

ПРАКТИЧНЕ ЗАНЯТТЯ №12

Тема. Розрахунок керованого випрямляча.

Мета: опрацювати методику розрахунку керованих випрямлячів та вибору і перевірки силових керованих вентилів.

Теоретичні відомості

Тиристорні перетворювачі - універсальні перетворювачі. При виконанні визначених умов один і той же керований перетворювач може працювати як перетворювач змінного струму в постійний - випрямлювальний режим, так і перетворювач постійного струму у змінний – інверторний режим. Незалежно від режиму роботи, схема з'єднання силових кіл тиристорного перетворювача залишається без змін. У наш час широко використовуються як однофазні так і багатозфазні схеми випрямлячів. Кожна зі схем володіє певними техніко-економічними показниками, які і визначають необхідність використання кожної із них. Найбільш розповсюдженими схеми тиристорних перетворювачів наведені на рис. 6.1.

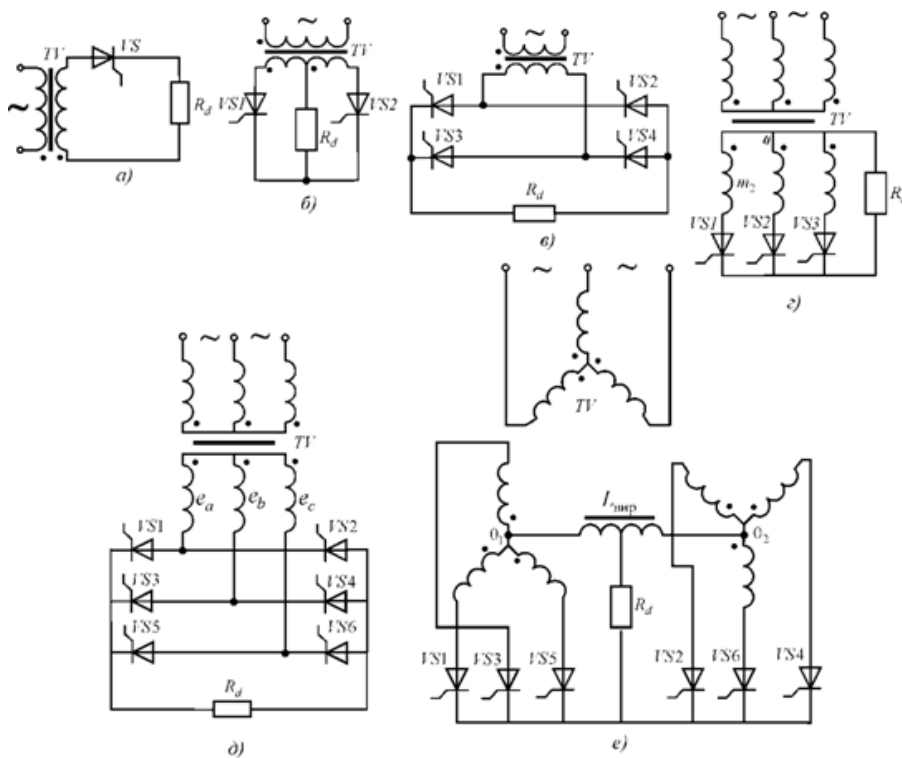


Рис. 6.1 – Схеми керованих випрямлячів на тиристорах:

- а) однофазна однопівперіодна; б) однофазна двопівперіодна з нульовою (середньою) точкою трансформатора; в) однофазна мостова; г) трифазна схема з нульовою точкою трансформатора (схема Міткевича); д) трифазна мостова схема (схема Ларіонова); е) трифазна нульова схема зі з'єднанням вторинної обмотки зигзаг.

Потрібно зазначити, що крім вказаних схем, в перетворювальній техніці використовуються і комбіновані схеми з послідовним або паралельним з'єднанням трифазних мостових схем, а також паралельне підключення трифазних нульових схем через зрівнювальні реактори.

Вибір конкретної схеми визначається потужністю споживача, необхідною якістю (пульсністю) випрямленої напруги, габаритом і вартістю згладжуючого фільтра.

Співвідношення між електричними величинами в тиристорному перетворювачі визначаються кількістю фаз, схемою з'єднання анодного трансформатора та схемою підключених до нього вентилів.

Будь-яку із наведених схем можна подати складеною з однієї або двох ідентичних вентиляльних груп, які з'єднані певним чином. Фазність m кожної вентиляльної групи визначається кількістю комутацій струму між вентилями одної групи за період живлячої напруги. Виходячи із цього схему Міцкевича і схему зигзаг потрібно вважати складеною з одної трифазної ($m=3$) групи, а схему Ларіонова – з двох трифазних груп ($m=6$), ввімкнених послідовно відносно навантаження. Кожну з двох однофазних двопівперіодних схем можна розглядати як складену з однієї двофазної вентиляльної групи ($m=2$), тільки в однофазній нульовій схемі комутуючі вентиля живляться від двох вторинних обмоток ($n=2$), а в мостовій схемі – від однієї вторинної обмотки ($n=1$). Нижче наведені співвідношення між електричними величинами для узагальненої схеми випрямлення для умови, коли індуктивний опір у колі випрямленого струму $X_d = \infty$. Ці співвідношення також справедливі і для реального значення індуктивності X_d , але при цьому випрямлений струм має бути безперервним і повинно виконуватися співвідношення: $X_d \geq (3 \div 4)R_d$ (R_d - активний опір навантаження), що часто має місце в більшості практичних випадків.

Таблиця 6.1 – Розрахункові коефіцієнти схем випрямлячів.

Коефіцієнти	1-фазна з середньою точкою тр-ра	1-фазна мостова	3-фазна нульова	3-фазна зигзаг з нулем	3-фазна мостова
$K_u = U_{do} / U_{2\phi}$	0,9	0,9	1,17	1,17	2,34
$K_{i.sp} = \frac{I_a}{I_d}$	1/2	1/2	1/3	1/3	1/3
$K_{i_0} = \frac{I_{a0}}{I_d}$	0,707	0,707	0,577	0,577	0,577
$K_{i_2} = I_2 / I_d$	0,707	1	0,577	0,577	0,816
$K_{i_1} = K_{mp} \cdot I_1 / I_d$	1	1	0,471	0,471	0,816

$Ku_{\max} = \frac{U_{3\phi_{\max}}}{U_{d0}}$	3,14	1,57	2,09	2,09	1,045
$K_{S2} = S_2/P_d$	1,57	1,11	1,48	1,71	1,045
$K_{S1} = S_1/P_d$	1,11	1,11	1,21	1,21	1,045
$K_S = S_m/P_d$	1,34	1,11	1,35	1,46	1,045
кількість фаз першої обмотки m_1	1	1	3	3	3
Фазність схеми m	2	2	3	3	3
Кратність пульсації m_n	2	2	3	3	6
кількість вторинних обмоток n	2	1	3	6	3
Тривалість протікання струму вентилів λ	π	π	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{2}{3}\pi$	$\frac{2}{3}\pi$
Кількість послідовних груп q	1	1	1	1	2

Таблиця 6.2 - Коефіцієнти схеми

Схема випрямляча	$K_x = \frac{qm}{2\pi}$	$K_R = q$	$A = \frac{K_x}{K_u \cdot K_{i1}}$	$v_0 = \frac{I_{I(1)}}{I}$
однофазна з середньою точкою трансформатора	0,318	1	0,35	0,9
однофазна мостова	0,318	1	0,35	0,9
трифазна нульова	0,478	1	0,87	0,826
трифазний зигзаг з нулем	0,478	1	0,87	0,826
трифазна мостова	0,955	2	0,5	0,955

де v_0 - коефіцієнт спотворень первинного струму.

Практична частина

Задача 6.1. Відповідно до заданого варіанту за даними таблиці 6.3 провести розрахунок параметрів і вибір елементів схеми силового кола неререверсивного тиристорного перетворювача для живлення якірного кола двигуна, а також розрахувати та побудувати основні характеристики перетворювача. При цьому потрібно враховувати, що момент навантаження двигуна є активним, тому можлива робота перетворювача в інверторному режимі.

Для цього необхідно:

1. На основі аналізу різних схем з'єднання вентиляльних перетворювачів пояснити і вибрати для заданої потужності двигуна схему силового кола нереверсивного тиристорного перетворювача.
2. Для вибраної схеми силового кола перетворювача за заданими параметрами двигуна розрахувати параметри анодного трансформатора і вибрати з довідникової літератури типовий трансформатор.
3. Визначити параметри тиристорів, вибрати їх із довідника та здійснити перевірку, визначивши вид їх охолодження. При необхідності визначити число вентилів, включених на паралельну або послідовну роботу.
4. Побудувати для перетворювача регульовальну характеристику $U_d=f(\alpha)$ для випрямлювального режиму роботи.
5. Нарисувати розраховану схему вентиляльного перетворювача.

Таблиця 6.3 - Варіанти завдань для виконання практичної роботи.

№ ва р.	Тип двигуна	P_n , кВт	U_n , В	I_n , А	N_n , об/хв	U_m , В
1	2	3	4	5	6	7
1	П80	17	110	187	750	380
2	П114	150	220	700	1500	380
3	П102	55	110	578	750	380
4	П32	4,5	110	48,5	3000	380
5	П110	100	220	511	1000	660
6	П151	40	110	384	600	380
7	П52	5,5	110	55	1500	380
8	П82	25	110	268	1000	380
9	П111	160	440	400	1500	660
10	П102	6	220	33,5	1500	380
11	П62	14	110	147	1500	380
12	П18	80	440	185	1355	660
13	П92	42	220	219	1000	380
14	П58	6,3	64	105	1500	380
15	П81	32	110	342	1500	380
16	П92	75	440	192	1500	660
17	П71	11	110	126	1000	380
18	П112	85	220	436	750	380
19	П111	160	220	809	1500	660
20	П112-2	19	220	63	1000	380
21	П153-5	4,5	110	52	750	380

22	П42	8	110	85	3000	380
23	П72	25	220	132	1500	380
24	П102	125	440	316	1000	660
25	П171-5	90	220	429	500	660
26	П91	55	220	287	1500	380
27	П108	95	440	240	1000	660
28	П82	42	440	107	1500	660
29	П41	6	110	68,5	3000	380
30	П81	32	220	166	1500	660
31	П61	11	220	60	1500	660
32	П81-1	19	110	210	1000	220
33	П101	100	440	256	1500	660
34	П91	55	440	143	1500	660
35	П153-8	40	115	384	600	660

У таблиці 6.3 прийняті такі позначення:

P_n , кВт – номінальна потужність двигуна;

U_n , В – номінальна потужність електродвигуна постійного струму;

I_n , А – номінальний струм двигуна;

n_n , об/хв. – номінальна швидкість обертання ротора двигуна;

U_m , В – напруга мережі живлення електродвигуна.

Методичні вказівки до розв'язування задачі

1. Порівняльна оцінка і вибір схем тиристорних перетворювачів.

Вибір схеми з'єднання трансформатора і вентилів заснований на порівняльній оцінці техніко-економічних показників різних схем перетворювачів. Він полягає у варіантному порівнянні з врахуванням вимог, що пред'являються до установки, її потужності, величини випрямленої напруги і напруги живлячої мережі, а також з урахуванням можливості використання стандартних анодних трансформаторів, типу вентилів і т.п.

Порівняльна оцінка різних схем випрямлення здійснюється за такими показниками:

1. Режим роботи трансформатора і його відносна типова потужність, що характеризується коефіцієнтом підвищення розрахункової потужності.
2. Ефективність використання вентилів за напругою та струмом.
3. Гармонійний склад випрямленої напруги.
4. Вплив перетворювача на живлячу мережу.

Перед тим, як здійснити аналіз і оцінку різних тиристорних перетворювачів, слід зауважити, що вибір схеми перетворювача, в першу чергу, полягає у виборі кількості числа фаз вторинної обмотки анодного трансформатора.

При бажанні отримати мінімальні пульсації випрямленої напруги необхідно збільшувати кількість фаз вторинної обмотки. В цьому випадку можна вимкнути зі схеми згладжуючий катодний дросель, або звести його габарити до мінімуму. Збільшення кількості фаз вторинної обмотки покращує гармонійний склад первинного струму анодного трансформатора і тим самим зменшує вплив перетворювача на живлячу мережу.

Від кількості фаз вторинної обмотки і схеми підключення вентилів залежить ступінь використання обмоток трансформатора, його габарити, вага, а також ступінь використання і габарити вентилів.

Ступінь використання обмоток і трансформатора в цілому характеризується коефіцієнтами підвищення розрахункових потужностей, в якості яких виступають схемні коефіцієнти K_{s1} , K_{s2} , K_s (наведені в таблиці 6.1). Із таблиці 6.1 видно, що найефективніше використовуються обмотки трансформатора в тих схемах, у яких по вторинним обмоткам протікає струм в обидва півперіоди.

Ефективність використання вентилів за напругою та струмом оцінюється за величиною максимального значення зворотної напруги, що прикладається до вентилів у даній схемі, і по величині середнього та діючого значення струмів через вентилі, а також їх кількістю, необхідною для отримання заданого значення струму I_d .

Вентилі використовуються ефективніше, якщо для забезпечення заданих значень випрямленої напруги і струму необхідна менша кількість вентилів при менших значеннях допустимого прямого струму і зворотної напруги.

Гармонійний склад випрямленої напруги і струму характеризується кратністю пульсацій порівняно з частотою живлячої мережі, наведеної в таблиці 6.2, у вигляді параметра m_n .

Зі збільшенням кратності пульсації порядок вищих гармонік, що наявні у випрямленій напрузі і струмі зростає, а їх амплітуда зменшується.

Вплив перетворювачів на живлячу мережу оцінюється за гармонійним складом первинного струму анодного трансформатора і може бути охарактеризований коефіцієнтом спотворень первинного струму v_0 , який наведений для різних схем у табл. 6.2.

Якщо порівняти між собою однофазні схеми, то з точки зору використання трансформатора вигіднішою є мостова схема, ніж нульова ($K_{SM}=1,11$, $K_{SN}=1,34$). Використання вентилів за струмом однакове для обох схем, але за напругою вентилі використовуються краще в мостовій схемі, оскільки зворотна напруга у двічі менша, але використана у двічі більша кількість вентилів. Тому у перетворювачах з низькою випрямленою напругою доцільно використовувати

однофазну нульову схему. За пульсаціями випрямленої напруги обидві схеми однакові.

Хоча однофазні схеми мають доволі непогане використання трансформатора, але значні пульсації випрямленої напруги і струму, а також сильний вплив на живлячу мережу обмежують їх використання для перетворювачів на рівні, не вищому декількох кіловат для живлення обмоток збудження машин, де пульсації не відіграють суттєвої ролі. Враховуючи це, використання однофазних схем доцільне для потужностей приблизно до 10кВт.

Багатофазні схеми випрямлення мають ряд переваг перед однофазними:

- симетричне навантаження живлячої мережі;
- менші споживання первинного струму ($\nu_0 \rightarrow 1$);
- менші пульсації випрямленої напруги і, відповідно, необхідний менший габарит згладжуючого дроселя;
- добре використання трансформатора і вентилів.

Серед багатофазних схем найпростіша є схема Міткевича і схема зигзаг. При їх порівнянні слід враховувати таке: за використанням вентилів, за пульсаціями випрямленої напруги і за впливом на живлячу мережу обидві схеми однакові. Використання ж трансформатора, як бачимо з таблиці 6.1, краще в схемі Міткевича. Але потрібно врахувати, що в схемі Міткевича існує постійний напрямлений потік вимушеного намагнічування трансформатора і, як результат, для запобігання насичення сердечника трансформатора штучно збільшують габарити та вагу його. Тому дійсний коефіцієнт підвищення розрахункової потужності на 20-30% вище вказаного в таблиці 6.1. У схемі зигзаг у порівнянні з нульовою відсутній потік вимушеного підмагнічування, але вона потребує подвійного комплекту вторинних обмоток, за рахунок чого збільшується габарит трансформатора.

До недоліків трифазних нульових схем належать: значні пульсації випрямленої напруги, значні діючі значення анодних струмів, великі спотворення первинних струмів.

Враховуючи це, використання трифазних нульових схем доцільне для потужностей приблизно від 10 до 50 кВт, при більших потужностях 50кВт – трифазну мостову схему.

Найдосконалішою з точки зору використання трансформатора і вентилів є трифазна мостова схема (Ларіонова). У порівнянні з нульовими схемами, мостова схема має суттєві переваги: меншу у двічі зворотну напругу на вентилях, менший нахил зовнішньої характеристики, дуже добре використання і просте виконання трансформатора; менші пульсації випрямленої напруги, значно менше значення ерс вторинної обмотки трансформатора, можливість використання в безтрансформаторному виконанні.

Поряд із перевагами схема Ларіонова має такі недоліки: необхідність подвійного комплекту вентилів, погане використання вентилів за струмом, так як середнє та діюче значення струму через вентиль такі ж самі, як і в трифазних нульових схемах, а кількість вентилів подвійна, зниження ККД внаслідок подвійного падіння напруги на вентилях (струм проводять послідовно завжди два вентиля). Проте, точно вказати сфери використання цієї або іншої схеми перетворювача неможливо, це вирішується тільки шляхом техніко-економічних порівнянь варіантів для конкретних умов.

Для правильного вибору стандартного обладнання і проектування нового виникає необхідність у розрахунку основних необхідних параметрів елементів силового кола тиристорного перетворювача. Для нереверсивних перетворювачів до таких елементів належать анодний трансформатор, вентиля і згладжуючий (катодний) реактор.

Розрахунок параметрів схеми живлення здійснюється залежно від значення струму навантаження I_d і забезпечення необхідної величини випрямленої напруги U_d .

Перед тим, як розпочати розрахунок параметрів елементів схеми, необхідно визначити розрахункові значення I_d , U_d . Вибір цих елементів залежить від характеру навантаження. У випадку роботи перетворювача на якір двигуна в якості розрахункових величин потрібно приймати номінальні значення напруги і струму двигуна, тобто:

$$U_d = U_n, \quad I_d = I_n. \quad (6.2)$$

2. Розрахунок параметрів і вибір анодного трансформатора

Анодний трансформатор вибирається за потужністю і за напругою вторинної і первинної обмоток.

Розрахункова потужність вторинної і первинної обмоток трансформатора:

$$S_2 = Ks_2 \cdot P_d \quad (6.3)$$

$$S_1 = Ks_1 \cdot P_d \quad (6.4)$$

$$P_d = U_d \cdot I_d, \quad (6.5)$$

де P_d - середнє значення випрямленої потужності.

Типова потужність анодного трансформатора:

$$S_m = Ks \cdot P_d, \quad (6.6)$$

де Ks_1 , Ks_2 , Ks - коефіцієнти схеми (табл. 6.1)

Діюче значення струму у вторинних обмотках трансформатора дорівнює:

$$I_2 = Ki_2 \cdot I_d, \quad (6.7)$$

де Ki_2 – коефіцієнт схеми (табл. 6.21).

Мінімальне значення вторинної фазної напруги:

$$U_{2\phi} = K_3 \frac{U_n + \Delta U_a + (1,1 \dots 1,2) K_R \cdot R_{mp} \cdot I_n}{K_u \left(1 - \frac{\Delta U \%}{100}\right) \cos \alpha_{\min} - \frac{K_x \cdot U_{\kappa \%}}{K i_1} \cdot \frac{U_{\kappa \%}}{100}}, B, \quad (6.8)$$

де $K_3 = (1,05 \dots 1,1)$ – коефіцієнт запасу, що враховує можливу несиметрію кутів відкривання тиристорів по фазах і дає запас напруги для забезпечення номінальної швидкості двигуна в системі автоматичного регулювання;

ΔU_a – падіння напруги на тиристорах, яке приймається попередньо рівним $1B$ для нульових схем і $2B$ для мостових схем;

$K_u, K_x, K_R, K i_1, K s_1, m_1$ – коефіцієнти, що приймаються з таблиць 6.1, 6.2 для вибраної схеми випрямляча;

$\Delta U \%$ – допустиме максимальне падіння напруги, для розрахунку можна прийняти $\Delta U \% = (1 \dots 2,5) \%$;

$U_{\kappa \%} = (3 \dots 12) \%$ – напруга КЗ трансформатора, величина якої може бути попередньо взята з каталогу для трансформатора, потужність якого визначається за виразом (6.6); нижня межа стосується трансформаторів потужністю декілька десятків kVA , а верхня – декілька тисяч kVA ;

α_{\min} – мінімальне значення кута регулювання, яке для нереверсивної схеми слід приймати рівним 0 ($\cos \alpha_{\min} = 1$);

R_{mp} – активний опір обмотки трансформатора:

$$R_{mp} = \frac{1,1 K s_1 \cdot U_n \cdot \Delta P_M \%}{m_1 K i_1^2 \cdot I_n \cdot 100}, \text{ Ом} \quad (6.9)$$

де $\Delta P_M \% = (1 \div 3) \%$ – втрати в міді трансформатора. Нижня межа стосується потужних, а верхня – малопотужних трансформаторів. Значення $\Delta P_M \%$ приймається по каталогу для трансформатора потужність якого визначена за формулою (6.6).

Діюче значення первинного фазного струму трансформатора I_1 визначається за формулою:

$$I_1 = \frac{1}{K_{mp}} \cdot K i_1 I_d \quad (6.10)$$

де $K_{mp} = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}} = \frac{U_{1л}}{U_{2л}}$ – коефіцієнт трансформації анодного трансформатора.

$U_{1\phi}, U_{1л}$ – відповідно діючі значення фазної та лінійної напруги живлячої мережі.

X_{mp} – приведений до первинної обмотки індуктивний опір однієї фази трансформатора:

$$X_{mp} = \frac{U_{1н}}{K_{mp}^2 \cdot I_{1н}} \cdot \frac{U_{\kappa \%}}{100} \quad (6.11)$$

де $U_{\kappa}\%=(3\div 12)\%$ – напруга короткого замикання трансформатора, нижня межа якої стосується трансформаторів, потужністю декілька десятків kVA .

У тих випадках, коли розрахункове значення U_2 , що визначається за (6.8) близьке до значення відповідної напруги мережі живлення, але дещо менше останньої, може бути використаний безтрансформаторний варіант мостової схеми (в установках не вище 100кВт). У цьому випадку анодний трансформатор відсутній і випрямлювальний міст під'єднується до живильної мережі. При живленні перетворювачів від потужних джерел з метою обмеження струмів КЗ і зменшення впливу перетворювача на мережу між мережею живлення і випрямлювальним мостом у фази вмикаються струмообмежуючі реактори (один для однофазної, три для трифазної схеми).

Необхідна величина індуктивного опору цього реактора X_p повинна бути такою ж, як у силового трансформатора, який потрібно було б встановити для заданої потужності перетворювача.

Тому величина X_p може бути визначена за формулою:

$$X_p = X_{mp} = \frac{U_2}{K i_1 I_n} \cdot \frac{U_{\kappa} \%}{100}, \text{ Ом} \quad (6.12)$$

приймавши коефіцієнти трансформації $K_{mp}=1$.

У подальших розрахунках враховується X_p замість X_{mp} .

Струмообмежуючі реактори для того, щоб вони не насичувалися струмами КЗ, виконуються повітряними (без залізного сердечника).

Вибираються вони за умов:

$$L_{p.n} \geq L_p = \frac{X_p}{\omega}; \quad (6.13)$$

$$I_{p.n} \geq I_{\alpha} \quad (6.14)$$

3. Розрахунок параметрів і вибір тиристорів

Тиристори вибираються за середнім значенням анодного струму, зворотною напругою і перевіряються на перевантажувальну здатність у відповідності з нормами, що наводяться у довідниках. В останньому випадку максимальне значення струму через вентиль на протязі певного часу має бути не більше допустимого.

3.1. Попередній вибір тиристорів

Середнє значення струму через вентиль:

$$I_a = \frac{I_n}{m} = K i_{cp} \cdot I_n, A \quad (6.15)$$

Величина максимальної зворотної напруги на тиристорі визначається з врахуванням коефіцієнту запасу:

$$U_{зв_{max}} = K_{зн} K u_{max} E_{do}, B \quad (6.16)$$

де $K_{зн} = 1,25$ – коефіцієнт запасу;

$U_{do}=E_{do}=K_u U_2$ – середнє значення випрямленої *e.p.c* за $\alpha = 0$.

За значеннями, отриманими з (6.15), (6.16) з довідника вибираємо тиристор за умови:

$$I_a \leq I_{an} \quad , \quad (6.17)$$

$$U_{зв,max} \leq U_{зв,дон} \quad (6.18)$$

При визначенні номінального значення струму вентиля потрібно врахувати умови його охолодження (природне, штучне) і схему в якій він працює.

Якщо не можна підібрати вентиль на необхідний номінальний струм, то необхідно використати паралельне з'єднання вентилів з меншим номінальним струмом, величина якого визначається за виразом:

$$n_{пар} = \frac{I_a}{I_{aH}} + \Delta n \quad (6.19)$$

де $n_{пар}$ – число паралельно ввімкнених вентилів;

I_{aH} - номінальний струм вибраного з каталогу вентиля;

Δn - доданок до ближнього цілого числа.

Після вибору кількості паралельно підключених керованих вентилів слід перевірити умову:

$$I_{an} \geq \frac{I_a}{n_{пар} \cdot K_{сни}}, A \quad (6.20)$$

де $K_{сни} = 0,7 + \frac{0,3}{n_{пар}}$ - коефіцієнт зниження навантаження для струму.

Якщо умова (6.20) для вибраного тиристора не виконуються, треба вибрати потужніший тиристор, або збільшити їх кількість на один.

Для рівномірного розподілу прямого струму потрібно послідовно з кожним тиристором увімкнути додатковий резистор (долі Ома, на порядок менший за прямий диференційний опір тиристора, рис. 1.2).

Величина допустимої зворотної напруги визначається класом тиристора, тобто $U_{зв,дон} = U_{кл}$. Якщо у довіднику не має тиристора необхідного класу, то можна використати послідовне з'єднання вентилів нижчого класу. Тоді допустима величина напруги $U_{кл}$ визначається за виразом:

$$n_{посл.} = \frac{U_{зв,дон}}{U_{зв,донH}} + \Delta n \quad (6.21)$$

де $n_{посл.}$ – число послідовно з'єднаних вентилів;

$U_{зв,донH}$ - максимальна зворотна напруга вибраного з каталогу вентиля.

Після вибору кількості послідовно підключених керованих вентилів слід перевірити умову:

$$U_{кл} \geq \frac{U_{зв,дон}}{K_{сн.и} \cdot n_{посл.}}, B \quad (6.22)$$

де $K_{сн.и} = 0,8 + \frac{0,2}{n_{нар}}$ - коефіцієнт зниження допустимої напруги.

Якщо умова (6.22) для вибраного тиристора не виконуються, треба вибрати потужніший тиристор, або збільшити їх кількість на один.

За виконання всіх наведених вище умов із довідника вибирається тип тиристора і записуються усі його параметри.

3.2 Перевірка вибраних тиристорів

Перевірку тиристорів за допустимою температурою нагріву здійснюємо залежно від втрат у тиристорі при нормальному робочому режимі перетворювача і, за необхідності, при технологічних і динамічних перевантаженнях.

Для робочого режиму втрати у вентилі визначаються за формулою:

$$\Delta P_a = U_o I_a + K_{\phi c}^2 R_g I_a^2, \text{ Вт} \quad (6.23)$$

де U_o – порогова напруга;

R_g – динамічний опір тиристора;

$K_{\phi c}$ – коефіцієнт форми струму, рівний відношенню діючого і середнього значень струму через вентиль.

Для прямокутної форми струму ($X_d \rightarrow \infty$):

$$K_{\phi c} = \sqrt{\frac{2\pi}{\lambda}}, \quad (6.24)$$

λ - кут провідності вентиля в радіанах, який залежить від схеми перетворювача (таблиця 6.1).

Якщо величини U_o , R_g в довіднику не наведені, то вони визначаються за наближеними формулами:

$$U_o \approx (1,35 \dots 1,45) \Delta U_{ан}, \text{ В} \quad (6.25)$$

$$R_g \approx \frac{(0,2 \dots 0,3) \Delta U_{ан}}{I_{ан}}, \text{ Ом} \quad (6.26)$$

де $\Delta U_{ан}$ – класифікаційне падіння напруги на відкритому вентилі, (приймається з довідника).

$I_{ан}$ - номінальний граничний струм тиристора в класифікаційній схемі, (приймається з довідника).

Температура нагріву кристалу вентиля при тривалому режимі роботи визначається за виразом:

$$Q_n = \Delta P_a R_T + Q_c, \text{ } ^\circ\text{С} \quad (6.27)$$

де R_T – загальний тепловий опір вентиля з охолоджувачем для заданих умов охолодження, $^\circ\text{С} / \text{Вт}$, (приймається з довідника);

Q_c - температура робочого середовища вентиля, для розрахунків можна прийняти $+25^\circ\text{С}$.

Підставляючи в (6.27) різні значення R_T , що відповідають природному і штучному (примусовому) охолодженню, отримуємо різні температури нагріву вентиля.

Після порівняння варіантів обирається той, для якого виконується умова:

$$Q_n \leq Q_{\text{доп}}, \quad (Q_{\text{доп Ge}}=75^\circ\text{C}, Q_{\text{доп Si}} = 140^\circ\text{C}) \quad (6.28)$$

Якщо температура середовища близька до стандартної ($+25^\circ\text{C}$) то для перевірки теплового режиму достатньо порівняти між собою дійсні втрати у вентилі з його номінальними втратами для різних умов охолодження. Останні визначаються за (6.23), якщо прийняти: $I_a = I_{an}$, $K_{\phi c} = 1,57$ (відповідає синусоїдній формі струму в класифікаційній схемі).

Коли робочий струм вентиля при тривалому режимі відповідає його гранично допустимому значенню, то технологічні перевантаження недопустимі і необхідно збільшити інтенсивність його охолодження, або взяти потужніший тиристор.

3.4. Побудова регулювальної характеристики

Регулювальна характеристика, що являє собою залежність середнього значення випрямленої ерс $U_{d\alpha}$ (для випрямляча) або середнього значення проти-е.р.с. $U_{d\beta}$ (для інвертора) від кута керування α (β).

При зміні кута α від 0° до 90° отримуємо характеристику для випрямленого режиму, а при зміні кута α від 90° до 180° - для інверторного режиму. В останньому випадку е.р.с. змінює знак і стає проти-е.р.с. інвертора (відкладається з протилежним знаком щодо $U_{d\alpha}$).

Регулювальна характеристика може бути побудована за рівнянням:

- для однофазних схем ($\alpha_{cp} = 180^\circ$):

$$U_{d\alpha} = K_u \cdot U_2 \cdot \cos \alpha = U_{d0} \cdot \cos \alpha \quad (6.29)$$

- для трифазної нульової схеми маємо два режими роботи:

- режим неперервних струмів, коли $0 \leq \alpha \leq 30^\circ$ (кут регулювання α у трифазних випрямлячах прийнято відраховувати від точки дійсного відкривання вентиля);

- режим перервних струмів $30^\circ \leq \alpha \leq 150^\circ$.

Середнє значення випрямленої напруги для цих двох режимів визначаються виразами:

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cos \alpha, \quad \text{при } (0 \leq \alpha \leq 30^\circ),$$

$$U_{d\alpha} = \frac{U_{d0}}{\sqrt{3}} \left[1 + \sin(60^\circ - \alpha) \right], \quad \text{при } (30^\circ < \alpha < 150^\circ)$$

За $\alpha_{cp} = 5\pi/6$ ($\alpha_{cp} = 150^\circ$) випрямлена напруга рівна 0.

- для трифазної мостової схеми маємо два режими роботи:

- режим неперервних струмів, коли $0 \leq \alpha \leq 60^\circ$ (кут регулювання α у трифазних випрямлячах прийнято відраховувати від точки дійсного відкриття вентиля);

- режим перервних струмів $60^\circ \leq \alpha \leq 120^\circ$.

Середнє значення випрямленої напруги для цих двох режимів визначаються виразами:

$$U_{d\alpha} = U_{d0} \cos \alpha, \text{ при } (0 \leq \alpha \leq 60^\circ),$$

$$U_{d\alpha} = U_{d0} [1 + \sin(30^\circ - \alpha)], \text{ при } (60^\circ < \alpha < 120^\circ).$$

За $\alpha_{ep} = 2\pi/3$ ($\alpha_{ep} = 120^\circ$) випрямлена напруга рівна 0.

Для зручності обчислень розрахункові дані заносяться до таблиці 6.4

Таблиця 6.4 – Дані для побудови регулювальної характеристики

α , град.	0	15	30	45	60	α_{ep}
$U_{d\alpha}$, В									

За отриманими даними у таблиці 6.4 будується регулювальна характеристика випрямляча $U_{d\alpha} = f(\alpha)$.

За отриманою регулювальною характеристикою визначаємо значення кута керування α_d при відомому значенні напруги U_d .

Таблиця Д9 – Основні параметри тиристорів типу Т10

Параметр	Позначення	Тиристор						Умови режиму
		Т10-10	Т10-16	Т10-25	Т10-40	Т10-63	Т10-80	
Зворотна напруга, В (для всіх тиристорів)	$U_{зв.д}$	50; 100; 200; 300; 400; 500; 600; 700; 800; 900; 1000; 1100; 1200						-
Граничний струм (середнє значення), А	I_z	10	16	25	40	63	80	Штучне охолодження температура корпусу 85°C
Граничний струм з типовим охолоджувачем (середнє значення), А	I_{z0}	8	10	12	14	20	25	Охолодження природне повітряне; температура оточуючого середовища 25°C
Ударний струм, А	$I_{yд}$	240	240	600	960	1300	1500	Тривалість імпульсу струму 10 мс
Порогова напруга, В	U_0	1,64	1,44	1,26	1,16	1,094	1,02	-
Динамічний опір у відкритому стані, мОм	R_d	10	7	6,4	4,4	1,8	1,7	-
Відмикаючий струм керування, не більше, А	I_k	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	За прямої напруги на тиристорі
Відмикаюча напруга керування, не більше, В	U_k	3	3	3	4	4	4	-
Загальний встановлений тепловий опір, °С/Вт	R_T	5,9	5,3	4,9	3,69	3,5	3,4	З типовим охолоджувачем за природного повітряного охолодження