

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет «Запорізька
політехніка»

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до курсового проєкту з дисципліни
«Основи силової електроніка»
для студентів спеціальності
141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка»
усіх форм навчання

Методичні вказівки до курсового проєкту з дисципліни «Основи силової електроніки» для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» усіх форм навчання / Укл.: М.Л. Антонов, М.В. Антонова – Запоріжжя: НУ «Запорізька політехніка»

Укладачі: М.Л. Антонов, канд. техн. наук,
М.В. Антонова

Рецензент: П.Д. Андрієнко, докт. техн. наук,
професор

Відповідальний за випуск: Р.Е. Мохнач

Затверджено
на засіданні кафедри
«Електричні та електронні апарати»
Протокол № 5
від « 03 » 11 2022 р.

Рекомендовано до видання
НМК Електротехнічного факультету
Протокол № 4
від « 17 » 11 2022 р.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
1 ВИХІДНІ ДАНІ	8
2 ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	9
3 ВИБІР СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	10
3.1 СПРОЩЕНИЙ ВИБІР ВТОРИЧНОЇ НАПРУГИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	10
3.2 РОЗРАХУНОК ПОТУЖНОСТІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	10
3.3 ВИБІР НОМІНАЛЬНИХ ЗНАЧЕНЬ ПОТУЖНОСТІ Й ВТОРИННОЇ НАПРУГИ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА	11
3.4 РОЗРАХУНОК АКТИВНОГО ОПОРУ Й НОМІНАЛЬНОГО СТРУМУ НАВАНТАЖЕННЯ.....	11
3.5 ПЕРЕВІРКА ПРАВИЛЬНОСТІ ВИБОРУ ПОТУЖНОСТІ СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА, ВИХОДЯЧИ ІЗ ПРИПУСТИМОГО ЗАВАНТАЖЕННЯ ЙОГО ПЕРВИННОЇ ОБМОТКИ СТРУМАМИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНОЇ ФОРМИ (ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА)	12
4 ВИБІР АВТОМАТИЧНОГО ВИМИКАЧА	16
4.1 УМОВА ВИБОРУ ПО НАПРУЗІ.....	16
4.2 УМОВА ВИБОРУ ПО СТРУМУ	16
4.3 ВИБІР ТИПУ АВТОМАТИЧНОГО ВИМИКАЧА	16
5 РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	18
5.1 РОЗРАХУНОК І ВИБІР ТИРИСТОРІВ КЕРОВАНОГО ВИПРЯМЛЯЧА	18
5.2 РОЗРАХУНОК І ВИБІР СТРУМООБМЕЖУЮЧОГО РЕАКТОРА	20
5.3 РОЗРАХУНОК ЕКВІВАЛЕНТНОЇ (СУМАРНОЇ) І ІНДУКТИВНОСТІ ФАЗИ ЗМІННОГО СТРУМУ ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	23
5.4 ПЕРЕВІРКА ДОСТАТНОСТІ СТРУМОВОЇ КОМУТАЦІЙНОЇ ЗДАТНОСТІ АВТОМАТИЧНОГО ВИМИКАЧА ПРИ ТРИФАЗНОМУ КОРОТКОМУ	

ЗАМИКАННІ НА ВХОДІ ТП.....	23
5.5 РОЗРАХУНОК І ВИБІР РЕАКТОРА, ЩО ЗГЛАДЖУЄ	24
6 РОЗРАХУНОК І ПОБУДОВА СТАТИЧНОЇ, РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА	33
7 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ	38
7.1 РОЗРАХУНОК ККД ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	38
7.2 РОЗРАХУНОК ВХІДНОГО КОЕФІЦІЕНТА ПОТУЖНОСТІ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	39
8 РОЗРАХУНОК ЗАХИСНИХ РС- ЛАНЦЮГІВ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА.....	42
8.1 РОЗРАХУНОК РС-ЛАНЦЮГІВ ЗАБЕЗПЕЧУЮЧИХ ЗАХИСТ ТП ВІД КОМУТАЦІЙНИХ ПЕРЕНАПРУГ.....	42
8.2 РОЗРАХУНОК РС-ЛАНЦЮГІВ, ЩО ЗАБЕЗПЕЧУЮТЬ ЗАХИСТ ТП, ВІД РОБОЧИХ ПЕРЕНАПРУГ	47
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ	50
ДОДАТОК А.....	51

ВСТУП

Виконання курсової проєкту "Тиристорний перетворювач постійного струму" базується на застосуванні знань, отриманих раніше студентами при вивченні дисциплін "Електроніка та мікросхемотехніка" та "Теоретичні основи електротехніки".

Мета курсового проєкту – набуття інженерних навичок проєктування тиристорних перетворювачів постійного струму. Зазначені перетворювачі використовуються при створенні сучасного автоматизованого регульованого електропривода постійного струму й знаходять широке застосування в різних галузях промисловості (металургія, машинобудування та ін.).

Курсовий проєкт містить у собі:

- розрахунок силових елементів тиристорного перетворювача постійного струму;
- вибір силового трансформатора, автоматичногоС вимикача й реакторного устаткування;
- розрахунок захисних пристроїв (від короткого замикання та перенапруг) для тиристорного перетворювача;
- побудову статичної передаточної характеристики й зовнішньої регульовальної характеристики тиристорного перетворювача;
- розрахунок енергетичних показників (коефіцієнта корисної дії й вхідного коефіцієнта потужності) тиристорного перетворювача постійного струму;
- побудову часових діаграм, що ілюструють роботу тиристорного перетворювача постійного струму.

Варіанти завдань на проєктування тиристорних перетворювачів наведені в таблиці А.1.

Примітка до завдань по курсовому проєкту

1) Види розрахункових в курсовому проєкту схем тиристорних перетворювачів постійного струму і їхні умовні позначки (ОМС, ТНС, ТМС, ДПС, НТМС) показані в таблиці А2.

2) Умовна позначка вихідних параметрів режиму перетворювача:

P_H — номінальна потужність навантаження, кВт;

U_H — номінальна напруга на навантаженні, В;

$I_{дн}$ номінальний струм навантаження, А;

L_H - індуктивність навантаження, мГн.

3) Характер навантаження – активно-індуктивний.

4) Максимальне значення струму навантаження

дорівнює двукратному:

$$I_{d \max} / I_{дн} = 2$$

5) Коливання напруги живлячої мережі: у межах від 0,9 до 1,1 від номінальної напруги живлячої мережі.

6) Заданий коефіцієнт пульсації струму навантаження, що відповідає номінальному режиму:

$$\xi = I_{(1)M} I_{дн}$$

прийняти рівним (залежно від типу схеми тиристорного перетворювача і його потужності) значенню, зазначеному в таблиці А 3 (де $I_{(1)M}$ - амплітудне значення найбільшої (першої) гармоніки струму в складі струму навантаження.

- форма опорної напруги СІФК (з амплітудою $U_{оп \max}$, рівної 10В): лінійна (для непарних варіантів завдання);

- косинусоїдальна (для парних варіантів завдання).

7) Діапазон зміни кутів керування α тиристорного перетворювача: $\alpha = (0-165)$ ел. град. Значення кута керування, що відповідає номінальному режиму роботи: $\alpha_H = 25$ ел. град.

8) Застосувати наступний вид охолодження тиристорів:

- природне повітряне (при $P_H \leq 30$ кВт);

- примусове повітряне (при $P_H > 30$ кВт).

9) Курсовий проєкт оформлюється у вигляді пояснювальної записки до курсового проєкту й містить: вступ,

вихідні дані, розрахункову частину, таблицю результатів розрахунку, реферат, список використаних бібліографічних джерел і графічну частину (оформлення повинне відповідати вимогам ЕСКД).

10) Графічна частина проекту містить:

- а) функціональну схему тиристорного перетворювача;
- б) електричну принципову схему ТП (виконану згідно правил ЕСКД [6] у вигляді креслення на білому папері форматом А4 або А3 (зі штампом);
- в) статичну передатну характеристику ТП;
- г) зовнішню регульовальну характеристику ТП;
- д) часові діаграми: мережних фазних напруг, імпульсів керування тиристорами, вихідної напруги (або ЕРС) і струму ТП, вхідних струмів тиристорного перетворювача (із вказівкою розмірності масштабів напруг, струмів, часу).

11) У введенні на одних-двох сторінках повідомляється про призначення перетворювальної техніки й конкретно тиристорних перетворювачів постійного струму, а також про факторів, що спричиняються їх широке сучасне впровадження в різних галузях промисловості.

1 ВИХІДНІ ДАНІ

Приводяться конкретні вихідні дані згідно свого варіанта завдання.

Приклад.

- 1) Варіант завдання – 41.
- 2) Номінальна напруга на навантаженні: $U_H = 440$ (В).
- 3) Номінальна потужність навантаження: $P_H = 1000$ (кВт).
- 4) Характер навантаження: активно-індуктивний;
індуктивність навантаження $L_H = 0,3 \cdot 10^{-3}$ (Гн).

- 5) Коефіцієнт стабільності живлячої напруги:

$$K_{c \min} \leq K_c = U_2 / U_{2H} \leq K_{c \max}$$

де $K_{c \min} = 0,9$ – мінімальне значення коефіцієнта стабільності живлячої напруги;

$K_{c \max} = 1,1$ – максимальне значення коефіцієнта стабільності живлячої напруги;

U_2 и U_{2H} – поточна вхідна напруга ТП і його номінальне значення відповідно.

- 6) Схема тиристорного перетворювача - трифазна мостова (ТМС).

- 7) Перевантаження по струму - двократне ($I_{d \max} / I_{dH} = 2$).

- 8) Форма опорної напруги СІФК - лінійна (з амплітудою $U_{оп \max} = 10$ В).

- 9) Мінімальне й максимальне значення кута керування $\alpha_{\min} = 0$ и $\alpha_{\max} = 165$ ел. град. Номінальне значення кута керування: $\alpha_H = 25$ ел. град.

- 10) Коефіцієнт пульсацій струму навантаження: $\xi = 0,03$.

2 ФУНКЦІОНАЛЬНА СХЕМА ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Приводиться функціональна схема ТП, докладно описується призначення всіх її складових частин, розшифровуються їхні умовні позначки на схемі.

Приклад.

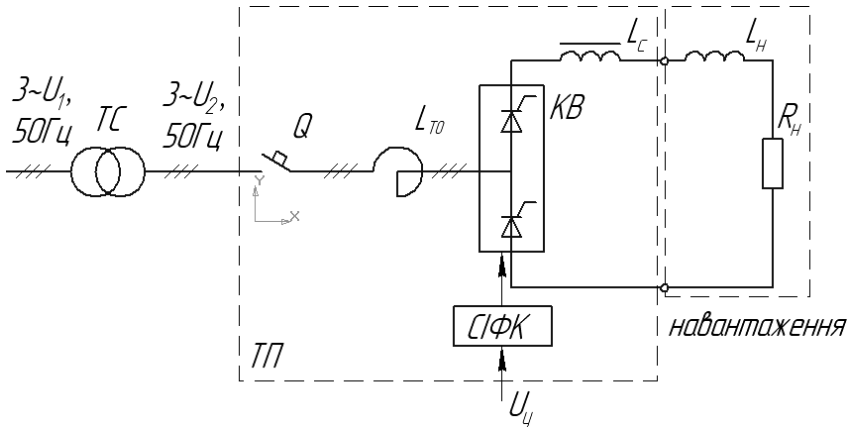


Рисунок 1. Функціональна схема тиристорного перетворювача

Дана функціональна схема містить:
 KB — керований випрямляч; Q — автоматичний вимикач; ТС — силовий трансформатор;
 $L_{ТО}$ — струмообмежувальний реактор;
 $(R_{н}-L_{н})$ — активно-індуктивне навантаження;
 СІФК — система імпульсно-фазового керування.

Далі докладно описується призначення кожного зі складених елементів схеми.

3 ВИБІР СИЛОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА

Силовий трансформаторс призначенийс для передачі від енергосистеми електричної потужності до тиристорного перетворювача й створення на вході ТП необхідного значення лінійної ($U_{2л}$) або фазної ($U_{2ф}$)напруги живлення.

3.1 Спрощений вибір вторичної напруги силового трансформатора

Знаходження необхідної лінійної $U_{2л}$ або фазної $U_{2ф}$ діючоївторинної напруги зазначеного трансформатора здійснюється зі співвідношення:7

$$U_{2л} = \begin{cases} 2(0,9 \div 1,0)U_H & \text{для ТНС} \\ (0,9 \div 1,0)U_H & \text{для ТМС та НТМС} \\ 0,5(0,9 \div 1,0)U_H & \text{для ДПС} \end{cases} \quad (1)$$

$$U_{2ф} = (1,15 \div 1,3)U_H \quad \text{для ОМС}$$

Приклад.

Для прийнятої трифазної мостової схеми ТП:

$$U_{2л} \approx 0,95 \cdot 440 = 418 \text{ В}$$

3.2 Розрахунок потужності силового трансформатора

Враховуючи, що від даного трансформатора живиться тільки одне наше навантаження, розрахуємо потужність трансформатора приблизно зі співвідношень:

$$S_{TC} \geq \begin{cases} 1,45 P_n & \text{— для ТНС;} \\ 1,05 P_n & \text{— для ТМС, НТМС та ДПС;} \\ 1,23 P_n & \text{— для ОМС.} \end{cases} \quad (2)$$

При цьому у двенадцатипульсній схемі (ДПС) використовується трьохобмотковий силовий трансформатор (а в інших схемах—двохобмотковий силовий трансформатор).

Приклад.

$$S_{TC} \geq 1,05 \cdot 1000 = 1050 \text{ (кВА)}.$$

3.3 Вибір номінальних значень потужності й вторинної напруги силового трансформатора

За номінальне значення вторинної напруги приймаємо найближче до

розрахованого з (1) значення лінійного діючого $U_{2\text{лн}}$ - для трифазного

трансформатора (або фазного діючого $U_{2\text{фн}}$ для однофазного трансформатора), що кратно десяти.

Приклад.

$$U_{2\text{лн}} = 420 \text{ В}.$$

За номінальне значення потужності трансформатора приймаємо найближче найбільше значення з таблиці 4 (дані силових трансформаторів).

Приклад.

$$S_{\text{Н}} = 1600 \text{ (кВА)}.$$

Примітка. Дозволяється вибір номінальних значень вторинної напруги й потужності силових трансформаторів з каталожних або довідкових даних на випускаемі вітчизняні або закордонні трансформатори (наприклад, з [1]).

3.4 Розрахунок активного опору й номінального струму навантаження

$$\begin{cases} R_H = U_H / I_H \\ I_{dn} = P_H / U_H \end{cases}$$

Приклад.

$$I_{dn} = 1000 \cdot 10^3 / 440 = 2273 (A)$$

$$R_H = 440 \cdot 2273 = 0,1936 (Om)$$

3.5 Перевірка правильності вибору потужності силового трансформатора, виходячи із припустимого завантаження його первинної обмотки струмами несинусоїдальної форми (при живленні від тиристорного перетворювача)

Дана перевірка здійснюється з наступних співвідношень для необхідної номінальної потужності силового трансформатора:

$$S_H \geq \begin{cases} 1,09U_{2лн} I_{dn} - \text{для ТНС}; \\ 1,49U_{2лн} I_{dn} - \text{для ТМС и НТМС}; \\ 2,98U_{2лн} I_{dn} - \text{для ДПС}; \\ 1,20U_{2лн} I_{dn} - \text{для ОМС}. \end{cases} \quad (4)$$

Приклад.

$$S_H \geq 1,49 \cdot 420 \cdot 2273 = 1422 \text{ (кВА)}.$$

Оскільки обрана раніше в п. 3.3 номінальна потужність $S_H = 1600$ кВА силового трансформатора задовольняє перевіірочні умові з (4), вибираємо з таб. 4 трифазний двухобмотковий трансформатор ТС-1600/10 (зазначеною номінальною потужністю 1600 кВА, первинною напругою 10 кВ) з наступними параметрами:

$$S_H = 1600 \text{ кВА} \quad \Delta P_{xx} = 3,4 \text{ кВт}$$

$$U_{2лн} = 420 \text{ В} \quad \Delta P_{кз} = 13,5 \text{ кВт}$$

$$U_{1л} = 10 \text{ кВ} \qquad I_{\text{ХХ}} = 0,9 \text{ \%};$$

$$U_{\text{К}} = 6 \text{ \%}$$

де $I_{\text{ХХ}}$ и $U_{\text{К}}$ — відносні значення відповідно струму холостого ходу й напруги короткого замикання силового трансформатора.

Примітка.

1) Якщо перевірочне співвідношення (4) не виконується, необхідно вибрати з таблиці А4 силовий трансформатор з більшою номінальною потужністю, що задовольняє умові (4).

2) Висновок перевірочних співвідношень (4) отриманий за допомогою наступних залежностей:

$$I_{\phi 1} = \begin{cases} S_n / \sqrt{3} U_{1л} \geq k_{\phi} k_I I_{dн} / k_{mp} - \text{для ТНС, ТМС та НТМС}; \\ S_n / \sqrt{3} U_{1л} \geq 2k_{\phi} k_I I_{dн} / k_{mp} - \text{для ДПС}; \\ S_n / U_{1\phi} \geq k_{\phi} k_I I_{dн} / k_{mp} - \text{для ОМС}, \end{cases}$$

$$\text{де } k_{\phi} = \frac{I_{2\phi д}}{I_{д}} = \begin{cases} 1,05 - \text{для ТМС, НТМС та ДПС}; \\ 1,08 - \text{для ТНС та ОМС} \end{cases}$$

коефіцієнт форми фазного струму, що враховує відмінність форми фазного струму силового трансформатора від прямокутної;

$$k_{mp} = U_{1л} / U_{2лн} = U_{1\phi} / U_{2\phi н} - \text{коефіцієнт трансформації};$$

$I_{2\phi д}$ і $I_{1\phi}$ — діючі значення фазних струмів у вторинній і первинній обмотках силового трансформатора відповідно; $U_{1л}$ і $U_{1\phi}$ номінальні діючі значення відповідно лінійної або фазної напруги первинної обмотки силового трансформатора;

k_I — коефіцієнт схеми ТП по струму, що розраховується із залежностей [2]:

$$k_I = \begin{cases} 0,583 & \text{- для ТНС;} \\ 0,817 & \text{- для ТМС, НТМС и ДПС;} \\ 1,11 & \text{- для ОМС.} \end{cases}$$

З даних залежностей випливає:

$$S_n \geq \begin{cases} \sqrt{3}k_\phi k_I U_{2,ли} I_{дн} & \text{- для ТНС, ТМС и НТМС;} \\ 2\sqrt{3}k_\phi k_I U_{2,ли} I_{дн} & \text{- для ДПС;} \\ k_\phi k_I U_{2,ли} I_{дн} & \text{- для ОМС.} \end{cases}$$

Після підстановки в останні залежності чисельних значень коефіцієнтів k_ϕ й k_I отримані співвідношення (4).

Розрахунок фазних значень активного опору й індуктивності розсіювання силового трансформатора

$$R_{тс.ф} = \begin{cases} \frac{\Delta P_{кз}}{3 (I_{2фн})^2} & \text{- для трьохфазних двухобмоткових трансформаторів;} \\ \frac{\Delta P_{кз}}{6 (I_{2фн})^2} & \text{- для трьохфазних трьохобмоткових трансформаторів;} \\ \frac{\Delta P_{кз}}{(I_{2фн})^2} & \text{- для однофазних трансформаторів} \end{cases} \quad (5)$$

$$L_{тс.ф} = \begin{cases} \frac{U_{2,ли} U_\kappa}{\sqrt{3}\omega_1 I_{2фн}} & \text{- для трьохфазних} \\ & \text{двухобмоткових трансформаторів;} \\ \frac{U_{2,ли} U_\kappa}{2\sqrt{3}\omega_1 I_{2фн}} & \text{- для трьохфазних} \\ & \text{трьохобмоткових трансформаторів;} \end{cases}$$

(6)

У наведених співвідношеннях:

$U_{2\phi n} = U_{2\text{лн}} / \sqrt{3} U_{2\phi n}$ – номінальне фазне діюче значення напруги вторинної обмотки силового трансформатора;

$\omega_1 = 2\pi f_1 = 314 \text{ с}^{-1}$ – кутова частота промислової трифазної мережі змінного струму ($f_1 = 50 \text{ Гц}$);

$I_{2\phi n}$ – номінальне фазне діюче значення струму вторинної обмотки силового трансформатора, що розраховує із залежностей:

$$I_{2\phi n} = \begin{cases} S_H / \sqrt{3} U_{2\text{лн}} - \text{для трьохфазних} \\ \text{двохобмоточних трансформаторів} \\ S_H / 2\sqrt{3} U_{2\text{лн}} - \\ \text{для трьохфазних трьохобмоточних трансформаторів} \\ S_H / U_{2\text{лн}} - \text{для однофазних двохобмоточних трансформаторів} \end{cases}$$

(7)

Приклад.

$$I_{2\phi n} = 1600 \cdot 10^3 / \sqrt{3} \cdot 420 = 2199 \text{ (A)}$$

$$R_{\text{мс.}\phi} = 13,5 \cdot 10^3 / 3 \cdot (2199)^2 = 0,931 \cdot 10^{-3} \text{ (Ом)}$$

$$L_{\text{мс.}\phi} = 420 \cdot 6 \cdot 10^{-2} / \sqrt{3} \cdot 314 \cdot 2199 = \text{(мГн)}$$

4 ВИБІР АВТОМАТИЧНОГО ВИМИКАЧА

Автоматичний вимикач призначений для зняття й подачі напруги живлення на ТП, а також для захисту останнього при коротких замиканнях або перевантаженнях по струму. Автоматичний вимикач вибирається по робочій напрузі й робочому струмі.

4.1 Умова вибору по напрузі

$$U_{QH} \geq U_{2ЛН}, \quad (8)$$

де U_{QH} – робоча напруга автоматичного вимикача.

Приклад.

$$U_{QH} \geq 420\text{В.}$$

4.2 Умова вибору по струму

$$I_{QH} \geq k_{\phi} k_I I_{дН}, \quad (9)$$

де I_{QH} – довготривалий припустимий робочий струм автоматичного вимикача.

Приклад.

$$I_{QH} \geq 1,05 \cdot 0,817 \cdot 2273 = 1950 \text{ (А)}.$$

4.3 Вибір типу автоматичного вимикача

Вибір необхідного типу автоматичного вимикача здійснюється згідно умов (8) і (9): з таблиці А5 і таблиці А6 або з каталожних даних на вітчизняні або закордонні автоматичні вимикачі (наприклад, з [1, 3]).

Приклад.

Вибираємо з таблиці А 7 триполюсний автоматичний вимикач серії

"Електрон" типу Э25М с параметрами:

$$U_{Qн} = 660 \text{ В} > U_{2лн} = 420 \text{ В}; I_{Qн} = 2500 \text{ А} > k_{\phi} k_I I_{дн} = 1950 \text{ А};$$

$I_{Qmax} = 70 \text{ кА}$ – струмова комутаційна здатність вимикача.

5 РОЗРАХУНОК І ВИБІР ЕЛЕМЕНТІВ СИЛОВОЇ ЧАСТИНИ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

5.1 Розрахунок і вибір тиристорів керованого випрямляча

а) Розрахунок тиристорів по струму

Середнє значення струму, що протікає через тиристор, знаходимо із залежностей:

$$I_{\text{тир.ср}} = \begin{cases} I_{d \max} / 3 & \text{- для ТНС, ТМС, НТМС та ДПС;} \\ I_{d \max} / 2 & \text{- для ОМС.} \end{cases} \quad (10)$$

Приклад.

$$I_{\text{тир.ср}} = 2 \cdot I_{dн} / 3 = 2 \cdot 2273 / 3 = 1515 \text{ (А)}.$$

б) Розрахунок тиристора по напрузі

Максимальне значення напруги, що прикладає в робочих режимах до тиристора, визначається із залежностей:

$$U_{\text{тир.маx}} = \begin{cases} \sqrt{2} K_{c \max} U_{2лн} & \text{- для ТНС, ТМС, НТМС и ДПС;} \\ \sqrt{2} K_{c \max} U_{2фн} & \text{- для ОМС.} \end{cases} \quad (11)$$

Приклад.

$$U_{\text{тир.маx}} = \sqrt{2} \cdot 1.1 \cdot 420 = 653 \text{ (В)}$$

в) Вибір типу й основних паспортних даних тиристорів

Здійснюється з наступних співвідношень:

$$\left. \begin{aligned} I_{\text{тир.н}} &\geq \frac{k_{\text{зт}} I_{\text{тир.сп}}}{nk_{\text{охл}}} \\ U_{\text{тир.н}} &\geq k_{\text{зн}} U_{\text{тир.мак}} \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

де n – кількість тиристорів, що з'єднують паралельно, у тиристорному перетворювачі;

$k_{\text{зт}}$ – коефіцієнт запасу по струму (враховуючий собою відмінність форми цього струму від прямокутної), рівний: 1,1 – для ОМС, ТНС, ТМС, і НТМС або 1,05 – для ДПС;

$k_{\text{зн}}$ = (1,4–1,5) коефіцієнт запасу по напрузі (рекомендований заводами виробниками силових напівпровідникових мприладів для надійної роботи тиристорів)

$$k_{\text{охл}} = \begin{cases} 1 - \text{Для вимушеного повітряного охолодження} \\ \quad \text{при встановленні тиристора} \\ \quad \text{на заводський охолоджувач;} \\ 0,33 - \text{для природнього повітряного} \\ \quad \text{охолодження (безвентиляції).} \end{cases}$$

Примітка.

У курсовому проєкті для тиристорних перетворювачів з потужністю навантаження понад 30 кВт варто застосовувати примусове повітряне охолодження, а в інших випадках - природне повітряне охолодження.

Приклад.

$n=2$ – задаємося паралельним з'єднанням двох тиристорів;

$$I_{\text{тир.н}} \geq \frac{1,1 \cdot 1515}{2 \cdot 1} = 833 \text{ (А)};$$

$$U_{\text{тир.н}} \geq 1,5 \cdot 653 = 980 \text{ (В)}.$$

Вибираємо з [4] (або інша довідкова літератури) тиристор Т253-1000-10 з наступними параметрами:

$I_{\text{тир.н}} = 1000 \text{ А}$ – номінальний струм тиристора;

$U_{\text{тир.н}} = 1000 \text{ В}$ – номінальна напруга тиристора (відповідна 10-ому класу);

$I_{\text{тир.мах}} = 20 \text{ кА}$ – ударний (імпульсний) струм через тиристор;

$\Delta U_{\text{тир.пр}} = 1,8 \text{ В}$ – пряме спадання напруги на відкритому тиристорі.

Примітка.

1) Варто уникати, якщо це можливо, паралельного з'єднання тиристорів, оскільки таке з'єднання вимагає індивідуального підбору тиристорів (із однаковими прямими спадання напруги) або застосування додатково схем для рівномірного розподілу струмів (дільників струму) через зазначені паралельно з'єднані тиристири. Краще вибрати один (потужніший) тиристор.

2) При відсутності паралельного з'єднання тиристорів у першій формулі з (12) варто думати, що: $n=1$.

3) Для несиметричної трифазної мостової схеми (НТМС) аналогічно (згідно п. 5.1,а,б,в) здійснюється розрахунок і вибір по струму й напрузі діодів зазначеної схеми тиристорного перетворювача.

4) При виборі типу тиристора (діода) варто орієнтуватися на тиристири (діоди), паспортні дані (параметри) яким найбільш близькі до розрахованого в п. 5.1,в і перевищують їх.

5.2 Розрахунок і вибір струмообмежуючого реактора

Струмообмежуючий реактор призначений для обмеження вторинного фазного струму силового трансформатора (або струму через тиристор керованого випрямляча) у режимі внутрішнього або зовнішнього короткого замикання в тиристорному перетворювачі (на рівні, що не перевищує максимально допустимого імпульсного (ударного) струму через тиристор)

а) Розрахунок індуктивності струмообмежуючого реактора

$$L_{mo} = \left[\frac{\sqrt{2} k_{c \max} U_{2\phi n}}{\omega_1 (n I_{\text{тир. max}} - I_{\text{уст. мз}})} - L_{\text{тс. ф}} \right], \quad (13)$$

де $I_{\text{уст. мз}} = (2,3 - 2,5) I_{\text{дн}}$ – уставка максимального захисту тиристорного перетворювача (при якій надходить команда на аварійне відключення автоматичного вимикача по дистанційному розчеплювачу).

Приклад.

$$L_{mo} = \left[\frac{\sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot (420 / \sqrt{3})}{314 \cdot (2 \cdot 20 \cdot 10^3 - 2,3 \cdot 2273)} - 0,0211 \right] = 0,0134 \text{ (мГн)}.$$

Примітка.

1) Формула (13) отримана з наступної залежності для розрахунку максимально припустимого струму $I_{\phi, \max}$ у вторинній обмотці силового трансформатора в режимі трифазного ("глухого") короткого замикання на вході ТП:

$$I_{\phi, \max} = \frac{\sqrt{2} k_{c \max} U_{2\phi n}}{\omega_1 L_{\text{тс. ф}} + L_{\text{то}}^*} + I_{\text{уст. мз}} \leq n I_{\text{тир. max}}$$

де $L_{\text{то}}^*$ – обране значення індуктивності струмообмежуючого реактора.

При цьому під режимом "глухого" короткого замикання розуміється найгірший (самий небезпечний) випадок короткого замикання, що виникає в тиристорному перетворювачі постійного струму при одночасному виході з ладу тиристорів у різних фазах перетворювача.

2) Якщо в результаті розрахунку значення індуктивності $L_{\text{то}}$ вийшло негативним, то необхідності в установці струмообмежуючого реактора немає. У цьому випадку у всіх наступних співвідношеннях варто думати фактичне обране значення. У цьому випадку потрібно розрахувати значення

ударного струму $I_{уд.тир}$, що протікає через тиристор у режимі "глухого" короткого замикання в тиристорному перетворювачі, і зрівняти це значення з максимально припустимим імпульсним струмом $I_{тир \max}$ обраного тиристора

$$I_{уд.тир} = \frac{1}{n} \left[\frac{\sqrt{2} k_{с \max} U_{2\phi n}}{\omega_1 L_{тс.ф}} + I_{уст.мз} \right] < I_{тир \max} \quad (14)$$

б) Вибір струмообмежуючого реактора

Здійснюється (при $L_{ТО} > 0$) двома шляхами:

- вибором існуючого реактора найближчою більшою індуктивністю (наприклад, з довідника [1]);

- або видачею завдання на розробку й виготовлення необхідного струмообмежуючого реактора, що відповідає умовам:

$$\begin{aligned} L_{то}^* &\geq L_{то} \\ I_{то} &\geq k_{\phi} k_I I_{дн}, \end{aligned}$$

де $L_{то}$ і $L_{то}^*$ – відповідно розраховане й обране значення індуктивності струмообмежуючого реактора;

$I_{то}$ – розрахункове діюче значення струму через реактор;

$\Delta P_{то}$ – активні втрати потужності в струмообмежуючому реакторі.

Приклад.

Дотримуючись останнього шляху, видамо завдання на розробку й виготовлення струмообмежуючого реактора з наступними параметрами:

- індуктивністю $L_{то}^* = 0.014 \text{ мГн} \geq L_{ТО} = 0.0134 \text{ мГн}$;

- діючим струмом $I_{\text{то}} = 2100\text{A} \geq 1,05 \cdot 0,817 \cdot 2273 = 1950\text{A}$;
- втратами потужності $\Delta P_{\text{то}} = 0,1 \cdot 10^{-2} \cdot 1000 = 1 \text{ кВт}$.

5.3 Розрахунок еквівалентної (сумарної) індуктивності фази змінного струму перетворювача

$$L_{\phi} = L_{\text{тс.}\phi} + L_{\text{то}}^* \quad (16)$$

Приклад.

$$L_{\phi} = 0,0211 + 0,014 = 0,0351 \text{ (мГн)}.$$

5.4 Перевірка достатності струмової комутаційної здатності автоматичного вимикача при трифазному короткому замиканні на вході ТП

Здійснюється шляхом розрахунку максимального миттєвого значення фазного струму $I_{\phi \text{ max}}^*$ автоматичного вимикача при зазначеному короткому замиканні й порівнянні цього значення з паспортним значенням струмовою комутаційною здатністю застосовуваного автоматичного вимикача:

$$I_{\phi \text{ max}}^* = \frac{\sqrt{2} k_{\text{с max}} U_{2\phi \text{ н}}}{\omega_1 L_{\phi}} + I_{\text{уст. мз}} \leq I_{Q \text{ max}}, \quad (17)$$

Приклад.

$$I_{\phi \text{ max}}^* = \frac{\sqrt{2} \cdot 1,1 \cdot (420 / \sqrt{3})}{3140,0351 \cdot 10^{-3}} + 2,3 \cdot 2273 = 39,5 \text{ (кА)};$$

$$I_{\phi \text{ max}}^* = 39,5 \text{ кА} < I_{Q \text{ max}} = 70 \text{ кА}$$

Примітка.

Якщо умова проерки не виконується, потрібно вибрати автоматичний вимикач із більшим значенням струмовою комутаційною здатністю.

5.5 Розрахунок і вибір реактора, що згладжує

Реактор, що згладжує, призначений для обмеження амплітуди пульсацій випрямленого струму (струму навантаження) на заданому рівні.

а) Визначення максимального значення вихідний ЕРС тиристорного перетворювача

$$E_{d0} = \begin{cases} 0,9U_{2\phi n} & \text{для ОМС;} \\ 1,17U_{2\phi n} & \text{для ТНС;} \\ 1,35U_{2\phi n} & \text{для ТМС і НТМС;} \\ 2,7U_{2\phi n} & \text{для ДПС.} \end{cases} \quad (18)$$

Приклад.

$$E_{d0} = 1,35 \cdot 420 = 567 \text{ (В).}$$

б) Розрахунок амплітуди пульсацій першої гармоніки вихідної напруги (у номінальному режимі роботи ТП)

$$U_{(1)M} = \frac{2E_{d0} \cos \alpha_n}{m^2 - 1} \sqrt{1 + m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_n}, \quad (19)$$

де α_n – кут керування, що відповідає номінальному режиму роботи ТП (який згідно з вихідними даними приймається рівним 25ел. град.)

m – пульсність випрямлення для обраної схеми ТП, що знаходиться зі співвідношень [2]:

$$m = \begin{cases} 2 - \text{для ОМС}; \\ 3 - \text{для ТНС}; \\ 6 - \text{для ТМС і НТМС}; \\ 12 - \text{для ДПС}. \end{cases} \quad (20)$$

Приклад.

$$U_{1,m} = \frac{2 \cdot 567 \cdot \cos(25^\circ)}{6^2 - 1} \sqrt{1 + 6^2 \operatorname{tg}^2(25^\circ)} = 87,2 \text{ В}.$$

в) Розрахунок необхідного значення сумарної (еквівалентної) індуктивності ланцюга постійного струму ТП

$$L_d \geq \frac{U_{(1),m}}{m \omega_1 \xi I_{дн}}, \quad (21)$$

де ξ – задане значення коефіцієнта пульсацій струму навантаження.

Приклад.

$$L_d \geq \frac{87,2}{6 \cdot 3140,03 \cdot 2273} = 0,679 \text{ (мГн)}.$$

г) Визначення індуктивності реактора, що згладжує

$$L_c \geq \begin{cases} (L_d - L_\phi - L_n) - \text{для ОМС і ТНС}; \\ (L_d - 2L_\phi - L_n) - \text{для ТМС і НТМС}; \\ (L_d - 4L_\phi - L_n) - \text{для ДПС}, \end{cases} \quad (22)$$

де L_n – індуктивність навантаження.

Приклад.

$$L_c \geq 0,679 - 2 \cdot 0,0351 - 0,3 = 0,309 \text{ (мГн)}.$$

Примітка.

Якщо значення індуктивності реактора, що згладжує, у результаті розрахунку вийшло негативним, то необхідності в його установці немає (тому що його функцію виконують індуктивності фази змінного струму L_{ϕ} і навантаження L_H). У цьому випадку подальших розрахунках варто думати обране значення індуктивності L^* реактора, що згладжує, рівним нулю ($L_c^* = 0$)

д) Вибір реактора, що згладжує

Здійснюється двома шляхами:

- вибором існуючого реактора найближчою більшою індуктивністю (наприклад з [1]);
- або видачею завдання на розробку й виготовлення необхідного реактора, що згладжує, що відповідає умовам:

$$\left. \begin{aligned} L_c^* &\geq L_c, \\ I_c &\geq I_{дн}, \\ \Delta P_c &\approx 0,25\% P_H \end{aligned} \right\} \quad (23)$$

де L_c – обране значення індуктивності реактора, що згладжує;

I_c – розрахункове значення струму через реактор;

ΔP_c – активні втрати потужності в реакторі, що згладжує.

Приклад.

Впливаючи останньому запропонованому шляху видамо завдання на розробку й виготовлення реактора, що згладжує, з наступними параметрами:

- індуктивністю $L_c^* = 0,31 \text{ мГн} \geq L_c$;
- струмом $I_c = 2300 \text{ А} \geq I_{дн} = 2273 \text{ А}$;
- втратами потужності $\Delta P_c = 0,25 \cdot 10^{-2} \cdot 1000 = 2,5$ (кВт).

е) Визначення результуючих значень індуктивності ланцюга постійного струму перетворювача й коефіцієнта пульсацій струму навантаження.

$$I_d^* \geq \begin{cases} (L_\phi + L_c^* + L_H) - \text{для ОМС і ТНС;} \\ (2L_\phi + L_c^* + L_H) - \text{для ТМС і НТМС;} \\ (4L_\phi + L_c^* + L_H) - \text{для ДПС;} \end{cases} \quad (24)$$

$$\zeta = \frac{U_{(1)M}}{m\omega_1 L_c^* I_{dH}}$$

Приклад.

$$L_d^* = 2 \cdot 0,0351 + 0,31 + 0,3 = 0,68 (\text{мГн}),$$

$$\zeta^* = \frac{87,2}{6314 \cdot 0,68 \cdot 10^{-3} \cdot 2273} = 2,99 (\%)$$

5.4 Розрахунок еквівалентної індуктивності тиристорного перетворювача

$$L_{\Pi} = L^* - L_H \quad (25)$$

Приклад.

$$L_{\Pi} = 0,68 - 0,3 = 0,38 (\text{мГн}).$$

5.5 Розрахунок фіктивного активного опору тиристорного перетворювача

Даний опір враховує собою зниження вихідної напруги ТП від комутаційних процесів фазних струмів перетворювача й розраховується зі співвідношень:

$$R_j = \begin{cases} 0 - \text{для ОМС}; \\ \frac{3}{2\pi} L_\phi \omega_1 - \text{для ТНС}; \\ \frac{3}{\pi} L_\phi \omega_1 - \text{для ТМС і НТМС}; \\ \frac{6}{\pi} L_\phi \omega_1 - \text{для ДПС}. \end{cases} \quad (26)$$

Приклад.

$$R_j = \frac{30,0351 \cdot 10^{-3} \cdot 314}{3,14} = 10,53 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} .$$

5.6 Визначення активних опорів реакторів

Розрахуємо активні опори зі співвідношень:

$$R_{то} \begin{cases} \Delta P_{то} / I^2 - \text{для ОМС}; \\ \Delta P_{то} / 3I_{то}^2 - \text{для ТНС, ТМС і НТМС}; \\ \Delta P_{то} / 6I^2 - \text{для ДПС}. \end{cases} \quad (27)$$

– для струмообмежуючого реактора;

$$R_c = \Delta P_c / I_c^2 \quad (28)$$

– для реактора, що згладжує.

Приклад.

$$R_{mo} = \frac{10^3}{3 \cdot 2100^2} = 0,0756 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} ,$$

$$R_c = \frac{2500}{2300^2} = 0,473 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} .$$

Розрахунок сумарного (еквівалентного) активного опору тиристорного перетворювача.

$$R_n = \begin{cases} [(R_{mc.\phi} + R_{mo}) + R_c + R_j + R_{ош} + R_{каб}] - \text{для ОМС і ТНС;} \\ [2(R_{mc.\phi} + R_{mo}) + R_c + R_j + R_{ош} + R_{каб}] - \text{для ТМС і НТМС;} \\ [4(R_{mc.\phi} + R_{mo}) + R_c + R_j + R_{ош} + R_{каб}] - \text{для ДПС;} \end{cases} \quad (29)$$

В останніх співвідношеннях активний опір $R_{ош}$ ошиновки тиристорного перетворювача й активний опір кабелів $R_{каб}$ (з'єднуючих тиристорний перетворювач із навантаженням) варто приблизно знаходити зі співвідношень:

$$R_{ош} \approx 0,01 \left(\frac{U_H}{I_{dH}} \right);$$

$$R_{каб} = \begin{cases} 0,03R_n, & \text{при } P_n < 10 \text{ кВт;} \\ 0,02R_n, & \text{при } 10 \text{ кВт} \leq P_n \leq 100 \text{ кВт;} \\ 0,01R_n, & \text{при } 100 \text{ кВт} < P_n < 1000 \text{ кВт;} \\ 0,005R_n, & \text{при } P_n \geq 1000 \text{ кВт} \end{cases} \quad (30)$$

де U_H , I_{dH} , P_n та R_n відповідно номінальні напруга, струм, потужність й опір навантаження.

Приклад.

$$R_{\text{ош}} = 0,01 \left(\frac{440}{2273} \right) = 1,94 \cdot 10^{-3} (\text{Ом});$$

$$R_{\text{каб}} = 0,005 \cdot 0,1936 = 0,968 \cdot 10^{-3} (\text{Ом}).$$

$$R_{\text{п}} = 2(0,931 \cdot 10^{-3} + 0,0756 \cdot 10^{-3}) + 0,473 \cdot 10^{-3} + 10,53 \cdot 10^{-3} + 1,94 \cdot 10^{-3} + 0,968 \cdot 10^{-3} = 15,92 \cdot 10^{-3} \text{ Ом} .$$

5.10 Перевірка правильності вибору напруги вторинної обмотки силового трансформатора

а) Розрахунок номінального діючого значення фазної ЕРС вторинної обмотки силового трансформатора

$$E_{2\text{фн}} = U_{2\text{фн}} (1 + U_{\text{к}}) . \quad (31)$$

Приклад.

$$E_{2\text{фн}} = \left(\frac{420}{\sqrt{3}} \right) (1 + 6 \cdot 10^{-2}) = 257 (\text{В}).$$

б) Розрахунок мінімального фазного діючого значення (при осіданні напруги живильної мережі) ЕРС вторинної обмотки силового трансформатора

$$E_{2\text{фmin}} = K_{\text{стін}} E_{2\text{фн}} . \quad (32)$$

Приклад.

$$E_{2\text{фmin}} = 0,9 \cdot 257 = 231 \text{ В} .$$

в) Розрахунок максимального значення вихідної ЕРС тиристорного перетворювача при осіданні напруги живлячої мережі

$$E_{d0\min} = \begin{cases} 0,9 E_{2\phi\min} & \text{— для ОМС;} \\ 1,17 E_{2\phi\min} & \text{— для ТНС;} \\ 2,34 E_{2\phi\min} & \text{— для ТМС і НТМС;} \\ 4,68 E_{2\phi\min} & \text{— для ДПС.} \end{cases} \quad (33)$$

Приклад.

$$E_{d0\min} = 2,34 \cdot 231 = 541(\text{В})$$

г) Розрахунок спадання напруги на відкритих вентиляхперетворювача

$$\Delta U_{\varepsilon} = \begin{cases} \Delta U_{\text{тир.пр}} & \text{— для ТНС;} \\ 2\Delta U_{\text{тир.пр}} & \text{— для ОМС і ТМС;} \\ U_{\text{тир.пр}} + \Delta U_{\text{диод.пр}} & \text{— для НТМС;} \\ 4\Delta U_{\text{тир.пр}} & \text{— для ДПС,} \end{cases} \quad (34)$$

де $\Delta U_{\text{тир.пр}}$ і $\Delta U_{\text{диод.пр}}$ — падіння напруги на відкритих тиристорі й діоді відповідно.

Приклад.

$$\Delta U_{\text{В}} = 2 \cdot 1,8 = 3,6(\text{В}).$$

д) Перевірка правильності вибору напруги вторинноїобмотки силового трансформатор

$$0 \leq \frac{E_{d0\min} - R_n I_{d\max} - \Delta U_{\varepsilon} - U_n}{E_{d0\min}} \leq 0,05. \quad (35)$$

Приклад.

$$0 \leq \frac{541 - 15,92 \cdot 10^{-3} \cdot 2 \cdot 2273 - 3,6 - 440}{541} = 0,046 \leq 0,05.$$

Примітка.

1) Якщо дана перевірна умова не виконується: менше нуля - варто збільшити напругу вторинної обмотки силового трансформатора, а якщо більше 0,05 - навпаки, варто зменшити напруга вторинної обмотки силового трансформатора. Після зазначеної зміни напруги необхідно повторити розрахунки заново (починаючи з п. 3.1).

2) У пояснювальній записці до курсового проекту приводяться лише остаточні розрахунки, що відповідають виконанню перевіркової умови з (35).

6 РОЗРАХУНОК І ПОБУДОВА СТАТИЧНОЇ, РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

6.1 Розрахунок і побудова статичної передатної характеристики ТП виду $E_{\alpha} = f(U_y)$

а) Для ОМС, ТНС, ТМС і ДПС розрахунок зазначеної характеристики виконується зі співвідношень:

$$E_d = \begin{cases} E_{d0} \sin\left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_y}{U_{onmax}}\right) & \text{— для лінійної форми опорної напруги СІФК;} \\ E_{d0} \left(\frac{U_y}{U_{onmax}}\right) & \text{— для косинусоїдальної форми опорної напруги СІФК;} \end{cases} \quad (36)$$

де E_{d0} — максимальне значення вихідної ЕРС тиристорного перетворювача, розраховані з (18);

$U_{оп max} = 10В$ — амплітуда опорної напруги СІФК;

U_y — вхідна (керуюча) напруга СІФК, варіює в

межах:

$$U_{onmax} = \left[\frac{90^\circ - \alpha_{max}}{90^\circ} \right] \leq U_y \leq 10В \text{ — для лінійної опорної напруги СІФК;}$$

$$U_{onmax} [\cos \alpha_{max}] \leq U_y \leq 10В \text{ — для косинусоїдальної опорної напруги СІФК.} \quad (37)$$

Для НТМС розрахунок статичної передатної характеристики ТП здійснюється з інших співвідношень:

$$E_d = \begin{cases} 0,5 E_{d0} \left[1 + \sin \left(\frac{\pi}{2} \cdot \frac{U_y}{2U_{on\ max}} \right) \right] & \text{— для лінійної форми опорної напруги СІФК;} \\ 0,5 E_{d0} \left[1 + \left(\frac{U_y}{U_{on\ max}} \right) \right] & \text{— для косинусоїдальної форми опорної напруги СІФК;} \end{cases} \quad (38)$$

Приклад.

$$E_d = 567 \cdot \sin \left(\frac{3,14 U_y}{2 \cdot 10} \right) = 567 \cdot \sin(0,157 \cdot U_y);$$

$$U_{y\ min} \leq U_y \leq U_{y\ max} = 10 \text{ В,}$$

$$E_d = 10 \cdot \left[\frac{90^\circ - 165^\circ}{90^\circ} \right] = -8,33 \text{ В .}$$

б) Побудова графіка статичної характеристики ТП:

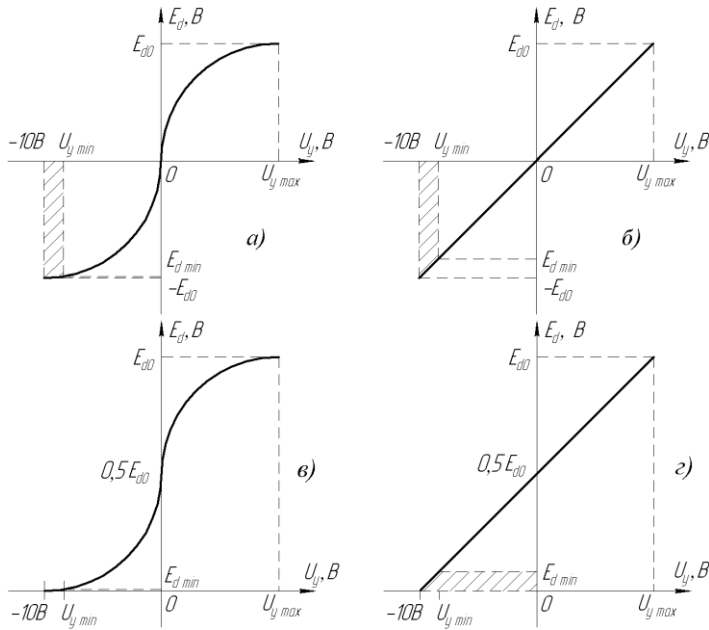


Рисунок 2. Статична передаточна характеристика ТП (а, б - для ОМС, ТНС, ТМС і ДПС; в, г - для НТМС; а, в - для СІФК з лінійною опорною напругою; б, г - для СІФК з косинусоїдальною опорною напругою)

Примітка.

Статична передатна характеристика будується відповідно дорозрахунковими даного свого варіанта завдання (із вказівкою розмірності й чисельних значень вихідний ЕРС E_d і сигнала керування U_d).

6.2 Розрахунок і побудова зовнішньої регулювальної характеристики тиристорного перетворювача

$$U_d = f(\alpha, I_d)$$

а) Розрахунок і побудова зовнішньої регулювальної характеристики здійснюється із залежності:

$$U_d = E_{d0} \cos \alpha - R_{\Pi} I_d - \Delta U_B \quad (39)$$

у наступних діапазонах зміни кута керування α і струму навантаження I_d :

$$\left. \begin{array}{l} 0 \leq \alpha \leq \alpha_{\max} \\ 0 \leq I_d \leq I_{d\max} \end{array} \right\} \quad (40)$$

б) побудова зовнішньої регулювальної характеристики ТП

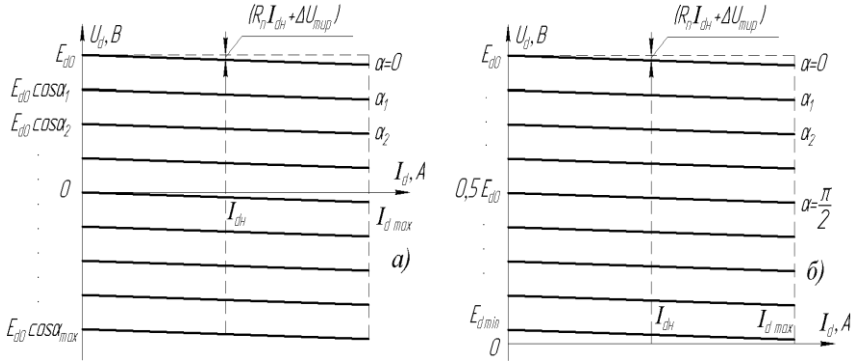


Рисунок 3. Зовнішня регулювальна характеристика ТП (а - для ОМС, ТНС, ТМС і ДПС; б - для НТМС)

Примітка.

Дана зовнішня регулювальна характеристика будується відповідно з розрахунковими даними свого варіанта завдання (із вказівкою розмірності й чисельних значень вихідної напруги U_d перетворювача й сигналу керування U_y).

в) Розрахунок внутрішнього спадання напруги на ТП приномінальному вихідному струмі:

$$\left. \begin{aligned} \Delta U_{mn} &= [R_n I_{dn} + \Delta U_\epsilon] - \text{абсолютне значення;} \\ \Delta U_{mn} / E_{d0} & - \text{відносне значення.} \end{aligned} \right\} \quad (41)$$

Приклад.

$$\Delta U_{mn} = 15,92 \cdot 10^{-3} \cdot 2273 + 3,6 = 36,2 \text{ В ;}$$

$$\Delta U_{mn} / E_{d0} = 36,2 / 567 = 6,38 \text{ \% .}$$

7 РОЗРАХУНОК ЕНЕРГЕТИЧНИХ ПОКАЗНИКІВ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Найважливішими енергетичними показниками перетворювачів є: коефіцієнт корисної дії (ККД) і вхідний коефіцієнт потужності (роботи перетворювачів, що розраховують для номінального режиму,).

7.1 Розрахунок ККД тиристорного перетворювача

Розрахунок КПД тиристорного перетворювача з урахуванням втрат у силовому трансформаторі, реакторах і кабелях, що підводять.

а) Розрахунок втрат потужності в захисних RC-ланцюгах тиристорного перетворювача

$$\Delta P_{RC} \approx 0,001 P_H . \quad (42)$$

Приклад.

$$\Delta P_{RC} \approx 0,001 \cdot 1000 = 1 \text{ (кВт)}.$$

б) Розрахунок втрат потужності в ланцюгах системи керування ТП

$$\Delta P_{cy} \approx \begin{cases} 50 \text{ Вт, при } P_H < 10 \text{ кВт;} \\ 100 \text{ Вт, при } 10 \text{ кВт} \leq P_H < 100 \text{ кВт;} \\ 200 \text{ Вт, при } 100 \text{ кВт} \leq P_H < 1000 \text{ кВт;} \\ 300 \text{ Вт, при } P_H \geq 1000 \text{ кВт.} \end{cases} \quad (43)$$

Приклад.

$$\Delta P_{cy} = 0,3 \cdot 10^{-3} \text{ (кВт)}.$$

в) Розрахунок загальних втрат потужності ТП (у номінальному режимі роботи)

$$\Delta P_{mn} = \Delta U_a I_{du} + (R_n - R_j) I^2 + \Delta P_{RC} + \Delta P_{cy} + \Delta P_{xx}, \quad (44)$$

де ΔP_{xx} — втрати холостого ходу силового трансформатора (наведені в паспортних даних на трансформатор).

Приклад.

$$\Delta P_{\text{тп}} = 3,6 \cdot 2273 + (15,9210^{-3} - 10,5310^{-3}) \cdot (2273)^2 + 1 \cdot 10^{-3} + 0,3 \cdot 10^{-3} + 3,4 \cdot 10^{-3} = 40,73 \text{ (кВт)}.$$

г) Розрахунок КПД перетворювача (у номінальному режимі)

$$\eta_{\text{тп}} = \frac{P_n \cdot 100}{P_n + \Delta P_{\text{тп}}} \% \quad (45)$$

Приклад.

$$\eta_{\text{тп}} = \frac{1000 \cdot 100}{1000 + 40,73} = 96,1 \%$$

7.2 Розрахунок вхідного коефіцієнта потужності тиристорного перетворювача

Розрахунок вхідного коефіцієнта потужності тиристорного перетворювача в номінальному режимі

а) Розрахунок кута комутації вентилів ТП

$$\gamma^0 = \begin{cases} 0, \text{ для ОМС;} \\ \left[\arccos \left(\cos \alpha_n - \frac{m \omega L_{\phi} I_{dH}}{\pi E_{d0}} \right) - \alpha_n \right] - \text{для ТНС, ТМС, НТМС, ДПС,} \end{cases} \quad (46)$$

де α_n — значення кута керування тиристорного перетворювача в номінальному режимі (відповідно до завдання:

Приклад.

$$\gamma^0 = \arccos \left(\cos 25^\circ - \frac{63140,0351 \cdot 10^{-3} \cdot 2273}{3.14567} \right) - 25^\circ = 9,73^\circ.$$

б) Розрахунок коефіцієнта перекручування вхідного струму ТП

Даний коефіцієнт являє собою відношення діючого значення $I_{1(d)}$ основної (першої) гармонійної складової вхідного фазного струму перетворювача до діючого значення I_d повного вхідного фазного струму ТП:

$$v = I_{1,d} / I_d.$$

Коефіцієнт перекручування вхідного фазного струму тиристорного перетворювача визначається приблизно зі співвідношень:

$$v \approx \begin{cases} \frac{2\sqrt{2}}{\pi} - \text{для ОМС;} \\ \frac{3}{\pi} \left(1 + \frac{\gamma}{4\pi} + \frac{\gamma^2}{24} \right) - \text{для ТНС, ТМС, НТМС, ДПС,} \end{cases} \quad (47)$$

де γ — кут комутації вентилів, виражений у радіанах:

$$\gamma = \frac{\pi\gamma^0}{180^\circ}. \quad (48)$$

Приклад.

$$\gamma = \frac{3,149,73}{180^\circ} = 0,17 \text{ рад};$$

$$v = \frac{3}{3,14} \left(1 + \frac{0,17}{43,14} + \frac{(0,17)^2}{24} \right) = 0,967.$$

в) Розрахунок вхідного коефіцієнта потужності ТП

$$K_M = \begin{cases} \nu \cos\left(\alpha_H + \frac{\gamma}{2}\right) - \text{для ОМС, ТНС, ТМС і ДПС} \\ 0,5\nu \left[\cos\left(\frac{\gamma}{2}\right) + \cos\left(\alpha_H + \frac{\gamma}{2}\right) \right] - \text{для НТМС;} \end{cases} \quad (49)$$

Примітка.

Для ОМС приймаємо: $\gamma^\circ = 0$.

Приклад.

$$K_M \approx 0,967 \cdot \cos(25^\circ + 9.73^\circ / 2) = 0,839.$$

8 РОЗРАХУНОК ЗАХИСНИХ RC-ЛАНЦЮГІВ ТИРИСТОРНОГО ПЕРЕТВОРЮВАЧА

8.1 Розрахунок RC-ланцюгів забезпечуючих захист ТП від комутаційних перенапруг

Комутаційні перенапруги виникають при комутації (відключенні) автоматичним вимикачем напруги вторинної обмотки силового трансформатора, а також при включенні й відключенні силового трансформатора. Схеми захисних RC-ланцюгів від комутаційних перенапруг показані на рис. 4.

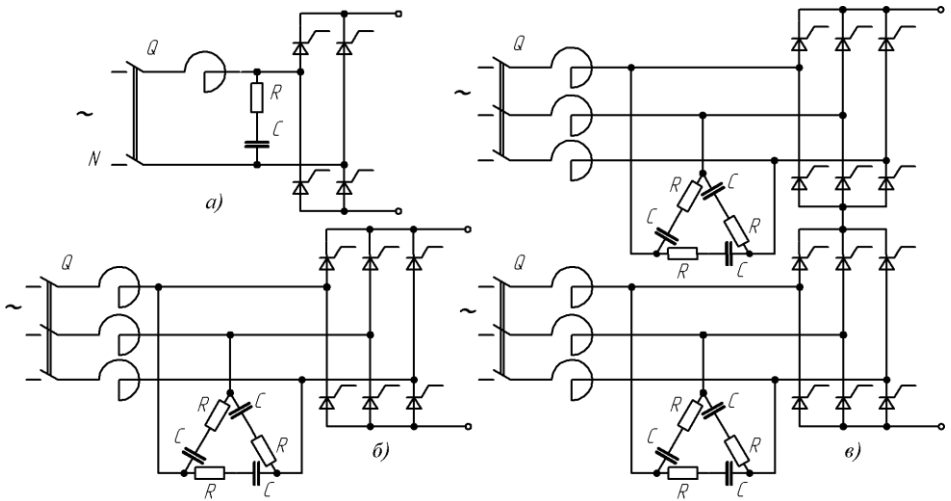


Рисунок 4. Схеми захисних RC-ланцюгів, від комутаційних перенапруг у ТП: а - для ОМС; б - для ТНС, ТМС і НТМС; в - для ДПС

а) Розрахунок номінального значення струму первинної обмотки силового трансформатора

$$I_{1нф} = \begin{cases} S_n / U_{1ф} & \text{— для ОМС;} \\ S_n / \sqrt{3}U_{1л} & \text{— для ТНС, ТМС, НТМС і ДПС,} \end{cases} \quad (50)$$

де $U_{1\phi}$ і $U_{1л}$ — відповідно фазне й лінійне номінальні напруги первинної обмотки силового трансформатора.

Приклад.

$$I_{1нф} = \frac{1600 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 10 \cdot 10^3} = 92,4 \text{ А}.$$

б) Розрахунок струму холостого ходу силового трансформатора

$$I_0 = I_{xx} I_{1нф}, \quad (51)$$

де I_{xx} — відносне значення струму холостого ходу, що приводить у паспортних даних для силового трансформатора (таблиця А.4).

Приклад.

$$I_0 = 0,9 \cdot 10^{-2} \cdot 92,4 \approx 0,832 \text{ (А)}.$$

в) Розрахунок ємності конденсатора захисного RC-ланцюга

$$C \geq \begin{cases} \frac{S_H I_0 10^4}{3\omega_1 (U_{тир.н}^2 - U_{тир.мах}^2)} \text{ мкФ} & \text{— для ТНС, ТМС і НТМС;} \\ \frac{S_H I_0 10^4}{6\omega_1 (U_{тир.н}^2 - U_{тир.мах}^2)} \text{ мкФ} & \text{— для ДПС;} \\ \frac{S_H I_0 10^4}{\omega_1 (U_{тир.н}^2 - U_{тир.мах}^2)} \text{ мкФ} & \text{— для ОМС,} \end{cases} \quad (52)$$

де $U_{тир.мах}$ і $U_{тир.н}$ — параметри, раніше розраховані в п. 5.1, б і п. 5.1, відповідно.

Приклад.

$$C = \frac{1600 \cdot 10^3 \cdot 0,832 \cdot 10^4}{3 \cdot 314 \left[1000^2 - 653^2 \right]} = 24,6 \text{ мкФ} .$$

г) Вибір конденсатора для захисного RC-ланцюга відкомутаційних перенапруг

При виборі зазначеного конденсатора варто керуватися наступним:

- орієнтуватися на застосування конденсаторів, що дозволяють працювати в ланцюгах змінного або пульсуючого струмів (наприклад, типу МБГЧ, КЧОУ-5, МБМ й ін.) [5];
- робоча (діюча) напруга конденсатора повинна перевищувати діючу напругу на вторинній обмотці силового трансформатора:

$$U_{c.роб} \geq \begin{cases} K_{стax} U_{2.лн} & \text{— для ТНС, ТМС, НТМС і ДПС;} \\ K_{стax} U_{2.фн} & \text{— для ОМС;} \end{cases} \quad (53)$$

- повинна бути обрана найближчої до розрахункового ємність конденсатора (перевищуюча її розрахункове з (51) значення):

$$C^* \geq C. \quad (54)$$

Примітка.

1) Якщо відсутній конденсатор з необхідною робочою напругою, що задовольняє умові (52), треба кілька конденсаторів з'єднати послідовно. При цьому напруга, прикладена до кожного конденсатора, зменшується пропорційно кількості встановлюваних послідовно конденсаторів. Одночасно із цим пропорційно кількості послідовно з'єднаних конденсаторів знижується сумарна ємність всіх конденсаторів.

2) Якщо відсутній конденсатор з необхідною ємністю, треба кілька конденсаторів установити паралельно. При цьому вибір робочої напруги конденсаторів відповідає умові (52), а сумарна ємність всіх паралельно з'єднаних конденсаторів збільшується прямо пропорційно їхній кількості.

3) При виборі ємності (сумарної ємності) конденсаторів допускається зі зменшення обраної ємності порушення умови (53). Одночасно із цим необхідно перерахувати (убік збільшення) і клас тиристорів (діодів) перетворювача по формулі: 37

$$U_{тир.н} \geq \begin{cases} \left[\frac{S_H I_0 10^{-2}}{3\omega_1 C} + U_{тирmax}^2 \right]^{1/2} & \text{— для ТНС, ТМС і НТМС;} \\ \left[\frac{S_H I_0 10^{-2}}{6\omega_1 C} + U_{тирmax}^2 \right]^{1/2} & \text{— для ДПС;} \\ \left[\frac{S_H I_0 10^{-2}}{\omega_1 C} + U_{тирmax}^2 \right]^{1/2} & \text{— для ОМС.} \end{cases} \quad (55)$$

Приклад 1.

Вибираємо з [5] конденсатор типу МБГЧ-500В-4мкф. Встановлюємо в паралель 7 штук даних конденсаторів:

$$U_{с.раб} = 500 \text{ (В)} \geq 1,1 \cdot 420 = 462 \text{ (В)};$$

$$C^* = 7 \cdot 4 = 28 \text{ (мкФ)} \geq C = 24,6 \text{ (мкФ)}.$$

Приклад 2.

Вибравши з [5] конденсатор того ж типу (МБГЧ-500У-4мкф), установимо сумарну кількість зазначених конденсаторів у розглянутому захисному RC-ланцюзі по 5 штук у паралель.

$$U_{с.раб} = 500 \text{ (В)} \geq 1,1 \cdot 420 = 462 \text{ (В)};$$

$$C^* = 5 \cdot 4 = 20 \text{ (мкФ)} < C = 24,6 \text{ (мкФ)}.$$

$$U_{тир.н} \geq \left[\frac{1600 \cdot 10^3 \cdot 0,832 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 314 \cdot 20 \cdot 10^{-6}} + (653)^2 \right]^{1/2} \approx 1064 \text{ В} .$$

Збільшимо до 11-го клас раніше обраного в п. 5.1 тиристор: Т253-1000-11 (з номінальною напругою 1100 В).

Приклад 3.

Виберемо з [5] конденсатор того ж типу (МБГЧ-500У-

4мкФ), установимо сумарну кількість зазначених конденсаторів рівним трьом.

$$U_{c.раб} = 500 \text{ (В)} \geq 1,1 \cdot 420 = 462 \text{ (В)};$$

$$C^* = 3 \cdot 4 = 12 \text{ (мкФ)} < C = 24,6 \text{ (мкФ)}.$$

$$U_{тир.н} \geq \left[\frac{1600 \cdot 10^3 \cdot 0,832 \cdot 10^{-2}}{3 \cdot 314 \cdot 12 \cdot 10^{-6}} + (653)^2 \right]^{1/2} \approx 1267 \text{ В}.$$

Збільшимо до 13-го класу обраного раніше в п. 5.1 тиристора: Т253-1000-13 (з номінальною напругою 1300 В).

У подальших розрахунках зупинимося на остаточному обраному варіанті ємності $C^* = 12$ мкФ (що відповідає трьом паралельно ввімкненим конденсаторам типу МБГЧ-500У-4мкФ).

д) Розрахунок опору резистора захисного RC-ланцюга відкомутаційних перенапруг.

Зазначений резистор забезпечує аперіодичний процес заряду конденсатора RC-ланцюга (чим виключаються перенапруги на тиристорах або діодах), значення даного резистора впливає зі співвідношення:

$$R^* \geq \sqrt[2]{\frac{L_{\phi}}{C^*}}$$

Приклад.

$$R^* \geq \sqrt[2]{\frac{0,0351 \cdot 10^{-3}}{12 \cdot 10^{-6}}} \approx 3,42 \text{ Ом}.$$

е) Розрахунок потужності резистора RC-ланцюга

$$P_R \geq \begin{cases} 0,001P_H / 9 - \text{для ТНС, ТМС і НТМС;} \\ 0,001P_H / 18 - \text{для ДПС;} \\ 0,001P_H / 5 - \text{для ОМС.} \end{cases} \quad (57)$$

Приклад.

$$P_R \geq 0,001 \cdot 1000 \cdot 10^3 / 9 = 111 \text{ (Вт)}.$$

ж) Вибір резистора захисного RC-ланцюга

Здійснюється відповідно до умов (55) і (56) зі

стандартного ряду існуючих опорів і потужностей резисторів типу: ПЭВ, МЛТ або 35-35 й ін. Стандартні ряди опорів і потужностей зазначених резисторів наведених у таблиці 8 і таблиці 9.

Приклад.

Вибираємо резистор ПЭВ-150Вт-3,6Ом±10% (опором 3,6 Ом, потужністю 150 Вт).

8.2 Розрахунок RC-ланцюгів, що забезпечують захист ТП, від робочих перенапруг

Схема захисних RC-ланцюгів, що запобігає робочі перенапруги на тиристорах (діодах) перетворювача (викликані включенням і вимиканням сусідніх тиристорів або діодів), показана на рис.5.

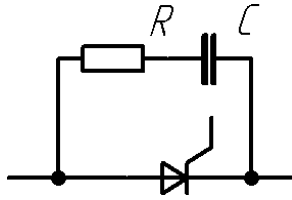


Рисунок 5. Схема захисного ланцюга від робочих перенапруг у ТП

а) Розрахунок ємності конденсатора захисного RC-ланцюга

$$C \geq \frac{n U_{\kappa} E_{d0}^2 \tau_{восст}^2 \sin^2(\alpha + \gamma)}{9 \omega_1 L_{\phi} I_{тир.н} U_{тир.н}} 10^6 \text{ мкФ} \quad (58)$$

де $\tau_{восст}$ — час відновлення замикаючих властивостей тиристора (варто прийняти в розрахунках $\tau_{восст} = 35$ мкс);

$I_{тир.н}$ і $U_{тир.н}$ — номінальні (паспортні) значення струму й напруги тиристора перетворювача;

n — число паралельно з'єднаних тиристорів перетворювача;

γ — кут комутації вентилів ($\gamma = 0$ — для ОМС).

Приклад.

$$C \geq \frac{2 \cdot 6 \cdot 10^{-2} \cdot 567 \cdot 2 \cdot 35 \cdot 2 \cdot 10^{-12} \cdot \sin^2(25^\circ + 9,73^\circ)}{9 \cdot 314 \cdot 0,0351^2 \cdot 10^{-6} \cdot 1000 \cdot 1300} \cdot 10^6 = 3,39 \text{ мкФ}$$

б) Вибір конденсатора захисного RC-ланцюга

При виборі конденсатора захисного RC-ланцюга від робочихперенапруг варто керуватися наступним:

- застосовувати ті ж типи конденсаторів, що встановлюються в захисних RC-ланцюгах від комутаційних перенапруг (розглянуті в п. 8.1,г);
- вибір робочої напруги конденсатора здійснювати з умови:

$$U_{c, \text{раб}} \geq U_{\text{тир max}} / \sqrt{2}, \quad (59)$$

де $U_{\text{тир max}}$ — максимальна напруга, що прикладає в робочих режимах тиристорного перетворювача до закритого тиристора (розраховане з п. 5.1,б);

- вибрати конденсатор з найближчим значенням ємності, що перевищує розрахункове значення з (57):

$$C^* \geq C. \quad (60)$$

Приклад.

Вибираємо конденсатор МБГЧ-500В-4мкф, що задовольняє умовам:

$$U_{c, \text{раб}} = 500 \text{ В} \geq 653 / \sqrt{2} = 462 \text{ В};$$

$$C^* = 4 \text{ (мкФ)} \geq C = 3,39 \text{ (мкФ)}.$$

в) Розрахунок опору резистора захисного RC-ланцюга

$$R \geq \frac{U_{\text{тир.н}} L_{\phi}}{E_{\text{до}} \tau_{\text{воєст}} \sin \alpha_n + \gamma}. \quad (61)$$

Приклад.

$$R \geq \frac{1300 \cdot 0,0351 \cdot 10^{-3}}{567,35 \cdot 10^{-6} \sin 25^{\circ} + 9,73^{\circ}} \approx 4,04 \text{ Ом}.$$

г) Розрахунок потужності резистора захисного RC-ланцюга (від робочих перенапруг)

$$P_R \geq \Delta P_{RC} / N, \quad (62)$$

де ΔP_{RC} — втрати потужності в RC-ланцюгах перетворювача, раніше розраховані в п. 7.1,а;

N — загальна кількість захисних RC-ланцюгів у перетворювачі, що перебуває у вигляді:

$$N = \begin{cases} 5 - \text{для ОМС;} \\ 6 - \text{для ТНС;} \\ 9 - \text{для ТМС та НТМС;} \\ 18 - \text{для ДПС.} \end{cases} \quad (62)$$

Приклад.

$$P_R \geq 1 \cdot 10^3 / 9 = 111 \text{ (Вт)}.$$

д) Вибір резистора захисного RC-ланцюга (від робочих перенапруг на тиристорі)

Здійснюється аналогічно описаному раніше в п. 8.1,ж.

Приклад.

Вибираємо резистор ПЭВ-150 Вт-4,3 Ом \pm 10%.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Комплектные тиристорные электроприводы: Справочник / И.Х. Евзеров, А.С. Городец, Б.И. Мошкович и др. Под ред. В.М. Перельмутера. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — 319 с.
2. Чиженко И.М., Руденко В.С., Сенько В.И. Основы преобразовательной техники. — М.: Высшая школа, 1974. — 430 с.
3. Справочник по проектированию электропривода, силовых и осветительных установок. Под ред. Я.М. Большама, В.И. Круповича, М.Л. Самовера. Изд. 2-е, перераб. и доп. — М.: Энергия, 1974.
4. Замятин В.Я., Кондратьев Б.В., Петухов Б.В. Мощные полупроводниковые приборы. Тиристоры. — М.: Радио и связь, 1987.
5. Электрические конденсаторы и конденсаторные установки: Справочник / В.П. Берзан, Б.Ю. Геликман, М.Н. Гураевский и др. Под ред. Г.С. Кучинского. — М.: Энергоатомиздат, 1987. — 656 с.
6. Графическое изображение электрорадиосхем: Справочник / С.Т. Усатенко, Т.К. Каченюк, М.В. Терехова. — К.: Техніка, 1986. — 120 с.

ДОДАТОК А

Таблиця А.1 - Варіанти завдань для курсового проекту з "Електроніки іамікротехніки"

№ вар.	Ном. пот. P_n [кВт]	Ном. напруга U_n [В]	Индук. наван. L_n [мГн]	Схема КВ
1	1	110	4,5	ОМС
2	2	110	3,0	ОМС
3	3	110	1,8	ОМС
4	4	110	2,5	ОМС
5	5,5	110	2,0	ОМС
6	7,5	110	1,5	ОМС
7	10	220	1,2	ТНС
8	13	220	1,1	ТНС
9	16	220	1,0	ТНС
10	22	220	0,9	ТНС
11	30	220	0,8	ТНС
12	40	220	0,5	ТМС
13	55	220	0,25	ТМС
14	75	220	0,15	ТМС
15	90	220	0,1	ТМС
16	110	440	0,12	ТМС
17	130	440	0,1	ТМС
18	160	440	0,08	ТМС
19	220	440	0,05	ТМС
20	270	440	0,04	ТМС
21	360	440	0,035	ТМС
22	400	440	0,03	ТМС
23	500	440	0,02	ТМС
24	630	440	0,015	ТМС
25	630	600	0,015	ТМС

№ вар.	Ном.пот. P_n [кВт]	Ном. напруга U_n [В]	Индук. наван. L_n [мГн]	Схема КВ
1	1	110	4,5	ОМС
2	2	110	3,0	ОМС
3	3	110	1,8	ОМС
4	4	110	2,5	ОМС
5	5,5	110	2,0	ОМС
6	7,5	110	1,5	ОМС
7	10	220	1,2	ТНС
8	13	220	1,1	ТНС
9	16	220	1,0	ТНС
10	22	220	0,9	ТНС
11	30	220	0,8	ТНС
12	40	220	0,5	ТМС
13	55	220	0,25	ТМС
14	75	220	0,15	ТМС
15	90	220	0,1	ТМС
16	110	440	0,12	ТМС
17	130	440	0,1	ТМС
18	160	440	0,08	ТМС
19	220	440	0,05	ТМС
20	270	440	0,04	ТМС
21	360	440	0,035	ТМС
22	400	440	0,03	ТМС
23	500	440	0,02	ТМС
24	630	440	0,015	ТМС
25	630	600	0,015	ТМС

Таблиця А.2 - Види схем тиристорних перетворювачів постійного струму

Умовне позначення	Назва схеми	Схема ТП постійного струму
ОМС	Однофазна мостова	
ТНС	Трьохфазна нульова	
ТМС	Трьохфазна мостова	
НТМС	Несимметрична трьохфазна мостова	
ДПС	Дванадцяти-пульсна	

Таблиця А.3 - Задані значення коефіцієнта пульсацій струмунавантаження

Тип схеми ТП	ОМС	ТНС	ТМС, НТМС		ДПС
			$P_H < 1000 \text{ кВт}$	$P_H \geq 1000 \text{ кВт}$	
Значення ξ , %	10	7	5	3	1

Таблиця А.4 - Дані силових трансформаторів

а) трифазні двообмоткові

№	Потужність, кВА	$U_{1л}$, кВ	Втрати, кВт		U_K , %	I_{XX} , %
			ΔP_{XX}	ΔP_{K3}		
1	4	0,38	0,12	0,2	4,7	16
2	6,3	0,38	0,13	0,32	4,7	14
3	10	0,38	0,135	0,4	5	12
4	16	0,38	0,14	0,55	5,2	10
5	25	0,38	0,21	1,1	5,5	8
6	40	0,38	0,27	1,5	5,5	7
7	63	0,38	0,33	1,9	5,5	6
8	100	0,66	0,44	2,3	5,8	5
9	160	0,66	0,795	2,4	4,5	4
10	250	0,66	0,915	3,7	4,7	3
11	400	6	1,6	4,7	5,6	2
12	630	6	2	5,6	5,9	1,7
13	100	6	2,65	8	5,5	1,2
14	1600	10	3,4	13,5	6	0,9
15	2500	10	4,8	14	5,2	1,1
16	4000	10	6,4	25	4,5	1

б) трифазні триобмоткові

№	Потужність, кВА	$U_{1л}$, кВ	Втрати, кВт		U_K , %	I_{XX} , %
			ΔP_{XX}	ΔP_{K3}		
1	3200	10	5,45	35	5,7	0,9
2	5000	10	7	40	6	0,9
3	8000	10	9,8	67	6,3	0,9

в) однофазні

№	Потужність, кВА	$U_{1л}$, кВ	Втрати, кВт		U_K , %	I_{XX} , %
			ΔP_{XX}	ΔP_{K3}		
1	2	0,38	0,03	0,06	4,2	18
2	4	0,38	0,04	0,07	4,7	16
3	6,3	0,38	0,042	0,11	4,7	14
4	10	0,38	0,045	0,13	5	12
5	16	0,38	0,047	0,18	5,2	10
6	25	0,38	0,07	0,37	5,5	8

Дані на триполюсні автоматичні вимикачі

Таблиця А.5 - Автоматичні вимикачі серії АП50Б (на номінальну робочу напругу 380, 500 й 660В)

Номінальний робочий струм вимикача, А	Час вимикання (за незалежним розчеплювачем), с	Струмова комутаційна здатність, кА		
		$U_{раб} = 380В$	$U_{раб} = 500В$	$U_{раб} = 660В$
16	0,05	5,1	6	1,4
25	0,05	5,1	6	1,7
40	0,05	8,5	6	1,7
50	0,05	8,5	6	1,7
63	0,05	10	6	1,7

Таблиця А.6 - Автоматичні вимикачі серії ВА50 (на номінальну робочу напругу 660В)

Тип вимикача	Номінальний робочий струм, А	Струмова комутаційна здатність, кА	Час вимикання (занезалежним розчеплювачем), с
ВА51-31	100	5	0,04
ВА52-33	160	8	0,04
ВА51-35	250	10	0,04
ВА51-37	400	12	0,04
ВА51-39	630	20	0,04
ВА53-43	1000	47,5	0,04

Таблиця А.7 - Автоматичні вимикачі серії "Електрон" (на номінальну робочу напругу 660В)

Тип вимикача	Номінальний робочий струм, А	Струмова комутаційна здатність, кА	Час вимикання (занезалежним розчеплювачем), с
Э10М	1000	70	0,01
Э25М	2500	70	0,01
Э40М	4000	104	0,01

Примітка. Дані на автоматичні вимикачі серії А3700 (на струми 160, 250, 400, 630А і напруги 380 й 660 В) приведені у довіднику Перельмутера В.М. “Комплектные тиристорные электроприводы”. — М.: Энергоатомиздат, 1988. — С. 182-192.

Таблиця А.8 - Стандартний ряд значень опорів резисторів

R [10 ^к ·Ом]	1	1,1	1,3	1,5	1,8	2	2,2	2,5	2,7	3	3,3	3,6	3,9
R [10 ^к ·Ом]	4,3	4,5	4,7	5,1	5,6	6,2	6,8	7,5	8,2	8,5	9,1	9,6	

К=0, 1, 2, 3, ... — натуральне число.

Таблиця А.9 - Стандартний ряд потужностей

P [Вт]	1*	2*	5	7,5	10	15	25	40	50	75	100	150	200	300	500
--------	----	----	---	-----	----	----	----	----	----	----	-----	-----	-----	-----	-----

* — для резисторів типів МЛТ и С5-35 (останні значення для резисторів типу ПЭВ)

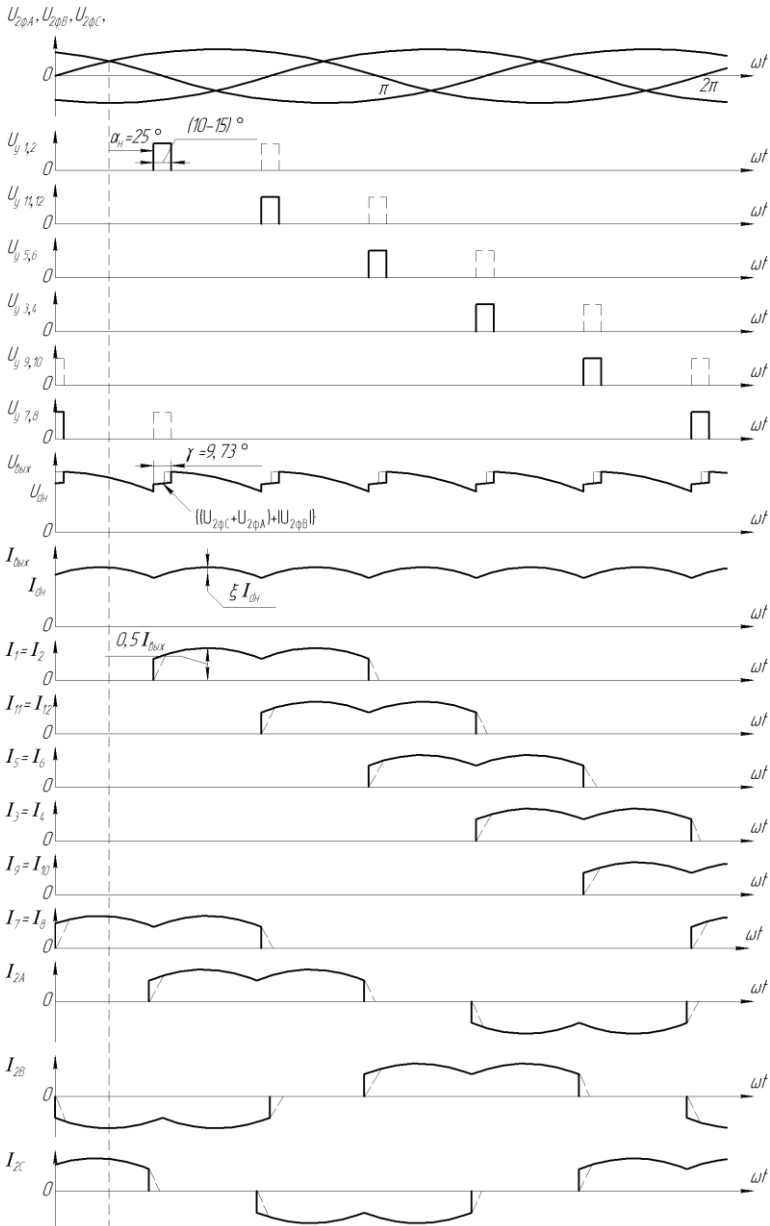


Рисунок А.2. Приклад оформлення тимчасових діаграм роботи тиристорного перетворювача