

Лабораторна робота №1

ДОСЛІДЖЕННЯ МЕХАНІЧНИХ ТА ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ХАРАКТЕРИСТИК АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА

Мета: побудувати механічну характеристику $M = f(n)$ та електромеханічну $I = f(M)$ або $I = f(n)$. Оцінити пусковий момент, критичний момент, ковзання, вплив параметрів ротора.

Короткі теоретичні відомості

Залежність електромагнітного моменту асинхронного двигуна від ковзання є аналітична наближена формула Клосса, яка коректно відтворює форму механічної характеристики в широкому діапазоні ковзань і дає змогу обійтися без громіздкого обчислення за повною Т-подібною схемою заміщення. У цій апроксимації момент двигуна M розглядають як функцію ковзання s (де $s = (n_s - n) / n_s$, n_s – синхронна частота обертання, n – механічна частота обертання ротора). Тоді момент описують співвідношенням:

$$M(s) = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$

де $M_{кр}$ – критичний (максимальний) момент, а $s_{кр}$ – критичне ковзання, що відповідає максимуму моменту на характеристиці. Зручність цієї форми полягає в тому, що вона автоматично забезпечує ключові властивості реального двигуна: при $s = s_{кр}$ знаменник дорівнює 2, отже $M(s_{кр}) = M_{кр}$. При малих ковзаннях $s \ll s_{кр}$ момент приблизно пропорційний s (робоча ділянка характеристики близько до синхронної швидкості), а при великих ковзаннях $s \gg s_{кр}$ момент спадає приблизно як $1/s$ (пусково-гальмівна ділянка). Симетричний вигляд знаменника відображає фізичну конкуренцію двох режимних факторів: зростання струму ротора зі збільшенням ковзання та

одночасне зменшення ефективності перетворення через зростання активної складової втрат у роторному колі.

Критичні параметри $M_{кр}$ і $s_{кр}$ у розрахункових роботах або задаються за паспортними/довідковими даними, або визначаються з наближених співвідношень за параметрами схеми заміщення. Фізично $M_{кр}$ відповідає межі стійкості: у точці максимуму похідна $dM/ds=0$, і при подальшому збільшенні навантаження двигун переходить на «праву» спадну частину характеристики, де можливе зривання обертання. Критичне ковзання $s_{кр}$ характеризує, при якому відхиленні від синхронної швидкості реалізується максимум моменту, воно суттєво залежить від активного опору ротора (приведеного до статора) і сумарної реактивності розсіювання.

Пусковий момент є окремим важливим випадком цієї залежності. Оскільки під час прямого пуску короткозамкненого асинхронного двигуна ротор нерухомий, маємо $n=0$, а отже $s=1$. Підстановка $s=1$ у формулу Клосса дає:

$$M_{п} = M(1) = \frac{2M_{кр}}{\frac{1}{s_{кр}} + s_{кр}} = \frac{2M_{кр} s_{кр}}{1 + s_{кр}^2}$$

Ця форма одразу показує, що за малих $s_{кр}$ (типово для двигунів з невеликим активним опором ротора) пусковий момент може бути порівняно невеликим відносно $M_{кр}$, тоді як збільшення $s_{кр}$ (наприклад, у двигунах із фазним ротором або зі спеціальними конструктивними заходами) підвищує пусковий момент, але водночас змінює нахил робочої ділянки характеристики та впливає на втрати.

Зв'язок ковзання зі швидкістю у розрахунках використовують у вигляді:

$$n = n_s(1 - s)$$

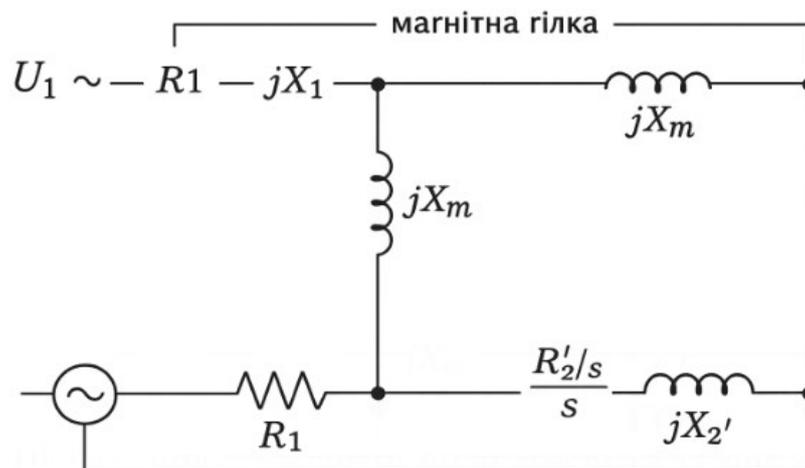
де n_s визначається частотою мережі та числом пар полюсів:

$$n_s = \frac{60f}{p} \quad (\text{об/хв})$$

f – частота живлення (Гц), p – число пар полюсів.

Задавши ковзання s , можна однозначно знайти швидкість n , а отже побудувати механічну характеристику $M(n)$: спочатку обирають набір значень $s \in (0; 1]$, для кожного обчислюють $M(s)$ за Клоссом і перераховують $s \rightarrow n$ за формулою $n = n_s(1-s)$. Це дозволяє отримати узгоджену криву «момент–швидкість» без експериментальних вимірів.

Для обґрунтування застосування формули Клосса нижче наведено спрощену еквівалентну схему заміщення асинхронного двигуна. У загальному вигляді (на фазу) вона містить послідовні параметри статора R_1 і jX_1 , приведене роторне коло ($R_2'/s + jX_2'$)), а також магнітну гілку намагнічування jX_m , увімкнену паралельно до внутрішньої точки схеми.



На схемі ми бачимо, що напруга живлення U_1 прикладена до вхідних клем статора. Опір R_1 описує активні втрати у статорній обмотці (мідні втрати), а X_1 її індуктивний опір розсіювання. Гілка намагнічування jX_m враховує магнітний потік у зазорі та споживання реактивної потужності на створення поля. Роторне коло, приведене до статора, містить R_2'/s , де поділ на

s відображає перерозподіл потужності між електромагнітним перетворенням і втратами в роторі залежно від ковзання: при малому s еквівалентний активний опір великий, струм ротора менший і момент формується на «лінійній» ділянці. При $s \rightarrow 1$ опір R_2'/s наближається до R_2' , струм зростає, але частина енергії йде у роторні втрати, що й призводить до спадання моменту на великих ковзаннях після проходження максимуму. Реактивність X_2' – індуктивний опір розсіювання ротора (приведений), який разом із X_1 визначає сумарну реактивність розсіювання, що впливає на положення $s_{кр}$.

Порядок виконання практичної

1. За варіантом задати/взяти $P_N, n_N, f, p, M_{п}/M_N, M_{кр}/M_N$.
2. Обчислити:

$$n_s, s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s}$$

$$M_N = \frac{9550 P_N}{n_N}$$

$$M_{кр} = (M_{кр}/M_N) \cdot M_N$$

3. Знайти $s_{кр}$ (якщо не задано). Зручно підібрати, щоб момент при s_N дорівнював M_N :

$$M_N = \frac{2M_{кр}}{\frac{s_N}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_N}}$$

4. Побудувати таблицю розрахунку $M(s), n(s)$ для $s = 1; 0.8; 0.6; \dots 0.02$.
5. Побудувати графік $M = f(n)$.
6. Розрахувати електромеханічну характеристику $I=f(M)$ можна оцінити наближено:

$$I \approx I_0 + k_M M$$

$$I_0 \approx (0.25 \dots 0.4) I_N, k_M = \frac{I_N - I_0}{M_N}$$

Приклад виконання лабораторної роботи

Вихідні дані

$$P_N = 7.5 \text{ кВт}$$

$$f = 50 \text{ Гц}$$

$$p = 2 \text{ (тобто 4-полюсний двигун)}$$

$$n_N = 1440 \text{ об/хв}$$

$$\frac{M_{\text{кр}}}{M_N} = 2.5$$

Розрахунок базових величин

Синхронна швидкість

$$n_s = \frac{60f}{p} = \frac{60 \cdot 50}{2} = 1500 \text{ об/хв}$$

Номінальне ковзання

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = \frac{1500 - 1440}{1500} = 0.04$$

Номінальний момент

$$M_N = \frac{9550 \cdot P_N}{n_N} = \frac{9550 \cdot 7.5}{1440} = 49.74$$

Критичний момент

$$M_{\text{кр}} = \left(\frac{M_{\text{кр}}}{M_N} \right) M_N = 2.5 \cdot 49.74 = 124.35$$

Визначення критичного ковзання $s_{\text{кр}}$

$$M_N = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s_N}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s_N}} \Rightarrow \left(\frac{s_N}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s_N} \right) = \frac{2M_{\text{кр}}}{M_N}$$

Оскільки $M_{\text{кр}} = 2.5M_N$, то:

$$\frac{2M_{кр}}{M_N} = 2 \cdot 2.5 = 5$$

$$\frac{s_N}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s_N} = 5$$

Нехай $x = s_{кр}$. Тоді:

$$\frac{0.04}{x} + \frac{x}{0.04} = 5$$

$$x^2 - 0.2x + 0.0016 = 0$$

$$x_1 \approx 0.1917 \quad x_2 \approx 0.00835.$$

Для реального АД беруть $s_{кр} \approx 0.15 \dots 0.3$, отже:

$$s_{кр} = 0.192$$

Пусковий момент M_p (при $s = 1$)

$$M_p = M(1) = \frac{2M_{кр}}{\frac{1}{s_{кр}} + s_{кр}}$$

$$M_{кр} = 124.35, s_{кр} = 0.192:$$

$$M_p \approx 45.97$$

у цьому прикладі пусковий момент нижчий за номінальний, що для деяких типів/параметрів двигуна може траплятись у спрощеному наближенні Клосса у реальних двигунів пусковий момент часто $1.5 \dots 2.5 M_N$, але він залежить від конструкції та параметрів схеми заміщення

Таблиця розрахунку $M(s)$, $n(s)$

Використовуємо набір ковзань:

$$s = 1; 0.8; 0.6; 0.4; 0.3; 0.25; 0.2; 0.15; 0.12; 0.10; 0.08; 0.06; 0.05; 0.04; 0.03; 0.025; 0.02$$

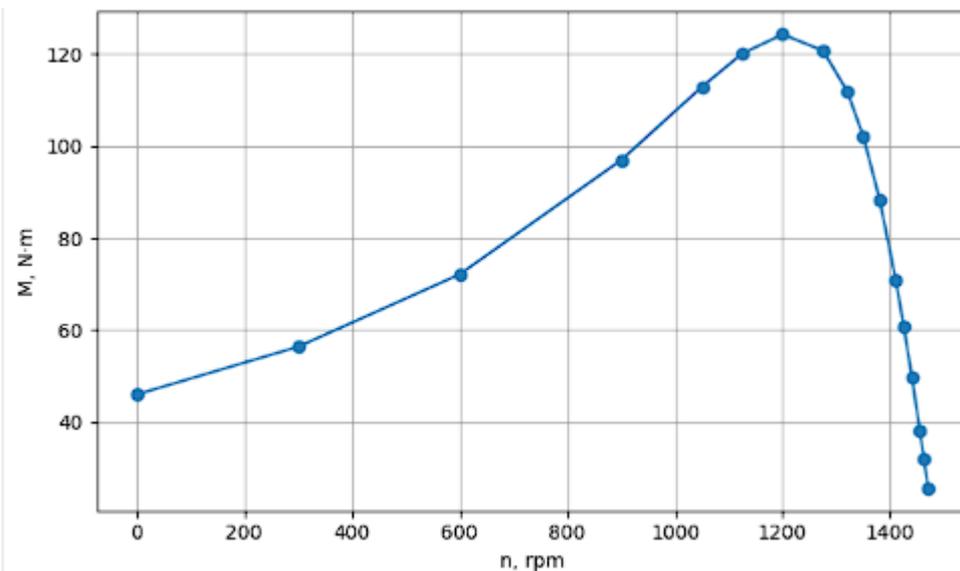
Для кожного s:

$$M(s) = \frac{2M_{кр}}{\frac{s}{s_{кр}} + \frac{s_{кр}}{s}}$$

$$n(s) = n_s(1 - s)$$

s	n, rpm	M(s), Н·м	M/MN	I(M), A (approx)
1.00	0.00	45.97	0.92	14.21
0.80	300.00	56.35	1.13	16.40
0.60	600.00	72.08	1.45	19.72
0.40	900.00	96.91	1.95	24.96
0.30	1050.00	112.83	2.27	28.32
0.25	1125.00	120.08	2.41	29.85
0.20	1200.00	124.24	2.50	30.73
0.15	1275.00	120.71	2.43	29.98
0.12	1320.00	111.86	2.25	28.12
0.10	1350.00	102.00	2.05	26.03
0.08	1380.00	88.41	1.78	23.17
0.06	1410.00	70.91	1.43	19.47
0.05	1425.00	60.75	1.22	17.33
0.04	1440.00	49.74	1.00	15.00
0.03	1455.00	38.00	0.76	12.52
0.02	1462.50	31.90	0.64	11.24
0.02	1470.00	25.67	0.52	9.92

Графік механічної характеристики $M = f(n)$



Оцінка електромеханічної характеристики $I = f(M)$

Оскільки у вихідних даних не задано I_N , для навчальної розрахункової роботи приймаються типові припущення для 7.5 кВт двигуна:

$$U_{\text{лін}} = 400 \text{ В}$$

$$\eta = 0.88$$

$$\cos \varphi = 0.82$$

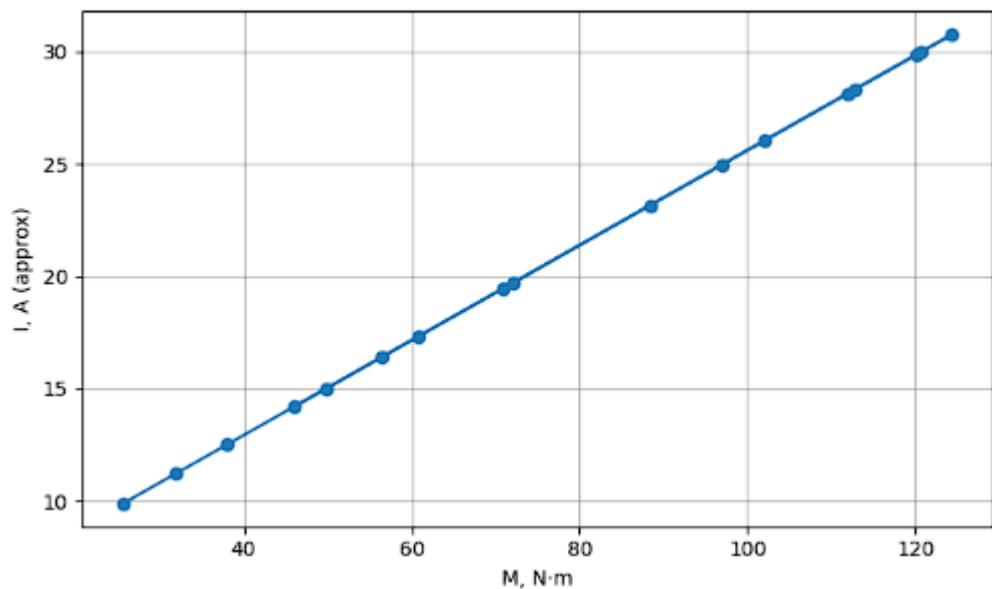
Тоді оцінка номінального струму:

$$I_N \approx \frac{P_N}{\sqrt{3} U_{\text{лін}} \eta \cos \varphi} \approx 15.00 \text{ А}$$

$$I_0 = 0.3 I_N$$

$$k_M = \frac{I_N - I_0}{M_N},$$

$$I(M) = I_0 + k_M M$$



Варіанти виконання лабораторної роботи

Варіант	P_N , кВт	f, Гц	p	n_N , об/хв	$M_{кр}/M_N$	U_1 , В	η	$\cos\varphi$
1	5.5	50	2	1455	2.4	400	0.87	0.80
2	11.0	50	2	1470	2.6	400	0.90	0.84
3	7.5	50	3	960	2.3	400	0.88	0.82
4	15.0	50	1	2920	2.2	400	0.91	0.86
5	3.0	50	2	1425	2.7	400	0.85	0.78
6	4.0	50	2	1440	2.5	400	0.86	0.80
7	18.5	50	2	1480	2.1	400	0.92	0.87
8	2.2	50	2	1410	2.6	400	0.84	0.76
9	30.0	50	1	2950	2.0	400	0.93	0.88
10	9.0	50	2	1460	2.4	400	0.89	0.83
11	5.5	50	3	970	2.2	400	0.87	0.81
12	22.0	50	2	1475	2.3	400	0.92	0.86
13	1.5	50	2	1390	2.8	400	0.82	0.74
14	12.5	50	1	2900	2.1	400	0.91	0.85
15	6.0	50	2	1435	2.5	400	0.88	0.82

Лабораторна робота №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ РЕЖИМІВ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА ЇХ ВПЛИВУ НА РОБОТУ ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Мета: порівняти прямий пуск, пуск зі зниженням напруги, зоря–трикутник, пуск з додатковим опором ротора (для фазного), вплив на $I_{\text{п}}$, $M_{\text{п}}$, час розгону $t_{\text{р}}$, нагрів.

Короткі теоретичні відомості

Нижче наведено розгорнуті теоретичні відомості щодо пускових режимів асинхронного двигуна (АД), впливу напруги на пусковий момент, пуску за схемою «зірка–трикутник», а також оцінювання часу розгону енергетичним методом з урахуванням типових характеристик моменту опору навантаження.

Асинхронний двигун при прямому пуску безпосередньо під'єднується до мережі номінальної лінійної напруги. У момент пуску ротор нерухомий, тому ковзання $s=1$, а частота струму в роторі дорівнює частоті мережі. За цих умов еквівалентний опір ротора (у схемі заміщення) не «підсилюється» поділом на ковзання, що призводить до значного пускового струму. У навчальних інженерних розрахунках прийнято використовувати наближену оцінку кратності пускового струму:

$$I_{\text{п}} \approx (5 \dots 7) I_{\text{N}}$$

де I_{N} – номінальний струм. Такий діапазон відображає типові значення для короткозамкнених АД загальнопромислового виконання й залежить від конструкції ротора, активного опору обмоток, реактивностей розсіювання та режиму живлення.

Пусковий електромагнітний момент АД у першому наближенні суттєво залежить від напруги живлення. Якщо частота та параметри двигуна сталі, то

електромагнітний момент (зокрема пусковий при $s=1$) приблизно пропорційний квадрату прикладеної напруги:

$$M_{\text{п}} \propto U^2$$

Звідси впливає важливе прикладне співвідношення для перерахунку пускового моменту при зміні напруги:

$$M_{\text{п2}} = M_{\text{п1}} \left(\frac{U_2}{U_1} \right)^2$$

де $M_{\text{п1}}$ – відомий пусковий момент за напруги U_1 , а $M_{\text{п2}}$ – пусковий момент за нової напруги U_2 . Фізично ця залежність пов'язана з тим, що магнітний потік у зазорі (за відсутності насичення) приблизно пропорційний напрузі, а момент пропорційний добутку потоку на струмову складову, що також масштабується з напругою; у підсумку отримуємо квадратичну залежність. Практичний наслідок полягає в тому, що навіть помірно зниження напруги призводить до суттєвого зменшення пускового моменту та може унеможливити розгін під навантаженням.

Одним із класичних способів зменшення пускового струму є пуск за схемою «зірка–трикутник». Такий спосіб застосовують для двигунів, обмотки статора яких у робочому режимі розраховані на з'єднання «трикутником» (Δ) при лінійній напрузі мережі U_L . На етапі пуску обмотки перемикають у «зірку» (Y), унаслідок чого фазна напруга зменшується:

$$U_{\varphi, Y} = \frac{U_L}{\sqrt{3}}$$

Оскільки струм і момент на пуску залежать від напруги, то для схеми «зірка» (порівняно з «трикутником» при тій самій лінійній напрузі мережі) приймають наближені співвідношення:

$$I_{\text{п}, Y} \approx \frac{1}{3} I_{\text{п}, \Delta}$$

$$M_{п,Y} \approx \frac{1}{3} M_{п,\Delta}$$

Ці формули відображають дві одночасні обставини: у режимі «зірка» фазна напруга менша у $\sqrt{3}$ разів, а момент, як зазначено вище, масштабується за квадратом напруги, тобто зменшується приблизно в 3 рази. Аналогічно скорочується й пусковий струм лінії. Отже, перевагою «зірка–трикутник» є зменшення пускового струму та механічних ударних навантажень, проте недоліком – істотне зменшення пускового моменту, що обмежує застосування цього способу приводами з легким або середнім пусковим навантаженням (вентилятори, насоси з закритою засувкою тощо).

Динаміка розгону електропривода описується рівнянням руху, де різниця між електромагнітним моментом двигуна $M_{дв}$ і моментом опору навантаження M_c створює прискорення системи. Для розрахункової оцінки часу розгону часто застосовують енергетичний (інтегральний) метод:

$$t_p = \int_{\omega_0}^{\omega_1} \frac{J_{\Sigma} d\omega}{M_{дв}(\omega) - M_c(\omega)}$$

де J_{Σ} – зведений до вала двигуна сумарний момент інерції (двигун + механізм), ω_0 та ω_1 – початкова та кінцева кутові швидкості розгону, $M_{дв}(\omega)$ – момент двигуна як функція швидкості (або ковзання), $M_c(\omega)$ – момент опору навантаження. Інтеграл має фізичний зміст «накопиченого» часу, необхідного для зміни швидкості на $d\omega$ при наявному прискорювальному моменті $M_{дв} - M_c$. Важливо, що якщо на деякій ділянці $M_{дв}(\omega) \leq M_c(\omega)$, то прискорення не є додатним, і розгін до заданої швидкості стає неможливим.

У навчальних лабораторних роботах, коли момент двигуна відомий у вигляді таблиці або побудований за аналітичною залежністю (наприклад, за формулою Клосса), інтеграл зручно замінюють дискретною сумою:

$$t_p \approx \sum_k \frac{J_{\Sigma} (\omega_{k+1} - \omega_k)}{M_{дв,k} - M_{c,k}}$$

де ω_k – вузлові значення кутової швидкості, а $M_{дв, k_M}$ – відповідні значення моментів на інтервалі $[\omega_k, \omega_{k+1}]$ (часто беруть середні на інтервалі або значення в середині відрізка). Такий підхід дозволяє реалізувати розрахунок у табличній формі без складної математики, що особливо актуально за обмежень обладнання та часу.

Для коректного розрахунку часу розгону необхідно задати характеристику моменту опору $M_c(\omega)$, яка визначається типом механізму. Для вентиляторів і відцентрових насосів момент опору зазвичай зростає пропорційно квадрату швидкості (закон подібності для гідроаеродинамічних машин):

$$M_c(\omega) = M_{ном} \left(\frac{\omega}{\omega_{ном}} \right)^2$$

де $M_{ном}$ – момент опору при номінальній швидкості $\omega_{ном}$. Такий характер навантаження вважають «легким на пуску», оскільки при малих швидкостях M_c малий, і навіть відносно невеликий пусковий момент здатний забезпечити розгін. Натомість для механізмів із приблизно сталим моментом опору (конвеєри, підйомні механізми з постійним моментом, деякі типи компресорів у спрощенні) приймають:

$$M_c \approx const$$

що є важчим випадком для пуску: двигун повинен одразу забезпечити достатній момент, і зниження напруги або застосування «зірка–трикутник» може призвести до ситуації, коли $M_{п} < M_c$, тобто розгін не відбудеться.

Порядок виконання

1. Взяти механічну характеристику АД з ЛР1 (або задану).
2. Обрати тип навантаження $M_c(\omega)$.
3. Для кожного способу пуску скоригувати $M_{дв}(\omega)$ (через зміну напруги) та оцінити $I_{п}$.
4. Розрахувати t_p методом суми по інтервалах швидкості (наприклад $0 \dots 0.2 \dots 0.4 \dots 0.6 \dots 0.8 \dots 1.0 \omega_N$).
5. Порівняти: $I_{п}$, мінімальний прискорювальний момент $M_{дв} - M_c$, час пуску, ризики «непуску».

Приклад виконання

Вихідні дані

$$M_N = 50 \text{ Н}$$

$$M_{кр} = 125 \text{ Н}$$

$$\frac{M_{кр}}{M_N} = 2.5$$

$$n_s = 1500 \text{ об/хв}, n_N = 1440 \text{ об/хв}$$

$$\omega_s = \frac{2\pi n_s}{60}, \omega_N = \frac{2\pi n_N}{60}$$

$$s_N = \frac{n_s - n_N}{n_s} = 0.04$$

Навантаження – вентилятор (квадратична характеристика):

$$M_c(\omega) = M_N \left(\frac{\omega}{\omega_N} \right)^2$$

Сумарний момент інерції (для прикладу):

$$J_{\Sigma} = 1.0$$

Механічна характеристика двигуна (Клосс)

Використовуємо апроксимацію Клосса:

$$M_{\text{дв}}(s) = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s}}$$

Щоб визначити $s_{\text{кр}}$, застосовуємо умову узгодження з номінальною точкою $M(s_N) = M_N$:

$$M_N = \frac{2M_{\text{кр}}}{\frac{s_N}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s_N}} \Rightarrow \left(\frac{s_N}{s_{\text{кр}}} + \frac{s_{\text{кр}}}{s_N} \right) = \frac{2M_{\text{кр}}}{M_N} = 5$$

Розв'язання дає два корені, фізично реалістичний:

$$s_{\text{кр}} \approx 0.192$$

Зв'язок швидкості з ковзанням:

$$s = \frac{\omega_s - \omega}{\omega_s} = 1 - \frac{\omega}{\omega_s}$$

Способи пуску та корекція моменту/струму

Прямий пуск ($M_{\text{дв}}(\omega)$ як у ЛР1.)

$$I_{\text{р, прям}} \approx 6I_N$$

Беремо типове значення із діапазону $5 \dots 7I_N$.

Пуск зі зниженням напруги до 0.8U

Момент приблизно пропорційний квадрату напруги:

$$M_{\text{дв}, 0.8U}(\omega) = (0.8)^2 M_{\text{дв}}(\omega) = 0.64 M_{\text{дв}}(\omega)$$

Струм грубо масштабується за напругою:

$$I_{p,0.8U} \approx 0.8I_{p, \text{прям}} \approx 4.8I_N$$

Розрахунок часу пуску (дискретний енергетичний метод)

Формула суми:

$$t_p \approx \sum_k \Delta t_k$$

$$\Delta t_k = \frac{J_{\Sigma} \Delta \omega}{M_{\text{дв, ср, } k} - M_{\text{с, ср, } k}}$$

Беремо 5 інтервалів по швидкості:

$$0 \rightarrow 0.2\omega_N \rightarrow 0.4\omega_N \rightarrow 0.6\omega_N \rightarrow 0.8\omega_N \rightarrow \omega_N$$

$$\Delta \omega = 0.2\omega_N$$

На кожному інтервалі використовуємо середню швидкість:

$$\omega_{\text{ср}} = \{0.1, 0.3, 0.5, 0.7, 0.9\} \omega_N$$

$$M_{\text{с, ср}} = M_N (\omega_{\text{ср}} / \omega_N)^2$$

$$s_{\text{ср}} = 1 - \omega_{\text{ср}} / \omega_s$$

$$M_{\text{дв, ср}} = M_{\text{дв}}(s_{\text{ср}}) \text{ (Клосс)}$$

$$M_{\text{пр, ср}} = M_{\text{дв, ср}} - M_{\text{с, ср}}$$

$$\Delta t_k = J_{\Sigma} \Delta \omega / M_{\text{пр, ср}}$$

Інтервал	$\omega_{\text{ср.}} / \omega_N$	$n_{\text{ср, об/хв}}$	$s_{\text{ср}}$	$M_{\text{дв, ср}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$M_{\text{с, ср}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$M_{\text{пр, ср}}, \text{ Н}\cdot\text{м}$	$\Delta t, \text{ с}$	$M_{\text{дв}}(0.8U), \text{ Н}\cdot\text{м}$	$M_{\text{пр}}(0.8U), \text{ Н}\cdot\text{м}$	$\Delta t(0.8U), \text{ с}$
0–0.2 ω_N	0.10	144.00	0.90	50.72	0.50	50.22	0.60	32.46	31.96	0.94
0.2–0.4 ω_N	0.30	432.00	0.71	62.75	4.50	58.25	0.52	40.16	35.66	0.85
0.4–0.6 ω_N	0.50	720.00	0.52	81.12	12.50	68.62	0.44	51.92	39.42	0.77
0.6–0.8 ω_N	0.70	1008.00	0.33	108.90	24.50	84.40	0.36	69.69	45.19	0.67
0.8–1.0 ω_N	0.90	1296.00	0.14	117.99	40.50	77.49	0.39	75.51	35.01	0.86

Підсумкові результати та порівняння

Час пуску

$$t_{p, \text{прям}} = \sum \Delta t \approx 2.30 \text{ с}$$

$$t_{p, 0.8U} = \sum \Delta t(0.8U) \approx 4.08 \text{ с}$$

Мінімальний прискорювальний момент

$$M_{\text{пр, min}} \approx 50.22$$

$$M_{\text{пр, min}}(0.8U) \approx 31.96$$

Оскільки на всіх інтервалах $M_{\text{пр}} > 0$, пуск можливий для обох випадків (для вентилятора на малих швидкостях $M_c \approx 0$, що суттєво полегшує пуск).

Варіанти виконання роботи

№	P_N , кВт	f , Гц	p	n_N , об/хв	$M_{\text{кр}}/M_N$	U_1 , В	η	$\cos \varphi$	Тип навантаження	M_c/M_N	$J\Sigma$, кг·м ²	$k_p = I_p/I_N$	$U_{\text{пуск}}/U$
1	3.0	50	2	1425	2.7	400	0.85	0.78	Вентилятор	0.80	0.35	6.0	0.80
2	4.0	50	2	1440	2.5	400	0.86	0.80	Конвеєр	0.60	0.55	6.5	0.85
3	5.5	50	2	1455	2.4	400	0.87	0.80	Вентилятор	0.90	0.45	5.5	0.80
4	7.5	50	2	1440	2.5	400	0.88	0.82	Конвеєр	0.70	0.90	6.0	0.90
5	9.0	50	2	1460	2.4	400	0.89	0.83	Вентилятор	0.75	0.60	6.5	0.80
6	11.0	50	2	1470	2.6	400	0.90	0.84	Конвеєр	0.55	1.10	6.0	0.85
7	12.5	50	1	2900	2.1	400	0.91	0.85	Вентилятор	0.85	0.40	5.5	0.80
8	15.0	50	1	2920	2.2	400	0.91	0.86	Конвеєр	0.65	0.75	6.5	0.90
9	18.5	50	2	1480	2.1	400	0.92	0.87	Вентилятор	0.80	1.30	6.0	0.85
10	22.0	50	2	1475	2.3	400	0.92	0.86	Конвеєр	0.60	1.60	6.5	0.90
11	30.0	50	1	2950	2.0	400	0.93	0.88	Вентилятор	0.90	0.85	5.5	0.80
12	5.5	50	3	970	2.2	400	0.87	0.81	Конвеєр	0.70	1.80	6.0	0.85
13	7.5	50	3	960	2.3	400	0.88	0.82	Вентилятор	0.75	1.50	6.5	0.90
14	1.5	50	2	1390	2.8	400	0.82	0.74	Конвеєр	0.55	0.25	7.0	0.80
15	6.0	50	2	1435	2.5	400	0.88	0.82	Вентилятор	0.85	0.70	6.0	0.85

Лабораторна робота №3

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕГУЛЬОВАНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Мета: дослідити регулювання швидкості ДПС: зміною напруги якоря U_a , зміною магнітного потоку Φ (ослаблення поля), введенням додаткового опору в коло якоря R_d .

Короткі теоретичні відомості

Для двигуна постійного струму незалежного збудження (а також для двигуна паралельного збудження за умови, що напруга на обмотці збудження практично стала) електромеханічні процеси зручно описувати через систему базових рівнянь, які пов'язують електричний стан якоря, електромагнітне перетворення енергії та механічний рух вала. У такій машині магнітний потік головного поля Φ створюється обмоткою збудження і в робочому діапазоні часто вважається або сталим, або керованим струмом збудження I_f . Це дозволяє відокремити регулювання потоку (по колу збудження) від регулювання якоря (по силовому колу).

Під час обертання якоря в магнітному полі у провідниках індукується проти-ЕРС (зворотна ЕРС), яка за фізичним змістом відображає закон електромагнітної індукції та енергетичний баланс перетворення «електрика – механіка». Для ДПС вона пропорційна магнітному потоку та кутовій швидкості:

$$E = k\Phi\omega$$

$$E = k_e\omega,$$

де E – ЕРС якоря, ω – кутова швидкість (рад/с), k – конструктивний коефіцієнт машини (визначається кількістю провідників, схемою обмотки, кількістю полюсів тощо), $k_e = k\Phi$ – «коефіцієнт ЕРС» при заданому потоці.

Коло якоря описують законом Кірхгофа для напруг:

$$U_a = E + I_a R_\Sigma$$

де U_a – напруга на якорі, I_a – струм якоря, R_Σ – сумарний активний опір кола якоря. До R_Σ зазвичай включають опір обмотки якоря R_a , перехідний опір щіток (у спрощенні як еквівалентний активний опір), а також можливий додатковий пусковий/регулювальний резистор. Фізично це рівняння означає, що прикладена напруга витрачається на «компенсацію» зворотної ЕРС і на падіння напруги на активному опорі через протікання струму.

Електромагнітний момент ДПС пропорційний магнітному потоку та струму якоря:

$$M = k\Phi I_a$$

Це фундаментальна властивість ДПС: при сталому Φ момент прямо пропорційний I_a , що робить такі двигуни зручними для систем керування моментом. Аналогічно можна ввести коефіцієнт моменту:

$$k_m = k\Phi$$

$$M = k_m I_a$$

У СІ за узгоджених одиниць зазвичай мають $k_e = k_m$ (коефіцієнти ЕРС і моменту рівні чисельно), що відображає енергетичну взаємність електромеханічного перетворення.

Виведення рівняння швидкості:

$$U_a = k\Phi\omega + I_a R_\Sigma$$

$$\omega = \frac{U_a - I_a R_\Sigma}{k\Phi}$$

Ця формула показує два ключові механізми формування швидкості:

1. напруга U_a підвищує швидкість (через зростання зворотної ЕРС у робочій точці);
2. падіння $I_a R_\Sigma$ зменшує швидкість (чим більший струм навантаження, тим нижча швидкість при сталому U_a).

Щоб отримати механічну характеристику, потрібно виключити струм I_a через момент.

$$I_a = \frac{M}{k\Phi}$$

$$\omega = \frac{U_a - \left(\frac{M}{k\Phi}\right) R_\Sigma}{k\Phi} = \frac{U_a}{k\Phi} - \frac{R_\Sigma}{(k\Phi)^2} M.$$

Механічна характеристика ДПС незалежного (паралельного) збудження у першому наближенні є лінійною:

$$\omega = \omega_0 - \beta M$$

$$\omega_0 = \frac{U_a}{k\Phi}, \quad \beta = \frac{R_\Sigma}{(k\Phi)^2}.$$

Фізичний зміст ω_0 і β :

1. ω_0 – ідеальна швидкість холостого ходу (при $M = 0$, тобто $I_a = 0$). У реальному двигуні абсолютний холостий хід недосяжний через механічні втрати та втрати в сталі, тому фактична швидкість холостого ходу буде трохи меншою.
2. β – крутизна механічної характеристики (швидкісна «пружність»): чим більший R_Σ , тим сильніше падає швидкість зі зростанням моменту. Чим більший потік Φ , тим менша β , тобто характеристика «жорсткіша» (швидкість менше просідає під навантаженням).

Наслідки для регулювання швидкості

1. Зміна напруги якоря U_a : змінює ω_0 майже без зміни β – вертикальне «зсування» характеристики. Це основний енергоефективний спосіб у сучасних перетворювачах.
2. Додавання опору в коло якоря ($R_\Sigma \uparrow$): збільшує β – характеристика стає «м'якою», швидкість сильніше залежить від навантаження; метод простий, але з великими втратами на резисторі.

3. Ослаблення поля ($\Phi \downarrow$) зміною струму збудження I_f : збільшує ω_0 (можна отримати швидкості вище номінальної), але одночасно збільшує β і зменшує максимально допустимий момент (бо $M = k\Phi I_a$).

Порядок виконання

1. Задати параметри: U_{aN} , R_Σ , $k\Phi_N$ (або визначити з номінальних даних).
2. Побудувати $\omega(M)$ для:

$$U_a = 1.0U_N, 0.8U_N, 0.6U_N \text{ при } \Phi = \Phi_N$$
$$\Phi = 1.0\Phi_N, 0.8\Phi_N, 0.6\Phi_N \text{ при } U_a = U_N$$
$$R_\Sigma + R_d \text{ (збільшення нахилу характеристики)}$$

3. Порівняти: діапазон регулювання, жорсткість характеристики, втрати.

Приклад виконання

Вихідні дані

$$U_{aN} = 220 \text{ В}$$

$$n_N = 1500 \text{ об/хв}$$

$$I_{aN} = 20 \text{ А}$$

$$R_\Sigma = 0.6 \text{ } \Omega$$

Визначення $k\Phi_N$ за номінальними даними

Номінальна кутова швидкість

$$\omega_N = \frac{2\pi n_N}{60} = \frac{2\pi \cdot 1500}{60} = 157.08 \text{ рад/с}$$

ЕРС якоря в номіналі

$$E_N = U_{aN} - I_{aN}R_\Sigma = 220 - 20 \cdot 0.6 = 208 \text{ В}$$

Коефіцієнт $k\Phi_N$

$$k\Phi_N = \frac{E_N}{\omega_N} = \frac{208}{157.08} = 1.324$$

Номінальний момент

$$M_N = k\Phi_N I_{aN} = 1.324 \cdot 20 = 26.48$$

Побудова $\omega(M)$ для $U_a = 220$ В та $U_a = 180$ В

$$\omega = \frac{U_a}{k\Phi_N} - \frac{R_\Sigma}{(k\Phi_N)^2} M$$

Обчислюємо коефіцієнти (при $\Phi = \Phi_N$, $R_\Sigma = 0.6 \Omega$):

$$\beta = \frac{0.6}{(1.324)^2} = 0.3422$$

Для $U_a = 220$:

$$\omega_0 = \frac{220}{1.324} = 166.14$$

$$\omega = 166.14 - 0.3422M$$

Для $U_a = 180$:

$$\omega_0 = \frac{180}{1.324} = 135.93$$

$$\omega = 135.93 - 0.3422M$$

	A	B	C	D
1	U_a, V	M, N·m	ω, rad/s	n, rpm
2	220	0	166.14	1586.54
3	220	10	162.72	1553.86
4	220	20	159.3	1521.19
5	220	26.5	157.07	1499.95
6	180	0	135.93	1298.08
7	180	10	132.51	1265.4
8	180	20	129.09	1232.72
9	180	26.5	126.87	1211.48

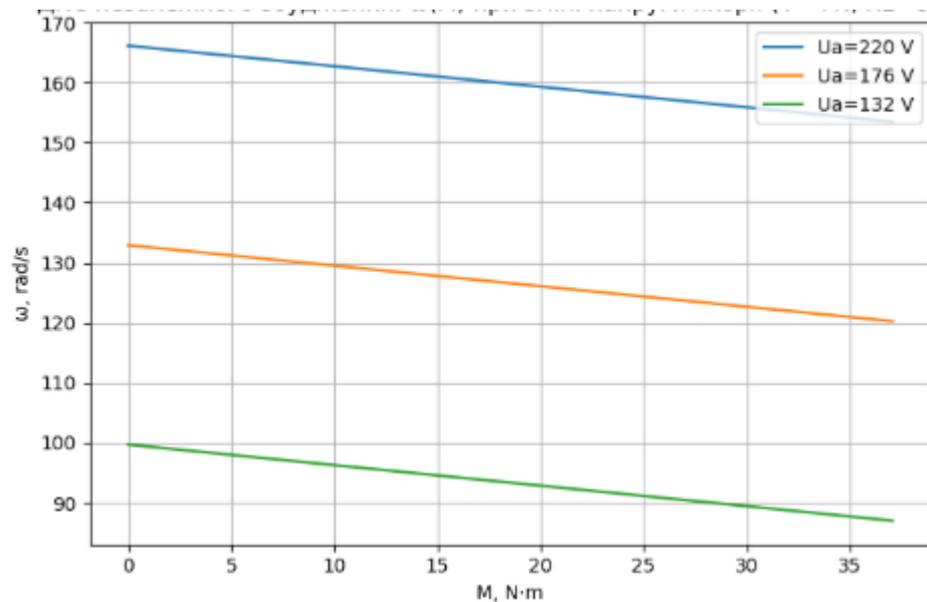
Регулювання напругою якоря U_a (при $\Phi = \Phi_N$)

Побудовано $\omega(M)$ для:

$$U_a = 1.0U_N = 220 \text{ В}$$

$$U_a = 0.8U_N = 176 \text{ В}$$

$$U_a = 0.6U_N = 132 \text{ В}$$



Висновок: змінюється ω_0 (перетин), а β незмінна – характеристика зсувається вниз/вгору паралельно; метод енергоефективний (особливо з тиристорним/ШІМ-перетворювачем).

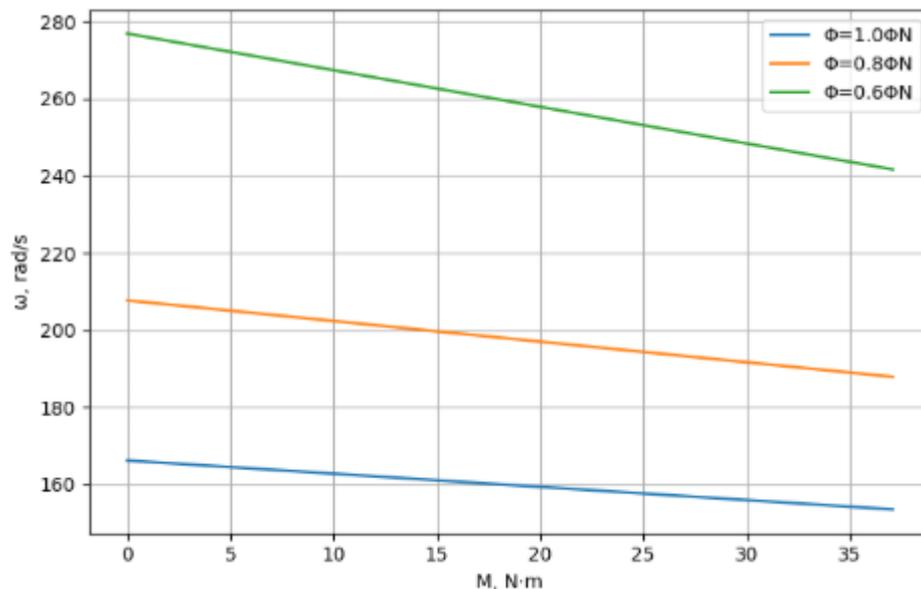
Регулювання потоком (ослаблення поля) Φ (при $U_a = U_N$)

Побудовано $\omega(M)$ для:

$$\Phi = 1.0\Phi_N$$

$$\Phi = 0.8\Phi_N$$

$$\Phi = 0.6\Phi_N$$



Висновок: при зменшенні Φ швидкість холостого ходу ω_0 зростає, але β теж зростає (характеристика стає «м'якшою»). Також падає здатність розвивати

момент, бо $M = k\Phi I_a$: при меншому Φ для того ж моменту потрібен більший I_a (обмеження по струму/нагріву).

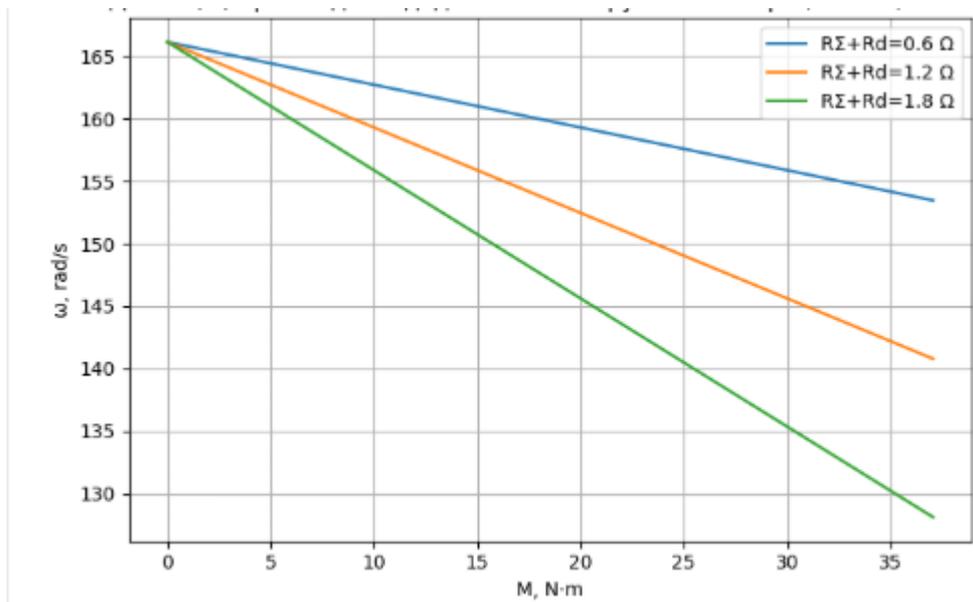
Регулювання додатковим опором R_d у колі якоря

Розглянуто:

$$R_d = 0$$

$$R_d = 0.6 \Omega \text{ (тобто } R_\Sigma + R_d = 1.2 \Omega \text{)}$$

$$R_d = 1.2 \Omega \text{ (тобто } R_\Sigma + R_d = 1.8 \Omega \text{)}$$



Висновок: ω_0 практично та сама, але β зростає пропорційно R – характеристика різко «м'якша», швидкість сильно просідає з навантаженням.

Метод простий, але має найбільші втрати:

$$P_{вт, R} = I_a^2 R_d$$

Тобто при великих моментах (струмах) втрати на резисторі різко зростають.

Варіанти виконання роботи

№	$U_{aN},$ В	$n_N,$ об/хв	$I_{aN},$ А	$R_{\Sigma},$ Ω	U_a для регул., В (0.8/0.6)	Φ для регул. (0.8/0.6)	R_d (1), Ω	R_d (2), Ω
1	220	1500	20	0.60	176 / 132	0.8 / 0.6	0.40	0.80
2	220	1500	25	0.50	176 / 132	0.8 / 0.6	0.30	0.70
3	220	1500	16	0.80	176 / 132	0.8 / 0.6	0.50	1.00
4	220	1500	32	0.35	176 / 132	0.8 / 0.6	0.25	0.60
5	220	1200	22	0.70	176 / 132	0.8 / 0.6	0.40	0.90
6	220	1000	18	0.90	176 / 132	0.8 / 0.6	0.60	1.20
7	110	1500	30	0.30	88 / 66	0.8 / 0.6	0.20	0.50
8	110	1500	18	0.55	88 / 66	0.8 / 0.6	0.30	0.70
9	110	1200	24	0.40	88 / 66	0.8 / 0.6	0.25	0.60
10	110	1000	20	0.65	88 / 66	0.8 / 0.6	0.40	0.90
11	180	1500	20	0.70	144 / 108	0.8 / 0.6	0.50	1.00
12	180	1500	28	0.45	144 / 108	0.8 / 0.6	0.30	0.80
13	180	1200	26	0.55	144 / 108	0.8 / 0.6	0.35	0.90
14	180	1000	18	0.85	144 / 108	0.8 / 0.6	0.60	1.20
15	220	3000	15	1.10	176 / 132	0.8 / 0.6	0.80	1.50

Лабораторна робота №4

ВИБІР ЕЛЕКТРОДВИГУНА ТА АНАЛІЗ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ДЛЯ ЗАДАНОГО МЕХАНІЗМУ

Мета: вибрати тип двигуна (АД/ДПС/СД тощо) та номінал P_N . Перевірити по моменту, нагріву (еквівалентні значення), пуску, перевантаженню. Виконати аналіз режимів: тривалий/повторно-короткочасний, розгін/гальмування.

Короткі теоретичні відомості

Статичний розрахунок виконується для усталеного режиму, коли прискорення відсутнє, а момент двигуна врівноважує момент опору механізму. Основна величина, яку визначають на цьому етапі потрібна механічна потужність на валу робочого механізму.

Якщо відомий момент опору M_c на валу механізму та кутова швидкість ω , то механічна потужність:

$$P_{\text{мех}} = M_c \omega$$

Якщо між двигуном і механізмом є передача (редуктор, пасова передача тощо), то необхідно врахувати її ККД $\eta_{\text{перед}}$. У такому разі потужність, яку має забезпечити двигун, зростає:

$$P_{\text{дв,ст}} = \frac{P_{\text{мех}}}{\eta_{\text{перед}}} = \frac{M_c \omega}{\eta_{\text{перед}}}$$

Аналогічно, якщо відома тягово-динамічна постановка задачі (сила F та лінійна швидкість v), то:

$$P_{\text{мех}} = Fv$$

$$P_{\text{дв,ст}} = \frac{Fv}{\eta_{\text{перед}}}$$

Динамічний розрахунок потрібний для аналізу пуску, розгону та перехідних процесів. У перехідному режимі вирішальним є прискорювальний момент, тобто різниця між моментом двигуна та моментом опору:

$$M_{\text{прис}}(\omega) = M_{\text{дв}}(\omega) - M_c(\omega)$$

Ця різниця визначає знак і величину прискорення: якщо $M_{\text{прис}} > 0$, швидкість зростає. Якщо $M_{\text{прис}} < 0$, привід не розганяється (або сповільнюється). Необхідна умова пуску та розгону формулюється так:

$$M_{\text{дв}}(\omega) > M_c(\omega)$$

Практично це означає, що на всіх швидкостях від $\omega \approx 0$ до $\omega = \omega_N$ має існувати додатний запас моменту. Якщо на певній ділянці $M_{\text{дв}} \leq M_c$, то розгін «застрягає» на цій швидкості (ризик «непуску»), особливо для навантажень із майже сталим моментом (конвеєри, підйомні механізми). Для вентиляторів/насосів (де $M_c \sim \omega^2$) пуск часто легший, бо на малих швидкостях M_c малий.

Для тривалого режиму роботи важливо, щоб двигун не перегрівався. Оскільки нагрів обмоток і силових елементів у першому наближенні пропорційний втратам I^2R , а струм у багатьох приводах приблизно пропорційний моменту, то для циклічного навантаження застосовують еквівалентний (RMS) момент.

Для циклу, що складається з ділянок із моментами M_i протягом часу t_i , еквівалентний момент:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i}}$$

Це значення є таким «сталим моментом», який викликав би той самий тепловий ефект, що й реальний змінний цикл. Перевірка за нагрівом у найпростішому вигляді:

$$M_{\text{екв}} \leq M_N$$

де M_N – номінальний момент двигуна. Для ДПС або приводів з ПЧ часто еквівалентність контролюють по струму (RMS-струм), бо саме він безпосередньо пов'язаний із тепловими втратами.

Після визначення потрібної механічної потужності механізму та врахування передачі виконують вибір двигуна за умовою забезпечення потрібної потужності з урахуванням ККД двигуна $\eta_{\text{дв}}$ і коефіцієнта запасу $K_{\text{зап}}$, який враховує невизначеність вихідних даних, можливі перевантаження та експлуатаційні фактори:

$$P_{\text{дв}} \geq \frac{P_{\text{потр}}}{\eta_{\text{дв}} \eta_{\text{перед}}} K_{\text{зап}}$$

Зазвичай для навчальних і інженерних оцінок беруть:

$$K_{\text{зап}} \approx 1.1 \dots 1.3.$$

Тобто двигун підбирають так, щоб він не працював «впритул» до межі можливостей у номінальному режимі, а мав технологічний резерв.

Порядок виконання

1. За варіантом: механізм, цикл, передача i , η , графік $M_c(t)$ або $F(t)$.
2. Обчислити потрібні $M_c(\omega)$, $P(t)$.
3. Вибрати тип двигуна (обґрунтувати: регулювання/пуск/точність).
4. Розрахувати $M_{\text{екв}}$ та потрібну номінальну потужність.
5. Сформулювати висновок.

Приклад виконання

Вихідні дані

Механізм: конвеєр.

Потрібний момент на валу механізму:

$$M_m = 60 \text{ при } n_m = 200 \text{ об/хв}$$

Передача:

передаточне число $i = 6$

ККД передачі $\eta_{\text{перед}} = 0.92$

Режим навантаження (цикл):

60% часу: $M_m = 60$

40% часу: $M_m = 30$

Статичний розрахунок (потужність)

Потужність на валу механізму для обертального руху

$$P_m = \frac{M_m \cdot n_m}{9550} \quad [\text{кВт}]$$
$$P_m = \frac{60 \cdot 200}{9550} = 1.256 \text{ кВт}$$

Потужність, потрібна на валу двигуна (з урахуванням ККД передачі)

$$P_{\text{дв,потр}} = \frac{P_m}{\eta_{\text{перед}}} = \frac{1.256}{0.92} = 1.365 \text{ кВт}$$

Врахування запасу

$$K_{\text{зап}} = 1.2$$

$$P_{\text{дв}} \geq P_{\text{дв,потр}} \cdot K_{\text{зап}} = 1.365 \cdot 1.2 = 1.64 \text{ кВт}$$

Вибір стандартного номіналу: $P_N = 2.2 \text{ кВт}$.

Узгодження швидкості (вибір типу двигуна/привода), потрібна швидкість на валу двигуна (за заданим i):

$$n_{\text{дв}} \approx i \cdot n_m = 6 \cdot 200 = 1200 \text{ об/хв}$$

Типові синхронні швидкості АД при $f=50$ Гц:

1. 4 полюси: ≈ 1500 об/хв
2. 6 полюсів: ≈ 1000 об/хв

Для точного узгодження можливі обґрунтовані рішення:

1. АД + ПЧ (частотний перетворювач) дозволяє встановити $n \approx 1200$ об/хв при заданому $i=6$.
2. Зміна передаточного числа, якщо обрати 4-полюсний АД ≈ 1500 об/хв, потрібно $i^* = 1500/200 = 7.5$.
3. 6-полюсний АД ≈ 1000 об/хв і уточнення $i^* = 1000/200 = 5$.

Приймаємо найтипівіше для конвеєра рішення – асинхронний двигун 2.2 кВт з ПЧ (бо конвеєру часто потрібне регулювання швидкості, плавний пуск і менші пускові струми).

Перерахунок моментів на вал двигуна та перевірка нагріву (еквівалентний момент)

Для редуктора (двигун швидше, механізм повільніше) момент на валу двигуна менший:

$$M_{\text{дв}} = \frac{M_m}{i \cdot \eta_{\text{перед}}}$$

Моменти на валу двигуна для двох рівнів навантаження

Для 60 Н·м (60% часу):

$$M_{\text{дв},60} = \frac{60}{6 \cdot 0.92} = 10.87 \text{ Н}$$

Для 30 Н·м (40% часу):

$$M_{\text{дв},30} = \frac{30}{6 \cdot 0.92} = 5.43 \text{ Н}^{\cdot}$$

Еквівалентний момент за цикл (RMS)

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i}}$$

Оскільки $t_1 = 0.6T$, $t_2 = 0.4T$, $\sum t_i = T$:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{(10.87)^2 \cdot 0.6 + (5.43)^2 \cdot 0.4}$$

$$(10.87)^2 = 118.16, \quad 118.16 \cdot 0.6 = 70.90$$

$$(5.43)^2 = 29.48, \quad 29.48 \cdot 0.4 = 11.79$$

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{70.90 + 11.79} = \sqrt{82.69} = 9.09 \text{ Н}$$

Перевірка за номінальним моментом обраного двигуна

Для двигуна $P_N=2.2$ кВт і (умовно) $n_N \approx 1500$ об/хв:

$$M_N = \frac{9550 \cdot P_N}{n_N} = \frac{9550 \cdot 2.2}{1500} = 14.0 \text{ Н}$$

Перевірка нагріву:

$$M_{\text{екв}} \leq M_N$$

$$9.09 \leq 14.0$$

Умова виконується, обраний двигун за нагрівом підходить.

Варіанти виконання роботи

№	Механізм	Дані шв. механізму	Передача (i)	$\eta_{\text{перед}}$	Цикл навантаження (у % часу)
1	Конвеєр (постійний момент)	$n_m=200$ об/хв	6.0	0.92	60%: (M=60) Н·м; 40%: (M=30) Н·м
2	Конвеєр (важчий пуск)	$n_m=160$ об/хв	7.5	0.90	50%: (M=85) Н·м; 30%: (M=55) Н·м; 20%: (M=30) Н·м
3	Мішалка/змішувач	$n_m=120$ об/хв	10.0	0.88	70%: (M=110) Н·м; 30%: (M=70) Н·м
4	Підіймальний механізм (еквівалент)	$n_m=90$ об/хв	15.0	0.85	40%: (M=160) Н·м; 40%: (M=90) Н·м; 20%: (M=30) Н·м
5	Вентилятор (квадратичне навантаження)	$n_m=980$ об/хв	1.6	0.95	50%: (M=18) Н·м; 30%: (M=12) Н·м; 20%: (M=6) Н·м
6	Насос відцентровий	$n_m=1450$ об/хв	1.0	0.98	60%: (M=22) Н·м; 25%: (M=16) Н·м; 15%: (M=8) Н·м
7	Компресор (умовно сталий момент)	$n_m=960$ об/хв	1.5	0.93	50%: (M=65) Н·м; 30%: (M=45) Н·м; 20%: (M=25) Н·м
8	Дробарка (ударний режим)	$n_m=300$ об/хв	5.0	0.90	30%: (M=140) Н·м; 50%: (M=90) Н·м; 20%: (M=40) Н·м
9	Лебідка/тяговий привід (лінійний)	$v=0.60$ м/с	12.0	0.86	40%: (F=2200) Н; 40%: (F=1400) Н; 20%: (F=600) Н
10	Подавач/транспортёр стрічковий	$n_m=240$ об/хв	6.5	0.91	60%: (M=75) Н·м; 25%: (M=50) Н·м; 15%: (M=25) Н·м
11	Центрифуга (змінний момент)	$n_m=1100$ об/хв	1.3	0.94	20%: (M=40) Н·м; 50%: (M=25) Н·м; 30%: (M=10) Н·м
12	Верстатний привід (точність)	$n_m=600$ об/хв	2.5	0.92	50%: (M=35) Н·м; 30%: (M=25) Н·м; 20%: (M=15) Н·м
13	Екструдер (важкий режим)	$n_m=80$ об/хв	20.0	0.84	70%: (M=220) Н·м; 30%: (M=140) Н·м
14	Тягова система (лінійний рух)	$v=0.35$ м/с	9.0	0.88	50%: (F=1800) Н; 30%: (F=1100) Н; 20%: (F=500) Н
15	Конвеєр (легший режим)	$n_m=180$ об/хв	8.0	0.90	40%: (M=65) Н·м; 40%: (M=45) Н·м; 20%: (M=20) Н·м

Однаково для всіх варіантів:

1. Для моментного навантаження:

$$P_m = \frac{M_m n_m}{9550} \text{ (кВт)}$$

2. Для силового (лінійного):

$$P_m = Fv/1000 \text{ (кВт)},$$

3. Потужність на валу двигуна:

$$P_{\text{дв,потр}} = \frac{P_m}{\eta_{\text{перед}}}$$

4. Момент на валу двигуна для редуктора:

$$M_{\text{дв}} = \frac{M_m}{i \eta_{\text{перед}}}$$

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum M_{\text{дв},i}^2 t_i}{\sum t_i}}$$

5. Запас: $K_{\text{зап}}=1.2$ (якщо не задано інше).

Лабораторна робота №5

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМИ РЕГУЛЮВАННЯ ШВИДКОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА

Мета: дослідити замкнену систему регулювання швидкості (контур швидкості), оцінити:

- статичну похибку,
- перехідний процес (перерегулювання, час встановлення),
- вплив параметрів регулятора (P/PI).

Короткі теоретичні відомості

Автоматизований електропривод у задачах регулювання швидкості зазвичай розглядають як систему, що перетворює електричну енергію у механічну та забезпечує рух виконавчого механізму. У загальному випадку електропривод є багатоланковою системою (електромагнітні процеси в двигуні, перетворювач, механіка). Однак для розрахункового типу дослідження, коли відсутня можливість експериментального відпрацювання та детального ідентифікування параметрів, доцільним є застосування зведеної механічної моделі, яка зберігає головні закономірності динаміки швидкості. Основою є рівняння динаміки обертального руху, що впливає з другого закону Ньютона для обертання:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M - M_c$$

де J_{Σ} – зведений момент інерції (двигун + муфти/редуктор + робоча машина, приведені до вала двигуна), ω – кутова швидкість, M – електромагнітний момент двигуна, M_c – момент опору (навантаження), який виступає як збурення для каналу швидкості.

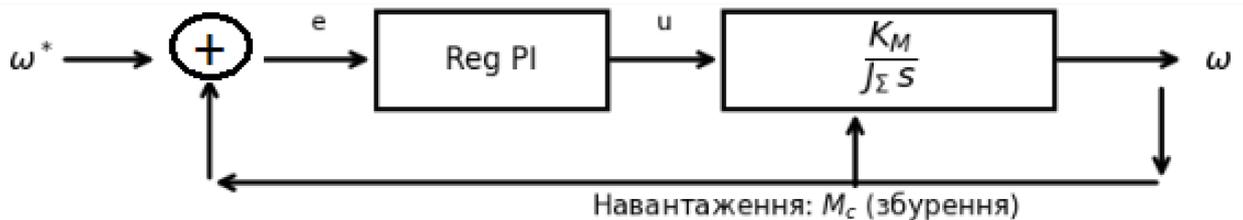
Це рівняння відображає, що прискорення (зміна швидкості) пропорційне різниці моментів: рушійного та навантажувального.

Для побудови лінійної моделі керування застосовують лінеаризацію відносно робочої точки. У багатьох режимах (особливо при використанні силового перетворювача та швидкого струмового контуру) момент двигуна можна наближено вважати пропорційним керуючому сигналу u :

$$M = K_M u,$$

де K_M – коефіцієнт підсилення за моментом (узагальнений коефіцієнт перетворення керування у момент). Підстановка дає лінійне диференціальне рівняння:

$$J_\Sigma \frac{d\omega}{dt} = K_M u - M_c$$



Перейдемо до операторної форми (перетворення Лапласа за нульових початкових умов). Для каналу $u - \omega$:

$$J_\Sigma s \Omega(s) = K_M U(s) - M_c(s)$$

Якщо розглядати об'єкт без збурення (або при аналізі номінального каналу керування), маємо передавальну функцію:

$$W_o(s) = \frac{\Omega(s)}{U(s)} = \frac{K_M}{J_\Sigma s}$$

Механічна частина в каналі керування швидкістю є інтегрувальною ланкою (астатичною) з коефіцієнтом K_M/J_Σ . У практичних інтерпретаціях для спрощення часто кажуть про «аперіодичну» поведінку швидкості, маючи на увазі безколивний (інерційний) характер реакції механіки; однак строго за передавальною функцією це інтегратор, а аперіодична ланка першого порядку з'являється, якщо додати механічне/електромагнітне згасання або внутрішні

швидкі контури, що формують еквівалентний полюс типу $(Ts+1)^{-1}$. У межах розрахункової ЛР прийнята модель $K_M/(J_\Sigma s)$ є допустимим мінімальним описом.

У типовому контурі швидкості формується сигнал похибки:

$$e(t) = \omega^*(t) - \omega(t)$$

де $\omega^*(t)$ – задавання швидкості. Далі регулятор формує керування $u(t)$, яке подається на об'єкт (двигун + механізм). Зворотний зв'язок за швидкістю забезпечує компенсацію збурень і стабілізацію режиму.

PI-регулятор (пропорційно-інтегральний) задається:

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int e(t) dt$$

Де K_p – пропорційний коефіцієнт (формує реакцію, пропорційну миттєвій похибці), K_i – інтегральний коефіцієнт (накопичує похибку в часі та формує коригувальну дію).

У операторній формі:

$$W_{PI}(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s}$$

Фізична інтерпретація: пропорційна частина підвищує швидкодію та жорсткість системи, але не усуває статичну похибку при сталих збуреннях. Інтегральна частина створює додаткову астатичність у замкненій системі, завдяки чому забезпечується компенсація сталого навантаження і зменшення/усунення усталеної похибки.

P-регулятор (без інтегрування) – якщо використати лише пропорційний закон:

$$u(t) = K_p e(t)$$

то при сталому навантаженні $M_c = \text{const}$ у режимі усталеного руху $d\omega/dt=0$, отже з рівняння механіки:

$$0 = K_M u - M_c$$

$$u = \frac{M_c}{K_M}$$

Але $u=K_p e$, тому усталена похибка:

$$e_{уст} = \frac{M_c}{K_M K_p}$$

Це означає, чим більше K_p та K_M , тим менша статична похибка, однак повністю до нуля вона не зникає (за сталого M_c).

У РІ-регуляторі інтегральна дія підлаштовує u так, щоб середня похибка прагнула до нуля. Для сталих задавання і сталого збурення інтегратор забезпечує умову:

$$e_{уст} \approx 0.$$

за умови стійкості системи та відсутності обмежень насичення/нелінійностей. Практично це означає, що система здатна відновлювати швидкість до заданої навіть при прикладенні сталого моменту навантаження.

Момент навантаження M_c у цій моделі діє як адитивне збурення на механічній частині, тобто входить зі знаком «мінус» у рівняння руху. У структурному поданні це відповідає введенню збурення на вході об'єкта (в суматор моментів). Така постановка є типовою для аналізу робастності та жорсткості електропривода щодо змін навантаження.

Порядок виконання

1. Задати J_Σ , K_M , закон навантаження $M_c(\omega)$ або $M_c=\text{const}$.
2. Вибрати тип регулятора: Р і РІ.
3. Для Р розрахувати $e_{уст}$, оцінити час перехідного процесу:

$$T \approx \frac{J_\Sigma}{K_M K_p}$$

4. Для РІ підібрати K_p, K_i за умовою потрібного $T_{уст}$.
5. Імітувати перехідний процес розрахунком по кроках часу Δt :

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \frac{\Delta t}{J_{\Sigma}} (K_M u_k - M_{c,k})$$

6. Порівняти Р та PI (похибка, швидкодія).

Приклад виконання

Задано:

1. $J_{\Sigma}=0.25$ кг/м²
2. $K_M=40$
3. $M_c=20$ (сталий момент навантаження)
4. $\omega^*=100$ рад/с
5. початкова умова: $\omega(0)=0$

Р-регулятор

Вибір коефіцієнта:

$$K_p = 0.05$$

Для Р-регулятора при сталому навантаженні:

$$e_{уст} = \frac{M_c}{K_M K_p}$$

$$e_{уст} = \frac{20}{40 \cdot 0.05} = \frac{20}{2} = 10 \text{ рад/с.}$$

$$\omega_{уст} = \omega^* - e_{уст} = 100 - 10 = 90 \text{ рад/с.}$$

Оцінка сталої часу для замкненого контуру з Р (для даної моделі):

$$T = \frac{J_{\Sigma}}{K_M K_p} = \frac{0.25}{2} = 0.125 \text{ с.}$$

Оцінка часу встановлення:

$$T_{уст} \approx 4T \approx 0.5 \text{ с}$$

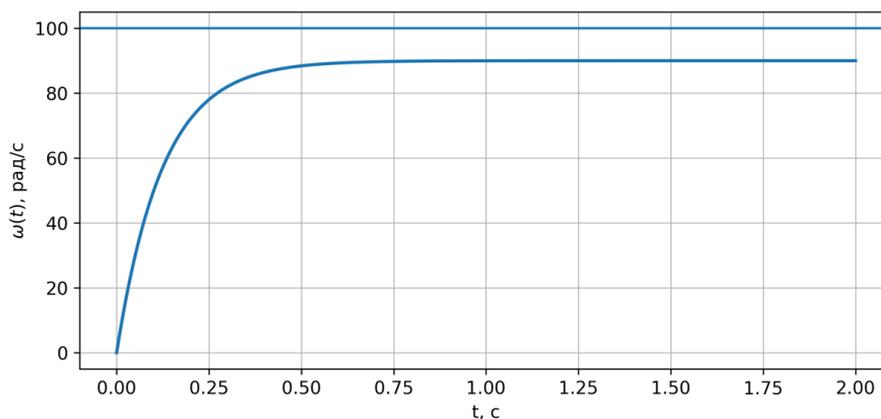
Моделювання по кроках, демонстрація 10 кроків. Задаємо $\Delta t=0.02$ с, $\omega_0=0$:

$$e_k = \omega^* - \omega_k, \quad u_k = K_p e_k,$$

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \Delta t \cdot \frac{K_M u_k - M_c}{J_\Sigma}$$

Результати Р-регулятора

k	t, c	ω_k , рад/с	e_k	u_k	ω_{k+1} , рад/с
0	0.00	0.000	100.000	5.000	14.400
1	0.02	14.400	85.600	4.280	26.496
2	0.04	26.496	73.504	3.675	36.657
3	0.06	36.657	63.343	3.167	45.192
4	0.08	45.192	54.808	2.740	52.361
5	0.10	52.361	47.639	2.382	58.383
6	0.12	58.383	41.617	2.081	63.442
7	0.14	63.442	36.558	1.828	67.691
8	0.16	67.691	32.309	1.615	71.261
9	0.18	71.261	28.739	1.437	74.259



Перехідний процес швидкості $\omega(t)$ для Р-регулятора

Швидкість зростає, але в усталеному режимі буде ≈ 90 рад/с, тобто похибка ≈ 10 рад/с не зникає.

PI-регулятор

Вибір коефіцієнтів:

$$K_p = 0.05,$$

$$K_i = 1.0 \text{ c}^{-1}$$

Теоретично для сталого навантаження PI забезпечує:

$$e_{уст} \rightarrow 0$$

Моделювання по кроках, 10 кроків. Задаємо $\Delta t=0.02\text{с}$, $\omega_0=0$.
Дискретизація інтегратора:

$$I_k = I_{k-1} + e_k \Delta t.$$

Керування:

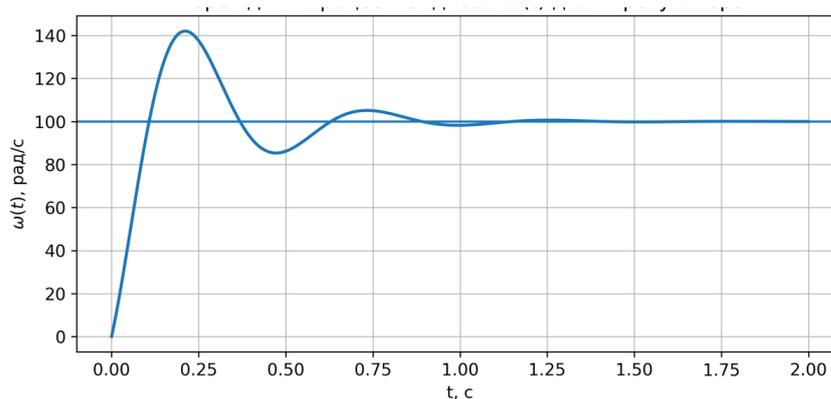
$$u_k = K_p e_k + K_i I_k.$$

Оновлення швидкості:

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \Delta t \cdot \frac{K_M u_k - M_c}{J_\Sigma}$$

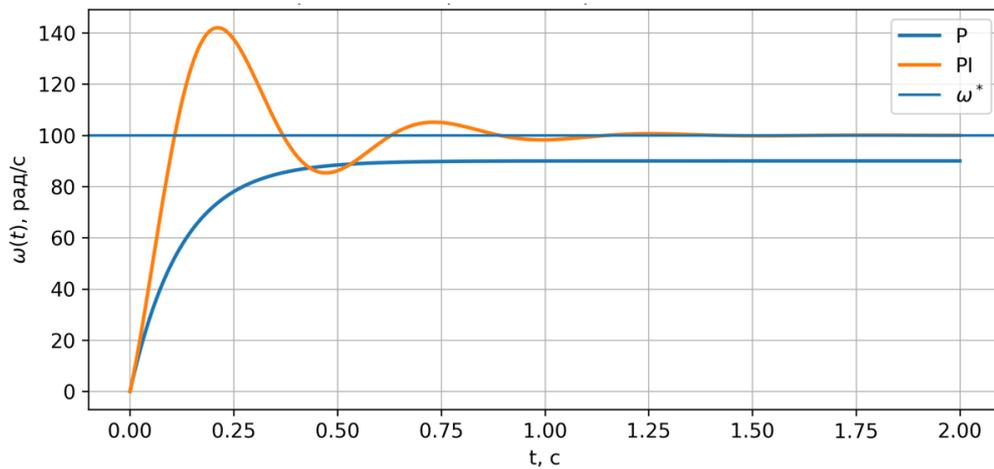
Результати ПІ-регулятора

k	t, с	ω_k	e_k	$I_k = \sum e \Delta t$	u_k	ω_{k+1}
0	0.00	0.000	100.000	2.000	7.000	20.800
1	0.02	20.800	79.200	3.584	7.544	43.341
2	0.04	43.341	56.659	4.717	7.550	65.901
3	0.06	65.901	34.099	5.399	7.104	87.034
4	0.08	87.034	12.966	5.658	6.307	105.616
5	0.10	105.616	-5.616	5.546	5.265	120.865
6	0.12	120.865	-20.865	5.129	4.086	132.339
7	0.14	132.339	-32.339	4.482	2.865	139.907
8	0.16	139.907	-39.907	3.684	1.689	143.711
9	0.18	143.711	-43.711	2.810	0.624	144.108



Перехідний процес швидкості $\omega(t)$ для ПІ-регулятора

ПІ швидко виводить систему до заданої, але при вибраних K_p, K_i є перерегулювання (швидкість перевищує 100 рад/с). Надалі інтегральна дія компенсує сталу похибку, і система повертається до ω^* .



Порівняння перехідних процесів $\omega(t)$ для P та PI

P-регулятор простий, швидкодія визначається:

$$T = \frac{J_{\Sigma}}{K_M K_P}$$

Але при сталому навантаженні є статична похибка:

$$e_{уст} = \frac{M_c}{K_M K_P} = 10 \text{ рад/с.}$$

PI-регулятор забезпечує майже нульову усталену похибку, але при невдалому виборі K_i можливі перерегулювання та коливальність, тобто параметри слід підбирати за вимогами до $T_{уст}$ і допустимого перерегулювання.

Варіанти виконання роботи

№	J_{Σ} , кг·м ²	K_M , Н·м/од.	Навантаження M_c , Н·м	ω^* , рад/с	Для P: K_P
1	0.20	35	$M_c=18$ (const)	90	0.06
2	0.30	45	$M_c=22$ (const)	110	0.05
3	0.18	50	$M_c=16$ (const)	120	0.04
4	0.25	40	$M_c=20$ (const)	100	0.05
5	0.40	55	$M_c=30$ (const)	130	0.035
6	0.22	38	$M_c=15$ (const)	80	0.07
7	0.28	42	$M_c=24$ (const)	95	0.055
8	0.35	48	$M_c=26$ (const)	115	0.045
9	0.16	30	$M_c=12$ (const)	70	0.08
10	0.32	60	$M_c=28$ (const)	140	0.03
11	0.24	45	$M_c(\omega)=12+0.06$	100	0.05
12	0.27	50	$M_c(\omega)=10+0.08$	120	0.04
13	0.33	52	$M_c(\omega)=14+0.10$	110	0.045
14	0.19	36	$M_c(\omega)=9+0.05$	85	0.07
15	0.45	58	$M_c(\omega)=18+0.12$	130	0.035

Лабораторна робота №6

ДОСЛІДЖЕННЯ ПУСКОВИХ І ГАЛЬМІВНИХ РЕЖИМІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА НА БАЗІ РЕЛЕЙНИХ СИСТЕМ

Мета: дослідити дискретне (релейне) керування під час пуску/гальмування: пуск прямий/ступінчастий та гальмування: противмиканням (plugging), динамічне (DC-injection), механічне (умовно). Оцінити $t_{\text{пуск}}$, $t_{\text{гальм}}$, пікові струми/моменти (наближено), енерговитрати.

Короткі теоретичні відомості

У релейних (дискретних) системах автоматичного керування керуючий сигнал $u(t)$ приймає скінченну множину рівнів. Найпоширенішим є двопозиційний закон керування $u \in \{0,1\}$, який реалізується контакторною апаратурою або логічними пристроями та забезпечує перемикання режимів привода між «увімкнено/вимкнено» (або «пуск/відключення», «рух/гальмування»). З метою підвищення завадостійкості та усунення частих перемикань у зоні заданої швидкості застосовують гістерезис (зону нечутливості), що формує дві різні межі перемикання при зростанні та спаданні керованої величини.

Двопозиційний релейний закон з гістерезисом:

Нехай $\omega(t)$ – кутова швидкість, ω^* – задане значення швидкості, $\Delta > 0$ – напівширина зони нечутливості. Тоді двопозиційний закон керування з гістерезисом може бути поданий у вигляді:

$$u(t) = \begin{cases} 1, & \omega(t) < \omega^* - \Delta \\ 0, & \omega(t) > \omega^* + \Delta \end{cases}$$

У проміжному інтервалі $\omega^* - \Delta \leq \omega(t) \leq \omega^* + \Delta$ сигнал $u(t)$ зберігає попередній стан, що і забезпечує гістерезисну поведінку (пам'ять реле). Δ визначає

компромiс мiж точнiстю пiдтримання швидкостi та частотою перемикань комутацiйної апаратури.

У релейних електроприводах пуско-гальмiвнi режими часто реалiзуються за рахунок ступiнчастої подачi команд моменту (через змiну напруги живлення, перемикання контактiв, введення гальмiвного кола тощо):

- Пуск: встановлюється режим, що забезпечує рушiйний електромагнiтний момент (умовно $u=1$, «номiнальний режим живлення»).
- Гальмування: система переводиться в режим, який формує гальмiвний момент (наприклад, динамiчне гальмування, противмикання, DC-iнжекцiя тощо). Реалiзацiйно це вiдповiдає вмиканню iншого контактора/режиму перетворювача.

Динамiка механiчної частини електропривода описується рiвнянням:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{реж}}(\omega) - M_c(\omega)$$

де J_{Σ} – зведений момент iнерцiї системи «двигун-механiзм», $M_{\text{реж}}(\omega)$ – момент, сформований приводом у вибраному режимi (пуск/робочий режим), $M_c(\omega)$ – момент опору (навантаження), який може залежати вiд швидкостi.

Для режиму гальмування електромагнiтний момент має напрям, протилежний швидкостi, тому рiвняння доцiльно записувати як:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = -M_{\text{гальм}}(\omega) - M_c(\omega)$$

де $M_{\text{гальм}}(\omega) \geq 0$ – модуль гальмiвного моменту.

Час пуску або гальмування мiж двома значеннями швидкостi $\omega_1 - \omega_2$ у загальному випадку визначається iнтегруванням:

$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J_{\Sigma}}{M_{\text{реж}}(\omega) - M_c(\omega)} d\omega \quad (\text{пуск/розгiн}),$$
$$t = \int_{\omega_1}^{\omega_2} \frac{J_{\Sigma}}{-M_{\text{гальм}}(\omega) - M_c(\omega)} d\omega \quad (\text{гальмування})$$

У розрахункових лабораторних роботах часто застосовують спрощені моделі моментів, що дозволяє отримати аналітичні оцінки або виконати чисельний розрахунок (методом кроків за часом).

Для інженерних розрахунків застосовують наближені залежності, що відображають домінуючі властивості режиму гальмування:

1. Динамічне гальмування (у першому наближенні):

$$M_{\text{Гальм}} \approx \text{const}$$

Таке припущення спрощує визначення часу зупинки, особливо якщо M_c також вважається сталим.

2. Противмикання (plugging) – характеризується великим гальмівним моментом на початку процесу. У спрощеній моделі його задають як кратний номінальному моменту двигуна:

$$M_{\text{Гальм}} \approx k M_N$$

$$k = 1.5 \dots 2.5$$

де M_N – номінальний момент двигуна, k – коефіцієнт інтенсивності гальмування (визначається способом вмикання та параметрами кола).

Типова структура релейного контуру за швидкістю включає порівняльний елемент, релейний нелінійний елемент із гістерезисом, комутаційний (контакторний) блок та об'єкт керування:



Порядок виконання

1. Задати J_Σ , $M_c(\omega)$.
2. Задати моменти режимів: $M_{\text{пуск}}(\omega)$ (можна з ЛР1) та $M_{\text{Гальм}}$.
3. Розрахувати $t_{\text{пуск}}$ і $t_{\text{Гальм}}$ дискретним інтегруванням.
4. Додати релейну логіку, у зоні гістерезису команда не перемикається.

Приклад виконання

Вихідні дані

Параметр	Значення
J_{Σ} , кг·м ²	0.3
M_c , Н·м (сталій)	10
$M_{\text{пуск}}$, Н·м (сталій)	35
$M_{\text{гальм}}$, Н·м (сталій)	45
ω_N , рад/с	100
Δt , с (для таблиць)	0.05
Δ , рад/с (гістерезис для реле)	2

Математична модель та формули розрахунку часу

Рівняння руху

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{реж}} - M_c$$

Режим пуску

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{\text{пуск}} - M_c$$

$$M_{\text{пуск}} - M_c = 35 - 10 = 25$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{25}{0.3} = 83.33 \text{ рад/с}^2$$

$$t_{\text{пуск}} = \frac{\omega_N}{d\omega/dt} = \frac{100}{83.33} = 1.20 \text{ с}$$

Режим гальмування

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = -(M_{\text{гальм}} + M_c)$$

$$M_{\text{гальм}} + M_c = 45 + 10 = 55$$

$$\frac{d\omega}{dt} = -\frac{55}{0.3} = -183.33 \text{ рад/с}^2$$

$$t_{\text{гальм}} = \frac{\omega_N}{|d\omega/dt|} = \frac{100}{183.33} = 0.545 \text{ с}$$

Дискретне інтегрування (метод Ейлера)

Загальна формула кроку

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \Delta t \cdot \frac{M_{\text{реж}} - M_c}{J_{\Sigma}}$$

Розрахунок пуску (дискретно)

$$\frac{d\omega}{dt} = 83.33 \text{ рад/с}^2$$

$$\Delta t = 0.05 \text{ с}$$

k	t, с	ω , рад/с	d ω /dt, рад/с ²
0	0.00	0.000	83.333
1	0.05	4.167	83.333
2	0.10	8.333	83.333
3	0.15	12.500	83.333
4	0.20	16.667	83.333
5	0.25	20.833	83.333
6	0.30	25.000	83.333
7	0.35	29.167	83.333
8	0.40	33.333	83.333
9	0.45	37.500	83.333
10	0.50	41.667	83.333
11	0.55	45.833	83.333
...
24	1.20	100.000	83.333

Результат: $t_{\text{пуск}} \approx 1.20$ с, що співпадає з аналітичним.

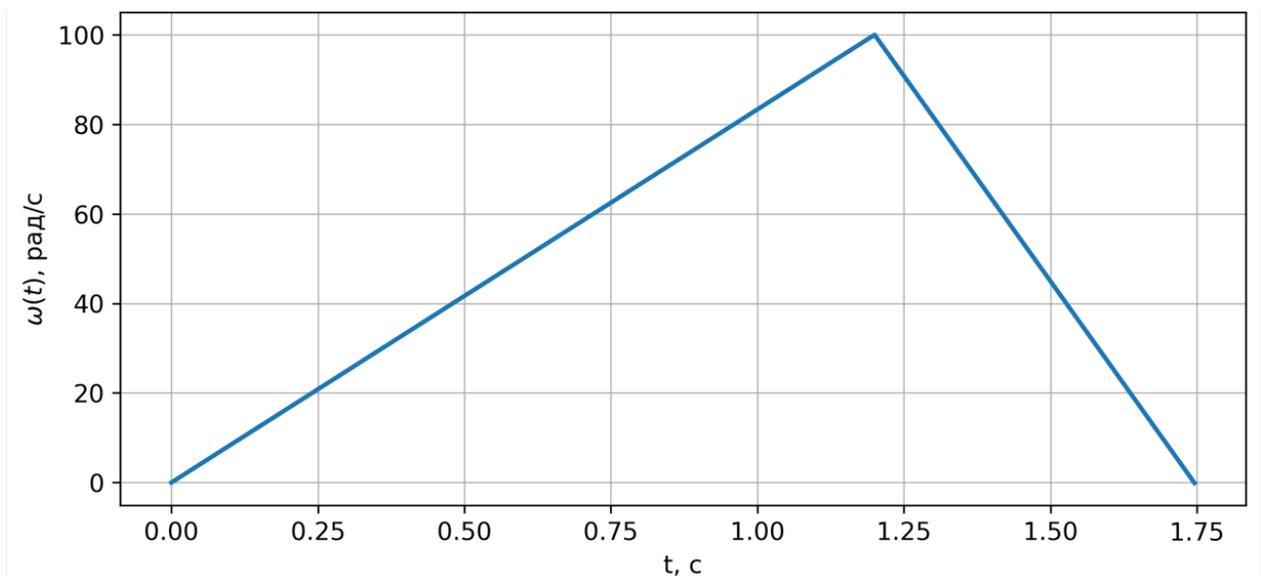
Розрахунок гальмування (дискретно)

$$\frac{d\omega}{dt} = -183.33 \text{ рад/с}^2$$

$$\Delta t = 0.05 \text{ с.}$$

k	t, с	ω , рад/с	d ω /dt, рад/с ²
0	0.000	100.000	-183.333
1	0.050	90.833	-183.333
2	0.100	81.667	-183.333
3	0.150	72.500	-183.333
4	0.200	63.333	-183.333
5	0.250	54.167	-183.333
6	0.300	45.000	-183.333
7	0.350	35.833	-183.333
8	0.400	26.667	-183.333
9	0.450	17.500	-183.333
10	0.500	8.333	-183.333
11	0.545	0.000	-183.333

Результат: $t_{\text{гальм}} \approx 0.545 \text{ с.}$



Залежність $\omega(t)$ при пуску до ω_N та гальмуванні до нуля (лінійні ділянки)

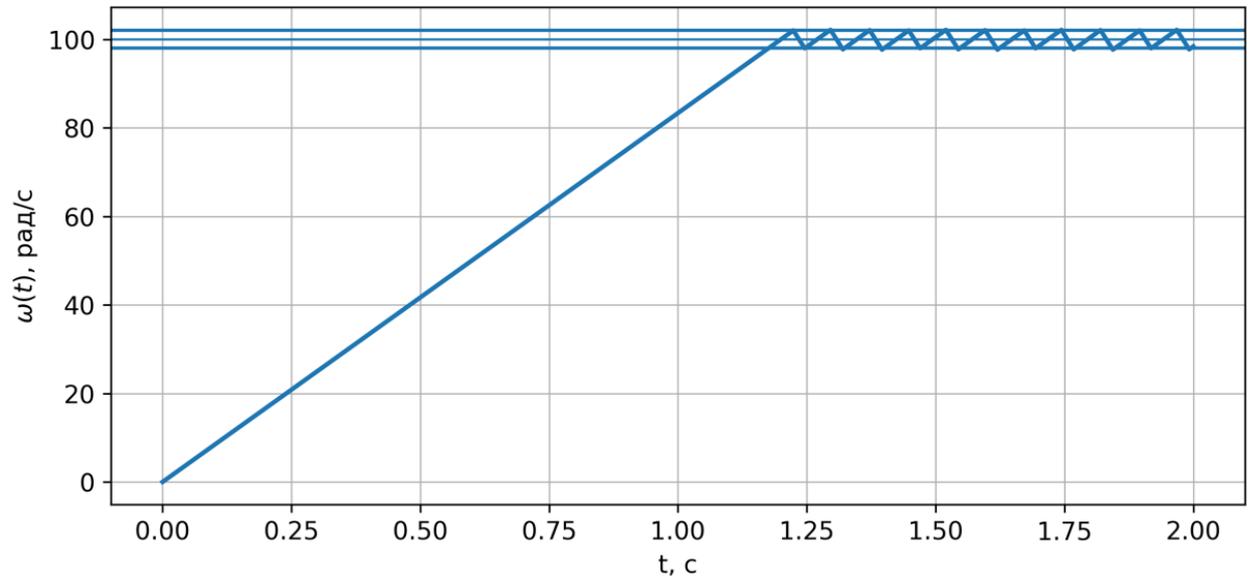
Додавання релейної логіки з гістерезисом

Задаємо $\Delta=2$ рад/с. Нехай $\omega^*=\omega_N$.

Логіка перемикання (дві команди: пуск / гальмування), у зоні гістерезису стан не змінюється:

1. якщо $\omega < \omega^* - \Delta$ – режим пуску
2. якщо $\omega > \omega^* + \Delta$ – режим гальмування
3. якщо $\omega^* - \Delta \leq \omega \leq \omega^* + \Delta$ – залишити попередній режим

Це забезпечує відсутність дребезгу керування поблизу заданої швидкості.



Варіанти виконання роботи

№	JS, кг·м ²	Ms, Н·м	Mпуск, Н·м	Mгальм, Н·м	ωN, рад/с	Δt, с	Δ, рад/с
1	0.25	8	30	40	90	0.05	2
2	0.30	10	35	45	100	0.05	2
3	0.28	12	38	50	110	0.05	3
4	0.35	15	45	55	120	0.05	3
5	0.22	7	28	36	80	0.04	2
6	0.40	18	55	65	140	0.05	4
7	0.32	11	42	52	105	0.05	3
8	0.27	9	33	43	95	0.05	2
9	0.45	20	60	75	150	0.05	4
10	0.20	6	24	32	70	0.04	2
11	0.38	16	50	60	130	0.05	3
12	0.26	10	36	48	115	0.05	3
13	0.34	14	46	58	125	0.05	4
14	0.29	13	40	54	100	0.05	3
15	0.24	9	32	44	85	0.04	2

Лабораторна робота №7

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

Мета: дослідити принцип $V/f = \text{const}$ (скалярне керування) та вплив частоти на: синхронну швидкість, механічну характеристику, момент у зоні до/понад базову частоту.

Короткі теоретичні відомості

Синхронна кутова (обертова) швидкість асинхронного двигуна визначається частотою живлення та числом пар полюсів і описується співвідношенням:

$$n_s(f) = \frac{60 f}{p}$$

де n_s – синхронна швидкість, об/хв; f – частота статора, Гц; p – число пар полюсів.

Для забезпечення практично сталого магнітного потоку в машині у діапазоні до номінальної (базової) частоти застосовують закон керування зі сталим відношенням напруги до частоти:

$$\frac{U}{f} = \text{const}$$

$$f \leq f_N$$

де U – діюче значення напруги статора; f_N – номінальна (базова) частота. За такого закону керування намагнічувальний потік Φ у першому наближенні залишається сталим, що приводить до збереження граничного (максимального) електромагнітного моменту в межах прийнятої моделі двигуна та перетворювача.

У зоні понад базову частоту ($f > f_N$) амплітуда вихідної напруги інвертора обмежується напругою DC-шини, тому умова $U/f = \text{const}$ вже не може бути виконана. Внаслідок цього магнітний потік зменшується приблизно обернено пропорційно частоті:

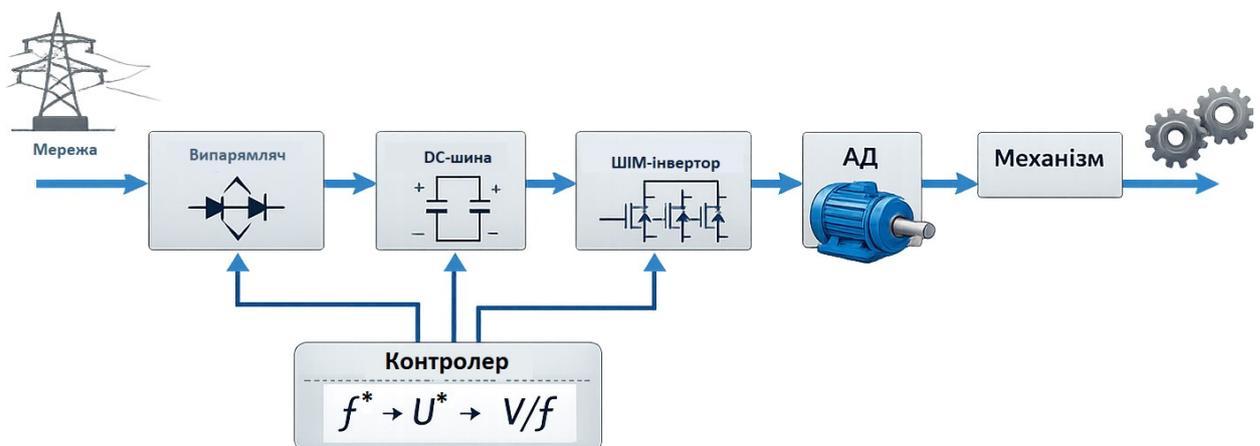
$$\Phi \sim \frac{U}{f}$$

Оскільки граничний момент у спрощеному представленні пропорційний квадрату потоку, одержуємо характерну для режиму ослаблення поля залежність:

$$M_{\text{max}} \sim \Phi^2 \sim \left(\frac{1}{f}\right)^2$$

тобто зі зростанням частоти понад f_N максимальний доступний момент зменшується.

Структурно частотно-керований електропривод (ЧКЕП) реалізується на базі перетворювача частоти, який включає випрямляч, проміжну DC-шину та інвертор з широтно-імпульсною модуляцією (ШІМ). Загальна функціональна схема може бути подана так:



Порядок виконання

1. Задати двигун: p , $f_N=50$, U_N , n_N .
2. Обрати частоти: наприклад 20, 30, 40, 50 Гц.
3. Для кожної частоти знайти: $n_s(f)$ та:

$$U(f) = U_N \cdot \frac{f}{f_N}$$

4. Побудувати сімейство характеристик $M=f(n)$ та вважати, що форма як у ЛР1, але масштабується по швидкості (через n_s).
5. Перевірити робочу точку з навантаженням $M_c(\omega)$.
6. Зробити висновок.

Приклад виконання

Вихідні дані

1. Асинхронний двигун 4-полюсний: $p=2$ (пари полюсів)
2. Номінальна частота: $f_N=50$ Гц
3. Номінальна напруга: $U_N=400$ В
4. Приймаємо типову номінальну швидкість (для 4-полюсного при 50 Гц):
 $n_N=1440$ об/хв.
5. Обрані частоти: $f=\{20,30,40,50\}$ Гц

Розрахунок синхронної швидкості $n_s(f)$

$$n_s(f) = \frac{60f}{p}$$

Приклад для $f = 30$ Гц:

$$n_s = \frac{60 \cdot 30}{2} = 900 \text{ об/хв}$$

Приклад для $f = 20$ Гц:

$$n_s = \frac{60 \cdot 20}{2} = 600 \text{ об/хв}$$

Закон керування V/f. Розрахунок U(f)

$$\frac{U}{f} = \text{const} \quad U(f) = U_N \frac{f}{f_N}$$

Приклад для $f = 30$ Гц:

$$U(30) = 400 \cdot \frac{30}{50} = 240 \text{ В}$$

Приклад для $f = 20$ Гц:

$$U(20) = 400 \cdot \frac{20}{50} = 160 \text{ В}$$

	f, Гц	U(f)=UN·f/fN, В	ns(f)=60·f/p, об/хв
1	20	160.0	600
2	30	240.0	900
3	40	320.0	1200
4	50	400.0	1500

Побудова сімейства характеристик M=f(n)

Прийнята розрахункова модель моменту АД

Ковзання:

$$s = \frac{n_s - n}{n_s}$$

Механічна характеристика (формула Клосса, у відносних одиницях):

$$M(s) = M_{max} \cdot \frac{2 \frac{s}{s_k}}{1 + \left(\frac{s}{s_k}\right)^2}$$

Для прикладу можна використовувати типові значення, коли паспортних даних немає:

$$M_{max} = 2.5 \text{ pu}$$

$$s_k = 0.20$$

Навантаження та робоча точка

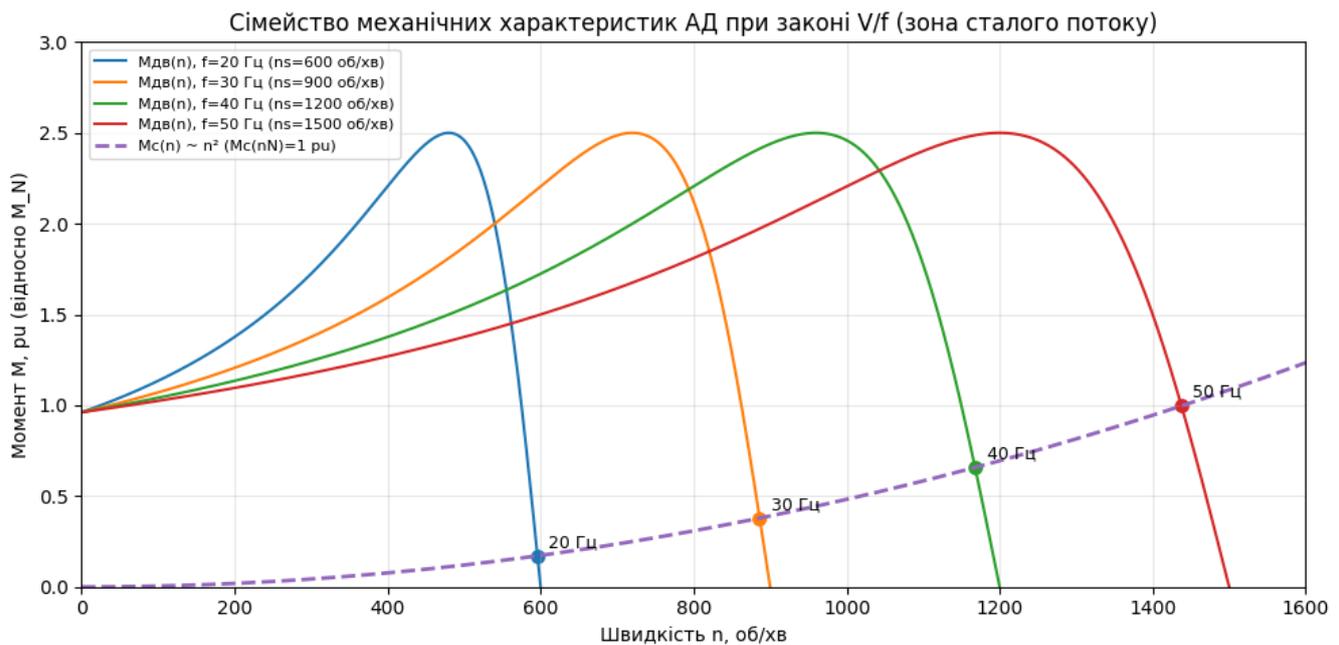
Прийнято навантаження типу вентилятор/насос (квадратична залежність):

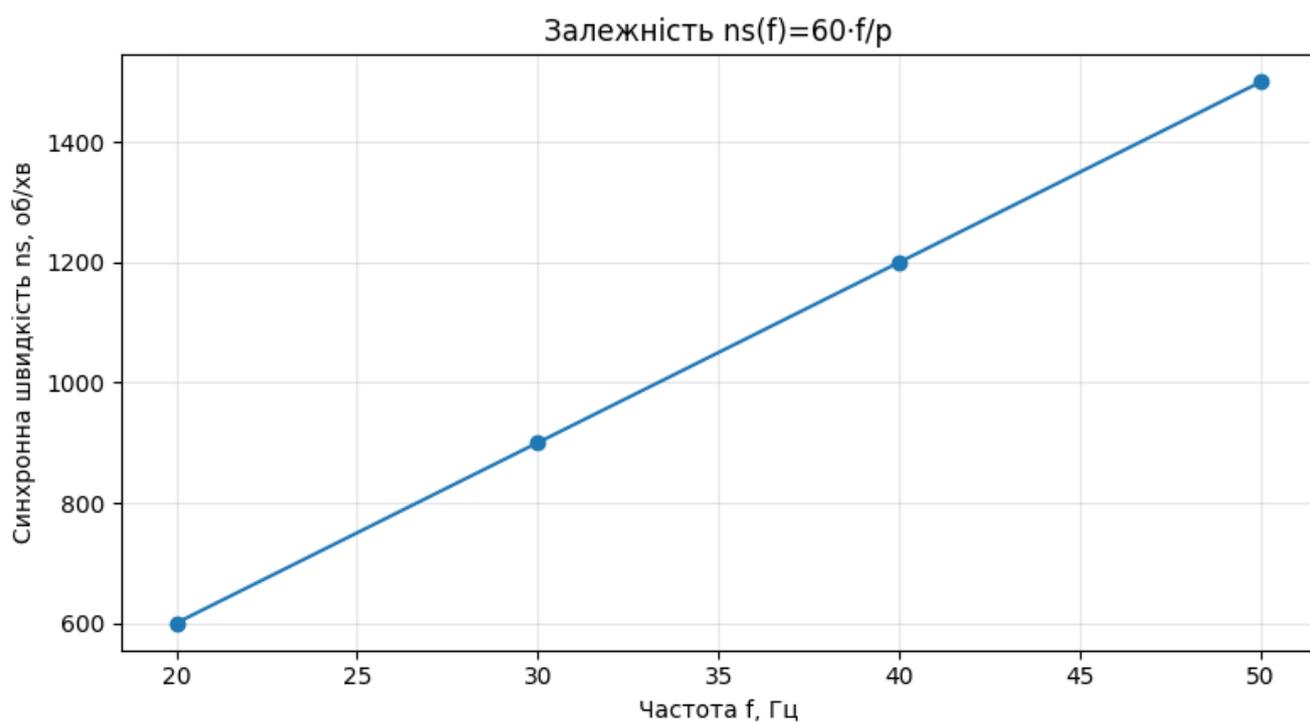
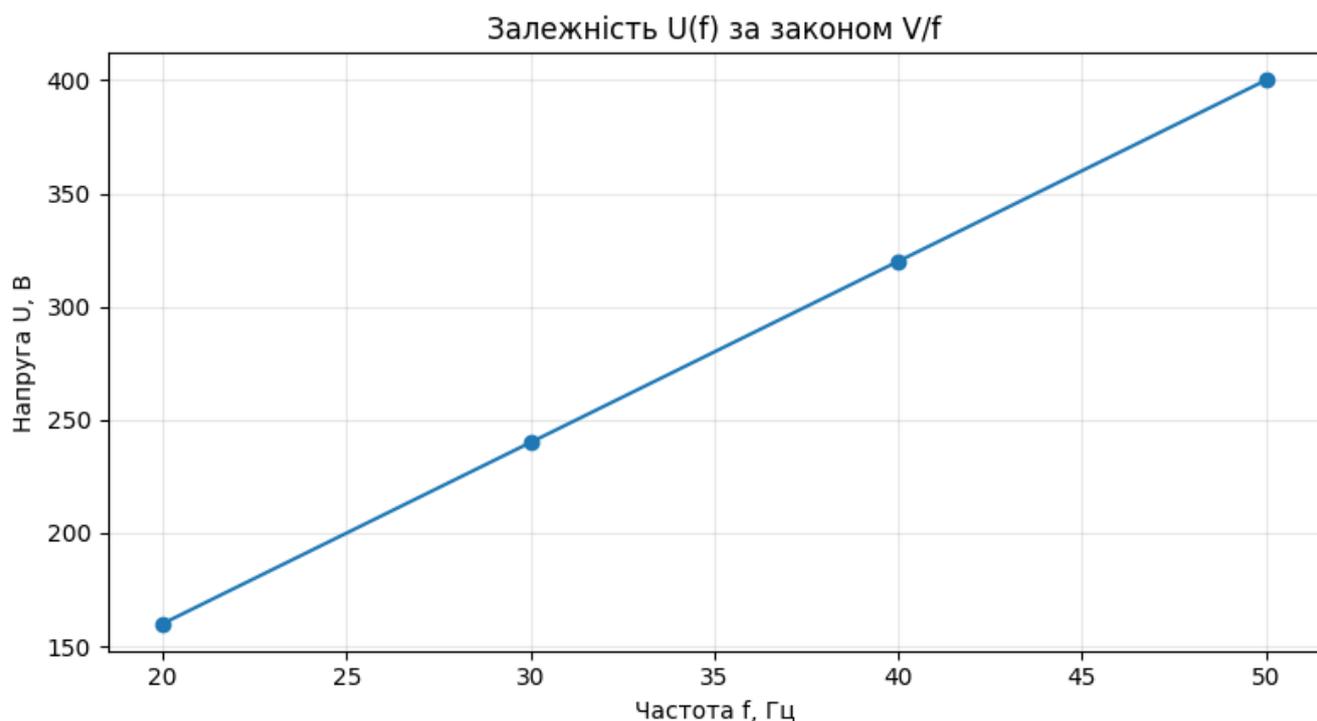
$$M_c(\omega) \sim \omega^2 \Rightarrow M_c(n) = \left(\frac{n}{n_N} \right)^2$$

Робочу точку знаходимо перетином:

$$M_{дв}(n) = M_c(n)$$

	f, Гц	U, В	ns, об/хв	проб, об/хв
1	20	160.0	600	595.9
2	30	240.0	900	886.3
3	40	320.0	1200	1167.9
4	50	400.0	1500	1437.6





Висновок: У зоні $f \leq f_N$ частотне керування за законом $V/f = \text{const}$ забезпечує збереження магнітного потоку, а отже здатності двигуна розвивати близький до сталого граничний момент. Зміна частоти приводить до пропорційної зміни синхронної швидкості, і механічні характеристики масштабуються по осі швидкості. Робочі точки визначаються перетином механічної характеристики двигуна з характеристикою навантаження $M_c(n)$.

Варіанти виконання роботи

№	p	U _N , В	f _N , Гц	n _N , об/хв	Частоти f, Гц	Навантаження M _c (n)
1	2	400	50	1440	15, 25, 35, 50	M _c =const
2	2	380	50	1450	20, 30, 40, 50	M _c ~n
3	2	400	50	1460	10, 20, 30, 50	M _c ~ n ²
4	2	415	50	1470	25, 35, 45, 50	M _c ~n ²
5	2	400	50	1430	20, 25, 40, 50	M _c =M ₀ +kn
6	3	400	50	960	15, 25, 35, 50	M _c =const
7	3	380	50	970	20, 30, 40, 50	M _c ~n
8	3	415	50	950	10, 20, 30, 45	M _c ~n ²
9	1	230	50	2880	20, 30, 40, 50	M _c ~n ²
10	1	220	50	2900	15, 25, 35, 45	M _c ~n
11	2	690	50	1480	20, 30, 40, 50	M _c =const
12	2	400	60	1740	20, 30, 45, 60	M _c ~ n ²
13	3	400	60	1160	15, 30, 45, 60	M _c =const
14	2	380	50	1420	18, 28, 38, 50	M _c =M ₀ +kn
15	3	415	50	980	12, 24, 36, 50	M _c ~ n ²

Лабораторна робота №8

АНАЛІЗ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ЗМІННИХ НАВАНТАЖЕННЯХ

Мета: проаналізувати роботу привода при ступінчастих/гармонійних змінах навантаження: зміна моменту опору, вплив на швидкість, струм, похибку регулювання, перевірка нагріву (еквівалентні значення).

Короткі теоретичні відомості

Динаміка обертального руху електромеханічної системи описується рівнянням моментів:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = M_{дв}(t) - M_c(t)$$

де J_{Σ} – зведений момент інерції (двигун + механізм), ω – кутова швидкість, $M_{дв}(t)$ – електромагнітний (розвиваний) момент двигуна, $M_c(t)$ – момент навантаження (збурення).

У замкненій системі регулювання швидкості зміна навантаження ΔM_c викликає відхилення швидкості та появу похибки регулювання $e(t) = \omega^*(t) - \omega(t)$. Для системи зі статичним (пропорційним) регулятором швидкості (P-регулятором) встановлюється ненульова статична похибка, величина якої у першому наближенні пропорційна збуренню за моментом:

$$\Delta e = \frac{\Delta M_c}{K_M K_P}$$

де K_P – коефіцієнт підсилення P-регулятора, K_M – еквівалентний коефіцієнт «момент–похибка» (узагальнена статична чутливість контуру, що враховує підсилення силової частини та механічного об'єкта).

Для системи з пропорційно-інтегральним регулятором (PI-регулятором) наявність інтегральної складової забезпечує астатизм першого порядку, тому при сталому збуренні ΔM_c похибка регулювання в усталеному режимі прямує

до нуля (за умови стійкості замкненої системи та відсутності насичення виконавчих елементів.):

$$\lim_{t \rightarrow \infty} e(t) = 0$$

За змінного навантаження оцінювання нагріву двигуна доцільно виконувати за еквівалентним (квадратично-середнім) моментом, який відображає еквівалентність теплових втрат (оскільки втрати в міді обмоток статора приблизно пропорційні I^2 , а струм у спрощеній моделі – моменту):

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum_i M_i^2 t_i}{\sum_i t_i}}$$

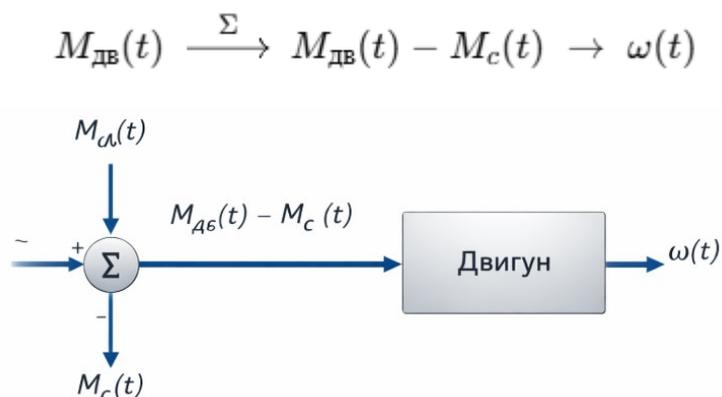
де M_i – рівень моменту на i -ій ділянці навантажувального графіка, t_i – тривалість відповідної ділянки.

Критерій допустимості теплового режиму для тривалого (порівняно з тепловою сталою часу) циклу роботи має вигляд:

$$M_{\text{екв}} \leq M_N$$

де M_N – номінальний момент двигуна. Виконання цієї нерівності означає, що середньоквадратичне навантаження не перевищує номінального за тепловим еквівалентом, а отже перегрів у квазіусталеному режимі не очікується (за умови нормальних умов охолодження).

Зміна моменту навантаження $M_c(t)$ у моделі привода розглядається як збурювальний вплив, що входить у суматор зі знаком «-» відносно моменту двигуна:



Порядок виконання

1. Задати закон зміни навантаження ступінчасто або періодично:

$$M_c : 15 \rightarrow 25$$

$$M_c(t) = M_0 + \Delta M \sin(\Omega t)$$

2. Вибрати модель керування (без регулятора / P / PI).
3. Розрахувати реакцію швидкості: аналітично для P (усталена похибка) та дискретно по часу для перехідної.
4. Розрахувати $M_{\text{екв}}$ і зробити висновок щодо нагріву/перевантаження.

Приклад виконання

Дано:

$$J_{\Sigma} = 0.2 \quad K_M = 50 \quad K_p = 0.04 \quad \omega^* = 100 \text{ рад/с}$$

Закон навантаження:

$$0-5 \text{ с} : M_c = 15 \text{ Н}^1$$

$$5-10 \text{ с} : M_c = 25 \text{ Н}^1$$

Модель замкненого контуру (спрощена)

Вважаємо:

1. Похибка

$$e(t) = \omega^*(t) - \omega(t)$$

2. Керуючий сигнал P-регулятора:

$$u(t) = K_p e(t)$$

3. Момент двигуна пропорційний керуванню:

$$M_{\text{дв}}(t) = K_M * u(t) = K_M * K_p * (\omega^* - \omega)$$

Тоді рівняння руху:

$$J_{\Sigma} \frac{d\omega}{dt} = K_M * K_p * (\omega^* - \omega) - M_c(t)$$

$$K = K_M K_p = 50 \cdot 0.04 = 2$$

Усталена похибка (аналітично для Р-регулятора)

$$0 = K * (\omega^* - \omega_{уст}) - M_c$$

$$e_{уст} = \omega^* - \omega_{уст} = \frac{M_c}{K}$$

Для $M_c=15$:

$$e_1 = \frac{15}{2} = 7.5, \quad \omega_{уст1} = 100 - 7.5 = 92.5 \text{ рад/с}$$

Для $M_c=25$:

$$e_2 = \frac{25}{2} = 12.5, \quad \omega_{уст2} = 100 - 12.5 = 87.5 \text{ рад/с}$$

Зміна усталеної швидкості через стрибок моменту:

$$\Delta\omega_{уст} = \omega_{уст2} - \omega_{уст1} = 87.5 - 92.5 = -5 \text{ рад/с}$$

При збільшенні навантаження на 10 швидкість у сталому режимі зменшується на 5 рад/с.

Часова стала системи. Перепишемо у стандартному вигляді (для сталого M_c):

$$\frac{d\omega}{dt} + \frac{K}{J_\Sigma}\omega = \frac{K}{J_\Sigma}\omega^* - \frac{1}{J_\Sigma}M_c$$

Часова стала:

$$T = \frac{J_\Sigma}{K} = \frac{0.2}{2} = 0.1 \text{ с}$$

Аналітична реакція на стрибок навантаження у момент $t_0=5 \text{ с}$

До стрибка система усталена:

$$\omega(5^-) = \omega_{уст1} = 92.5$$

Після стрибка новий усталений рівень:

$$\omega_{уст2} = 87.5$$

Тоді для $t \geq 5$:

$$\omega(t) = \omega_{уст2} + (\omega(5^-) - \omega_{уст2})e^{-\frac{t-5}{T}} = 87.5 + 5e^{-\frac{t-5}{0.1}}$$

Дискретний розрахунок (метод Ейлера)

Обираємо крок $\Delta t=0.02$ с (щоб бачити швидкий перехід при $T=0.1$ с).

Рекурентна формула:

$$\omega_{k+1} = \omega_k + \Delta t \cdot \frac{K(\omega^* - \omega_k) - M_{c,k}}{J_{\Sigma}}$$

де $K=2$, $J_{\Sigma}=0.2$. Початкова умова (усталений режим до стрибка):

$$\omega_0 = \omega_{уст1} = 92.5 \text{ рад/с}$$

Усталені значення (до/після стрибка)

Інтервал, с	M), Н·м	K = K _M * K _p	e _{уст}	$\omega_{уст}$, рад/с
0–5	15	2	7.5	92.5
5–10	25	2	12.5	87.5

Перехідний процес після стрибка ($t = 5 \dots 5.30$ с, $\Delta t=0.02$ с)

t, с	Mс, Н·м	$\omega_{аналіт}$, рад/с	$\omega_{Ейлер}$ ($\Delta t=0.02$), рад/с
5.00	25	92.5000	92.5000
5.02	25	91.5937	91.5000
5.04	25	90.8516	90.7000
5.06	25	90.2441	90.0600
5.08	25	89.7466	89.5480
5.10	25	89.3394	89.1384
5.12	25	89.0060	88.8107
5.14	25	88.7330	88.5486
5.16	25	88.5095	88.3389
5.18	25	88.3265	88.1711
5.20	25	88.1767	88.0369
5.25	25	87.9104	87.8092
5.30	25	87.7489	87.6759

Перевірка нагріву (еквівалентний момент)

$$M_{екв} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i}} \quad \begin{array}{l} M_1 = 15, t_1 = 5 \\ M_2 = 25, t_2 = 5 \\ \sum t_i = 10 \end{array}$$

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{15^2 \cdot 5 + 25^2 \cdot 5}{10}} = \sqrt{\frac{1125 + 3125}{10}} = \sqrt{425} = 20.62$$

$$M_{\text{екв}} \leq M_N$$

Якщо $M_N \geq 20.62$, то режим допустимий за нагрівом.

Висновок: у замкненій системі з Р-регулятором стрибок моменту навантаження спричиняє ненульову усталену похибку: $e_{\text{уст}} = Mc / (K_M K_p)$. У даному прикладі збільшення Mc з 15 до 25 Н·м зменшило усталену швидкість з 92.5 до 87.5 рад/с. Перехідний процес є аперіодичним першого порядку з часовою сталою $T=0.1$ с. Еквівалентний момент $M_{\text{екв}}=20.62$ Н·м дає підставу вважати нагрів допустимим за умови $M_N \geq 20.62$ Н·м.

Варіанти виконання роботи

№	ЖС	К _м	Регулятор	К _р	ω^* (рад/с)	Закон навантаження Мс(т)
1	0.15	40	Р	0.05	120	0–6 с: 10 Н·м; 6–12 с: 18 Н·м
2	0.20	50	Р	0.03	100	0–5 с: 12 Н·м; 5–10 с: 22 Н·м
3	0.25	60	Р	0.04	110	0–4 с: 15 Н·м; 4–9 с: 25 Н·м
4	0.18	45	Р	0.06	90	0–7 с: 8 Н·м; 7–14 с: 16 Н·м
5	0.22	55	Р	0.035	130	0–5 с: 20 Н·м; 5–10 с: 30 Н·м
6	0.30	70	Р	0.025	100	0–6 с: 14 Н·м; 6–12 с: 24 Н·м
7	0.12	35	Р	0.07	80	0–5 с: 6 Н·м; 5–10 с: 14 Н·м
8	0.16	50	Р	0.045	140	0–3 с: 18 Н·м; 3–8 с: 28 Н·м
9	0.28	65	Р	0.03	120	0–5 с: 16 Н·м; 5–10 с: 26 Н·м
10	0.20	40	Р	0.055	95	0–4 с: 9 Н·м; 4–9 с: 19 Н·м
11	0.18	50	PI	0.04	100	0–5 с: 15 Н·м; 5–10 с: 25 Н·м
12	0.25	60	PI	0.035	110	0–6 с: 12 Н·м; 6–12 с: 22 Н·м
13	0.15	45	PI	0.05	120	0–4 с: 10 Н·м; 4–8 с: 20 Н·м
14	0.22	55	PI	0.03	90	0–5 с: 18 Н·м; 5–10 с: 28 Н·м
15	0.30	70	PI	0.025	130	0–6 с: 20 Н·м; 6–12 с: 32 Н·м

Лабораторна робота №9

ОЦІНЮВАННЯ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОДВИГУНА В РІЗНИХ РЕЖИМАХ РОБОТИ

Мета: оцінка енергоефективності електропривода в режимах номінального та часткового навантаження, холостого ходу, пуску й перехідних процесів, а також під час регулювання швидкості із застосуванням перетворювача частоти. У межах дослідження виконуються розрахунки коефіцієнта корисної дії η , коефіцієнта потужності $\cos\phi$, питомих витрат електроенергії та визначається економія енергії й ефект від переходу до оптимального режиму роботи.

Короткі теоретичні відомості

Енергоефективність електропривода доцільно розглядати як інтегральну властивість системи «мережа – силовий перетворювач – електродвигун – механічна передача – робочий механізм», що визначається не лише паспортними параметрами окремих елементів, а насамперед умовами їх роботи в конкретному технологічному процесі. Об'єктом порівняння є енергетичні показники привода в різних режимах навантаження та за різних способів керування, з акцентом на зміну втрат і структури споживаної потужності.

Ключовим чинником виступає робоча точка, тобто співвідношення електромагнітного моменту та швидкості, яке задається навантаженням. Для більшості двигунів максимальні значення ККД досягаються поблизу номінального режиму, тоді як за часткових навантажень зростає частка постійних втрат (магнітні, механічні, вентиляційні, частина втрат у сталі), що призводить до погіршення загального ККД. Таким чином, при однаковій корисній механічній потужності енергетична «ціна» її отримання може суттєво відрізнятись залежно від відхилення робочої точки від номінальної.

Не менш важливим є характер навантаження, який визначає залежність моменту опору від швидкості. Для механізмів із квадратичною характеристикою (типово для вентиляторів і насосів) зниження швидкості спричиняє істотне зменшення необхідної потужності, оскільки механічна потужність є добутком моменту на кутову швидкість і в таких системах швидкісне регулювання дозволяє радикально скоротити споживання енергії. Відповідно, порівнюються режими роботи з регулюванням продуктивності шляхом зміни швидкості та режими, де продуктивність досягається іншими методами, що не зменшують потреби в потужності пропорційно.

Визначальним фактором енергоефективності є спосіб керування. Під час дроселювання або інших «пасивних» методів регулювання (наприклад, механічного обмеження потоку) електродвигун часто продовжує працювати поблизу номінальної швидкості, а надлишкова енергія фактично розсіюється у вигляді додаткових втрат у регулювальному органі. Натомість застосування перетворювача частоти забезпечує «активне» керування, коли зменшення швидкості узгоджується зі зменшенням потрібного моменту/потужності, що знижує як корисну, так і споживану потужність, а також може покращувати енергетичні показники за рахунок оптимізації режиму роботи двигуна (за умови коректного налаштування). У межах порівняння аналізують не лише економію активної енергії, а й зміну коефіцієнта потужності, рівня гармонік та втрат у силовому перетворювачі.

Окремо враховується частота пусків і гальмувань, оскільки перехідні процеси супроводжуються підвищеними струмами, додатковими втратами в обмотках та силовій електроніці, а також можливими втратами енергії під час гальмування (якщо не реалізовано рекуперацію). За циклічного режиму роботи сумарні втрати, пов'язані з розгонами та зупинками, можуть істотно впливати на середні питомі витрати енергії, тому порівняння режимів має включати оцінювання внеску перехідних складових у загальний енергобаланс.

Узагальнену енергетичну модель електропривода описують через потоки потужності та втрат. Електрична потужність, що надходить із мережі

P_1 , подається на силовий перетворювач (зокрема ПЧ), який характеризується власним ККД η_c та втратами ΔP_c . На виході перетворювача формується електрична потужність, що живить двигун; двигун перетворює її в механічну з ККД η_m та втратами ΔP_m , після чого на валу отримують корисну механічну потужність P_2 , яка через механічну передачу (з ККД $\eta_{\text{перед}}$ передається робочому механізму. В такій постановці загальний (сумарний) ККД системи визначається як добуток ККД її послідовних ланок:

$$\eta_{\Sigma} = \eta_c \cdot \eta_m \cdot \eta_{\text{перед}}$$

Цей вираз відображає принцип мультиплікативного накопичення втрат: навіть незначне зниження ККД будь-якої ланки (наприклад, у перетворювачі при неповному завантаженні або в двигуні за часткового моменту) призводить до помітного зменшення η_{Σ} .

Порядок виконання

1. Задати 3–4 режими: наприклад 100%, 75%, 50% навантаження та швидкість 100% і 80% (для ПЧ).
2. Для кожного режиму визначити:

$$P_2 \text{ (за } M\omega \text{ або тех. даними),}$$
$$P_1 = \frac{P_2}{\eta} \text{ (або через } \sqrt{3}UI \cos \varphi),$$
$$\Delta P.$$

3. Розрахувати енергію за цикл/зміну:

$$W = \sum P_{1,i} t_i$$

4. Порівняти варіанти (без ПЧ / з ПЧ; номінал / часткове).
5. Сформулювати висновок.

Приклад виконання

Дано: 3-фазний двигун, $U=400$ В. Цикл $T=1$ год:

Режим 1 (30 хв): $P_{2,1} = 5.0$ кВт, $\eta_1 = 0.90$, $\cos \varphi_1 = 0.85$

Режим 2 (20 хв): $P_{2,2} = 3.0$ кВт, $\eta_2 = 0.86$, $\cos \varphi_2 = 0.78$

Режим 0 (10 хв, холостий хід): $P_{1,0} = 0.8$ кВт

Переведемо час у години:

$$t_1 = \frac{30}{60} = 0.5 \text{ год}$$

$$t_2 = \frac{20}{60} = \frac{1}{3} \approx 0.3333 \text{ год}$$

$$t_0 = \frac{10}{60} = \frac{1}{6} \approx 0.1667 \text{ год}$$

Вхідна потужність у навантажених режимах:

$$P_{1,1} = \frac{P_{2,1}}{\eta_1} = \frac{5.0}{0.90} = 5.5556 \approx 5.56 \text{ кВт}$$

$$P_{1,2} = \frac{P_{2,2}}{\eta_2} = \frac{3.0}{0.86} = 3.4884 \approx 3.49 \text{ кВт}$$

Струм (за потреби):

$$I_1 = \frac{P_{1,1}}{\sqrt{3}U \cos \varphi_1} = \frac{5556}{1.732 \cdot 400 \cdot 0.85} \approx \frac{5556}{588.88} \approx 9.44 \text{ А}$$

$$I_2 = \frac{P_{1,2}}{\sqrt{3}U \cos \varphi_2} = \frac{3488}{1.732 \cdot 400 \cdot 0.78} \approx \frac{3488}{540.38} \approx 6.46 \text{ А}$$

Втрати потужності в режимах:

$$\Delta P_1 = P_{1,1} - P_{2,1} = 5.5556 - 5.0 = 0.5556 \text{ кВт}$$

$$\Delta P_2 = P_{1,2} - P_{2,2} = 3.4884 - 3.0 = 0.4884 \text{ кВт}$$

Холостий хід:

$$P_{2,0} = 0, \quad \Delta P_0 = P_{1,0} = 0.8 \text{ кВт}$$

Енергія, спожита з мережі за цикл:

$$W = P_{1,1}t_1 + P_{1,2}t_2 + P_{1,0}t_0$$

$$W = 5.5556 \cdot 0.5 + 3.4884 \cdot 0.3333 + 0.8 \cdot 0.1667$$

$$W_1 = 5.5556 \cdot 0.5 = 2.7778 \text{ кВт}$$

$$W_2^{(in)} = 3.4884 \cdot 0.3333 \approx 1.1628 \text{ кВт}$$

$$W_0 = 0.8 \cdot 0.1667 \approx 0.1333 \text{ кВт}$$

$$W \approx 2.7778 + 1.1628 + 0.1333 = 4.0739 \approx 4.074 \text{ кВт}$$

Корисна енергія на валу за цикл:

$$W_2 = P_{2,1}t_1 + P_{2,2}t_2 + 0 = 5.0 \cdot 0.5 + 3.0 \cdot 0.3333$$

$$W_2 = 2.5 + 1.0 = 3.5 \text{ кВт}$$

Цикловий ККД, питомі витрати, енергія втрат:

$$\eta_{\text{цикл}} = \frac{W_2}{W} = \frac{3.5}{4.0739} \approx 0.859$$

$$e = \frac{W}{W_2} = \frac{4.0739}{3.5} \approx 1.164 \text{ кВт}$$

Енергія втрат за цикл:

$$W_{\text{втраг}} = W - W_2 \approx 4.0739 - 3.5 = 0.5739 \approx 0.574 \text{ кВт}$$

Можна також розкласти втрати по ділянках:

$$W_{\text{втраг},1} = \Delta P_1 t_1 = 0.5556 \cdot 0.5 = 0.2778$$

$$W_{\text{втраг},2} = \Delta P_2 t_2 = 0.4884 \cdot 0.3333 \approx 0.1628$$

$$W_{\text{втраг},0} = \Delta P_0 t_0 = 0.8 \cdot 0.1667 \approx 0.1333$$

$$W_{\text{втраг, сум}} \approx 0.2778 + 0.1628 + 0.1333 = 0.5739 \text{ кВт}$$

Висновок: суттєва частка втрат формується в режимах часткового навантаження та особливо на холостому ході; підвищення енергоефективності досягається скороченням часу ХХ, оптимізацією робочої точки та застосуванням ПЧ для узгодження швидкості з навантаженням.

Варіанти виконання роботи

№	t_1 , хв	$P_{2,1}$, кВт	η_1	$\cos\varphi_1$	t_2 , хв	$P_{2,2}$, кВт	η_2	$\cos\varphi_2$	t_0 , хв	$P_{1,0}$, кВт
1	30	5.0	0.90	0.85	20	3.0	0.86	0.78	10	0.80
2	25	6.0	0.91	0.86	25	3.5	0.87	0.80	10	0.85
3	35	4.5	0.89	0.84	15	2.8	0.85	0.77	10	0.75
4	20	7.0	0.92	0.87	30	3.0	0.86	0.79	10	0.90
5	30	5.5	0.90	0.85	15	2.5	0.84	0.75	15	0.80
6	28	6.5	0.91	0.86	22	3.2	0.86	0.78	10	0.88
7	32	4.0	0.88	0.83	18	2.6	0.84	0.74	10	0.70
8	24	5.8	0.90	0.85	26	3.6	0.87	0.81	10	0.92
9	30	4.8	0.89	0.84	20	3.1	0.86	0.79	10	0.78
10	27	6.2	0.91	0.86	23	2.9	0.85	0.77	10	0.86
11	22	7.2	0.92	0.88	28	3.4	0.87	0.80	10	0.95
12	34	4.2	0.88	0.82	16	2.7	0.84	0.74	10	0.72
13	26	5.2	0.90	0.85	24	3.3	0.86	0.79	10	0.82
14	30	6.8	0.91	0.86	20	3.0	0.85	0.77	10	0.90
15	18	7.5	0.92	0.88	32	3.2	0.86	0.79	10	0.98

У всіх варіантах: 3-фазна мережа, $U=400$ В, цикл $T=1$ год, 3 ділянки:
режим 1 (навантаження), режим 2 (часткове), режим 0 (ХХ).

Лабораторна робота №10

ДОСЛІДЖЕННЯ ВТРАТ ЕЛЕКТРИЧНОЇ ЕНЕРГІЇ В ЕЛЕКТРОПРИВОДИ ТА ШЛЯХІВ ЇХ ЗМЕНШЕННЯ

Мета: кількісне розкладання сумарних енергетичних втрат електропривода на основні складові (втрати в двигуні, силовому перетворювачі, механічній передачі та мережевих елементах) і визначення внеску кожної з них у загальне споживання електроенергії. На цій основі виконується порівняльна оцінка ефективності енергозберігаючих заходів, зокрема підвищення класу енергоефективності двигуна (IE2 – IE3/IE4), застосування перетворювача частоти, оптимізації робочого циклу (скорочення холостого ходу, зменшення швидкості), а також компенсації реактивної потужності й зниження втрат у кабельних лініях, з метою обґрунтування заходів, що забезпечують максимальний енергетичний ефект у заданих умовах експлуатації.

Короткі теоретичні відомості

Для асинхронного електродвигуна сумарні втрати доцільно розглядати як сукупність електричних, магнітних і механічних складових, величина яких по-різному залежить від режиму навантаження, напруги живлення та частоти. У практиці енергетичного аналізу виділяють мідні втрати в обмотці статора, мідні втрати в роторному колі, втрати в сталі магнітопроводу, механічні втрати та додаткові (розсіяні) втрати, що разом формують загальну потужність втрат двигуна.

Мідні втрати статора ΔP_{Cu1} зумовлені протіканням струму через активний опір фазних обмоток і в першому наближенні описуються залежністю:

$$\Delta P_{Cu1} \sim I^2 R_1$$

де I – фазний (або лінійний, залежно від прийнятої моделі) струм статора, R_1 – еквівалентний активний опір статорної обмотки. Оскільки струм

суттєво зростає із підвищенням навантаження та під час перехідних процесів, ця складова є однією з найбільш чутливих до режиму роботи і, як правило, домінує при перевантаженнях і частих пусках.

Мідні втрати ротора ΔP_{Cu2} пов'язані з тепловиділенням у роторному колі (стрижнях короткозамкненого ротора або роторній обмотці фазного ротора). Їхня природа також має омичний характер, а величина визначається струмами ротора та еквівалентним опором роторного кола. У спрощеній формі їх розглядають як складову, що зростає з навантаженням і суттєво залежить від ковзання: зі збільшенням ковзання збільшується роторний струм і відповідно теплові втрати в роторі. Саме тому в пусковому режимі, коли ковзання близьке до одиниці, ΔP_{Cu2} різко зростають.

Втрати в сталі ΔP_{Fe} виникають у магнітопроводі статора (і частково ротора) внаслідок гістерезису та вихрових струмів. Для інженерних розрахунків часто використовують якісну залежність:

$$\Delta P_{Fe} \sim U^2 f$$

що відображає зростання магнітних втрат зі збільшенням напруги та частоти живлення. На відміну від мідних втрат, ΔP_{Fe} відносно слабше залежать від моментного навантаження і можуть розглядатися як близькі до «умовно сталих» у межах робочого діапазону, особливо для режимів із близькою до номінальної напругою та частотою.

Механічні втрати ΔP_{mech} обумовлені тертям у підшипниках, втратами на вентиляцію (аеродинамічний опір), а також додатковими механічними опорами у вузлах обертання. Ця складова, як правило, істотно залежить від швидкості обертання, тому при зниженні швидкості (зокрема за допомогою ПЧ) механічні втрати можуть помітно зменшуватися, що робить швидкісне регулювання одним із дієвих шляхів підвищення енергоефективності в приводах із тривалим режимом роботи.

Додаткові втрати ΔP_{add} включають розсіяні втрати, зумовлені нерівномірністю розподілу струмів, паразитними потоками розсіювання, поверхневими ефектами в провідниках, гармонічними складовими струму та

поля, а також конструктивними особливостями машини. У розрахункових моделях їх часто оцінюють за нормативними допусками або задають у відсотках від номінальної потужності, оскільки точне визначення потребує експериментальної ідентифікації.

Сумарні втрати двигуна в загальному вигляді подаються як:

$$\Delta P = \Delta P_{Cu1} + \Delta P_{Cu2} + \Delta P_{Fe} + \Delta P_{mech} + \Delta P_{add}.$$

Цей розклад дозволяє пов'язати зміни режиму роботи (навантаження, напруга, частота, швидкість) із конкретними фізичними механізмами втрат та обґрунтувати найбільш ефективні енергозберігаючі заходи.

Окрім втрат у двигуні, важливо враховувати втрати в елементах живлення, насамперед у кабельних лініях. Втрати в лінії мають омичний характер і визначаються квадратичною залежністю від струму:

$$\Delta P_{line} = 3I^2 R_{ph}$$

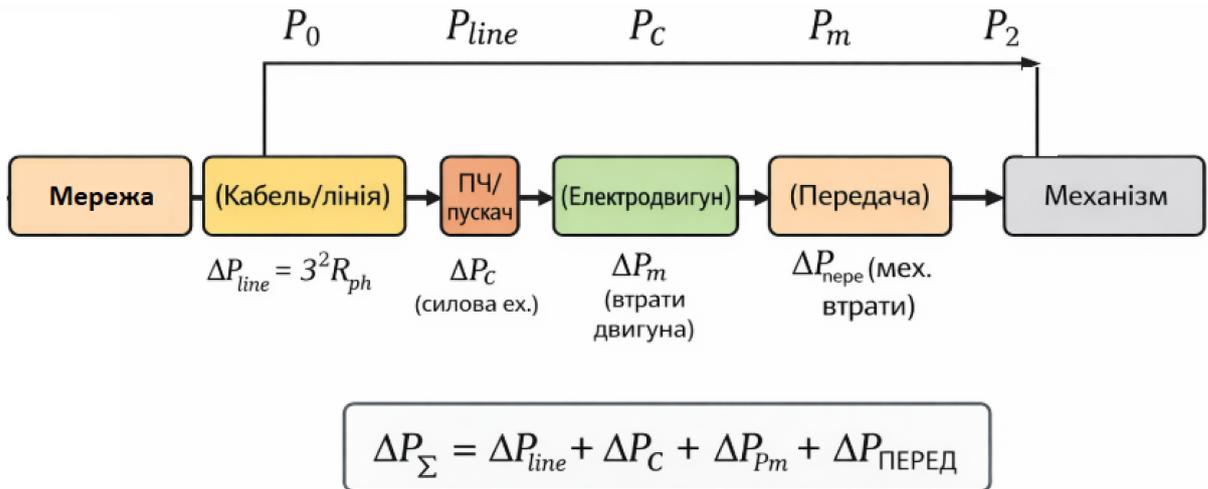
де R_{ph} – активний опір фазного проводу. Через квадратичний характер залежності навіть помірне зменшення струму призводить до відчутного зниження ΔP_{line} , що робить актуальними заходи зі скорочення струмових навантажень у мережі.

Зменшення струму, зокрема, може бути досягнуте шляхом компенсації реактивної потужності. За сталої активної вхідної потужності P_1 струм трифазного кола визначається співвідношенням:

$$I = \frac{P_1}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

Звідси випливає, що підвищення $\cos \varphi$ (зменшення реактивної складової) знижує струм, а отже зменшує втрати типу $I^2 R$ як у кабельних лініях, так і у мідних втратах елементів електропривода, де струм проходить через активні опори. У прикладному аналізі це означає, що ефект компенсації реактивної потужності проявляється насамперед через зниження теплових втрат у мережевій інфраструктурі та підвищення якості енергоспоживання.

Схема «де виникають втрати» (узагальнена)



Порядок виконання

1. Визначити P_2 , P_1 , η у робочих точках.
2. Знайти сумарні втрати $\Delta P = P_1 - P_2$.
3. Розподілити втрати за моделлю (таблично, з прийнятими частками) або з наближених залежностей:

ΔP_{Fe} — майже стала при $U, f = const$

$\Delta P_{Cu} \sim I^2$

ΔP_{mech} — близька до сталої/залежить від швидкості

4. Порахувати втрати в лінії ΔP_{line} .
5. Запропонувати 2–3 заходи та оцінити економію енергії за зміну/рік.

Приклад виконання

Дано: трифазна мережа, $U=400$ В; активна потужність навантаження $P_1=6.0$ кВт; початковий коефіцієнт потужності $\cos\varphi_1=0.80$. Довгий кабель: активний опір фазного проводу $R_{ph}=0.25$ Ω . Після компенсації $\cos\varphi_2=0.92$.

Потрібно знайти струм і втрати в лінії до/після компенсації та річну економію за $t_{рік}=3000$ год.

Для трифазного кола активна потужність:

$$P_1 = \sqrt{3} U I \cos \varphi$$

$$I = \frac{P_1}{\sqrt{3} U \cos \varphi}$$

До компенсації ($\cos\varphi_1=0.80$):

$$I_1 = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.80}$$

$$\sqrt{3} \cdot 400 = 1.732 \cdot 400 = 692.8$$

$$692.8 \cdot 0.80 = 554.24$$

$$I_1 = \frac{6000}{554.24} = 10.83 \text{ A}$$

Після компенсації ($\cos\varphi_2=0.92$):

$$I_2 = \frac{6000}{\sqrt{3} \cdot 400 \cdot 0.92} = \frac{6000}{692.8 \cdot 0.92}$$

$$692.8 \cdot 0.92 = 637.376$$

$$I_2 = \frac{6000}{637.376} = 9.41 \text{ A}$$

Втрати в трифазній лінії:

$$\Delta P_{line} = 3I^2 R_{ph}$$

До компенсації:

$$\Delta P_{line1} = 3 \cdot (10.83)^2 \cdot 0.25$$

$$(10.83)^2 = 117.29$$

$$\Delta P_{line1} = 3 \cdot 117.29 \cdot 0.25 = 87.97 \text{ Вт}$$

Після компенсації:

$$\Delta P_{line2} = 3 \cdot (9.41)^2 \cdot 0.25$$

$$(9.41)^2 = 88.55$$

$$\Delta P_{line2} = 3 \cdot 88.55 \cdot 0.25 = 66.41 \text{ Вт}$$

Економія активних втрат у кабелі:

$$\Delta P_{ек} = \Delta P_{line1} - \Delta P_{line2} = 87.97 - 66.41 = 21.56 \text{ Вт}$$

$$\Delta P_{ек} = 0.02156 \text{ кВт}$$

Річна економія електроенергії за $t_{рік}=3000$ год:

$$W_{ек} = \Delta P_{ек} \cdot t_{рік} = 0.02156 \cdot 3000 = 64.68 \text{ кВт}$$

Висновок: підвищення $\cos\varphi$ з 0.80 до 0.92 зменшило струм з 10.83 А до 9.41 А, що знизило втрати в кабелі з 87.97 Вт до 66.41 Вт. Річна економія електроенергії на втрати в лінії становить ≈ 64.7 кВт·год/рік (за 3000 год/рік). Ефект особливо відчутний для довгих ліній із підвищеним R_{ph} , оскільки втрати пропорційні I^2R .

Варіанти виконання роботи

№	P_1 , кВт	$\cos\varphi_1$	$\cos\varphi_2$	R_{ph} , Ω	$t_{рік}$, год
1	6.0	0.80	0.92	0.25	3000
2	5.5	0.78	0.92	0.22	2800
3	7.5	0.82	0.95	0.30	3200
4	4.0	0.75	0.90	0.18	2500
5	8.0	0.80	0.93	0.28	3500
6	3.5	0.70	0.90	0.20	2400
7	6.8	0.77	0.94	0.26	3000
8	9.0	0.83	0.95	0.32	3600
9	4.8	0.76	0.92	0.21	2700
10	10.0	0.85	0.96	0.35	4000
11	5.0	0.73	0.90	0.19	2600
12	7.0	0.79	0.93	0.24	3100
13	6.2	0.81	0.95	0.23	2900
14	8.5	0.74	0.92	0.31	3300
15	4.5	0.78	0.94	0.17	2800

Для всіх варіантів: трифазна мережа $U=400$ В.

Лабораторна робота №11

АНАЛІЗ НАДІЙНОСТІ ТА ТЕПЛОВИХ РЕЖИМІВ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ

Мета: оцінювання теплового стану електричної машини в умовах змінного навантаження шляхом визначення нагріву обмоток і корпусу та перевірки відповідності отриманих температурних рівнів допустимим значенням для заданого класу ізоляції. Додатково здійснюється аналіз показників надійності у встановлених умовах експлуатації, зокрема оцінювання інтенсивності відмов і середнього напрацювання до відмови (МТВФ), з метою обґрунтування допустимих режимів роботи та прогнозування ресурсу обладнання.

Короткі теоретичні відомості

Для інженерної оцінки нагріву електричної машини при змінних втратах доцільно застосовувати зосереджену теплову модель першого порядку, яка відображає основні фізичні механізми: генерацію тепла у джерелі втрат $\Delta P(t)$, тепловідвід у навколишнє середовище через еквівалентний тепловий опір R_{th} та теплову інерцію об'єкта, що описується теплоємністю C_{th} . У такій постановці температура двигуна характеризується перегрівом відносно середовища:

$$\theta = T_{дв} - T_{окр}$$

а тепловий баланс задається диференціальним рівнянням:

$$C_{th} \frac{d\theta}{dt} + \frac{\theta}{R_{th}} = \Delta P(t).$$

Перший доданок описує акумулювання теплової енергії в масі двигуна, другий – інтенсивність тепловіддачі (пропорційну перегріву), права частина –

миттєву потужність тепловиділення, яка визначається сумарними втратами в машині.

Для сталого режиму (за $\Delta P = \text{const}$ і $d\theta/dt=0$) перегрів набуває усталеного значення:

$$\theta_{\text{уст}} = \Delta P \cdot R_{th}$$

що безпосередньо пов'язує допустимий рівень втрат із тепловим опором системи охолодження та умовами теплообміну.

При ступінчастій зміні втрат від ΔP_1 до ΔP_2 температурна реакція має експоненційний характер:

$$\theta(t) = \theta_2 + (\theta_1 - \theta_2)e^{-t/\tau}$$

$$\tau = R_{th}C_{th}$$

де $\theta_1 = \Delta P_1 R_{th}$, $\theta_2 = \Delta P_2 R_{th}$ – усталені перегріви до та після зміни, а τ – теплова стала часу, що визначає швидкість наближення до нового теплового стану. Таким чином, модель дозволяє оцінювати як максимальні температури, так і динаміку нагріву/охолодження у циклічних режимах.

У режимах зі змінним навантаженням тепловий ефект визначається насамперед мідними втратами, які в першому наближенні пропорційні квадрату струму:

$$\Delta P_{Cu} \sim I^2$$

а для електропривода – квадрату моменту (за близької сталої швидкості та лінійної залежності $I \sim M$):

$$\Delta P_{Cu} \sim M^2$$

Тому для коректного порівняння змінного режиму з еквівалентним сталим режимом вводять еквівалентний струм або еквівалентний момент, які

забезпечують однаковий тепловий вплив за розглянутий інтервал часу. Для дискретного циклу з ділянками i , тривалістю t_i , отримують:

$$I_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum I_i^2 t_i}{\sum t_i}}$$

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i}}$$

Використання цих величин дозволяє визначати нагрів за паспортними або розрахунковими характеристиками двигуна, замінюючи змінний режим еквівалентним постійним, що має той самий «квадратичний» тепловий ефект. У практичних розрахунках це спрощує перевірку допустимості циклу за перегрівом та відповідності класу ізоляції.

Для попередньої оцінки надійності електромеханічних систем часто застосовують модель із експоненціальним законом відмов, що відповідає припущенню про сталу інтенсивність відмов у проміжку нормальної експлуатації. У цьому випадку функція безвідмовної роботи має вигляд:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

де λ – інтенсивність відмов (1/год). Середній напрацювання до відмови визначається як:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Якщо для обладнання задано базову інтенсивність відмов λ_0 (у стандартних умовах), то вплив реальних умов експлуатації враховують коригувальними коефіцієнтами, зокрема температурним, запиленості та вібрацій:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot k_T \cdot k_{\text{dust}} \cdot k_{\text{vib}}$$

Порядок виконання

1. Задати цикл навантаження (по $M(t)$ або $P_2(t)$).
2. Оцінити P_1 та $\Delta P(t)$ у кожній ділянці.
3. Розрахувати $M_{\text{екв}}$ (або $I_{\text{екв}}$) і зробити висновок про допустимість нагріву.
4. Теплова перевірка за моделлю 1-го порядку (при потребі): обчислити $\theta(t)$ на ділянках циклу.
5. Розрахувати показники надійності $R(t)$, МТBF з урахуванням коефіцієнтів умов.

Приклад виконання

Вихідні дані:

Цикл $T=30$ хв:

Ділянка 1: $t_1 = 20$ хв, $M_1 = 0.9 M_N$, втрати $\Delta P_1 = 600$ Вт

Ділянка 2: $t_2 = 10$ хв, $M_2 = 0.4 M_N$, втрати $\Delta P_2 = 250$ Вт

$R_{th} = 0.9$ °C/Вт, $C_{th} = 250$ Дж/°C

$T_{\text{окр}} = 30$ °C

Якщо нагрів визначається втратами $\sim M^2$, еквівалентний момент:

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{\sum M_i^2 t_i}{\sum t_i}}$$

$$\begin{aligned} \frac{M_{\text{екв}}}{M_N} &= \sqrt{\frac{(0.9)^2 \cdot 20 + (0.4)^2 \cdot 10}{30}} = \sqrt{\frac{0.81 \cdot 20 + 0.16 \cdot 10}{30}} \\ &= \sqrt{\frac{16.2 + 1.6}{30}} = \sqrt{\frac{17.8}{30}} = \sqrt{0.5933} = 0.770 \end{aligned}$$

$$M_{\text{екв}} \approx 0.77 M_N$$

Висновок: за нагрівом цикл еквівалентний сталому режиму приблизно 0.77 від номінального моменту.

Теплова стала часу τ для моделі 1-го порядку:

$$\tau = R_{th}C_{th}$$

$$\tau = 0.9 \cdot 250 = 225 \text{ с} = 3.75 \text{ хв}$$

Перегрів $\theta = T_{дв} - T_{окр}$. Для сталих втрат:

$$\theta_{уст} = \Delta P \cdot R_{th}$$

Ділянка 1:

$$\theta_{уст1} = 600 \cdot 0.9 = 540^\circ\text{C}$$

Ділянка 2:

$$\theta_{уст2} = 250 \cdot 0.9 = 225^\circ\text{C}$$

Розрахунок $\theta(t)$ на ділянках циклу (модель 1-го порядку). Для ступінчастої зміни втрат:

$$\theta(t) = \theta_2 + (\theta_1 - \theta_2)e^{-t/\tau}$$

де θ_1 – перегрів на початку ділянки, θ_2 – новий усталений рівень.

Прийmemo старт циклу з охолодженого стану:

$$\theta(0) = 0$$

Ділянка 1 (20 хв = 1200 с), перехід до $\theta_{уст1}$:

$$\theta_{1,кін} = \theta_{уст1} + (\theta(0) - \theta_{уст1})e^{-t_1/\tau}$$

$$\theta_{1,кін} = 540 + (0 - 540)e^{-1200/225} = 540(1 - e^{-5.333})$$

$$e^{-5.333} \approx 0.00483 \Rightarrow \theta_{1,кін} \approx 540(1 - 0.00483) = 537.39^\circ\text{C}$$

Ділянка 2 (10 хв = 600 с), перехід до $\theta_{уст2}$. На початку ділянки 2: $\theta = \theta_{1,кін}$:

$$\theta_{2,кін} = \theta_{уст2} + (\theta_{1,кін} - \theta_{уст2})e^{-t_2/\tau}$$

$$\theta_{2,кін} = 225 + (537.39 - 225)e^{-600/225}$$

$$e^{-600/225} = e^{-2.667} \approx 0.06948$$

$$\theta_{2,кін} = 225 + 312.39 \cdot 0.06948 \approx 225 + 21.71 = 246.71^\circ\text{C}$$

Отже після одного циклу ми маємо максимальний перегрів (після 20 хв):

$\theta_{max} \approx 537.4^\circ\text{C}$. Перегрів в кінці циклу: $\theta_{кін} \approx 246.7^\circ\text{C}$.

Абсолютна температура:

$$T = T_{окр} + \theta$$

$$T_{max} \approx 30 + 537.4 = 567.4^\circ\text{C}$$

Якщо цикл повторюється багато разів (періодичний режим)

Після кількох циклів встановиться періодичний режим із практично тим самим кінцевим перегрівом $\theta_{кін} \approx 246.8^\circ\text{C}$ і піком $\theta_{max} \approx 538.6^\circ\text{C}$ (для цих параметрів $\tau \ll t_1, t_2$, тому встановлення відбувається швидко).

Тепловий висновок: порівняти T_{max} із допустимою температурою для класу ізоляції (А/В/С/Н) і зробити висновок про допустимість. Якщо перевищує – запропонувати зниження втрат ΔP (ПЧ/зменшення навантаження/покращення вентиляції/скорочення часу перевантаження).

Експоненційний закон відмов:

$$R(t) = e^{-\lambda t}$$

$$MTBF = \frac{1}{\lambda}$$

Якщо задано базову інтенсивність λ_0 та коефіцієнти умов:

$$\lambda = \lambda_0 \cdot k_T \cdot k_{dust} \cdot k_{vib}$$

Нехай:

$$\lambda_0 = 2.0 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}, \quad k_T = 1.5, \quad k_{dust} = 1.2, \quad k_{vib} = 1.1$$

$$\lambda = 2.0 \cdot 10^{-5} \cdot 1.5 \cdot 1.2 \cdot 1.1 = 3.96 \cdot 10^{-5} \text{ год}^{-1}$$

$$MTBF = \frac{1}{3.96 \cdot 10^{-5}} \approx 25253 \text{ год}$$

Імовірність безвідмовної роботи за $t=1000$ год:

$$R(1000) = e^{-(3.96 \cdot 10^{-5}) \cdot 1000} = e^{-0.0396} \approx 0.961$$

Варіанти виконання роботи

№	t ₁ , хв	M ₁ /M _N	M ₂ /M _N	ΔP ₁ , Вт	ΔP ₂ , Вт	R _{th} , °C/Вт	C _{th} , Дж/°C	T _{окр} , °C	λ ₀ , 1/год	k _T	k _{dust}	k _{vib}	t _{мис} , год
1	20	0.90	0.40	600	250	0.90	250	30	2.0e-5	1.5	1.2	1.1	1000
2	18	0.95	0.45	650	280	0.85	220	25	1.8e-5	1.4	1.1	1.2	1500
3	22	0.85	0.35	560	210	1.00	260	30	2.2e-5	1.6	1.3	1.1	1000
4	15	1.00	0.50	720	320	0.80	200	35	2.5e-5	1.7	1.2	1.3	800
5	24	0.80	0.30	520	180	0.95	280	28	1.6e-5	1.3	1.2	1.1	2000
6	16	0.92	0.42	610	260	0.88	240	30	2.1e-5	1.5	1.1	1.2	1200
7	21	0.88	0.38	590	235	0.92	270	27	1.9e-5	1.4	1.3	1.2	1500
8	19	0.97	0.47	680	300	0.83	230	32	2.6e-5	1.8	1.2	1.2	700
9	17	0.90	0.55	640	360	0.78	210	30	2.4e-5	1.6	1.1	1.3	900
10	23	0.82	0.32	540	190	1.05	300	26	1.7e-5	1.3	1.2	1.1	2500
11	14	1.05	0.45	760	290	0.75	190	35	2.8e-5	1.9	1.3	1.4	600
12	25	0.78	0.28	500	170	1.00	280	25	1.5e-5	1.2	1.1	1.1	3000
13	12	1.10	0.60	820	420	0.70	180	38	3.0e-5	2.0	1.2	1.5	500
14	20	0.86	0.36	575	220	0.93	260	30	2.0e-5	1.5	1.2	1.2	1200
15	18	0.93	0.33	630	205	0.98	290	29	1.8e-5	1.4	1.1	1.1	2000

У всіх варіантах цикл $T=30$ хв, $t_2=30-t_1$. Якщо $T_{\max} \leq T_{\text{доп}}$, то режим допустимий.

Лабораторна робота №12

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ РОБОТИ АВТОМАТИЗОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДУ З УРАХУВАННЯМ ЕНЕРГОЕФЕКТИВНОСТІ ТА УМОВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Мета: побудова та порівняння 2–3 стратегій керування (експлуатації) автоматизованого електроприводу в заданих режимах з подальшим вибором оптимальної стратегії за сукупністю критеріїв енергоефективності – мінімуму спожитої енергії W та втрат ΔW – за умови дотримання обмежень за температурою T і часом циклу (вимогами до продуктивності).

Короткі теоретичні відомості

Оптимізація режимів керування/експлуатації електроприводу формулюється як задача вибору такої стратегії, яка забезпечує мінімальні енерговитрати за умови дотримання технологічних і теплових обмежень. Узагальнений критерій оптимальності доцільно задавати у вигляді цільової функції з штрафними доданками за порушення обмежень:

$$J = W + \alpha \cdot \max(0, T_{\max} - T_{\text{доп}}) + \beta \cdot \max(0, t_{\text{цикл}} - t_{\text{доп}})$$

де W – спожита енергія за цикл або за заданий інтервал роботи; T_{\max} – максимальна температура (наприклад, обмоток або корпусу двигуна) у процесі роботи; $T_{\text{доп}}$ – допустиме значення температури; $t_{\text{цикл}}$ – фактичний час технологічного циклу; $t_{\text{доп}}$ – гранично допустимий час циклу (вимога продуктивності); α і β – вагові коефіцієнти, що визначають «жорсткість» штрафу за перевищення температурних та часових обмежень відповідно.

У межах розрахункової лабораторної роботи оптимізаційну задачу реалізують практично через порівняльний аналіз декількох наперед заданих сценаріїв керування, для яких розраховують W , ΔW (втрати енергії) та

оціночні теплові показники T , після чого обирають сценарій з мінімальним значенням J за виконання обмежень. Типовими сценаріями є:

1. **Сценарій А:** робота без перетворювача частоти (ПЧ); регулювання подачі дроселюванням/заслінкою при практично сталій швидкості.
2. **Сценарій В:** робота з ПЧ; зниження швидкості обертання n за законом V/f для забезпечення необхідної продуктивності зі зменшенням споживаної потужності.
3. **Сценарій С:** робота з ПЧ із додатковим енергозберіжним режимом «sleep» (вимикання або перехід у знижене споживання на холостому ході).

Для приводів насосів і вентиляторів визначальними є закони подібності (афінності), згідно з якими при зміні швидкості обертання:

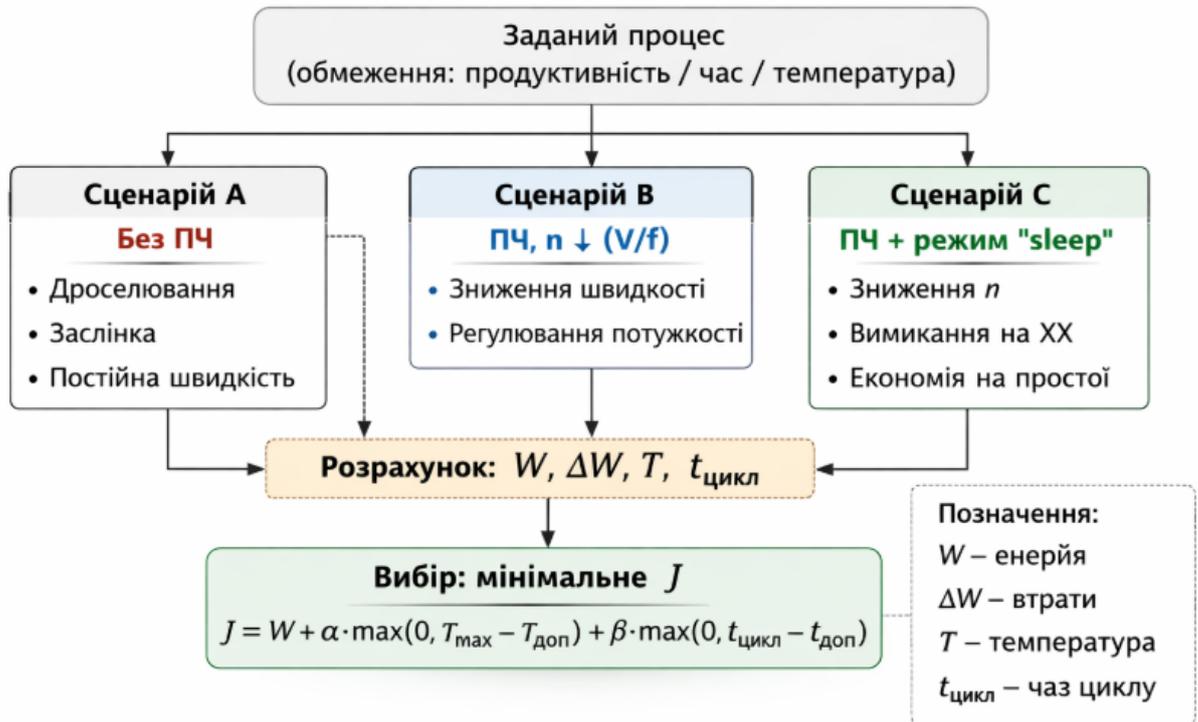
$$Q \sim n$$

$$H \sim n^2$$

$$P \sim n^3$$

де Q – подача, H – напір (тиск), P – споживана потужність. Звідси випливає, що зменшення швидкості n забезпечує суттєве зниження потужності та енергії за рахунок кубічної залежності $P(n)$, що робить частотне регулювання принципово енергоефективнішим порівняно з дроселюванням.

Схема прийняття рішення: вибір оптимальної стратегії керування



Порядок виконання

1. Описати процес і обмеження: продуктивність, час циклу, $T_{\text{доп}}$.
2. Сформувані 2–3 сценарії керування.
3. Для кожного сценарію визначити: профіль швидкості $n(t)$, профіль навантаження $M_c(t)$, P_1 або $P_2(t)$ та η .
4. Розрахувати енергію:

$$W = \sum P_{1,i} t_i$$

5. Перевірити нагрів (через $M_{\text{екв}}$ або теплову модель з ЛР11).
6. Вибрати оптимальний сценарій та обґрунтувати.

Приклад виконання

Об'єкт: вентилятор (квадратичне навантаження).

Вимога процесу: забезпечити продуктивність $Q=0.8Q_N$ протягом $t=8$ год/зміну.

Обмеження:

- за температурою: $T_{\max} \leq T_{\text{доп}}$ (перевірка через еквівалентний момент або теплову модель);
- за продуктивністю/часом: продуктивність не нижче заданої (в нашому випадку 80% номіналу упродовж зміни).

Дано: номінальна споживана потужність двигуна при номінальній швидкості:

$$P_{1N} = 10 \text{ кВт}$$

Порівняти два сценарії:

А) без ПЧ, регулювання заслінкою (швидкість 100%)

В) з ПЧ, зменшення швидкості до $n=0.8n_N$ (закон V/f)

Для вентиляторів/насосів (закони подібності):

$$\frac{Q}{Q_N} = \frac{n}{n_N}$$

$$\frac{H}{H_N} = \left(\frac{n}{n_N} \right)^2$$

$$\frac{P}{P_N} = \left(\frac{n}{n_N} \right)^3$$

Енергія за інтервал для сталого режиму:

$$W = P_1 \cdot t$$

Для довільного профілю:

$$W = \int_0^t P_1(\tau) d\tau \approx \sum_{i=1}^m P_{1,i} \Delta t_i$$

Економія:

$$\Delta W = W_A - W_B$$

$$\delta = \frac{\Delta W}{W_A} \cdot 100\%$$

Оскільки задача зміна 8 год і продуктивність стала, приймаємо стаціонарні профілі.

Сценарій А (заслінка, без ПЧ)

Швидкість:

$$n_A(t) = n_N$$

$$0 \leq t \leq 8 \text{ год}$$

Продуктивність зменшується заслінкою до $0.8Q_N$, але швидкість не знижується, тому потужність близька до номінальної. Прийmemo (за умовою):

$$P_{1A} \approx 9.5 \text{ кВт}$$

Сценарій В (ПЧ, $n=0.8n_N$)

Швидкість:

$$n_B(t) = 0.8n_N$$

$$0 \leq t \leq 8 \text{ год}$$

Потужність за законом куба:

$$P_{1B} \approx P_{1N} \left(\frac{n}{n_N} \right)^3 = 10 \cdot 0.8^3 = 10 \cdot 0.512 = 5.12 \text{ кВт}$$

Розрахунок енергії W:

Сценарій А:

$$W_A = P_{1A} \cdot t = 9.5 \cdot 8 = 76$$

Сценарій В:

$$W_B = P_{1B} \cdot t = 5.12 \cdot 8 = 40.96$$

Розрахунок економії ΔW та відносної економії:

$$\Delta W = W_A - W_B = 76 - 40.96 = 35.04$$

$$\delta = \frac{\Delta W}{W_A} \cdot 100\% = \frac{35.04}{76} \cdot 100\% \approx 46.1\%$$

Перевірка нагріву (спрощено через еквівалентний момент)

Для навантаження типу вентилятор/насос:

$$M_c \sim n^2$$

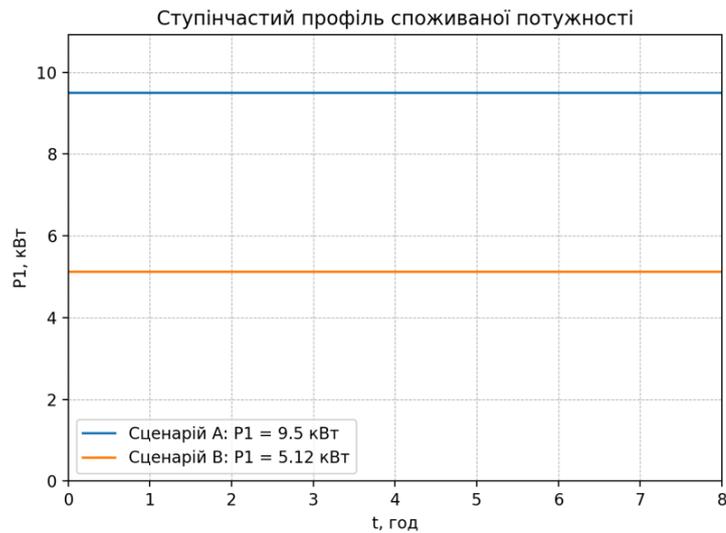
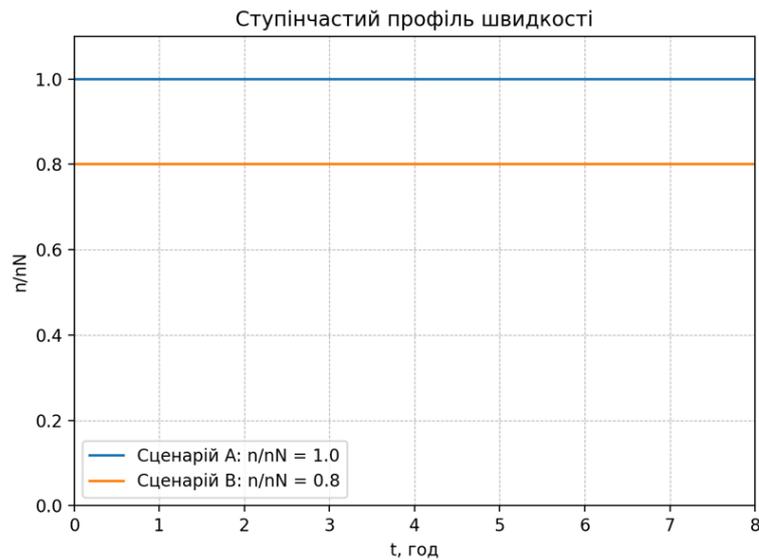
$$\frac{M_B}{M_A} = \left(\frac{n_B}{n_A} \right)^2 = (0.8)^2 = 0.64$$

Еквівалентний момент (за сталого моменту на інтервалі збігається з самим моментом):

$$M_{\text{екв}} = \sqrt{\frac{1}{t} \int_0^t M^2(\tau) d\tau}$$

Тоді для А: $M_{\text{екв,А}}=M_A$, для В: $M_{\text{екв,В}}=M_B=0.64M_A$.

Висновок по теплу: оскільки $M_{екв,В} < M_{екв,АМ}$, теплове навантаження двигуна в сценарії В менше, отже виконати обмеження $T_{max} \leq T_{доп}$ для В зазвичай легше (або принаймні не гірше), ніж для А.



Сценарій В (ПЧ, $n=0.8n_N$) є оптимальнішим за критерієм мінімуму енергії:

$$W_B = 40.96 < 76 = W_A$$

Економія:

$$\Delta W = 35.04 \text{ кВт} \quad \delta \approx 46.1\%$$

Зниження швидкості зменшує момент навантаження ($\sim n^2$), що покращує тепловий режим і полегшує виконання обмеження за температурою.

Варіанти виконання роботи

№	Тип механізму	P_N , кВт	Вимога (Q/Q_N)	Тривалість, год	$k_{др}$ для А ($P_A=k_{др}P_N$)	Простій для С (год), якщо є
1	Вентилятор	7.5	0.70	6	0.95	0
2	Вентилятор	11	0.80	8	0.95	0
3	Насос	15	0.60	10	0.92	0
4	Насос	5.5	0.75	8	0.94	1
5	Вентилятор	18.5	0.85	12	0.96	0
6	Насос	22	0.65	8	0.93	2
7	Вентилятор	30	0.50	6	0.90	0
8	Насос	9	0.90	8	0.97	0
9	Вентилятор	4	0.60	5	0.92	1
10	Насос	37	0.80	12	0.95	0
11	Вентилятор	14	0.55	8	0.91	2
12	Насос	12.5	0.70	10	0.94	0
13	Вентилятор	25	0.75	8	0.95	1
14	Насос	6.2	0.65	6	0.93	0
15	Вентилятор	45	0.85	10	0.96	2

У кожному варіанті студент має порівняти А (заслінка/дроселювання, $n=n_N$), В (ПЧ, $n=Q/Q_N$), і за бажанням С (ПЧ + sleep), якщо задані паузи/простій.

Для В використовувати:

$$P_B = P_N \left(\frac{Q}{Q_N} \right)^3$$

Для А прийняти:

$$P_A = k_{др} \cdot P_N$$