

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Донецький національний університет економіки і  
торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

**О.В. Омельченко**

**ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

**Методичні рекомендації  
до виконання курсової роботи**

Ступінь: бакалавр

**Кривий Ріг  
2020**

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
Донецький національний університет економіки і  
торгівлі імені Михайла Туган-Барановського

Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

**О. В. Омельченко**

## **ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

### **Методичні рекомендації до виконання курсової роботи**

Ступінь: бакалавр

Затверджено на засіданні  
кафедри загальноінженерних  
дисциплін та обладнання  
Протокол № 8  
від «20» січня 2020 р.

Схвалено навчально-  
методичною радою ДонНУЕТ  
Протокол № 5  
від «28» лютого 2020 р.

**Кривий Ріг  
2020**

УДК 621(076)  
О 57

**Омельченко О.В.**

**О 57** Електрообладнання енергетичних установок [Текст] : метод. рекомендації до виконання курсової роботи / О.В. Омельченко; Донец. нац. ун-т економіки і торгівлі ім. М. Туган-Барановського, каф. загальноінженерних дисциплін та обладнання. – Кривий Ріг : ДонНУЕТ, 2020. – 66 с.

В методичних рекомендаціях до виконання курсової роботи з дисципліни «Електрообладнання енергетичних установок» визначено ціль, задачі, загальні вимоги до виконання та оформлення курсової роботи.

**УДК 621(076)**

© Омельченко О.В., 2020  
© Донецький національний університет економіки і торгівлі імені Михайла Туган-Барановського, 2020

## ЗМІСТ

Передмова	5
1. Загальні рекомендації щодо виконання курсової роботи	6
2. Тематика курсових робіт	6
3. Завдання розрахункової частини курсової роботи	17
4. Структура і зміст курсової роботи	46
5. Оформлення курсової роботи	48
6. Критерії оцінювання курсової роботи	48
7. Рекомендована література	51
Додатки	52

## ПЕРЕДМОВА

Курсову роботу з дисципліни «Електрообладнання енергетичних установок» виконують студенти як підсумок при завершенні вивчення дисципліни. Курсова робота навчає студентів працювати з технічною літературою, розвиває навички самостійного отримання і накопичення знань. Виконання курсової роботи з дисципліни «Електрообладнання енергетичних установок» є важливим засобом формування у студентів фахових компетентностей.

*Мета виконання курсової роботи* – здобуття студентами навиків самостійної роботи і закріплення знань та умінь, що одержані при вивченні спеціальних дисциплін, а також формування навиків самостійного рішення задач при проектуванні систем керування енергетичними установками. Курсова робота дає можливість установити ступінь засвоєння навчального матеріалу та вміння студентів застосовувати знання, а також підготувати студентів до вивчення подальших дисциплін.

Робота студента над літературою вчить його логічно мислити, узагальнювати опрацьований матеріал, викладати свої думки з приводу прочитаного і творчо пов'язувати теорію із практикою. Така робота дає студентам навички наукового пошуку і самостійного викладу тексту курсової роботи.

# 1. ЗАГАЛЬНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ ЩОДО ВИКОНАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Процес виконання курсової роботи складається з декількох етапів:

1. Вибір теми курсової роботи, визначення її структури та попередні розрахунки відповідно до заданої конструкції установки.
2. Робота зі спеціальною технічною вітчизняною та зарубіжною технічною літературою, довідковими даними за обраною темою.
4. Оформлення курсової роботи.
5. захист курсової роботи.

Кожний вид роботи має часові межі згідно з індивідуальним графіком (Додаток), що надається кожному студенту та потребує узгодження з керівником курсової роботи. Невиконання графіку може спричинити зниження оцінки за курсову роботу.

Загальні вимоги до курсової роботи:

- актуальність;
- високий теоретичний рівень роботи;
- комплексність дослідження;
- самостійність та оригінальність конструкторського рішення;
- використання реальних даних;
- точність, грамотність оформлення роботи;
- практична значущість результатів, обґрунтованість висновків та пропозицій.

## 2. ТЕМАТИКА КУРСОВИХ РОБІТ

Вибір теми курсової роботи погоджується з керівником. Тематика курсових робіт з дисципліни «Електрообладнання енергетичних установок» видається викладачем.

Курсова робота складається з теоретичної, аналітичної, проблемно-питальної та практично-розрахункової частин. Номер завдання з кожної теми курсової роботи визначається викладачем. Слід мати на увазі, що роботи, які не відповідають тематиці курсових робіт, рецензуванню не підлягають. Якщо у студента виникають складнощі з виконанням роботи, він може звернутися на кафедру за роз'ясненням (на консультаціях за розкладом викладача-керівника) або дозволом на зміну завдання.

Автор проекту повинен дати аналіз режимів роботи електропривода на базі вихідних даних:

- номінальна потужність електродвигуна, який підключається на вихід перетворювача;
- номінальна напруга електродвигуна;
- вид струму електродвигуна (постійний або змінний);
  - номінальний к.к.д. і коефіцієнт потужності (для змінного струму) електродвигуна;
- напруга живлення перетворювача;
- вид струму живлення (постійний або змінний);
- частота змінного струму живлення;

- діапазон регулювання напруги на виході перетворювача;
- діапазон регулювання частоти на виході перетворювача змінного струму;
- необхідність реверсу швидкості електродвигуна.

У результаті аналізу режимів роботи електропривода та вищенаведених факторів повинні бути сформульовані висновки про вибір необхідного типу перетворювача.

Однофазна мостова і трифазна нульова схеми через нерівномірне завантаження мережі і завищену потужність трансформатора знаходять використання в електроприводах малої (до 10 кВт) потужності. В промислових електроприводах середньої (від 10 до 2000 кВт) і великої (від 2000 до 25000 кВт) потужності знаходять використання мостові схеми.

Реверсивні тиристорні перетворювачі на відміну від нереверсивних мають, як правило, два нереверсивні перетворювача.

Нижче (рис. 2.1–рис. 2.24) наведені найбільш поширені схеми тиристорних перетворювачів змінного струму в постійний. У табл. 2.1 наведені коефіцієнти співвідношення струмів і напруг у схемах перетворювачів.

Таблиця 2.1. Розрахункові коефіцієнти різних схем перетворювачів

№ з/п	Тип схеми перетворювача	$k_U$	$k_{I_2}$	$k_S$	$k_B$	$k_D$	$k_1$	$k_2$
	Однофазна мостова	0,9	1,0	1,11	1,57	1,41	1,11	0,9
	Трифазна нульова $Y(\Delta)/Y_H$	1,17	0,577	1,345	2,09	0,62	1,21	0,827
	Трифазна нульова $Y(\Delta)/Z_H$	1,17	0,577	1,46	2,09	0,62	1,21	0,827
	Трифазна нульова перехресна	1,17	0,577	2,09	2,09	0,7	1,21	0,827
	H-схема з послідовним включення двох трифазних нульових груп для кожного напрямку	2,34	0,577	1,345	1,045	0,7	1,21	0,827
	Трифазна мостова зустрічно-паралельна	2,34	0,817	1,045	1,045	0,62	1,05	0,955
	Трифазна мостова перехресна	2,34	0,817	1,571	1,045	0,18	1,05	0,955

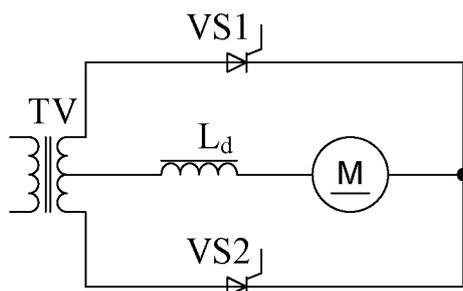


Рис. 2.1. Однофазна двонапівперіодна нульова схема

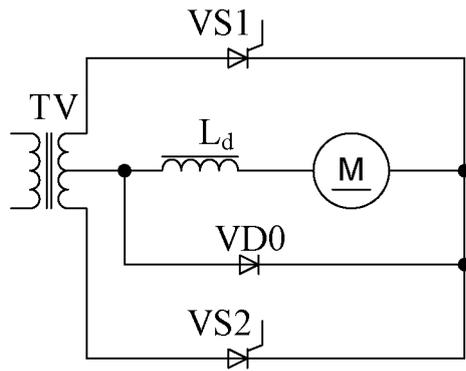


Рис. 2.2. Однофазна двонапівперіодна нульова схема з нульовим вентилем

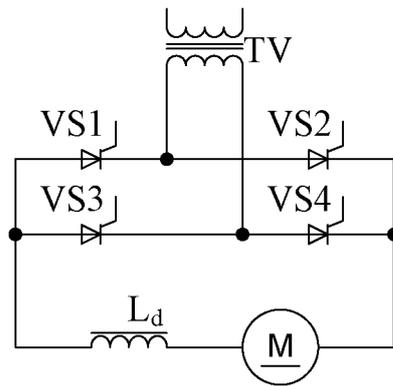


Рис. 2.3. Однофазна мостова схема

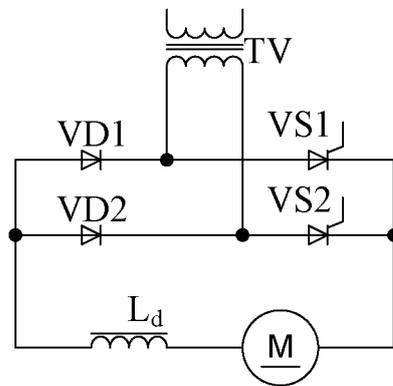


Рис. 2.4. Однофазна мостова несиметрична схема

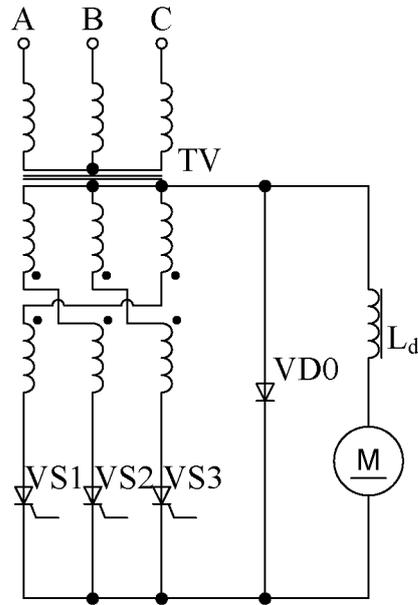


Рис. 2.5. Трифазна схема з нульовим вентилям (Y/Z<sub>н</sub>)

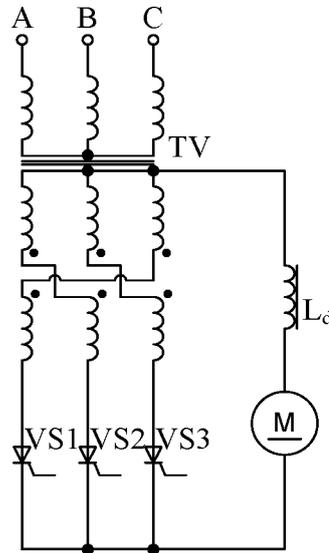


Рис. 2.6. Трифазна нульова схема (Y/Z<sub>н</sub>)

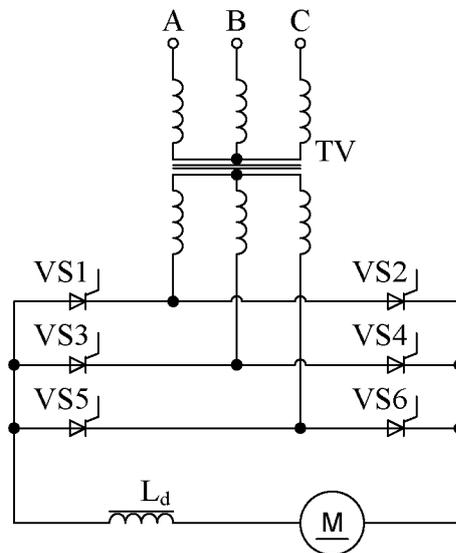


Рис. 2.7. Трифазна мостова симетрична схема

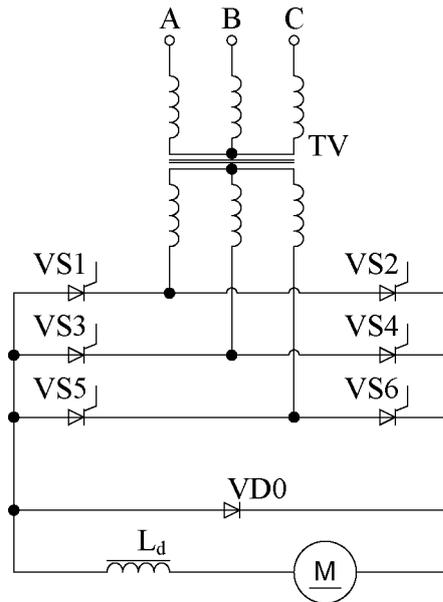


Рис. 2.8. Трифазна мостова симетрична схема з нульовим вентилем

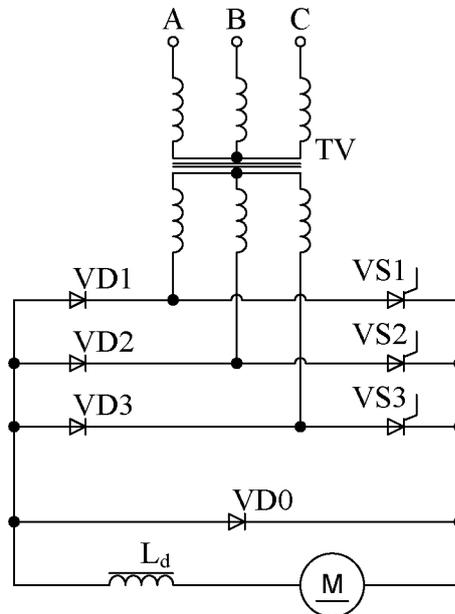


Рис. 2.9. Трифазна мостова несиметрична схема

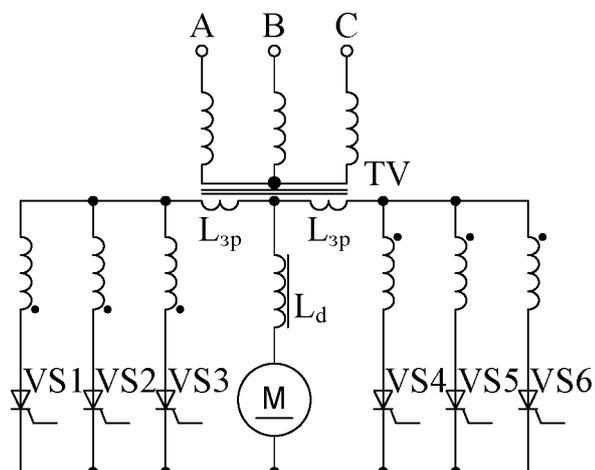


Рис. 2.10. Шестифазна схема зі зрівнювальним реактором

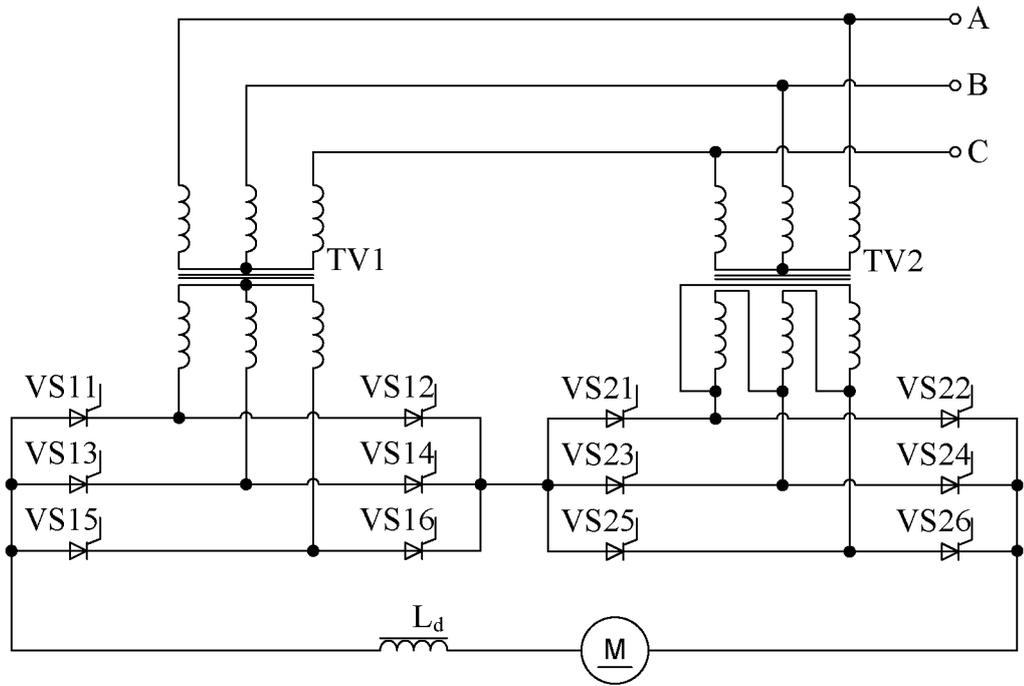


Рис. 2.11. Двомостова схема з послідовним включенням мостів

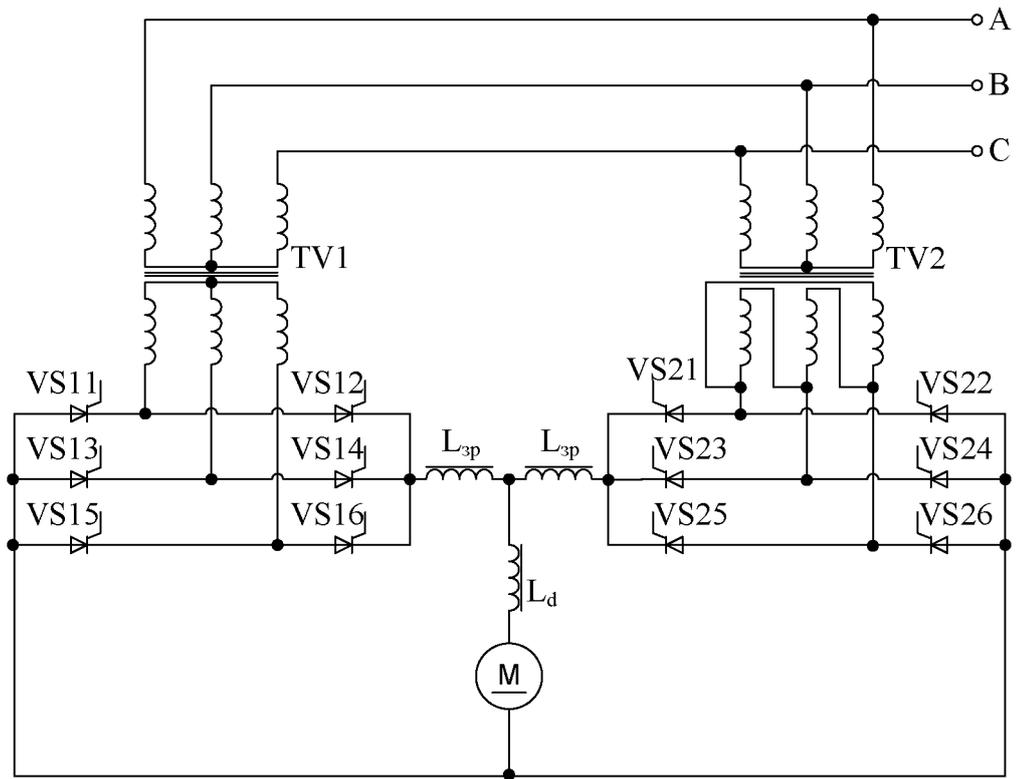


Рис. 2.12. Двомостова схема з паралельним включенням мостів

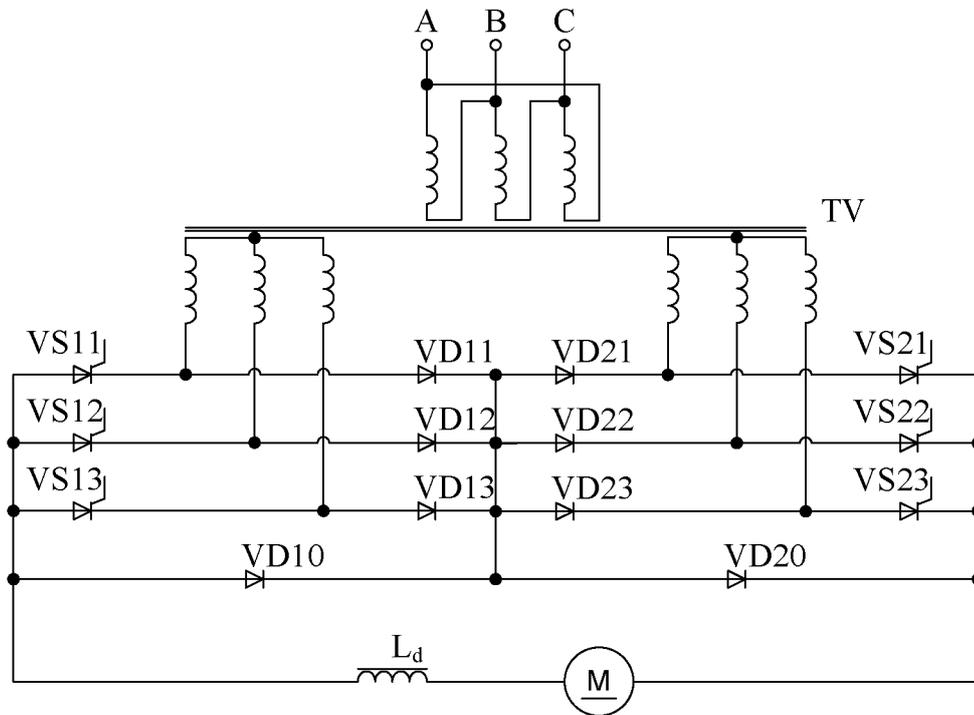


Рис. 2.13. Двомостова несиметрична схема

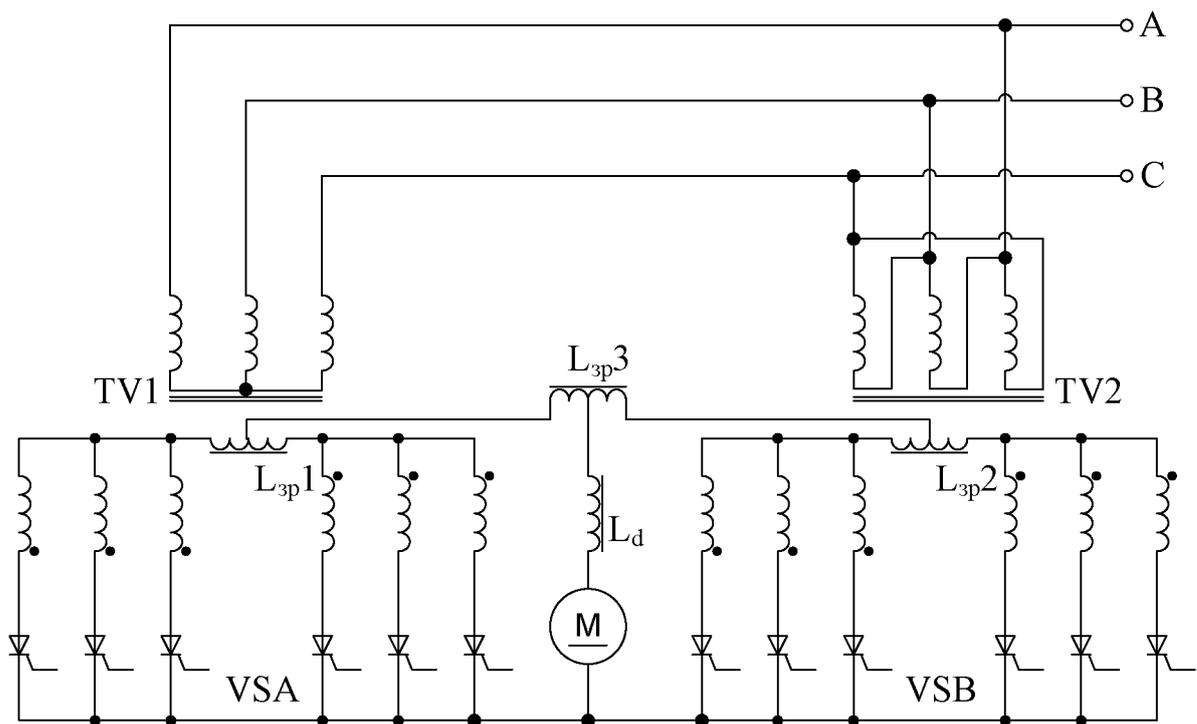


Рис. 2.14. Комбінована з паралельним включенням двох шестифазних схем зі зрівнювальним реактором

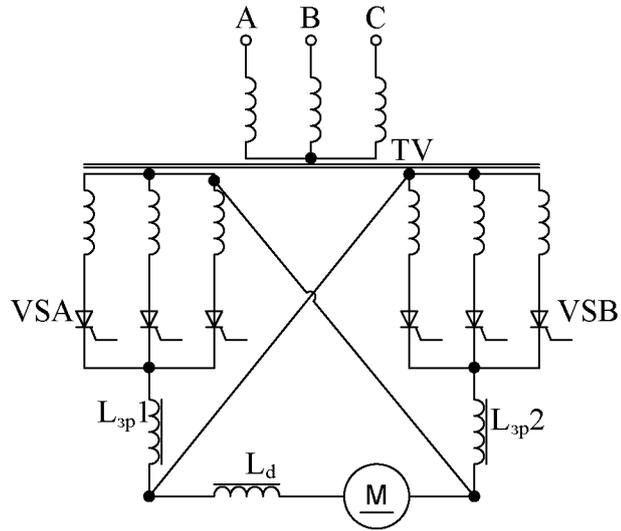


Рис. 2.15. Трифазна перехресна нульова

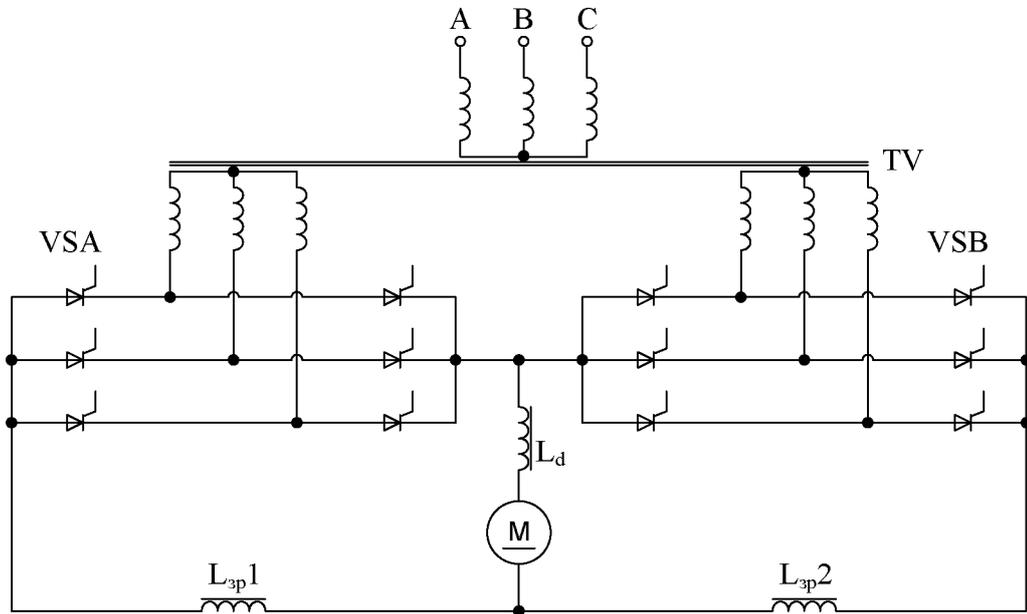


Рис. 2.16. Трифазна перехресна мостова

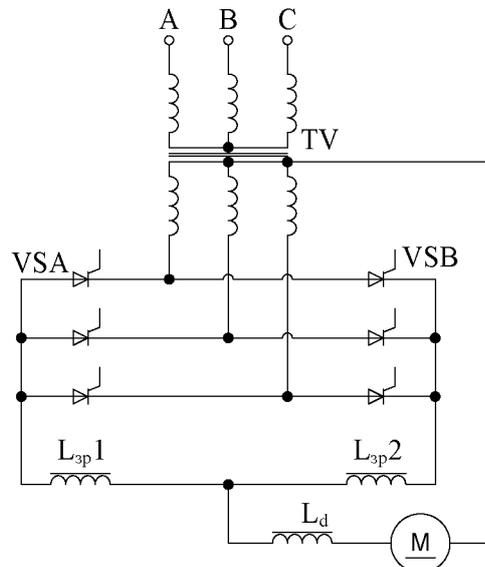


Рис. 2.17. Трифазна зустрічно-паралельна нульова

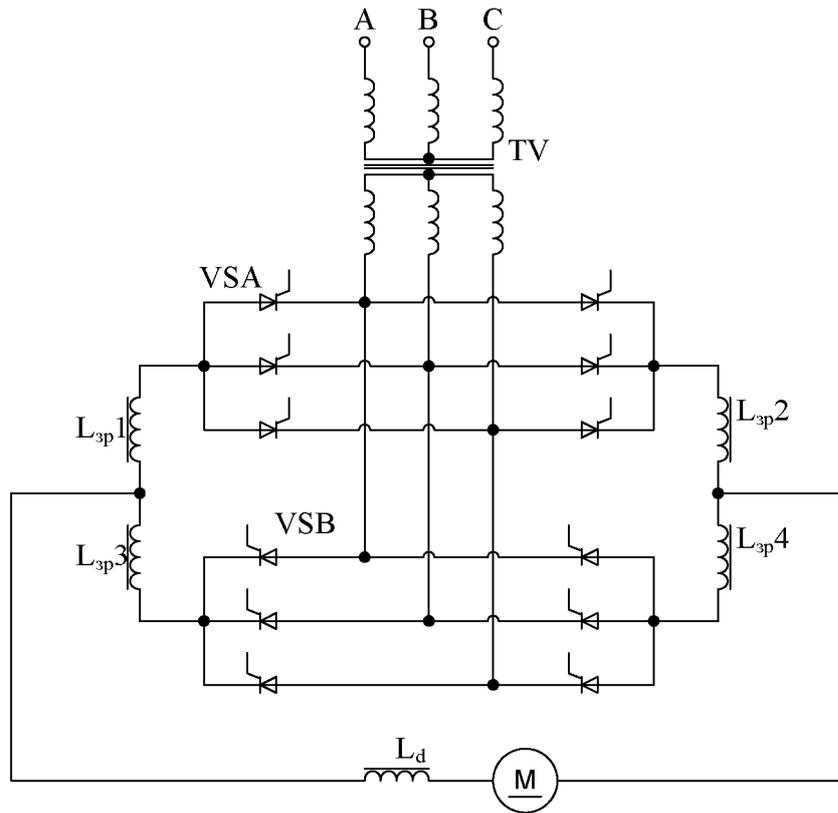


Рис. 2.18. Трифазна зустрічно-паралельна мостова

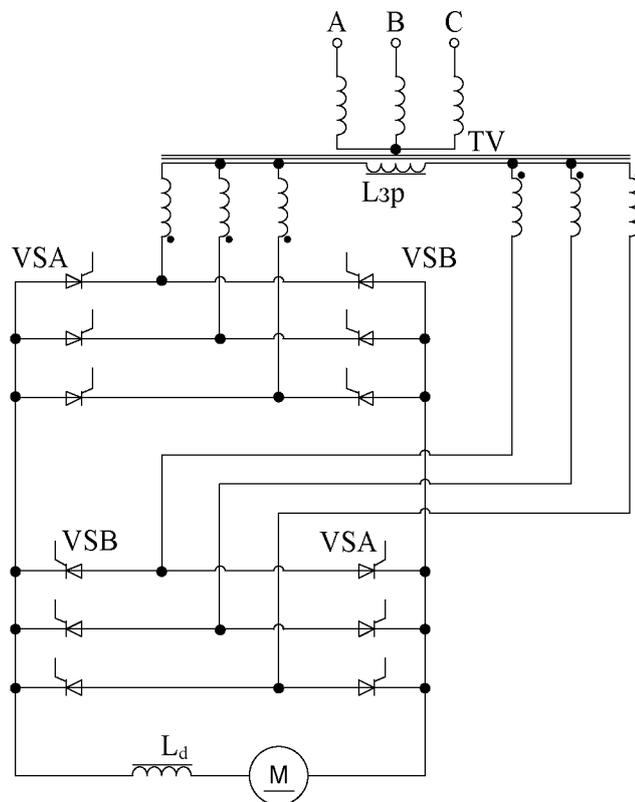


Рис. 2.19. H-схема з послідовним включення двох трифазних нульових груп для кожного напрямку

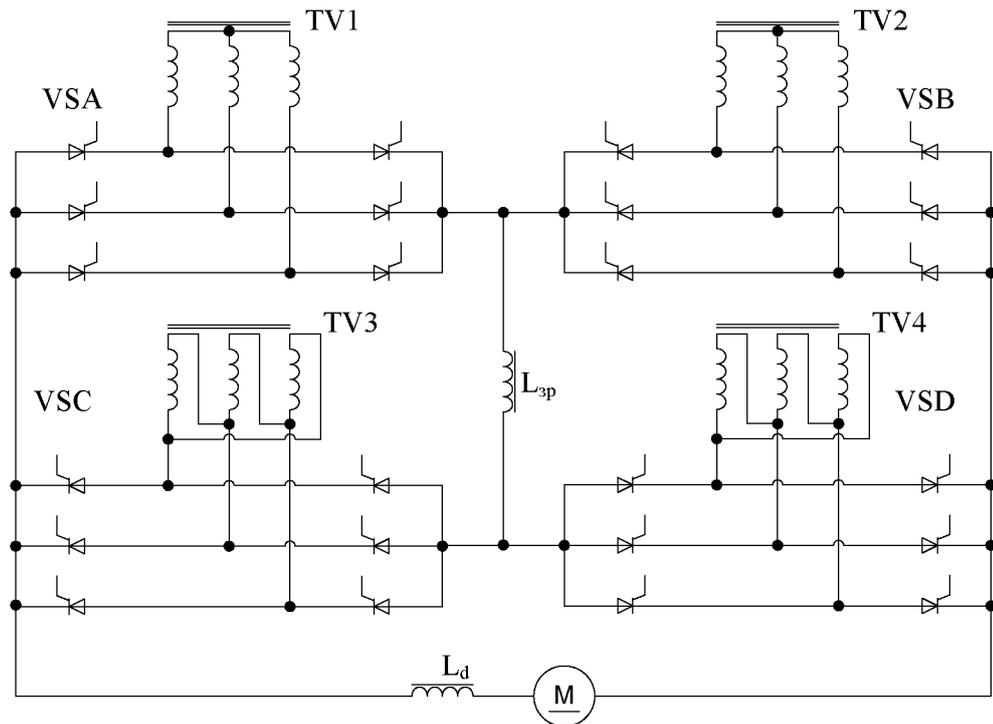


Рис. 2.20. Н-схема з послідовним включенням двох трифазних мостових груп для кожного напрямку

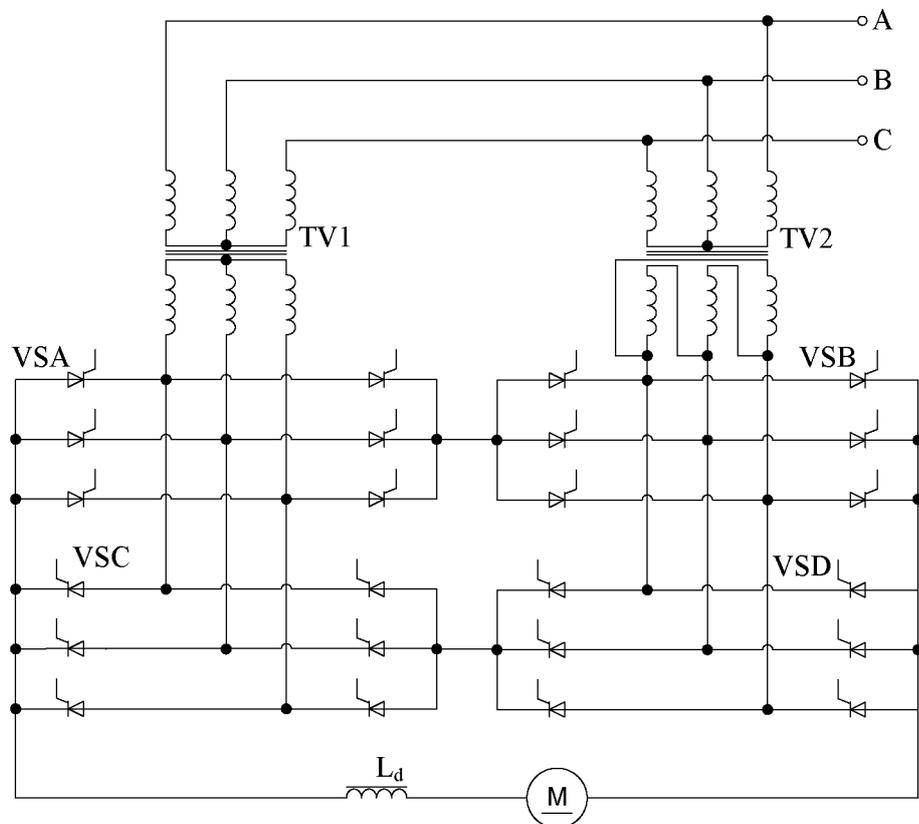


Рис. 2.21. Зустрічно-паралельна з послідовним з'єднанням двох трифазних мостових схем для одного напрямку

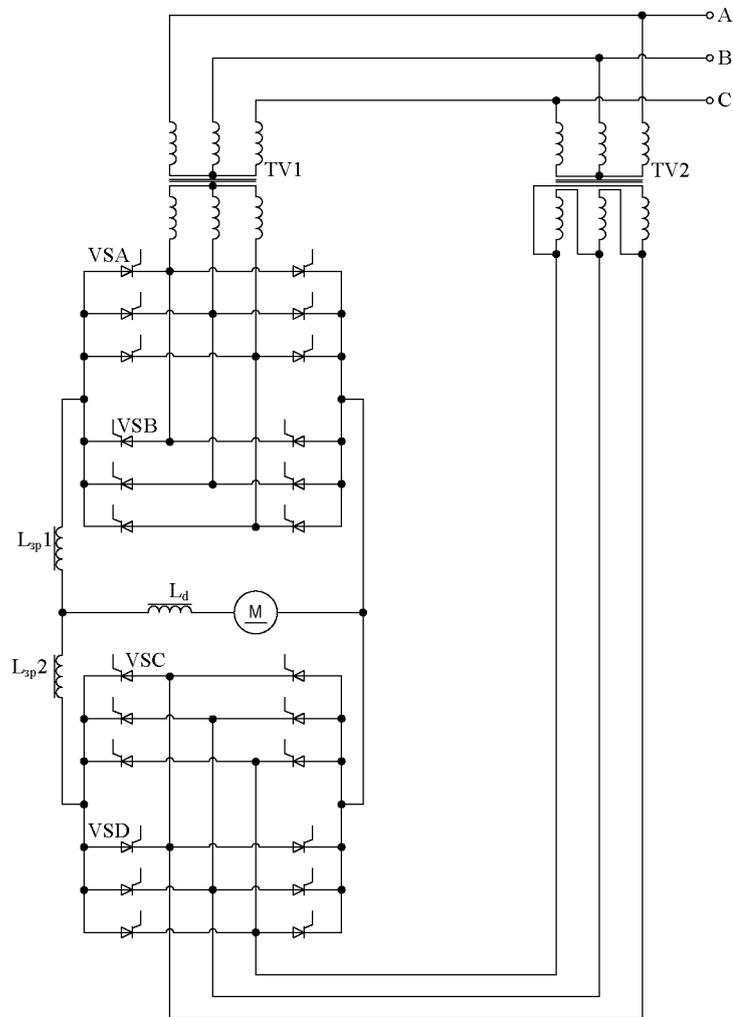


Рис. 2.22. Зустрічно-паралельна з паралельним з'єднанням двох трифазних мостових схем для одного напрямку

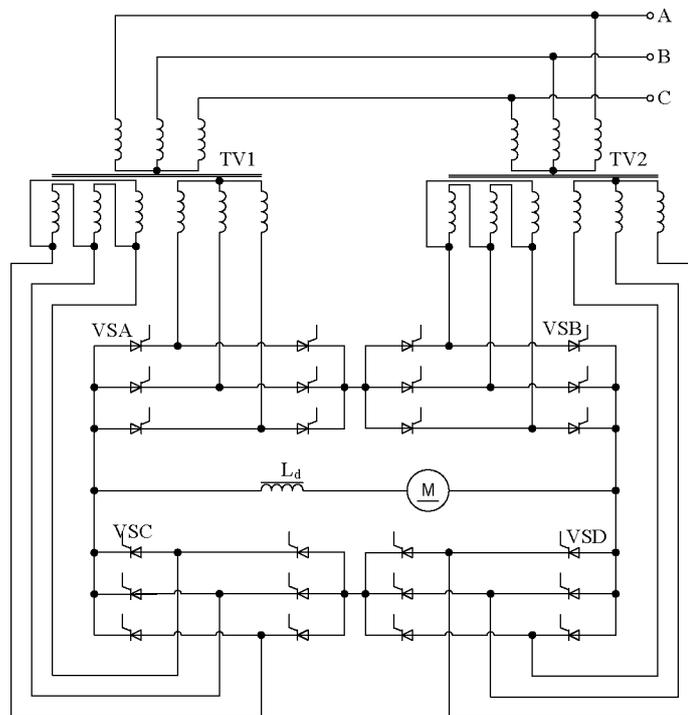


Рис. 2.23. Перехресна з послідовним з'єднанням двох трифазних мостових схем для одного напрямку

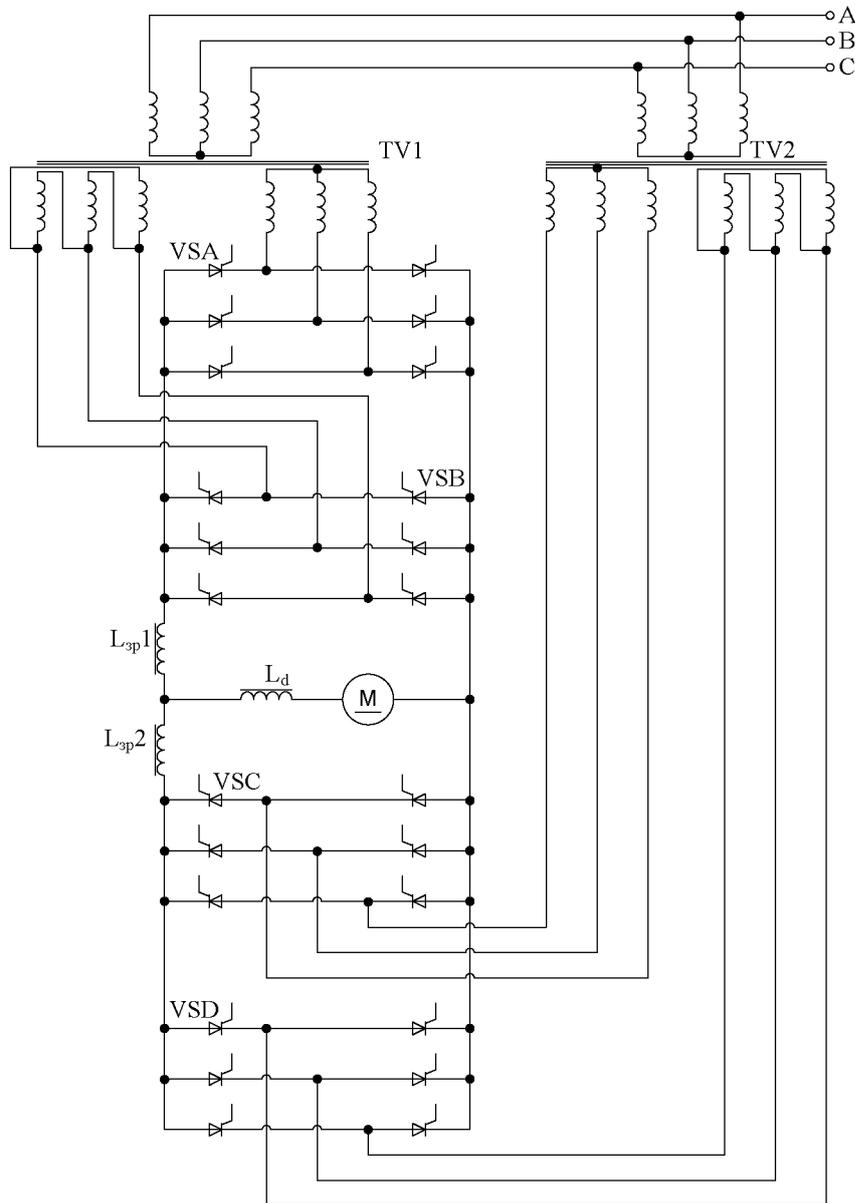


Рис. 2.24. Перехресна з паралельним з'єднанням двох трифазних мостових схем для одного напрямку

### 3. ЗАВДАННЯ РОЗРАХУНКОВОЇ ЧАСТИНИ КУРСОВОЇ РОБОТИ

**3.1. Аналіз режимів роботи електропривода, технічних вимог до перетворювача, обґрунтування і визначення типу перетворювача**

#### 3.1.1. Розрахунок та вибір перетворювального трансформатора

Трансформатор застосовується для погодження напруги мережі живлення і напруги живлення перетворювача.

Розрахункове значення напруги вторинної фазної обмотки трансформатора:

$$U_{2\phi} = k_3 k_\gamma k_R \frac{U_{dH}}{k_U}, \quad (3.1)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт урахування зниження напруги мережі живлення;  $k_3 = 1,05-1,1$ ;

$k_\gamma$  – коефіцієнт урахування комутації та асиметрії вихідної напруги;  $k_\gamma = 1,05$ ;

$k_R$  – коефіцієнт урахування падіння напруги на тиристорах і на обмотках трансформатора (реактора);  $k_R = 1,05$ ;

$k_U$  – коефіцієнт схеми перетворювача за напругою (табл. 2.1);

$$k_U = \frac{U_d}{U_{2\phi}}; \quad (3.2)$$

$U_{dn}$  – номінальна напруга на виході перетворювача.

Розрахункова потужність силового трансформатора визначається:

$$S_m = k_S k_U U_{2\phi} I_{dn}, \quad (3.3)$$

де  $k_S$  – коефіцієнт схеми перетворювача за потужністю (табл. 2.1);

$$k_S = \frac{S_m}{P_d}; \quad (3.4)$$

$I_{dn}$  – номінальний вихідний струм перетворювача.

Найбільше середнє значення е.р.с. перетворювача розраховується за

$$U_{d0} = k_U U_{2\phi}. \quad (3.5)$$

Діюче значення лінійного струму перетворювача визначається, як

$$I_2 = k_{I2} I_{dn}, \quad (3.6)$$

де  $k_{I2}$  – коефіцієнт схеми перетворювача за струмом (табл. 2.1);

$$k_{I2} = \frac{I_2}{I_d}. \quad (3.7)$$

Діюче значення лінійного струму первинної обмотки трансформатора

$$I_1 = \frac{k_{I1} I_{dn}}{k_m}, \quad (3.8)$$

де  $k_{I1}$  – коефіцієнт схеми перетворювача за струмом (табл. 2.1);

$$k_{I1} = \frac{I_1}{I_d}, \quad (3.9)$$

$k_m$  – розрахунковий коефіцієнт трансформації;

$$k_m = \frac{U_{1\phi}}{U_{2\phi}}, \quad (3.10)$$

$U_{1\phi}$  – діюче значення напруги первинної фазної обмотки трансформатора.

У відповідності до отриманих значень  $S_m$ ,  $U_{1\phi}$ ,  $U_{2\phi}$ ,  $I_1$ ,  $I_2$  та схемою перетворювача вибирають відповідний трансформатор. Потім з урахуванням параметра  $U_{2\phi}$  реального трансформатора уточнюють значення ЕРС  $U_{d0}$ .

### 3.1.2. Розрахунок та вибір струмообмежуючого реактору

У безтрансформаторних перетворювачах, коли напруга мережі живлення співпадає з напругою живлення перетворювача замість трансформатора використовують трифазні лінійні реактори, які обмежують комутаційні та аварійні струми. Оскільки реактори не повинні зменшувати свою індуктивність при струмах короткого замикання, то вони виконуються без магнітопроводів.

Індуктивний опір фази реактора вибирають за умови:

$$X_p = (0,05 \dots 0,1) \frac{U_{2\phi}}{I_2}, \quad (3.11)$$

де  $U_{2\phi}$ ,  $I_2$  – напруга і струм, які визначені згідно формул, наведених вище для розрахунку трансформатора.

Необхідне значення індуктивності фази реактора визначається

$$L_p = \frac{X_p}{\omega_m}, \quad (3.12)$$

де  $\omega_m$  – кругова частота мережі живлення.

За визначеними значеннями  $I_2$ ,  $L_p$  і напруги мережі живлення вибирають стандартний струмообмежуючий реактор.

### 3.1.3. Розрахунок та вибір тиристорів

Вибір тиристорів виконують за середнім значенням струму, який протікає через нього, і за величиною прикладеної повторної імпульсної напруги.

Розрахункове середнє значення струму тиристора визначається за формулою:

$$I_{vc} = \frac{I_{dh}}{m}, \quad (3.13)$$

де  $m=3$  для трифазних схем перетворювачів;

$m=2$  для однофазних схем перетворювачів.

Найбільше розрахункове значення повторної імпульсної напруги на тиристорах визначається:

$$U_{vm} = k_B U_{d0}, \quad (3.14)$$

де  $k_B$  – коефіцієнт схеми перетворювача за повторною напругою перетворювача (табл. 2.1).

Тип тиристора вибираємо за  $U_{vm}$  та  $I_{vc}$  (середнє значення струму тиристора з урахуванням коефіцієнтів запасу за струмом та типом охолодження):

$$I_{vc-z} = \frac{k_{zi}}{k_{ox}} I_{vc}, \quad (3.15)$$

де  $k_{zi}=2,2-2,5$  – коефіцієнт запасу за струмом з урахуванням збільшення струму навантаження в перехідних режимах;

$k_{ox}$  – коефіцієнт, який враховує інтенсивність охолодження ( $k_{ox}=0,3-0,35$  – для природного охолодження;  $k_{ox}=1,0$  – для примусового охолодження).

Слід враховувати, що при  $I_{dh}<300$  А застосовують природне охолодження тиристорів, а при  $I_{dh}>300$  А – примусове повітряне або водяне охолодження. Значення повторної напруги після поділення на 100 визначає клас тиристора.

### 3.1.4. Розрахунок та вибір згладжуючих реакторів

Для зменшення пульсацій струму перетворювача і звуження зони перервних струмів у якірний ланцюг двигуна включають згладжуючий реактор.

Необхідна величина індуктивності якірного ланцюга визначається:

$$L_d = \frac{U_{d1m}}{\sqrt{2m\omega_m I_1^* I_{dh}}}, \quad (3.16)$$

де  $U_{d1m}$  – амплітуда основної гармоніки вихідної напруги;

$m_n$  – кратність пульсацій вихідної напруги;  $m_n=3$  для нульових трифазних схем;  $m_n=6$  для мостових трифазних схем;  $m_n=2$  для мостових однофазних схем;  $m_n=12$  для мостових 12-фазних схем;

$I_1^*$  – допустиме відносне діюче значення основної гармоніки вихідного струму перетворювача;

$\omega_m$  – кругова частота мережі живлення.

Величина амплітуди основної гармоніки вихідної напруги визначається:

$$U_{d1m} = \frac{2U_{d0} \cos \alpha_n}{m^2 - 1} \sqrt{1 + m^2 \operatorname{tg}^2 \alpha_n}, \quad (3.17)$$

де  $\alpha_n$  – кут керування перетворювача, який відповідає номінальній напрузі

$$\alpha_n = \arccos \frac{U_{dn}}{U_{d0}}. \quad (3.18)$$

Також є спрощена формула для визначення індуктивності  $L_d$  для обмеження пульсацій струму:

$$L_d \geq \frac{8,8U_{dn}}{1000\delta_n I_{dn}}, \quad (3.19)$$

де  $\delta_n$  – допустима величина пульсації струму двигуна, %.

Індуктивність згладжуючого реактора визначається

$$L_p = L_d - L_{\delta\delta}, \quad (3.20)$$

де  $L_{\delta\delta}$  – індуктивність якоря електродвигуна, яка визначається:

$$L_{\delta\delta} = \frac{\gamma U_{\delta\delta n}}{p \omega_{\delta\delta n} I_{\delta\delta n}}, \quad (3.21)$$

де  $\gamma$  – коефіцієнт компенсованості двигуна;  $\gamma=0,25$  – для компенсованих і  $\gamma=0,6$  – для некомпенсованих двигунів;

$p$  – число пар полюсів електродвигуна;

$\omega_{\delta\delta n}, U_{\delta\delta n}, I_{\delta\delta n}$  – номінальні параметри електродвигуна.

За розрахованими значеннями індуктивності  $L_d$  і струму перетворювача  $I_{dn}$  вибирають типовий згладжуючий реактор.

### 3.1.5. Розрахунок та вибір зрівнювальних реакторів

При сумісному керуванні тиристорними мостами в реверсивних перетворювачах у контури зрівнювального струму з метою обмеження його величини включають зрівнювальні реактори.

Величина сумарної індуктивності  $L_{zp}$  контуру зрівнювального струму визначається:

$$L_{zp} = k_D \frac{U_{2m}}{\omega_m I_{zp}}, \quad (3.22)$$

де  $k_D$  – коефіцієнт максимального діючого значення зрівнювального струму реверсивного перетворювача (табл. 2.1);

$U_{2m}$  – амплітуда фазної напруги (для трифазної зустрічно-паралельної схеми, трифазної і шестифазної нульової перехресної схеми) і лінійної напруги (для трифазної мостової перехресної схеми);

$\omega_m$  – кругова частота мережі живлення;

$I_{zp}$  – діюче значення зрівнювального струму (приймається 10 % від номінального струму).

За розрахованими значеннями індуктивності  $L_{zp}$  і зрівнювального струму перетворювача  $I_{zp}$  вибирають типовий реактор.

### 3.1.6. Розрахунок та вибір елементів захисту від перенапруг

Під час комутацій на вентиль діють короточасні періодичні та однократні перенапруги, для обмеження яких застосовують спеціальні захисні пристрої.

Для захисту від зовнішніх перенапруг, які виникають під час включення і відключення перетворювального трансформатора, застосовують додатковий діодний випрямляч, навантажений на  $RC$  контур (рис. 3.251).

Параметри  $C7$ ,  $R1$ ,  $R2$  визначають за формулами:

$$\begin{aligned} C7 &= (20 \div 60) \frac{S_{2mp}}{U_{2mp}^2}; \\ R7 &= 170 \frac{U_{2mp}}{i_{xx} I_{2mp}}; \\ R8 &= \frac{1 \div 3}{C1}, \end{aligned} \quad (3.23)$$

де  $S_{2mp}$ ,  $U_{2mp}$ ,  $I_{2mp}$  – номінальні значення потужності, напруги і струму вторинної обмотки перетворювального трансформатора;

$i_{xx}$  – значення намагнічуючого струму трансформатора, приведене до вторинної обмотки у відсотках.

Розрахункова потужність опорів  $R7$ ,  $R8$  визначається за формулами:

$$P_{R7} = 60 R7 \left( \frac{U_2}{R7 + R8} \right)^2, \quad (3.24)$$

$$P_{R8} = 2 R8 \left( \frac{U_2}{R7 + R8} \right)^2, \quad (3.25)$$

Для захисту вентилів від комутаційних перенапруг, які обумовлені накопиченням носіїв у напівпровідниковій структурі, паралельно вентилям включають захисні  $RC$  ланцюги ( $R1$ – $R6$ ,  $C1$ – $C6$  на рис. 3.253.1), параметри яких вибирають:

$$C1 = (0,25 \div 1) \text{ мкФ} \quad (3.26)$$

$$R1 = (10 \div 30) \text{ Ом.} \quad (3.27)$$

Причому більші значення ємності та менші значення опорів відповідають перетворювачам більшої потужності.

Розрахункова потужність опору  $R1-R6$  вибирається в межах:

$$P_{R1} = (100 \div 200)C2U_{DRM}^2 \quad (3.28)$$

де  $U_{DRM}$  – допустима амплітуда зворотної напруги вентиля (0).

На основі розрахованих ємностей конденсаторів, опорів резисторів, їх потужностей і робочих напруг виконується вибір цих елементів із довідників.

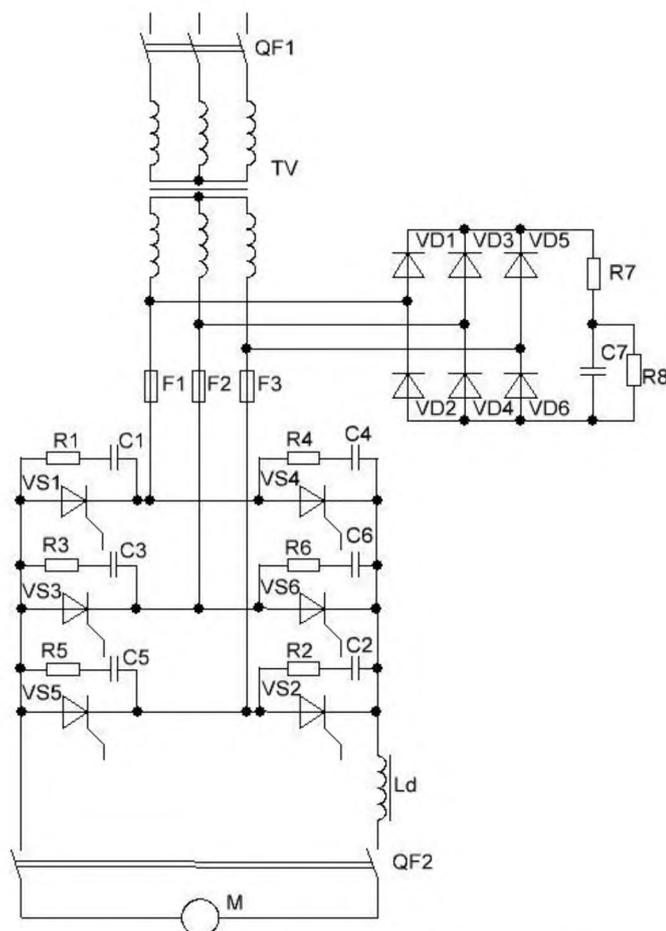


Рис. 3.25. Схема перетворювача з елементами захисту

### 3.1.7. Розрахунок та вибір елементів захисту від аварійних струмів

Захист тиристорного перетворювача від внутрішніх коротких замикань забезпечується плавкими запобіжниками шляхом погодження їх амперсекундних характеристик з амперсекундними характеристиками вентилів. При цьому для будь-якого моменту часу допустимий струм вентиля повинен бути більшим струму роботи захисту  $I_{зax}$ , отже

$$I_e \geq I_{зax} \quad (3.29)$$

або

$$\left( \int i^2 dt \right)_e \geq \left( \int i^2 dt \right)_{зax} \quad (3.30)$$

де  $\left( \int i^2 dt \right)_e$ ,  $\left( \int i^2 dt \right)_{зax}$  – максимально допустиме значення інтегралів квадрату аварійного струму вентиля та пристрою захисту, відповідно.

Захист тиристорного перетворювача від аварійних струмів під час зовнішніх коротких замикань і зривів інвертування забезпечується

автоматичними вимикачами, які встановлюються в ланцюгах постійного і змінного струму (рис. 3.25).

Для захисту використовують автоматичні вимикачі типу АЗ700, ВАТ-42, ВАТ-46, ВАТ-48, ВА51-ВА56, а також швидкодіючі запобіжники ПНБ-5, ПП-57. Вибір цих пристроїв виконують за номінальним струмом і номінальною напругою, а також перевіряють за інтегралом ( $\int i^2 dt$ ).

Значення інтегралу ( $\int i^2 dt$ )<sub>е</sub> визначається за формулою

$$\left(\int i^2 dt\right)_e = 0,5I^2t_i, \quad (3.31)$$

де  $I$  – значення ударного струму вентиля для заданої тривалості перевантаження  $t_i = 10$  мс.

Поряд з розглянутими, в тиристорних перетворювачах застосовують швидкодіючі пристрої за керуючим електродом, які зсувають імпульси керування до межі інверторного режиму

$$\alpha_e \leq \alpha_{\max}. \quad (3.32)$$

Це зменшує похідну струму під час аварії та полегшує відключення аварійного струму.

### 3.1.8. Розрахунок та побудова зовнішніх та регулювальних характеристик перетворювача

Середнє значення вихідної напруги тиристорного перетворювача є функцією двох змінних: струму навантаження  $I_d$  і кута керування  $\alpha$ , зв'язок між якими встановлюється такими рівняннями (без урахування падіння напруги на вентилях і активних опорах силових ланцюгів):

– у режимі безперервного струму навантаження ( $I_d > 0$ ;  $\lambda > 2\pi/m_2$ )  
для симетричних схем

$$U_d = U_{d0} \cos \alpha - \left( \frac{m_2 x_T}{2\pi} + r_T + r_d \right) (I_d - I_{ep}), \quad (3.33)$$

для несиметричних схем

$$U_d = U_{d0} \frac{\cos \alpha + 1}{2} - \left( \frac{m_2 x_T}{2\pi} + r_T + r_d \right) (I_d - I_{ep}), \quad (3.34)$$

– у режимі граничного струму ( $I_d = I_{ep}$ ;  $\lambda = 2\pi/m_2$ )

$$\begin{aligned} U_{ep} &= U_{d0} \cos \alpha; \\ I_{ep} &= \frac{U_{d0}}{x_T + x_d} \left( 1 - \frac{\pi}{m_2} \operatorname{ctg} \frac{\pi}{m_2} \right) \sin \alpha; \end{aligned} \quad (3.35)$$

– у режимі уривчастого струму навантаження ( $I_d < I_{ep}$ ;  $\lambda < 2\pi/m_2$ )

$$\begin{aligned} U_d &= \frac{U_{2m}}{\lambda} \left[ \sin \left( \lambda + \alpha - \frac{\pi}{m_2} \right) - \sin \left( \alpha - \frac{\pi}{m_2} \right) \right]; \\ I_d &= \frac{m_2}{2\pi} \frac{U_{2m}}{(x_T + x_d)} \left[ \cos \left( \alpha - \frac{\pi}{m_2} \right) - \cos \left( \lambda + \alpha - \frac{\pi}{m_2} \right) \right] \left( 1 - \frac{\lambda}{2} \operatorname{ctg} \frac{\lambda}{2} \right), \end{aligned} \quad (3.36)$$

де  $x_T = \omega_m L_T$  – приведений до вторинної обмотки індуктивний опір розсіювання фази трансформатора;  
 $x_d = \omega_m L_d$  – індуктивний опір якріного ланцюгу;  
 $r_T, r_d$  – активний опір фаз трансформатору і згладжуючого реактору;  
 $\lambda$  – кут провідності вентилів на інтервалі повторювання кривої напруги  $U_d$ ;  
 $U_{2m}$  – амплітуда фазної напруги (для нульових схем) і лінійної напруги (для мостових схем).

Наведені формули дозволяють побудувати зовнішні характеристики  $U_d = f(I_d)$  перетворювачів для  $\alpha = 0; 30; 45; 60$  ел.град. На рис. 3.26 наведений вид зовнішніх характеристик.

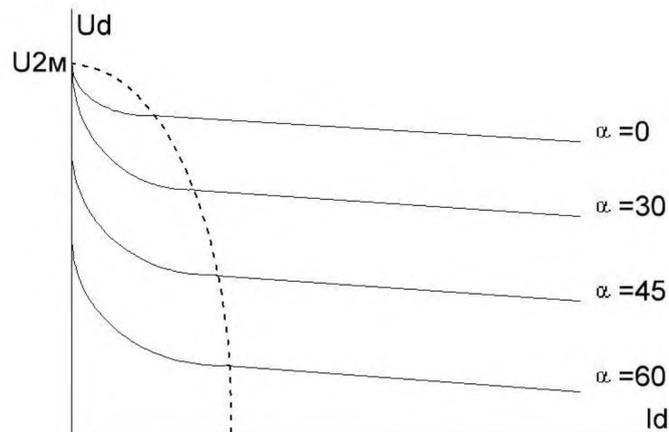


Рис. 3.26. Зовнішні характеристики тиристорних перетворювачів

Регульовальні характеристики  $U_d = f(\alpha)$  можуть бути побудовані для  $I_d = const$ .

Вісь ординат зовнішні характеристики перетинають при  $I_d = 0$  у точках:

$$- \text{при } \alpha \leq \frac{\pi}{m_2}$$

$$U_d = U_{2m} \quad (3.37)$$

$$- \text{при } \alpha > \frac{\pi}{m_2}$$

$$U_d = U_{2m} \cos\left(\alpha - \frac{\pi}{m_2}\right) \quad (3.38)$$

Під час роботи перетворювача в інверторному режимі система керування повинна обмежувати величину кута керування для запобігання перекидання інвертора. Це призводить до обмеження струму навантаження  $I_d$  у залежності від величини напруги  $U_d$  перетворювача, яке визначається обмежувальною характеристикою:

$$U_d = -U_{d0} \cos(\delta + \psi) + \frac{m_2 x_T}{2\pi} I_d, \quad (3.39)$$

де  $\delta = \omega_m t_q$  – кутова тривалість виключення тиристора;

$t_q$  – час виключення тиристора;

$\psi$  – кут урахування асиметрії імпульсів керування;  $\psi = 3$  ел.град.

Мінімальне значення кута інвертування  $\beta_{\min}$  визначається

$$\beta_{\min} = \arccos \left[ \cos(\delta + \psi) - \frac{m_2 x_T I_d}{\pi(1 - \Delta U_1^*) U_{d0}} \right] \quad (3.40)$$

де  $\Delta U_1^*$  - відносне зниження напруги після трансформатора перетворювача;  $\Delta U_1^* = 0,1$ .

### 3.1.9. Розрахунок та побудова енергетичних характеристик перетворювача

Цей пункт включає в себе побудову діаграми струму мережі, спектральний аналіз отриманої кривої, побудову спектру гармонік  $I_{(k)} = f(k)$  (для симетричних схем) або зміну рівнів гармонік струму від кута керування  $I_{(k)} = f(\alpha)$  (для несиметричних схем) та побудову графіків залежності складових потужності від кута керування: активна складова –  $P(\alpha)$ ; реактивна складова, викликана зсувом першої гармоніки струму відносно напруги живлення –  $Q(\alpha)$ ; реактивна складова, викликана спотворенням форми струму живлення –  $P_c(\alpha)$ ; повна потужність  $S_1(\alpha)$  і побудову графіків залежності коефіцієнту потужності  $k_n$ , коефіцієнту зсуву  $k_s$  та коефіцієнту спотворення  $k_c$ .

Враховуючи те, що аналіз однофазних схем досить простий, студентам надається можливість виявити творчі здібності у вирішенні поставленої задачі.

У табл. 3. наведені вирази для найбільш поширених схем перетворювачів (без урахування процесів комутації).

Таблиця 3.1. Вирази для розрахунку гармонік струму

№ з/п	Схема	Вирази
1.	Трифазна нульова	$A_{I_{1(k)}} = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{2I_d}{\pi k} \sin k \frac{\pi}{3} \cos k \left( \alpha + \frac{\pi}{2} \right);$ $B_{I_{1(k)}} = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{2I_d}{\pi k} \sin k \frac{\pi}{3} \sin k \left( \alpha + \frac{\pi}{2} \right).$
2.	Трифазна мостова симетрична	$A_{I_{1(k)n}} = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{4I_d}{\pi k} \sin k \alpha \cos k \pi \sin k \frac{\pi}{2} \sin k \frac{\pi}{3};$ $B_{I_{1(k)n}} = -\frac{1}{k_m} \cdot \frac{4I_d}{\pi k} \cos k \alpha \cos k \pi \sin k \frac{\pi}{2} \sin k \frac{\pi}{3}.$
3.	Трифазна мостова несиметрична	$A_{I_{1(k)}} = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{2I_d}{\pi k} \sin k \frac{\pi}{3} \left[ \cos k \left( \alpha + \frac{\pi}{2} \right) - \cos \left( k \frac{\pi}{2} \right) \right];$ $B_{I_{1(k)}} = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{2I_d}{\pi k} \sin k \frac{\pi}{3} \left[ \sin k \left( \alpha + \frac{\pi}{2} \right) - \sin \left( k \frac{\pi}{2} \right) \right].$
4.	Еквівалентна 12-фазна	$A_{I_{1(k)}} = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{4I_{dn}}{\pi k} \sin k \alpha \cos k \pi \sin k \frac{\pi}{2} \sin k \frac{\pi}{3} \left( \frac{2\sqrt{3}}{3} \cos k \frac{\pi}{6} + 1 \right);$

№ з/П	Схема	Вирази
		$B_{I1(k)} = \frac{1}{k_m} \cdot \frac{4I_{dn}}{\pi k} \cos k\alpha \cos k\pi \sin k \frac{\pi}{2} \sin k \frac{\pi}{3} \left( \frac{2\sqrt{3}}{3} \cos k \frac{\pi}{6} + 1 \right).$

Діюче значення кожної гармоніки визначатиметься:

$$I_{1(k)} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{(A_{I1(k)})^2 + (B_{I1(k)})^2}. \quad (3.41)$$

Діюче значення первинного струму:

$$I_1 = \sqrt{\sum_{k=1}^{\infty} I_{1(k)}^2}. \quad (3.42)$$

Повна потужність, яка споживається з мережі, без урахування втрат:

$$S_1 = 3U_1 I_1. \quad (3.43)$$

Активна потужність

– для симетричних схем:

$$P = U_{d0} I_d \cos \alpha; \quad (3.44)$$

– для несиметричних схем:

$$P = U_{d0} I_d \frac{\cos \alpha + 1}{2}. \quad (3.45)$$

Реактивна складова потужності, викликана зсувом першої гармоніки струму відносно напруги мережі живлення

– для симетричних схем:

$$Q = U_{d0} I_d \sin \alpha; \quad (3.46)$$

– для несиметричних схем:

$$Q = U_{d0} I_d \frac{\sin \alpha}{2}. \quad (3.47)$$

Реактивна складова потужності, викликана спотворенням кривої струму:

$$P_c = \sqrt{S_1^2 - (P^2 + Q^2)}. \quad (3.48)$$

Коефіцієнт зсуву:

$$k_s = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}}. \quad (3.49)$$

Коефіцієнт спотворення:

$$k_c = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S_1}. \quad (3.50)$$

Коефіцієнт потужності:

$$k_n = k_s k_c = \frac{P}{\sqrt{P^2 + Q^2}} \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{S_1} = \frac{P}{S_1}. \quad (3.51)$$

Коефіцієнт корисної дії визначається:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_\Sigma}{U_d I_d}} \quad (3.52)$$

де  $\Delta P_\Sigma$  – сумарні втрати потужності у перетворювачі.

Сумарні втрати потужності у перетворювачі визначаються:

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_T + \Delta P_P + \Delta P_B + \Delta P_3 \quad (3.53)$$

де  $\Delta P_T$ ,  $\Delta P_P$ ,  $\Delta P_B$ ,  $\Delta P_3$  – втрати потужності відповідно в трансформаторі, реакторі, вентилях та захисних елементах.

Втрати потужності у трансформаторі:

$$\Delta P_T = \Delta P_{XX} + \Delta P_{K3} \left( \frac{I_d}{I_{dH}} \right)^2 \quad (3.54)$$

де  $\Delta P_{XX}$ ,  $\Delta P_{K3}$  – втрати потужності холостого ходу і короткого замикання трансформатору.

Втрати потужності у реакторі (струмообмежуючому, згладжуючому або порівнювальному):

$$\Delta P_P = R_P \left( \frac{I_d}{I_{dH}} \right)^2 \quad (3.55)$$

де  $R_P$  – активний опір реактора.

Необхідно побудувати графіки залежностей енергетичних показників від ступеню регулювання  $U_d$ :  $S_d=f(U_d)$ ,  $P_d=f(U_d)$ ,  $Q_d=f(U_d)$ ,  $k_n=f(U_d)$ ,  $\eta=f(U_d)$  для  $I_d=0,2;0,4;0,6;0,8;1,0 I_{dH}$ , а також  $\eta=f(I_d)$  для  $U_d=0,2;0,4;0,6;0,8;1,0 U_{dH}$ .

### 3.2. Розрахунок перетворювачів постійного струму в постійний струм

Для зміни вихідної напруги перетворювача використовується широтно-імпульсне і частотно-імпульсне регулювання (ШІР або ЧІР).

Відповідні схеми перетворювачів наведені на рис. 3.3, 3.4, 3.5, 3.6.

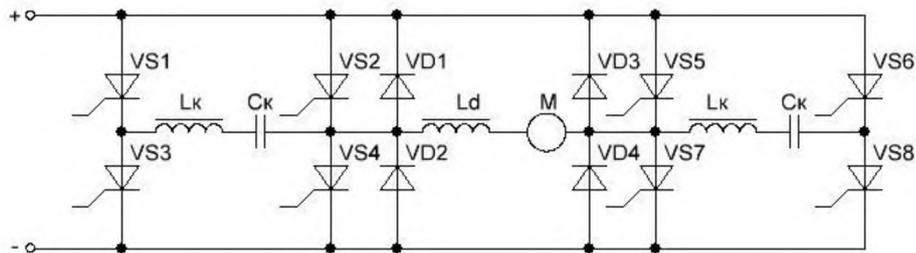


Рис. 3.3. Схема мостового широтно-імпульсного перетворювача

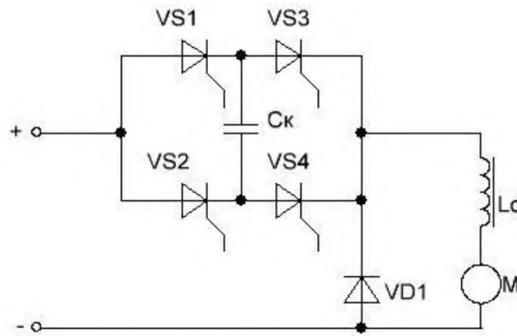


Рис. 3.4. Схема частотно-імпульсного перетворювача

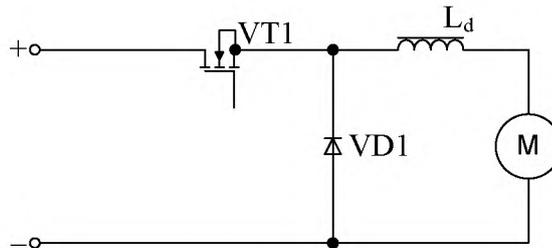


Рис. 3.5. Понижуючий імпульсний регулятор напруги (chopper, buck converter, step-down converter)

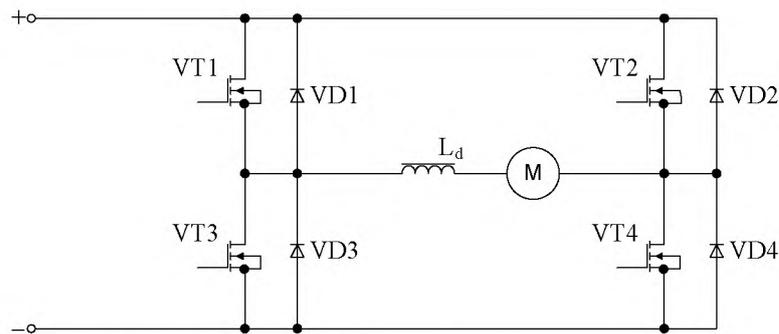


Рис. 3.6. Мостовий перетворювач (full bridge)

### 3.2.1. Розрахунок та вибір комутуючого конденсатора

Величина ємності комутуючого конденсатора для схеми на рис. 3.3 визначається:

$$C_{\kappa} = \frac{I_{дн} t_{вук}}{U_{жс}} \quad (3.56)$$

де  $I_{дн}$  – номінальний струм перетворювача;  
 $t_{вук}$  – час виключення тиристора;  $t_{вук} = 20 \div 40$  мкс;  
 $U_{жс}$  – напруга живлення перетворювача.

Величина ємності комутуючого конденсатора для схеми на рис. 3.4 визначається:

$$C_{\kappa} = \frac{I_{дн}}{2U_{жс} f_{макс}} \quad (3.57)$$

де  $I_{дн}$  – номінальний струм перетворювача;  
 $f_{макс}$  – максимальна робоча частота перетворювача;  
 $U_{жс}$  – напруга живлення перетворювача.

Робоча напруга конденсатора визначається:

$$U_{сн} = k_3 U_{эс}, \quad (3.58)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт запасу;  $k_3 = 1,2 \div 1,3$ .

### 3.2.2. Розрахунок та вибір комутуючого реактору

Величина індуктивності комутуючого реактору для схеми на рис. 3.3 визначається:

$$L_{к} = \frac{1}{4\pi^2 f^2 C_{к}}, \quad (3.59)$$

де  $f$  – частота імпульсів перетворювача.

Робочий струм комутуючого реактору визначається:

$$I_{LH} = U_{эс} \sqrt{\frac{C_{к}}{L_{к}}}. \quad (3.60)$$

### 3.2.3. Розрахунок та вибір тиристорів

Вибір тиристорів виконують за середнім значенням струму, який протікає через нього, і за величиною прикладеної повторної імпульсної напруги.

Розрахункове середнє значення струму основних тиристорів для схеми на рис. 3.3 (VS2, VS4, VS5, VS7) та схеми на рис. 3.4 (VS1–VS4) визначається за формулою:

$$I_{от} = I_{н} + U_{эс} \sqrt{\frac{C_{к}}{L_{к}}}. \quad (3.61)$$

Розрахункове середнє значення струму комутуючих тиристорів для схеми на рис. 3.3 (VS1, VS3, VS6, VS8) визначається за формулою:

$$I_{кт} = U_{эс} \sqrt{\frac{C_{к}}{L_{к}}}. \quad (3.62)$$

Розрахункове середнє значення струму зворотних діодів (VD1–VD4) визначається за формулою:

$$I_{зд} = I_{н}. \quad (3.63)$$

### 3.2.4. Розрахунок та вибір транзисторів

Схеми (рис. 3.5, рис. 3.6) можуть бути виконані на повністю керованих ключах (MOSFET, IGBT, GTO). Вибір таких ключів виконують за середнім значенням струму, який протікає через нього, і за величиною прикладеної повторної імпульсної напруги.

Розрахункове значення середнього струму ключів:

$$\begin{aligned} I_{IT} &= I_{н}; \\ I_{VD} &= I_{н}. \end{aligned} \quad (3.64)$$

### 3.2.5. Розрахунок та вибір елементів захисту від аварійних струмів

Елементи захисту розраховуються згідно п.п. 3.1.7.

### 3.2.6. Розрахунок та побудова зовнішніх та регулювальних характеристик перетворювача

Середнє значення вихідної напруги тиристорного широтно-імпульсного перетворювача є функцією двох змінних: струму навантаження  $I_d$  і коефіцієнту заповнення імпульсів  $\gamma$ , зв'язок між якими встановлюється такими рівняннями (без урахування падіння напруги на вентилях і активних опорах силових ланцюгів):

- у режимі безперервного струму навантаження ( $I_d > I_{zp}$ )

$$U_d = U_{жс} \gamma - 2R_{\theta} (I_d - I_{zp}); \quad (3.65)$$

- у режимі граничного струму ( $I_d = I_{zp}$ )

$$U_{zp} = U_{жс} \gamma; \quad (3.66)$$

$$I_{zp} = \frac{U_{жс}}{2\pi f L_d} \gamma(1 - \gamma),$$

де  $L_d$  – індуктивність якірного ланцюга.

- у режимі нульового струму навантаження ( $I_d = 0$ )

$$U_d = U_{жс}. \quad (3.67)$$

Усі характеристики перетинають вісь ординат у точці  $U_{жс}$ .

На рис. 3.7 наведений орієнтовний вид зовнішніх характеристик широтно-імпульсного перетворювача при зміні коефіцієнту заповнення імпульсів  $\gamma$  від 0 до 1,0. Область граничного струму показана пунктирною лінією.

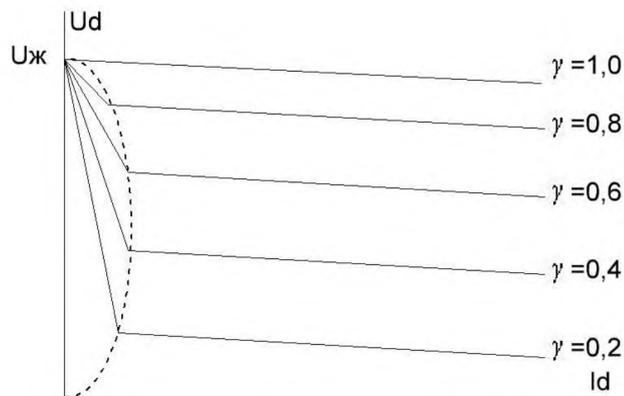


Рис. 3.7. Зовнішні характеристики широтно-імпульсного перетворювача

Середнє значення вихідної напруги тиристорного частотно-імпульсного перетворювача є функцією двох змінних: струму навантаження  $I_d$  і відносної частоти імпульсів  $f^*$ , зв'язок між якими встановлюється такими рівняннями (без урахування падіння напруги на вентилях і активних опорах силових ланцюгів):

- у режимі безперервного струму навантаження ( $I_d > I_{zp}$ )

$$U_d = U_{жс} f^* - 2R_{\theta} (I_d - I_{zp}); \quad (3.68)$$

- у режимі граничного струму ( $I_d = I_{zp}$ )

$$U_{zp} = U_{жс} f^*; \quad (3.69)$$

$$I_{zp} = \frac{U_{жс}}{2\pi f L_d} (1 - f^*);$$

– у режимі нульового струму навантаження ( $I_d=0$ )

$$U_d = U_{жс}, \quad (3.70)$$

де  $L_d$  – індуктивність якірного ланцюга;

$f^*$  – відносне значення частоти імпульсів вихідної напруги;  $f^* = \frac{f}{f_n}$ .

На рис. 3.8 наведений орієнтовний вид зовнішніх характеристик частотно-імпульсного перетворювача при зміні відносної частоти  $f^*$  від 0 до 1,0. Область граничного струму показана пунктирною лінією.

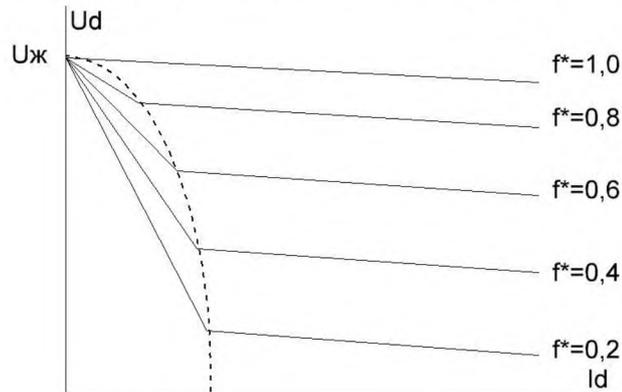


Рис. 3.8. Зовнішні характеристики частотно-імпульсного перетворювача

Регульовальні характеристики  $U_d=f(\gamma)$  або  $U_d=f(f^*)$  можуть бути побудовані при  $I_d=const$  із виразів для безперервного струму

$$U_d = U_{жс} \gamma - 2R_\theta (I_d - I_{зр}), \quad (3.71)$$

або

$$U_d = U_{жс} f^* - 2R_\theta (I_d - I_{зр}). \quad (3.72)$$

### 3.2.7. Розрахунок та побудова енергетичних характеристик перетворювача

Коефіцієнт корисної дії визначається:

$$\eta = \frac{1}{1 + \frac{\Delta P_\Sigma}{U_d I_d}}, \quad (3.73)$$

де  $\Delta P_\Sigma$  – сумарні втрати потужності у перетворювачі.

Сумарні втрати потужності у перетворювачі визначаються:

$$\Delta P_\Sigma = \Delta P_p + \Delta P_B + \Delta P_3, \quad (3.74)$$

де  $\Delta P_p$ ,  $\Delta P_B$ ,  $\Delta P_3$  – втрати потужності відповідно у реакторі, вентилях та захисних елементах.

Втрати потужності у реакторі (згладжуючому і комутуючому):

$$\Delta P_p = R_p \left( \frac{I_d}{I_{дн}} \right)^2, \quad (3.75)$$

де  $R_p$  – активний опір реактора.

Необхідно побудувати графіки залежностей енергетичних показників від струму:  $\eta=f(I_d)$  при  $U_d=0,2;0,4;0,6;0,8;1,0 U_{дн}$ .

### 3.3. Розрахунок перетворювачів постійного струму в змінний струм

Розроблено багато схем перетворювачів постійного струму в змінний, які використовуються в електротранспорті для регульованого електропривода при живленні від мереж постійного струму, а також при використанні як складової частини перетворювачів частоти. Ми розглядаємо дві найпростіші схеми інверторів напруги і струму.

Для зміни вихідної напруги перетворювача використовуються автономні інвертори напруги і струму, схеми яких наведені на рис. 3.9, рис. 3.10.

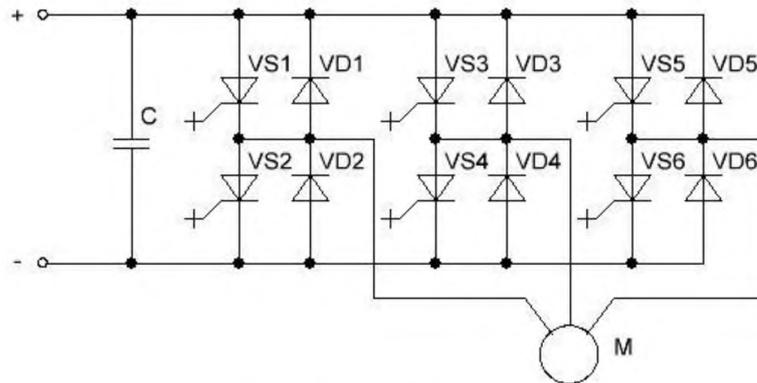


Рис. 3.9. Схема інвертора напруги

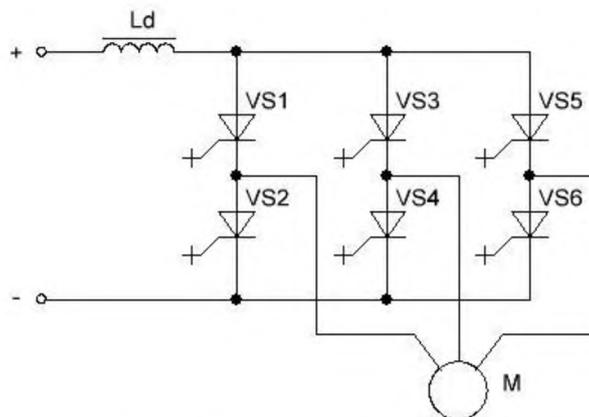


Рис. 3.10. Схема інвертора струму

#### 3.3.1. Розрахунок та вибір напруги і струму живлення інвертора

Розрахункове значення напруги живлення інвертора напруги:

$$U_{\text{жс}} = k_3 k_\gamma k_R k_U \frac{U_n}{\sqrt{3}}, \quad (3.76)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт урахування зниження напруги мережі живлення;  $k_3 = 1,05 - 1,1$ ;  
 $k_\gamma$  – коефіцієнт урахування комутації та асиметрії вихідної напруги;  $k_\gamma = 1,05$ ;  
 $k_R$  – коефіцієнт урахування падіння напруги на ключах та опорах трансформатор (реактора);  $k_R = 1,05$ ;

$U_n$  – номінальна лінійна напруга двигуна змінного струму;

$k_U$  – коефіцієнт схеми перетворювача за напругою для мостової схеми (таблиця 2.1):

$$k_U = \frac{U_d}{U_{2\phi}} = 2,34. \quad (3.77)$$

Діюче значення струму живлення перетворювача визначається:

$$I_{\text{жс}} = \frac{I_n}{k_{I2}}, \quad (3.78)$$

де  $k_{I2}$  – коефіцієнт схеми перетворювача за струмом (таблиця 2.1):

$$k_{I2} = \frac{I_2}{I_d} = 0,815; \quad (3.79)$$

$I_n$  – лінійний струм двигуна змінного струму:

$$I_n = \frac{P_n}{\sqrt{3}U_n \eta_n \cos \varphi_n}, \quad (3.80)$$

де  $\varphi_n$  – номінальний кут зсуву струму двигуна стосовно його напруги.

### 3.3.2. Розрахунок та вибір вхідного конденсатору

Величина ємності вхідного конденсатору для схеми інвертора напруги (рис. 3.9) визначається:

$$C_{\text{жс}} = \frac{I_n \sin \varphi_n}{48U_{\text{жс}} f_n q_u}, \quad (3.81)$$

де  $f_n$  – номінальна вихідна частота перетворювача;

$q_u$  – коефіцієнт допустимих пульсацій напруги на вході перетворювача;  $q_u=0,05$ .

Робоча напруга конденсатора визначається:

$$U_{\text{сн}} = k_3 U_{\text{жс}}, \quad (3.82)$$

де  $k_3$  – коефіцієнт запасу;  $k_3=1,2 \div 1,3$ .

### 3.3.3. Розрахунок та вибір вхідного реактору

Величина індуктивності вхідного реактору для схеми інвертора струму (рис. 3.1010) визначається:

$$L = \frac{0,1U_n}{q_i I_{\text{жс}} \omega_m}, \quad (3.83)$$

де  $U_n$  – лінійна напруга асинхронного двигуна;

$q_i$  – коефіцієнт допустимих пульсацій струму на вході перетворювача;  $q_i=0,05$ ;

$\omega_m$  – кругова частота мережі живлення.

Робочий струм вихідного реактору визначається:

$$I_{\text{н}} = \frac{I_n}{k_{I2}}, \quad (3.84)$$

де  $k_{I2}$  – коефіцієнт схеми перетворювача за струмом.

### 3.3.4. Розрахунок та вибір напівпровідникових ключів

Якщо напівпровідниковими ключами обрані тиристри, то їх вибір виконують за середнім значенням струму, який протікає через них, і за величиною прикладеної повторної імпульсної напруги.

Розрахункове середнє значення струму тиристора визначається за формулою:

$$I_{vc} = \frac{I_{жс}}{m}, \quad (3.85)$$

де  $m=3$  для трифазних схем перетворювачів;  
 $m=2$  для однофазних схем перетворювачів.

Якщо ж напівпровідниковими ключами обрані MOSFET, IGBT, GTO, а керування таким перетворювачем виконується за широтно-імпульсною модуляцією, то вибір ключів виконують за середнім значенням струму, який протікає через них під час їх замкненого стану, і за величиною прикладеної повторної імпульсної напруги.

Розрахункове значення струму напівпровідникового ключа (MOSFET, IGBT, GTO) при широтно-імпульсній модуляції визначається за формулою:

$$I_{vc} = I_{жс}. \quad (3.86)$$

Найбільше розрахункове значення повторної імпульсної напруги на ключах визначається:

$$U_{vm} = k_B U_{жс} \quad (3.87)$$

де  $k_B$  – коефіцієнт схеми перетворювача за повторною напругою перетворювача (таблиця 2.1).

За розрахованими значеннями  $I_{vc}$  і  $U_{vm}$  з довідника вибираємо тип тиристора, враховуючи, що при  $I_{дн} < 300$  А застосовують природне охолодження напівпровідникових ключів, а при  $I_{дн} > 300$  А – примусове повітряне або водяне охолодження.

### 3.3.5. Розрахунок та вибір елементів захисту від аварійних струмів

Розрахунок та вибір елементів захисту розраховуються згідно п.0.

### 3.3.6. Розрахунок та вибір елементів захисту від перенапруг

Під час комутацій на вентиль діють короточасні періодичні та однократні перенапруги, для обмеження яких застосовують спеціальні захисні пристрої.

Для захисту від зовнішніх перенапруг, які виникають під час включення і відключення асинхронного двигуна, застосовують додатковий діодний випрямляч, навантажений на  $RC$  контур рис. 3.251.

Параметри  $C7$ ,  $R7$ ,  $R8$  визначають за формулами:

$$C7 = (20 \div 60) \frac{P_n}{U_l^2 \cos \varphi_n};$$

$$R7 = 170 \frac{U_l}{i_{xx} I_l}; \quad (3.88)$$

$$R8 = \frac{1 \div 3}{C1},$$

де  $P_n$ ,  $U_l$ ,  $I_l$  – номінальні значення потужності, напруги і струму асинхронного двигуна;

$i_{xx}$  – значення намагнічуючого струму асинхронного двигуна у відсотках.

Розрахункова потужність опорів  $R7$ ,  $R8$  визначається згідно формул:

$$P_{R7} = 60R7\left(\frac{U_2}{R7 + R8}\right)^2; \quad (3.89)$$

$$P_{R8} = 2R8\left(\frac{U_2}{R7 + R8}\right)^2.$$

Для захисту вентилів від комутаційних перенапруг, які обумовлені накопиченням носіїв у напівпровідниковій структурі, паралельно вентилям включають захисні  $RC$  ланцюги ( $R1, C1$  на рис. 3.253.1), параметри яких вибирають:

$$C1 = (0,25 \div 1) \text{ мкФ}; \quad (3.90)$$

$$R1 = (10 \div 30) \text{ Ом}. \quad (3.91)$$

Причому більші значення ємності та менші значення опорів відповідають перетворювачам більшої потужності.

Розрахункова потужність опору  $R3$  вибирається у межах:

$$P1 = (100 \div 200) C1 U_{DRM}^2, \quad (3.92)$$

де  $U_{DRM}$  – допустима амплітуда зворотної напруги вентиля.

### 3.3.7. Розрахунок та побудова зовнішніх характеристик перетворювача

Середнє значення вихідної напруги тиристорного інвертора напруги визначається:

$$U_{вих} = \frac{U_{жс}}{k_U} - R_e I_{вих} \cos \varphi_{вих}, \quad (3.93)$$

де  $k_U$  – коефіцієнт схеми перетворювача за напругою для мостової схеми (таблиця 2.1):

$$k_U = \frac{U_d}{U_{2\phi}} = 2,34; \quad (3.94)$$

$R_e$  – активний опір вентиля мосту інвертора;

$I_{вих}$  – вихідний струм інвертора;

$\varphi_{вих}$  – фазовий зсув вихідного струму по відношенню до вихідної напруги.

Необхідно побудувати  $U_{вих} = f(I_{вих})$  при  $\alpha = 0; 30; 45; 60; 90$  ел.град. Орієнтовний вид зовнішніх характеристик інвертора напруги наведений на рис. 3.11.

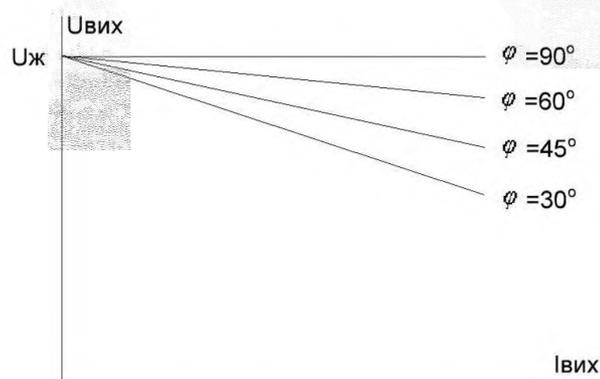


Рис. 3.11. Зовнішні характеристики інвертора напруги

Середнє значення вихідної напруги тиристорного інвертора струму визначається:

$$U_{вих} = (I_{ж} k_{I2} - I_{вих}) \frac{R_6}{\cos \varphi_{вих}}, \quad (6.95)$$

де  $k_{I2}$  – коефіцієнт схеми перетворювача за струмом для мостової схеми (таблиця 2.1):

$$k_{I2} = \frac{I_2}{I_d} = 0,817. \quad (3.96)$$

Необхідно побудувати  $U_{вих} = f(I_{вих})$  при  $\alpha = 0; 30; 45; 60; 90$  ел.град.

Орієнтовний вид зовнішніх характеристик інвертора струму наведений на рис. 3.12

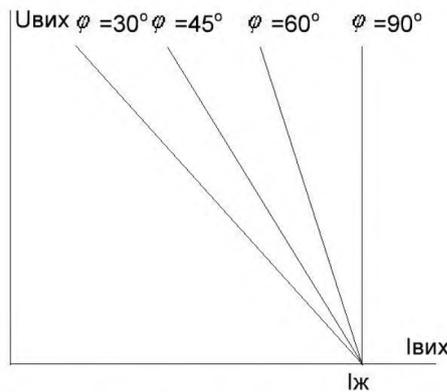


Рис. 3.12. Зовнішні характеристики інвертора струму

### 3.3.8. Розрахунок та побудова енергетичних характеристик перетворювача

Розрахунок та побудова енергетичних характеристик перетворювача визначаються згідно п.п.0.

Необхідно побудувати графіки залежностей енергетичних показників  $\eta = f(I_d)$  при  $U_d = 0,2; 0,4; 0,6; 0,8; 1,0$ .

### 3.4. Розрахунок перетворювачів змінного струму в змінний струм

Перетворювачі змінного струму в змінний струм будуються за двома схемами:

- перетворювачі частоти з ланкою постійного струму (з інверторами напруги і струму);
- перетворювачі частоти з безпосереднім зв'язком.

Схеми цих перетворювачів наведені на рис. 3.13, рис. 3.27, рис. 3., рис. 3., рис. 3.28.

У перетворювачі частоти з ланкою постійного струму в залежності від використання інвертора напруги або інвертора струму на виході випрямляча (VSI–VSB) підключається або паралельно конденсатор  $C$ , або послідовно реактор  $L$ .

Порядок розрахунку перетворювачів частоти з ланкою постійного струму такий:

- 1) згідно параметрів електродвигуна визначаються параметри інвертора напруги або інвертора струму;
- 2) згідно визначених вхідних параметрів інвертора  $U_d$ ,  $I_d$  визначаються параметри випрямляча ( $VS1-VS6$ ) і трансформатора  $TV$  згідно до п.3.2.

Для перетворювачів частоти з безпосереднім зв'язком порядок розрахунку такий:

- 1) згідно параметрів електродвигуна визначаються параметри випрямлячів ( $VS1-VS18$ ) і трансформатора  $TV$  відповідно до п. **Ошибка!**  
**Источник ссылки не найден..**

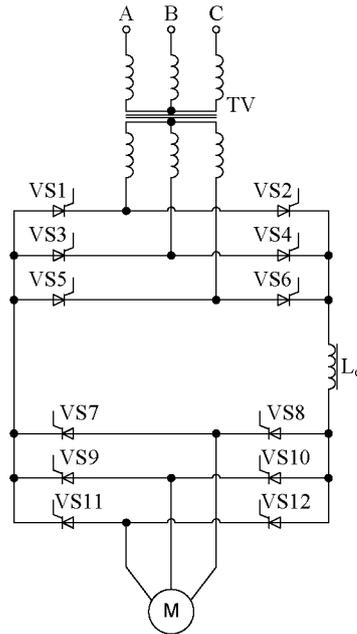


Рис. 3.13. Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму (з автономним інвертором струму)

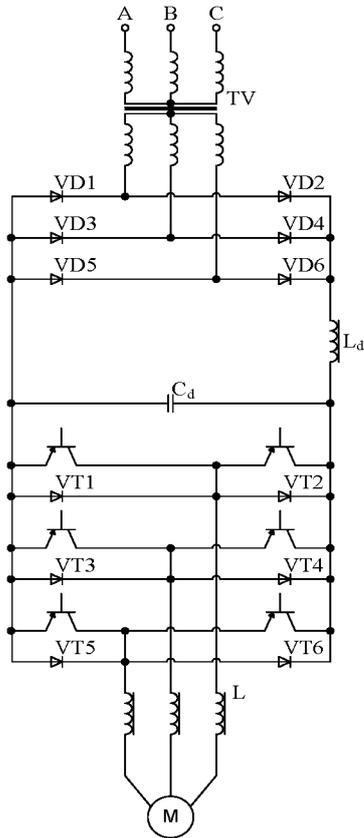


Рис. 3.27. Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму (з некерованим випрямлячем та автономним інвертором напруги)

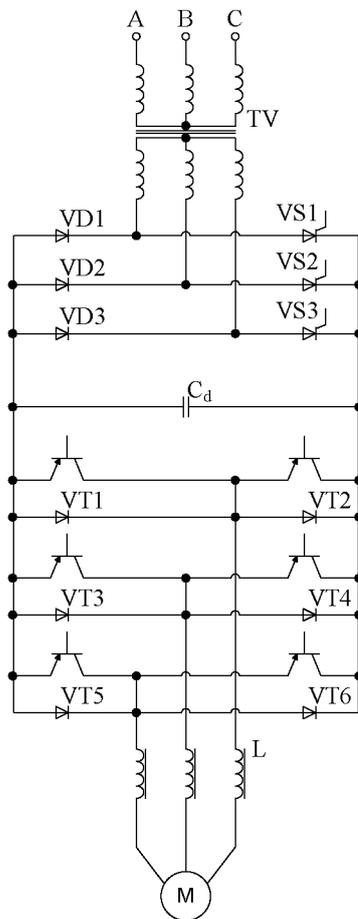


Рис. 3.15. Схема перетворювача частоти з ланкою постійного струму (з напівкеруваним випрямлячем та автономним інвертором напруги)

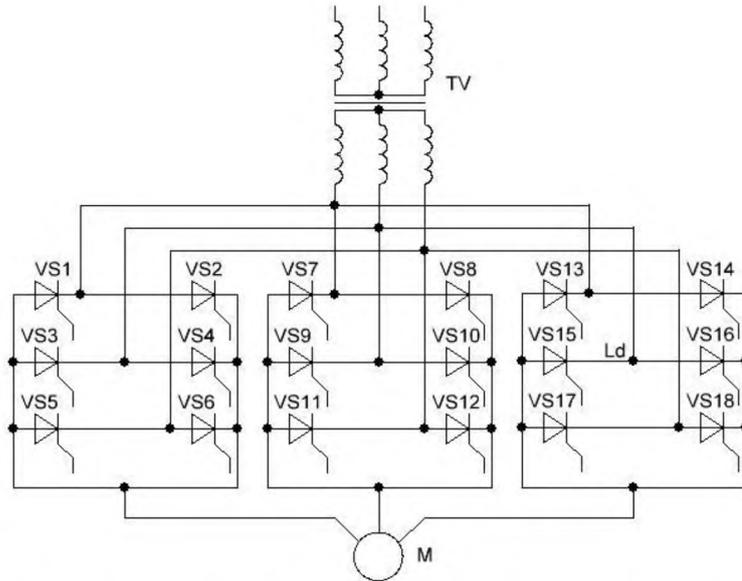


Рис. 3.16. Трифазно-трифазний трипульсний перетворювач з нульовими вентильними групами

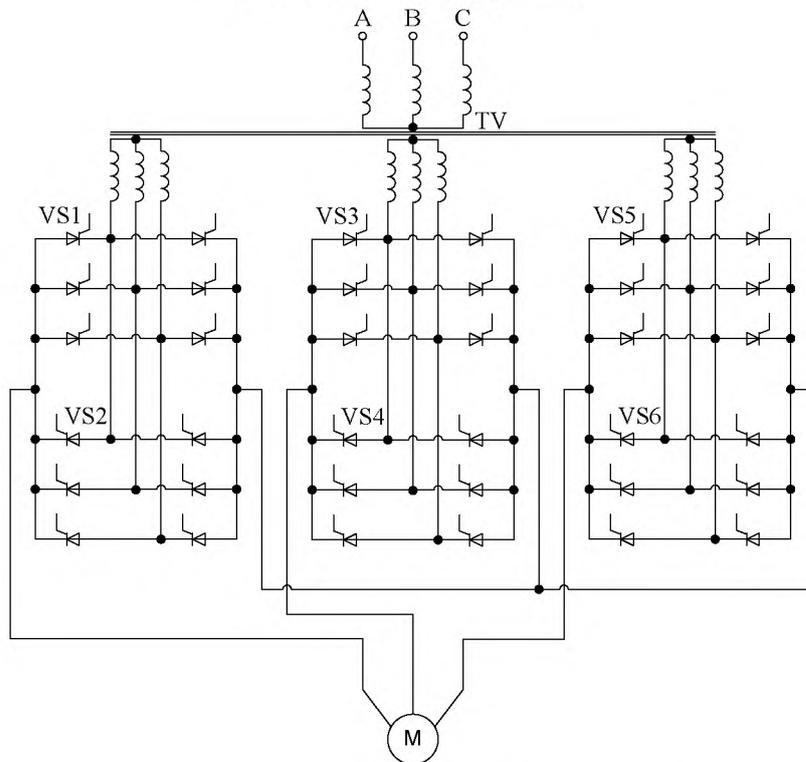


Рис. 3.28. Трифазно-трифазний шестипульсний перетворювач з мостовими вентильними групами та потенційним розділенням обмоток трансформатора

### 3.5. Розрахунок перетворювачів для електроприводів за системою «вентильний двигун» і вентильних каскадів

Для електроприводів за системою «вентильний двигун» використовується перетворювач, побудований за схемою перетворювача з ланкою постійного струму навантаженого на синхронну машину (рис. 3.) (В – випрямляч, ІС – інвертор струму, СД – синхронний двигун, ТЗ – тиристорний збудник синхронного двигуна). Відмінність у тому, що керування інвертором струму (ІС) здійснюється за допомогою датчика положення ротору (ДПР) й інвертор є залежним від проти-ЕРС синхронного двигуна (СД). Таким чином, розрахунок

елементів схеми перетворювача не відрізняється від методики, яка наведена в п.0 для перетворювача з ланкою постійного струму.

Для асинхронно-вентильного каскаду, схема якого наведена на рис. 3.29, характерною ознакою є некерований випрямляч ( $VD1-VD6$ ) і керований трифазний перетворювач змінного струму в постійний струм. Цей перетворювач постійно працює як інвертор ведений мережею живлення.

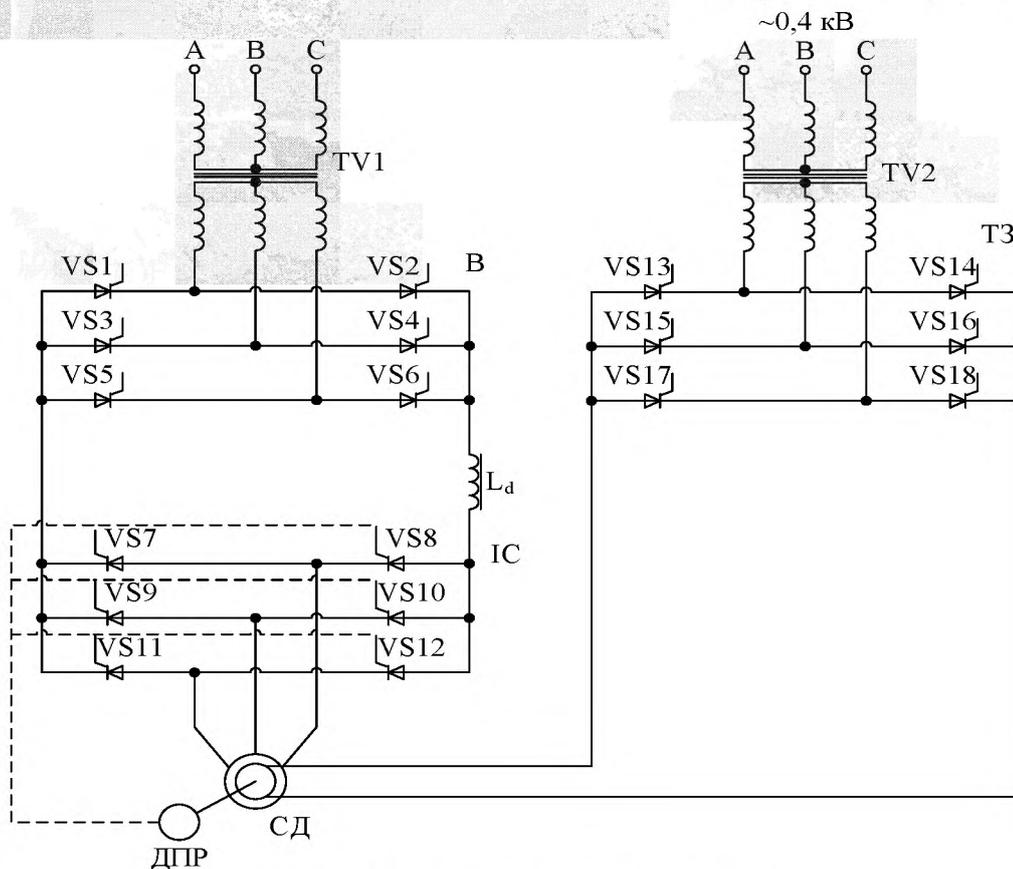


Рис. 3.18. Вентильний двигун

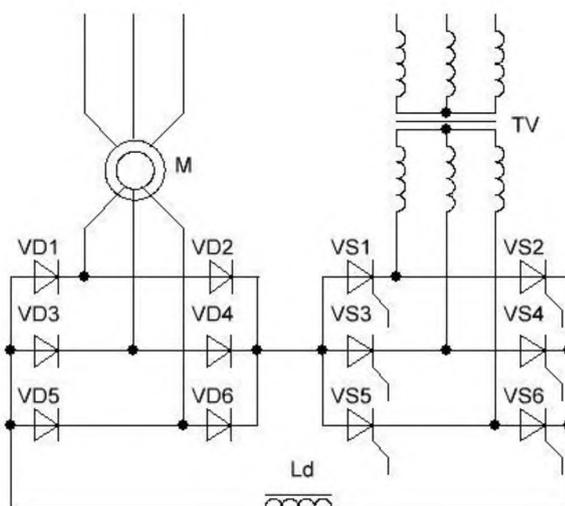


Рис. 3.29. Схема перетворювача для асинхронно-вентильного каскаду

Порядок розрахунку перетворювачів для асинхронно-вентильного каскаду такий:

- 1) згідно параметрів електродвигуна визначаються параметри випрямляча ( $VS1–VS6$ ) відповідно до п. **Ошибка! Источник ссылки не найден.**;
- 2) згідно визначених вихідних параметрів випрямляча  $U_d$ ,  $I_d$  визначаються параметри інвертора струму і трансформатора  $TV$  відповідно до п.0.

Розрахунки енергетичних показників вентильних каскадів ведуться.

### 3.6. Розрахунок тиристорних перетворювачів напруги

Основними елементами тиристорних перетворювачів напруги є зустрічно-паралельно включені силові вентиля (тиристори або тиристор та діод), що по своїй суті є швидкодіючим ключем, за допомогою якого можна комутувати ланки змінного струму та змінювати діючі значення струму в колі та напруги на навантаженні. При включенні силових тиристорних елементів у коло з чисто активним опором форма струму при відкритому вентилі повторює форму прикладеної до ланки напруги. Тривалість імпульсу струму, яка характеризується електричним кутом  $\lambda_T$  провідності тиристора, визначається у цьому випадку як різниця між півперіодом  $\pi$  напруги живлення та кутом  $\alpha$  включення (відкривання) тиристорів.

Під час комутації ланки, яка містить активно-індуктивний опір, виникає ЕРС самоіндукції, яка затримує зростання та спадання струму. В такому колі форма струму відрізняється від форми прикладеної напруги і струм зникає з запізнювання на кут  $\delta$  стосовно моменту зміни знаку прикладеної напруги.

У залежності від функцій, які виконують тиристорні перетворювачі напруги при керуванні асинхронним двигуном, силові тиристорні елементи можуть включатися за різними схемами. Вибір тієї чи іншої схеми визначається з необхідності виконання набору режимів електропривода, а також техніко-економічних показників.

Найбільш широкого практичного використання нереверсивних перетворювачів набули схеми рис. 3.2030–3.31.

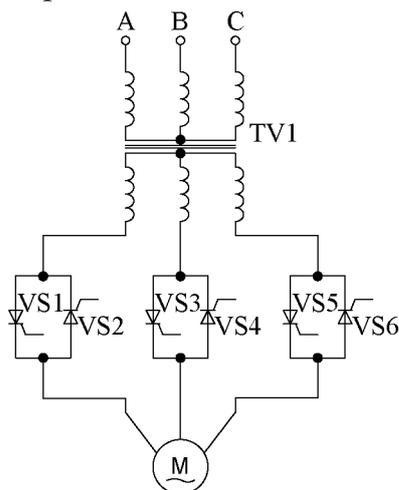


Рис. 3.2030. Тиристорний перетворювач напруги ТПН-6Т (шість тиристорів)

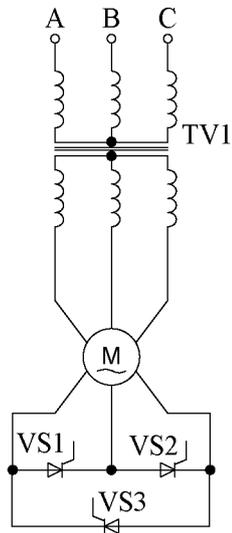


Рис. 3.21. Тирсторний перетворювач напруги ТПН-3Т (три тирстора)

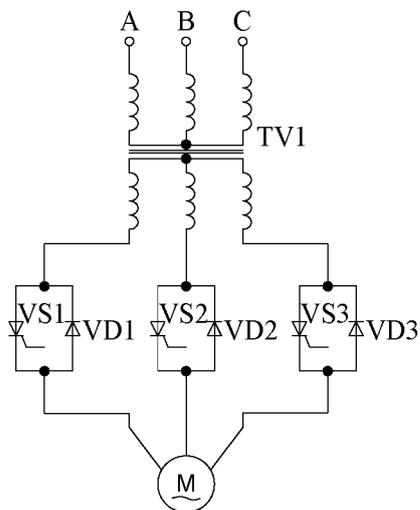


Рис. 3.22. Тирсторний перетворювач напруги ТПН-3ТЗД (три тирстора, три діода)

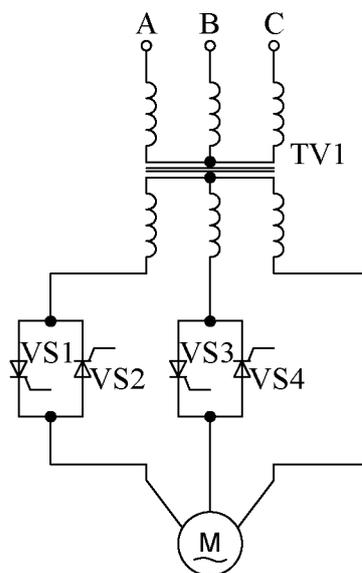


Рис. 3.23. Тирсторний перетворювач напруги ТПН-4Т (чотири тирстора)

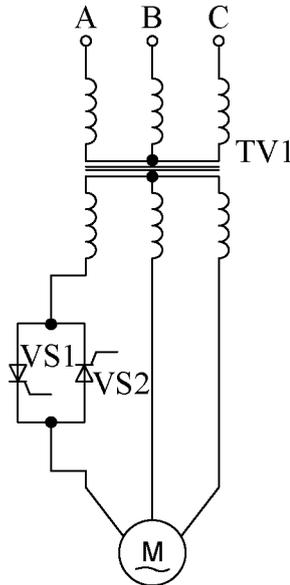


Рис. 3.31. Тиристорний перетворювач напруги ТПН-2Т (два тиристора)

Силкові схеми реверсивних тиристорних перетворювачів напруги у більшості випадків виконуються за схемами рис. 3.3225, рис. 3.26. Реверс здійснюється переключенням тиристорних елементів, включених між фазою мережі та обмотками асинхронного двигуна, що забезпечує зміну напрямку обертання основної гармоніки магнітного поля асинхронного двигуна. Схема рис. 3.32 має меншу кількість тиристорів ніж схема рис. 3., але й більш важкі умови комутації.

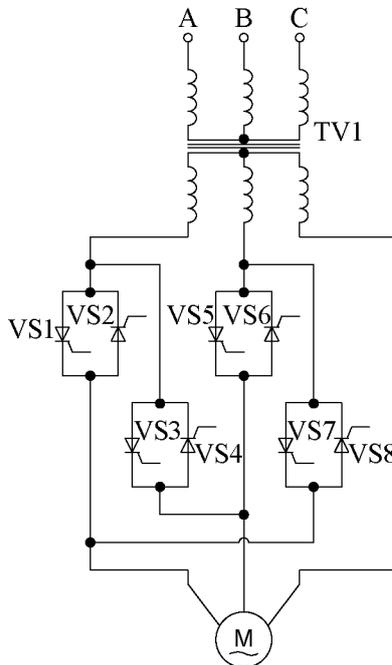


Рис. 3.32. Реверсивний тиристорний перетворювач напруги

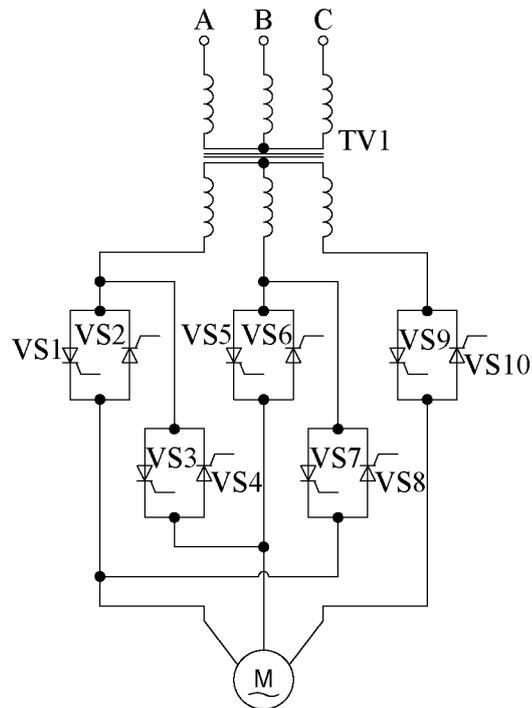


Рис. 3.26. Реверсивний тиристорний перетворювач напруги

### 3.6.1. Розрахунок та вибір трансформатора перетворювача

Розрахунок та вибір перетворювального трансформатора виконується з метою узгодження напруги мережі живлення та тиристорного перетворювача аналогічно п.п.0.

### 3.6.2. Розрахунок та вибір струмообмежуючого реактору

Розрахунок та вибір струмообмежуючого реактору виконується згідно п.п.0.

### 3.6.3. Розрахунок та вибір тиристорів

Вибір тиристорів здійснюється за напругою (класом) та номінальним струмом і залежить від схеми включення, номінальної потужності, ступеню завантаження та режиму роботи асинхронного двигуна, способу охолодження тиристорів.

Клас тиристорів визначає повторна напруга  $U_n$ , тобто максимально допустима миттєва напруга, яка прикладається до тиристора в процесі комутації в кожний період напруги мережі. Рекомендована робоча напруга тиристора визначається амплітудою напруги мережі і дорівнює  $0,8U_n$ . Якщо враховувати можливість нерівномірного розподілу напруги на тиристорах, які включені в фази обмоток асинхронного двигуна, то незалежно від силової схеми тиристорного перетворювача напруга на тиристорі може дорівнювати амплітуді  $U_{л.м}$  лінійної напруги. Характерною особливістю роботи тиристорів у статорних ланках асинхронного двигуна є те, що при відключенні двигуна напруга на тиристорах значно підвищується за рахунок ЕРС, яка наводиться в обмотках асинхронного двигуна затухаючим полем ротора. Як показали дослідження, ця напруга може сягнути  $(1,4... 1,8) U_{л.м}$ . З урахування цього клас тиристора можна визначити за формулою:

$$U_n = 1,2U_{nm}k_1k_2, \quad (3.97)$$

де  $k_1=1,05\dots 1,07$  – коефіцієнт, який враховує припустиме за ДСТ підвищення напруги в мережа;

$k_2$  – коефіцієнт, який враховує підвищення напруги на тиристорі за рахунок затухаючого магнітного потоку ротора. Коефіцієнт  $k_2$  можна приймати рівним  $1,4\dots 1,5$  для асинхронного двигуна до 4,5 кВт та  $1,5\dots 1,8$  для двигуна більшої потужності.

Вибір тиристорів за струмом для асинхронного двигуна значно складніший, так як він залежить від режиму роботи двигуна, характеру пуску, способу охолодження тиристорів та кута провідності. Як правило, тиристорні перетворювачі напруги використовуються для приводів з великою кількістю включень, тому при виборі тиристорів слід враховувати пусковий струм. Граничний (номінальний) струм тиристора  $I_e$ , який визначає його типорозмір, у цьому випадку визначається як

$$I_e \geq \frac{k_\partial I_n}{k_{cx}k_0}, \quad (3.98)$$

де  $k_\partial$  – кратність пускового струму асинхронного двигуна стосовно його номінального струму  $I_n$ ;

$k_{cx}$  – коефіцієнт, який залежить від схеми включення тиристорів. Для зустрічно-паралельного включення  $k_{cx}=2,22$ ; для схеми трикутного комутатора  $k_{cx}=1,48$ ;

$k_0$  – коефіцієнт, який залежить від умов охолодження та визначається за каталожними даними тиристорів. Для природного охолодження  $k_0$  з деяким наближенням може бути прийнятим: для тиристорів на 50 А – 0,5; на 100 А – 0,4; на 160...500 А – 0,3.

Слід зазначити, що оскільки тиристори вибираються за пусковими струмами, то в усталеному режимі роботи асинхронного двигуна вони будуть дещо недовантаженими.

### 3.6.4. Розрахунок та вибір захисту

Тиристори, як і всі напівпровідникові апарати, мають невелику перевантажувальну здатність, і для надійної роботи електропривода слід передбачити відповідний захист, який забезпечить такі значення струму та напруги на тиристорах, які за амплітудою та тривалістю не перевищували б допустимих. Основними є два типи захисту: від великих струмів під час короткого замикання та перенапруг.

Під час коротких замикань можливий вихід з ладу тиристора за двома причинами: через перевищення температури напівпровідникового кристала у всьому його об'ємі при тривалому перетіканні струму більшого за граничний, коли потужність, яка розсіюється в кристалі, перевищує припустиму; через перевищення температури кристала під час короткочасного зростання струму (високе значення  $di/dt$ ). Перевантаження за струмом можуть виникати і в усталених режимах через несиметричний розподіл струму між паралельно включеними тиристорами внаслідок відмінностей їх характеристик. Щоб запобігти таким перевантаженням, використовують спеціальні дільники. Для покращення рівномірності завантаження необхідно також використовувати керуючі імпульси з крутим переднім фронтом.

Захист тиристорів від струмів короткого замикання досить ефективно здійснюється за допомогою швидкодіючих запобіжників та автоматичних вимикачів (п.п.0). Для обмеження впливу швидкості зростання ( $di/dt$ ) використовують реактори, які включаються між мережею та тиристорним перетворювачем напруги. В схемі захисту, особливо для реверсивних тиристорних перетворювачів напруги, доцільно передбачити засіб струмової відсічки, який повністю знімає керуючі імпульси, запобігаючи виходу з ладу тиристорів під час аварійних режимів.

Для попередження самодовільного включення тиристорів за великої швидкості зростання напруги ( $du/dt$ ) використовуються  $RC$ -ланки (п.п.0), які включаються паралельно тиристорі. В деяких випадках опір у  $RC$ -ланках шунтується діодом. Конденсатор повинен мати хороші частотні властивості. Ланка, яка обмежує  $du/dt$ , повинна бути змонтована якнайближче до тиристора. Для захисту тиристорного перетворювача від короточасних перенапруг в мережі до його вхідних виводів підключають трифазний мостовий випрямляч, який навантажений на конденсатори великої ємності.

У реверсивних тиристорних перетворювачах напруги для запобігання міжфазного короткого замикання слід передбачити затримку подачі імпульсів під час реверсу, яка повинна бути достатньою для надійного закривання тиристорів, які працювали до подачі команди на реверс.

#### 4. СТРУКТУРА І ЗМІСТ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Структура курсової роботи складається з наступних елементів: титул; зміст; вступ; основна частина; практична частина; висновки; список літератури; додатки.

Робота повинна складатися зі вступу, основної частини, висновків, списку використаних джерел, можливого додатку (таблиць, схем, діаграм, зразків нормативних документів, тощо). Робота повинна бути доповнена таблицями, діаграмами, графіками, відповідними порівняннями автора тощо.

**У вступі** розглядається актуальність вибраної теми, визначається предмет, коло питань, що будуть аналізуватися в основній частині роботи, визначається мета і конкретні завдання.

**Основна частина** – це найбільша за обсягом частина курсової роботи, яка відображає вміння студента самостійно описувати, аналізувати та систематизувати теоретичний і практичний матеріал.

У розділах основної частини курсової роботи докладно викладається методика і техніка дослідження та узагальнюються результати. Усі матеріали, що не є принципово важливими, виносяться в додатки.

Зміст розділів основної частини має точно відповідати темі курсової роботи і цілком її розкривати. Розділи курсової роботи повинні показати вміння студента стисло, логічно та аргументовано викладати матеріал, виклад і оформлення якого повинні відповідати вимогам до друкованих робіт.

**У висновках** курсової роботи необхідно зробити певні узагальнення у вигляді коротких тез, викласти практичні рекомендації та пропозиції, до яких дійшов автор. Висновки не повинні підмінюватися механічним

підсумовуванням висновків наприкінці розділів, що представляють коротке резюме. Послідовність висновків визначається логікою побудови курсової роботи.

У кінці роботи додається *список використаних джерел*, складений в алфавітному порядку та згідно з правилами бібліографічного оформлення наукових робіт, призначених для публікацій.

Виконання курсової роботи доцільно поділити на такі етапи:

- вибір теми;
- підбір і вивчення літератури;
- збір і обробка матеріалів;
- написання курсової роботи;
- рецензування курсової роботи;
- захист і оцінка курсової роботи.

*Тема курсової роботи* вибирається студентом самостійно із запропонованої кафедрою тематики.

Наступний крок - це *підбір літератури*. Необхідну для виконання курсової роботи літературу, студент повинен підібрати самостійно. Для загального, початкового ознайомлення із темою корисно використовувати енциклопедичну літературу, довідники, алфавітні та предметні покажчики, відповідні каталоги у бібліотеках. До збору і класифікації статистичних і фактологічних матеріалів слід підходити ретельно. Брати до уваги слід тільки ті статистичні і фактологічні дані, які мають безпосереднє відношення до вибраної теми курсової роботи, причому найважливіші з них, типові і об'єктивні. У список використаної літератури, доданий до курсової роботи, необхідно включити всю літературу, на яку є посилання і виноска по тексту, а також ті важливі джерела, які були вивчені при написанні курсової роботи і знайшли відображення у формулюванні вузлових питань теми, хоча вони і не наведені у посиланнях на сторінках роботи.

Після вивчення відповідної літератури студент складає *робочий план курсової роботи*, який в обов'язковому порядку повинен бути погоджений з керівником. План - це логічна основа курсової роботи, від нього залежить структура, зміст, логічний зв'язок частин. План повинен включати: вступ, основну частину та висновки.

Виконану роботу студент здає на кафедру для рецензування. *Рецензія* - це форма контролю і оцінки викладачем проведеної студентом роботи. У рецензії студент отримує відповідь на питання, як глибоко він вивчив відповідну тему, яка форма і зміст роботи, її теоретичний рівень. На основі рецензії студент робить аналіз своєї роботи: що вдалося, які зроблені помилки, які побажання рецензента з покращання подання теми, за допомогою якої літератури можна доопрацювати тему. Студент доопрацьовує роботу і знову її здає на кафедру. Якщо зауваження рецензента враховані, робота допускається до захисту. Студенту необхідно виправити усі вказані помилки.

## 5. ОФОРМЛЕННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

Оформлення курсової роботи здійснюється відповідно до STU ДонНУЕТ 02.02-30-2017.

## 6. КРИТЕРІЇ ОЦІНЮВАННЯ КУРСОВОЇ РОБОТИ

**Оцінювання курсової роботи.** Курсова робота (загальна оцінка) оцінюється за чотирибальною системою (з обов'язковим переведенням досягнень студента в шкалу ECTS).

Оцінювання курсової роботи здійснюється за критеріями, поданими у таблиці 6.1.

Таблиця 6.1 – Шкала оцінювання курсової роботи

Оцінка за шкалою ECTS	Оцінка за бальною шкалою, що використовується у ДонНУЕТ	Оцінка за національною шкалою
A	90 - 100	5 (відмінно)
B	80 - 89	4 (добре)
C	75 - 79	
D	70 - 74	3 (задовільно)
E	60 - 69	
FX	35 - 59	2 (незадовільно)
F	0 - 34	

Якість виконання курсової роботи та відповіді студента на захисті максимально оцінюються у 60 та 40 балів відповідно (табл. 6.2).

Таблиця 6.2 – Розподіл балів за виконання та захист курсової роботи

Виконання курсової роботи	Захист роботи	Загальна оцінка
до 60 балів	до 40 балів	до 100 балів

Оцінювання якості виконання курсової роботи здійснюється згідно критеріїв, наведених у таблиці 6.3.

Таблиця 6.3. Шкала оцінювання якості курсової роботи

Бали	Критерії оцінювання
54-60	В роботі повно та послідовно розкрито зміст теми, творчо, самостійно досліджено проблеми, проаналізовано широке коло фактичних даних та матеріалів за останні роки. Висновки повні та обгрунтовані. Повністю дотримано вимоги до оформлення. Курсова робота виконувалася згідно графіку.
48-53	В роботі зміст розкрито на достатньо високому творчому рівні, змістовно розглянуто окремі питання плану, зібрано та проаналізовано фактичний матеріал за останні роки. Висновки повні та обгрунтовані. Однак в роботі мають місце окремі неточності, незначні помилки, недоліки в оформленні. Курсова робота виконувалася згідно графіку.

45-47	В роботі зміст розкрито на достатньо високому творчому рівні, досить змістовно розглянуто окремі питання плану, зібрано та проаналізовано фактичний матеріал за останні роки. Висновки досить повні та обґрунтовані. В роботі мають місце окремі неточності, незначні помилки, недоліки в оформленні. Курсова робота виконувалася з незначними відхиленнями від графіку.
42-44	В роботі в основному правильно, але недостатньо повно розкрито зміст основних питань, відсутня належна глибина аналізу теоретичного та фактичного матеріалу, роботі притаманні окремі стилістичні та граматичні помилки, є порушення щодо оформлення курсової роботи. Курсова робота виконана із запізненням.
36-41	В роботі зміст розкрито не досить повно, не досить обґрунтовані власні висновки, не було використано джерела інформації за останні роки. Висновки не досить повні, відсутні рекомендації. Є значні зауваження до оформлення. Курсова робота виконана із значним запізненням.
21-35	В роботі допущено суттєві помилки у викладенні програмного матеріалу, використано доволі вузьке коло літературних джерел, практично не наводяться фактичні та статистичні данні, немає їх аналізу. Оформлення не відповідає вимогам. Курсова робота виконана із значним запізненням.
0-20	Курсова робота виконана із значним запізненням та не відповідає висунутим вимогам.

**Захист роботи.** Заключним етапом є захист курсової роботи. Результати захисту курсової роботи оцінюється відповідно до критеріїв та за діючою шкалою оцінювання знань студента.

Студентам, які не захистили курсову роботу, призначається повторний захист.

Оцінювання захисту виконання курсової роботи здійснюється згідно критеріїв, наведених у таблиці 6.4.

Таблиця 6.4. Шкала оцінювання захисту курсової роботи

Кількість балів	Критерії оцінювання
36-40	Під час захисту давались правильні, чіткі та конкретні відповіді на більш, ніж 90% запитань.
32-35	Студент правильно відповів на 80-90% питань.
30-31	Студент відповів на 75% питань, був не в усьому послідовним.
28-29	Відповіді під час захисту були не завжди правильними. В цілому студент відповів на 70-74% запитань.
24-27	Студент відповів на 60-69% питань, був не послідовним у відповідях.
14-23	Студент відповів на 20-60% запитань. Відповіді нечіткі та непослідовні.
0-13	Під час захисту не виділено головні моменти теми, давались невірні відповіді на запитання.

При написанні курсової роботи неминучі труднощі й помилки, які студент долає за допомогою керівника курсової роботи. Однак є ряд типових недоліків, яких можна уникнути.

**Недоліки** курсових робіт, що найбільш розповсюджені:

- відсутність обґрунтування цілей і завдань курсової роботи;
- використання застарілих джерел і неактуальної інформації;
- незбалансований зміст;
- відсутність зв'язку між змістом роботи та загальними висновками;
- публіцистичний стиль викладання матеріалу;
- відсутність алгебраїчної та геометричної інтерпретації;
- відсутність графічних ілюстрацій;
- відсутність зв'язку між змістом роботи й матеріалами, розміщеними в додатках;
- відсутність зв'язку між змістом роботи та бібліографічним списком;
- неправильне оформлення списку літератури.

## ЛІТЕРАТУРА

1. Шавьолкін О.О. Силові напівпровідникові перетворювачі енергії: навч. посібник / О.О. Шавьолкін; Харків, над. ун-т. міськ. госп-ва ім. О.М. Бекетова. - Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2015. – 403 с.
2. Казачковський М.М. Автономні перетворювачі та перетворювачі частоти: Навчальний посібник. – Дніпропетровськ: НГА України, 2000. – 197 с.
3. Перетворювальна техніка : підручник для студ. вищих техн. закладів освіти. Ч.ІІ / [Ю.П. Гончаров та ін.] ; за ред. В.С. Руденка. Харків : Фоліо, 2000. 360 с.
4. Попович М. Г. Електромеханічні системи керування та електроприводи : навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.
5. Воронин П. А. Силовые полупроводниковые ключи: семейства, характеристики, применение. –М. : Издательский дом Додэка–XXI, 2005. – 384 с.
6. Електропривод. Підручник / Ю.М. Лавріненко, О.С. Марченко, П.І. Савченко, О.Ю. Синявський, Д.Г. Войтюк, В.П. Лисенко; за ред. Ю.М. Лавріненка. Видавництво «Ліра-К». – К., 2009. – 504 с.
7. Методичні вказівки до виконання курсової роботи з навчальної дисципліни «Промислова електроніка та перетворювальна техніка» (для студентів спеціальності 141 «Електроніка, електротехніка та електромеханіка» всіх форм навчання.) / Укл.: Удовенко О.О.– Київ: НУБІП, 2020. – 96 с.
8. Преобразовательная техника в электроприводе: практикум / В.А. Дайнеко, Е.Н. Музыченко, Н.А. Равинский. – Минск: БГАТУ, 2010. – 108 с.
1. Овчинников И.Е. Вентильные электрические двигатели и привод на их основе (малая и средняя мощность) / И.Е. Овчинников : Курс лекций. – СПб. : Корона-Век, 2006. – 336 с.
20. Перетворювальна техніка. Підручник.Ч.2. / [Ю.П. Гончаров, О.В. Будьоний, В.Г. Морозов та ін.] : За ред. В.С.Руденка. – Харків : Фоліо, 2000. – 360 с.

## **ДОДАТКИ**

## ДОДАТОК А

### ГРАФІК ВИКОНАННЯ

курсової роботи з дисципліни «Електрообладнання енергетичних установок»  
студента (-ки) групи \_\_\_\_\_ курсу \_\_\_\_\_  
(група) (П.І.Б.)

№ пп	Вид робіт	Строки виконання	Відмітка про виконання	Підпис керівника
1	Вибір теми курсової роботи	1-й тиждень		
2	Складання попереднього плану курсової роботи	2-й тиждень		
3	Добір літературних джерел та технічного довідникового матеріалу	3-й тиждень		
4	Корегування плану курсової роботи (у випадку необхідності)	3-й тиждень		
5	Написання і надання на перевірку першого розділу	4, 5, 6-й тижні		
6	Написання і надання на перевірку другого розділу	7, 8, 9-й тижні		
7	Написання і надання на перевірку другого розділу	10, 11, 12-й тижні		
8	Написання і надання на перевірку вступу та висновків	13- й тиждень		
9	Оформлення курсової роботи згідно з вимогами та подання до захисту	14-й тиждень		
11	Захист курсової роботи	15-й тиждень		

Керівник курсової роботи:

\_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (П.І.Б.)

Студент (-ка) гр. \_\_\_\_\_

\_\_\_\_\_ (підпис) \_\_\_\_\_ (П.І.Б.)

## ДОДАТОК Б

### Вихідні дані до виконання КР

№ з/п	Привод	Схема	$P_n$ , кВт	$U_n$ , В	$\cos\varphi_n$	$\eta_n$	$U_{жс}$ , кВ	$I$ жив	$f_{жс}$ , Гц
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1.	ТП-Д	Рис. 2.1	5	220	—	0,78	0,4	~	50
2.	ТП-Д	Рис. 2.2	10	220	—	0,79	0,4	~	50
3.	ТП-Д	Рис. 2.3	15	220	—	0,82	0,4	~	50
4.	ТП-Д	Рис. 2.4	25	220	—	0,83	0,4	~	50
5.	ТП-Д	Рис. 2.5	30	220	—	0,84	0,4	~	50
6.	ТП-Д	Рис. 2.6	60	220	—	0,86	0,4	~	50
7.	ТП-Д	Рис. 2.7	80	440	—	0,87	0,4	~	50
8.	ТП-Д	Рис. 2.8	120	440	—	0,89	0,4	~	50
9.	ТП-Д	Рис. 2.9	250	440	—	0,90	0,4	~	50
10.	ТП-Д	Рис. 2.10	400	600	—	0,92	6,0	~	50
11.	ТП-Д	Рис. 2.11	500	600	—	0,93	6,0	~	50
12.	ТП-Д	Рис. 2.12	750	600	—	0,78	6,0	~	50
13.	ТП-Д	Рис. 2.13	1000	750	—	0,79	6,0	~	50
14.	ТП-Д	Рис. 2.14	2000	930	—	0,82	6,0	~	50
15.	ТП-Д	Рис. 2.15	3200	930	—	0,83	6,0	~	50
16.	ТП-Д	Рис. 2.16	4000	930	—	0,84	6,0	~	50
17.	ТП-Д	Рис. 2.17	5000	930	—	0,86	6,0	~	50
18.	ТП-Д	Рис. 2.18	6300	930	—	0,87	6,0	~	50
19.	ТП-Д	Рис. 2.19	90	440	—	0,88	0,4	~	50
20.	ТП-Д	Рис. 2.20	120	440	—	0,89	0,4	~	50
21.	ТП-Д	Рис. 2.21	250	440	—	0,90	0,4	~	50
22.	ТП-Д	Рис. 2.22	400	440	—	0,92	6,0	~	50
23.	ТП-Д	Рис. 2.23	240	220	—	0,94	0,4	~	50
24.	ТП-Д	Рис. 2.24	400	220	—	0,94	6,0	~	50
25.	ШПП-Д	Рис. 3.33	2000	440	—	0,97	0,55	=	—
26.	ЧПП-Д	Рис. 3.44	400	440	—	0,97	0,55	=	—
27.	ШПП-Д	Рис. 3.55	220	440	—	0,93	0,55	=	—
28.	ШПП-Д	Рис. 3.66	440	600	—	0,94	0,55	=	—
29.	АН-АД	Рис. 3.99	630	6000	0,89	0,95	6,0	=	—
30.	АІС-АД	Рис. 3.1010	1250	6000	0,87	0,96	6,0	=	—
31.	ПЧ-АД	Рис. 3.1313	55	380	0,87	0,93	0,4	~	50
32.	ПЧ-АД	Рис. 3.2714	75	380	0,88	0,94	6,0	~	50
33.	ПЧ-АД	Рис. 3.15	125	380	0,89	0,94	6,0	~	50
34.	БПЧ-АД	Рис. 3.6	250	380	0,90	0,94	0,4	~	50
35.	БПЧ-АД	Рис. 3.2817	400	380	0,86	0,95	0,4	~	50
36.	ВД	Рис. 3.18	1500	6000	0,87	0,95	6,0	~	50
37.	АВК	Рис. 3.19	400	380	0,87	0,95	6,0	~	50
38.	ТПН-АД	Рис. 3.20	125	380	0,88	0,94	0,4	~	50
39.	ТПН-АД	Рис. 3.21	250	380	0,89	0,94	0,4	~	50
40.	ТПН-АД	Рис. 3.22	400	380	0,90	0,97	0,4	~	50

№ з/п	Привод	Схема	$P_{н\>}$ кВт	$U_{н\>}$ В	$\cos\varphi_{н\>}$	$\eta_{н\>}$	$U_{ж\>}$ кВ	$I$ жив	$f_{ж\>}$ Гц
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
41.	ТПН-АД	Рис. 3.23	500	380	0,86	0,97	6,0	~	50
42.	ТПН-АД	Рис. 3.24	630	6000	0,87	0,93	6,0	~	50
43.	ТПН-АД	Рис. 3.25	800	6000	0,87	0,94	6,0	~	50
44.	ТПН-АД	Рис. 3.26	1000	6000	0,88	0,95	6,0	~	50
45.	ТП-Д	Рис. 2.1	10	220	—	0,78	0,4	~	50
46.	ТП-Д	Рис. 2.2	15	220	—	0,79	0,4	~	50
47.	ТП-Д	Рис. 2.3	25	220	—	0,82	0,4	~	50
48.	ТП-Д	Рис. 2.4	30	220	—	0,83	0,4	~	50
49.	ТП-Д	Рис. 2.5	120	440	—	0,84	0,4	~	50
50.	ТП-Д	Рис. 2.6	250	440	—	0,86	0,4	~	50
51.	ТП-Д	Рис. 2.7	400	600	—	0,87	6,0	~	50
52.	ТП-Д	Рис. 2.8	500	600	—	0,89	6,0	~	50
53.	ТП-Д	Рис. 2.9	750	600	—	0,90	6,0	~	50
54.	ТП-Д	Рис. 2.10	1000	750	—	0,92	6,0	~	50
55.	ТП-Д	Рис. 2.11	2000	930	—	0,93	6,0	~	50
56.	ТП-Д	Рис. 2.12	3200	930	—	0,78	6,0	~	50
57.	ТП-Д	Рис. 2.13	4000	930	—	0,79	6,0	~	50
58.	ТП-Д	Рис. 2.14	5000	930	—	0,82	6,0	~	50
59.	ТП-Д	Рис. 2.15	6300	930	—	0,83	6,0	~	50
60.	ТП-Д	Рис. 2.16	90	440	—	0,84	0,4	~	50
61.	ТП-Д	Рис. 2.17	120	440	—	0,86	0,4	~	50
62.	ТП-Д	Рис. 2.18	250	440	—	0,87	0,4	~	50
63.	ТП-Д	Рис. 2.19	400	440	—	0,88	0,4	~	50
64.	ТП-Д	Рис. 2.20	240	440	—	0,89	0,4	~	50
65.	ТП-Д	Рис. 2.21	400	440	—	0,90	0,4	~	50
66.	ТП-Д	Рис. 2.22	2000	440	—	0,92	6,0	~	50
67.	ТП-Д	Рис. 2.23	3200	440	—	0,94	6,0	~	50
68.	ТП-Д	Рис. 2.24	220	600	—	0,94	0,4	~	50
69.	ШПП-Д	Рис. 3.33	440	600	—	0,97	0,55	=	—
70.	ЧПП-Д	Рис. 3.44	630	600	—	0,97	0,55	=	—
71.	ШПП-Д	Рис. 3.55	1200	750	—	0,93	0,55	=	—
72.	ШПП-Д	Рис. 3.66	90	440	—	0,94	0,55	=	—
73.	АН-АД	Рис. 3.99	125	380	0,87	0,95	0,4	=	—
74.	АИС-АД	Рис. 3.1010	200	380	0,88	0,96	0,4	=	—
75.	ПЧ-АД	Рис. 3.1313	250	380	0,89	0,93	0,4	~	50
76.	ПЧ-АД	Рис. 3.2714	320	380	0,90	0,94	0,4	~	50
77.	ПЧ-АД	Рис. 3.15	400	380	0,86	0,94	0,4	~	50
78.	БПЧ-АД	Рис. 3.6	500	6000	0,87	0,94	6,0	~	50
79.	БПЧ-АД	Рис. 3.2817	630	6000	0,87	0,95	6,0	~	50
80.	ВД	Рис. 3.18	3500	380	0,88	0,95	0,4	~	50
81.	АВК	Рис. 3.19	800	380	0,89	0,95	6,0	~	50
82.	ТПН-АД	Рис. 3.20	1000	6000	0,90	0,94	6,0	~	50

№ з/п	Привод	Схема	$P_{н\>}$ кВт	$U_{н\>}$ В	$\cos\varphi_n$	$\eta_n$	$U_{ж\>}$ кВ	$I$ жив	$f_{ж\>}$ Гц
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
83.	ТПН-АД	Рис. 3.21	1250	380	0,86	0,94	0,4	~	50
84.	ТПН-АД	Рис. 3.22	1600	380	0,87	0,97	0,4	~	50
85.	ТПН-АД	Рис. 3.23	200	6000	0,89	0,97	6,0	~	50
86.	ТПН-АД	Рис. 3.24	320	6000	0,90	0,93	6,0	~	50
87.	ТПН-АД	Рис. 3.25	250	380	0,86	0,94	0,4	~	50
88.	ТПН-АД	Рис. 3.26	400	380	0,87	0,95	0,4	~	50

**ДОДАТОК В**  
**Технічні данні трансформаторів для загальнопромислових**  
**перетворювачів**

№ з/п	Тип трансформатору	Номинальна потужність, кВА	Напруга обмотки мережі перетворювача, В	Вентильна обмотка		Параметри перетворювача		Напруга $U_{кз}$ , %	Втрати $P_{кз}$ , Вт
				Напруга, В	Струм, А	Напруга, В	Струм, А		
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
1	ТСП-10/0,7	7,3	380	205	20.5	230	25	4,7	320
2	ТСП-16/0,7	14,6	380	205	41	230	50	5,2	550
3	ТСП-25/0,7	23,1	380	205	82	230	100	5,5	1100
4	ТСП-63/0,7	58	380	205	164	230	200	5,5	1900
5	ТСП-100/0,7	93	380	205	262	230	320	5,8	2300
6	ТСП-125/0,7	117	380	410	164	460	200	5,8	2700
7	ТСЗП-160/0,7	143	380	416	204	460	250	4,5	2400
8	ТСЗП-250/0,7	235	380	416	326	460	400	4,7	3400
9	ТСЗП-400/10	364	6000	569	408	660	500	5,6	4700
10	ТСЗП-630/10	580	6000	410	816	460	1000	5,9	5600
11	ТСЗП-630/10	645	6000	570	652	660	800	5,9	5600
12	ТСЗП-1000/10	938	6000	415	1305	460	1600	6,1	8400
13	ТСЗП-1000/10	938	6000	570	1020	660	1250	6,1	8400
14	ТСЗП-1000/10	1007	6000	712	816	825	1000	6,1	8400
15	ТСЗП-1600/10	1450	6000	410	2042	460	2500	6	13500
16	ТСЗП-1600/10	1612	6000	570	1635	660	2000	6	13500
17	ТСЗП-1600/10	1621	6000	717	1308	825	1600	6	13500
18	ТСЗП-2500/10	2324	6000	410	3267	460	4000	6,5	19500
19	ТСЗП-2500/10	1979	6000	561	2042	660	2500	6,5	19500
20	ТСЗП-2500/10	2509	6000	710	2042	825	2500	6,5	19500
21	ТСЗП-4000/10	3220	6000	570	3265	660	4000	7,4	25000
22	ТСЗП-4000/10	4028	6000	570	4080	660	5000	7,4	25000
24	ТСЗП-4000/10	4030	6000	712	3265	825	4000	7,4	25000
25	ТСЗП-4000/10	3180	6000	902	2042	1050	2500	7,4	25000
26	ТМП-6300/10	5030	6000	565	5140	660	6300	6,1	33600
27	ТМП-6300/10	6280	6000	706	4080	825	5000	6,1	28500
28	ТМП-6300/10	6360	6000	900	4080	1050	5000	8,1	44800
29	ТДП-10000/10	7980	6000	896	5140	1050	6300	6,1	39000
30	ТДП-10000/10	10130	6000	896	6530	1050	8000	7,7	63300

**ДОДАТОК Д**  
**Технічні данні реакторів постійного струму для**  
**загальнопромислових перетворювачів**

№ з/п	Тип реактору	Номинальний струм, А	Номинальна індуктивність, мГн	Активний опір, Ом
1	2	3	4	5
1	ФРОС-65/0,5	250	1,5	0,0068
2	ФРОС-65/0,5	320	1	0,0045
3	ФРОС-125/0,5	500	0,75	0,003
4	ФРОС-250/0,5	250	6,5	0,0176
5	ФРОС-250/0,5	320	4,2	0,0115
6	ФРОС-250/0,5	800	0,6	0,0017
7	ФРОС-250/0,5	1000	0,35	0,0011
8	ФРОС-500/0,5	500	3,25	0,0075
9	ФРОС-1000/0,5	800	2,3	0,0047
10	ФРОС-1000/0,5	800	5	0,0072
11	ФРОС-1000/0,5	1000	1,6	0,0031
12	СРОС-63/0,5	200/100*	4/16*	0,0167
13	СРОС-100/0,5	320/160*	2,25/9*	0,0102
14	СРОС-160/0,5	150/75*	3,5/0,875	0,0075
15	СРОС-200/0,5	200/100*	30\7,5	0,00401
16	СРОС-400/0,5	200/400*	60/15	0,00235
17	СРОС-500	1000		0,00154
18	СРОС-800	1600	0,5/2	0,00082
19	СРОС3-1250	2000	0,2/0,8	0,00044
20	СРОС3-2000	4000	0,2/0,8	0,00025
21	СРОС3-3200	6300	0,08/0,32	0,00012
22	СРОС3-4000	8000	0,1/0,4	0,00009
23	СРОС3-5000	10000	0,08/0,32	0,00007
24	СРОС3-6300	12500	0,06/0,24	0,00005

\* - паралельне та послідовне з'єднання напівобмоток реактору

**ДОДАТОК Е**  
**Технічні данні реакторів змінного струму для**  
**загальнопромислових перетворювачів**

№ з/п	Тип реактору	Номінальний струм, А	Номінальна індуктивність, мГн	Активний опір, Ом
1	2	3	4	5
1	РТСТ-20,5	20,5	2,02	0,265
2	РТСТ-41	41	1,01	0,102
3	РТСТ-82	82	0,505	0,037
4	РТСТ-165	165	0,25	0,013
5	РТСТ-265	265	0,156	0,0072
6	РТСТ-410	410	0,101	0,0038
7	РТСТ-660	660	0,064	0,0021
8	РТСТ-820	820	0,0505	0,0014
9	РТТ 0,38-50	50	0,446	0,042
10	РТТ 0,38-80	80	0,446	0,042
11	РТТ 0,38-100	100	0,446	0,042
12	РТТ 0,38-200	200	0,446	0,042

**ДОДАТОК Є**  
**Технічні дані тиристорів**

№ з/п	Тип тиристора	Середній струм $I_{TAV}$ А	Напруга, що повторюється $U_{DRM}$ В	Порогова напруга $U_T$ , В	Ударний струм $I_{TSM}$ А	Динамічний опір $r_T$ , мОм
1	2	3	4	5	6	7
1	T161-125	125	300-1800	1,75	2500	1,3
2	T333-250	250	1600-2400	2,5	6000	1,3
3	T333-320	320	1600-2400	2,1	7000	0,7
4	T343-500	500	1600-2400	2,3	8000	0,7
5	T343-630	630	1600-2400	1,9	9000	0,3
6	T253-800	800	2000-2400	2,1	17000	0,4
7	T353-1000	1000	2000-2400	2,0	19000	0,2
8	T453-1250	1250	2000-2400	1,8	24000	0,1
9	T173-1600	1600	2000-2400	2.05	36000	0,1
10	T173-2000	2000	2000-2400	1,6	46000	0,06
11	T173-2500	2500	2000-2400	1.55	50000	0,05
12	T173-3200	3200	2000-2400	1,5	60000	0,03

**ДОДАТОК Ж**  
**Технічні данні діодів**

№ з/п	Тип діода	Середній струм $I_{TAV}$ , А	Напруга, що повторюється $U_{DRM}$ , В	Порогова напруга $U_T$ , В	Ударний струм $I_{TSM}$ , А	Динамічний опір $r_T$ , мОм
1	2	3	4	5	6	7
1	Д123-200	200	4600 - 6000	2,5	3000	1,1
2	Д123-250	250	3000 - 4400	2,2	4000	1,0
3	Д123-320	320	1800 - 2800	2,0	5500	0,9
4	Д233-400	400	2400 - 4400	2,0	6000	0,8
5	Д233-500	500	1000 - 4400	2,0	7000	0,5
6	Д143-630	630	1000 - 3200	2,1	10500	0,4
7	Д143-800	800	1000 - 2400	1,55	18000	0,2
8	Д243-1000	1000	1000 - 3200	1,55	16000	0,1
9	Д353-1250	1250	1000 - 2400	2,2	24000	0,1
10	Д353-1600	1600	400 - 2200	2,0	26000	0,1
11	Д253-2000	2000	400 - 2400	1,55	35000	0,08
12	Д253-2500	2500	1200 - 2800	1,65	40000	0,05

**ДОДАТОК И**  
**Технічні данні запобіжників**

№ з/п	Тип запобіжника	Номінальний струм, А	Інтеграл відключення, А <sup>2</sup> ·с
1	2	3	4
1	ПП57-31	100	100000
2	ПП57-34	250	240000
3	ПП57-37	400	710000
4	ПП57-39	630	1160000
5	ПП57-40	800	1300000

Номінальна напруга запобіжників: 220, 380, 660, 1250, 2000 В.

**ДОДАТОК К**  
**Технічні данні автоматичних вимикачів**

№ з/п	Тип вимикача	Номінальний струм, А	Час відключення, с
1	2	3	4
1	A3710	160	0,040
2	A3720	250	0,040
3	A3730	400	0,040
4	A3740	630	0,040
5	ВАТ-42-1000	1000	0,012
6	ВАТ-42-2000	2000	0,012
7	ВАТ-42-4000	4000	0,012
8	ВАТ-42-6300	6300	0,012
9	ВАТ-42-10000	10000	0,012

Номінальна напруга автоматичних вимикачів: А3700 – 220, 380, 440, 660.  
ВАТ-42 – 660, 1050.

**ДОДАТОК Л**  
**Технічні данні резисторів**

№ з/п	Тип резистору	Межі опору		Номінальна напруга, В	Номінальна потужність, Вт
		Мінімальне, Ом	Максимальне, кОм		
1	2	3	4	5	6
1	МЛТ-0,25	51	3000	250	0,25
2	МЛТ-0,5	51	5100	350	0,5
3	МЛТ-1	51	10000	500	1
4	МЛТ-2	51	10000	750	2
5	ПЕВ-7,5	1	3,3	600	7,5
6	ПЕВ-10	1,8	10	600	10
7	ПЕВ-15	3,9	15	600	15
8	ПЕВ-25	10	24	600	25
9	ПЕВ-50	18	51	600	50
10	ПЕВ-75	47	56	600	75
11	ПЕВ-100	47	56	600	100
12	С5-5-1	1	13	400	1
13	С5-5-2	2	30	400	2
14	С5-5-5	5,1	75	400	5
15	С5-5-8	10	100	400	8
16	С5-5-10	10	180	400	10

**ДОДАТОК М**  
**Технічні данні конденсаторів**

№ з/п	Тип конденсатору	Межі ємності		Номінальна напруга, В
		Мінімальне, мкФ	Максимальне, мкФ	
1	2	3	4	5
1	K53-14	0,47	68	30
2	K52-1	10	470	25
3	K50-35	2,2	2200	160
4	K52-1	1,5	150	100
5	B25650	0,56	16000	2400
6	K73-17	0,001	1	630
7	K73-9	0,001	0,15	630
8	K78-2	0,001	0,47	1600
9	B32522	0,1	6,8	400
10	B32656	0,33	1,0	2000

Навчальне видання

**Омельченко Олександр Володимирович**, к.т.н., доцент

Кафедра загальноінженерних дисциплін та обладнання

## **ЕЛЕКТРООБЛАДНАННЯ ЕНЕРГЕТИЧНИХ УСТАНОВОК**

**Методичні рекомендації  
до виконання курсової роботи**

---

Зведений план 2016 р., поз. № \_\_\_\_  
Донецький національний університет економіки і торгівлі  
імені Михайла Туган-Барановського  
50005, Дніпропетровська обл.,  
м. Кривий Ріг, вул. Трамвайна, 16.