1,0 " ÷ 16 "	ПЭВ-25	10 " ÷ 24 "
ПЭ-75	1,0 " ÷ 30 "	ПЭВ-30	10 " ÷ 30 "
ПЭ-150	1,0 " ÷ 51 "	ПЭВ-40	18 " ÷ 51 "
		ПЭВ-50	18 " ÷ 51 "
		ПЭВ-75	47 " ÷ 56 "
		ПЭВ-100	47 " ÷ 56 "

Примечание. Число в обозначении резистора указывает значение мощности рассеивания P_{max} .

Приложение 8

Технические характеристики металлобумажных конденсаторов

U_c ном, В	С, мкФ для конденсаторов типов		
	МБМ	МБЦ	МБП
500	0,025 ÷ 0,5	0,25 ÷ 4	0,25 ÷ 10
600	-	-	-
750	0,01 ÷ 0,25	0,25 ÷ 2	0,1 ÷ 10
1000	0,01 ÷ 0,1	0,25 ÷ 1,0	0,5 ÷ 10
1500	0,005 ÷ 0,1	-	0,25 ÷ 10,5

КОНТРОЛЬНЫЕ ВОПРОСЫ

1. Конструктивные отличия, характеристики, параметры обычных и лавинных диодов и тиристоров.
2. Конструктивные отличия штывевых и таблеточных диодов и тиристоров.
3. Предельные параметры диодов и тиристоров. Дайте определение каждому предельному параметру.
4. От каких величин зависит предельный ток вентиля? Как влияет скорость охлаждения на предельный ток?
5. Что показывает класс вентиля?
6. Расшифруйте условные обозначения: В-200-10; ВЛ-200-8; ТЗ-320.
7. Назовите расчетные проектные параметры трансформатора и дайте определение каждому из них.
8. Чем отличается номинальная мощность трансформатора от типовой?
9. Дайте определение среднему току I_a и максимальному обратному напряжению $U_{b\max}$ вентиляльного плеча. Для каких расчетов нужны эти величины?
10. Порядок расчета числа параллельно включенных вентилях a_1 , a_2 выпрямителя и инвертора. Объясните расчетные формулы.
11. Какой аварийный режим выпрямителя и инвертора выбирается для расчета a_2 ? Объясните расчетные формулы.
12. С какой целью в цепь инвертора включается дополнительный реактор индуктивностью L_d ?
13. Как влияет $S_{кв}$, $U_{кп}$, L_d на величину a_2 ?
14. Нарисуйте и объясните схему выравнивания тока между параллельными вентилями.
15. Из чего складывается сопротивление контура короткого замыкания выпрямителя и инвертора?
16. Порядок расчета класса вентиля и числа последовательно включенных вентилях.
17. Порядок расчета и выбора цепей R_ω , $R_b - C_b$, R_c . Объясните расчетные формулы.
18. Нарисуйте и объясните схему выравнивания распределения напряжения между последовательными вентилями.

19. Объясните силовую схему вентиляционного плеча.
20. Объясните теорию работы разработанного выпрямителя при $d = 0$ и $d > 0$.
21. Нарисуйте и объясните временные диаграммы $U_2, U_d, U_b, i_d, i_y, i_2, i_1$ при $d = 0$ и $d > 0$ и расчетном значении угла γ .
22. Дайте определение угла коммутации, приведите и объясните расчетную формулу для γ .
23. Как влияет угол регулирования d на γ ?
24. Как влияет угол коммутации на форму и величину выпрямленного напряжения U_d , тока вентиля, коэффициент мощности?
25. Покажите на схеме цепь тока нагрузки через вентили выпрямителя для любого момента на оси времени ϑ .
26. Покажите на схеме цепь тока коммутации при переходе тока с одного вентиля на другой.
27. Что называется внешней характеристикой выпрямителя? Приведите и объясните формулы внешней характеристики при $d = 0$ и $d > 0$.
28. Почему при $d = const$ внешняя характеристика падающая?
29. Как влияют $S_{кз}, U_{кТ}$ на угол коммутации и внешнюю характеристику выпрямителя?
30. Что называется коэффициентами мощности и полезного действия выпрямителя?
31. Приведите и объясните расчетные формулы для λ .
32. Назовите источник, вырабатывающий энергию, и потребитель при работе преобразователя в инверторном режиме.
33. Объясните теорию работы разработанного инвертора.
34. Нарисуйте и объясните временные диаграммы $U_2, U_u, i_y, i_u, i_2, i_1$, характеризующие работу инвертора.
35. Покажите на схеме цепь тока через вентили инвертора для любого момента на оси времени ϑ .
36. Почему при переводе в режим инвертирования напряжение вентиляльной обмотки повышается с $U_{2в}$ до $U_{2и}$?
37. Почему при переводе в режим инвертирования изменяется полярность преобразователя?
38. От каких моментов времени измеряется угол опережения β ?

39. Напишите соотношение между углами β , γ , δ , при выполнении которого сохраняется нормальная работа инвертора.

40. Какой из углов β , γ , δ может быть изменен системой управления, а какой зависит от нагрузки и конструкции тиристора?

41. Что называется входной и ограничительной характеристикой инвертора?

42. Почему внешняя характеристика выпрямителя $U_d = f(I_d)$ падающая, а входная характеристика инвертора $U_u = f(I_u)$ - возрастающая?

43. Приведите и объясните формулы внешней $U_u = f(I_u)$ и ограничительной $U_{огр} = f(I_u)$ характеристик.

44. Объясните физический смысл точки пересечения внешней и ограничительной характеристик.

45. Как рассчитать графически и аналитически предельный ток инвертора $I_{u1 \max}$, $I_{u2 \max}$ при естественной и стабилизированной входных (внешних) характеристиках инвертора?

46. Что называется опрокидыванием и прорывом инвертора? Перечислите причины, вызывающие эти аварийные режимы.

47. Коэффициенты мощности и полезного действия инвертора. Приведите и объясните расчетные формулы λ .

48. Как влияет угол β на γ , U_u , $U_{огр}$, λ ?

49. Как влияет $S_{кз}$, $U_{кз}$, β на предельные токи $I_{u1 \max}$, $I_{u2 \max}$?

50. Объясните программы и порядок расчета характеристик и параметров преобразователя на ЭВМ.

ЛИТЕРАТУРА

1. Засорин С.Н., Мацкевич В.А., Кучма К.Г. Электронная и преобразовательная техника. М., Транспорт, 1981, 320 с.
2. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. М., Высшая школа, 1984, 424 с.
3. Полупроводниковые выпрямители. /Под ред. Ф.Н.Ковалева, Г.П.Мостковой. М., Энергия, 1978, 448 с.
4. Соколов С.Д., Бей Ю.М., Гуральник Я.Д., Чаусов О.Г. Полупроводниковые преобразовательные агрегаты тяговых подстанций. М., Транспорт, 1979, 265 с.
5. Бей Ю.М. и др. Тяговые подстанции. М., Транспорт, 1986, 319 с.
6. Чебовский О.Г., Моисеев Л.Г., Недошвин Р.П. Силовые полупроводниковые приборы. Справочник. М., Энергия, 1985, 400 с.
7. Радиолюбительский справочник. Под ред. Р.М.Малинина. М., Энергия, 1976, с. 348-368.
8. Глух Е.М., Зеленов В.Е. Защита полупроводниковых преобразователей. М., Энергоиздат, 1982, с. 153.
9. Грунд Ф. Программирование на языке "Фортран IV". М., Мир, 1976, 184 с.
10. Энергетическая электроника (справочное пособие). Пер. с немецкого, под ред. Лабунцова В.А. М., Энергоатомиздат, 1987, 464 с.