

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
КАФЕДРА ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИКИ, ЕЛЕКТРОТЕХНІКИ ТА
ЕЛЕКТРОМЕХАНІКИ

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ (ЧАСТИНА II)

методичні рекомендації

для виконання практичних робіт здобувачами
за першим (бакалаврським) рівнем вищої освіти ОПП «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка» спеціальності 141 «Електроенергетика,
електротехніка та електромеханіка» денної форми здобуття вищої освіти

Миколаїв

2025

УДК 621.313:621.373

Т30

Рекомендовано до друку методичною радою Інженерно-енергетичного факультету Миколаївського національного аграрного університету від 15.10.2025, протокол № 2.

Укладач:

Ростислав Ставинський — канд. тех. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Віталій Мардзявко — асистент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Рецензенти:

Олексій Садовий — канд. тех. наук, доцент кафедри електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

Андрій Ставинський — д-р техн. наук, професор, зав. кафедрою електроенергетики, електротехніки та електромеханіки, Миколаївський національний аграрний університет.

© Миколаївський національний
аграрний університет, 2025

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1. Тема: Перехідний процес в електроприводі, розрахунок часу пуску та зупинки електродвигуна.....	7
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2. Тема: Розрахунок характеристик та пускового реостата ДПС.....	17
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3. Тема: Розрахунок механічних характеристик асинхронного електродвигуна при регулюванні швидкості обертання частотою струму.....	28
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4. Тема: Вибір двигуна постійного струму.....	49
ПРАКТИЧНА РОБОТА №5. Тема: Розрахунок і вибір потужності електродвигуна для повторно-короткочасного режиму роботи.....	60
ПРАКТИЧНА РОБОТА №6. Тема: Розрахунок і вибір потужності електродвигуна для тривалого режиму роботи.....	73
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7. Тема: Розрахунок параметрів та характеристик електропривода системи ТП-Д.....	84
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 8. Тема: Дослідження схеми керування електродвигуном постійного струму паралельного збудження при пуску в функції часу.....	102
ПРАКТИЧНА РОБОТА № 9. Тема: Дослідження робочих та регулювальних характеристик асинхронного двигуна з при живленні від перетворювача частоти.....	114
ПРАКТИЧНА РОБОТА №10. Тема: Розрахунок системи ПЧ-АД..	128
ПРАКТИЧНА РОБОТА №11. Тема: Дослідження схем нереверсивного та реверсивного керування асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором.....	148

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ПРАКТИЧНИХ РОБІТ.....	178
ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ПІДГОТОВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАННЯТЬ.....	180
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	182
ДОДАТКИ.....	185

ВСТУП

Сучасний розвиток електроприводів характеризується широким застосуванням автоматизованих систем керування, які забезпечують підвищення енергоефективності, точності регулювання та надійності роботи електромеханічних комплексів. Вивчення дисципліни «Теорія електроприводу» має на меті формування у здобувачів вищої освіти системи знань про принципи побудови, функціонування, моделювання та дослідження електромеханічних систем автоматичного керування. Особливу увагу приділено аналізу перехідних процесів, дослідженню статичних і динамічних характеристик двигунів різних типів, визначенню впливу електромагнітних та механічних параметрів на роботу електроприводу.

Методичні рекомендації, викладені у частині II, спрямовані на поглиблення практичних навичок і закріплення теоретичних знань з основ побудови та аналізу електроприводів. У них наведено матеріал для виконання трьох базових практичних робіт, що охоплюють найважливіші аспекти роботи електроприводів:

- дослідження перехідних процесів електроприводу, розрахунок часу пуску та зупинки двигуна;
- аналіз реостатного пуску та динамічного гальмування двигуна постійного струму;
- розрахунок механічних характеристик асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні швидкості обертання.

Кожна практична робота містить короткі теоретичні відомості, приклад виконання розрахунків, контрольні питання та таблиці вихідних даних. Така структура забезпечує логічну послідовність засвоєння навчального матеріалу - від теоретичного осмислення фізичних процесів до практичної реалізації та аналізу результатів.

Зміст методичних рекомендацій відповідає програмі освітньо-професійної підготовки за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» першого (бакалаврського) рівня вищої освіти. Представлений матеріал охоплює ключові елементи теорії електроприводу, які формують основу для подальшого вивчення спеціалізованих дисциплін - таких як «Енергозберігаючі технології в електромеханічних системах» тощо.

Практична спрямованість методичних рекомендацій дозволяє студентам набути досвіду розрахунку електромеханічних характеристик двигунів, визначення режимів роботи систем електроприводу, аналізу процесів пуску, гальмування та регулювання швидкості.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

Тема: Перехідний процес в електроприводі, розрахунок часу пуску та зупинки електродвигуна

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з методикою розрахунку часу пуску та зупинки електродвигуна

1.1. Теоретичні відомості

Перехідним режимом роботи електроприводу називається режим переходу від одного сталого стану до іншого. Перехідні процеси в електроприводі виникають, наприклад, при пуску двигуна, реверсі, гальмуванні, скиданні або набиранні навантаження, зміні параметрів двигуна. У перехідних процесах взаємозалежно змінюються швидкість двигуна, його ток, момент і ЕРС.

Від протікають по обмотках двигуна струмів в них виникають втрати, і обмотки якоря і збудження нагріваються. Процес нагріву двигуна зазвичай вельми тривалий, тому при дослідженні перехідних процесів струму та швидкості тепловими перехідними процесами зазвичай нехтують, вважаючи активні опори двигуна постійними.

Електромеханічні і електромагнітні перехідні процеси в сучасних електроприводах протікають за порівнянне час, і при дослідженні перехідних режимів їх необхідно враховувати. Тим більше що всі параметри для розрахунку таких перехідних процесів наводяться в довідкових даних по електричним машинам, а сучасне програмне забезпечення дозволяє провести розрахунки без істотних тимчасових витрат. Однак є ціла група електроприводів з релейно-контакторних управлінням, в яких електромагнітні перехідні процеси протікають за дуже короткий час і ними так само можна знехтувати.

Для розрахунку та дослідження перехідного процесу електроприводу в першу чергу необхідно навчитися визначати час перехідного процесу (пуску та зупинки). Час перехідного процесу при зміні часу від значення ω_1 до ω_2 , визначається виразом:

$$t_{1-2} = J \cdot \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{дин}}, \text{ с.} \quad (1.1)$$

де J – величина, що приведена до валу двигуна.

Для визначення величину динамічного моменту двигуна при пуску та при різних видах гальмування, розберемо приклад розрахунку перехідного процесу електродвигуна.

1.2. Завдання

Необхідно виконати розрахунок параметрів перехідних процесів електроприводу, а саме пуску та гальмування асинхронного двигуна з жорсткою механічною характеристикою. Вихідними даними є номінальна потужність двигуна P_n , кВт, номінальна швидкість обертання n_n , об/хв, момент інерції двигуна J_d , кг·м² та момент інерції механізму на валу J_l , кг·м². Значення параметрів для індивідуального варіанту студент обирає згідно свого порядкового номера (див. табл. 1.1).

Прийняти коефіцієнт приведення моменту інерції зовнішніх мас $\delta=1,15$, статичний момент навантаження $M_c = 0,8 \cdot M_n$, середній пусковий момент $M_{пуск} = 1,7 \cdot M_n$, початковий гальмівний момент $M_{галь.п} = 2,2 \cdot M_n$ та кінцевий гальмівний момент $M_{галь.к} = 1,2 \cdot M_n$.

Потрібно визначити приведений момент інерції системи, розрахувати номінальний, статичний та динамічні моменти двигуна при пуску і гальмуванні, визначити час пуску $t_{пуск}$ та час гальмування $t_{галь}$, розрахувати початкову кінетичну енергію обертової системи та оцінити її розсіяння під час гальмування, побудувати графіки залежності швидкості від часу при пуску та

гальмуванні ($\omega-t$) та зробити висновки, охарактеризувавши процеси пуску та гальмування, оцінити вплив моменту інерції та гальмівних моментів на тривалість процесів, пояснити енергетичний зміст гальмування як перетворення кінетичної енергії у тепло та порівняти розрахункові результати з побудованими графіками.

1.3. Приклад виконання практичного завдання

Завдання: Визначити параметри пуску та гальмування двигуна, працюючого з реактивним статичним навантаженням, яке дорівнює 0,8 від номінальної, якщо середній пусковий момент, який розвиває двигун рівний 1,7 від номінального, двигун гальмує в режимі проти вмикання. Початковий гальмівний момент дорівнює 2,2 номінального, а кінцевий гальмівний момент – 1,2 від номінального, момент інерції обертаючих частин, який знаходиться на валу електродвигуна рівний – 0,3 кг·м². Коефіцієнт δ який враховує момент інерції обертових частин системи які не знаходяться на валу двигуна, рівні – 1,15.

Номінальні показники двигуна: Потужність 4,2 кВт; швидкість обертання 730 об/хв.; момент інерції 1,87 кг·м². Механічна характеристика – жорстка. Необхідно визначити час пуску – $t_{\text{пуск}}$ та час гальмування – $t_{\text{галь}}$.

Дано: $P_n = 4,2$ кВт; $n_n = 730$ об/х; $J_d = 2$ кг·м²; $J_l = 0,32$ кг·м²; $\delta = 1,15$; $M_c = 0,8 \cdot M_n$; $M_{\text{ср.пуск}} = 1,7 \cdot M_n$; $M_{\text{поч.галь}} = 2,2 \cdot M_n$; $M_{\text{кін.галь}} = 1,2 \cdot M_n$.

1. Кутова швидкість номінальна:

$$\omega_n = 2\pi \cdot \frac{n_n}{60} = 2\pi \cdot \frac{730}{60} = 76,4 \text{ рад/с.}, \quad (1.2)$$

2. Момент інерції який приведений до валу двигуна, визначаємо за виразом:

$$J_{np} = J_d + \delta \cdot J_l = 2 + 1,15 \cdot 0,32 = 2,36 \text{ кг·м}^2, \quad (1.3)$$

2. Номінальний момент двигуна:

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{4250}{76,4} = 55,59 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (1.4)$$

3. Статичний момент двигуна:

$$M_c = 0,8 \cdot M_n = 0,8 \cdot 55,59 = 44,47 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (1.5)$$

4. Динамічний момент двигуна:

а) при пуску двигуна:

$$M_{\text{дин.пуск}} = M_{\text{ср.пуск}} - M_c = 1,7 \cdot M_n - 0,8 \cdot M_n = 0,9 \cdot M_n, \quad (1.6)$$

$$M_{\text{дин.пуск}} = 0,9 \cdot 55,59 = 50,03 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

б) при гальмуванні, відповідно до правил визначення знаків моментів за правилом спів падання з обертанням (гальмування на початку):

$$M_{\text{дин.торм}} = M_{\text{ср.торм}} - M_c = -(M_{\text{ср.торм}} - M_c), \quad (1.7)$$

де

$$M_{\text{ср.торм}} = \frac{M_{\text{нач.торм}} + M_{\text{кон.торм}}}{2} = \frac{2,2M_n + 1,2M_n}{2} + 1,7 \cdot M_n, \quad (1.8)$$

тоді

$$M_{\text{дин.торм}} = (2,2 - 0,8)M_n = 1,4 \cdot M_n, \quad (1.9)$$

$$M_{\text{дин.торм}} = 1,4 \cdot 55,59 = 77,83 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

в) при гальмуванні в кінці:

$$M_{\text{торм.кінці}} = (1,2 - 0,8)M_n = 0,4 \cdot M_n, \quad (1.10)$$

$$M_{\text{торм.кінці}} = 0,4 \cdot 55,59 = 22,23 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

5. Час пуску двигуна:

$$t_{\text{пуск}} = J_{\text{пр}} \cdot \frac{\omega_2 - \omega_1}{M_{\text{дин.пуск}}}, \quad (1.11)$$

де ω_2 - швидкість обертання двигуна при навантаженні, яке відповідає статичному моменту. Так як за умовою механічна характеристика двигуна жорстка, то для практичних розрахунків необхідно прийняти:

$$\omega_2 = \omega_c \approx \omega_n,$$

ω_1 - початкова швидкість при пуску (с нерухомого стану).

$$\omega_1 = \omega_2 \approx \omega_n,$$

Тоді

$$t_{\text{пуск}} = \frac{J_{\text{пр}} \omega_n}{M_{\text{дин.пуск}}} = \frac{2,36 \cdot 76,4}{50,03} = 3,62 \text{ с.} \quad (1.12)$$

6. Час гальмування двигуна:

$$t_{\text{гальм}} = \frac{J_{\text{пр}} \omega_n}{M_{\text{дим.торм}}} = \frac{2,36 \cdot 76,4}{77,8} = 2,32 \text{ с.} \quad (1.13)$$

7. Енергетика:

Початкова кінетична енергія:

$$E_{\text{кін}} = \frac{1}{2} \cdot J_{\text{пр}} \cdot \omega_n^2 = \frac{1}{2} \cdot 2,36 \cdot 76,4^2 = 6919,2 \text{ Дж,} \quad (1.14)$$

8. Побудова графіка пуску (ω – t), (рис. 1.1). Під час пуску двигуна він починає рухатися з нерухомого стану ($\omega = 0$) і поступово розганяється до своєї номінальної швидкості обертання ω_n .

Оскільки за умовою завдання механічна характеристика двигуна жорстка, тобто швидкість практично не залежить від навантаження, а пусковий момент у середньому більший за статичний момент навантаження, можна вважати, що розгін відбувається рівноприскорено. Це означає, що залежність швидкості від часу є лінійною.

Побудова виконується так:

1. Малюємо систему координат:
 - горизонтальна вісь - це час t , с;
 - вертикальна вісь - кутова швидкість ω , рад/с.
2. Позначаємо точку (0; 0) - двигун стоїть, швидкість дорівнює нулю на початку процесу.

3. Позначаємо точку ($t_{\text{руск}}; \omega_n$) - це момент, коли двигун досяг номінальної швидкості за розрахований час пуску.

4. З'єднуємо ці дві точки прямою лінією. Оскільки розгін відбувається з майже постійним прискоренням, лінія виходить прямою і відображає рівномірний ріст швидкості.

5. Обов'язково підписуємо осі:

- вертикальну як « ω , рад/с»;
- горизонтальну як « t , с».

Таким чином отримуємо простий, але інформативний графік: швидкість наростає від 0 до ω_n за час $t_{\text{руск}}$.

9. Побудова графіка гальмування ($\omega-t$), (рис. 1.1). У випадку гальмування двигун працює у режимі противмикання. Це означає, що на його вал прикладається гальмівний момент, який протидіє руху і зменшує швидкість до повної зупинки.

Побудова виконується аналогічно:

1. У тій самій системі координат позначаємо точку (0; ω_n) - початок гальмування (двигун працює на номінальній швидкості).

2. Позначаємо точку ($t_{\text{гальм}}; 0$) - момент повної зупинки двигуна.

3. Якщо приймається середній гальмівний момент (що часто роблять для спрощення), то залежність швидкості від часу вважається лінійною, і точки з'єднуються прямою лінією, яка показує рівномірне уповільнення.

4. Якщо ж ураховувати зміну гальмівного моменту (він за умовою змінюється від $M_{\text{поч}} = 2,2M_n$ до $M_{\text{кін}} = 1,2M_n$, тоді гальмування відбувається не рівномірно:

- на початку уповільнення швидкість падає швидше (бо момент великий),
- ближче до кінця процесу - повільніше (бо момент зменшується).

У такому випадку графік матиме вигляд вигнутої кривої, що плавно спадає до осі часу.

5. Осі підписуються аналогічно:

- вертикальна - « ω , рад/с»;
- горизонтальна - « t , с».

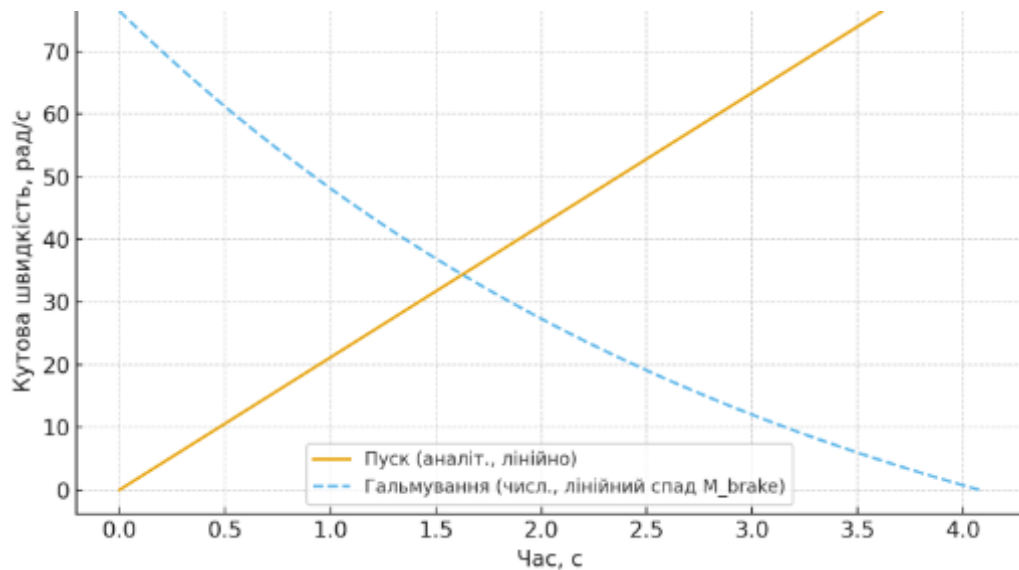


Рис. 1.1 – Графік пуску та гальмування

Графік пуску відображає процес накопичення кінетичної енергії у системі. Графік гальмування показує процес розсіювання цієї енергії у вигляді тепла в гальмівних режимах. Лінійність чи кривизна лінії залежить від того, наскільки детально враховується зміна моменту в часі.

10. Зробити висновок відповідно до узагальнення характеристик процесів пуску та гальмування двигуна, відзначивши особливості зміни кутової швидкості у часі.

1.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з прикладом виконання практичного завдання;
3. Виконати розрахунок за даними у відповідності з варіантом (див. табл. 1.1);

4. Відповісти на контрольні питання.
5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.
6. Зробити висновок про виконану роботу.

1.5. Контрольні питання

1. Що називається перехідним режимом роботи електроприводу?
2. У яких випадках виникають перехідні процеси в електроприводах?
3. Які основні електромеханічні величини змінюються під час перехідних процесів?
4. Чому під час розрахунку перехідних процесів нехтують тепловими явищами?
5. Яка різниця між електромеханічними та електромагнітними перехідними процесами?
6. У яких електроприводах можна знехтувати електромагнітними перехідними процесами і чому?
7. Яке значення має момент інерції при розрахунку пуску та гальмування двигуна?
8. Як визначається номінальна кутова швидкість двигуна?
9. Як розраховується момент інерції, приведений до валу двигуна?
10. Що таке статичний момент навантаження і як він впливає на процес пуску?
11. Як визначається динамічний момент двигуна при пуску?
12. Як змінюється динамічний момент під час гальмування проти вмикання?
13. Як визначається час пуску двигуна при відомому пусковому та статичному моменті?

14. Як визначається час гальмування двигуна при змінному гальмівному моменті?

15. Який фізичний зміст має графік пуску ($\omega-t$)?

16. Який фізичний зміст має графік гальмування ($\omega-t$)?

Таблиця 1.1 - Вихідні дані для розрахунку до практичної роботи № 1

№ вар.	P_n , кВт	ω_n , об/х	J_d , кг·м ²	J_l , кг·м ²
1	4	800	2,1	0,38
2	3,00	475	1,50	0,24
3	3,55	425	1,60	0,25
4	15,0	1400	1,70	0,27
5	7,50	1000	1,80	0,28
6	6,00	875	2,00	0,32
7	4,25	580	1,80	0,28
8	11,0	1060	1,87	0,30
9	8,50	875	1,56	0,26
10	8,00	600	1,70	0,273
11	11,0	800	1,90	0,31
12	8,50	515	2,10	0,34
13	15,0	850	2,20	0,35
14	11,0	530	2,20	0,36
15	15,0	580	3,00	0,48
16	5,50	720	1,75	0,29
17	9,00	950	2,10	0,33
18	12,0	1200	2,30	0,40

№ вар.	P_H , кВт	ω_H , об/х	J_d , кг·м ²	J_l , кг·м ²
19	10,0	875	2,00	0,34
20	6,50	650	1,85	0,27
21	7,20	710	2,05	0,31
22	13,0	960	2,50	0,42
23	5,00	560	1,60	0,25
24	14,0	1450	2,40	0,38
25	9,50	880	2,20	0,36
26	16,0	1000	2,70	0,45
27	6,80	790	1,90	0,29
28	10,5	920	2,15	0,37
29	12,5	1100	2,40	0,39
30	8,20	630	1,75	0,28

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

Тема: Розрахунок характеристик та пускового реостата ДПС

Мета: поглибити теоретичні знання студентів з електромеханічних властивостей двигунів постійного струму; отримати практичні навички та уміння з методики побудови графіків розрахунку багатоступінчастих пускових реостатів та аналізу механічних характеристик ДПС.

2.1. Теоретичні відомості

Двигуни постійного струму (ДПС) належать до найбільш поширених електричних машин у системах автоматизованого електропривода, що зумовлено їх високою жорсткістю механічної характеристики та стабільністю швидкості обертання у широкому діапазоні навантажень. У двигунах даного типу обмотка збудження вмикається паралельно до кола якоря, внаслідок чого магнітний потік Φ практично не залежить від струму навантаження та зберігає сталу величину в номінальному режимі. Електрорушійна сила (ЕРС) якірного кола визначається виразом:

$$E = k\Phi\omega, \quad (2.1)$$

де k - конструктивний коефіцієнт двигуна, ω - кутова швидкість обертання, що свідчить про лінійну залежність швидкості від крутного моменту.

Безпосереднє вмикання двигуна в мережу супроводжується виникненням значного пускового струму, який може у декілька разів перевищувати номінальне значення струму якоря. Це обумовлено тим, що на початку пуску ЕРС двигуна дорівнює нулю, а опір кола якоря має малу величину. З метою обмеження пускового струму у коло якоря послідовно вмикають пусковий реостат, що складається з певної кількості секцій. У процесі розгону двигуна секції реостата поступово виводяться з кола, що

забезпечує поетапне зменшення активного опору та плавне зростання швидкості обертання.

Природна електромеханічна характеристика ДПС, яка описує залежність швидкості обертання від струму якоря, є майже лінійною. Вона визначається за двома характерними режимами: режимом холостого ходу, при якому $I_a = 0$ та $\omega = \omega_0$, і номінальним режимом, де $I_a = I_n$ та $\omega = \omega_n$. Механічна характеристика, що встановлює залежність крутного моменту M від кутової швидкості ω , також має лінійний характер і може бути апроксимована прямою лінією, що з'єднує точки $(0, \omega_0)$ та (M_n, ω_n) . Жорсткість механічної характеристики визначають за виразом

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega}, \quad (2.2)$$

де $\Delta M = M_n - 0$, $\Delta \omega = \omega_0 - \omega_n$. Чим більше значення коефіцієнта β , тим вищою є стабільність швидкості двигуна при зміні навантаження.

Реостатні механічні характеристики формуються шляхом збільшення активного опору кола якоря. Для кожного значення додаткового опору R_d будується окрема характеристика, нахил якої є меншим порівняно з природною характеристикою. Перша реостатна характеристика відповідає найбільшому загальному опору, при якому встановлюється максимальний перемикаючий крутний момент M_1 , що вибирається в межах $1,5 \dots 2,6 M_n$. Наступні характеристики формуються графічно шляхом побудови горизонталей і вертикалей для заданих значень крутного моменту M_1 та M_2 ($1,15 \dots 1,25 M_n$), відповідно до кількості секцій реостата. За розташуванням цих характеристик визначають значення повного та ступеневих опорів пускового реостата.

Динамічне гальмування є ефективним методом примусової зупинки двигуна, який реалізується шляхом від'єднання якірного кола від джерела живлення та підключення його до спеціального гальмівного опору. У цьому режимі залишковий магнітний потік Φ індукує ЕРС, яка викликає

протидіючий струм у колі якоря. Створений при цьому крутний момент має гальмівний характер та описується лінійною залежністю від швидкості обертання. Оптимальне значення гальмівного опору вибирається таким чином, щоб забезпечити достатню інтенсивність зупинки без перевищення допустимого значення струму якоря.

Отже, дослідження процесів реостатного пуску та динамічного гальмування двигуна постійного струму паралельного збудження дає змогу визначити вплив активних опорів у колі якоря на електромеханічні характеристики та встановити умови безпечного пуску й ефективного гальмування електричної машини.

2.2. Завдання

Згідно з вихідними даними обраного варіанта завдання, пов'язаного з реостатним пуском та динамічним гальмуванням ДПС, необхідно:

1) надати схему електричну принципову реостатного пуску двигуна постійного струму (ДПС) паралельного збудження;

2) розрахувати та побудувати графіки природних електромеханічної та механічної характеристик ДПС;

3) побудувати графіки механічних характеристик двигуна при реостатному пуску, визначити графоаналітичним способом опори секцій та повний опір пускового реостата, якщо величини максимального та мінімального перемикаючих моментів знаходяться відповідно у межах $M_1 = (1,5 \dots 2,6)M_{\text{ном}}$ і $M^2 = (1,15 \dots 1,25)M_{\text{ном}}$;

4) визначити коефіцієнт жорсткості ті природної механічної характеристики при зміні моменту ДПС від нуля до номінального;

5) розрахувати та побудувати механічну характеристику двигуна у режимі динамічного гальмування.

Вихідні дані варіантів завдання наведено у таблиці 1, де $U_{\text{ном}} = U_{\text{н}}$ та $I_{\text{н}}$ - номінальні напруга та струм ДПС відповідно; $P_{\text{н}}$ - номінальна потужність двигуна; $R_{\text{з}}$ - опір кола обмотки збудження машини (ОЗМ); $n_{\text{н}}$ - номінальна частота обертання якоря ДПС; m - кількість секцій (ступенів) пускового реостата; $R_{\text{дин}}$ - опір резистора динамічного гальмування, в якості якого використовуються вказана секція пускового реостата.

2.3. Приклад виконання практичного завдання

Завдання: Відомі наступні вихідні дані: $U_{\text{н}} = 220 \text{ В}$; $I_{\text{н}} = 50 \text{ А}$; $P_{\text{н}} = 10 \text{ кВт}$; $n_{\text{н}} = 2500 \text{ об/хв}$; $R_{\text{оз}} = 22 \text{ Ом}$; $m = 3$; $R_{\text{дин}} = R_{\text{пз}}$.

1. Навести схему електричну принципову реостатного пуску ДПС з паралельним збудженням.

2. Знайти номінальний опір ДПС за формулою:

$$R_{\text{н}} = \frac{U_{\text{н}}}{I_{\text{н}}} = \frac{220}{50} = 4,4 \text{ Ом}, \quad (2.3)$$

3. Розрахувати активний опір кола обмотки якоря двигуна:

$$R_{\text{я}} = 0,5(1 - \eta_{\text{н}}) \cdot R_{\text{н}} = 0,5(1 - 0,9) \cdot 4,4 = 0,20 \text{ Ом}, \quad (2.4)$$

де $\eta_{\text{н}}$ - величина номінального ККД - визначається як:

$$\eta_{\text{н}} = \frac{P_{\text{н}}}{U_{\text{н}} \cdot I_{\text{н}}} = \frac{10000}{220 \cdot 50} = 0,90, \quad (2.5)$$

4. Розрахувати величину номінального моменту на валу двигуна, необхідного для побудови графіків природних електромеханічної та механічної характеристик:

$$M_{\text{н}} = 9550 \frac{P_{\text{н}}}{n_{\text{н}}} = 9550 \frac{10}{2500} = 38,2 \text{ Н·м}, \quad (2.6)$$

5. Розрахувати номінальну кутову швидкість ДПС:

$$\omega_n = \frac{2\pi \cdot n_n}{60} = \frac{6,28 \cdot 2500}{60} = 261,6 \text{ рад/с}, \quad (2.7)$$

6. Визначити кутову швидкість ідеального холостого ходу:

$$\omega_0 = \frac{U_n}{k\Phi} = \frac{220}{0,81} = 274 \text{ рад/с}, \quad (2.8)$$

де k - величина коефіцієнта ЕРС двигуна:

$$k\Phi = \frac{U_n - I_n \cdot R_n}{\omega_n} = \frac{220 - 40 \cdot 0,2}{261,6} = 0,81 \text{ В} \cdot \text{с}, \quad (2.9)$$

7. Розрахувати номінальний струм кола якоря:

$$I_{ян} = I_n - I_{\phi} = I_n - \frac{U_n}{R_{оз}} = 50 - \frac{220}{22} = 40 \text{ А}, \quad (2.10)$$

8. Побудувати графіки природних електромеханічної та механічної характеристик, які є лінійними і будуються за координатами двох точок:

а) електромеханічна – перша точка, яка відповідає номінальному режиму $I_a = I_{ян} = 40 \text{ А}$, $\omega = \omega_n = 261,6 \text{ рад/с}$, та друга точка, що відповідає режиму холостого ходу $I_a = I_{я0} = 0$, $\omega = \omega_0 = 274 \text{ рад/с}$;

б) механічна – відповідно пройде через точки $M = M_n = 38,2 \text{ Н} \cdot \text{м}$, $\omega = \omega_n = 261,66 \text{ рад/с}$ та $M = 0$, $\omega = \omega_0 = 274 \text{ рад/с}$.

За отриманими даними будуються графіки характеристик, які надаються на рис. 2.1, а та б.

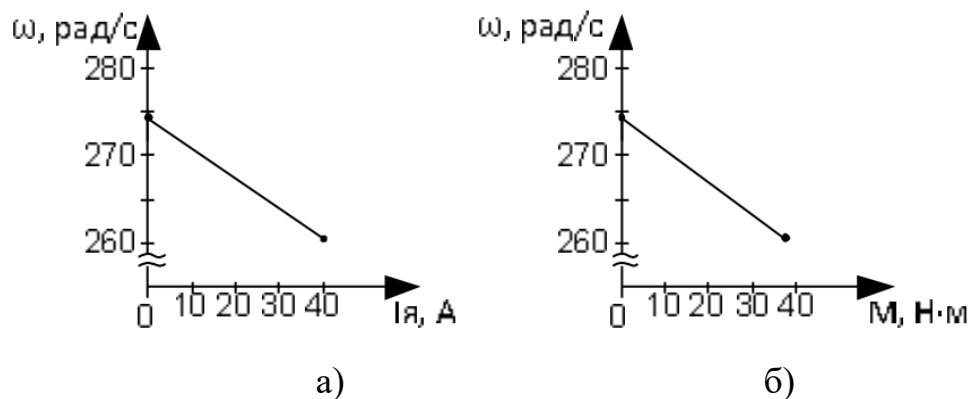


Рис. 2.1 – Природні електромеханічна та механічна характеристики ДПС

9. Побудувати графіки реостатних пускових механічних характеристик ДПС, для чого:

- а) будується природна механічна характеристика;
- б) задаються максимальним пусковим (перемикаючим) моментом $M_1 = 1,9 \cdot M_H = 1,99 \cdot 38,2 = 76 \text{ Н}\cdot\text{м}$, та будується перша реостатна механічна характеристика, яка повинна пройти через точки $\omega = \omega_0$ та $M = M_1$, що розташовані на відповідних осях, та якій відповідає перший ступінь пускового реостата, тобто усі секції його введені у коло якоря;
- в) обирається величина мінімального моменту перемикавання $M_2 = 1,23 \cdot M_H = 1,23 \cdot 38,2 = 43,02 \text{ Н}\cdot\text{м}$;
- г) через точки M_1 та M_2 на осі моментів проводять вертикальні прямі;
- д) через точку перетинання вертикальної прямої з вертикальною із точки M_2 з першою реостатною характеристикою проводять горизонтальну пряму;
- е) точка перетинання цієї прямої з вертикальною, яка виходить із точки M_1 на осі моментів, з'єднуються з точкою ω на осі швидкості і таким чином отримується друга реостатна механічна характеристика;
- ж) виконуючи аналогічні дії, як у пунктах д та е, за допомогою другої характеристики отримують наступну реостатну характеристику та ін.;
- з) кількість побудованих характеристик повинна відповідати числу $m = 3$, інакше необхідно змінювати величину моменту M_2 (графіки надаються на рис. 2.2, прямі 1 - 4).

10. За отриманими графіками характеристики графічним способом визначаються опори кожного ступеня та пускового реостата у цілому за розглянутою вище методикою.

Опори окремих секцій пускового реостата визначаються наступним чином:

$$R_{n3} = \frac{z - d}{a - e} \cdot R_n = \frac{217 - 156}{274} \cdot 4,4 = 0,97 \text{ Ом}, \quad (2.11)$$

$$R_{n2} = \frac{b - c}{a - e} \cdot R_n = \frac{246 - 217}{274} \cdot 4,4 = 0,46 \text{ Ом}, \quad (2.12)$$

$$R_{n1} = \frac{b - e}{a - e} \cdot R_n = \frac{262 - 246}{274} \cdot 4,4 = 0,25 \text{ Ом}, \quad (2.13)$$

Величина повного опору пускового реостата:

$$R_n = \frac{b - d}{a - e} \cdot R_n = \frac{262 - 156}{274} \cdot 4,4 = 1,70 \text{ Ом}, \quad (2.14)$$

$$R_n = R_{n1} + R_{n2} + R_{n3} = 0,25 + 0,46 + 0,97 = 1,68 \text{ Ом}, \quad (2.15)$$

Механічні характеристики двигуна постійного струму з паралельним збудженням при пуску (розгоні) за допомогою пускового реостата наведено на рис. 2.2. Відрізок «а-е» відповідає опору двигуна R_n .

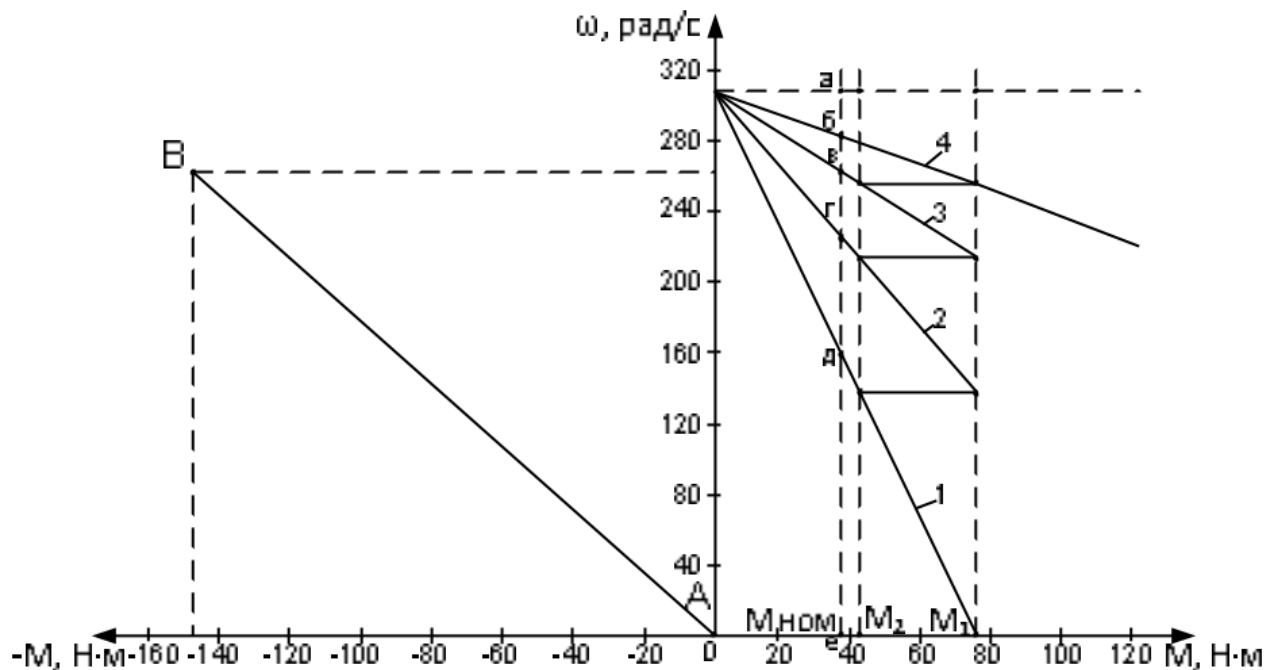


Рис. 2.2 – Механічні характеристики ДПС при реостатному пуску та при динамічному гальмуванні

11. Визначити коефіцієнт жорсткості природної механічної характеристики

$$\beta = \frac{\Delta M}{\Delta \omega} = \frac{0 - M_n}{\omega_0 - \omega_n} = \frac{0 - 38,2}{274 - 261,6} = -3,08 \text{ Н·м·с}, \quad (14)$$

12. Побудова механічної характеристики ДПС у режимі динамічного гальмування, для чого необхідно:

а) визначити величину номінальної ЕРС двигуна:

$$E_n = k\Phi \cdot \omega_n = 0,81 \cdot 261,6 = 211,9 \text{ В}, \quad (2.16)$$

б) розрахувати струм кола якоря при переході ДПС із двигунного режиму у режим динамічного гальмування:

$$I_{я.дин} = -\frac{E}{R_{я} + R_{оз}} = -\frac{211,89}{0,20 + 0,97} = -181,1 \text{ А}, \quad (2.17)$$

в) визначення початкового моменту двигуна при переході його у режим динамічного гальмування

$$M_{дин} = k\Phi \cdot I_{я.дин} = -0,81 \cdot 181,07 = -146,66 \text{ Н·м}, \quad (2.18)$$

г) побудувати графік механічної характеристики ДПС у режимі динамічного гальмування за точками з координатами: точка А ($-M=0$, $\omega=0$) та точка В ($M=-146,66 \text{ Н·м}$, $\omega=261,66 \text{ рад/с}$), який надається на рис. 2.2.

13. Надати короткі висновки за отриманими розрахунком та графікам характеристик.

2.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з прикладом виконання практичного завдання;
3. Виконати розрахунок за даними у відповідності з варіантом (див. табл. 2.1);
4. Відповісти на контрольні питання.
5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.
6. Зробити висновок про виконану роботу.

2.5. Контрольні питання

1. Вирази для механічної та електромеханічної характеристик ДПС з різними способами збудження.
2. Рівняння балансу ДПС незалежного збудження для кола якоря.
3. Рівняння моментів електропривода у перехідному та усталеному режимах.
4. Методика розрахунку та побудови графіків електромеханічних та механічних характеристик ДПС у двигунному режимі.
5. Як визначається струм обмотки якоря ДПС незалежного збудження у різних режимах роботи двигуна?
6. Жорсткість механічної характеристики, як вона визначається та як впливає на діапазон регулювання швидкості.
7. Особливості реостатного пуску ДПС, методика розрахунку ступенів реостату та побудови штучних пускових механічних характеристик.
8. Як змінюється швидкість ДПС при зменшенні (збільшенні) навантаження на валу?
9. При зміні опору та напруги кола якоря, магнітного потоку обмотки збудження ДПС жорсткість та швидкість механічних характеристик змінять або не змінять свої значення?
10. Способи пуску та гальмування ДПС, їх сутність та схеми, механічні характеристики двигуна у цих режимах.

Таблиця 2.1 - Вихідні дані для розрахунку до практичної роботи № 2

№ вар.	U_n , В	I_n , А	P_n , кВт	R_z , Ом	n_n , об/хв	m	$R_{дин}$
1	220	59	11,0	55,0	1500	3	Rп1
2	220	94	20,0	22,0	200	3	Rп2

№ вар.	U_H , В	I_H , А	P_H , кВт	R_3 , Ом	n_H , об/хв	m	$R_{дин}$
3	440	67	25,0	37,0	1500	4	Рп3
4	220	78	15,0	27,5	1000	3	Рп4
5	440	75	30,0	30,0	750	4	Рп1
6	220	116	22,0	22,0	960	4	Рп2
7	440	100	37,0	100,0	525	4	Рп3
8	440	46	17,5	46,2	560	3	Рп4
9	110	130	12,4	5,5	750	3	Рп1
10	110	100	9,6	10,0	960	3	Рп2
11	220	85	13,5	18,0	1500	3	Рп3
12	440	120	40,0	60,0	1000	4	Рп4
13	110	72	8,4	12,0	750	3	Рп1
14	220	58	11,5	35,0	1500	3	Рп2
15	440	90	28,0	42,0	960	4	Рп3
16	220	47	10,0	20,0	1000	3	Рп4
17	110	95	14,0	9,8	1500	3	Рп1
18	440	55	16,5	33,0	750	4	Рп2
19	220	110	26,0	24,0	525	3	Рп3
20	110	49	7,2	15,0	960	3	Рп4
21	440	130	45,0	80,0	1500	4	Рп1
22	220	63	12,8	28,5	1000	3	Рп2
23	110	82	10,5	11,5	750	3	Рп3
24	440	70	21,0	38,0	960	4	Рп4
25	220	98	24,5	21,0	1500	3	Рп1

№ вар.	U_H , В	I_H , А	P_H , кВт	R_3 , Ом	n_H , об/хв	m	$R_{дин}$
26	110	60	8,8	14,0	525	3	Рп2
27	440	88	33,0	50,0	1000	4	Рп3
28	220	76	18,0	26,0	750	3	Рп4
29	110	105	15,6	8,5	1500	3	Рп1
30	440	52	19,2	45,0	960	4	Рп2

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

Тема: Розрахунок механічних характеристик асинхронного електродвигуна при регулюванні швидкості обертання частотою струму

Мета: засвоїти методику розрахунку механічних характеристик трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором в приводі різних виробничих машин при частотному регулюванні кутової швидкості.

3.1. Теоретичні відомості

Найбільш поширеними методами регулювання швидкості обертання асинхронних електродвигунів (АД) є:

- використання резисторів у колах статора та ротора;
- зміна кількості пар полюсів;
- регулювання напруги живлення статора;
- частотне керування.

Принцип частотного регулювання швидкості АД ґрунтується на відомій залежності для синхронної швидкості.

$$\omega_0 = \frac{2\pi \cdot f_1}{p}, \quad (3.1)$$

де f_1 - частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц; p - кількість пар полюсів електродвигуна.

Для сільськогосподарських машин та агрегатів створено частотно-регульовані електродвигуни з діапазоном регулювання частоти від 5 до 60 Гц і напруги від 30 до 380 В. Зміна частоти живильного струму дає змогу керувати швидкістю обертання двигуна в області малих ковзань, що супроводжується мінімальними втратами енергії в роторному колі. Завдяки цьому частотне регулювання швидкості асинхронних двигунів відзначається високим

коефіцієнтом корисної дії. Така система забезпечує плавне регулювання у широкому діапазоні, при цьому штучні механічні характеристики характеризуються значною жорсткістю.

Зміна частоти струму на затискачах двигуна призводить до зміни його параметрів. Так, при зменшенні частоти за незмінної напруги зростає струм намагнічування, що викликає збільшення магнітного потоку. Навпаки, підвищення частоти струму спричиняє зменшення струму намагнічування та магнітного потоку. За умов сталого статичного моменту на валу двигуна відбувається зростання струму ротора, внаслідок чого тепловий режим виходить за межі допустимих значень. Тому частотне регулювання неможливе без одночасної корекції напруги живлення.

Частотно-регульовані приводи дозволяють змінювати швидкість обертання як у бік збільшення, так і зменшення відносно номінального значення. Верхня межа регулювання швидкості визначається механічною міцністю ротора і не повинна перевищувати подвоєне номінальне значення. Нижня межа обмежується нестабільністю роботи перетворювача на низьких частотах.

У приводах із різними механічними характеристиками робочих машин регулювання напруги на виході перетворювача частоти здійснюється з урахуванням необхідності збереження перевантажувальної здатності двигуна.

$$\lambda = \frac{M_{\kappa}}{M_c} = \text{const}, \quad (3.2)$$

Як відомо, максимальний момент двигуна становить

$$M_{\kappa} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{2\omega_0 \left(R_1 + \sqrt{R_{\kappa}^2 + X_{\kappa}^2} \right)}, \quad (3.3)$$

При визначенні закону, за яким необхідно змінювати напругу при зміні частоти струму, вираз (3.3) записують, зробивши припущення, що $R_1=0$

$$M_{\kappa} = \frac{3 \cdot U_{\phi}^2}{2 \omega_0 X_{\kappa}}, \quad (3.4)$$

Параметри ω_0 , X_{κ} залежать від частоти струму. Отже, критичний момент виражається залежністю

$$M_{\kappa} = \frac{A \cdot U_{\phi}^2}{f^2}, \quad (3.5)$$

де A - коефіцієнт, що включає параметри, незалежні від частоти струму.

Перевантажувальна здатність двигуна при різних частотах струму згідно з формулою (3.2) має вигляд

$$\frac{U_{\phi n}^2}{f_n^2 \cdot M_{cn}} = \frac{U_{\phi}^2}{f^2 \cdot M_c} = \lambda, \quad (3.6)$$

Вираз (3.6) у відносних одиницях має вигляд

$$U' = f' \cdot \sqrt{M_c'}, \quad (3.7)$$

де U' , f' , M_c' - відповідно напруга, частота струму і статичний момент, в.о.

Статичний момент робочої машини у відносних одиницях, якщо зробити припущення, що $M_0 = 0$, записується

$$M_c = \left(\frac{\omega}{\omega_n} \right)^x = \left(\frac{f}{f_n} \right)^x = f^x, \quad (3.8)$$

З урахуванням (3.8) вираз (3.7) матиме вигляд

$$U' = f' \cdot \sqrt{f^x}, \quad (3.9)$$

де x - показник степеня виду механічної характеристики робочої машини.

При зниженні частоти $f_1 < f_{1\text{нов}}$ магнітний потік Φ зростає, що спричиняє глибоке насичення магнітного кола та збільшення намагнічувального струму. Це, у свою чергу, погіршує енергетичні показники двигуна ($\cos \varphi$, η). Для збереження магнітного потоку Φ на сталому рівні необхідно під час зміни

частоти f_1 відповідним чином регулювати напругу живлення з урахуванням типу механічної характеристики виконавчого органу робочої машини.

Рівняння механічної характеристики робочої машини має вигляд

$$M_c = M_o + (M_{сн} - M_o) \cdot \left(\frac{\omega_i}{\omega_n} \right)^x, \quad (3.10)$$

де M_c - момент опору при швидкості ω , M_o - момент опору тертя в рухомих частинах (момент зрушення), який не залежить від швидкості, Н·м; $M_{сн}$ - момент опору при номінальній швидкості ω_n , Н·м; ω_n - номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с; ω_i - поточне значення кутової швидкості, рад/с; x - показник степеня, що характеризує зміну статичного моменту при зміні швидкості.

Раціональний закон зміни напруги залежить від характеру моменту навантаження M_c . Так при постійному моменті навантаження $M_c = const$ (показник степеня $x=0$) напруга на статорі повинна регулюватися пропорційно його частоті

$$\frac{U_1}{f_1} = const, \quad (3.11)$$

Для механізмів, у яких M_c зменшується нелінійно при збільшенні швидкості (для робочої машини з $x=1$), відношення (3.11) має вигляд

$$\frac{U_1}{\sqrt{f_1}} = const, \quad (3.12)$$

Для механізмів з вентиляторним моментом навантаження M_c для робочої машини з $x=2$ відношення (3.12) буде мати вигляд

$$\frac{U_1}{f_1^2} = const, \quad (3.13)$$

Підвищення частоти живильного джерела понад номінальне значення (50 Гц) за умови подачі номінальної напруги $U_{1н}$ призводить до зменшення

магнітного потоку та електромагнітного моменту двигуна. Тому в таких умовах необхідно знижувати навантаження, щоб запобігти «перекиданню» електродвигуна.

Механічні характеристики асинхронного двигуна при частотному регулюванні швидкості обертання для робочих машин з різними механічними характеристиками подано на рис. 3.1 (для випадку $R_1=0$).

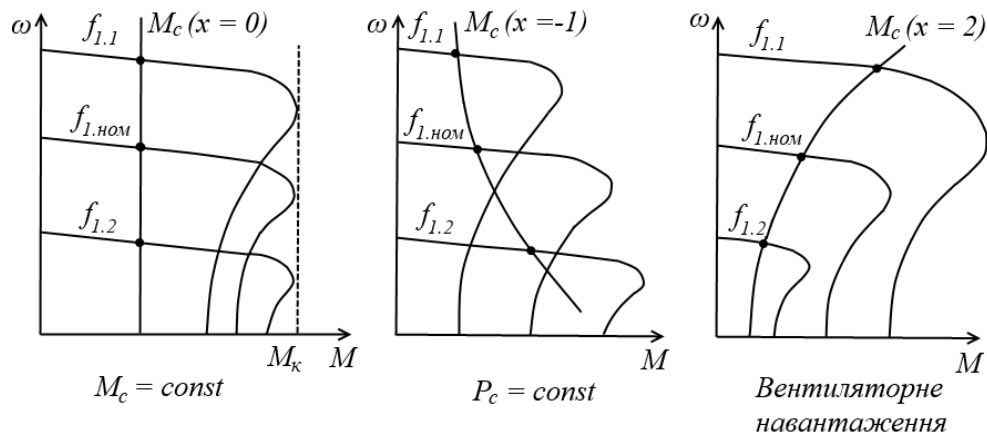


Рис. 3.1 – Механічні характеристики асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором при частотному регулюванні швидкості

Припущення $R_1=0$ не призводить до суттєвих похибок у використанні основного закону зміни напруги живлення частотно-регульованих приводів (3.9 - 3.13) для електродвигунів великої потужності або при роботі за умов незначного зниження частоти струму. У двигунів великої потужності індуктивний опір X_k значно перевищує активний опір R_k . У такому випадку спад напруги на активному опорі обмотки статора незначний, і двигун зберігає високу перевантажувальну здатність.

Для електродвигунів малої та середньої потужності на номінальній частоті активний і індуктивний опори статорної обмотки мають одного порядку величини. При зниженні частоти живильного струму індуктивний опір зменшується пропорційно, тоді як активний опір залишається сталим. У результаті спад напруги на активному опорі R_1 зростає, що призводить до

зниження перевантажувальної здатності двигуна. У таких умовах виникає необхідність корекції основного закону регулювання напруги статора.

Зазначений метод широко використовується для ефективного регулювання швидкості асинхронних двигунів і активно застосовується на сучасному етапі. Він забезпечує плавне регулювання у широкому діапазоні швидкостей, а отримані штучні характеристики відзначаються високою жорсткістю. Важливою перевагою частотного регулювання є те, що зміна швидкості асинхронного двигуна не супроводжується збільшенням ковзання, що мінімізує втрати потужності.

Природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна при $f_1=50$ Гц можна визначити за спрощеною формулою Клосса.

$$M = \frac{2M_{\kappa}}{\frac{S_i}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{S_i}}, \quad (3.14)$$

Штучна механічна характеристика асинхронного електродвигуна при новій частоті $f_{1.1}$ розраховується за формулою

$$M = \frac{2M_{\kappa} \cdot \lambda^x}{\frac{\lambda \cdot S_i}{S_{\kappa}} + \frac{S_{\kappa}}{\lambda \cdot S_i}}, \quad (3.15)$$

де λ - коефіцієнт, що показує співвідношення нової частоти струму до частоти струму мережі $f_1=50$ Гц; x - показник степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання.

$$\lambda = \frac{f_{1.1}}{f_1}, \quad (3.16)$$

де $f_{1.1}$ - нова частота струму при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна, Гц.

3.2. Завдання

Для асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором визначити: номінальний момент M_n , критичний момент M_k , номінальну кутову швидкість ω_n , критичне ковзання S_k та критичну кутову швидкість ω_k .

Розрахувати та побудувати природну механічну характеристику цього двигуна.

Розрахувати штучні механічні характеристики для двигуна в наступних режимах приводу: підйомник, генератор постійного струму з незалежним збудженням, насос і фрезерний верстат при частотах живлення $f_{1.1} = 40$ Гц та $f_{1.2} = 60$ Гц.

На одному графіку зобразити природну та відповідні штучні механічні характеристики асинхронного двигуна для приводів підйомника і насоса при регулюванні швидкості шляхом зміни частоти живлення.

3.3. Приклад розрахунку практичного завдання

Завдання 1. Розрахувати природну та штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна (АД) при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна приводу підйомника ($x=0$).

1.1. Розрахуємо природну механічну характеристику електродвигуна типу АІР250М6 приводу підйомника з технічними даними: $P_n = 55$ кВт, $S_n = 2\%$, $\mu_k = 2,3$.

Номінальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (3.17)$$

де P_n - номінальна потужність двигуна, Вт; ω_n - кутова швидкість двигуна при номінальному навантаженні, рад/с.

Номінальна кутова швидкість, яка відповідає номінальному ковзанню, визначається за формулою

$$\omega_n = \omega_0 (1 - S_n), \quad (3.18)$$

Синхронна кутова швидкість визначається за формулою

$$\omega_0 = \frac{\pi \cdot n_0}{30}, \quad (3.19)$$

де n_0 - синхронна частота обертання, об/хв.;

$$n_0 = \frac{60 \cdot f_1}{p}, \quad (3.20)$$

де f_1 - частота струму в мережі, Гц, $f_1 = 50$ Гц; p - кількість пар полюсів.

Для електродвигуна типу АІР250М6 $p = 3$. Отже

$$n_0 = \frac{60 \cdot 50}{3} = 1000 \text{ об/хв.},$$

$$\omega_0 = \frac{3,14 \cdot 1000}{30} = 104,6 \text{ рад/с},$$

$$\omega_n = 104,6 (1 - 0,02) = 102,6 \text{ рад/с},$$

$$M_n = \frac{5500}{102,6} = 536,2 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

Критичний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_{кр} = M_n \cdot \mu_k, \quad (3.21)$$

де μ_k - кратність максимального (критичного) моменту електродвигуна, в.о.

За паспортними даними електродвигуна типу АІР250М6 $\mu_k = 2,3$. Отже

$$M_{кр} = 536,2 \cdot 2,3 = 1233,26 \text{ Н}\cdot\text{м}.$$

Критична кутова швидкість, яка відповідає критичному ковзанню природної механічної характеристики, визначається за формулою

$$\omega_{кр} = \omega_0 (1 - S_k), \quad (3.22)$$

Критичне ковзання визначаємо за формулою

$$S_{\kappa \text{ пр}} = S_{\text{н}} \cdot \left(\mu_{\kappa} + \sqrt{\mu_{\kappa}^2 - 1} \right) = 0,02 \cdot \left(2,3 + \sqrt{2,3^2 - 1} \right) = 0,09, \quad (3.23)$$

$$\omega_{\kappa \text{ пр}} = 104,6(1 - 0,09) = 95,25 \text{ рад/с},$$

Природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна при $f_1 = 50$ Гц розраховуємо за спрощеною формулою Клосса

$$M = \frac{2M_{\kappa \text{ пр}}}{\frac{S_i}{S_{\kappa \text{ пр}}} + \frac{S_{\kappa \text{ пр}}}{S_i}}, \quad (3.24)$$

Для зручності розрахунків природної механічної характеристики АД при частоті струму мережі $f_1 = 50$ Гц зводимо в таблицю 3.1.

Таблиця 3.1 - Розрахункові дані природної механічної характеристики АД при частоті струму мережі $f_1 = 50$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	$S_{\text{н}}$	$3S_{\text{н}}$	$S_{\kappa \text{ пр}}$	$2S_{\kappa \text{ пр}}$	$3S_{\kappa \text{ пр}}$	$4S_{\kappa \text{ пр}}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$S_i / S_{\kappa \text{ пр}}$	0		0,67	1,0	2,0	3,0	4,0	11,11
$S_{\kappa \text{ пр}} / S_i$	0		1,5	1,0	0,5	0,33	0,25	0,09
$S_i / S_{\kappa \text{ пр}} + S_{\kappa \text{ пр}} / S_i$	0		2,17	2,0	2,5	3,33	4,25	11,2
$2M_{\kappa \text{ пр}}, \text{ Н} \cdot \text{м}$	2466,52							
$M, \text{ Н} \cdot \text{м},$	0	536,2	1136,7	1233,3	986,6	740,7	580,4	2220,2
$\omega = \omega_0 \cdot (1 - S_i)$	104,67	102,58	98,39	95,25	85,83	76,41	66,99	0

За розрахунковими даними таблиці 3.1 будемо природну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x=0$) при частоті струму мережі $f_1 = 50$ Гц (рис. 3.2).

1.2. Штучна механічна характеристика асинхронного електродвигуна при новій частоті $f_{1,1}$ розраховується за формулою

$$M_{um} = \frac{2M_{кр} \cdot \lambda^x}{\frac{\lambda \cdot S_i}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{\lambda \cdot S_i}}, \quad (3.25)$$

де λ - коефіцієнт, що показує співвідношення нової частоти струму до частоти струму мережі $f_1 = 50$ Гц; x - показник степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання (3.16).

Для підйомника показник степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання дорівнює $x = 0$. За умовою нова частота струму $f_{1.1} = 40$ Гц. Тоді

$$\lambda_1 = \frac{40}{50} = 0,8 \approx \lambda_1^x = 0,8^0 = 1,$$

Формула (3.24) для підйомника з $x=0$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1.1} = 40$ Гц буде мати вигляд

$$M = \frac{2M_{кр}}{\frac{0,8 \cdot S_i}{S_{кр}} + \frac{S_{кр}}{0,8 \cdot S_i}}, \quad (3.26)$$

Синхронна кутова швидкість при частоті струму мережі $f_{1.1} = 40$ Гц буде дорівнювати

$$\omega_{0(40)} = \lambda_1 \cdot \omega_{0np} = 0,8 \cdot \omega_{0np} = 0,8 \cdot 104,6 = 83,7 \text{ рад/с},$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при новій частоті струму $f_{1.1} = 40$ Гц зводимо в таблицю 3.2.

Таблиця 3.2 - Розрахункові дані штучної механічної характеристики

АД приводу підйомника ($x = 0$) при $f_{1.1} = 40$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює						
	S_H	$3S_H$	$S_{кр}$	$2S_{кр}$	$3S_{кр}$	$4S_{кр}$	1

		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$0,8S_i/S_{\text{кпр}}$	0	0,18	0,53	0,8	1,6	2,4	3,2	8,89
$S_{\text{кпр}}/0,8S_i$	0	5,63	1,88	1,25	0,63	0,42	0,31	0,11
$0,8S_i/S_{\text{кпр}} + S_{\text{кпр}}/0,8S_i$	0	5,81	2,41	2,05	2,23	2,82	3,51	9,0
$2M_{\text{кпр}}, \text{Н}\cdot\text{м}$	2466,52							
$M, \text{Н}\cdot\text{м},$	0	424,5	1023,5	1203,2	1106,1	874,7	702,7	274,1
$\omega = \omega_{0(40)} \cdot (1 - S_i)$	83,74	82,07	78,72	76,2	68,67	61,13	53,59	0

За розрахунковими даними таблиці 3.2 будуємо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму $f_{1.1} = 40$ Гц (рис. 3.2).

1.3. Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу підйомника при новій частоті струму $f_{1.2} = 60$ Гц. Тоді

$$\lambda_2 = \frac{60}{50} = 1,2 \approx \lambda_2^x = 1,2^0 = 1$$

Формула (3.24) для підйомника з $x = 0$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1.2} = 60$ Гц буде мати вигляд

$$M_{\text{шт}} = \frac{2M_{\text{кпр}}}{\frac{1,2 \cdot S_i}{S_{\text{кпр}}} + \frac{S_{\text{кпр}}}{1,2 \cdot S_i}}, \quad (3.27)$$

Синхронна кутова швидкість при частоті струму мережі $f_{1.2} = 60$ Гц буде дорівнювати

$$\omega_{0(60)} = \lambda_2 \cdot \omega_{0np} = 1,2 \cdot \omega_{0np} = 1,2 \cdot 104,6 = 125,6 \text{ рад/с},$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x = 0$) при новій частоті струму $f_{1.2} = 60$ Гц зводимо в таблицю 3.3.

Таблиця 3.3 - Розрахункові дані штучної механічної характеристики

АД приводу підйомника ($x=0$) при $f_{1,2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{к пр}$	$2S_{к пр}$	$3S_{к пр}$	$4S_{к пр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{к пр}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{к пр}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{к пр} + S_{к пр}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$2M_{к пр}, Н \cdot м$	2466,52							
$M, Н \cdot м,$	0	613,6	1203,2	1215,0	874,7	635,7	492,3	184,3
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i)$	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 3.3 будуємо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу підйомника ($x=0$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму $f_{1,2} = 60$ Гц (рис. 3.2).

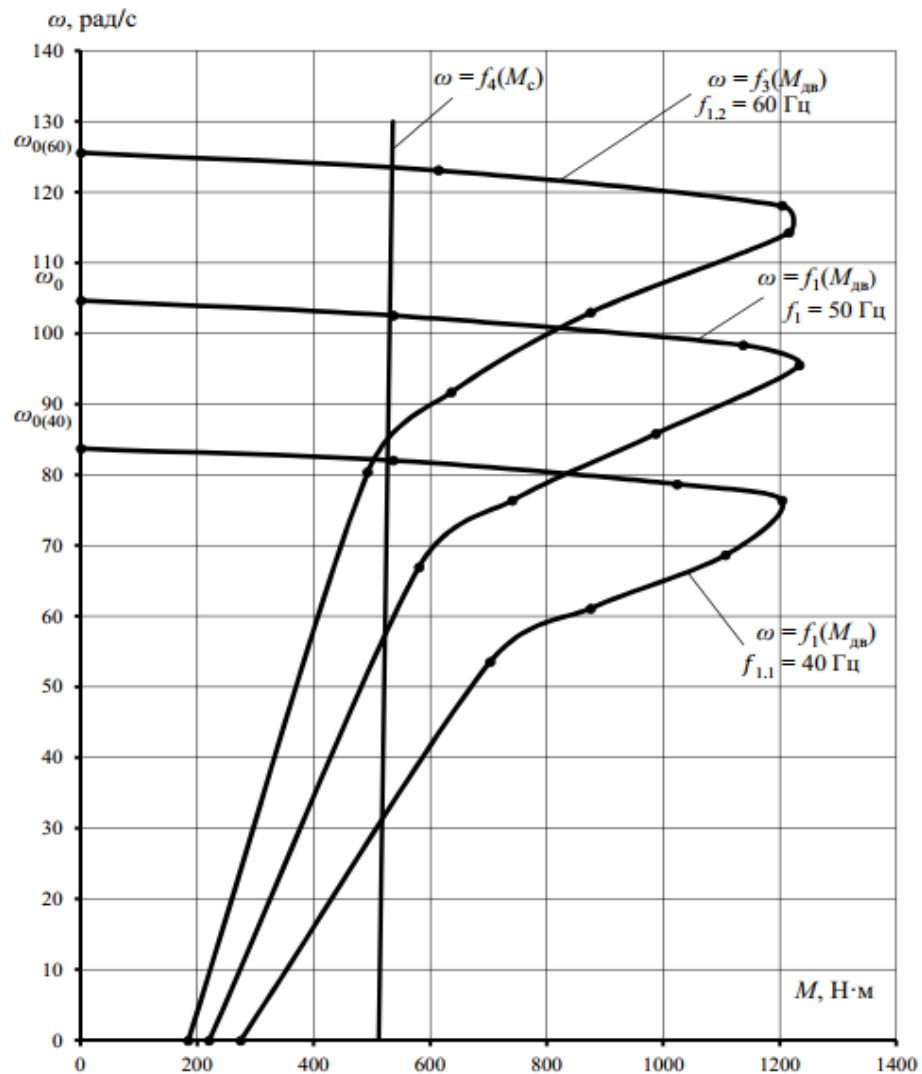


Рис. 3.2 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу підйомника ($x = 0$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму

Завдання 2. Розрахувати природну та штучні механічні характеристики асинхронного електродвигуна при частотному регулюванні швидкості обертання електродвигуна приводу насоса ($x = 2$).

2.1. Розрахуємо природну механічну характеристику електродвигуна приводу насоса.

Для приводу насоса використовується той же двигун, тому природну механічну характеристику будуємо за даними таблиці 3.1 при $f_1 = 50$ Гц (рис. 3.2).

2.2. Розрахуємо штучну механічну характеристику електродвигуна приводу насоса з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x=2$ на нову частоту струму мережі $f_{1,1} = 40$ Гц. Тоді

$$\lambda_1 = \frac{40}{50} = 0,8 \approx \lambda_1^x = 0,8^2 = 0,64,$$

Формула (3.24) для насоса з $x = 2$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,1} = 40$ Гц має вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр} \cdot 0,64}{\frac{0,8 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{0,8 \cdot S_i}}, \quad (3.28)$$

Для зручності розрахунків штучної механічної характеристики асинхронного електродвигуна приводу насоса ($x=2$) на нову частоту струму мережі $f_{1,1} = 40$ Гц зводимо в таблицю 3.4.

Таблиця 3.4 - Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу насоса ($x=2$) при $f_{1,1} = 40$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_n	$3S_n$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$0,8S_i/S_{кпр}$	0	0,18	0,53	0,8	1,6	2,4	3,2	8,89
$S_{кпр}/0,8S_i$	0	5,63	1,88	1,25	0,63	0,42	0,31	0,11
$0,8S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/0,8S_i$	0	5,81	2,41	2,05	2,23	2,82	3,51	9,0
$2M_{кпр}, \text{Н} \cdot \text{м}$	1578,57							
$M, \text{Н} \cdot \text{м},$	0	271,7	655,0	770,0	707,9	559,8	449,7	175,4
$\omega = \omega_{0(40)} \cdot (1 - S_i)$	83,74	82,07	78,72	76,2	68,67	61,13	53,59	0

За розрахунковими даними таблиці 3.4 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу насоса ($x=2$) при частоті струму мережі $f_{1,1} = 40$ Гц (рис. 3.3).

2.3. Розрахуємо штучну механічну характеристику АД приводу насоса з показником степеня зміни моменту опору робочої машини в залежності від її швидкості обертання $x=2$ на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц. Тоді

$$\lambda_2 = \frac{60}{50} = 1,2 \approx \lambda_2^x = 1,2^2 = 1,44,$$

Формула (3.24) для насоса з $x=2$ і частотному регулюванні на нову частоту струму $f_{1,2} = 60$ Гц має вигляд

$$M_{шт} = \frac{2M_{кпр} \cdot 1,44}{\frac{1,2 \cdot S_i}{S_{кпр}} + \frac{S_{кпр}}{1,2 \cdot S_i}}, \quad (3.29)$$

Для зручності розрахунок штучної механічної характеристики АД приводу насоса ($x=2$) на нову частоту струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц зводимо в таблицю 3.5.

Таблиця 3.5 - Розрахункові дані штучної механічної характеристики АД приводу насоса ($x=2$) при $f_{1,2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{кпр}$	$2S_{кпр}$	$3S_{кпр}$	$4S_{кпр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{кпр}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{кпр}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{кпр} + S_{кпр}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$2M_{кпр}, \text{Н} \cdot \text{м}$	3551,79							
$M, \text{Н} \cdot \text{м},$	0	883,5	1732,	1749,7	1259,5	915,4	708,9	265,5

			6					
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i)$	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 3.5 будуюмо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу насоса ($x=2$) при частоті струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц (рис. 3.3).

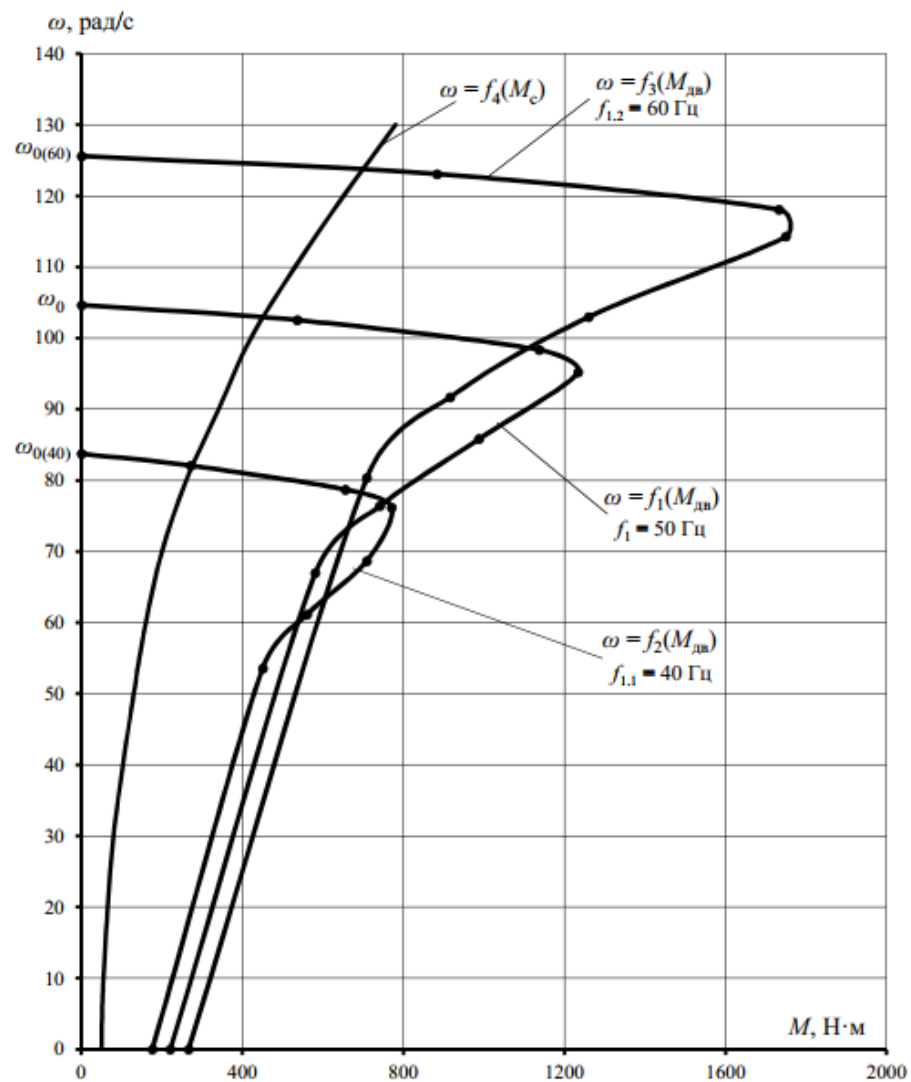


Рис.3.3 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу насоса ($x = 2$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму

Таблиця 3.5 - Розрахункові дані штучної механічної характеристики

АД приводу насоса ($x=2$) при $f_{1,2} = 60$ Гц

Параметр	Значення параметра при ковзанні S_i , що дорівнює							
	0	S_H	$3S_H$	$S_{к пр}$	$2S_{к пр}$	$3S_{к пр}$	$4S_{к пр}$	1
		0,02	0,06	0,09	0,18	0,27	0,36	
$1,2S_i/S_{к пр}$	0	0,27	0,8	1,2	2,4	3,6	4,8	13,3
$S_{к пр}/1,2S_i$	0	3,75	1,25	0,83	0,42	0,28	0,21	0,08
$1,2S_i/S_{к пр} + S_{к пр}/1,2S_i$	0	4,02	2,05	2,03	2,82	3,88	5,01	13,38
$2M_{к пр}, Н \cdot м$	3551,79							
$M, Н \cdot м,$	0	883,5	1732,6	1749,7	1259,5	915,4	708,9	265,5
$\omega = \omega_{0(60)} \cdot (1 - S_i)$	125,6	123,1	118,1	114,3	103,0	91,7	80,4	0

За розрахунковими даними таблиці 3.5 будемо штучну механічну характеристику асинхронного електродвигуна приводу насоса ($x=2$) при частоті струму мережі $f_{1,2} = 60$ Гц (рис. 3.3).

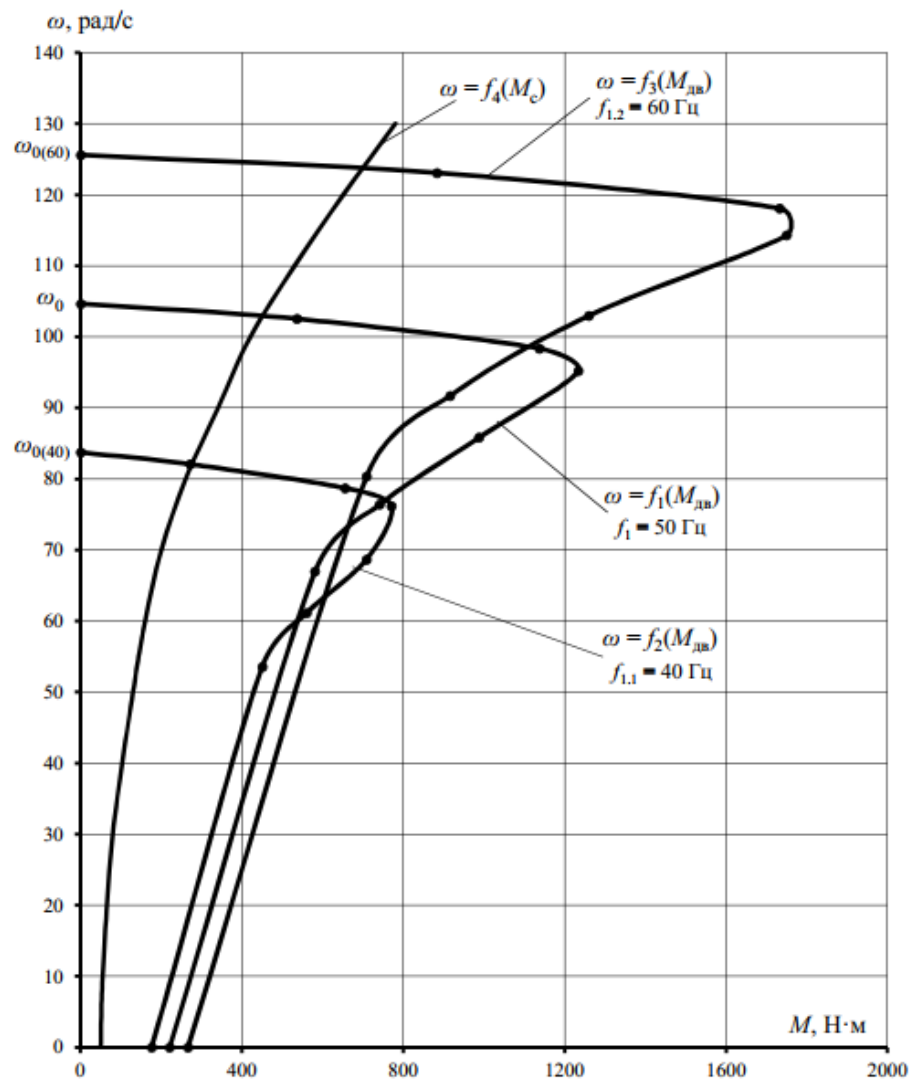


Рис.3.3 – Природна та штучні механічні характеристики АД приводу насоса ($x = 2$) при регулюванні швидкості обертання частотою струму

3.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з прикладом виконання практичного завдання;
3. Виконати розрахунок за даними у відповідності з варіантом (див. табл. 3.6);
4. Відповісти на контрольні питання.

5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.
6. Зробити висновок про виконану роботу.

3.5. Контрольні питання

1. Яку залежність називають механічною характеристикою асинхронного електродвигуна (АД)?
2. Що називається природною та штучною характеристиками АД?
3. Що таке максимальний момент та як його можна розрахувати за каталожними даними електродвигуна?
4. Як розрахувати поточне значення кутової швидкості при відомому ковзанні АД?
5. Як розрахувати поточне значення моменту для побудови механічних характеристик АД?
6. Як залежить момент асинхронного електродвигуна від величини підвищеної до нього напруги?
7. Назвіть можливі способи регулювання швидкості АД.
8. На чому базується частотний спосіб регулювання кутової швидкості асинхронного електродвигуна, які показники регулювання? Які одержують штучні характеристики? Який їх коефіцієнт жорсткості?
9. Чи можна використовувати електродвигуни загального призначення в частотно-регульованих приводах?
10. Для яких двигунів ставляться підвищені вимоги до вибору номінального ковзання при їх паралельній роботі?
11. З якими межами регулювання частоти і напруги розроблені частотно-регульовані двигуни для сільськогосподарських машин і агрегатів?
12. Який напрямок регулювання у частотно-регульованих приводах? Чим обмежується верхня межа регулювання швидкості і мінімальна частота

обертання?

13. Який параметр двигуна необхідно змінювати для кращого використання АД і одержання високих енергетичних показників його роботи – коефіцієнта потужності, ККД, перевантажувальної здатності – одночасно із зміною частоти на- пруги живлення? Від чого при цьому залежить закон його зміни?

14. Як змінюють напругу на виході перетворювача частоти при регулюванні частоти струму в приводах з різними механічними характеристиками робочих машин?

15. Як визначається перевантажувальна здатність двигуна λ ?

16. Який вигляд матиме вираз основного закону зміни напруги при часто- тному способі регулювання швидкості АД?

17. Чому при частотному регулюванні разом із зміною частоти необхідно змінювати і напругу?

18. За яким законом необхідно змінювати напругу на затискачах асинх- ронного двигуна при зміні частоти струму?

Таблиця 3.6 - Вихідні дані для розрахунку до практичної роботи № 3

Варіант	Типорозмір електродвигуна	Номінальна потужність, P_H , кВт	Номінальне ковзання, S_H , %	Кратність критичного моменту, μ_K , в.о.
1	AIP132M2	11	3,0	2,2
2	AIP160S2	15	3,0	2,7
3	AIP160M2	18,5	3,0	2,7
4	AIP180S2	22	2,7	2,7
5	AIP180M2	30	2,5	3,0
6	AIP200M2	37	2,0	2,8
7	AIP200S2	45	2,0	2,8

8	AIP225M2	55	2,0	2,6
9	AIP250S2	75	2,0	3,0
10	AIP250M2	90	2,0	3,0
11	AIP132S4	7,5	4,0	2,5
12	AIP132M4	11	3,5	2,7
13	AIP160S4	15	3,0	2,9
14	AIP160M4	18,5	3,0	2,9
15	AIP180S4	22	2,5	2,4
16	AIP180M4	30	2,0	2,7
17	AIP200M4	37	2,0	2,7
18	AIP200L4	45	2,0	2,7
19	AIP225M4	55	2,0	2,6
20	AIP250L4	75	1,5	2,5
21	AIP132S6	5,5	4,0	2,2
22	AIP132M6	7,5	4,0	2,2
23	AIP160S6	11	3,0	2,7
24	AIP160M6	15	3,0	2,7
25	AIP180M6	18,5	2,0	2,4

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

Тема: Вибір двигуна постійного струму

Мета: ознайомити здобувачів вищої освіти з методикою вибору потужності електродвигуна для електроприводу при дотриманні встановлених вимог

4.1. Теоретичні відомості

Електроприводи з двигунами постійного струму широко застосовуються у виробничих механізмах із змінним або реактивним навантаженням завдяки високій перевантажувальній здатності та добрій керованості моменту. У випадках, коли навантаження механізму змінюється в часі, вибір двигуна за номінальною потужністю є недостатньо коректним, оскільки двигун повинен бути здатним витримувати як короткочасні пікові навантаження, так і роботу на знижених рівнях моменту. Для таких умов застосовується методика еквівалентного навантаження, яка дозволяє оцінити тепловий стан двигуна в умовах змінної роботи.

Робота двигуна у змінному циклі характеризується чергуванням інтервалів навантаження та пауз. Для оцінки теплових процесів у двигуні запроваджується поняття тривалості вмикання (ПВ), що визначається як відношення сумарної тривалості навантажених інтервалів до загальної тривалості циклу. Залежно від величини ПВ розрізняють три основні режими роботи:

- короткочасний ($\text{ПВ} \leq 25\%$),
- повторно-короткочасний ($25\% < \text{ПВ} \leq 60\%$),
- тривалий ($\text{ПВ} > 60\%$).

Вибір двигуна значною мірою залежить саме від встановленого режиму роботи, оскільки двигуни різного конструктивного виконання мають різну переважувальну здатність та допустиму теплову інерційність.

Для визначення розрахункового навантаження застосовується еквівалентний момент, який розраховується з урахуванням квадратичної дії моменту навантаження в часі. Такий підхід ґрунтується на тому, що нагрівання обмоток двигуна прямо пропорційне квадрату струму, а отже - квадрату моменту. При цьому еквівалентний момент приводиться до стандартного значення ПВ, прийнятого для паспортних параметрів двигуна (зазвичай 15%, 25%, 40%, 60% або 100%).

Після визначення еквівалентного моменту обчислюється еквівалентна потужність, за якою виконується попередній вибір двигуна з каталогу. Обраний двигун обов'язково перевіряється на переважувальну спроможність, тобто на здатність розвивати максимальний момент навантаження без перевищення допустимих термічних або електромеханічних обмежень. Для цього використовується коефіцієнт переважувальної здатності λ , значення якого встановлюються стандартами або каталожними даними.

Таким чином, розрахунок двигуна за навантажувальною діаграмою забезпечує енергетично та технічно обґрунтований вибір електропривода, що відповідає як тепловим, так і динамічним умовам роботи механізму. Володіння даною методикою є необхідною компетенцією при проектуванні систем автоматизованого електропривода, кранів, верстатів, транспортних механізмів та іншого обладнання циклічної дії.

При проектуванні електропривода для механізму зі змінним навантаженням доцільно застосовувати методику еквівалентного навантаження, що враховує теплові процеси у двигуні при змінній тривалості робочих циклів. Це дозволяє обрати електродвигун не за максимальною

потужністю, а за тепловим навантаженням, яке він здатний витримувати без перегріву.

1. Визначення тривалості вмикання (ПВ).

Загальна тривалість циклу $T_{\text{цик}}$ включає робочі інтервали t_{pi} та паузи t_{zi} .

Тривалість вмикання визначається як:

$$ПВ = \frac{\sum t_{pi}}{T_{\text{цик}}} \cdot 100\%, \quad (4.1)$$

В залежності від отриманого значення ПВ визначається режим роботи:

- $ПВ \leq 25\%$ - короткочасний режим;
- $25\% < ПВ \leq 60$ - повторно-короткочасний режим;
- $ПВ > 60\%$ - тривалий режим;

2. Обчислення еквівалентного моменту.

Тепловий вплив змінного навантаження на обмотки двигуна оцінюється через еквівалентний момент:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 \cdot t_{pi}}{\sum t_{pi}}}, \quad (4.2)$$

де M_i - момент навантаження на відповідному інтервалі часу t_{pi} .

3. Приведення еквівалентного моменту до стандартного ПВ.

Оскільки каталожні дані двигунів вказані для певного стандартного значення ПВ ($ПВ_{\text{ст}}$), еквівалентний момент необхідно перерахувати:

$$M_{\text{пр}} = M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{ПВ}{ПВ_{\text{ст}}}}, \quad (4.3)$$

4. Визначення еквівалентної потужності.

При заданій кутовій швидкості обертання ω , еквівалентна потужність обчислюється за формулою:

$$P_{\text{екв}} = \frac{M_{\text{пр}} \cdot \omega}{1000}, \quad (4.4)$$

(у кВт, якщо M - в Н·м, ω - в рад/с)

5. Перевірка на перевантажувальну здатність.

Для забезпечення роботи на пікових навантаженнях виконується умова:

$$M_{\text{макс.наг.}} \leq \lambda \cdot M_{\text{ном}}, \quad (4.5)$$

де λ - коефіцієнт перевантажувальної здатності (за таблицею), $M_{\text{ном}}$ - номінальний момент двигуна.

4.2. Завдання

Необхідно виконати розрахунок та вибір електропривода для виробничого механізму, що працює з реактивним навантаженням. Двигун постійного струму приводить у дію механізм, навантаження якого змінюється відповідно до діаграми моменту на валу $M=f(t)$, наведеної на рис. 4.1.

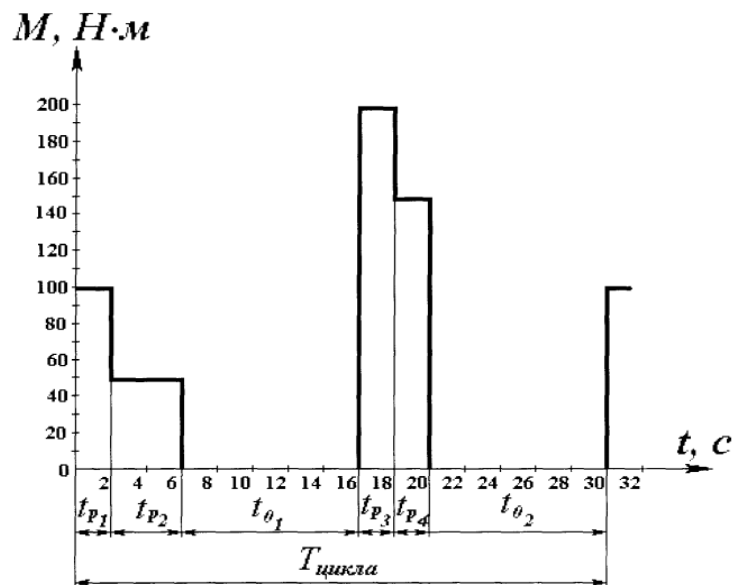


Рис. 4.1 – Навантажувальна діаграма двигуна

Виходячи з навантажувальної діаграми, необхідно визначити розрахункову тривалість вмикання двигуна, обчислити еквівалентний момент робочого періоду та привести його до стандартного значення тривалості вмикання.

Далі, задавшись типовою швидкістю обертання за каталогом двигунів постійного струму, потрібно обчислити еквівалентну потужність приводу, виконати попередній вибір двигуна відповідно до отриманих параметрів та визначити режим його роботи на підставі аналізу навантажувального циклу.

Зіставивши значення максимального моменту навантаження з перевантажувальною спроможністю обраного електродвигуна, слід перевірити відповідність двигуна умові допустимого перевантаження.

За результатами розрахунку зробити висновок щодо придатності вибраного двигуна для роботи в заданих умовах.

4.3. Приклад виконання практичного завдання

Завдання: Двигун постійного струму приводить у дію виробничий механізм із реактивним навантаженням. Графік навантаження $M = f(t)$ представлений на рис. 4.1. Розрахуйте потрібну потужність двигуна та виберіть двигун за каталогом.

Дано: Момент навантаження $M_1 = 98,1 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_2 = 48 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_3 = 196 \text{ Н}\cdot\text{м}$; $M_4 = 147 \text{ Н}\cdot\text{м}$; Час роботи: $t_{p1} = t_{p3} = t_{p4} = 2 \text{ с.}$, $t_{p2} = 4 \text{ с.}$; Час зупинок $t_{z1} = t_{z2} = 10 \text{ с.}$; Час циклу $T_{\text{цикл}} = 30 \text{ с.}$

Попередній вибір двигуна виконується за наступною методикою:

1. Визначаємо розрахункову тривалість вмикання двигуна за формулою:

$$PB_p = \frac{\sum t_{\text{роб}}}{T_{\text{ц}}} \cdot 100 = \frac{2 + 4 + 2 + 2}{30} \cdot 100 = 33,3\%, \quad (4.6)$$

2. Еквівалентний момент робочого періоду:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{M_1^2 \cdot t_{p1} + M_2^2 \cdot t_{p2} + M_3^2 \cdot t_{p3} + M_4^2 \cdot t_{p4}}{t_{p1} + t_{p2} + t_{p3} + t_{p4}}}, \quad (4.7)$$

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{98,1^2 \cdot 2 + 48^2 \cdot 4 + 196^2 \cdot 2 + 147^2 \cdot 2}{2 + 4 + 2 + 2}} = 122, \text{ Н}\cdot\text{м}$$

3. Наводимо еквівалентний момент до стандартного значення ПВ:

$$M_{екв.пр} = M_{екв} \cdot \sqrt{\frac{ПВ_p}{ПВ_{ст}}}, \quad (4.8)$$

де $ПВ_{ст}$ - стандартне значення ПВ, приймаємо $ПВ = 25\%$.

Тривалість включення визначається ДСТУ і виражається у відсотках або частках. ПВ: 15%; 25%; 40%; 60%; 100%. Тривалість включення 15% і 25% характеризує короткочасний режим роботи. Якщо ПВ лежить в межах від 25% до 60%, то це повторно-короткочасний режим роботи. Якщо ПВ більше 60% - це тривалий режим роботи. Залежно від режиму роботи по-різному можна обирати потужності двигуна.

Відповідно:

$$M_{екв.пр} = 122 \cdot \sqrt{\frac{33,3}{25}} = 139, \text{ Н}\cdot\text{м}$$

4. Задаємося швидкістю обертання (за каталогом) та визначаємо еквівалентну попередню потужність:

$$\omega = 122 \text{ 1/с } (n = 1160 \text{ об/хв}), \quad (4.9)$$

$$P_{екв.пр.} = M_{екв.пр.} \cdot \omega \cdot 10^{-3} = 139 \cdot 122 \cdot 10^{-3} = 17 \text{ кВт}, \quad (4.10)$$

Аналізуючи наведену на рисунку 3.1 діаграму навантаження, можна зробити висновок, що двигун функціонує у повторно-короткочасному режимі роботи.

5. По каталогу на двигун повторно-короткочасному режимі при ПВ = 25% вибираємо двигун паралельного збудження ДП-41, з параметрами: $U_n = 220 \text{ В}$; $I_n = 114 \text{ А}$; $P_n = 22 \text{ кВт}$; $\omega_n = 122 \text{ 1/с}$; $J_n = 0,8 \text{ кг}\cdot\text{м}^2$.



Рис. 4.2 – Електродвигун ДП - 41

6. Обраний двигун перевіряємо на перевантажувальну здатність за умовою:

$$\lambda \geq \frac{M_{\text{макс.нагр.}}}{M_n}, \quad (4.11)$$

де $M_{\text{макс.нагр.}} = 196 \text{ Н}\cdot\text{м}$.

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n} \cdot 10^3 = 182 \text{ Н}\cdot\text{м}, \quad (4.12)$$

$$\lambda = 2,5 \geq \frac{196}{182} = 1,08,$$

де λ – перевантажувальна спроможність двигуна, див. таблицю 4.1.

Таблиця 4.1 - Перевантажувальна спроможність двигуна

Тип двигуна	Перевантажувальна здатність двигуна
Двигун постійного струму: - номінального виконання кранового та металургійного виконання:	2,5

- послідовного збудження	до 4
- змішаного збудження	до 3,5
- незалежного збудження	до 2,5
Асинхроні двигуни з короткозамкненим ротором нормального виконання	1,1 – 2,5
Короткозамкнуті двигуни з подвійною кліткою чи глибоким пазом	1,7 – 2,6
Асинхроні двигуни кранового та металургійного виконання:	2,3 – 3,6
Синхроні двигуни	2,0 – 2,5

Висновок: Обраний електродвигун проходить до перевантажувальній можливості, тому двигун підходить під встановлені умови роботи.

4.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з прикладом виконання практичного завдання;
3. Виконати розрахунок за даними у відповідності з варіантом (див. табл. 4.2);
4. Відповісти на контрольні питання;
5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт;
6. Зробити висновок про виконану роботу.

4.5. Контрольні питання

1. Які режими роботи двигунів постійного струму виділяють за тривалістю вмикання (ПВ)?
2. Як визначають тривалість вмикання (ПВ) для циклічної роботи механізму?
3. Що таке еквівалентний момент навантаження, і яку роль він відіграє при виборі двигуна?
4. Як обчислити еквівалентний момент для двигуна, що працює за змінним циклом навантаження?
5. Що таке стандартне значення ПВ, і чому необхідно приводити еквівалентний момент до нього?
6. Яким чином визначають еквівалентну потужність двигуна за заданим циклом навантаження?
7. Які критерії використання двигуна у короткочасному, повторно-короткочасному та тривалому режимах?
8. Що таке перевантажувальна здатність двигуна і як вона враховується при виборі електропривода?
9. Які параметри двигуна за каталогом необхідно враховувати при підборі для циклічної роботи?
10. Як залежить номінальний момент двигуна від максимального навантаження механізму?
11. Які фактори впливають на правильний вибір двигуна для механізму з реактивним навантаженням?
12. Як визначається сумарний час циклу роботи механізму, і яку роль він відіграє при розрахунку ПВ?
13. Що слід враховувати при виборі двигуна для роботи з піковими моментами навантаження?
14. Яка різниця між попереднім вибором двигуна за розрахунковою потужністю і остаточним вибором за каталогом?

15. Як аналіз навантажувальної діаграми допомагає оцінити тепловий стан двигуна?

Таблиця 4.2 - Вихідні дані для розрахунку до практичної роботи № 4

№ вар.	M_1 , Н·м	t_{p1} , с	t_{z1} , с	M_2 , Н·м	t_{p2} , с	t_{z2} , с	M_3 , Н·м	t_{p3} , с	t_{z3} , с	M_4 , Н·м	t_{p4} , с	t_{z4} , с	$T_{\text{цикл}}$, с
1	210	5	-	95	30	-	180	5	160	-	-	-	200
2	190	4	-	110	20	32	190	4	-	120	20	70	150
3	165	4	-	90	32	-	150	4	80	-	-	-	120
4	195	4	-	115	20	-	195	6	50	-	-	-	80
5	320	5	-	140	30	20	-	-	-	-	-	-	55
6	260	5	-	120	30	40	260	5	-	80	20	60	160
7	210	4	-	75	40	-	170	6	100	-	-	-	150
8	180	4	20	180	4	20	180	4	20	180	4	20	24
9	370	5	-	190	60	-	370	5	130	-	-	-	200
10	270	5	-	125	40	40	270	5	-	190	30	20	140
11	250	6	10	135	25	-	200	5	50	180	4	20	150
12	300	5	15	160	20	10	210	6	-	-	-	-	130
13	220	4	-	95	30	15	180	5	20	150	4	-	140
14	200	3	-	100	25	10	160	5	-	180	6	30	120
15	310	5	-	140	30	20	220	6	25	200	5	-	180
16	180	4	10	110	20	15	150	5	10	130	3	-	120
17	260	5	-	120	25	15	200	5	30	180	4	-	160
18	230	4	5	100	20	10	170	5	15	150	4	10	130
19	210	5	-	90	30	-	180	6	25	160	4	-	140

№ вар.	M_1 , Н·м	t_{p1} , с	t_{31} , с	M_2 , Н·м	t_{p2} , с	t_{32} , с	M_3 , Н·м	t_{p3} , с	t_{33} , с	M_4 , Н·м	t_{p4} , с	t_{34} , с	$T_{\text{цикл}}$, с
20	300	6	10	150	25	15	250	5	20	200	5	10	180
21	190	4	-	95	20	-	170	5	15	150	4	-	130
22	220	5	10	110	20	5	180	5	20	160	4	-	140
23	250	6	-	130	25	15	200	5	20	180	5	10	160
24	270	5	-	140	20	10	220	6	25	200	5	15	180
25	240	4	-	120	20	10	190	5	15	170	4	-	150
26	260	5	-	130	25	10	200	6	20	180	5	15	160
27	230	4	-	120	20	10	180	5	15	160	4	-	150
28	310	6	10	150	25	15	250	5	20	200	5	10	180
29	200	4	-	100	20	5	170	5	15	150	4	-	130
30	280	5	-	140	25	10	220	6	20	200	5	15	180

ПРАКТИЧНА РОБОТА №5

Тема: Розрахунок і вибір потужності електродвигуна для повторно-короткочасного режиму роботи

Мета: засвоєння здобувачами вищої освіти методики визначення потужності двигуна для повторно-короткочасного режиму роботи.

5.1. Теоретичні відомості

Повторно-короткочасний номінальний режим S3 – це послідовність однакових робочих циклів, кожний з яких складається р періодів роботи з постійним навантаженням і вимкненого нерухомого стану, причому тривалість періодів роботи і пауз настільки малі, що за час роботи електродвигун не встигає нагрітися до практично усталеної температури, а за час паузи не встигає охолонути до температури охолоджуючого середовища. Тривалість одного робочого циклу приймається не більше 10 хв.

Для роботи в повторно-короткочасному режимі виготовляють спеціальні електродвигуни, які порівняно із звичайними мають збільшені пускові та максимальні моменти, зменшену інерційність роторів та інші особливості. Як відомо, момент інерції тіла обертання пропорційний четвертому ступеню його діаметра і першому ступеню довжини. Тому для зниження втрат енергії при частих пусках і гальмуваннях двигуни краново-металургійних серій і тягові виготовляють з видовженими роторами (якорями) зменшеного діаметра. З метою рівномірнішого перерозподілу втрат між ротором і статором обмотки роторів асинхронних короткозамкнених електродвигунів мають підвищений опір.

Крім загальних даних, на паспортах таких електродвигунів вказується номінальна відносна тривалість вмикання їх в електромережу $TB_n = 15, 25, 40, 60 \%$.

Номинальні дані двигунів, призначених для повторно-короткочасного режиму, в каталогах наводяться при стандартних тривалостях вмикання. тривалість циклу не повинна перевищувати 10 хвилин. Основним режимом S3 сучасних двигунів є режим при $TB = 40 \%$. В повторно-короткочасному режимі роботи працюють тельфера та кранбалки.

Приведений момент опору або зусиль здійснюється із умови рівності потужності на валу електродвигуна тельфера визначається за формолою:

$$M_0 = \frac{F \cdot v}{\omega_d \cdot \eta}, \quad (5.1)$$

де M_0 - момент опору приведений до валу електродвигуна, Н·м; F - зусилля в робочому органі машини, яке здійснює поступальний рух, Н; ω_d - кутова швидкість вала електродвигуна, рад/с; η - ККД передачі, прийнятий по довідниковим даним.

Зусилля переміщення кран-балки (тельфера) по направляючим визначається за формулою:

$$F = \frac{2(m + m_g)g}{D} \left(f + \mu \frac{d}{2} k \right) \alpha k, \quad (5.2)$$

де m - маса тельфера (балки), кг; m_g - маса корисного вантажу, кг; D, d - діаметр тельфера (балки) і діаметр цапф, м; F - коефіцієнт тертя котіння коліс балки, тельфера; $f_0=0,05$; $f_T=0,03$; α - коефіцієнт, що враховує додаткові опори в ребордах коліс, торцях колодець; $\alpha = 2,5$; k - коефіцієнт; $k = 0,01$.

Зусилля, необхідне для піднімання вантажу:

$$F = (m_g + m_g) g, \quad (5.3)$$

де m_g - маса гака, кг.

Вибір двигуна спеціального виконання виконується за наступними показниками:

- фактична тривалість включення визначається

$$TB_{\phi} = \frac{t_1 + t_2 + t_3}{t_{\phi}} \cdot 100 \%, \quad (5.4)$$

де t_{ϕ} - тривалість циклу роботи двигуна, с. Вибираємо найближче більше стандартне ТВ (15;25;40;60;100).

- якщо $TB_{\phi} = TB_{ст}$, то вибираємо за каталогом двигун з підвищеним ковзанням за умовою:

$$P_n \geq P_{екв}, \quad (5.5)$$

- якщо $TB_{\phi} \neq TB_{ст}$, то виконуємо перерахунок потужності двигуна за формулою

$$P_{роз} = P_{екв} \sqrt{\frac{TB_{\phi}}{TB_{ст}}}, \quad (5.6)$$

- еквівалентна потужності визначаємо за формулою

$$P_{екв} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 \cdot t_i}{\sum t_i}}, \quad (5.7)$$

За каталогом або з інтернет джерела, вибираємо двигун спеціального виконання за умовою:

$$P_n \geq P_{роз}, \quad (5.8)$$

Вибраний двигун перевіряють за умовами пуску та перевантажувальній можливості.

Вибір двигуна основного виконання за наступними показниками:

- якщо вибирається двигун тривалого номінального режиму $S1$, то розрахункова потужність визначається за формулою:

$$P_{роз} = P_{екв} \sqrt{TB_{\phi}}, \quad (5.9)$$

- перевіряємо електродвигун за умовами пуску:

$$M'_{n.дв} \geq M_{зр}, \quad (5.10)$$

де $M'_{п.дв}$ - пусковий момент електродвигуна при зниженій напрузі, Н·м; $M_{зр}$ - момент зрушення робочої машини, Н·м.

$$M'_{n.дв} = M_n \cdot \mu_n \cdot k_u^2, \quad (5.11)$$

де M_n - номінальний момент електродвигуна, Н·м; μ_n - кратність пускового моменту електродвигуна; k_u - коефіцієнт зниження напруги, приймаємо $k_u = 0,9$.

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (5.12)$$

де ω_n - номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

$$\omega_n = \frac{\pi \cdot n_n}{30}, \quad (5.13)$$

де n_n - номінальна частота обертання електродвигуна, хв⁻¹.

$$M_{зр} = (0,2 \dots 0,3) \cdot \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (5.14)$$

- перевіряємо електродвигун за умовами перевантаження:

$$M'_{мак.дв} \geq M_{о.мак.рм}, \quad (5.15)$$

де $M'_{мак.дв}$ - максимальний момент електродвигуна при зниженій напрузі;

$$M'_{мак.дв} = M_n \cdot \mu_{макс} \cdot k_u^2, \quad (5.16)$$

де $M_{о.мак.рм}$ - максимальний момент опору робочої машини.

$$M_{о.мак.рм} = \frac{P_{о.макс}}{\omega_n}, \quad (5.17)$$

де $P_{о.макс}$ - максимальна потужність з навантажувальної діаграми, кВт; ω_n - номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

5.2. Завдання

За вихідними даними з таблиці 5.1 будувати графік повторно-короткочасного навантаження механізму (див. рис. 5.1). Необхідно вибрати електродвигун для режиму S3 та S1 роботи. Частота обертання приводу вала

робочої машини $n_{об} \text{ хв}^{-1}$. Електродвигун з'єднаний з механізмом безпосередньо.

5.3. Приклад виконання практичного завдання

Завдання: За вихідними даними $P_1 = 8 \text{ кВт}$, $P_2 = 14 \text{ кВт}$, $P_3 = 4 \text{ кВт}$; $t_1 = 48 \text{ с}$; $t_2 = 72 \text{ с}$; $t_3 = 36 \text{ с}$; $t_{ц} = 636 \text{ с}$. необхідно побудувати графік повторно-короткочасного навантаження механізму (див. рис. 5.1).

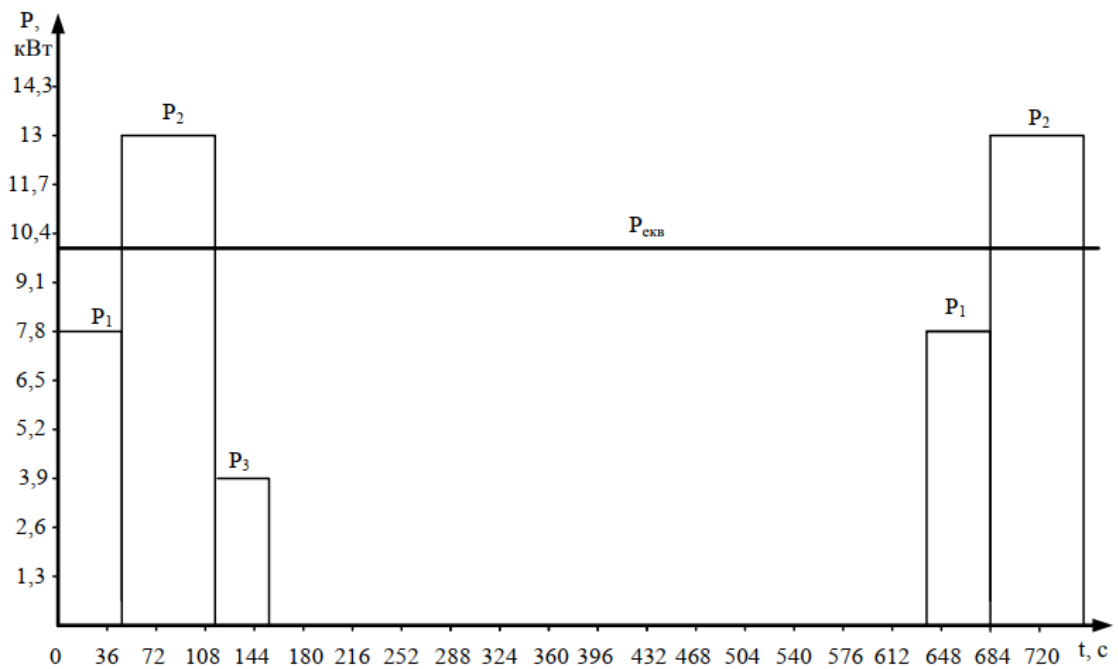


Рис. 5.1 – Навантажувальна діаграма електродвигуна

Необхідно вибрати електродвигун для режиму S3 та S1 роботи. Частота обертання приводу вала робочої машини $n_{об} = 1450 \text{ хв}^{-1}$. Електродвигун з'єднаний з механізмом безпосередньо.

1. Вибір електродвигуна спеціального виконання:

- фактична тривалість включення визначається за формулою

$$TB_{\phi} = \frac{48 + 72 + 36}{636} \cdot 100\% = 24,5 \approx 25 \%,$$

Вибираємо стандартне $TB_{ст} = 25 \%$

- еквівалентна потужність двигуна визначається за формулою:

$$P_{екв} = \sqrt{\frac{8^2 \cdot 48 + 14^2 \cdot 72 + 4^2 \cdot 36}{48 + 72 + 36}} = 10,6 \text{ кВт},$$

- за каталогом попередньо вибираємо електродвигун за умовою:

$$P_n \geq P_{роз} = 14 \geq 10,5 \text{ кВт},$$

- за каталогом або з інтернет джерела, вибираємо двигун спеціального виконання: тип АІР132М4У3, з наступними параметрами: $P_n = 14 \text{ кВт}$; ПВ = 25 % ; $\cos \varphi = 0,85$; $n_n = 1455 \text{ хв}^{-1}$; $\eta_n = 84\%$; $K_i = 6,5$; $\mu_n = 3,3$; $\mu_{мін} = 1,6$; $\mu_{мак} = 3,4$; $m = 83,5 \text{ кг}$.



Рис. 5.2 – Електродвигун типу АІР132М4У3

1.1. Виконуємо перевірки електродвигуна за максимальним та пусковим моментом:

- номінальна кутова швидкість електродвигуна визначається за формулою:

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 1455}{30} = 152,3 \text{ рад/с},$$

- номінальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_n = \frac{14 \cdot 10^3}{152,3} = 91,9 \text{ Н·м},$$

- пусковий момент електродвигуна визначається за формулою

$$M'_{п.дв} = 91,9 \cdot 2,2 \cdot 0,9^2 = 163,8 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- момент зрушення робочої машини визначається за формулою

$$M_{зр} = 0,25 \cdot \frac{14 \cdot 10^3}{152,3} = 22,9 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- перевірка здійснюється згідно умови

$$M'_{п.дв} \geq M_{зр} = 163,8 \geq 22,9 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

Умова виконується.

1.2. Перевірка електродвигуна за умовами перевантаження здійснюється

за умовою $M'_{мак.дв} \geq M_{о.мак.рм}$.

- максимальний момент опору робочої машини визначається за формулою

$$M_{о.мак.рм} = \frac{14 \cdot 10^3}{152,3} = 91,9 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- максимальний момент електродвигуна при зниженій напрузі визначається за формулою

$$M'_{мак.дв} = 91,9 \cdot 3,4 \cdot 0,9^2 = 253 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- перевірка здійснюється згідно умови

$$M'_{мак.дв} \geq M_{о.мак.рм} = 253 \geq 91,9 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

Умова виконується.

2. Вибір електродвигуна основного виконання

2.1. Вибираємо двигун тривалого режиму S1, для цього визначаємо розрахункову потужність за формулою

$$P_{роз} = 10,6 \sqrt{0,245} = 5,24 \text{ кВт},$$

- за каталогом з інтернет джерела попередньо вибираємо електродвигун за умовою

$$P_n \geq P_{роз} = 5,5 \geq 5,24 \text{ кВт},$$

Каталожні дані електродвигуна: Тип 5AM112M4У3; $P_n = 5,5 \text{ кВт}$; $I_n = 11,7 \text{ А}$; $\cos \varphi = 0,83$; $n_n = 1440 \text{ хв}^{-1}$; $\eta_n = 83 \%$; $K_i = 6,7$; $\mu_n = 2,6$; $\mu_{\max} = 2,9$; $m = 48,5 \text{ кг}$.



Рис. 5.3 – Електродвигун типу 5AM112M4У3

2.2. Виконуємо перевірки електродвигуна за максимальним та пусковим моментом:

- номінальна кутова швидкість електродвигуна визначається за формулою

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 1440}{30} = 150,7 \text{ рад/с},$$

- номінальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_n = \frac{5,5 \cdot 10^3}{150,7} = 36,5 \text{ Н·м},$$

- пусковий момент електродвигуна визначається за формулою

$$M'_{n.ов} = 36,5 \cdot 2,6 \cdot 0,9^2 = 76,8 \text{ Н·м},$$

- момент зрушення робочої машини визначається за формулою

$$M_{зр} = 0,25 \cdot \frac{5,5 \cdot 10^3}{150,7} = 9,1 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- перевірка здійснюється згідно умови

$$M'_{п.дв} \geq M_{зр} = 76,8 \geq 9,1 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

Умова виконується.

2.3. Перевірка електродвигуна за умовами перевантаження здійснюється за умовою $M'_{мак.дв} \geq M_{о.мак.рм}$.

- максимальний момент опору робочої машини визначається за формулою

$$M_{о.мак.рм} = \frac{14 \cdot 10^3}{150,7} = 92,9 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- максимальний момент електродвигуна при зниженій напрузі визначається за формулою

$$M'_{мак.дв} = 36,5 \cdot 2,9 \cdot 0,9^2 = 85,7 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- перевірка здійснюється згідно умови

$$M'_{мак.дв} \geq M_{о.мак.рм} = 85,7 \geq 92,9 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

Умова не виконується вибираємо двигун більшої потужності.

Каталожні дані електродвигуна: Тип 5AMX132S4Y3; $P_n = 7,5$ кВт; $I_n = 15,3$ А; $\cos \varphi = 0,85$; $n_n = 1450$ хв⁻¹; $\eta_n = 85$ %; $K_i = 7,0$; $\mu_n = 2,1$; $\mu_{мак} = 2,8$; $m = 64$ кг.

- номінальна кутова швидкість електродвигуна визначається за формулою

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 1450}{30} = 151,7 \text{ рад/с},$$

- номінальний момент електродвигуна визначається за формулою

$$M_n = \frac{7,5 \cdot 10^3}{151,7} = 49,4 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- максимальний момент електродвигуна при зниженій напрузі визначається за формулою

$$M'_{\text{мак.дв}} = 49,4 \cdot 2,8 \cdot 0,9^2 = 112 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- перевірка здійснюється згідно умови

$$M'_{\text{мак.дв}} \geq M_{\text{о.мак.рм}} = 112 \geq 92,9 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

Умова виконується.

3. Зробити висновок відповідно до кінцевих результатів розрахунків.

5.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з прикладом виконання практичного завдання;
3. Виконати розрахунок за даними у відповідності з варіантом (див. табл. 5.1);
4. Відповісти на контрольні питання;
5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт;
6. Зробити висновок про виконану роботу.

5.5. Контрольні питання

1. Що таке повторно-короткочасний режим роботи електродвигуна (режим S3)? Які його основні характеристики?
2. Чим відрізняється режим S3 від тривалого номінального режиму S1?
3. Які типи електроприводів та механізмів найчастіше працюють у повторно-короткочасному режимі?

4. Що таке тривалість включення (ПВ або ТВ)? Як вона визначається та в яких одиницях вимірюється?
5. Які стандартні значення тривалості включення застосовуються у каталожних даних електродвигунів?
6. Які конструктивні особливості мають електродвигуни спеціального виконання для режиму S3?
7. Як впливає момент інерції ротора на роботу приводу у повторно-короткочасному режимі?
8. Яка формула використовується для визначення моменту опору, приведенного до вала двигуна? Роз'ясніть її складові.
9. Як визначається зусилля переміщення кран-балки або тельфера по напрямних?
10. Як визначається зусилля, необхідне для піднімання вантажу?
11. У чому полягає різниця між номінальною, еквівалентною та розрахунковою потужністю двигуна?
12. Яким чином виконується перерахунок потужності електродвигуна, якщо фактична тривалість включення відрізняється від стандартної?
13. Як визначається еквівалентна потужність для повторно-короткочасного режиму?
14. За якою умовою попередньо підбирається двигун спеціального виконання з каталогу?
15. Які параметри двигуна перевіряються після попереднього вибору?

Таблиця 5.1 - Вихідні дані для виконання практичної роботи №5

Варіант	P_1 , кВт	P_2 , кВт	P_3 , кВт	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_{Σ} , с	$n_{об}$, хв ⁻¹
1	6	12	3	50	80	40	600	1450
2	10	18	5	60	90	45	720	1000
3	4	9	2	45	70	35	580	750

Варіант	P_1 , кВт	P_2 , кВт	P_3 , кВт	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_{II} , с	$n_{ог}$, XB^{-1}
4	12	20	6	70	100	50	800	1450
5	5	11	3	55	85	40	650	3000
6	7	15	4	60	95	48	710	1450
7	9	16	5	65	100	50	740	1000
8	8	14	4	52	78	38	605	750
9	11	19	5	68	102	49	780	1450
10	6	13	3	50	82	42	620	3000
11	7	12	4	48	75	36	590	1450
12	10	17	5	62	92	46	730	1000
13	4	8	2	44	68	34	570	750
14	12	21	6	72	105	52	820	1450
15	5	10	3	53	80	39	610	3000
16	8	15	4	57	88	41	670	1450
17	9	18	5	63	97	47	760	1000
18	6	11	3	49	73	37	580	750
19	11	20	5	69	104	51	790	1450
20	7	14	4	51	83	43	630	3000
21	5	9	2	46	70	35	560	1450
22	10	16	4	60	90	45	720	1000
23	8	13	3	54	78	40	600	750
24	12	19	6	71	101	50	810	1450
25	6	12	3	50	78	38	590	3000
26	9	17	5	64	96	48	740	1450

Варіант	P_1 , кВт	P_2 , кВт	P_3 , кВт	t_1 , с	t_2 , с	t_3 , с	t_{II} , с	$n_{об}$, XB^{-1}
27	7	13	4	52	81	42	615	1000
28	4	7	2	43	66	32	550	750
29	11	18	6	70	103	49	800	1450
30	5	11	3	47	74	36	570	3000

ПРАКТИЧНА РОБОТА №6

Тема: Розрахунок і вибір потужності електродвигуна для тривалого режиму роботи

Мета: засвоєння здобувачами вищої освіти методики розрахунку потужності електродвигуна для тривалого режиму роботи методом середніх втрат та еквівалентних величин.

6.1. Теоретичні відомості

Тривалий номінальний режим S1 - режим роботи електродвигуна при незмінному навантаженні, причому за час роботи перевищення температури усіх частин електродвигуна досягає встановленого значення.

Прикладом механізмів з таким технологічним режимом можуть бути відцентрові насоси, компресорні і вентиляторні установки, конвеєри масою транспортованого матеріалу, зерноочисні машини, силосорізки, металорізальні верстати.

Потужності які, споживаються робочою машиною (РМ) при незмінному навантаженні, у багатьох випадках розраховується за формулами. Потужність, кВт, для приводу насоса визначають за формулою:

$$P_{\text{нас}} = \frac{Q \cdot \rho \cdot H \cdot g \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{нас}}}, \quad (6.1)$$

де Q - подача насоса, м³/с; ρ - густина рідини, що подається насосом, кг/м³; H - розрахунковий напір, м; g - прискорення вільного падіння, $g = 9,81$ м/с²; $\eta_{\text{нас}}$ - ККД насоса.

Потужність, кВт, для приводу вентилятора:

$$P_{\text{вен}} = \frac{L \cdot \rho \cdot 10^{-3}}{\eta_{\text{вен}}}, \quad (6.2)$$

де L - подача вентилятора, $\text{м}^3/\text{с}$; p - напір вентилятора, Па; $\eta_{\text{вент}}$ - ККД вентилятора.

Потужність, яка споживається скребковим конвеєром при транспортуванні суцільним потоком:

$$P_{\text{с,кон}} = Q \cdot g (L \cdot f_c \cdot \cos \alpha + H) \cdot 10^{-3}, \quad (6.3)$$

де Q - розрахункова продуктивність конвеєра, $\text{кг}/\text{с}$; g - прискорення вільного падіння, $g = 9,81 \text{ м}/\text{с}^2$; H - висота підйому продукту, м ; L - довжина конвеєра, м ; f_c - коефіцієнт опору рухові; α - кут нахилу конвеєра.

У тому випадку, якщо пусковий момент (момент зрушення) РМ дуже великий, необхідна перевірка вибраного двигуна за умовами пуску. Двигун успішно запуститься, якщо

$$M_n = M_{\text{ном}} \cdot \mu_n \geq (1,2 \dots 1,3) M_{\text{о.зр}}, \quad (6.4)$$

де M_n , $M_{\text{ном}}$ - відповідно пусковий і номінальний момент двигуна, $\text{Н} \cdot \text{м}$; μ_n - кратність пускового моменту; $M_{\text{о.зр}}$ - момент зрушення, який приведений до валу двигуна РМ, $\text{Н} \cdot \text{м}$.

Для приводу РМ з великим коефіцієнтом інерції необхідна також перевірка двигуна на нагрівання під час пуску. З цією метою визначають час пуску привода t_n і порівнюють з допустимим часом пуску $t_{\text{доп}}$ за умовою

$$t_n \leq t_{\text{доп}}, \quad (6.5)$$

Для тривалого режиму роботи із змінним навантаженням вибір електродвигуна і перевірка попередньо вибраного двигуна проводиться двома методами:

- методом середніх втрат потужності;
- методом еквівалентних значень величин (струму, потужності або моменту).

Дослідимо методику перевірки потужності попередньо вибраного електродвигуна методом середніх втрат потужності, яка виконується наступним чином:

1. Використовуючи навантажувальну діаграму РМ $P_{PM}=f(t)$ (рис. 6.1) визначаємо середню потужність на валу електродвигуна:

$$P_{сер} = \frac{\sum P_i t_i}{\sum t_i}, \quad (6.6)$$

де P_i - потужності, які споживаються електродвигуном на окремих ділянках, кВт; t_i - час роботи електродвигуна на даній ділянці, с.

2. Потужність, яка споживається на валу електродвигуна:

$$P_{роз} = K_3 \cdot P_{сер}, \quad (6.7)$$

де K_3 - коефіцієнт запасу, приймаємо $K_3 = 1,2$.

3. За каталогом, попередньо вибираємо електродвигун за умовою:

$$P_n \geq P_{роз}, \quad (6.8)$$

4. Розраховуємо втрати:

- номінальні втрати

$$\Delta P_n = \frac{P_n}{\eta_n} - P_n, \quad (6.9)$$

де P_n - номінальна потужності електродвигуна, кВт; η_n - номінальний коефіцієнт корисної дії двигуна, в.о.

- втрати на окремих ділянках графіку навантаження

$$\Delta P_i = \Delta P_n \frac{\alpha + K_i^2}{\alpha + 1}, \quad (6.10)$$

- середні втрати

$$\Delta P_{сер} = \frac{\sum \Delta P_i t_i}{\sum t_i}, \quad (6.11)$$

де ΔP_i - середні втрати потужності в електродвигуні на окремих ділянках, кВт.

5. Вибраний двигун перевіряють за умовами пуску та перевантажувальній здатності.

- перевіряємо електродвигун за умовами пуску

$$M'_{n.дв} \geq M_{зр}, \quad (6.12)$$

де $M'_{п.дв}$ - пусковий момент електродвигуна при зниженій напрузі, Н·м; $M_{зр}$ - момент зрушення робочої машини, Н·м.

$$M'_{п.дв} = M_n \cdot \mu_n \cdot k_u^2, \quad (6.13)$$

де M_n - номінальний момент електродвигуна, Н·м; μ_n - кратність пускового моменту електродвигуна; k_u - коефіцієнт зниження напруги, приймаємо $k_u = 0,9$.

$$M_{зр} = (0,2 \dots 0,3) \cdot \frac{P_n}{\omega_n}, \quad (6.14)$$

- перевіряємо електродвигун за умовами перевантаження:

$$M'_{мак.дв} \geq M_{о.мак.рм}, \quad (6.15)$$

де $M_{о.мак.рм}$ - максимальний момент опору робочої машини.

$$M_{о.мак.рм} = \frac{P_{о.макс}}{\omega_n}, \quad (6.16)$$

де $P_{о.макс}$ - максимальна потужність з навантажувальної діаграми, кВт; ω_n - номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

6. Метод розрахунку потужності електродвигуна методом еквівалентної потужності.

При визначенні потужності двигуна методом еквівалентної потужності необхідно користуватися формулою:

$$P_{екв} = \sqrt{\frac{\sum P_i^2 t_i}{\sum t_i}}, \quad (6.17)$$

За каталогом, попередньо вибираємо електродвигун за умовою:

$$P_n \geq P_{екв}, \quad (6.18)$$

6.2. Завдання

За вихідними даними з таблиці 6.1 побудувати графік довготривалого змінного навантаження механізму (див. рис. 6.1). Вибираємо електродвигун режиму S_1 методом середніх втрат та еквівалентних величин. Частота обертання приводу вала робочої машини $n_{об} \text{ хв}^{-1}$. Електродвигун з'єднаний з механізмом безпосередньо.

6.3. Приклад виконання практичного завдання

Завдання: За вихідними даними $P_1 = 9 \text{ кВт}$, $P_2 = 14,4 \text{ кВт}$, $P_3 = 3 \text{ кВт}$; $P_4 = 12 \text{ кВт}$; $t_1 = 180 \text{ с}$; $t_2 = 234 \text{ с}$; $t_3 = 657 \text{ с}$; $t_4 = 189 \text{ с}$. необхідно побудувати графік довготривалого змінного навантаження механізму (див. рис. 6.1). Вибираємо електродвигун режиму S_1 методом середніх втрат та еквівалентних величин. Частота обертання приводу вала робочої машини $n_{об} = 1450 \text{ хв}^{-1}$. Електродвигун з'єднаний з механізмом безпосередньо.

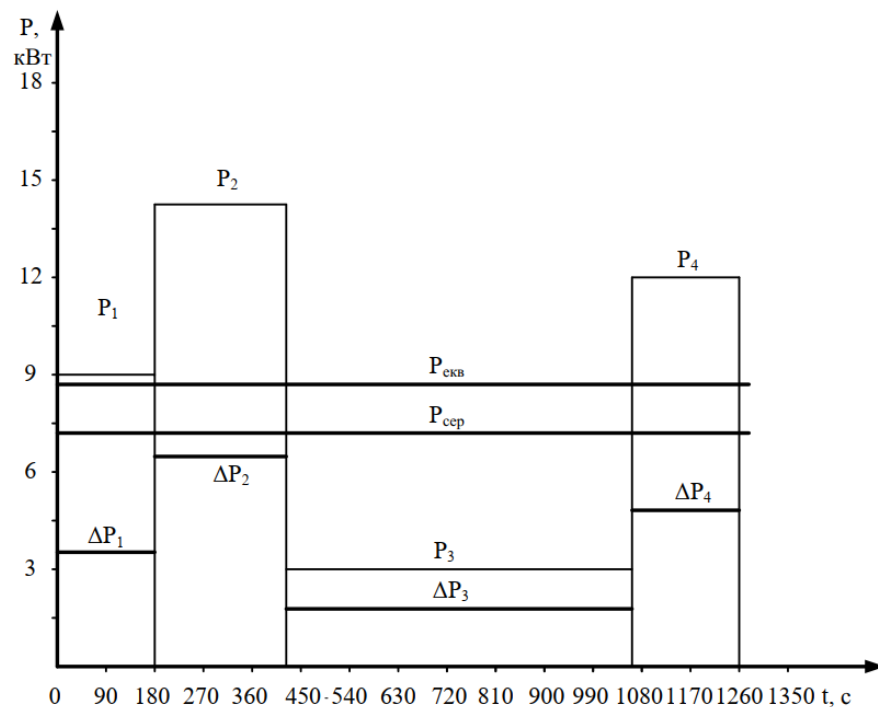


Рис. 6.1 – Навантажувальна діаграма електродвигуна

1. Розрахунок потужності електродвигуна методом середніх втрат:

- середня потужність на валу електродвигуна визначається за формулою

$$P_{сер} = \frac{9 \cdot 180 + 14,4 \cdot 234 + 3 \cdot 657 + 12 \cdot 189}{180 + 234 + 657 + 189} = 7,3 \text{ кВт},$$

- потужність, що споживається на валу електродвигуна визначається за формулою

$$P_{роз} = 1,2 \cdot 7,3 = 8,8 \text{ кВт},$$

- по каталогу або з інтернет джерела попередньо вибираємо електродвигун за умовою

$$P_n \geq P_{роз} = 11 \geq 8,8 \text{ кВт},$$

Каталожні дані двигуна: тип 5AMX132M4Y3 (рис. 5.2); $P_n = 11 \text{ кВт}$; $n_n = 1455 \text{ хв}^{-1}$; $I_n = 22,1 \text{ А}$; $\eta_n = 72,2 \%$; $\cos \varphi_n = 0,85$; $K_i = 7,3$; $\mu_n = 2,2$; $\mu_{мак} = 3,0$.



Рис. 6.2 – Дивгун типу 5AMX132M4Y3

- номінальні втрати електродвигуна визначається за формулою

$$\Delta P_n = \frac{11}{0,72} - 11 = 4,3 \text{ кВт},$$

- втрати на окремих ділянках графіку навантаження визначаються за формулою

$$\Delta P_1 = 4,24 \frac{0,5 + \left(\frac{9}{11}\right)^2}{0,5 + 1} = 3,3 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_2 = 4,24 \frac{0,5 + \left(\frac{14,4}{11}\right)^2}{0,5 + 1} = 6,3 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_3 = 4,24 \frac{0,5 + \left(\frac{3}{11}\right)^2}{0,5 + 1} = 1,6 \text{ кВт},$$

$$\Delta P_4 = 4,24 \frac{0,5 + \left(\frac{12}{11}\right)^2}{0,5 + 1} = 4,8 \text{ кВт},$$

- середні втрати в електродвигуні визначаються за формулою

$$\Delta P_{1-4} = \frac{3,3 \cdot 180 + 6,3 \cdot 234 + 1,6 \cdot 657 + 4,8 \cdot 189}{180 + 234 + 657 + 189} = 3,2 \text{ кВт},$$

- перевіряємо вибраний двигун за умовою

$$\Delta P_n \geq \Delta P_{роз} = 4,3 \geq 3,2$$

Умова виконується.

2. Виконуємо перевірки електродвигуна за максимальним та пусковим

моментом за умовами пуску $M'_{n.дв} \geq M_{зр}$.

- номінальна кутова швидкість електродвигуна, рад/с.

$$\omega_n = \frac{3,14 \cdot 1455}{30} = 152,3 \text{ рад/с},$$

- номінальний момент електродвигуна

$$M_n = \frac{11 \cdot 10^3}{152,3} = 72,3 \text{ Н·м},$$

- пусковий момент електродвигуна при зниженій напрузі

$$M'_{n.дв} = 72,3 \cdot 2,2 \cdot 0,9^2 = 128,8 \text{ Н·м},$$

- момент зрушення робочої машини

$$M_{зр} = 0,2 \cdot \frac{11 \cdot 10^3}{152,3} = 14,5 \text{ Н·м},$$

- перевірка здійснюється згідно умови

$$M'_{п.дв} \geq M_{зр} = 128,8 \geq 14,5 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

Умова виконується.

Перевірка електродвигуна за умовами перевантаження здійснюється за умовою $M'_{мак.дв} \geq M_{о.мак.рм}$.

- максимальний момент опору робочої машини

$$M_{о.мак.рм} = \frac{14,4 \cdot 10^3}{152,3} = 94,6 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- максимальний момент електродвигуна при зниженій напрузі

$$M'_{мак.дв} = 72,3 \cdot 3 \cdot 0,9^2 = 175,6 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

- перевірка здійснюється згідно умови

$$M'_{мак.дв} \geq M_{о.мак.рм} = 175,5 \geq 94,6 \text{ Н}\cdot\text{м},$$

Умова виконується.

3. Розрахунок потужності електродвигуна методом еквівалентної потужності

- при визначенні потужності двигуна методом еквівалентної потужності необхідно користуватися формулою:

$$P_{екв} = \sqrt{\frac{9^2 \cdot 180 + 14,4^2 \cdot 234 + 3^2 \cdot 657 + 12^2 \cdot 189}{180 + 234 + 657 + 189}} = 8,7 \text{ кВт},$$

- за каталогом, попередньо вибираємо електродвигун за умовою

$$P_n \geq P_{екв} = 11 \geq 8,7 \text{ кВт},$$

З умови вибираємо електродвигун потужністю 11 кВт типу 5AMX132M4У3.

Перевірку на перевантажувальну здатність не проводимо, так як даний двигун перевірений раніше, в інших умовах ми повині провести перевірку на перевантажувальну здатність.

4. Зробити висновок відповідно до кінцевих результатів розрахунків.

6.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з прикладом виконання практичного завдання;
3. Виконати розрахунок за даними у відповідності з варіантом (див. табл. 6.1);
4. Відповісти на контрольні питання;
5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт;
6. Зробити висновок про виконану роботу.

6.5. Контрольні питання

1. Що характеризує тривалий номінальний режим роботи електродвигуна (S1)?
2. Які приклади механізмів працюють у тривалому режимі S1?
3. Які основні методи використовуються для вибору потужності електродвигуна при тривалому режимі роботи?
4. У чому полягає суть методу середніх втрат потужності?
5. Як визначається середня потужність на валу електродвигуна при змінному навантаженні?
6. Що таке коефіцієнт запасу потужності та для чого він застосовується?
7. Як розраховуються номінальні втрати потужності електродвигуна?
8. Які дані необхідно знати для побудови навантажувальної діаграми електродвигуна?

9. Які показники каталогу двигуна використовуються для перевірки умов пуску?
10. За якою умовою визначається можливість пуску електродвигуна?
11. Як перевіряється електродвигун на перевантажувальну здатність?
12. У чому полягає метод еквівалентних величин при виборі електродвигуна?
13. Чим відрізняється метод середніх втрат від методу еквівалентної потужності?
14. Як впливає ККД електродвигуна на розрахунок його потужності?
15. Які висновки можна зробити після виконання перевірок електродвигуна за умовами пуску та перевантаження?

Таблиця 6.1 - Вихідні дані для виконання практичної роботи №6

№ вар.	P ₁ , кВт	P ₂ , кВт	P ₃ , кВт	P ₄ , кВт	t ₁ , с	t ₂ , с	t ₃ , с	t ₄ , с	n _{об} , об/хв
1	9.0	14.4	3.0	12.0	180	234	657	189	1450
2	7.5	10.2	4.5	8.4	150	300	540	270	1470
3	11.0	16.5	5.5	13.2	200	250	600	210	1440
4	8.0	12.0	4.0	10.0	160	220	580	300	1460
5	10.5	15.0	6.0	12.5	210	240	630	180	1455
6	6.8	9.2	3.6	7.8	140	260	570	290	1480
7	12.0	18.0	6.5	14.0	190	270	620	180	1450
8	8.5	13.0	4.2	11.5	200	240	610	210	1475
9	9.8	14.6	5.0	12.4	180	250	600	230	1460
10	10.0	13.5	4.8	11.0	160	230	640	230	1450
11	7.0	11.2	3.8	9.0	190	250	620	200	1470
12	13.0	19.0	7.0	15.0	200	280	600	180	1450

№ вар.	P ₁ , кВт	P ₂ , кВт	P ₃ , кВт	P ₄ , кВт	t ₁ , с	t ₂ , с	t ₃ , с	t ₄ , с	n _{об} , об/хв
13	8.2	12.8	4.5	10.5	170	240	610	240	1445
14	9.5	14.0	5.2	12.0	200	250	580	230	1465
15	10.8	15.6	6.0	13.2	180	260	640	180	1450
16	6.5	8.5	3.0	7.0	150	270	590	250	1475
17	11.5	17.2	6.3	14.4	210	240	620	190	1455
18	8.7	13.2	4.6	10.8	160	230	650	220	1460
19	7.8	11.5	3.9	9.6	170	260	600	230	1470
20	9.2	14.0	5.0	11.8	200	240	610	210	1450
21	10.2	15.0	5.5	12.8	190	250	630	190	1440
22	12.5	18.5	7.0	15.5	220	260	590	190	1455
23	6.0	8.8	3.2	7.2	160	280	560	260	1470
24	8.0	12.0	4.5	10.2	200	240	600	220	1450
25	9.6	14.4	5.2	11.6	210	250	580	220	1465
26	7.4	10.6	3.8	8.5	170	260	600	230	1470
27	10.0	15.2	6.0	13.0	200	240	620	200	1455
28	11.2	16.0	5.8	13.5	180	250	640	190	1450
29	9.0	13.0	4.6	11.0	170	230	650	210	1460
30	12.0	17.5	6.5	14.8	210	270	590	190	1450

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 7

Тема: Розрахунок параметрів та характеристик електропривода системи ТП-Д.

Мета роботи: отримати практичні навички та уміння з методики розрахунку параметрів та побудови графіків характеристик привода системи ТП-Д.

7.1. Теоретичні відомості

Основними типами перетворювачів, застосованих у теперішній час у керованому електроприводі постійного струму, є напівпровідникові статичні перетворювачі та у першу чергу тиристорні перетворювачі (ТП). Такі перетворювачі використовують як джерела живлення приводного електродвигуна (ПЕД). Зв'язка тиристорний перетворювач – двигун постійного струму отримала назву система ТП – Д, функціональну схему силової частини якої наведено на рис. 7.1.

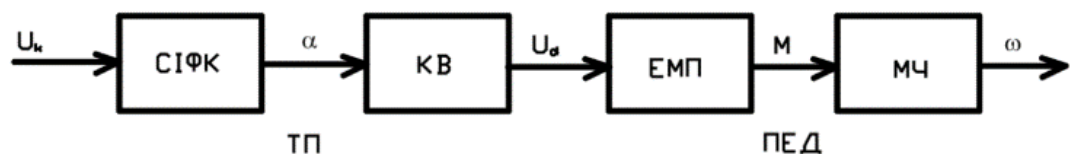


Рис. 7.1 – Функціональна схема системи ТП-Д

Основними вузлами такої системи є ТП, який складається із системи імпульсно-фазового керування (СІФК) та керованого випрямляча (КВ), і ПЕД постійного струму, головними частинами якого є електромеханічний перетворювач (ЕМП) енергії та механічна частина (МЧ) двигуна.

Тиристорний перетворювач постійного струму призначений для перетворення напруги змінного струму у регульовану напругу постійного струму для живлення кіл обмоток якоря й збудження електричних машин у

функції вхідної керуючої напруги. Основний елемент ТП – керований напівпровідниковий вентиль із трьома р-п переходами, який називають тиристором VS; схема включення тріодного тиристора та часові діаграми напруги та струму на навантаженні зображена на рис. 7.2 а, б.

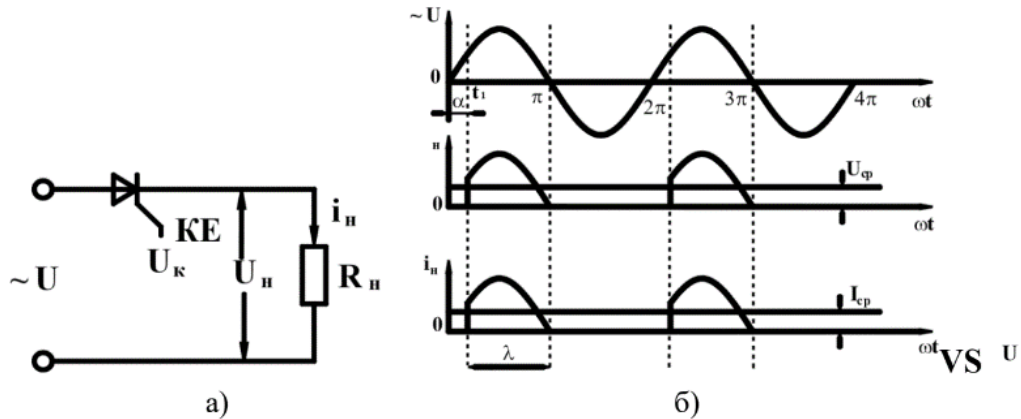


Рис. 7.2 – Схема включення й часові діаграми тиристора

Якщо немає керуючої напруги U_k на керуючому електроді (KE), то тиристор VS закритий, оскільки він має великий опір у прямому й зворотному напрямках. При подачі напруги на KE тиристор відчиняється й працює як звичайний некерований вентиль. Включення тиристора відбувається у певні моменти часу подачі напруги U_k , тобто

$$\omega \cdot t_1 = \alpha,$$

де α - кут включення (керування або регулювання), відлічуваний від початку позитивної напівхвилі.

Час, протягом якого через тиристор VS протікає струм, визначається кутом провідності λ .

Таким чином, керування напругою на виході керованого перетворювача зводиться до регулювання моментів увімкнення та вимкнення тиристорів у часі. Забезпечення цих процесів виконує система керування, яка визначає послідовність і час спрацювання тиристорів. Існує велика кількість

класифікацій тиристорних перетворювачів (ТП), серед яких розглянемо основні.

Залежно від схеми з'єднання тиристорів у вентильних групах розрізняють нульові та мостові схеми ТП. Мостова схема є еквівалентом послідовного з'єднання двох вентильних груп нульової схеми. Вентилі, об'єднані спільними катодами, формують катодну групу, а вентилі зі спільними анодами - анодну групу. Для підвищення потужності перетворювача та зменшення пульсацій вихідної напруги нульові та мостові схеми можуть з'єднуватися паралельно або послідовно. У разі паралельного з'єднання використовують зрівняльні реактори, які вирівнюють миттєві значення напруг у одночасно працюючих обмотках трансформатора.

За напрямком струму в колі навантаження ТП поділяються на нереверсивні - де струм протікає лише в одному напрямку, та реверсивні, які дозволяють змінювати напрямок струму. Реверсування може здійснюватися за допомогою перемикачів у колі навантаження або за рахунок використання двох комплектів вентилів. Реверсивні двокомплектні перетворювачі виконуються за зустрічно-паралельною або перехресною схемами. У першому випадку обидва комплекти вентилів під'єднуються до спільної обмотки трансформатора і включаються зустрічно-паралельно. У перехресній схемі кожен комплект вентилів живиться від окремої обмотки, а їхні виходи підключаються перехресно відносно навантаження.

У таких двокомплектних перетворювачах можливе роздільне або спільне керування вентильними групами. При роздільному керуванні імпульси подаються лише на той комплект, який забезпечує потрібний напрямок струму; інший комплект у цей час не працює. При спільному керуванні імпульси подаються на обидва комплекти вентилів одночасно. У цьому випадку через неробочий комплект протікає зрівняльний струм, який замикається через вентилі обох комплектів і трансформаторні обмотки,

минаючи навантаження. Щоб обмежити цей струм, у коло вмикають обмежувальні дроселі.

Залежно від наявності струму в навантаженні ТП можуть працювати в режимі безперервних струмів, коли струм не має нульових інтервалів, або в режимі переривчастих струмів, коли струм періодично дорівнює нулю. Тип режиму визначається значенням кута увімкнення, індуктивністю обмоток трансформатора та параметрами навантаження.

За принципом побудови системи керування розрізняють системи імпульсно-фазового керування (СІФК) з горизонтальним або вертикальним керуванням.

За формою опорної напруги системи керування поділяються на такі, що використовують пилкоподібну або косинусоїдну форму опорного сигналу.

За способом подачі керуючих імпульсів виділяють спільне та роздільне керування вентильними комплектами. При спільному керуванні розрізняють погоджене та непогоджене виконання. У першому випадку середні значення ЕРС випрямного та інверсного комплектів рівні за величиною, але протилежні за знаком, що спричиняє появу зрівняльного струму, який обмежується реакторами (до 10 % номінального струму). У разі непогодженого керування ЕРС інверсного комплекту перевищує ЕРС випрямного, тому зрівняльний струм зменшується, і для його обмеження потрібні реактори меншої індуктивності.

При роздільному керуванні необхідність у зрівняльних реакторах відпадає. У цьому випадку керуючі імпульси подаються лише на той комплект вентилів, що повинен працювати в даний момент. Коли струм навантаження досягає нуля, керування на попередній комплект блокується, і після короткої паузи (5–10 мс) дозволяється подача імпульсів на інший комплект. Такий спосіб підвищує ККД електропривода, оскільки усуває втрати, пов'язані із зрівняльними струмами.

Функціональна схема тиристорного перетворювача (ТП), наведена на рис. 7.3, а, включає систему керування (блок Б1) та керований випрямляч (КВ, блок Б2).

Вхідною координатою ТП є напруга керування U_k , а вихідною - спрямована ЕРС або напруга U_d , що визначається як середнє значення напруги на інтервалі провідності у сталому режимі роботи.

Блок Б1 виконує функцію перетворення сигналу керування U_k у кут відкриття тиристорів α , тоді як блок Б2 перетворює цей кут у відповідну ЕРС перетворювача E_d .

У ролі системи керування (СК) у блоці Б1 використовується система імпульсно-фазового керування (СІФК), а блок Б2 являє собою керовані вентильні групи (ВГ), з'єднані певним чином залежно від схеми перетворювача.

Керований випрямляч (КВ) складається з комплектів тиристорів, які забезпечують перетворення змінної напруги у регульовану постійну напругу заданого напрямку. У реверсивних ТП для цього застосовують два комплекти вентилів - «Вперед» та «Назад», що дозволяє змінювати напрямок струму у колі навантаження.

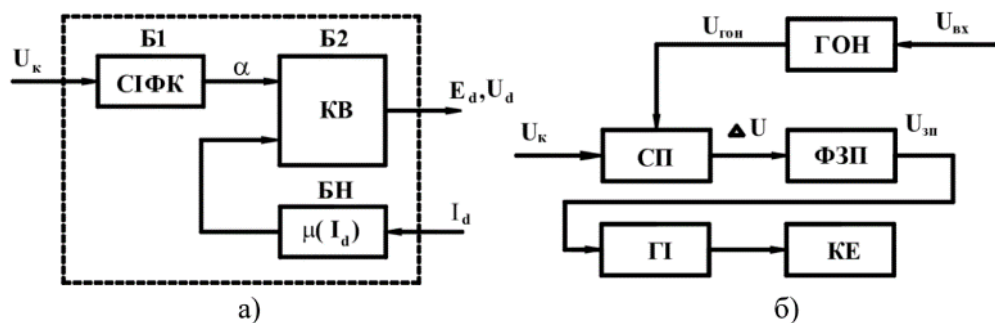


Рис. 7.3 – Функціональні схеми ТП і блоку керування

На вихідну координату ТП діє вплив, що обумовлює, у виді струму I_d навантаження, який через блок навантаження (БН) надходить до блоку Б2. Вплив струму I_d на ЕРС E_d проявляється тільки у режимі переривчастих

струмів. У режимі безперервних струмів ЕРС ТП є функцією тільки кута включення:

$$U_d = E_{do} \cdot \cos \alpha, \quad (7.1)$$

Принцип роботи системи імпульсно-фазового керування (СІФК) ґрунтується на тому, що безперервна вхідна керуюча напруга U_k перетворюється у фазове зміщення імпульсу, який відкриває тиристор у певний момент часу, відрахований від природного моменту його вмикання.

Основним елементом СІФК є блок керування, функціональну схему якого подано на рис. 7.3, б. Він призначений для керування одним тиристором і містить такі основні вузли:

- генератор опорної напруги (ГОН), синхронізований із напругою живлення тиристорів;
- схему порівняння (СП), яка порівнює значення U_k та $U_{гон}$;
- фазозсувний пристрій (ФЗП), що визначає фазу імпульсу керування;
- генератор імпульсів (ГІ), який формує імпульси U_a необхідної амплітуди та тривалості для подачі на керуючі електроди (КЕ) тиристорів.

Керовані випрямлячі (КВ) за схемними рішеннями аналогічні випрямлячам із некерованими вентилями. Найпоширенішими є трифазні нульові та мостові схеми випрямлення (рис. 7.4, а та б відповідно).

ТП функціонує з активно-індуктивним навантаженням електродвигуна М, а СІФК забезпечує регулювання кута керування α відповідно до заданого закону, змінюючи середні значення випрямленої напруги та струму.

Аналіз роботи нульової схеми КВ показує, що за умови, коли кут керування $\alpha < \pi/6$ (тобто менше 30°), струм I_n у навантаженні має безперервний характер, а кожен тиристор залишається відкритим протягом інтервалу, що відповідає куту $2\pi/3$.

При цьому середнє значення спрямленої напруги для кута $\alpha \neq 0$ визначається за формулою:

$$U_{н.сп} = \frac{1}{2\pi/3} \int_{\pi/6+\alpha}^{\pi} \sqrt{2}U_2 \sin \omega t \cdot d(\omega t) = U_{d0} \frac{\sqrt{3}}{3} (1 + \cos(30^\circ + \alpha))$$

(7.2)

При куті $\alpha > \pi/6$ у спрямленому струмі з'являються паузи, що відповідає режиму переривчастих струмів.

На рис. 7.4, б наведена схема трифазного мостового керованого випрямляча.

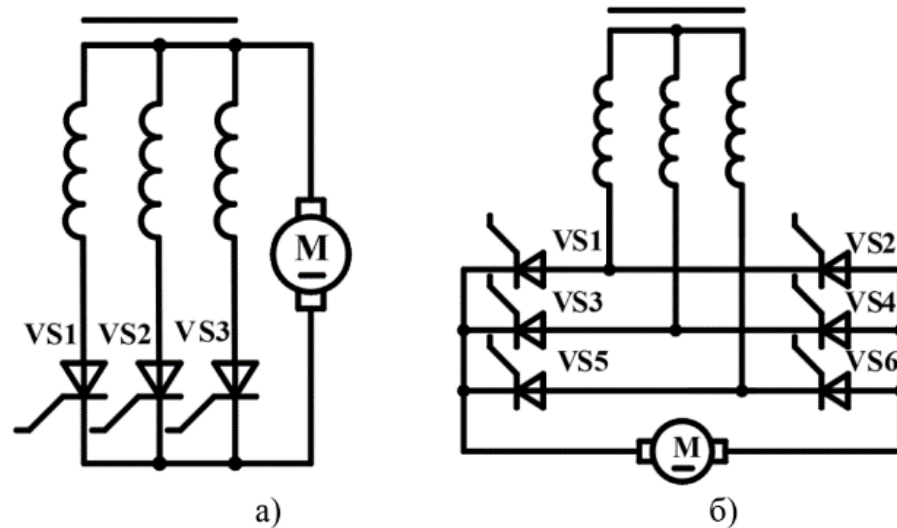


Рис. 7.4 – Схеми керованих випрямлячів

У нього входять шість тиристорів, електроди яких об'єднані у катодну й анодну групи. Так само як і у некерованому випрямлячеві, у розглянутому пристрої одночасно працюють два тиристора: один - з анодної, інший – з катодної груп. При цьому керуючий сигнал, що подається на тиристор катодної групи, випереджає на 180 град сигнал, який надходить на тиристор анодної групи.

Режим переривчастого струму у мостовому випрямлячеві настає при куті керування $\alpha \geq \pi/3$. У цьому режимі один з двох тиристорів, який повинен

відкриватися, не зможе відкритися, й струму у навантажувальному пристрої не буде. Щоб уникнути цього, керуючі імпульси повинні мати тривалість, що відповідає куту $\pi/3$. Співвідношення для середнього значення спрямленої напруги при куті $\alpha \leq \pi/3$ має вигляд:

$$U_{npr} = U_{do} \cdot \cos \alpha, \quad (7.3)$$

До основних статичних характеристик тиристорного перетворювача відносяться наступні характеристики:

- 1) характеристика керування СІФК - залежність кута включення від напруги керування $\alpha = f(U_k)$;
- 2) зовнішня характеристика ТП - залежність напруги або ЕРС перетворювача від струму навантаження $U_d = f(I_d)$ при $\alpha = const$;
- 3) характеристика керування ТП - залежність напруги або ЕРС перетворювача від напруги керування $U_d = E_d = f(U_k)$;
- 4) характеристика керування випрямляча - залежність напруги або ЕРС керованого випрямляча від кута включення $U_d = E_d = f(\alpha)$.

Типові графіки характеристик ТП наведено на рис. 7.5.

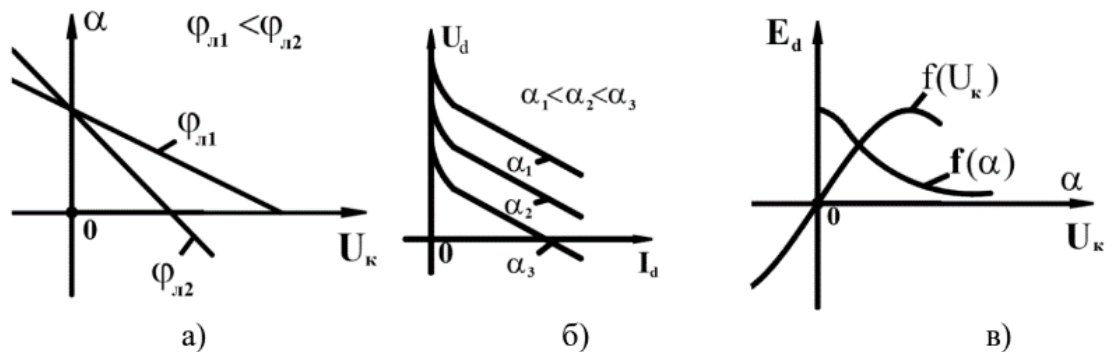


Рис. 7.5 – Типові графіки характеристик ТП

У режимі безперервного струму якоря рівняння електричної рівноваги має вигляд:

$$U_d = E + I_a \cdot R_a + \Delta U_{тип}, \quad (7.4)$$

де $U_d = E_{do} \cdot \cos \alpha$ - випрямлена напруга; $E = K \cdot \Phi \cdot \omega$ - ЕРС двигуна; E_{do} - максимальне значення випрямленої ЕРС при куті керування $\alpha = 0$ ($K_{сх}$ - коефіцієнт, значення якого залежать від схеми випрямлення); $\Delta U_{тир}$ - спад напруги на відкритих тиристорах; $U_{2ф}$, $U_{2л}$ - відповідно фазна і лінійна напруги вторинної обмотки узгоджувального трансформатора або мережі; $R_{я} = r_{оя} + r_{дп} + r_{ко} + r_{др} + r_{тр} + R_{екв}$ - сумарний опір якірного кола; $r_{оя}$, $r_{дп}$, $r_{ко}$ - відповідно опір обмотки якоря, додаткових полюсів і компенсаційній; $r_{тр}$ - зведений до кола випрямленої напруги опір трансформатора; $R_{екв} = \chi_{тр} \cdot m / 2\pi$ - еквівалентний опір, що враховує зменшення випрямленої напруги внаслідок комутації тиристорів; m - кількість пульсацій випрямленої напруги за період змінної напруги мережі (пульсаційність перетворювача); $m=3$ і $m=6$ відповідно для трифазної нульової і мостової схем випрямлення; $\chi_{тр}$ - індуктивний опір трансформатора.

З урахуванням $E = K \cdot \Phi \cdot \omega$ вирази для електромеханічної і механічної характеристик мають вигляд:

$$\omega = \frac{E_{do} \cdot \cos \alpha - I_{я} \cdot R_{я} - \Delta U_{тир}}{K \cdot \Phi}, \quad (7.5)$$

$$\omega = \frac{E_{do} \cdot \cos \alpha - \Delta U_{тир}}{K \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R_{я}}{(K \cdot \Phi)^2}, \quad (7.6)$$

7.2. Завдання

У склад електропривода системи тиристорний перетворювач-двигун постійного струму входять нереверсивний тиристорний перетворювач з керованим випрямлячем, зібраним за трифазною мостовою схемою, та приводний електродвигун постійного струму з незалежним збудженням.

Відомі наступні номінальні (паспортні) дані приводного електродвигуна (ПЕД): потужність $P_n = 17$ кВт, напруга $U_n = 220$ В, струм якоря $I_n = 82,4$ А, максимальна частота обертання $n_{max} = 3000$ хв⁻¹, момент інерції двигуна $J_d =$

0,3 кг·м², а також опори обмотки якоря $r_{\text{оя}}$, додаткових полюсів $r_{\text{дп}}$, обмотки збудження $r_{\text{оз}}$, момент інерції робочого механізму $J_{\text{мх}}$, номінальна частота обертання $n_{\text{н}}$, індуктивність обмотки якоря $L_{\text{оя}}$, значення яких надані у табл. 6.1 для кожного варіанта завдання.

Тиристорний перетворювач приєднується до трансформатора, який живиться від трифазної промислової мережі та має наступні паспортні дані: повна потужність 25 кВА, номінальні лінійні напруги первинної $U_{1\text{л}} = 380\text{В}$ та вторинної $U_{2\text{л}} = 209\text{ В}$ обмоток, струм вторинної обмотки $I_{2\text{н}}$, напруга $U_{\text{кз}}$ та потужність $\Delta P_{\text{кз}}$ короткого замикання (табл. 7.1). Амплітудне значення косинусоїдної опорної напруги перетворювача $U_{\text{оп.м}} = 10\text{ В}$.

Необхідно скласти:

- 1) спрощені функціональну та принципову електричну схеми системи ТП-Д;
- 2) розрахувати параметри системи;
- 3) розрахувати і побудувати графіки зовнішньої характеристики тиристорного перетворювача;
- 4) розрахувати та побудувати графіки механічної характеристики привода.

7.3. Приклад виконання практичного завдання

Завдання: За наданими даними та наступними значеннями параметрів: $r_{\text{оя}} = 0,125\text{Ом}$, $r_{\text{дп}} = 0,08\text{Ом}$, $I_{\text{з}} = 4\text{ А}$, $U_{\text{кз}} = 4,5\%$, $\Delta P_{\text{кз}} = 541\text{Вт}$, $n_{\text{н}} = 750\text{ хв}^{-1}$, $L_{\text{оя}} = 0,019\text{ Гн}$, $J_{\text{мх}} = 0,5 \cdot J_{\text{д}}$, $I_{2\text{н}} = 62,8\text{ А}$.

1. Складання спрощених функціональної та принципової електричної схем неререверсивного тиристорного електропривода.
2. Визначення повного опору фази трансформатора

$$z_{\text{мп}} = \frac{U_{2\phi} \cdot U_{\text{кз}}}{100 \cdot I_{2\text{н}}} = \frac{209 \cdot 4,5}{\sqrt{3} \cdot 100 \cdot 63} = 0,086\text{ Ом},$$

де $U_{2\phi} = U_{2л} / \sqrt{3}$ - номінальна фазна напруга вторинної обмотки трансформатора.

3. Розрахунок активного опору фази вторинної обмотки трансформатора

$$r_{mp} = \frac{\Delta P_{кз}}{3 \cdot I_{2н}^2} = \frac{541}{3 \cdot 63} = 0,046 \text{ Ом},$$

4. Визначення індуктивного опору та індуктивності фази трансформатора відповідно:

$$x_{mp} = \sqrt{z_{mp}^2 - r_{mp}^2} = \sqrt{0,086^2 - 0,047^2} = 0,07 \text{ Ом},$$

$$L_{mp} = \frac{x_{mp}}{2 \cdot \pi \cdot f_m} = \frac{0,07}{2 \cdot 3,14 \cdot 50} = 0,2 \text{ мГн},$$

5. Розрахунок еквівалентного опору, обумовленого комутацією тиристорів:

$$R_{екв} = \frac{x_{mp}}{2 \cdot \pi} \cdot m = \frac{0,07}{2 \cdot 3,14} \cdot 6 = 0,07 \text{ Ом},$$

6. Визначення повних опору та індуктивності якірного кола відповідно:

$$R_{я} = r_{оя} + r_{он} + 2 \cdot r_{mp} + 2 \cdot R_{екв} = 0,123 + 0,08 + 2 \cdot 0,046 + 2 \cdot 0,07 = 0,436 \text{ Ом},$$

$$L_{я} = L_{оя} + 2 \cdot L_{mp} = 19 \cdot 10^{-3} + 2 \cdot 0,2 \cdot 10^{-3} = 19,4 \text{ мГн},$$

7. Розрахунок електромагнітної постійної часу кола якоря

$$T_{я} = \frac{L_{я}}{R_{я}} = \frac{19,4 \cdot 10^{-3}}{0,457} = 0,044 \text{ с},$$

8. Визначення електромеханічної постійної кола якоря

$$T_m = \frac{(J_{\delta} + J_{мк}) \cdot R_{я}}{(\kappa \cdot \Phi)^2},$$

де κ та Φ - конструктивний коефіцієнт та магнітний потік обмотки збудження електродвигуна, а величина $\kappa \cdot \Phi = C_e$ є коефіцієнт електрорушійної сили двигуна.

Величина цього коефіцієнта визначається із рівняння балансу напруг для кола якоря при номінальному навантаженні згідно з виразом:

$$C_e = \kappa \cdot \Phi = \frac{U_n - I_n (r_{оя} + r_{он})}{\omega_n} = \frac{220 - 78,5 \cdot (0,125 + 0,08)}{78,5} = 2,6 \text{ В} \cdot \text{с},$$

де ω_n - номінальна кутова швидкість електродвигуна.

Тоді електромеханічна постійна дорівнює

$$T_m = \frac{(0,3 + 0,5 \cdot 0,3) \cdot 0,454}{(2,6)^2} = 0,03 \text{ с},$$

9. Розрахування модуля коефіцієнта жорсткості механічної характеристики приводного двигуна

$$\beta = \frac{(\kappa \cdot \Phi)^2}{R_{я}} = \frac{2,5^2}{0,457} = 14,8 \text{ (В} \cdot \text{с)}^2 / \text{Ом}$$

10. Визначення коефіцієнта перетворювання тиристорного перетворювача

$$K_{mn} = \frac{E_{do}}{U_{он.м}/2} = \frac{\kappa_{cx} \cdot U_{2\phi}}{10/2} = \frac{2,34 \cdot 209}{5 \cdot \sqrt{3}} = 56,5$$

де E_{do} - максимальне значення випрямленої ЕРС перетворювача при куті керування $\alpha = 0$; κ_{cx} - коефіцієнт, значення якого залежить від схеми випрямлення, наприклад $\kappa_{cx} = 2,34$ і $\kappa_{cx} = 1,17$ - для трифазних мостової і нульової схем випрямлення відповідно.

11. Визначення постійної часу тиристорного перетворювача

$$\tau = \frac{1}{f_m \cdot m} + (0,007 \dots 0,01) = \frac{1}{50 \cdot 6} + (0,007 \dots 0,01),$$

де f_m та m - частота та кількість пульсації випрямленої напруги за період напруги мережі ($m = 3$ і $m = 6$ для трифазних нульової та мостової схем).

12. Розрахунок коефіцієнта перетворювання K_d та постійної часу T_d приводного двигуна:

$$K_{\partial} = \frac{1}{\kappa \cdot \Phi} = \frac{1}{2,6} = 0,385 \text{ (В} \cdot \text{с)}^{-1},$$

$$T_{\partial} = \sqrt{T_{\text{я}} \cdot T_{\text{м}}} = \sqrt{0,043 \cdot 0,03} = 0,036 \text{ с},$$

13. Розрахувати та побудувати графіки зовнішньої характеристики тиристорного перетворювача за формулою

$$U_{\partial} = E_{\text{до}} \cdot \cos \alpha - \left(r_{\text{мп}} + \frac{x_{\text{мп}}}{2 \cdot 3,14 / m} \right) \cdot I_{\text{д}} - \Delta U_{\text{тип}} =$$

$$= 283 \cdot \cos \alpha - \left(0,046 + \frac{0,073}{2 \cdot 3,14 / 6} \right) \cdot I_{\text{д}} - 1,5 \quad ,$$

де $\Delta U_{\text{тип}} = (1 \dots 2) \cdot \text{В}$ - падіння напруги на тиристорах; $I_{\text{д}} = I_{\text{я}}$ - струм на навантаженні тиристорного перетворювача.

Розрахунки зробити для трьох значень кута $\alpha = 60, 90, 120$ град. За результатами розрахунків складається табл. 7.2. За даними цієї таблиці будуються графіки зовнішньої характеристики, які наведені на рис. 7.6.

Таблиця 7.2 - Розрахункові дані для зовнішніх характеристик

$\alpha \backslash I_{\text{д}}$	$I_{\text{д}}, \text{А}$	0	50	100	150	200
$\alpha_1 = 60^\circ$	$E_{\text{д}}, \text{В}$	139,65	133,85	128,5	122,2	116,4
$\alpha_2 = 90^\circ$	$E_{\text{д}}, \text{В}$	-1,5	-7,3	-13,1	-18,9	-24,7
$\alpha_3 = 120^\circ$	$E_{\text{д}}, \text{В}$	-142,65	-148,45	-154,2	-160	-165,8

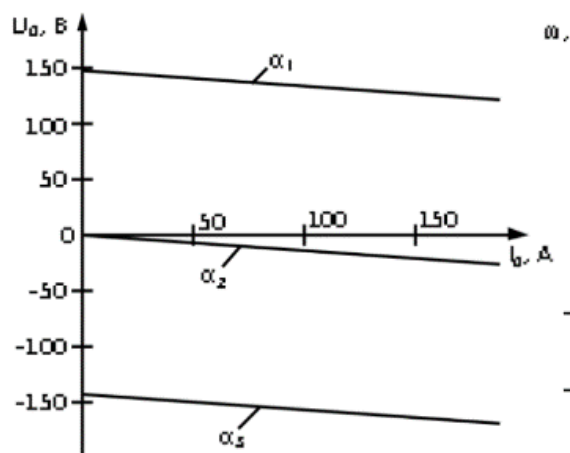


Рис. 7.6 – Графік зовнішньої характеристики ТП

14. Розрахувати та побудувати графіки механічної характеристики тиристорного електропривода за формулою

$$\omega = \frac{E_{do} \cdot \cos \alpha - \Delta U_{мур}}{\kappa \cdot \Phi} - \frac{M \cdot R_{я}}{(\kappa \cdot \Phi)^2} = \frac{283 \cdot \cos \alpha - 1,5}{2,6} - M \cdot \frac{0,45}{(2,6)^2},$$

де M - обертовий момент на валу приводного двигуна.

Розрахунки зробити для трьох значень кута $\alpha = 60, 90, 120$ град. За результатами розрахунків складається табл. 7.3. За даними цієї таблиці будуються графіки механічної характеристики електропривода системи ТП - Д, які наведені на рис. 7.7.

Таблиця 7.3 - Розрахункові дані для механічних характеристик

$\alpha \backslash M$	$M, \text{Н} \cdot \text{м}$	0	50	100	150	200
$\alpha_1 = 60^\circ$	$\omega, \text{с}^{-1}$	53,9	50,5	47,1	43,7	40,3
$\alpha_2 = 90^\circ$	$\omega, \text{с}^{-1}$	-0,58	-4	-7,4	-10,8	-14,2
$\alpha_3 = 120^\circ$	$\omega, \text{с}^{-1}$	-53,9	-57,3	-60,7	-64,4	-67,5

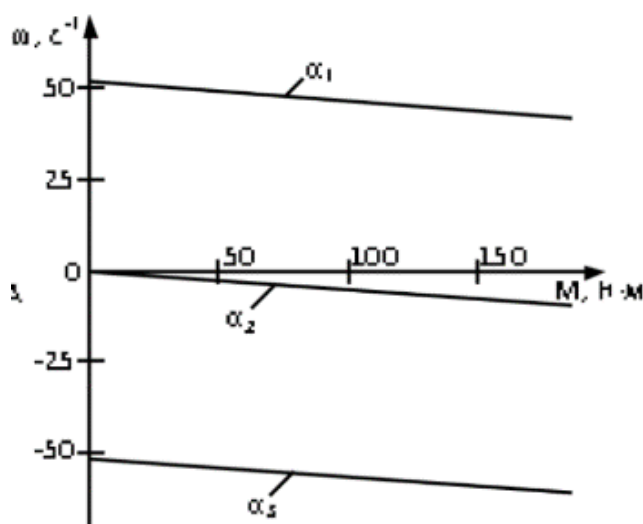


Рис. 7.7 – Графік механічної характеристики ДПС

15. Провести аналіз побудованих характеристик та зробити висновки.

7.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з прикладом виконання практичного завдання;
3. Виконати розрахунок за даними у відповідності з варіантом (див. табл. 6.1);
4. Відповісти на контрольні питання;
5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт;
6. Зробити висновок про виконану роботу.

7.5. Контрольні запитання

1. Що таке система ТП–Д? Назвіть її основні функціональні вузли.
2. Поясніть принцип роботи тиристора. Що означає кут включення α і кут провідності λ ?
3. У чому відмінність між нульовою та мостовою схемою керованого випрямляча? Які типові значення коефіцієнта $k_{сх}$ для цих схем?
4. Що таке режим безперервного і переривчастого струму в колі випрямляча? При яких значеннях α для трифазної мостової схеми настає режим переривчастого струму?
5. Які основні характеристики тиристорного перетворювача (ТП)? Наведіть їх визначення.
6. Поясніть структуру СІФК (система імпульсно-фазового керування). Які її основні блоки і функції?

7. Запишіть вираз для середнього значення спрямленої напруги U_d для трифазної мостової схеми при $\alpha \leq \pi/3$ (формула виду, що використовується у практиці).

8. Як впливає падіння напруги на відкритих тиристорах $\Delta U_{\text{тир}}$ на зовнішню характеристику ТП?

9. Що таке еквівалентний опір $R_{\text{екв}}$, який враховує комутацію тиристорів, і як він обчислюється (в загальних рисах)?

10. Наведіть баланс напруги для кола якоря в режимі безперервного струму і поясніть значення кожного члена рівняння.

11. Як знаходиться коефіцієнт електрорушійної сили ($k \cdot \Phi$ або C_e) двигуна за паспортними даними? Покажіть порядок дій.

12. Що таке електромагнітна та електромеханічна постійні часу (T_j , $T_{\text{мех}}$) у приводі і як їх розрахувати?

13. Поясніть, як розраховується коефіцієнт перетворення ТП K_d і від чого він залежить.

14. Опишіть порядок розрахунку зовнішньої характеристики ТП - які величини треба розрахувати і для яких значень α будуються криві?

15. Як переходять від зовнішньої характеристики ТП до механічної характеристики привода? Яка формула використовується для побудови $M = f(\omega)$?

Таблиця 7.1 - Вихідні дані для виконання практичної роботи №7

№ вар	$r_{\text{оя}}, \text{Ом}$	$r_{\text{дп}}, \text{Ом}$	$I_z, \text{А}$	$J_{\text{мх}}, \text{кг} \cdot \text{м}^2$	$U_{\text{кз}}, \%$	$\Delta P_{\text{кз}}, \text{Вт}$	$n_n, \text{хв}^{-1}$	$L_{\text{оя}}, \text{Гн}$	$I_{2н}, \text{А}$
1	0.125	0.075	3.0	0.15	4.5	532	750	0.012	52.6
2	0.150	0.095	3.4	0.24	4.5	545	820	0.016	54.2
3	0.175	0.105	4.2	0.28	4.8	584	870	0.019	58.2
4	0.200	0.125	4.8	0.32	5.2	620	900	0.024	62.4

№ вар	$r_{\text{оя}}, \text{Ом}$	$r_{\text{дп}}, \text{Ом}$	$I_3, \text{А}$	$J_{\text{мх}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$U_{\text{кз}}, \%$	$\Delta P_{\text{кз}}, \text{Вт}$	$n_{\text{н}}, \text{хВ}^{-1}$	$L_{\text{оя}}, \text{Гн}$	$I_{2\text{н}}, \text{А}$
5	0.225	0.145	5.2	0.36	5.6	744	925	0.027	66.8
6	0.250	0.165	5.6	0.42	5.2	769	950	0.032	71.4
7	0.275	0.185	6.2	0.46	5.8	797	985	0.036	74.5
8	0.300	0.200	6.7	0.52	6.2	812	1000	0.040	78.2
9	0.325	0.205	7.0	0.56	6.8	832	1200	0.042	81.2
10	0.340	0.230	7.2	0.59	7.1	854	1350	0.062	83.4
11	0.365	0.245	7.6	0.63	7.4	868	1400	0.068	85.6
12	0.385	0.260	8.0	0.67	7.8	892	1450	0.072	88.3
13	0.410	0.275	8.4	0.71	8.0	915	1500	0.075	91.2
14	0.435	0.290	8.8	0.75	8.3	932	1550	0.079	94.0
15	0.460	0.310	9.1	0.79	8.6	958	1600	0.083	96.4
16	0.485	0.325	9.4	0.83	8.9	972	1650	0.087	99.1
17	0.510	0.340	9.7	0.87	9.2	995	1700	0.091	102.3
18	0.535	0.355	10.0	0.91	9.4	1012	1750	0.095	105.6
19	0.560	0.370	10.5	0.95	9.6	1038	1800	0.099	108.8
20	0.585	0.385	10.9	1.00	9.8	1055	1850	0.103	112.0
21	0.610	0.400	11.3	1.04	10.0	1072	1900	0.107	115.2
22	0.635	0.415	11.8	1.08	10.3	1090	1950	0.111	118.4
23	0.660	0.430	12.2	1.12	10.5	1115	2000	0.115	121.8
24	0.685	0.445	12.6	1.16	10.8	1132	2050	0.119	125.0
25	0.710	0.460	13.0	1.20	11.0	1155	2100	0.123	128.2
26	0.735	0.475	13.4	1.24	11.2	1171	2150	0.127	131.4
27	0.760	0.490	13.8	1.28	11.4	1193	2200	0.131	134.6

№ вар	$r_{\text{оя}}, \text{Ом}$	$r_{\text{дп}}, \text{Ом}$	$I_3, \text{А}$	$J_{\text{мх}}, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	$U_{\text{кз}}, \%$	$\Delta P_{\text{кз}}, \text{Вт}$	$n_{\text{н}}, \text{хВ}^{-1}$	$L_{\text{оя}}, \text{Гн}$	$I_{2\text{н}}, \text{А}$
28	0.785	0.505	14.3	1.32	11.7	1210	2250	0.135	137.8
29	0.810	0.520	14.7	1.36	11.9	1235	2300	0.139	141.2
30	0.835	0.535	15.2	1.40	12.2	1250	2350	0.143	144.6

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 8

Тема: Дослідження схеми керування електродвигуном постійного струму паралельного збудження при пуску в функції часу.

Мета роботи: практично вивчити схему автоматичного керування двигуном постійного струму паралельного збудження і придбати навички в збиранні і регулюванні цієї схеми.

8.1. Теоретичні відомості

Електродвигуни постійного струму паралельного (шунтового) збудження широко застосовуються в системах електропривода, де необхідне плавне регулювання швидкості обертання та високий пусковий момент. Особливістю таких двигунів є те, що обмотка збудження підключається паралельно до якоря, тому магнітний потік залишається майже сталим у широкому діапазоні навантажень.

Пуск електродвигуна постійного струму паралельного збудження є одним із найвідповідальніших режимів його роботи. У момент увімкнення, коли якор нерухомий і електрорушійна сила (ЕРС) відсутня, струм у колі якоря обмежується лише активним опором його обмотки. Через мале значення цього опору пусковий струм може у багато разів перевищувати номінальний, що призводить до низки небажаних явищ:

- перегрів обмоток через великі струми;
- іскріння на колекторі, що прискорює знос щітково-колекторного вузла;
- механічні удари та ривки у трансмісії при різкому наростанні моменту;
- просідання напруги живлення у мережі, що негативно впливає на інші споживачі;
- зниження загальної надійності та довговічності двигуна.

Щоб уникнути цих проблем, у коло якоря вводиться додатковий пусковий опір, який обмежує початковий струм до допустимого рівня. Але цей опір потрібно поступово виводити у процесі розгону двигуна, оскільки зі збільшенням швидкості ЕРС зростає, а потреба в обмеженні струму зменшується.

Керування пуском у функції часу дозволяє автоматизувати процес розгону без участі оператора. У такій системі виведення секцій пускового резистора здійснюється не вручну, а через певні часові інтервали, заздалегідь визначені розрахунками або експериментально.

Основні переваги такого способу:

1. Захист електричної машини від перевантажень у період пуску. Завдяки часовій залежності забезпечується контрольований спад пускового струму та зменшення електромагнітного моменту.
2. Плавність розгону. Вимикання секцій пускового опору за заданим часовим законом запобігає ривкам у швидкості та моменті, що важливо для механічної частини приводу.
3. Автоматизація процесу. Використання реле часу, електронних або мікропроцесорних контролерів усуває необхідність ручного втручання, підвищує надійність і повторюваність пускового процесу.
4. Оптимізація енергоспоживання. У процесі пуску енергія, що розсіюється на пусковому резисторі, зменшується завдяки точно розрахованим часовим інтервалам його виведення.
5. Підвищення ресурсу електродвигуна та приводу. Контрольований режим пуску знижує термічні та динамічні навантаження, що продовжує строк служби машини.

Отже, керування пуском електродвигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу необхідне для забезпечення:

- безпечного та плавного розгону двигуна;
- обмеження пускових струмів і моментів;

- підвищення стабільності, довговічності та ефективності роботи електропривода;
- автоматизації процесу пуску без участі оператора.

Таким чином, це рішення є важливою складовою системи керування сучасними електроприводами, де поєднуються вимоги до енергоефективності, надійності та технологічної гнучкості.

1. Особливості процесу пуску.

При пуску двигуна якір нерухомий, отже, ЕРС самоіндукції $E = k\Phi\omega$ дорівнює нулю, а струм у колі якоря визначається лише прикладеною напругою та опором кола:

$$I_a = \frac{U}{R_a}, \quad (8.1)$$

де U - напруга живлення, R_a - опір обмотки якоря.

Оскільки R_a має мале значення, пусковий струм може у багато разів перевищувати номінальний, що призводить до механічних та теплових перевантажень. Тому під час пуску необхідно обмежити струм шляхом послідовного увімкнення додаткового пускового резистора R_p .

2. Керування в функції часу.

Для плавного пуску пусковий резистор поступово виводиться з кола якоря у міру зростання швидкості двигуна. Це може здійснюватися автоматично - у функції часу або швидкості обертання.

У системі пуску в функції часу керування відбувається за заздалегідь заданим часовим законом, який визначає моменти відключення секцій пускового резистора:

$$R_p = f(t), \quad (8.2)$$

Під час пуску ЕРС якоря зростає пропорційно швидкості обертання, зменшуючи струм якоря та падіння напруги на пусковому резисторі. Через певні інтервали часу (визначені розрахунком або експериментально) частина

резистора вимикається, забезпечуючи поступове підвищення швидкості двигуна до номінальної.

Керування може реалізовуватись реле часу, електронним контролером або мікропроцесорною системою, що формує часову залежність струму пуску:

$$I_a = \frac{U - E(t)}{R_a + R_p(t)}, \quad (8.3)$$

де $E(t) = k\Phi\omega(t)$.

Таким чином, із ростом швидкості $\omega(t)$ ЕРС $E(t)$ збільшується, а струм $I_a(t)$ зменшується відповідно до вибраної функції часу.

3. Динамічні характеристики.

Рівняння руху електродвигуна:

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_c, \quad (8.4)$$

де J - момент інерції системи, $M_e = k\Phi I_a$ - електромагнітний момент, M_c - момент навантаження.

Під час пуску $M_e(t)$ змінюється залежно від струму якоря, який, у свою чергу, визначається законом зміни пускового опору у часі.

Правильний вибір функції $R_p(t)$ дозволяє забезпечити:

- обмеження максимального струму до допустимого рівня;
- плавне зростання швидкості без ривків;
- мінімальний час пуску при заданих обмеженнях.

4. Практичні способи реалізації.

У сучасних системах пуск у функції часу реалізується такими способами:

- релейно-контакторними схемами з реле часу;
- тиристорними або транзисторними регуляторами, які плавно змінюють напругу якоря за заданим часовим законом;

- мікропроцесорними системами, що формують оптимальну траєкторію розгону на основі алгоритмів керування.

В даній роботі ми будемо досліджувати схему автоматичного керування пуском електродвигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу з динамічним гальмуванням в функції ЕРС з керуванням змінною напругою (рис. 8.1).

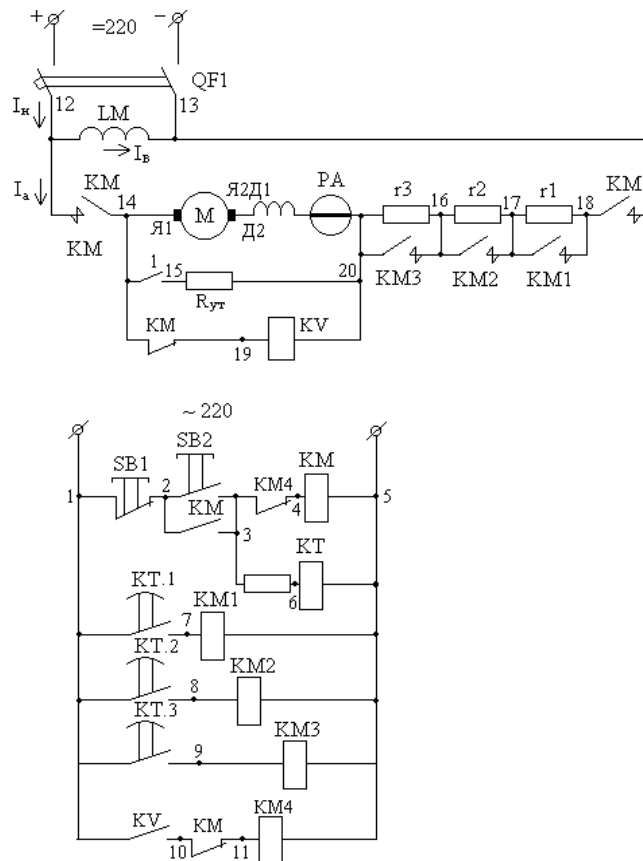


Рис. 8.1 – Схема автоматичного керування пуском електродвигуна постійного струму паралельного збудження у функції часу з динамічним гальмуванням в функції ЕРС з керуванням змінною напругою

Розглянута схема (рис. 8.1) призначена для автоматизованого нереверсивного пуску електродвигуна постійного струму у два ступені з використанням програмованої витримки часу, а також для його динамічного гальмування за ЕРС.

Схема складається з двох незалежних частин:

- Силова частина (працює на постійній напрузі) – включає електродвигун постійного струму (коло якоря та збудження), пусковий реостат з трьома секціями r_1 – r_3 , резистор динамічного гальмування $r_{дг}$, а також контакти, що здійснюють підключення та шунтування окремих елементів.
- Керуюча частина (живиться від змінної напруги) – реалізована на базі реле та контакторів, що здійснюють автоматизований пуск двигуна згідно із заданим часовим алгоритмом.

Роздільне живлення дає змогу виконувати перевірку і налагодження схеми керування без необхідності вмикати силову частину двигуна. Силова частина підключається до мережі автоматичним вимикачем QF1, а керуюча – вимикачем QF2.

Принцип роботи при пуску:

1. Для запуску натискається кнопка «Пуск» (SB2).
 - Вмикається котушка лінійного контактора КМ, який замикає свої силові контакти у колі якоря двигуна.
 - У коло двигуна вмикається повний пусковий опір $r_1+r_2+r_3$, що забезпечує перший ступінь пуску.
 - Одночасно вмикається електронне реле часу КТ (реле прискорення), налаштоване на затримку спрацювання.
2. Після витримки часу t_1 спрацьовує реле прискорення КТ1.
 - Його контакти вмикають контактор КМ1, який шунтує першу секцію пускового резистора r_1 .
 - Опір у колі якоря зменшується до r_2+r_3 , двигун отримує більше напруги та переходить у другий ступінь пуску.
3. Через наступну витримку часу t_2 спрацьовує реле КТ2.
 - Воно вмикає контактор КМ2, який шунтує другу секцію резистора r_2 .
 - У колі залишається лише r_3 , і двигун продовжує розганятися.

4. Після витримки часу t_3 спрацьовує реле КТЗ, яке вмикає контактор КМЗ, що шунтує останній елемент пускового резистора r_3 .

- Двигун виходить на номінальну напругу живлення без додаткового опору.

- На цьому процес пуску завершується.

Таким чином, пуск відбувається поетапно, у функції часу, що забезпечує обмеження пускових струмів і плавне наростання швидкості.

Відключення двигуна та гальмування

- Для зупинки короткочасно натискають кнопку «Стоп» (SB1).

- Коло котушки головного контактора КМ розмикається, силові контакти КМ відключають якір двигуна від мережі.

- Одночасно відключаються котушки прискорюючих контакторів КМ1, КМ2, КМ3, які готують схему до наступного пуску.

- При цьому замикаються спеціальні контакти КМ у колі динамічного гальмування.

- Двигун переходить у режим динамічного гальмування, коли ЕРС якоря, що виникає за рахунок обертання по інерції, спричиняє протікання струму через резистор $r_{дг}$.

- Кінетична енергія ротора і навантаження перетворюється на тепло, яке розсіюється на резисторі.

- Після зниження швидкості до майже нульового значення ЕРС зникає, реле напруги KV спрацьовує, і схема переходить у вихідний стан.

Переваги даної схеми

- Забезпечується автоматичний багатоступінчастий пуск із мінімальними струмовими перевантаженнями.

- Часові затримки дозволяють підлаштовувати алгоритм пуску під інерційність конкретного механізму.

- Динамічне гальмування підвищує безпеку експлуатації та скорочує час зупинки двигуна.

- Наявність роздільного живлення дає можливість налагодження та перевірки схеми без увімкнення силової частини.

8.2. Завдання

Ознайомитись із лабораторним обладнанням: двигуном, пусковим опором (r_1 , r_2 , r_3), реле часу, контакторами, опором динамічного гальмування гдт, захисними апаратами; внести параметри в специфікацію.

Зібрати (або перевірити зібрану) реальну схему керування згідно рис. 8.2; перевірити правильність з'єднань і контактів.

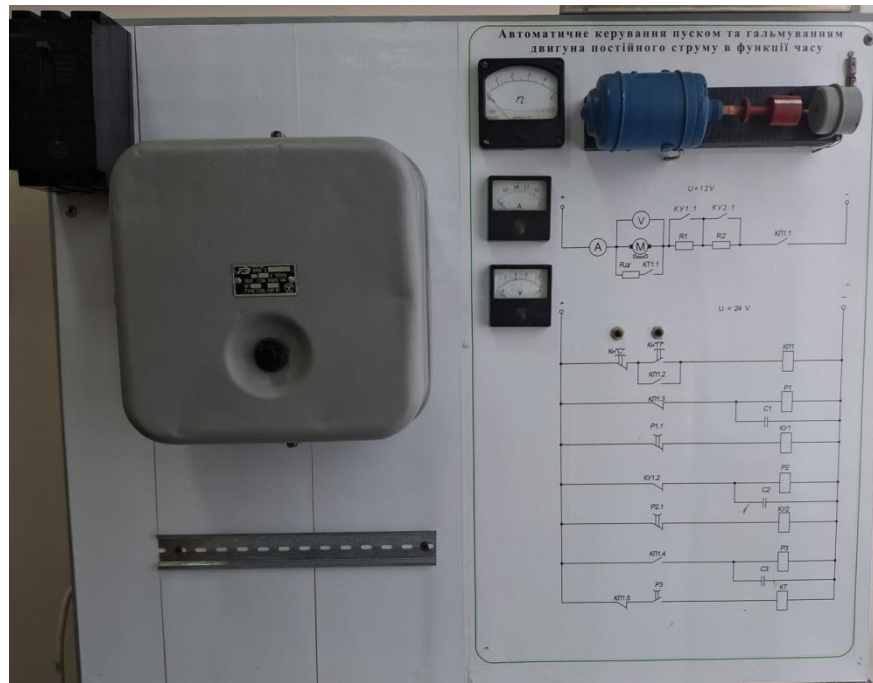


Рис. 8.2 – Схема автоматичного керування пуском та гальмуванням ДПС в функції часу

Налагодити і випробувати роботу схеми: забезпечити подачу живлення на силову і на керуючу частину (QF1, QF2), перевірити кнопки «Пуск»/«Стоп».

Виконати три незалежні досліди пуску при фіксованих уставках реле часу (t_1 , t_2) — зареєструвати часові інтервали спрацювань, повні опори у якорному колі на кожній ступені ($r_1+r_2 \rightarrow$ повна напруга).

Дослідити вплив зміни опору в колі якоря (по черзі змінюючи r_1 , r_2) на час прискорення і кінцеву швидкість; зробити додаткові 2–3 серії вимірювань для різних конфігурацій опору.

Дослідити вплив уставок реле часу (змінити t_1 , t_2) на характер пуску - виконати мінімум дві серії з іншими значеннями уставок.

Перевірити режим динамічного гальмування: після натискання «Стоп» зафіксувати час зупинки, напругу/струм на опорі $r_{дт}$, оцінити розсіяну енергію.

Обробити експериментальні дані: побудувати графіки $n(t)$ (швидкість від часу) для кожного досліду, визначити n_1 , n_2 , та кінцеву $n_{кінечна}$. Побудувати діаграми прискорення (dn/dt або $\Delta n/\Delta t$).

Розрахувати та проаналізувати: середній час прискорення на кожній ступені, відносний вплив кожного елемента пускового опору, відносну похибку вимірювань.

Оформити звіт за вимогами (див. пункт «Вимоги до звіту») і відповісти на контрольні питання.

8.3. Порядок виконання практичного завдання

1. Підготовка.

○ Ознайомитись із лабораторним стендом та його елементами: двигун постійного струму паралельного збудження, пускові опори R_1 та R_2 , реле часу, контактори, опір динамічного гальмування $R_{дт}$, захисні апарати.

○ Занести основні параметри в таблицю (специфікацію).

○ Перевірити правильність з'єднань у схемі (рис. 8.2).

2. Увімкнення живлення.

○ Включити автоматичний вимикач QF1 (силова частина, $U = 12$ В).

- Включити автоматичний вимикач QF2 (керуюча частина, $U = 24 \text{ В}$).
- Перевірити роботу кнопок «Пуск» і «Стоп» у колі керування.

3. Пуск двигуна.

- Натиснути кнопку «Пуск».
- Двигун запускається при повному пусковому опорі ($R1 + R2$).
- Після витримки часу $t1$ реле прискорення виводить з кола опір $R1$, у колі залишається лише $R2$.
- Після витримки часу $t2$ з кола виводиться $R2$, і двигун переходить на живлення без додаткових опорів (повна напруга).

4. Дослідження пуску.

- Виконати 3 пуски двигуна з однаковими уставками реле часу ($t1$, $t2$).
- Для кожного досліду зафіксувати часові інтервали виводу опорів та швидкість двигуна на кожному етапі ($n1$ при $R1+R2$, $n2$ при $R2$, кінцева при повній напрузі).
- Побудувати графік $n(t)$.

5. Варіації параметрів.

- Повторити пуск при змінених уставках реле часу ($t1$, $t2$).
 - Провести досліди при відключенні одного з опорів (наприклад, лише $R1$ або лише $R2$ у колі).
 - Порівняти вплив $R1$ і $R2$ на тривалість пуску та кінцеву швидкість.
- ### 6. Дослідження гальмування.
- Після розгону двигуна натиснути «Стоп».
 - Зафіксувати час повної зупинки двигуна.
 - Виміряти струм і напругу на гальмівному опорі $R_{дт}$, оцінити розсіяну енергію.

Таблиця 8.1 - Дослідження роботи схеми пуску ДПС паралельного збудження

№ досліду	Час встановлений		Ввімкнений опір		Швидкість якоря		
	t ₁	t ₂	R ₁	R ₂	n ₁	n ₂	
Встановлений					-	-	
1			-	-			
2			-	-			
3			-	-			
Середнє							
1	-	-					
2	-	-					
3	-	-					

8.4. Обробка результатів

1. Побудувати графіки швидкості $n(t)$ для різних варіантів пуску.
2. Побудувати діаграми прискорення $\Delta n / \Delta t$.
3. Порівняти режими: «повний пусковий опір $\rightarrow$ частковий $\rightarrow$ повна напруга» з режимами без одного з опорів.
4. Зробити висновки про вплив часу та опорів на процес пуску й гальмування.

8.5. Контрольні питання

1. Які особливості конструкції електродвигуна постійного струму паралельного збудження?
2. Чому необхідно обмежувати пусковий струм електродвигуна постійного струму?
3. Для чого у схемі пуску застосовується пусковий опір і як він впливає на струм і швидкість двигуна?

4. У чому полягає принцип пуску двигуна у функції часу?
5. Яке призначення мають реле часу у схемі автоматизованого пуску?
6. Як здійснюється перехід між ступенями пуску у досліджуваній схемі?
7. Поясніть послідовність роботи елементів схеми при натисканні кнопки «Пуск».
8. Що відбувається при натисканні кнопки «Стоп» і як реалізується динамічне гальмування?
9. Яку функцію виконує опір динамічного гальмування $r_{дт}$?
10. Яке призначення має реле KV у схемі керування?
11. Як зміна уставок реле часу впливає на плавність пуску електродвигуна?
12. Яким чином можна регулювати час пуску двигуна без зміни пускових опорів?
13. Які параметри двигуна вимірюються під час експерименту і для чого вони потрібні?
14. Як за експериментальними даними побудувати графік залежності швидкості обертання від часу $n = f(t)$?
15. Які заходи техніки безпеки необхідно дотримуватись при роботі з установкою?

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 9

Тема: Дослідження робочих та регулювальних характеристик асинхронного двигуна з при живленні від перетворювача частоти.

Мета: дослідити робочі та регулювальні характеристики асинхронного двигуна при живленні від перетворювача частоти, перевірити вплив частоти живильної напруги та навантаження на основні параметри двигуна й побудувати відповідні характеристики.

9.1. Теоретичні відомості

Асинхронні двигуни (АД) з короткозамкненим ротором є найбільш поширеними у промисловості завдяки простій конструкції, надійності, відносно низькій вартості та достатньо високим експлуатаційним показникам. Однак їхня робота значною мірою залежить від способів пуску та регулювання швидкості обертання.

Традиційно асинхронний двигун живиться від мережі змінного струму із фіксованою частотою (50 Гц), що обмежує можливості регулювання частоти обертання. Для сучасних електроприводів важливою є можливість плавного регулювання швидкості та моменту двигуна, що забезпечується застосуванням перетворювачів частоти (ПЧ).

Перетворювач частоти здійснює перетворення напруги промислової мережі змінного струму з фіксованою частотою (50 Гц) у напругу зі змінною частотою і амплітудою. Це дозволяє змінювати синхронну частоту обертання магнітного поля статора:

$$n_s = \frac{60 \cdot f_s}{p}, \quad (9.1)$$

де f_s - частота живильної напруги, p - кількість пар полюсів.

Швидкість обертання ротора n_{pp} визначається як:

$$n = n_s (1 - s), \quad (9.2)$$

де s - ковзання ротора.

При зміні частоти живлення змінюється і синхронна швидкість поля, а отже і швидкість обертання ротора. Для збереження сталих умов роботи двигуна використовується принцип керування $U/f = \text{const}$, який полягає у пропорційному зменшенні напруги статора зі зниженням частоти. Це дає змогу підтримувати магнітний потік двигуна в оптимальному діапазоні та уникати його насичення.

Робочі характеристики описують залежність основних параметрів електропривода (струму I , потужності P , частоти обертання n , моменту M , ККД η , коефіцієнта потужності $\cos\phi$) від навантаження на валу двигуна при фіксованій частоті живлення.

Основні характеристики:

- механічна характеристика $n(M)$ – залежність швидкості від моменту;
- енергетичні характеристики – залежності $P(M)$, $I(M)$, $\cos\phi(M)$, $\eta(M)$.

Вони дозволяють оцінити роботу двигуна при різних навантаженнях.

Регульовальні характеристики отримують при фіксованому навантаженні, змінюючи частоту живильної напруги. При цьому будуються залежності:

- швидкості обертання $n(f_s)$,
- напруги $U(f_s)$,
- струму $I(f_s)$,
- коефіцієнта потужності $\cos\phi(f_s)$,
- ККД $\eta(f_s)$.

Аналіз цих характеристик дозволяє оцінити ефективність керування електроприводом за допомогою ПЧ.

Переваги використання перетворювача частоти:

1. Плавне регулювання швидкості обертання без застосування механічних передач.
2. Зниження пускових струмів у 3–5 разів порівняно з прямим пуском від мережі.
3. Підвищення енергоефективності привода.
4. Можливість автоматизації процесів і дистанційного керування.
5. Забезпечення захисту двигуна від перевантажень, перегріву та аварійних режимів.

9.2. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися на випробувальному стенді зі складом обладнання, (див. рис. 9.1 -9.2), з номінальними даними використовуваного АД, а також з функціями дисплея на перетворювачі частоти.

2. Зібрати дослідну установку відповідно схемі на рис. 9.1, або, якщо вона вже зібрана, перевірити правильність передбачених з'єднань, а також границі вимірювань контролюючих приладів.

3. Вихідний стан обладнання перед початком дослідів має бути наступним. Автоматичні вимикачі - вимкнені, границі вимірювань приладів попередньо перевищують очікувані струми і напруги. Реостат R - у положенні, яке забезпечує мінімальний струм обмотки збудження ЕМГ.

4. Зняття робочих характеристик двигуна при фіксованих значеннях частоти живлячої напруги. Виконати дослід навантаження асинхронного двигуна для 2-4 значень (за вказівкою викладача) частоти f_s живлячої напруги з діапазону за табл. 9.1. Тут же приведені необхідні положення перемикача частот і відповідні значення частоти обертання n_s магнітного поля статора.

Таблиця 9.1 – Залежність частот від положення перемикача

Положення перемикача	010	011	100	101	110
f_s , Гц	10	20	30	40	50
n_s , об/хв	300	600	900	1200	1500

Кожного разу дослід починається з подачі напруги живлення на ПЧ через автоматичний вимикач QF . Першою знімається точка неробочого ходу АД, а потім вмикається автоматичний вимикач SF у колі обмотки збудження ЕМГ.

Межі зміни навантаження двигуна, регульованого за допомогою струму обмотки збудження ЕМГ, задає викладач (цей струм не записується, оскільки орієнтиром навантаження є вимірюваний обертальний момент).

Результати вимірювань у 6...7 точках для кожної частоти занести до табл. 9.2.

Таблиця 9.2 – Дані для робочих характеристик

Виміряне						Обчислене					
I	U	P_{W1}	P_{W2}	n	M	s	β	P_{in}	P	$\cos\varphi$	η
А	В	Вт	Вт	об/хв	Н·м	–	–	Вт	Вт	–	–
$f_s =$ Гц; $n_s =$ об/хв; $\alpha =$; $U f_s =$											
$f_s =$ Гц; $n_s =$ об/хв; $\alpha =$; $U f_s =$											
І так далі											

5. Зняття регулювальних характеристик двигуна при фіксованому

значенні моменту обертання.

Підтримуючи задане значення обертового моменту двигуна (вказує викладач) і регулюючи частоту живлячої напруги в діапазоні відповідно табл. 9.2, провести вимірювання величин, вказаних в табл. 9.3, і записати їх до неї.

Таблиця 9.3 – Дані для регулювальних характеристик

$M = \quad \quad \quad H \cdot m$										
Виміряне						Обчислене				
f_s	I	U	P_{W1}	P_{W2}	n	U / f_s	P_{in}	P	$\cos\varphi$	η
Гц	А	В	Вт	Вт	об/хв	В/Гц	Вт	Вт	—	—

6. Для кожного значення частоти живлячої напруги на основі зміряних даних (табл. 9.2) треба обчислити розрахункові дані АД, вказані в цієї ж таблиці. І для всіх значень цієї частоти треба побудувати робочі моментні характеристики АД – залежності $n(M)$, $P(M)$, $I(M)$, $\cos \varphi(M)$, $\eta(M)$, де для зручності замість звичайного P за аргумент прийнята величина M . Перша з характеристик одночасно представляє частину механічної характеристики.

7. Побудувати також залежності моменту від абсолютного ковзання ротора $M(\beta)$ на окремому графіку.

8. Для певного моменту обертання на основі зміряних даних (табл. 9.3) обчислити розрахункові дані асинхронного двигуна, вказані в цієї ж таблиці, і внести їх до неї.

За даними розрахунків побудувати регулювальні характеристики асинхронного двигуна – залежності $n(f_s)$, $U(f_s)$, $I(f_s)$, $\cos\varphi(f_s)$, $\eta(f_s)$..

9. Проаналізувати результати, отримані в табл. 9.2 і табл. 9.3 і проілюстровані побудованими характеристиками.

9.3. Опис експериментальної установки

Принципова схема експериментальної установки подана на рис. 9.1.

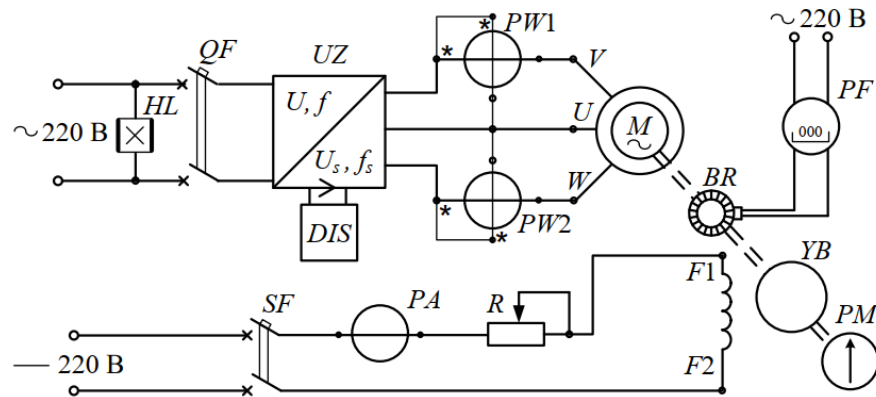


Рис. 9.1 – Схема дослідження системи АД-ПЧ

Випробовуваним є асинхронний двигун (АД). Одним з основних елементів схеми є перетворювач частоти (ПЧ) U_Z . Конкретно застосований перетворювач частоти серії CFM110 (рис. 9.2), призначений для управління частотою обертання трифазних асинхронних двигунів, використовуваних для приводу конвеєрів, пакувальних машин, насосів і вентиляторів.

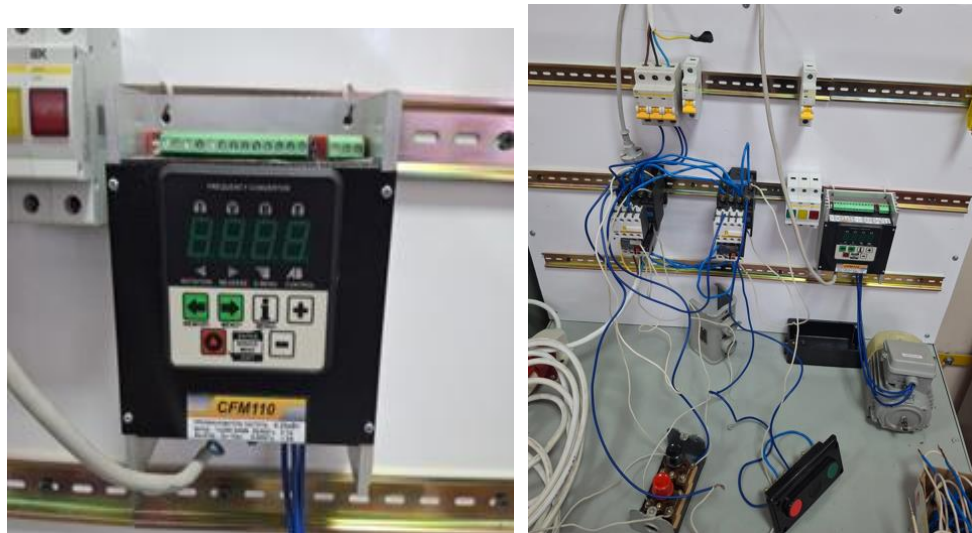


Рис. 9.2 – Зображення перетворювач частоти серії CFM110

Перетворювач частоти живиться через автоматичний вимикач QF від однофазного джерела напругою 220 В з частотою 50 Гц. ПЧ забезпечує роботу АД згідно із законом керування $U/f = \text{const}$ з компенсацією падіння напруги на активному опорі обмотки статора.

Частота обертання АД залежить від частоти напруги, а обертальний момент – від струму (побічно – від напруги). Інвертор має декілька вбудованих функцій і параметрів, які дозволяють змінювати режими роботи перетворювача, а також виконувати функцію захисту АД від перевантажень. Зауважимо, що за допомогою функції $F030$ для ПЧ встановлюється напруга живлення (за умовчанням – 220 В), за допомогою функції $F036$ – кількість полюсів АД: $2p=2$ для $n_s=3000$ об/хв; $2p=4$ для $n_s=1500$ об/хв (за умовчанням $2p=4$).

Зовнішній вигляд і габаритні розміри перетворювача серії CFM110 зображені на рис. 9.3.

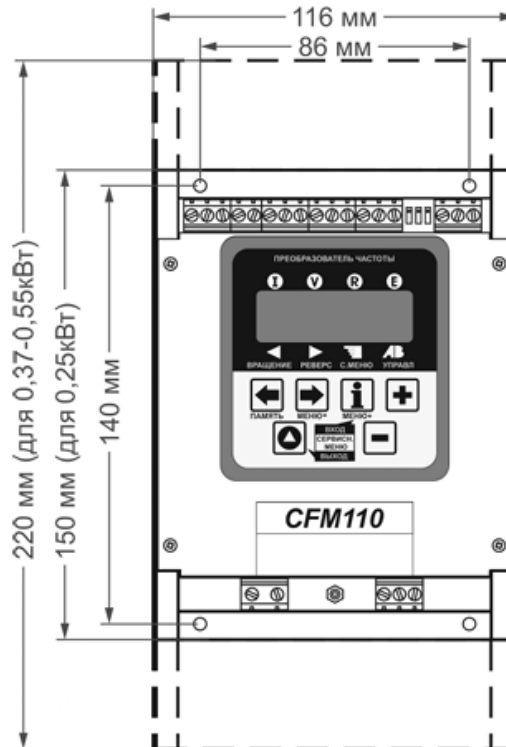


Рис. 9.3 – Габаритні розміри перетворювачів CFM110

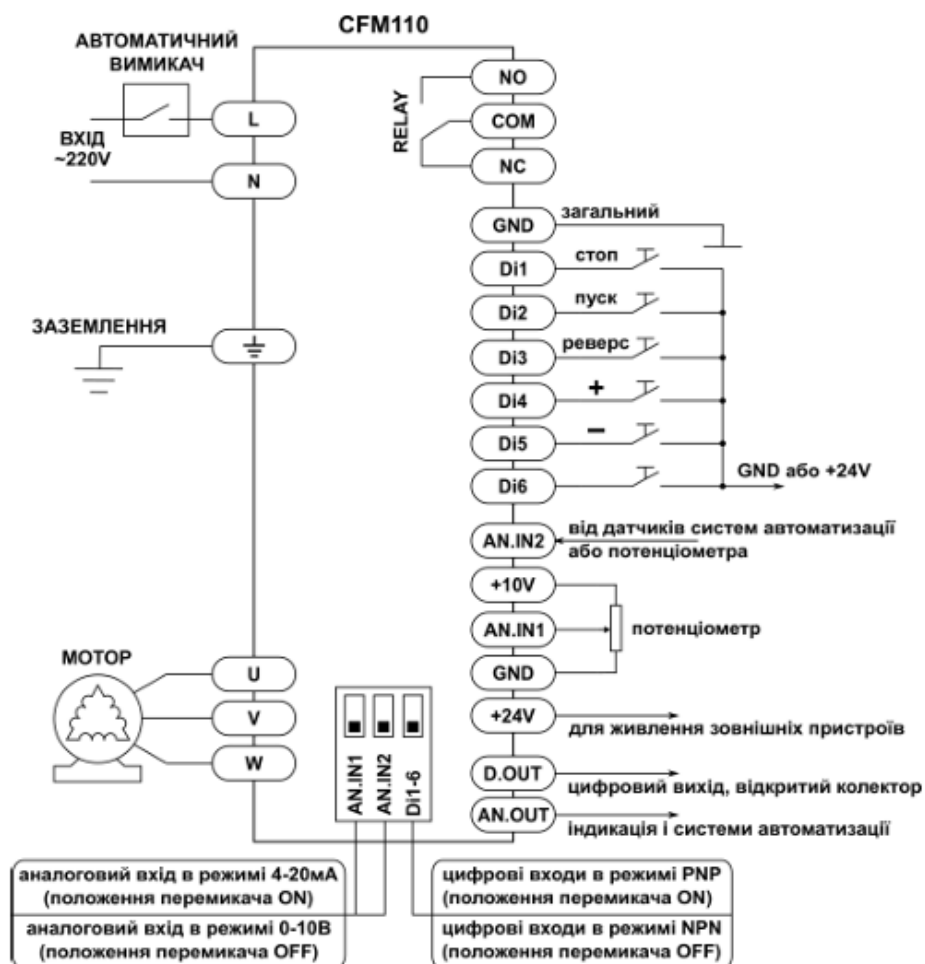


Рис. 9.4 – Базова схема зовнішніх підключень до перетворювача

Перетворювачі розраховані на роботу із стандартними трифазними асинхронними електродвигунами, які треба підключати трикутником «Δ», як показано на рис. 9.5 справа. Зліва показано підключення обмоток двигуна зіркою «Y»,», при якому той же двигун може працювати, але з меншим моментом на валу.

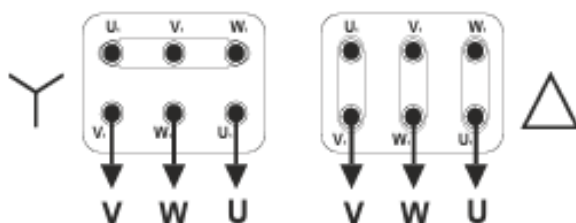


Рис. 9.5 – Варіанти підключення обмоток двигуна

При живленні трифазного асинхронного двигуна від ПЧ втрати в двигуні менше, ніж при живленні від мережі. В залежності від встановленого часу розгону, пусковий струм, що споживається електроприводом з мережі, може не перевищувати номінального струму, чи перевищувати його лише у 1,5 - 2 рази. При прямому пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором пусковий струм більше номінального в 5-7 разів, що негативно відбивається на мережі та її споживачах. 2.

Під час тривалої роботи стандартного асинхронного двигуна на низькій швидкості з номінальним моментом можливий його перегрів через зменшення обдування власним вентилятором.

Стандартний асинхронний двигун може тривало забезпечити номінальний момент тільки на номінальній частоті обертання, тому при зниженні швидкості обертання необхідно зменшувати середнє навантаження на вал двигуна.

Для довготривалого досягнення великих моментів при низьких швидкостях обертання слід використовувати спеціальні двигуни з незалежним від швидкості обертання охолодженням, або двигуни підвищеної потужності. При використанні стандартного двигуна на частотах вище номіналу слід враховувати обмеження, які пов'язані з ресурсом підшипників, підвищеною вібрацією від залишкового дисбалансу ротора, а також зменшення моменту порівняно з номінальним.

Гарантується нормальна робота перетворювача при струмі навантаження 150% від номінального, протягом не менше 1 хвилини.



Рис. 9.6 – Зовнішній вигляд панелі керування

Панель керування (рис. 9.6) ПЧ має дві функціональні частини: цифровий LED дисплей та кнопки керування режимами роботи привода. Цифровий дисплей розділений на три зони:

- індикатори перевантаження (червоні світлодіоди з маркуванням) – зверху;
- цифрове табло для відображення параметрів ПЧ – всередині;
- індикатори стану ПЧ (жовті світлодіоди) – знизу;

Нижні жовті індикатори відображають стан перетворювача (зліва-направо):

- постійне світіння - обертання двигуна (незалежно від напрямку),
- миготіння з низькою частотою - двигун обертається, при цьому йде розгін чи гальмування. миготіння з високою частотою - на двигун подана напруга та виконуються допоміжні процедури.
- напрямок обертання (незалежно від того, обертається чи ні);
- робота ПЧ в режимі налаштування (сервісному меню);
- автоматичне чи ручне керування.



Рис. 9.7 – Робоче меню перетворювача

Крім керування кнопками з передньої панелі, в ПЧ передбачено дистанційне керування роботою двигуна за допомогою терміналів зовнішнього керування (рис. 9.8). Термінали підтримують роботу з дискретними та аналоговими вхідними сигналами. Цифрові входи можуть бути підключені до зовнішніх кнопок, перемикачів, датчиків та інших комутаційних елементів з виходами типу «NPN» або «PNP». Режим роботи входу обирається відповідним DIP-перемикачем (рис. 9.4).

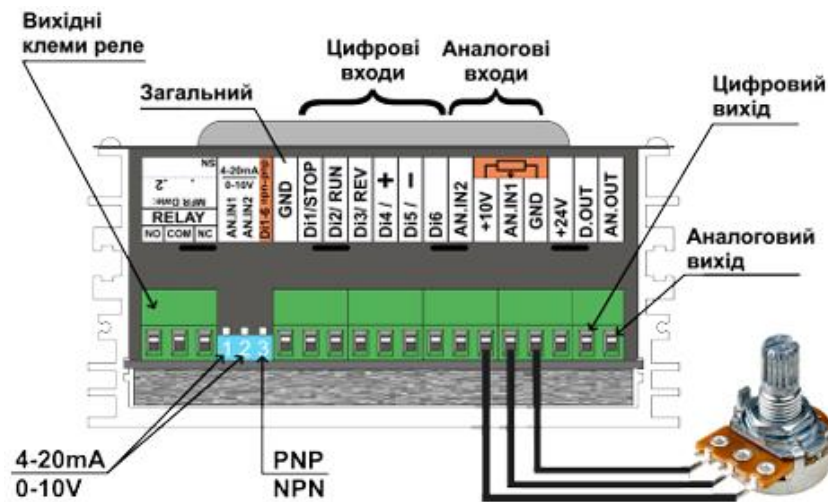


Рис. 9.8 – Клеми(термінали) дистанційного керування перетворювачем

Аналогові входи призначені для керування частотою обертання двигуна, а також для введення завдання та сигналу зворотного зв'язку для вбудованого в перетворювач ПД-регулятора. Для керування частотою за допомогою змінного резистора (потенціометра) необхідно його підключити до клем «+10V», «AN.IN1» та «GND» (» (рис. 9.8). Номінал змінного резистора має бути в межах від 1 до 47 кОм (типове значення – 4.7 кОм), бажано з лінійною (А) характеристикою опору. Після підключення потенціометра до клем необхідно налаштувати ПЧ на роботу з першим аналоговим входом в пункті меню 3-02 = 1. Якщо необхідна робота з аналоговими сигналами 0(4)...20mA - слід виконати активацію даного режиму входу D» (IP-перемикачем (рис. 9.4) та відповідним пунктом меню.

Навантаження АД здійснюється електромагнітним гальмом (ЕМГ) YB, обмотка збудження якого F1-F2 підключається до мережі через автоматичний вимикач QF і регульовальний реостат R, а сила струму контролюється по амперметру PA. Момент обертання двигуна M вимірюється за допомогою стрілочного показчика PM на електромагнітному гальмі.

Частота обертання n_s поля, лінійні струм I і напруга U статора двигуна вимірюються на дисплеї перетворювача. Активна потужність, що поступає в

двигун, вимірюється системою з двох ватметрів PW_1 і PW_2 : відповідно потужності PW_1 і PW_2 .

Частота обертання ротора АД визначається за допомогою спеціального пристрою – індикатора частоти обертання BR , що складається із зубчатого диска, укріпленого на валу двигуна, і фотодіода, імпульси від якого поступають на цифровий тахометр. З відлікового приладу PF на тахометрі безпосередньо і знімаються значення частоти обертання n .

9.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з порядком виконання практичного завдання;
4. Відповісти на контрольні питання.
5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.
6. Зробити висновок про виконану роботу.

9.5. Контрольні питання

1. Яке призначення перетворювача частоти в системі електропривода?
2. Які основні вузли входять до складу експериментальної установки?
3. Для чого використовується електромагнітне гальмо в установці?
4. Як визначається момент на валу асинхронного двигуна?
5. Яким чином вимірюється частота обертання ротора в даній установці?
6. Які параметри знімаються під час побудови робочих характеристик асинхронного двигуна?
7. Які параметри знімаються під час побудови регулювальних характеристик двигуна?

8. Чим відрізняється механічна характеристика двигуна від робочої моментної характеристики?
9. Що таке ковзання асинхронного двигуна і як воно визначається?
10. Як впливає частота живильної напруги на швидкість обертання асинхронного двигуна?
11. Як впливає частота живильної напруги на коефіцієнт потужності двигуна?
12. Чому при прямому пуску асинхронного двигуна пускові струми значно перевищують номінальні?
13. Які переваги використання перетворювача частоти порівняно з прямим пуском двигуна від мережі?
14. Чому стандартний асинхронний двигун може перегріватися при тривалій роботі на низьких швидкостях?

ПРАКТИЧНА РОБОТА №10

Тема: Розрахунок системи ПЧ-АД.

Мета: засвоїти методику розрахунку основних параметрів електропривода при частотному регулюванні, визначити вплив зміни частоти та напруги живлення на електромеханічні характеристики асинхронного двигуна, а також навчитися аналізувати пускові, робочі та гальмівні режими системи частотно-регульованого електропривода.

10.1. Теоретичні відомості

Найбільш ефективним і водночас найпоширенішим способом регулювання швидкості асинхронних двигунів (АД) на сучасному етапі є частотний метод. Його застосування дає змогу здійснювати плавне регулювання у широкому діапазоні швидкостей, забезпечуючи при цьому отримання характеристик з високою жорсткістю. Важливою перевагою цього способу є те, що під час зміни частоти живлення не відбувається збільшення ковзання двигуна, на відміну від, наприклад, реостатного регулювання, де таке явище неминуче. Це дозволяє підвищити енергоефективність та зменшити теплові втрати, що особливо актуально для сучасних електроприводів.

Для реалізації частотного методу використовуються перетворювачі частоти (ПЧ), які дозволяють змінювати частоту живильної напруги, а отже, і швидкість обертання асинхронного двигуна. Розглянемо характеристики основних типів таких перетворювачів.

а) НПЧ – непрямий перетворювач частоти.

Непрямі перетворювачі частоти призначені для перетворення змінної напруги з високою частотою у напругу з низькою частотою. Конструктивно вони складаються з 18 тиристорів, об'єднаних у зустрічно-паралельні групи

(рис. 10.1). Основу схеми утворює трифазна нульова схема випрямлення. Кожна фаза містить по два випрямлячі, з'єднані зустрічно.

НПЧ можуть виконуватися з роздільним або спільним керуванням вентильними групами.

- При роздільному керуванні керуючі імпульси подаються лише на тиристори однієї з вентильних груп, залежно від напрямку струму в навантаженні. Для реалізації такої роботи застосовується спеціальний логічний пристрій, який виключає можливість одночасного проходження струму через обидві групи. Це забезпечує надійність роботи та мінімізує ризик коротких замикань.

- У перетворювачах зі спільним керуванням обидві вентильні групи можуть одночасно брати участь у процесі перетворення. Для цього необхідне введення додаткових реакторів, які обмежують зрівняльні струми між паралельними вентилями. Кути керування тиристорів позитивної та негативної груп змінюються за визначеним законом, що дозволяє уникнути появи постійної складової у струмі навантаження. Завдяки цьому підвищується якість вихідної напруги та забезпечується стабільність роботи двигуна.

Перетворювачі частоти зі спільним керуванням вентильними групами, як правило, мають значно більшу потужність силових елементів, що дозволяє використовувати їх у потужних електроприводах промислових механізмів.

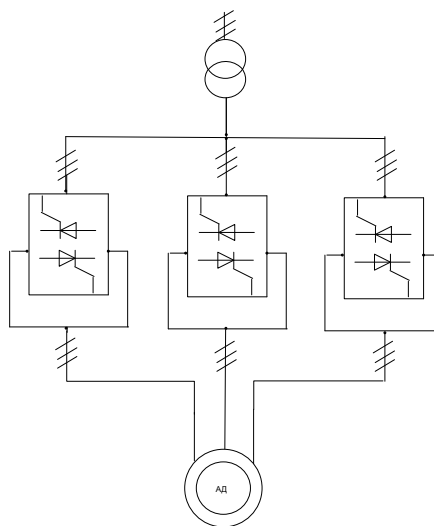


Рис. 10.1 – ПЧ с безпосереднім зв'язком

Для того щоб отримати вихідну напругу, форма якої була б максимально наближеною до синусоїдальної, необхідно здійснювати керування вентилями таким чином, щоб середнє значення напруги за кожний напівперіод мережі змінювалося відповідно до синусоїдального закону протягом напівперіоду вихідної напруги. Іншими словами, процес комутації вентилів повинен бути синхронізований із законом зміни синусоїдальної величини, що дозволяє мінімізувати гармонійні спотворення та покращити якість живлення електродвигуна.

Регулювання як частоти, так і амплітуди вихідної напруги в подібних перетворювачах здійснюється шляхом зміни кута включення вентилів (рис. 10.2). Таким способом досягається можливість гнучкого керування швидкістю обертання асинхронного двигуна, забезпечується плавність пуску, а також створюються умови для оптимального енергоспоживання.

Завдяки такому принципу роботи перетворювач здатний формувати керовану вихідну напругу з необхідними параметрами, що робить його придатним для широкого застосування в системах електропривода різного призначення – від побутових пристроїв до потужних промислових агрегатів.

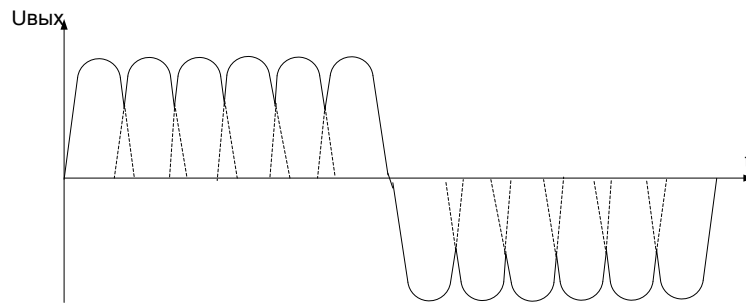


Рис. 10.2 – Графік вихідної напруги НП

До переваг даного типу перетворювачів можна віднести такі властивості:

- одноразове перетворення електричної енергії, що забезпечує високий коефіцієнт корисної дії (приблизно 0,97–0,98);
- можливість незалежного регулювання амплітуди вихідної напруги від її частоти, що дає ширші можливості для керування електроприводом;
- здатність здійснювати двосторонній обмін активною та реактивною енергією між мережею та двигуном;
- відсутність необхідності в комутуючих конденсаторах, оскільки комутація тиристорів виконується природним способом - за рахунок напруги мережі.

Недоліками таких перетворювачів є:

- обмежений діапазон регулювання вихідної частоти (приблизно від 0 до 40 % номінальної частоти мережі), що зменшує гнучкість їх застосування;
- велика кількість силових вентилів та складність системи їх керування;
- порівняно невисокий коефіцієнт потужності, який на вході перетворювача не перевищує значення 0,8.

б) Перетворювачі з ланкою постійного струму.

Найбільшого поширення в сучасних частотно-регульованих електроприводах набули перетворювачі, що мають чітко виражену проміжну

ланку постійного струму. Принципова схема одного з таких пристроїв наведена на рисунку 10.3.

Робота перетворювача цього типу ґрунтується на подвійному перетворенні електричної енергії:

1. На першому етапі вхідна синусоїдальна напруга з постійною амплітудою та частотою випрямляється у випрямлячі (УВ).
2. Далі отримана напруга згладжується за допомогою фільтра (С) та перетворюється на постійну.
3. На заключному етапі інвертор (Та) знову перетворює цю постійну напругу у змінну, але вже з регульованими частотою та амплітудою.

Через подвійне перетворення енергії у таких пристроях спостерігається деяке зниження коефіцієнта корисної дії та погіршення масогабаритних характеристик у порівнянні з перетворювачами з безпосереднім зв'язком.

Водночас, перетворювачі з проміжною ланкою постійного струму мають суттєві переваги:

- можливість регулювання частоти як у бік зменшення, так і у бік збільшення відносно частоти живильної мережі;
- досить високий коефіцієнт корисної дії (близько 0,96);
- значна швидкодія, що забезпечує оперативне реагування системи на зміну параметрів;
- відносно компактні габарити та підвищена надійність у роботі.

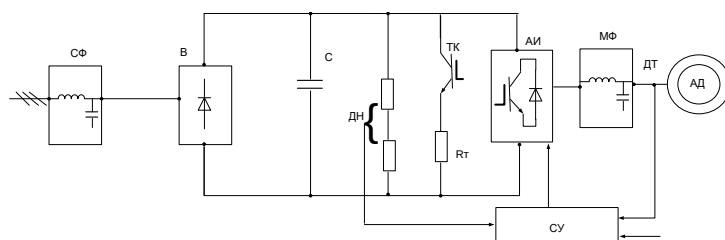


Рис. 10.3 – Принципова схема ПЧ з ланкою постійного струму: СФ - мережний фільтр для відсікання вищих гармонік; В - випрямляч, зазвичай не регульований (ПЧ першого покоління) для регулювання напруги в ланці постійного струму; ДН і ДТ - датчики напруги і струму; ТК - гальмуйний ключ;

АІ - автономний інвертор, зазвичай ШІМ (рис. 10.4); МТ - мотор-фільтр, зменшення вищих гармонік на двигун; СК - система керування.

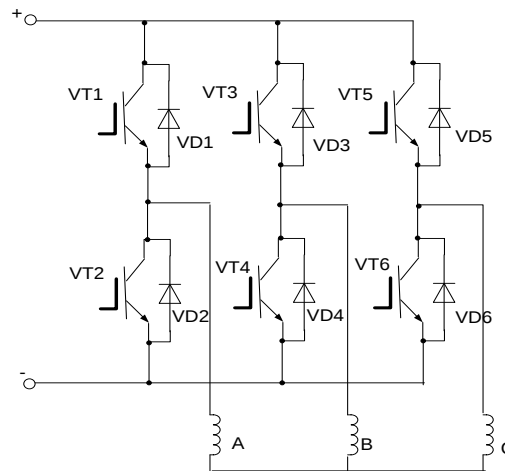


Рис. 10.4 – Принципіальна схема силової АІ

Як силові ключі в автономних інверторах (АІ) можуть застосовуватися GTO-тиристири або IGBT-транзистори. У даній курсовій роботі розглядається схема на базі IGBT-транзисторів, що зумовлено низкою причин.

Тиристор належить до напівкерованих приладів: для його ввімкнення достатньо подати короткий імпульс на керуючий електрод, однак для вимкнення необхідно або прикласти до нього зворотну напругу, або знизити комутований струм до нуля. Через це в тиристорних перетворювачах частоти потрібна складна та громіздка система керування, що ускладнює практичну реалізацію та знижує ефективність.

На відміну від тиристорів, IGBT-транзистори (біполярні транзистори з ізолюваним затвором) є повністю керованими приладами. Вони відзначаються простою системою керування, яка не потребує значних енергетичних витрат, а також здатністю працювати на значно вищих частотах. Завдяки цьому перетворювачі частоти на базі IGBT дозволяють розширити діапазон регулювання швидкості обертання двигуна та підвищити динамічні показники електроприводу.

Крім того, використання IGBT із високою частотою комутації у поєднанні з мікропроцесорною системою керування сприяє зниженню рівня вищих гармонік, характерних для тиристорних схем. Це дає низку позитивних ефектів:

- зменшення додаткових втрат у обмотках та магнітопроводі електродвигуна;
- зниження нагріву машини та підвищення її надійності;
- зменшення пульсацій електромагнітного моменту та усунення ефекту так званого «крокування» ротора на низьких частотах;
- зниження втрат у трансформаторах, батареях конденсаторів та збільшення строку їхньої служби;
- підвищення стійкості ізоляції проводів;
- зменшення кількості помилкових спрацювань захисних пристроїв та похибок індукційних вимірювальних приладів.

Зміна частоти вихідної напруги, що подається на двигун, досягається шляхом регулювання періоду подачі керуючих імпульсів на силові ключі інвертора (рис. 10.4).

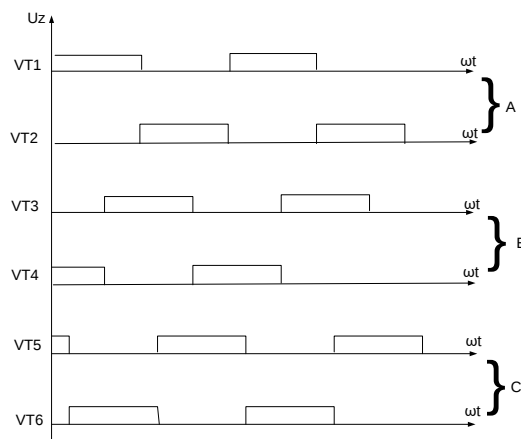


Рис. 10.4 – Алгоритм подачі імпульсів на транзистори

За такого алгоритму керування в кожен момент часу одночасно задіяні три силові ключі (VT1, VT4, VT6). Для нормальної роботи асинхронного двигуна

необхідно одночасно зі зміною частоти живлення здійснювати і зміну напруги. Це можна реалізувати двома способами: регулюванням напруги у ланці постійного струму або застосуванням широтно-імпульсної модуляції (ШІМ).

При виборі співвідношення між частотою та напругою зазвичай виходять із умови забезпечення перевантажувальної здатності електропривода, що дозволяє двигуну працювати стабільно при змінних навантаженнях.

Вибір конкретного типу перетворювача частоти здійснюється з урахуванням таких умов:

$$I_{вих.пч} \geq I_{1н}, \quad (10.1)$$

$$U_{вих.пч} \geq U_{1н}, \quad (10.2)$$

10.2. Завдання

Ознайомитися з теоретичними відомостями про принципи роботи перетворювачів частоти (ПЧ) та методи частотного регулювання асинхронного двигуна.

Для заданого варіанту відповідно до таблиці індивідуальних даних визначити номінальні параметри асинхронного двигуна: номінальну потужність, напругу, частоту живлення, кількість пар полюсів, магнітний опір, момент інерції, тип технологічного навантаження.

Розрахувати номінальну та синхронну частоту обертання, ковзання двигуна при номінальному режимі, критичне ковзання та критичний момент, струм намагнічування, приведений струм ротора, а також активні та реактивні опори статора і ротора.

Виконати розрахунок механічних і енергетичних характеристик асинхронного двигуна при частотному регулюванні, визначити зміну струмів статора, ротора та магнітного потоку при різних значеннях частоти живлення.

Побудувати графіки залежності струмів статора, ротора та струму намагнічування від частоти живлення, механічні характеристики двигуна при різних частотах, а також навантажувальну характеристику системи ПЧ–АД.

За результатами розрахунків провести аналіз отриманих характеристик і зробити висновки щодо впливу частоти живлення на електромеханічні параметри асинхронного двигуна та ефективність його роботи.

10.3. Приклад розрахунку практичного завдання

Аналіз характеристик АД при частотному управлінні можна зробити, використавши Т-подібну схему заміщення (рис. 10.5).

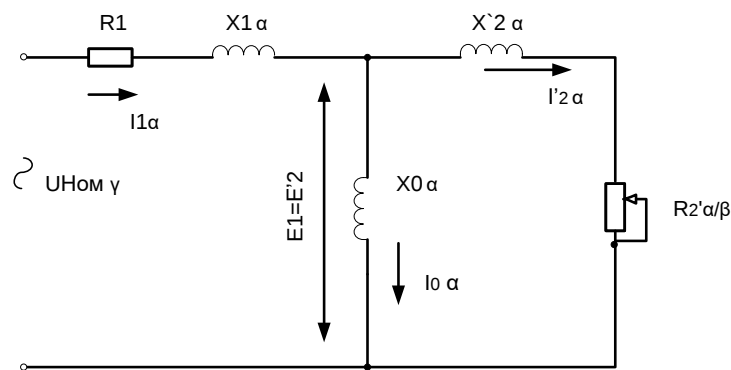


Рис. 10.5 – Схема заміщення асинхронного двигуна при частотному регулюванні

Швидкість обертання на ХХ:

$$n_0 = \frac{60 \cdot f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв}, \quad (10.3)$$

де $p=2$ - кількість пар полюсів.

Частота обертання на ХХ:

$$\omega_0 = \frac{\pi n_0}{30} = \frac{\pi \cdot 1500}{30} = 157 \text{ с}^{-1}, \quad (10.4)$$

Номінальна частота обертання:

$$\omega_H = \frac{\pi n_{ном}}{30} = \frac{\pi \cdot 1480}{30} = 154 \text{ с}^{-1}, \quad (10.5)$$

Номінальне ковзання:

$$S_H = \frac{\omega_0 - \omega_H}{\omega_0} = 0,013, \quad (10.6)$$

Рівняння для критичного ковзання:

$$\frac{S_k}{S_i} = \lambda_i + \sqrt{\lambda_i^2 - 1} = 1,9 + \sqrt{2,3^2 - 1} = 0,058, \quad (10.7)$$

де λ_m - кратність максимального моменту, $\lambda_m = 2,3$.

$$S_k = 3,52 \cdot S_H = 0,186, \quad (10.8)$$

Струм намагнічування $I_{\mu H}$:

$$I_{\mu} := I_1 n \left[\sin \phi_n - \left(\frac{\cos \phi_n}{\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}} \right) \right], \quad (10.9)$$

$$I_{\mu} = 23,36 \text{ A}$$

Приведенный струм ротора:

$$I_2 = I_1 \cdot \left(\cos \varphi \cdot \sqrt{\frac{2 \cdot \lambda_m}{\lambda_m + \sqrt{\lambda_m^2 - 1}}} \right), \quad (10.10)$$

$$I_2 = 65,72 \text{ A}$$

Опір статора:

$$R_1 = \frac{3 \cdot \left(\frac{U}{\sqrt{3}} \right)^2 \cdot (1 - S_H)}{2 \cdot c_1 \cdot (P_H + \Delta P_{\text{мех}}) \cdot \lambda_m \cdot \left(1 + \frac{c_1}{S_{kr}} \right)}, \quad (10.11)$$

$$R_1 = 1,23 \text{ Ом}$$

де $c_1 = 1 + (I_0 / 2 \cdot k_i \cdot I_{1H})$; кратність пускового струму - $k_i = I_n / I_H$ в.о.

Приведенный опір ротора:

$$R_2 = \frac{\lambda_{\text{max}} \cdot (P_H + \Delta P_{\text{мех}})}{3 \cdot (1 - S_H) \cdot k_i^2 \cdot I_1^2}, \quad (10.12)$$

$$R_2 = 1,379 \text{ Ом}$$

Індуктивний опір контуру намагнічування:

$$X_\mu = \frac{U_{ном}}{\sqrt{3} \cdot I_{\mu_ном}}, \quad (10.13)$$

$$X_\mu = 143 \text{ Ом}$$

Індуктивне опір ротора:

З допомогою критичного ковзання знайдемо X_k :

$$X_k = \sqrt{\frac{R_2'^2}{S_k^2} - R_1^2}, \quad (10.14)$$

$$X_k = 23,62 \text{ Ом}$$

Реактивне опір статора:

$$X_1 = \frac{X_k}{2 \cdot c_1}, \quad (10.15)$$

$$X_1 = 11,35 \text{ Ом}$$

Реактивне опір ротора;

$$X_2 = X_1 \cdot c_1, \quad (10.16)$$

$$X_2 = 11,81 \text{ Ом}$$

Номінальний момент АД:

$$M_H := \frac{P_H}{\omega_H}, \quad (10.17)$$

$$M_H = 4065 \text{ Нм}$$

Критичний момент:

$$M_k := 3 \cdot \frac{U_{1n}^2}{2 \cdot \omega_0 \cdot (R_1 + \sqrt{R_1^2 + Z_{k1}^2})}, \quad (10.18)$$

$$M_{кр} = 4810 \cdot 10^3 \text{ Нм}$$

На підставі отриманих результатів проводимо розрахунок статичних і енергетичних характеристик.

Закон частотного керування, який визначає співвідношення між частотою і напругою в залежності від характеру технологічного навантаження: $\gamma = \alpha \cdot \sqrt{m}$.

$$\gamma = \frac{U_1}{U_n} - \text{відносне напруга};$$

$$\alpha = \frac{f_1}{f_n} - \text{відносна частота};$$

$$m = \frac{M_c(\omega_1)}{M_c(\omega_2)} - \text{відносний момент};$$

Для приводів з насосною навантаженням $\frac{U}{f^2} = \text{const}$: $m = \alpha^2$, тоді закон частотного керування буде мати вигляд:

Прийнятими допущеннями обумовлюється сталість опорів схеми заміщення при даній частоті. Індуктивні опору відповідають частоті ХХ.

Параметр абсолютного ковзання, або відносна частота ротора - відношення абсолютного ковзання до синхронної швидкості при номінальній частоті.

$$\beta = \Delta\omega / \omega_{1H} = (\omega_1 - \omega) / \omega_{1H} = f_2 / f_{1H}, \quad (10.19)$$

Параметр використовується замість ковзання s і пов'язаний з ним співвідношенням:

$$s = \Delta\omega / \omega_1 = f_2 \cdot f_{1H} / f_1 \cdot f_{1H} = \beta / \alpha, \quad (10.20)$$

Коефіцієнт розсіювання відповідно для статора і ротора:

$$\tau_1 = \frac{X_1}{X_\mu}, \quad \tau_2 = \frac{X'_2}{X_\mu}, \quad (10.21)$$

Загальний коефіцієнт розсіювання

$$\tau = \tau_1 + \tau_2 + \tau_1\tau_2, \quad (10.22)$$

Крім того, введемо позначення:

$$b = R_1 \cdot (1 + \tau_2); c = X_\mu \cdot \tau; d = R_1 / X_\mu; e = 1 + \tau_1, \quad (10.23)$$

Аналіз і розрахунки усталеного режиму проводяться в діючих значеннях величин.

Для подальших розрахунків приймемо позначення:

$$A(\alpha, \beta) = (b^2 + c^2 \cdot \alpha^2) \cdot \beta^2 + 2 \cdot R_1 \cdot R_2' \cdot \alpha \cdot \beta + (d^2 + e^2 \cdot \alpha^2) \cdot (R_2')^2, \quad (10.24)$$

$$B(\beta) = (R_2')^2 + (X_2')^2 \cdot \beta^2, \quad (10.25)$$

$$C(\beta) = (R_2')^2 / X_0^2 + (1 + \tau_2)^2 \cdot \beta^2, \quad (10.26)$$

$$D(\beta) = (R_2')^2 / X_0^2 + \tau_2^2 \cdot \beta^2, \quad (10.27)$$

Для кожної з розрахованих величин задаються кілька значень α і змінна $\beta = 0 \dots \alpha_i$.

З розрахунку схеми заміщення отримуємо електрорушійну силу.

$$E_{1\alpha} = E_{2\alpha}' = U_H \cdot \gamma \cdot \alpha \cdot \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}, \quad (10.28)$$

Потік у повітряному зазорі

$$\Phi_\alpha = \frac{U_H}{C_1 \cdot f_{1H}} \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{B(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}, \quad (10.29)$$

Струм статора

$$I_{1\alpha} = U_H \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{C(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}, \quad (10.30)$$

Приведений струм ротора

$$I_{2\alpha}' = U_H \cdot \gamma \cdot \frac{\beta}{\sqrt{A(\alpha, \beta)}}, \quad (10.31)$$

Струм намагнічування

$$I_{\mu\alpha} = U_H \cdot \gamma \cdot \sqrt{\frac{D(\beta)}{A(\alpha, \beta)}}, \quad (10.32)$$

Графіки струмів показані на рисунках 10.6 - 10.8.

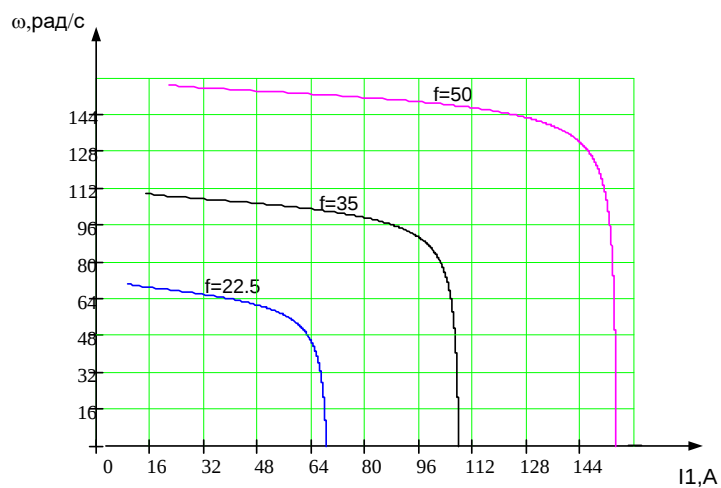


Рис. 10.6 – Графік зміни струмів статора при частотному регулюванні

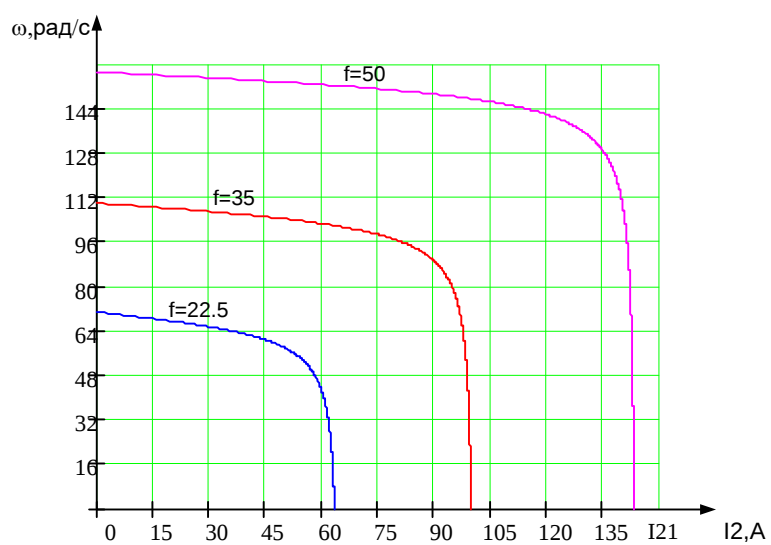


Рис. 10.7 – Графік зміни струмів ротора при частотному регулюванні.

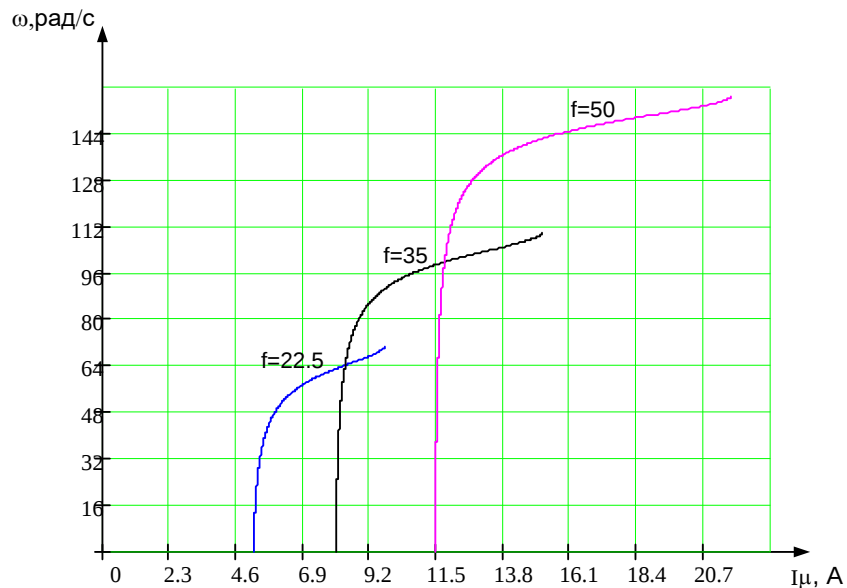


Рис. 10.8 – Графік зміни струмів намагнічування

Розрахунок механічних характеристик і навантажувальні характеристики виконується наступним чином:

Момент двигуна :

$$M_{\alpha} = \frac{m_1 \cdot U_H^2}{\omega_{1H}} \cdot \gamma^2 \cdot \frac{R_2' \cdot \beta}{A(\alpha, \beta)}, \quad (10.33)$$

Навантажувальна характеристика визначається з виразів статичного моменту і кутової швидкості:

$$M_c = M_n \cdot (1-S)^2, \quad (10.34)$$

$$\omega = \omega_0 \cdot (1-S), \quad (10.35)$$

При цьому S змінюється від 0 до 1.

Механічні характеристики і навантажувальна крива, при частотному регулюванні, зображені на рис. 10.9.

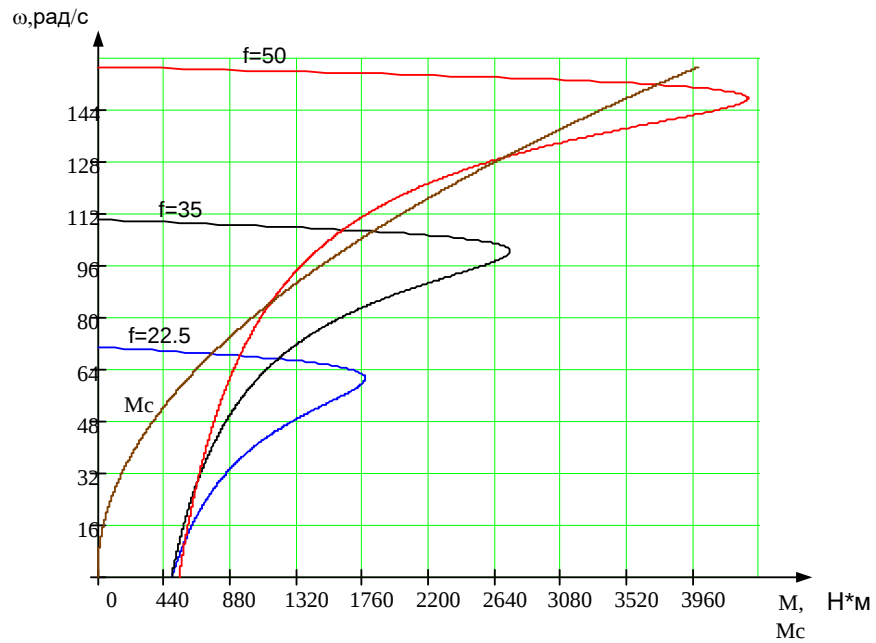


Рис. 10.9 – Механічні і навантажувальні характеристики

10.4. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитися з короткими теоретичними відомостями практичної роботи;
2. Ознайомитися з прикладом виконання практичного завдання;
3. Виконати розрахунок за даними у відповідності з варіантом (див. табл. 10.1);
4. Відповісти на контрольні питання.
5. Оформити звіт відповідно до вимог захисту та виконання практичних робіт.
6. Зробити висновок про виконану роботу.

10.5. Контрольні питання

1. У чому полягає принцип частотного регулювання швидкості асинхронного двигуна?

2. Які типи перетворювачів частоти застосовуються в сучасних електроприводах?
3. Яка різниця між перетворювачем з безпосереднім зв'язком і перетворювачем із ланкою постійного струму?
4. Що таке ковзання асинхронного двигуна і як воно впливає на частоту обертання ротора?
5. Як визначається критичне ковзання та критичний момент асинхронного двигуна?
6. Яким чином змінюється струм статора і ротора при зміні частоти живлення?
7. Які параметри електродвигуна залишаються сталими при частотному регулюванні?
8. Як впливає зміна частоти на магнітний потік у повітряному зазорі машини?
9. Чому при зниженні частоти необхідно одночасно зменшувати і напругу живлення?
10. У чому полягає принцип широтно-імпульсної модуляції (ШІМ) у ПЧ на базі IGBT-транзисторів?
11. Які переваги мають IGBT-транзистори порівняно з тиристорами в перетворювачах частоти?
12. Як формується механічна характеристика асинхронного двигуна при частотному регулюванні?
13. Як визначаються пускові та гальмівні режими електропривода з ПЧ?
14. У яких випадках застосовується закон керування " $U/f = \text{const}$ "?
15. Які фактори впливають на енергетичну ефективність системи ПЧ–АД?
16. Як змінюються струми намагнічування при зміні частоти живлення?
17. Чому частотне регулювання вважається найефективнішим способом керування електроприводом?

18. Які висновки можна зробити за результатами розрахунків механічних та енергетичних характеристик системи ПЧ–АД?

Таблиця 10.1 - Вихідні дані для виконання практичної роботи №10

№	P_n , кВт	U_n , В	f , Гц	p	X_m , Ом	Тип навантаження	n_n , об/хв
1	3,0	400	50	2	40	Насос ($M \sim \omega^2$)	2910
2	4,0	400	50	2	50	Вентилятор ($M \sim \omega^2$)	2910
3	5,5	400	50	2	85	Насос ($M \sim \omega^2$)	2910
4	7,5	400	50	2	95	Вентилятор ($M \sim \omega^2$)	2910
5	11,0	400	50	2	120	Компресор ($M \approx \text{const}$)	2910
6	15,0	400	50	4	140	Шліфувальний верстат ($M \approx \text{const}$)	1450
7	18,5	400	50	4	150	Зубчастий привід ($M \approx \text{const}$)	1450
8	22,0	400	50	4	160	Транспортер ($M \approx \text{const}$)	1450
9	25,0	400	50	4	175	Насос (великий)	1450
10	30,0	400	50	4	200	Насос (великий)	1450

№	P _н , кВт	U _л , В	f, Гц	p	X _м , Ом	Тип навантаження	n _н , об/хв
11	37,0	400	50	4	220	Компресор	1450
12	45,0	400	50	4	250	Прес/станок (M≈const)	1450
13	55,0	400	50	4	300	Прес/станок (M≈const)	1450
14	60,0	400	50	4	320	Редукторний привід	1450
15	75,0	400	50	4	380	Пилосос промисловий	1450
16	90,0	400	50	4	420	Кран/привід (імпульсні навантаж.)	1450
17	7,0	400	50	2	100	Відцентровий вентилятор	2910
18	9,2	400	50	2	110	Повітродувка (M~ω ²)	2910
19	12,5	400	50	2	130	Вакуумний насос	2910
20	14,0	400	50	4	145	Змішувач (M≈const)	1450
21	16,0	400	50	4	155	Конвеєр (рівномірний)	1450
22	20,0	400	50	4	170	Дробарка (імпульсне)	1450

№	P _н , кВт	U _л , В	f, Гц	p	X _м , Ом	Тип навантаження	n _н , об/хв
23	28,0	400	50	4	190	Екструдер (M≈const)	1450
24	35,0	400	50	4	210	Компресор високого тиску	1450
25	42,0	400	50	4	235	Ремінний привід (M≈const)	1450
26	50,0	400	50	4	270	Прес важкий	1450
27	65,0	400	50	4	330	Вальцювальний стан	1450
28	80,0	400	50	4	360	Кран-стріла (імпульс.)	1450
29	100,0	400	50	4	420	Гірничий привід	1450
30	120,0	400	50	4	480	Валковий млин	1450

ПРАКТИЧНА РОБОТА №11

Тема: Дослідження схем нереверсивного та реверсивного керування асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором

Мета роботи: є вивчення принципів побудови, дії та практичне ознайомлення зі схемами нереверсивного і реверсивного керування асинхронним електродвигуном з короткозамкненим ротором.

11.1. Теоретична частина

В умовах сучасного промислового виробництва підвищення ефективності та надійності електроприводів є одним із ключових напрямів технічного прогресу. Асинхронні електродвигуни займають провідне місце у промисловості, оскільки вони відзначаються простотою конструкції, високою надійністю та економічністю. Для забезпечення ефективного та безпечного використання таких двигунів необхідно глибоко розуміти принципи їх керування, пуску, зупинки та реверсування.

Вивчення схем нереверсивного та реверсивного керування асинхронними двигунами дозволяє студентам оволодіти не лише теоретичними знаннями, а й практичними навичками роботи з електричними колами, апаратами захисту та автоматизації. Це особливо актуально у контексті сучасних систем автоматизації, де правильне проектування та налаштування електроприводів є запорукою стабільної та безпечної роботи технологічного обладнання.

Таким чином, тема дослідження є актуальною, оскільки формує у майбутніх інженерів комплексне розуміння принципів керування електроприводами та готує їх до професійної діяльності у сфері енергетики та автоматизації.

Під час виконання роботи розглядаються основні елементи кола керування: магнітні пускачі, теплові реле, кнопкові пости, блокувальні контакти, а також порядок їх взаємодії при пуску, зупинці та зміні напрямку обертання двигуна.

Асинхронні електродвигуни з короткозамкненим ротором невеликої потужності зазвичай запускаються прямим підключенням до електричної мережі на номінальну напругу (прямий пуск).

На рис. 11. 1 представлена схема нереверсивного керування двигуном з нульовою блокіровкою за допомогою електромагнітного пускача. При натисканні кнопки SB2 «Пуск» замкнеться коло котушки пускача КМ, в результаті чого пускач спрацює і головними контактами підключить двигун до мережі. Замикаючий допоміжний контакт шунтує кнопку SB2, тому після її відпускання котушка пускача залишатиметься увімкненою через цей контакт. Вимикання двигуна відбувається при натисканні кнопки SB1 «Стоп» або при спрацюванні теплового реле КК. У будь-якому випадку коло живлення котушки КМ розмикається, пускач повертається у вихідне положення і відключає двигун від мережі. Захист силових кіл від коротких замикань забезпечує автоматичний вимикач QF1, а кола керування - QF2.

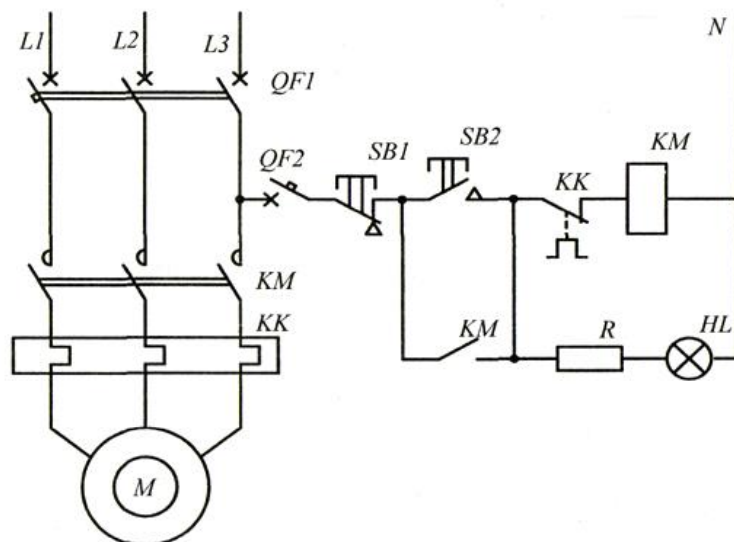


Рис. 11. 1 – Схема нереверсивного керування асинхронним електродвигуном

Якщо потрібно організувати керування двигуном з кількох місць, усі замикаючі контакти командних апаратів підключаються паралельно, а розмикаючі - послідовно.

Для забезпечення реверсивного керування асинхронним двигуном використовують або два нереверсивні пускачі, або один спеціальний реверсивний пускач із двома контакторами. Схема реверсивного керування наведена на рис. 11.2.

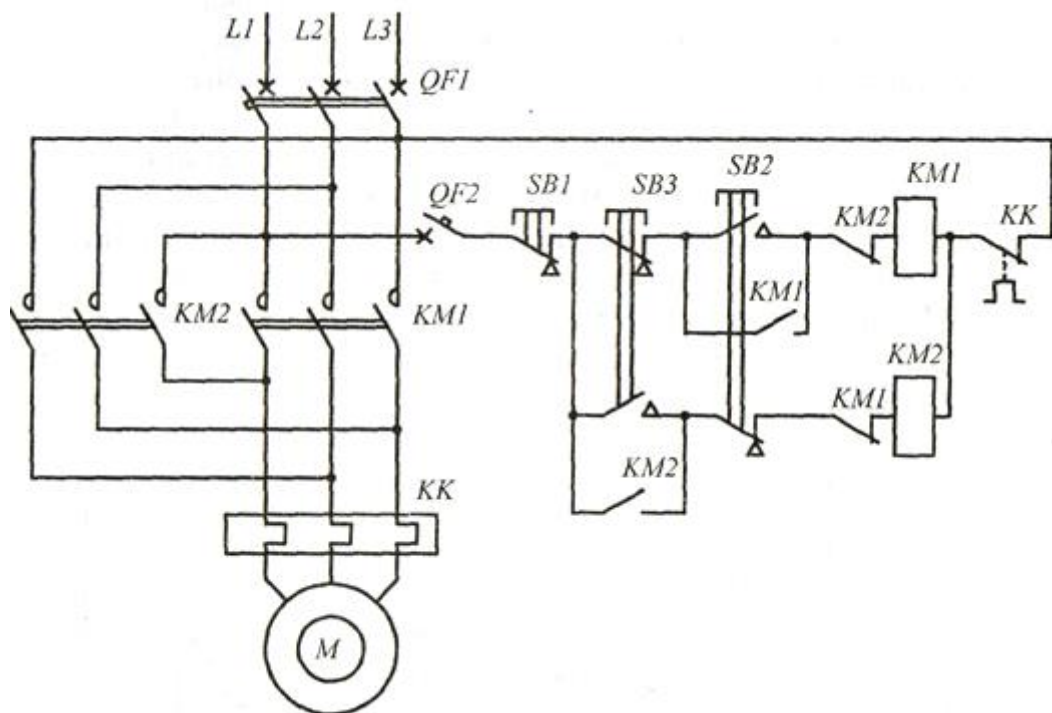


Рис. 11.2 – Схема реверсивного керування асинхронним електродвигуном

Для пуску двигуна в напрямку «Вперед» натискають кнопку SB2, при цьому спрацьовує контактор KM1. Зупинка двигуна здійснюється натисканням кнопки SB1 «Стоп». Для пуску в напрямку «Назад» використовують кнопку SB3, яка вмикає контактор KM2. Схема дозволяє реверсувати двигун «з ходу»: якщо двигун, наприклад, обертається «Назад», натискання кнопки SB2 призводить до вимкнення контактора KM2 і

одночасного включення КМ1. Двигун при цьому гальмується методом противмикання, а потім починає обертатися в заданому напрямку.

Схема реверсивного керування обов'язково включає блокіровки, що запобігають одночасному ввімкненню контакторів КМ1 і КМ2, уникаючи короткого замикання на головних контактах. Керування контакторами здійснюється кнопками SB2 і SB3, які мають як замикаючі, так і розмикаючі контакти (рис. 11.2). Якщо механічна блокіровка відсутня, у коло живлення котушок пускачів включають «чужі» розмикаючі допоміжні контакти: при спрацьовуванні одного контактора його розмикаючий допоміжний контакт розриває коло живлення котушки другого контактора.

11.2. Завдання

1. Ознайомитися з теоретичною частиною про особливості асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором, принципи їх пуску, зупинки та реверсування.

2. Вивчити схему нереверсивного керування асинхронним двигуном, визначити функцію основних елементів: магнітного пускача, теплового реле, кнопкового поста, блокувальних контактів.

3. Зібрати і перевірити роботу схеми нереверсивного пуску асинхронного двигуна:

- підключення силового ланцюга;
- підключення ланцюга керування;
- перевірка роботи кнопок «Пуск» і «Стоп»;
- перевірка дії теплового реле та автоматичних вимикачів.

4. Вивчити схему реверсивного керування асинхронним двигуном: визначити функції контактів кнопок SB1, SB2, SB3 та контакторів КМ1 і КМ2, принцип дії блокувальних елементів.

5. Зібрати і перевірити роботу схеми реверсивного пуску асинхронного двигуна:

- підключення силового та керуючого ланцюга;
- перевірка роботи пуску «Вперед» і «Назад»;
- перевірка роботи функції реверсу «з ходу»;
- контроль роботи блокувальних контактів для запобігання короткого замикання.

6. Порівняти роботу двигуна при нереверсивному та реверсивному керуванні, зробити висновки про особливості підключення та безпечної експлуатації.

7. Оформити звіт про виконану роботу, включивши схеми, опис алгоритму підключення та результати практичних перевірок.

Необхідне обладнання та матеріали:

- Асинхронний електродвигун з короткозамкненим ротором (до 5,5 кВт)
- Магнітний пускач ПМЛ;
- Теплове реле ТРН;
- Кнопковий пост (SB1, SB2, SB3);
- Автоматичні вимикачі QF1, QF2;
- Провід одножильний, інструменти (викрутка, бокорізи, плоскогубці, ніж);
- Трифазна вилка.

11.3. Порядок виконання практичного завдання

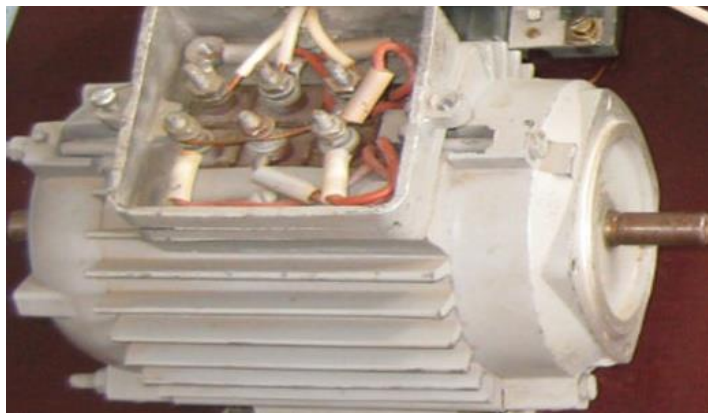
Завдання 1. Схема нереверсивного запуску асинхронного двигуна.

Схема нереверсивного керування асинхронним двигуном складається з кількох основних елементів, які забезпечують її функціонування та безпеку. До складу схеми входять сам асинхронний двигун із короткозамкненим ротором, магнітний пускач для включення та відключення двигуна, теплове

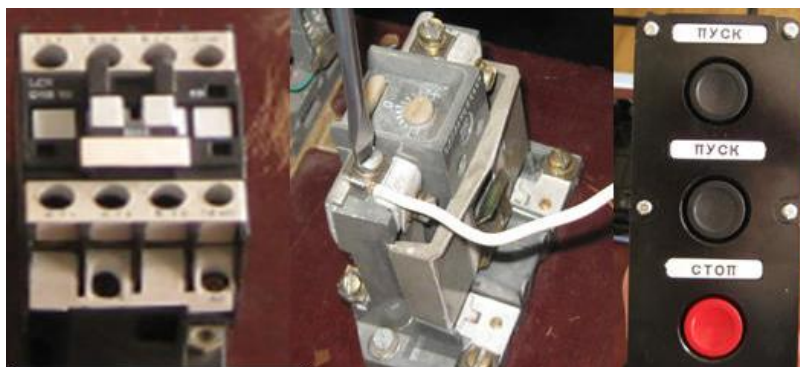
реле для захисту від перевантажень, а також кнопочний пост «Пуск/Стоп» для керування роботою двигуна. Крім того, схема містить допоміжні блокувальні контакти, автоматичні вимикачі для захисту силових і керуючих кіл та з'єднувальні провідники, що забезпечують правильну роботу та безпечну експлуатацію електроприводу.



Асинхронний двигун із короткозамкненим ротором загального призначення.



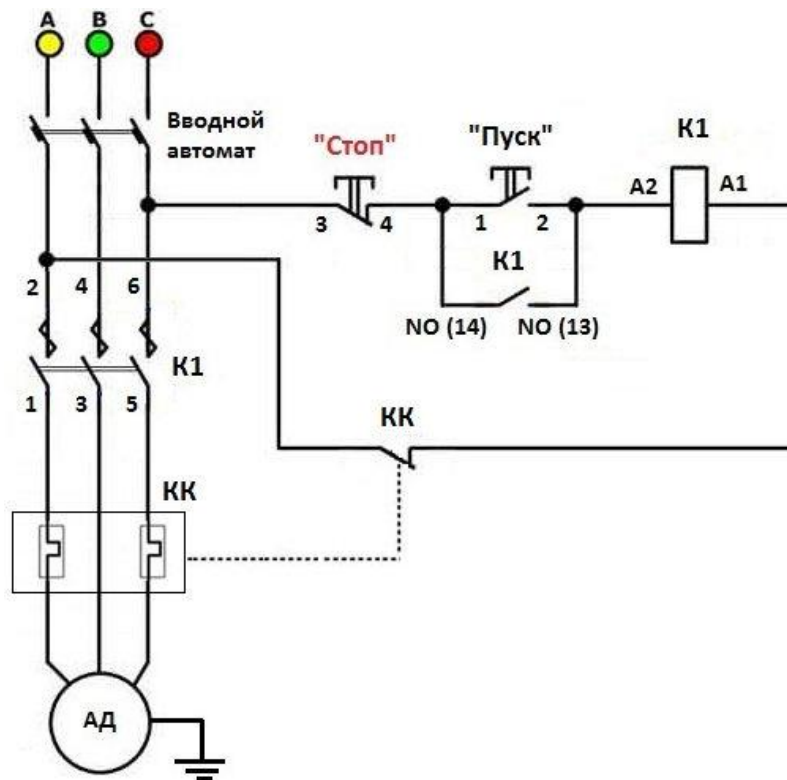
Магнітний пускач ПМЛ (для пуску, зупинки двигуна). Теплове реле ТРН (для захисту трифазних асинхронних двигунів із короткозамкненим ротором від перевантажень). Кнопка пуск/стоп.



Робочий інструмент: для виконання практичної роботи необхідно підготувати плоску викрутку, бокорізи, ніж, одножильний кабель (провід), круглогубці, плоскогубці та трифазну вилку.

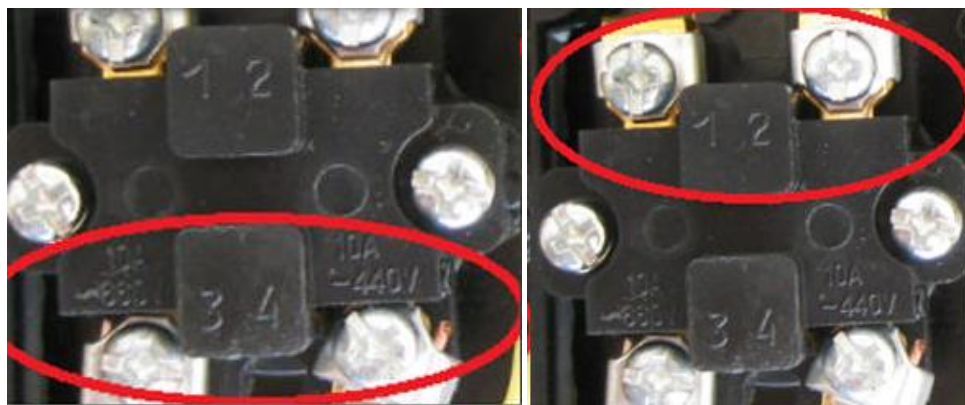


Схема нереверсивного пуску асинхронного двигуна із короткозамкненим ротором:



До початку роботи хотілося б пояснити прості поняття для розуміння схеми:

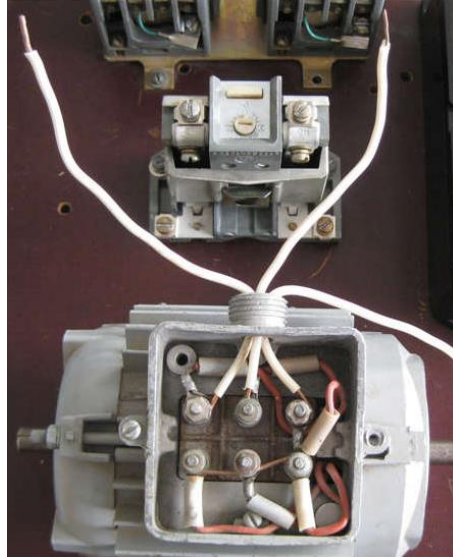
- нормально замкнутий контакт у кнопці пуск/стоп під цифрами (3-4)
- нормально розімкнений контакт у кнопці пуск/стоп під цифрами (1-2)



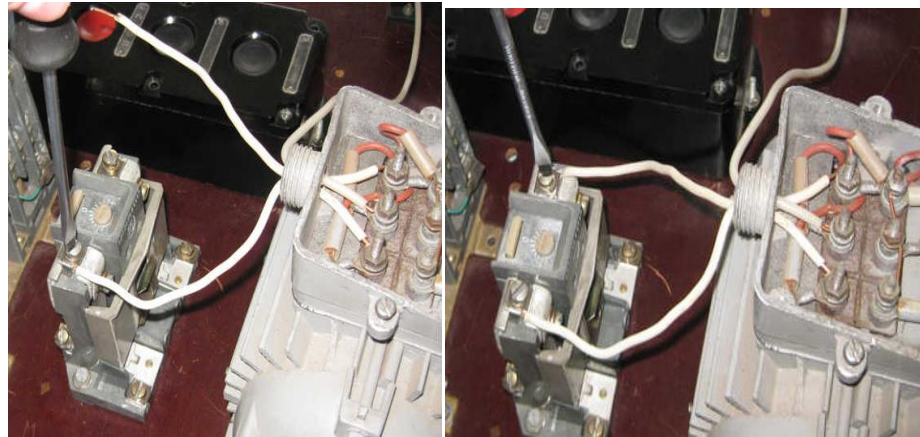
Алгоритм (порядок виконання) складання схеми неререверсивного пуску асинхронного двигуна (АД)

1. Силовий ланцюг:

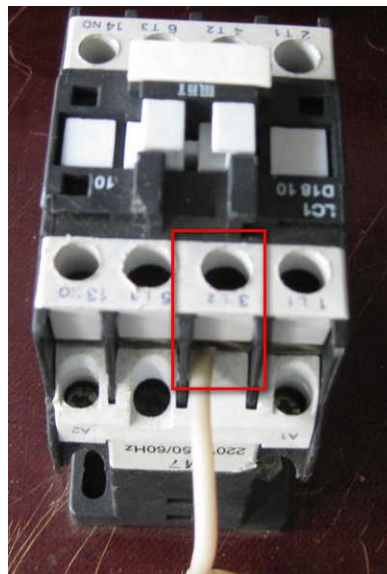
1.1. Беремо крайні 2 дроти (фаза А і С) що виходять від двигуна



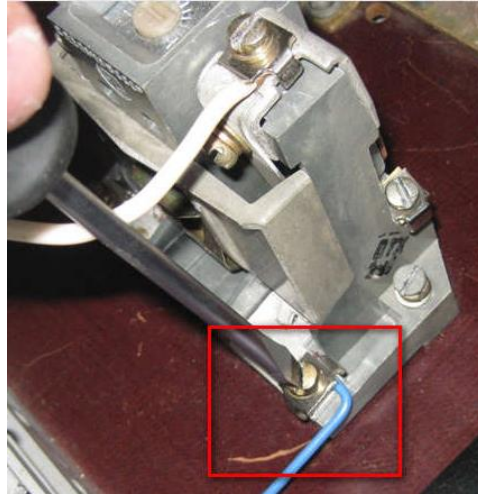
1.2. Приєднуємо ці дроти до верхніх контактів теплового реле.



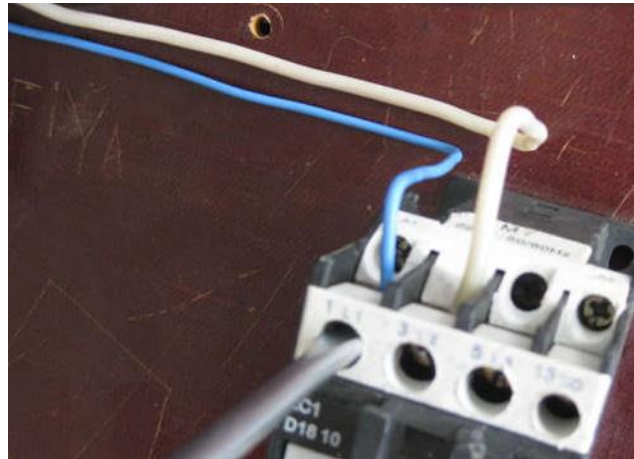
1.3. Третій провід від двигуна з'єднуємо з магнітним пускачем, приєднуючи його на контакт 3 (фаза В)



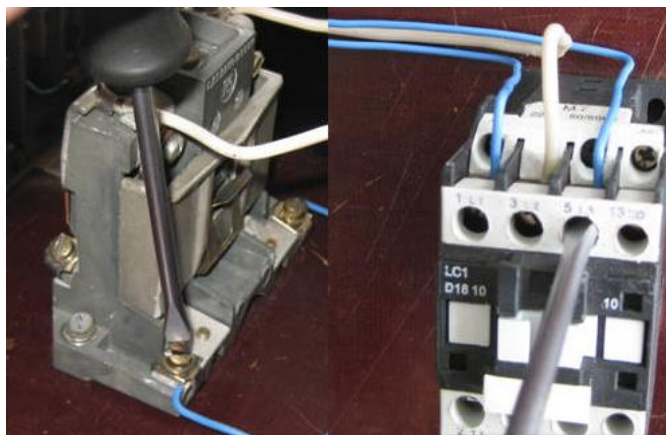
1.4. З'єднуємо нижні контакти теплового реле з магнітним пускатчем



1.5. Один нижній контакт теплового реле з'єднуємо з контактом 1 на магнітному пускатчі

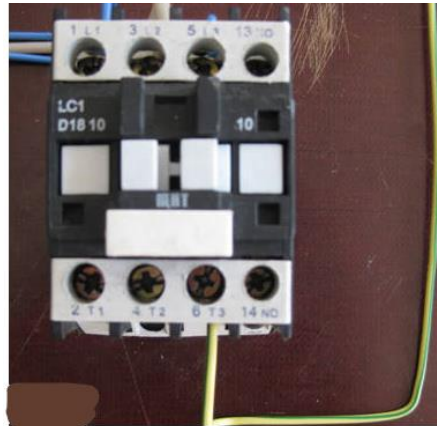


1.6. Інший нижній контакт теплового реле з'єднуємо з контактом 5 на магнітному пускатчі

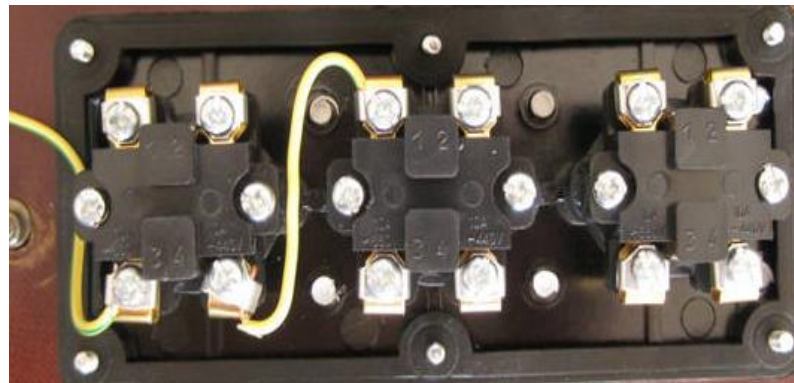


2. Ланцюг управління:

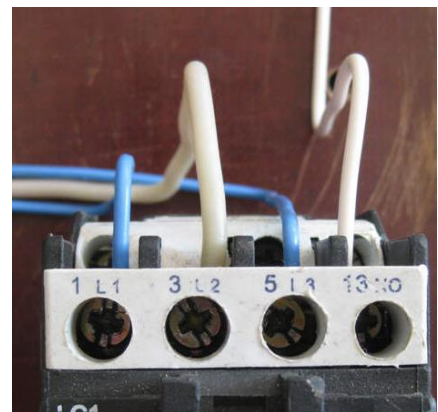
2.1. Контакт 6 на магнітному пускачі з'єднуємо дротом із нормально замкнутим контактом кнопки «Стоп»



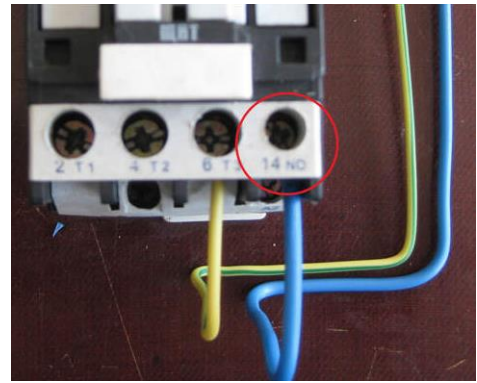
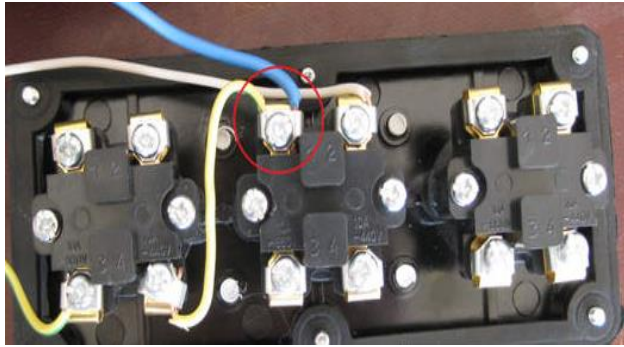
2.2. Робимо перемичку із нормально замкнутого контакту кнопки «Стоп» на нормально розімкнений контакт кнопки «Пуск»



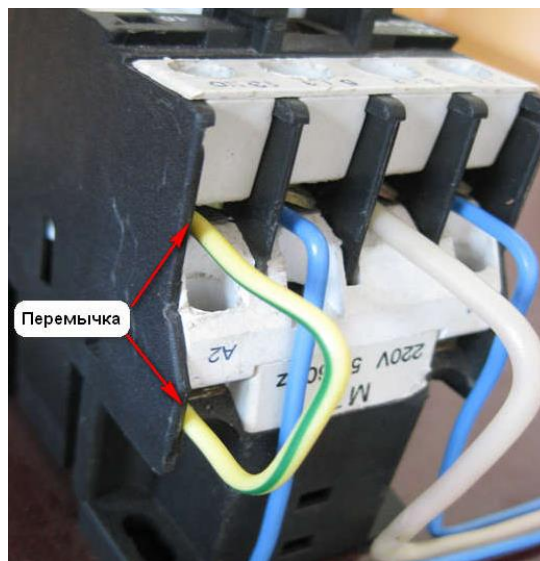
2.3. Блокуємо нормально розімкнений контакт: з'єднуємо контакт 2 кнопки «Пуск» з блок-контактом магнітного пускача 13



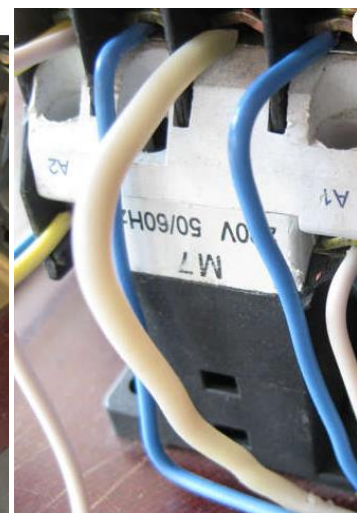
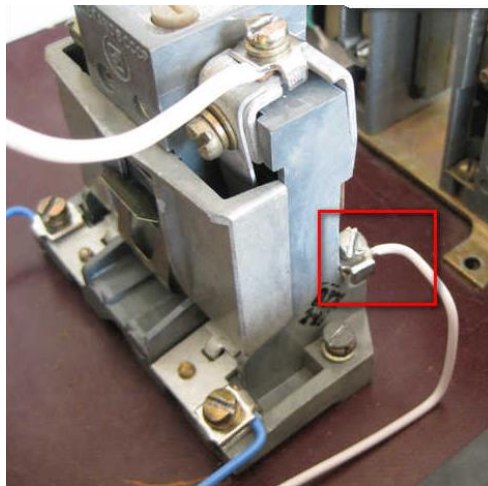
2.4. З'єднуємо нормально розімкнений контакт 1 кнопки «Пуск» з блок-контактом магнітного пускача 14



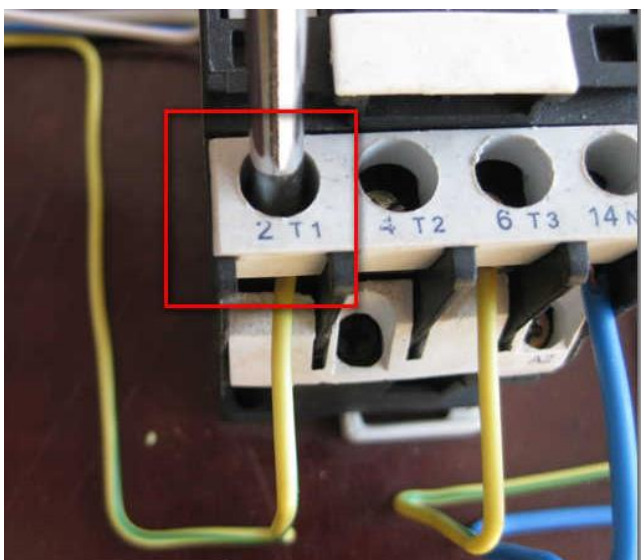
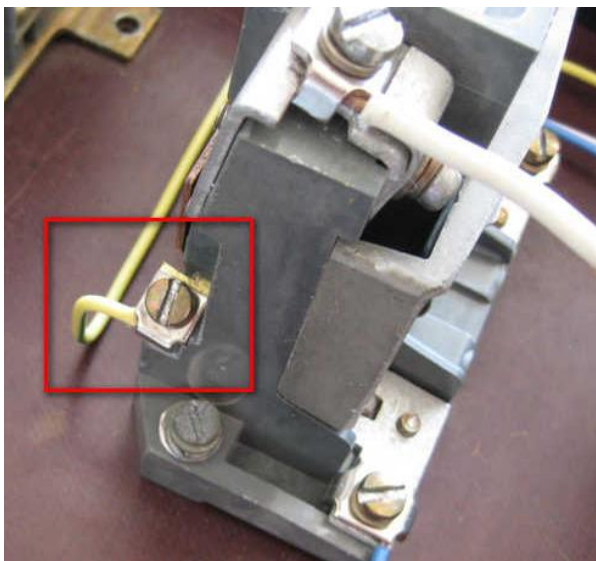
2.5. Перемичкою з'єднуємо блок-контакт магнітного пускача 13 з котушкою магнітного пускача (контакт - A2)



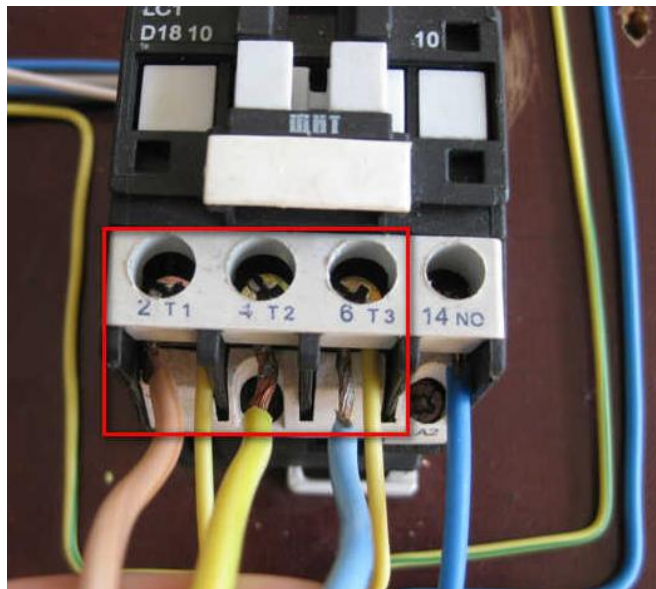
2.6. З котушки магнітного пускача (контакт A1) подаємо харчування на нормально замкнуті контакти теплового реле



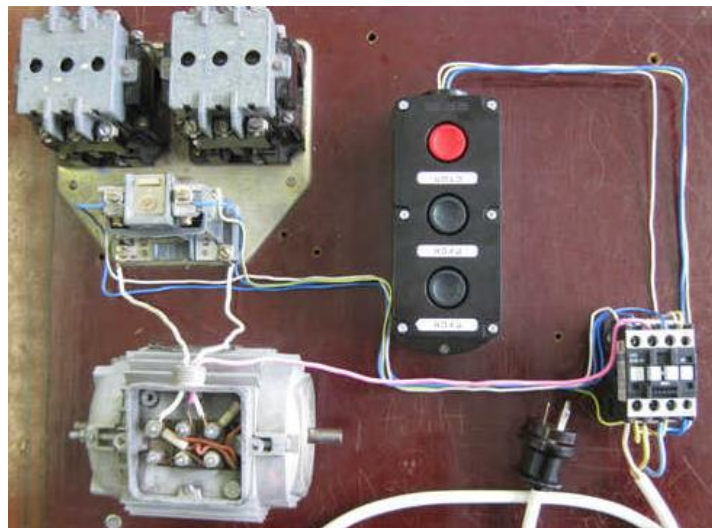
2.7. З теплового реле (з нормально замкнутого контакту) на контакт 2 магнітного пускача



2.8. Приєднуємо шнур живлення до контактів магнітного пускача - 2, 4, 6.

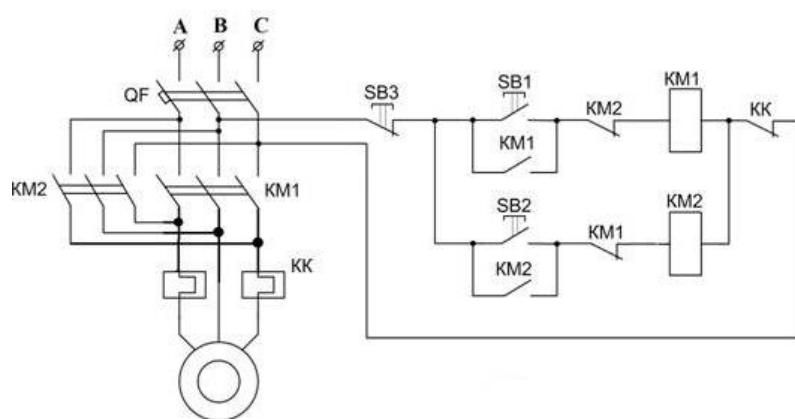


2.9. Перед запуском перевіряємо схему ще раз!



2.10. Запускаємо двигун.

Завдання 2. Схема реверсивного пуску асинхронного двигуна (АД) із короткозамкненим ротором

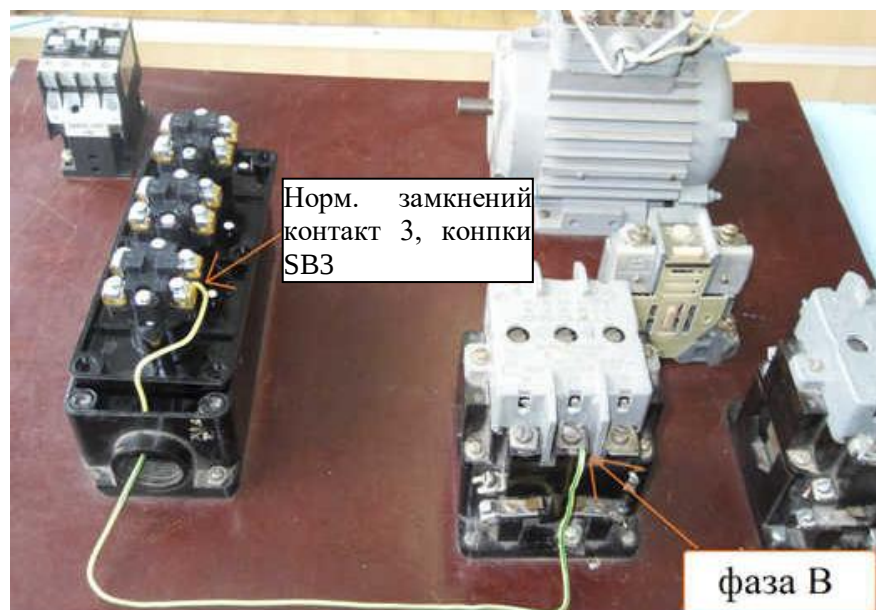
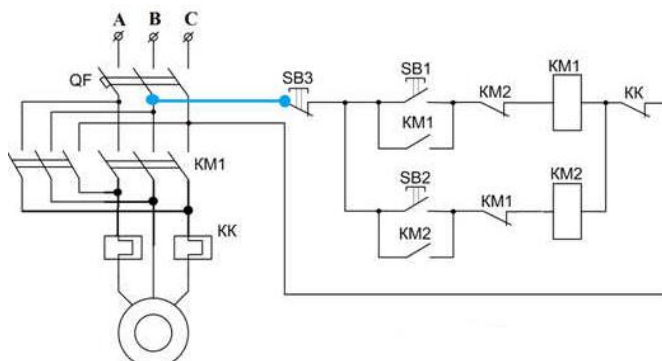


Розшифрування кнопок:

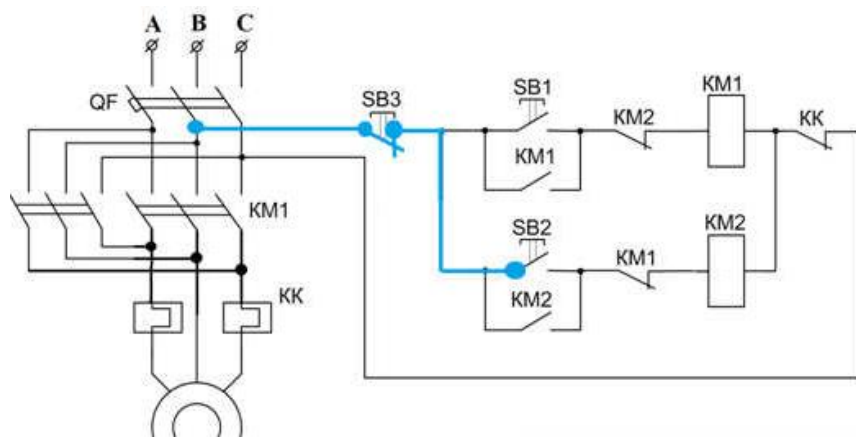
- SB1 - "Вперед"
- SB2 - "Назад"
- SB3 - "Стоп"

Технологічний процес складання схеми реверсу асинхронного двигуна (АД) з короткозамкненим ротором

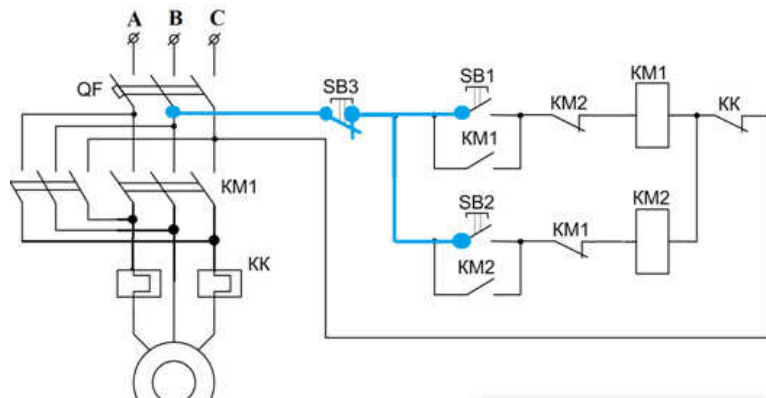
1.1. Живильний кабель приєднуємо з фази В на нормально замкнутий контакт (3) кнопки SB3.

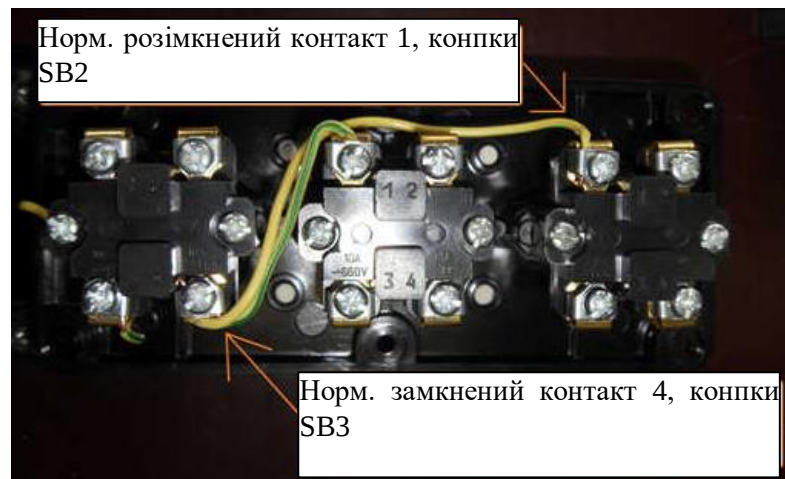


1.2. З нормально замкнутого контакту (4) кнопки SB3 приєднати перемичку на нормально розімкнений контакт (1) кнопки SB2.

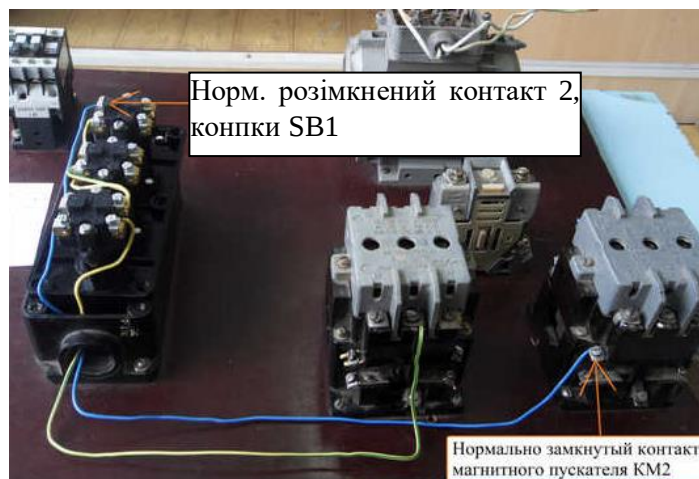
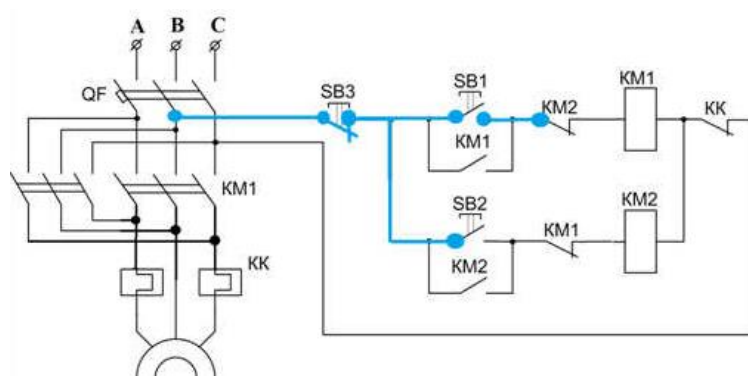


1.3. З нормально замкнутого контакту (4) кнопки SB3 приєднати перемичку на нормально розімкнений контакт (1) кнопки SB1.



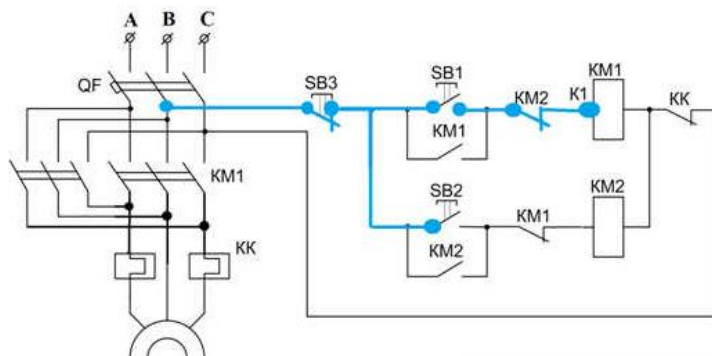


1.4. З нормально розімкнутого контакту (2) кнопки SB1 приєднати провід на нормально замкнутий контакт магнітного пускача KM2.

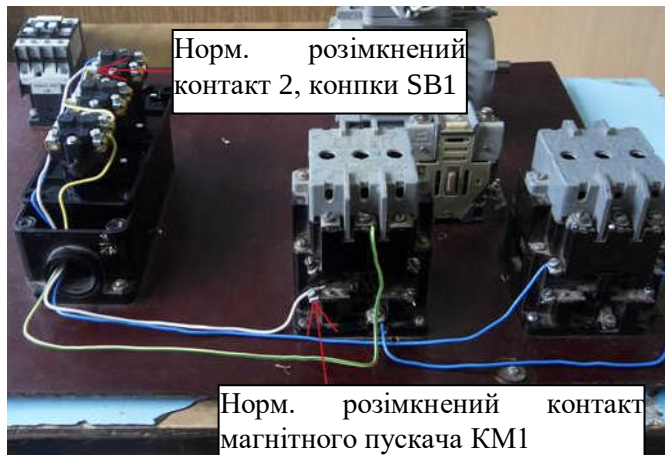
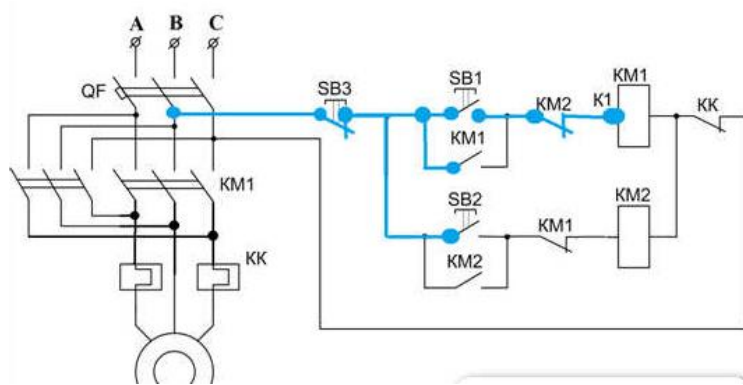




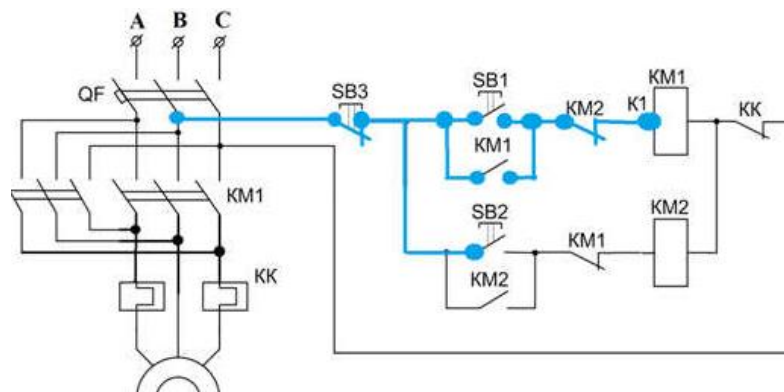
1.5. З нормально замкнутого контакту магнітного пускача KM2 приєднуємо провід на котушку K1 магнітного пускача KM1.



1.6. З нормально розімкнутого контакту (1) кнопки SB1 приєднуємо провід на нормально розімкнений контакт магнітного пускача KM1.



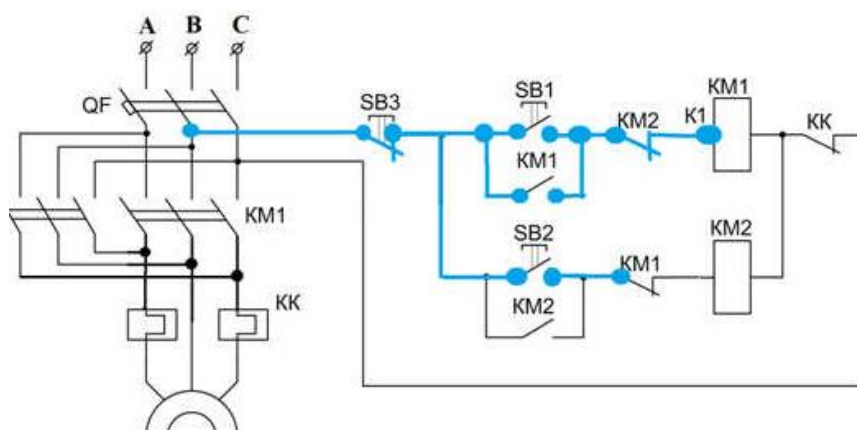
1.7. З нормально розімкнутого контакту магнітного пускача KM1 приєднуємо перемичку на нормально замкнутий контакт магнітного пускача KM2.

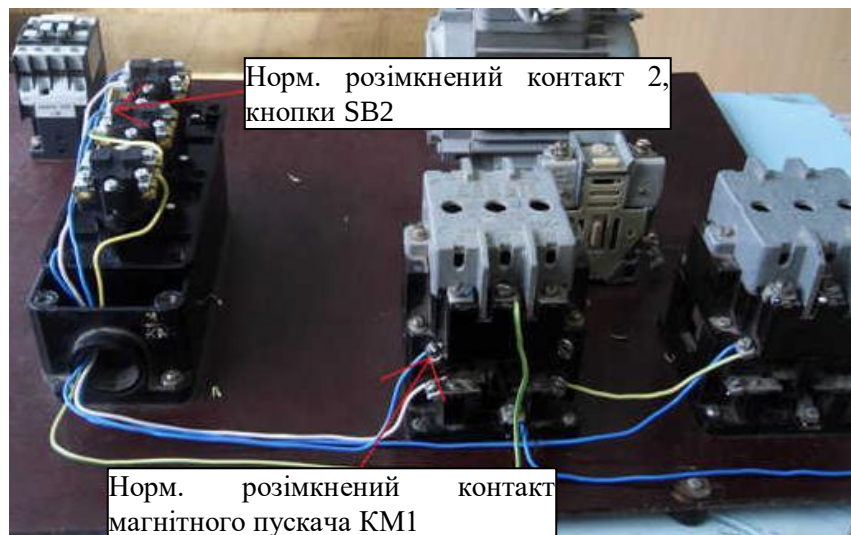


Норм. розімкнений контакт
магнітного пускача KM1

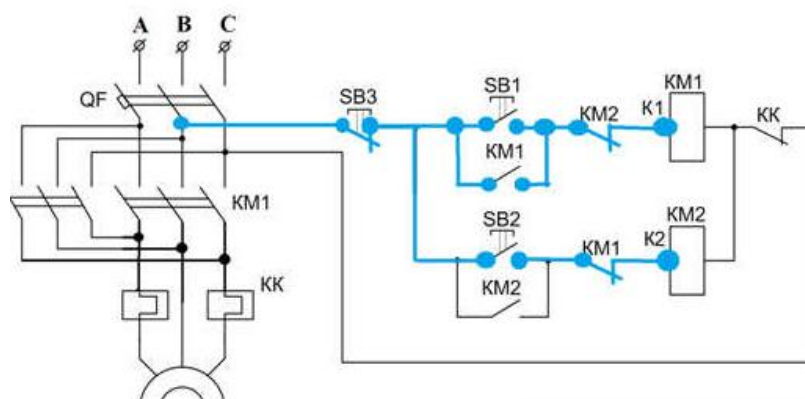
Норм. замкнений контакт
магнітного пускача KM1

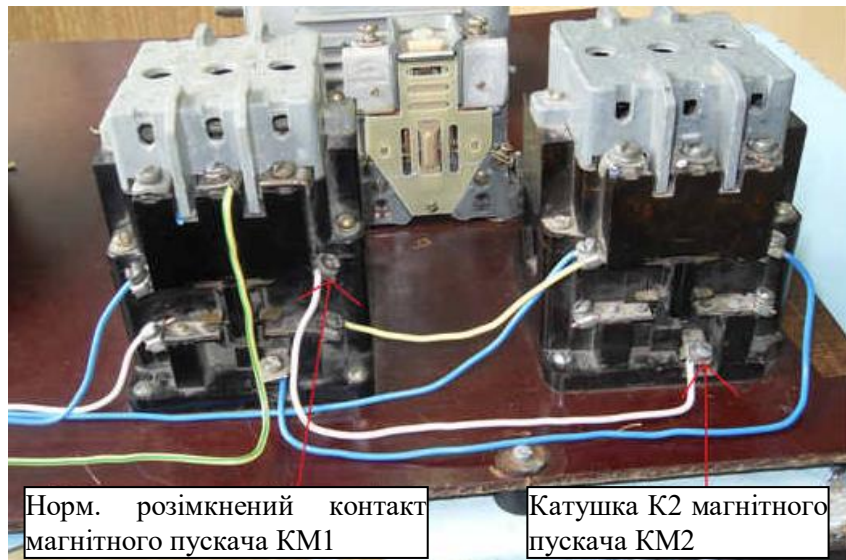
1.8. З нормально розімкнутого контакту (2) кнопки SB2 приєднати провід на нормально замкнутий контакт магнітного пускача KM1.



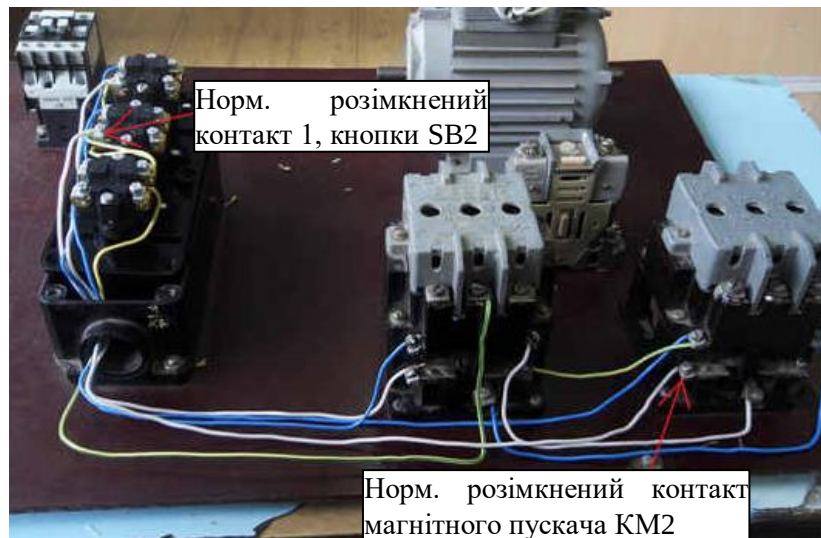
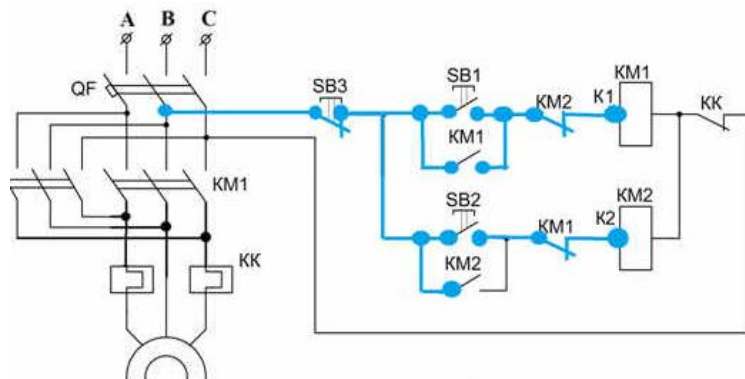


1.9. З нормально замкнутого контакту магнітного пускача KM1 приєднуємо провід на котушку K2 магнітного пускача KM2.



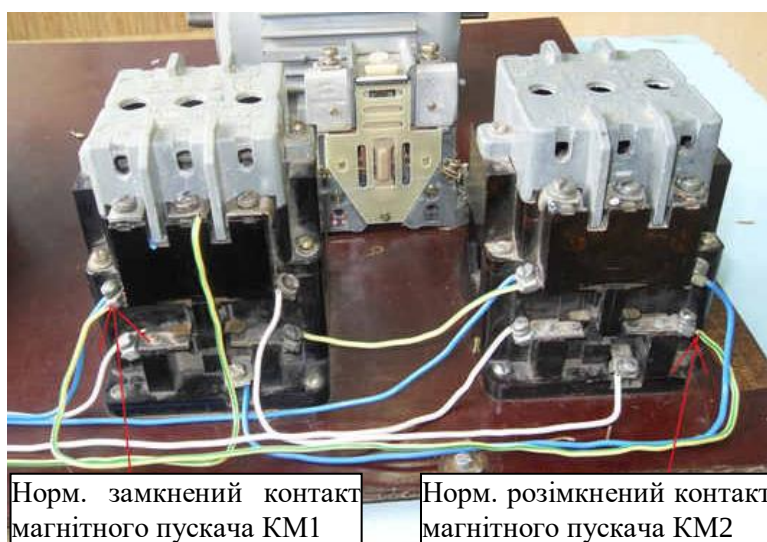
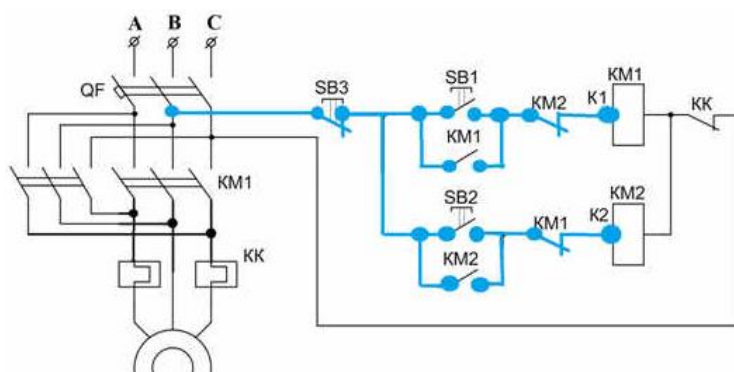


1.10. З нормально розімкнутого контакту (1) кнопки SB2 приєднати провід на нормально розімкнений контакт магнітного пускача KM2.





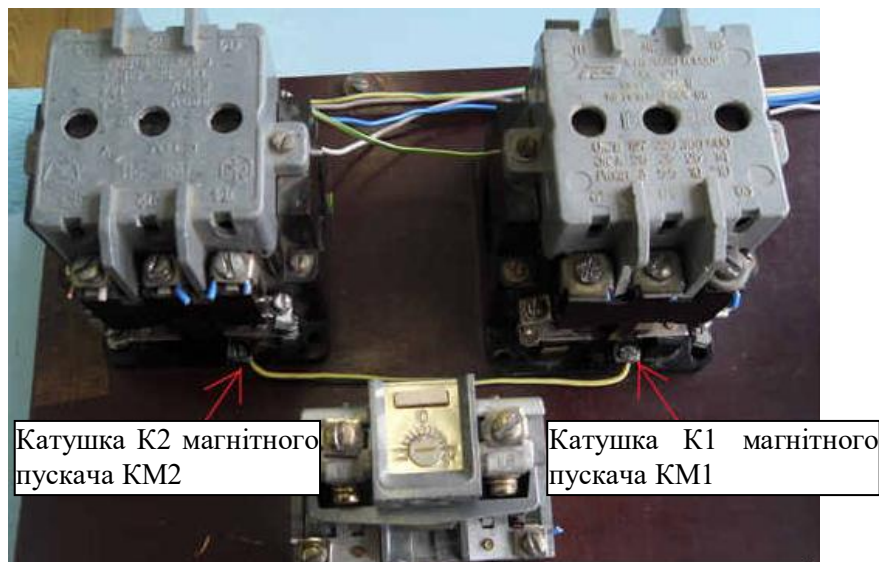
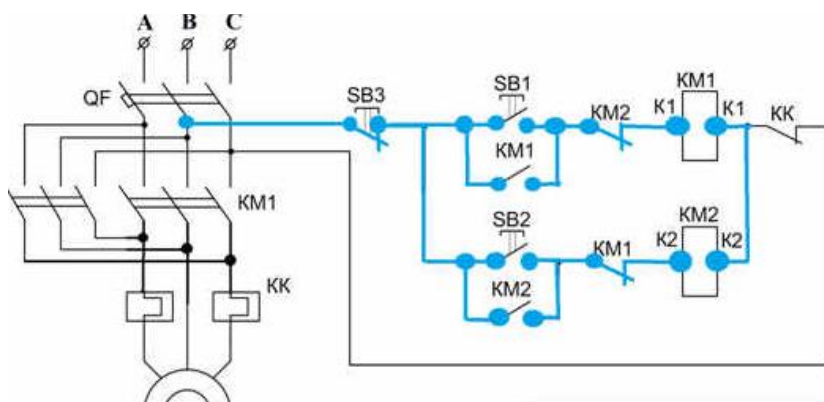
1.11. З нормально розімкнутого контакту магнітного пускача KM2 приєднуємо перемичку на нормально замкнутий контакт магнітного пускача KM1.



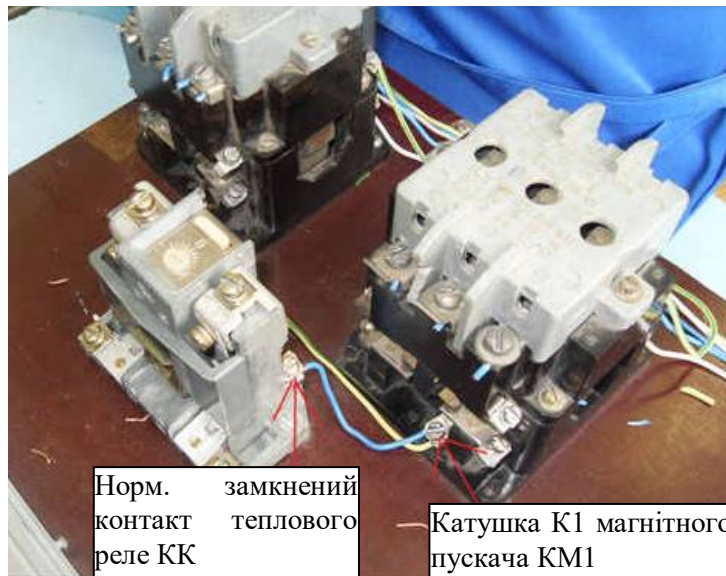
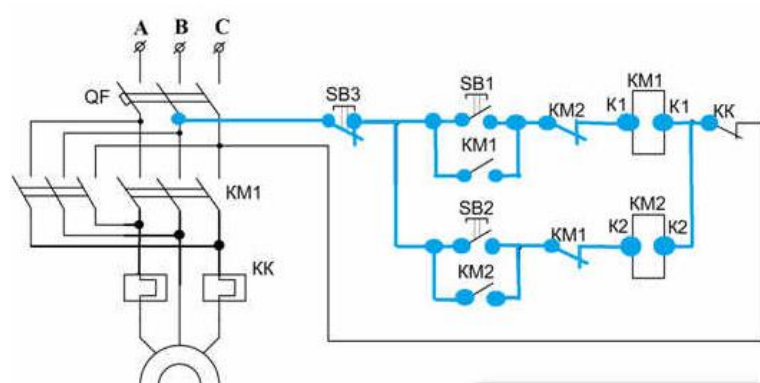
1.12. Закрийте кришку кнопочкового поста.



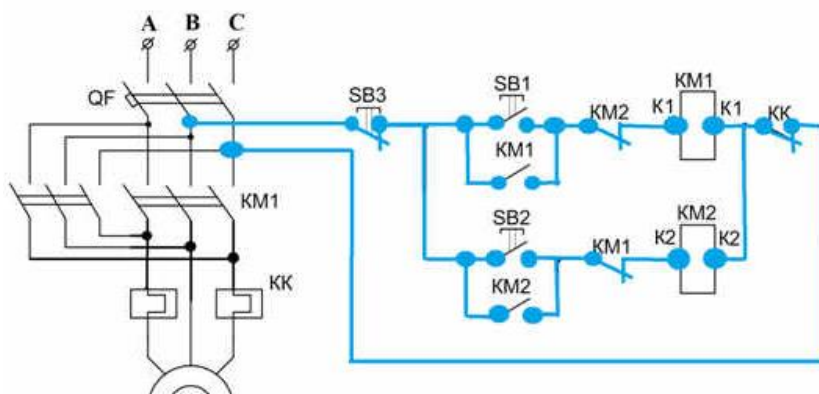
1.13. Робимо перемичку між котушок K1 і K2 магнітних пускачі KM1 та KM2.

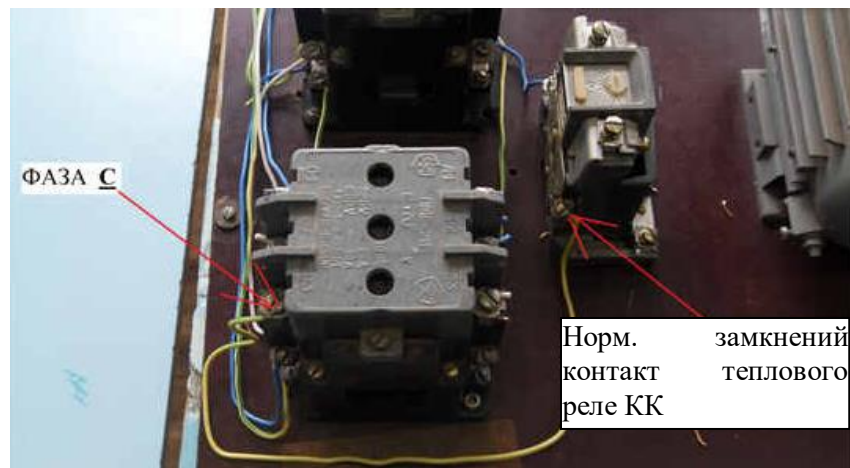


1.14. Від котушки K1 магнітного пускача KM1 приєднати провід до замкнутого контакту теплового реле KK.



1.15. З нормально замкнутого контакту теплового реле КК приєднуємо провід на фазу «С».





Силовий ланцюг:

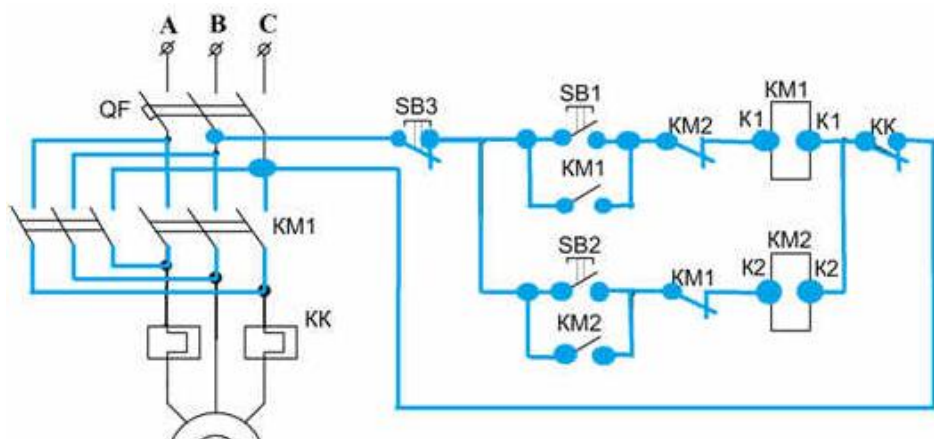
1.16. На магнітних пусках здійснити реверс шляхом перемикання контактів за схемою.

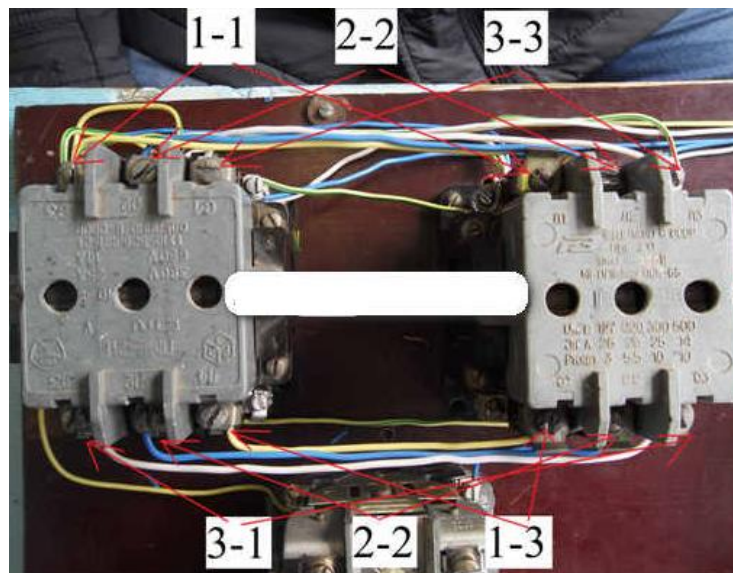
З боку двигуна:

- 3-1
- 2-2
- 1-3

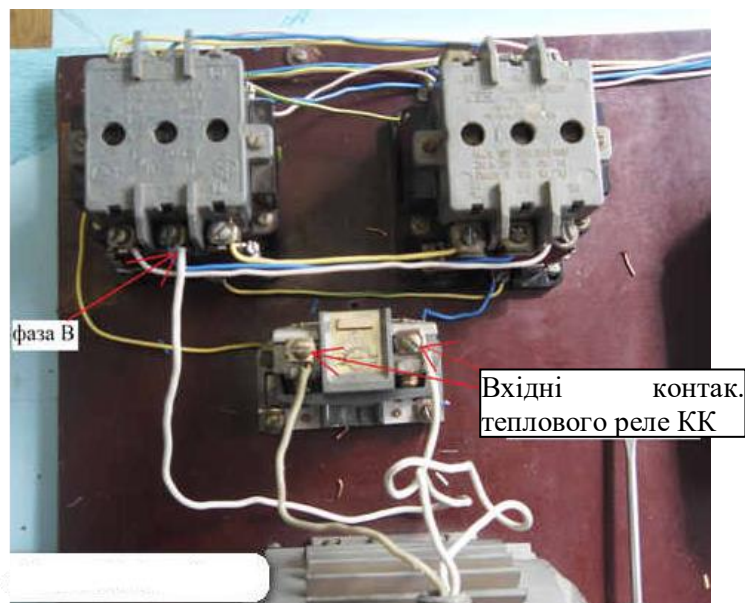
З боку підключення кнопочового поста:

- 1-1
- 2-2
- 3-3

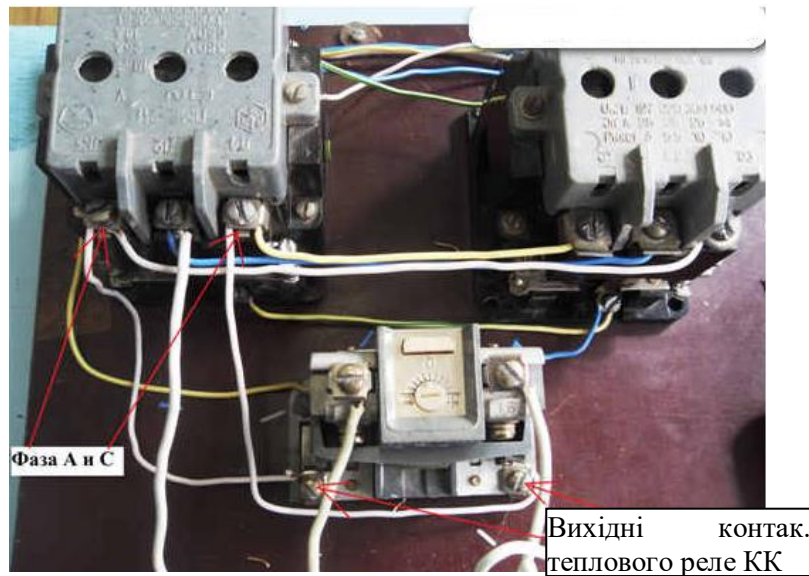
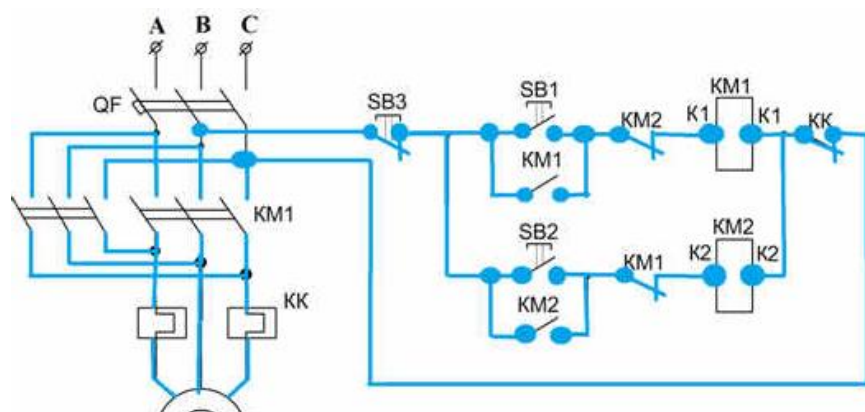




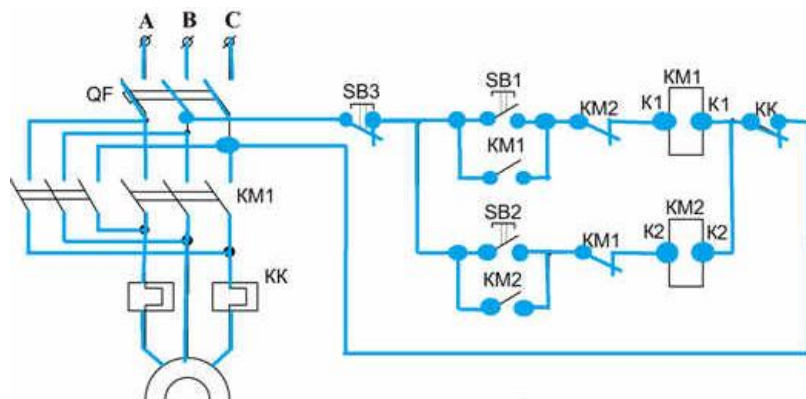
1.17. Підключення двигуна з КЗ ротором фазою "В" до фази "В" на магнітний пускач. Фазу «А» та «С» підключаємо до вхідним контактам теплового реле КК.

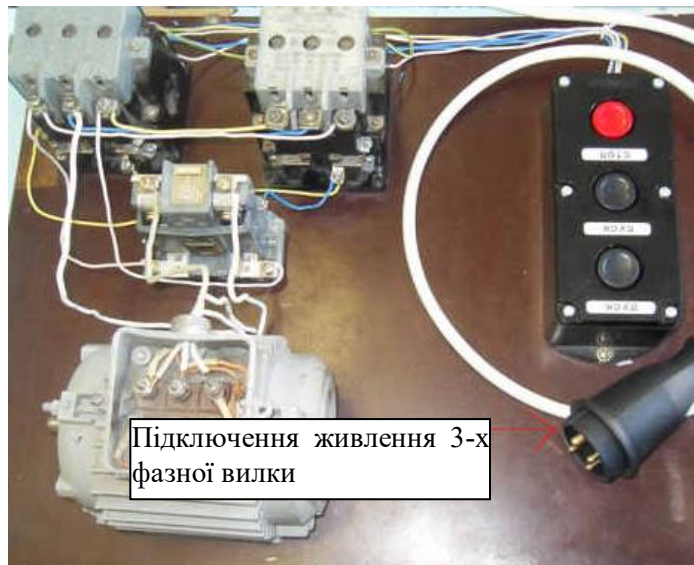
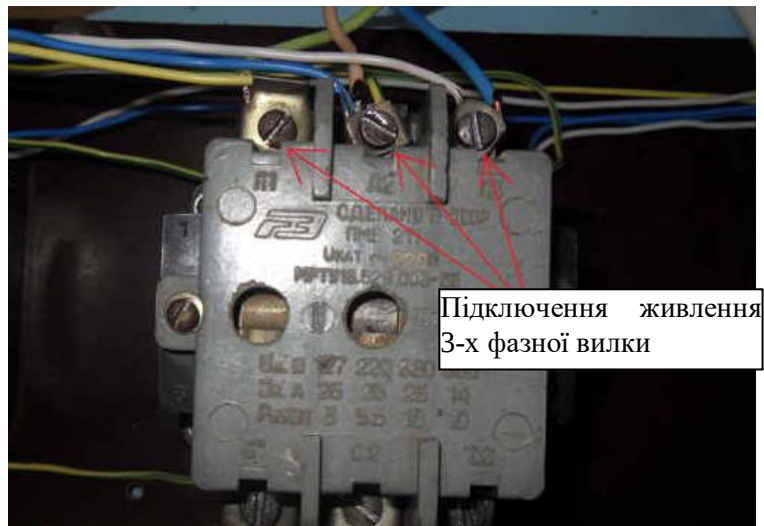


1.18. З вихідних контактів теплового реле КК приєднати дроти до фази «А» та фази «З».



1.19. Підключити трифазну вилку до магнітного пускача на фази "А", "В" і "С".





1. 20. Перевірити правильність складання схеми реверсу асинхронного двигуна і лише після цього подати напругу і запустити двигун.

11.3. Контрольні питання

1. Які способи пуску асинхронного двигуна існують і в яких випадках застосовується прямий пуск?
2. Що таке схема нереверсивного керування і які її основні елементи?
3. Як працює магнітний пускач та яку функцію він виконує в схемі керування?

4. Для чого використовується теплове реле і як воно захищає двигун від перевантажень?
5. Яке призначення кнопкового поста «Пуск/Стоп» у схемі керування?
6. Як реалізується блокування кнопок у схемі нереверсивного керування?
7. В чому полягає різниця між нереверсивним та реверсивним керуванням двигуном?
8. Скільки пускачів необхідно для організації реверсивного керування і як вони підключаються?
9. Як працює реверс «з ходу» і які елементи забезпечують його безпечне виконання?
10. Яка роль допоміжних контактів у схемі реверсивного керування?
11. Як забезпечується захист силових і керуючих кіл від короткого замикання?
12. Що таке гальмування противмиканням і в яких випадках воно використовується?
13. Як правильно підключити силовий та керуючий ланцюги в схемі пуску асинхронного двигуна?

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ДО ОФОРМЛЕННЯ ЗВІТІВ З ПРАКТИЧНИХ РОБІТ

з дисципліни «Теорія електроприводу» для підготовки до практичних занять здобувачами за першим(бакалаврським) рівнем вищої освіти спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка»

1. Практична робота пишеться кожним студентом власноруч (одним коляром пасти) та починається з номеру практичної роботи та її найменування. Листи заповнюються лише з однієї сторони.

2. Робота оформлюється на листах А4: полем ліворуч – 2,5 см; полем праворуч – 1 см; полем внизу/верху – 2 см.

3. Кожна сторінка повинна бути пронумерована та підписана відповідним шифром (див. додаток 2.)

3. Звіт з практичної роботи повинен мати: титульний лист, теоретичну частину, розрахункову частину, відповіді на контрольні питання, висновки.

4. Титульний аркуш є першою сторінкою практичної роботи і містить основні дані про звіт роботи та її автора. Титульний аркуш заповнюється за строго визначеною формою (див. додаток 1) та повинна містити:

- найменування вищого навчального закладу, факультету та кафедри;
- назву практичної роботи;
- допуски до виконання та захисту;
- відведену графу для оцінки студента;
- прізвище, ім'я автора;
- шифр групи в якій навчається автор;
- науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ім'я викладача;
- рік виконання.

Слід пам'ятати, що титульний лист не підлягає нумерації, однак включається до загальної нумерації сторінок практичної роботи.

5. Розрахункова частина практичної роботи повинна виконуватися з урахуванням загальних вимоги до оформлення звіту та оформлюватися у рамці з відповідним шифром (див. додаток 2).

6. захист практичної роботи відбувається у наступні послідовності:

1) оформлення звіту практичної роботи (титульний лист та теоретична частина), після чого студент отримує допуск до виконання роботи;

2) виконання або розрахунок завдання практичної роботи, після перевірки якої студент готується та відповідає письмово на контрольні питання. Отримується можливість до захисту практичної роботи;

3) захист практичної роботи відбувається усно, за питаннями по темі практичної роботи та відповідного лекційного матеріалу.

ЗАГАЛЬНІ ВИМОГИ ПІДГОТОВКИ ДО ПРАКТИЧНИХ ЗАННЯТЬ

з дисципліни «Теорія електроприводу»

На практичному занятті студент повинен закріпити одержані теоретичні знання і набути практичних навичок з розрахунку параметрів роботи електроприводу.

При виконанні практичних робіт з дисципліни теорія електроприводу студент повинен самостійно вирішувати практичні інженерні задачі, уміти застосовувати методики розрахунку параметрів для дослідження роботи електроприводу.

Одержавши графік виконання практичних робіт з дисципліни, студент самостійно готується до кожної з них, вивчаючи відповідні розділи теоретичного матеріалу.

Для роботи студент отримує варіант індивідуального завдання і необхідну нормативно-довідкову літературу. При розрахунках студентам рекомендується використовувати мікрокалькулятори. Студент самостійно виконує розрахунки відповідно з темою практичного заняття та при необхідності отримує допомогу викладача. Після виконання необхідних розрахунків здобувач складає звіт по роботі, який вміщує всі фактичні дані (схеми, таблиці, графіки) та аналіз результатів розрахунку. Для економії часу графіки краще виконувати на міліметровому папері, або побудувати за допомогою комп'ютерних програм.

В кінці заняття студент повинен представити викладачу результати індивідуальної роботи, при необхідності виконати необхідні виправлення та захистити практичну роботу за тематичними питаннями для одержання оцінки від викладача.

Перед захистом практичної роботи перевіряється готовність студента до практичного заняття (наявність оформленого звіту) та за темою практичного

заняття, використовуючи контрольні питання, які приводяться в практичній роботі. Лише після перевірки викладачем ступеня підготовки, студент допускається до занять, і може захищати практичну роботу.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

Основна

1. Авдєєва О. А., Садовий О. С. Електропривід і автоматизація: конспект лекцій. Миколаїв : МНАУ, 2018. 98 с. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/3743>
2. Василєга П. О. Електропривод робочих машин : підручник. Суми, 2022. 290 с. URL: <https://essuir.sumdu.edu.ua/bitstream-download/123456789/88282/3/Vasilega.pdf>
3. Видмиш А. А., Ярошенко Л. В. Основи електропривода. Теорія та практика. Частина 1 : навч. посібник. Вінниця : ВНАУ, 2020. 387 с. URL: <https://repository.vsau.org/getfile.php/25015.pdf>
4. Донець О. В., Колотіло В. І. Теорія електропривода : конспект лекцій. Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2021. 148 с. URL: <https://surl.li/mcbgwu>
5. Красношاپка Н. Д. Автоматизований електропривод. Розділ 1. Теорія електропривода : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 100 с. URL: <https://ela.kpi.ua/handle/123456789/57270>
6. Красношاپка Н. Д. Автоматизований електропривод. Розділ 1. Теорія електропривода : навчальний посібник / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: Н. Д. Красношاپка. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 101 с. URL: <https://ela.kpi.ua/items/0d4ea828-349e-4aa0-9050-ca2b21c29ff9>
7. Красношاپка Н., Піжов В. Електропривод: Механіка електроприводу. Електромеханічне перетворення енергії та електромеханічні властивості двигунів постійного струму: навч. посіб. Київ, 2019. 198 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b88af571-a07f-4926-8e23-07a11228deb7/content>
8. Красношاپка Н., Пушкар М., Піжов В. Електропривод : лаборатор. практикум. Київ, 2022. 54 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/b88af571-a07f-4926-8e23-07a11228deb7/content>

<https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/c4262f9f-0f7e-4fba-9d92-0974b8a6cbe9/content>

9. Лукавенко В. П., Зілінський А. І. Основи промислового електроприводу лабораторний практикум : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 72 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e68021fb-f64c-450a-bea6-421644246fcb/content>

10. Мілих В., Іваненко В. Дослідження асинхронних двигунів: Лабораторний практикум з курсу «Електричні машини». Харків : ХПІ, 2017. 93 с.

11. Основи промислового електроприводу: лабораторний практикум : навчальний посібник / уклад. В. П. Лукавенко, А. І. Зілінський. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 72 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/e68021fb-f64c-450a-bea6-421644246fcb/content>

12. Осташевський М. О., Юр'єва О. Ю. Електричні машини і трансформатори : навч. посіб. / за ред. В. І. Мілих. Київ : Каравела, 2018. 454 с. URL: https://pdf.lib.vntu.edu.ua/books/2019/Ostashev_2018_452.pdf

13. Постнікова М. В., Квітка С. О., Нестерчук Д. М. Основи електропривода : практикум, ч. 1. Мелітополь : Люкс, 2020. 259 с.

14. Скляр О. Г., Болтянська Н. І. Технології наукових досліджень : підручник. Мелітополь : ФОП Однорог Т.В., 2022. 682 с.

15. Ставинський А. А., Циганов О. М. Спеціальні електричні машини. Частина 1 "Електричні машини систем автоматики" : навчальний посібник. Миколаїв : МНАУ, 2025. 77 с. URL: <https://dspace.mnau.edu.ua/jspui/handle/123456789/21980>

16. Теоретичні основи електротехніки - 2: Лабораторний практикум : навч. посіб. / М. П. Бурик, Л. Ю. Спінул, В. Ю. Лободзинський ; Н. В. Беленок, Ю. М. Чуняк КПІ ім. Ігоря Сікорського. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022.

96 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/f8ebe919-c814-4e26-abe1-60e492c23f76/content>

17. Теряєв В. І. Автоматизований електропривод. Ч. 2 : навчальний посібник. Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 204 с. URL: <https://ela.kpi.ua/server/api/core/bitstreams/73e51e44-c55f-4e5f-b00a-a0ad60d200a8/content>11. Leonhard W. Control of Electrical Drives. Springer, 2014. 460 p.

18. The influence of the design of the stator winding of a synchronous-reactive generator on increasing its energy efficiency / M. Kundenko et al. *Electrical engineering and electromechanics*. 2025. P. 3–9.

Електронні ресурси

1. ДСТУ 2313-93 Електроприводи. Терміни та визначення. *БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України*. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=60224.

2. ДСТУ 2649-94 Електродвигуни асинхронні заглибні. Загальні технічні умови (ГОСТ 30195-94). *БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України*. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page.html?id_doc=93694.

3. ДСТУ 8312:2015 Машини електричні малої потужності. Двигуни. Загальні технічні умови. *БУДСТАНДАРТ Online - нормативні документи будівельної галузі України*. URL: http://online.budstandart.com/ua/catalog/doc-page?id_doc=72817.

4. ДСТУ 2.701:2011. Єдина система конструкторської документації. Схеми. Види та типи. Київ : Держспоживстандарт України, 2012. 28 с.

ДОДАТКИ

Додаток 1

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МИКОЛАЇВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ АГРАРНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІНЖЕНЕРНО-ЕНЕРГЕТИЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ
Кафедра електроенергетики, електротехніки та електромеханіки

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1

з дисципліни

Теорія електроприводу

на тему: “Розрахунок параметрів електроприводу для тягової установки”

Допуск до виконання _____

Допуск до захисту _____

Захист _____

Виконав студент групи: Ен 1/1 _____
(підпис)

Олексій ХАРИТОН
(імя, прізвище)

Керівник: _____
(підпис)

Віталій МАРДЗЯВКО
(імя, прізвище)

2025

					141 Ен 1/1. 11. ПР01. ТЕП	Лист
Ізм	Лист	№ докум.	Підпис	Дата		

Навчальне видання

ТЕОРІЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДУ (ЧАСТИНА II)

Методичні рекомендації

Укладач: **Ставинський** Ростислав Андрійович

Мардзявко Віталій Анатолійович

Формат 60х84 1/16. Ум. друк. арк. 11.7.

Тираж 20 прим. Зам. № _____

Надруковано у видавничому відділі
Миколаївського національного університету
54020, м. Миколаїв, вул. Георгія Гонгадзе, 9

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 4490 від 20.02.2013 р.