

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №1

**ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРВИННИХ ВИМІРЮВАЛЬНИХ
ПЕРЕТВОРЮВАЧІВ СТРУМУ ТА НАПРУГИ**

Мета роботи: вивчити принцип дії вимірювальних трансформаторів струму (ТС) і напруги (ТН), визначити коефіцієнти трансформації, розрахувати похибки та оцінити вплив навантаження.

Короткі теоретичні відомості

Вимірювальні трансформатори є важливими елементами електроенергетичних систем, які призначені для перетворення великих значень струму та напруги у стандартні, безпечні для вимірювання величини. Основними їх функціями є зниження високих струмів і напруг до нормованих значень (зазвичай 5 А для струму та 100 В для напруги), забезпечення гальванічної розв'язки між високовольтними колами та вимірювальними приладами, а також можливість підключення засобів контролю, обліку електроенергії та релейного захисту без прямого контакту з небезпечними рівнями напруги.

Принцип дії вимірювальних трансформаторів базується на явищі електромагнітної індукції, згідно з яким змінний струм у первинній обмотці створює змінне магнітне поле, що індукуює електрорушійну силу у вторинній обмотці. Для оцінки перетворювальних властивостей трансформатора використовують коефіцієнт трансформації. Для трансформатора струму він визначається як відношення первинного струму до вторинного:

$$k_I = \frac{I_1}{I_2} \quad (1.1)$$

де I_1 — струм у первинній обмотці, I_2 — струм у вторинній обмотці. Аналогічно, для трансформатора напруги коефіцієнт трансформації визначається як:

$$k_U = \frac{U_1}{U_2} \quad (1.2)$$

де U_1 — первинна напруга, U_2 — вторинна напруга. Ці коефіцієнти є основними параметрами, що характеризують точність і масштаб перетворення електричних величин.

Оскільки реальні вимірювальні трансформатори працюють з певними втратами та відхиленнями від ідеальних умов, виникає похибка вимірювання. Для її кількісної оцінки використовують відносну похибку, яка визначається за формулою:

$$\delta = \frac{X_{\text{НОМ}} - X_{\text{ВИМ}}}{X_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% \quad (1.3)$$

де $X_{\text{НОМ}}$ — номінальне (теоретично очікуване) значення вимірюваної величини, а $X_{\text{ВИМ}}$ — фактично виміряне значення. Відносна похибка показує ступінь відхилення реального результату від номінального і є одним із ключових показників точності вимірювального трансформатора.

Використання вимірювальних трансформаторів дозволяє не лише забезпечити безпеку обслуговуючого персоналу та вимірювальних пристроїв, але й досягти високої точності контролю параметрів електричних мереж, що є необхідною умовою ефективної та надійної роботи енергетичних систем.

Порядок виконання

1. Зібрати схему підключення ТС/ТН.
2. Виміряти первинні та вторинні величини.
3. Обчислити коефіцієнт трансформації.
4. Визначити відносну похибку.
5. Побудувати залежність похибки від навантаження.

Приклад виконання

1. Вихідні дані вимірювань:

- Номінальний первинний струм: $I_1 = 200 \text{ A}$
- Номінальний вторинний струм (очікуваний): $I_{2\text{НОМ}} = 5 \text{ A}$
- Фактично виміряний струм у вторинній обмотці: $I_{2\text{ВИМ}} = 4.92 \text{ A}$

2. Визначення коефіцієнта трансформації

Використовуємо формулу (1.1) з теоретичних відомостей для розрахунку номінального коефіцієнта трансформації k :

$$k = \frac{I_1}{I_2} = \frac{200}{5} = 40$$

- Даний трансформатор зменшує силу струму в 40 разів, що дозволяє підключати стандартні вимірювальні прилади (амперметри) зі шкалою до 5 А.

3. Розрахунок відносної похибки вимірювання

Оскільки реальний трансформатор має втрати (на перемагнічування осердя та нагрів обмоток), фактичне значення $I_{2\text{ВИМ}}$ відрізняється від номінального. Розрахуємо відносну похибку δ за формулою (1.3):

$$\delta = \frac{X_{\text{НОМ}} - X_{\text{ВИМ}}}{X_{\text{НОМ}}} \cdot 100\%$$

Підставляємо значення:

$$\delta = \frac{5 - 4.92}{5} \cdot 100\% = \frac{0.08}{5} \cdot 100\% = 0.016 \cdot 100\% = 1.6\%$$

Примітка: Отримана похибка 1.6% вказує на точність приладу. Якщо, наприклад, клас точності трансформатора становить 0.5 або 1.0, то такий трансформатор (з похибкою 1.6%) потребує калібрування або заміни, оскільки вийшов за межі допустимих норм.

Контрольні питання

1. Чому заборонено розмикати вторинну обмотку ТС?
2. Що таке клас точності?
3. Від чого залежить похибка ТН?
4. Призначення вимірювальних трансформаторів.

Варіанти завдань

№	I_1 (А)	U_1 (кВ)	Навантаження (%)
1	50	6	25
2	75	10	50
3	100	6	75
4	150	10	100
5	200	35	25
6	250	6	50
7	300	10	75
8	400	35	100
9	500	6	25
10	600	10	50
11	700	35	75
12	800	6	100
13	900	10	25
14	1000	35	50
15	1200	6	75

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №2

ДОСЛІДЖЕННЯ ДАТЧИКІВ НЕЕЛЕКТРИЧНИХ ВЕЛИЧИН В ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМАХ

Мета роботи: вивчити принцип дії датчиків неелектричних величин (температури, тиску, рівня), дослідити їх статичні характеристики, визначити чутливість, коефіцієнти перетворення та оцінити похибки вимірювання.

Короткі теоретичні відомості

У сучасних електроенергетичних системах контроль технологічних параметрів (температури обмоток трансформаторів, тиску масла, рівня охолоджувальних рідин, вібрацій тощо) здійснюється за допомогою датчиків неелектричних величин.

Датчик — це первинний вимірювальний перетворювач, який перетворює фізичну величину (температуру, тиск, рівень, переміщення) в електричний сигнал (напругу, струм або опір).

1. Датчики температури

Найбільш поширеними є:

- Терморезистори (RTD, наприклад Pt100)
- Термопари

Для металевих терморезисторів залежність опору від температури в першому наближенні має вигляд:

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (2.1)$$

де

R_0 - опір при 0°C ;

α - температурний коефіцієнт опору;

t - температура, $^\circ\text{C}$.

Для Pt100:

$R_0 = 100 \text{ Ом}$,

$\alpha \approx 0,00385 \text{ 1/}^\circ\text{C}$.

2. Датчики тиску

Тиск часто вимірюється за допомогою тензорезистивних датчиків, у яких зміна механічної деформації мембрани викликає зміну електричного опору.

Вихідний сигнал зазвичай нормується в стандартний струмовий інтерфейс: 4–20 мА.

Лінійна залежність має вигляд:

$$I = I_{min} + \frac{P}{P_{max}}(I_{max} - I_{min}) \quad (2.2)$$

3. Датчики рівня

В електроенергетиці застосовуються:

- поплавкові;
- ємнісні;
- гідростатичні датчики рівня.

Для гідростатичного методу:

$$P = \rho gh \quad (2.3)$$

де

ρ - густина рідини;

g - прискорення вільного падіння;

h - висота стовпа рідини.

4. Чутливість датчика

Чутливість визначається як відношення приросту вихідного сигналу до приросту вхідної величини:

$$S = \frac{\Delta Y}{\Delta X} \quad (2.4)$$

5. Відносна похибка

$$\delta = \frac{X_{\text{НОМ}} - X_{\text{ВИМ}}}{X_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% \quad (2.5)$$

Таким чином, точність та стабільність роботи датчиків безпосередньо впливають на надійність та безпечність функціонування електроенергетичних об'єктів.

Порядок виконання

1. Ознайомитися з типом датчика та його технічними характеристиками.
2. Задати зміну вимірюваної величини в заданому діапазоні.
3. Зняти експериментальні значення вихідного сигналу.
4. Побудувати статичну характеристику датчика.
5. Визначити чутливість.
6. Розрахувати відносну похибку.
7. Зробити висновок щодо точності та лінійності перетворення.

Приклад виконання

1. Вихідні дані

Тип датчика: Pt100

$R_0 = 100 \text{ Ом}$

$\alpha = 0,00385 \text{ 1/}^\circ\text{C}$

Температура: $t = 80^\circ\text{C}$

Фактично виміряний опір: $R_{\text{ВИМ}} = 130 \text{ Ом}$

2. Розрахунок теоретичного опору

Використовуємо формулу (2.1):

$$R_t = 100(1 + 0,00385 \cdot 80)$$

$$R_t = 100(1 + 0,308) = 130,8 \text{ Ом}$$

3. Визначення чутливості

$$S = \frac{\Delta R}{\Delta t}$$

$$S = \frac{130,8 - 100}{80 - 0}$$

$$S = \frac{30,8}{80} = 0,385 \text{ Ом}/^{\circ}\text{C}$$

4. Розрахунок відносної похибки

$$\delta = \frac{130,8 - 130}{130,8} \cdot 100\%$$

$$\delta = 0,61\%$$

Примітка: Отримана похибка 0,61% відповідає високій точності вимірювання та свідчить про коректну роботу датчика. У випадку перевищення допустимого значення похибки необхідно провести калібрування або перевірку з'єднань.

Контрольні питання

1. Що таке датчик неелектричної величини?
2. Чим відрізняється терморезистор від термопари?
3. Що таке чутливість датчика?
4. Чому у промисловості використовується сигнал 4–20 мА?
5. Від чого залежить точність вимірювання?

Варіанти завдань

№	Тип датчика	Діапазон вимірювання	Номінальний сигнал
1	Pt100	0–100°C	0–200 Ом
2	Pt100	0–200°C	0–300 Ом
3	Pt100	0–150°C	0–250 Ом
4	Термопара К	0–400°C	0–20 мВ
5	Термопара К	0–800°C	0–40 мВ
6	Термопара J	0–600°C	0–30 мВ

7	Датчик тиску	0–10 бар	4–20 мА
8	Датчик тиску	0–16 бар	4–20 мА
9	Датчик тиску	0–25 бар	4–20 мА
10	Рівнемір гідростатичний	0–2 м	4–20 мА
11	Рівнемір гідростатичний	0–5 м	4–20 мА
12	Рівнемір гідростатичний	0–10 м	4–20 мА
13	Pt100	0–300°C	0–400 Ом
14	Термопара К	0–1000°C	0–50 мВ
15	Датчик тиску	0–40 бар	4–20 мА

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №3

ДОСЛІДЖЕННЯ ХАРАКТЕРИСТИК СИНУСНО-КОСИНУСНОГО ОБЕРТОВОГО ТРАНСФОРМАТОРА (СКОТ)

Мета роботи: Вивчити принцип дії синусно-косинусного обертового трансформатора (СКОТ), дослідити залежність вихідних напруг від кута повороту ротора, визначити амплітудні значення сигналів, оцінити похибку перетворення кута та перевірити лінійність роботи пристрою.

Короткі теоретичні відомості

Синусно-косинусний обертовий трансформатор (СКОТ) є електромеханічним перетворювачем кутового переміщення в електричний сигнал. Він широко застосовується в системах автоматичного керування, сервоприводах, робототехнічних комплексах та електроенергетичних установках для точного визначення положення валів механізмів.

Принцип дії СКОТ базується на явищі електромагнітної індукції. На обмотку збудження подається змінна напруга, внаслідок чого в статорних обмотках індуються напруги, амплітуда яких залежить від кута повороту ротора.

Вихідні напруги визначаються залежностями:

$$U_s = U_m \sin \theta \quad (3.1)$$

$$U_c = U_m \cos \theta \quad (3.2)$$

де:

U_s - синусна складова напруги;

U_c - косинусна складова;

U_m - амплітудне значення;

θ - кут повороту ротора.

Кут визначається із співвідношення:

$$\tan \theta = \frac{U_s}{U_c} \quad (3.3)$$

$$\theta = \arctan \left(\frac{U_s}{U_c} \right) \quad (3.4)$$

Похибка визначення кута. Відносна похибка:

$$\delta = \frac{\theta_{\text{НОМ}} - \theta_{\text{ВИМ}}}{\theta_{\text{НОМ}}} \cdot 100\% \quad (3.5)$$

СКОТ забезпечує безперервне вимірювання кута в межах 0–360° та характеризується високою точністю, надійністю та стійкістю до електромагнітних завад.

Порядок виконання

1. Ознайомитися зі схемою підключення СКОТ.
2. Подати напругу збудження заданої амплітуди.
3. Задати кут повороту ротора (через кожні 30° або 45°).
4. Виміряти значення U_s та U_c .
5. Розрахувати кут за формулою (3.4).
6. Визначити відносну похибку.
7. Побудувати графіки залежностей $U_s(\theta)$ та $U_c(\theta)$.
8. Зробити висновки щодо точності та симетрії сигналів.

Приклад виконання

1. Вихідні дані

Амплітудна напруга:

$$U_m = 10 \text{ В}$$

Заданий кут:

$$\theta_{\text{НОМ}} = 45^\circ$$

Експериментально виміряно:

$$U_s = 7,05 \text{ В}$$

$$U_c = 7,20 \text{ В}$$

2. Теоретичні значення напруг

Використовуємо формули (3.1) та (3.2):

$$U_s = 10 \sin 45^\circ$$

$$U_s = 10 \cdot 0,707 = 7,07 \text{ В}$$

$$U_c = 10 \cos 45^\circ$$

$$U_c = 10 \cdot 0,707 = 7,07 \text{ В}$$

3. Визначення кута за вимірними значеннями

Використовуємо формулу (3.4):

$$\theta_{\text{вим}} = \arctan\left(\frac{7,05}{7,20}\right)$$

$$\theta_{\text{вим}} = \arctan(0,979)$$

$$\theta_{\text{вим}} \approx 44,4^\circ$$

4. Розрахунок відносної похибки

$$\delta = \frac{45 - 44,4}{45} \cdot 100\%$$

$$\delta = 1,33\%$$

Примітка: Отримана похибка 1,33% свідчить про достатню точність роботи СКОТ. Відхилення можуть бути спричинені неточністю вимірювальних приладів, несиметрією обмоток або впливом перешкод.

Контрольні питання

1. Принцип дії синусно-косинусного обертового трансформатора.
2. Чому використовуються одночасно синусна і косинусна складові?
3. Як визначається кут повороту ротора?
4. Від чого залежить точність СКОТ?
5. Де застосовуються такі перетворювачі?

Варіанти завдань

№	U_m (В)	Діапазон кута	Крок вимірювання
1	5	0–90°	15°
2	5	0–180°	30°
3	5	0–360°	45°
4	10	0–90°	15°
5	10	0–180°	30°
6	10	0–360°	45°
7	12	0–90°	10°
8	12	0–180°	30°
9	12	0–360°	60°
10	24	0–90°	15°
11	24	0–180°	30°
12	24	0–360°	45°
13	15	0–90°	15°
14	15	0–180°	30°
15	15	0–360°	45°

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №4
**ДОСЛІДЖЕННЯ ВИКОНАВЧИХ МЕХАНІЗМІВ ТА
РЕГУЛЮВАЛЬНИХ ОРГАНІВ**

Мета роботи: вивчити принцип дії виконавчих механізмів електроенергетичних систем, дослідити їх механічні та електричні характеристики, визначити залежність моменту від струму, потужності від навантаження, розрахувати ККД та оцінити точність позиціонування регулювального органа.

Короткі теоретичні відомості

Виконавчий механізм є кінцевою ланкою системи автоматичного керування і призначений для перетворення електричного сигналу керування в механічний вплив на регулювальний орган (засувку, клапан, заслінку, реостат, перемикач відпаяк трансформатора тощо).

У електроенергетиці застосовуються:

- електродвигуни постійного струму;
- асинхронні двигуни;
- сервоприводи;
- електромагнітні виконавчі механізми.

1. Електромеханічна характеристика двигуна

Електромагнітний момент двигуна пропорційний струму:

$$M = kI \quad (4.1)$$

де

M - момент (Н·м),

k - коефіцієнт пропорційності,

I - струм якоря (А).

2. Механічна потужність

$$P_{\text{мех}} = M\omega \quad (4.2)$$

де

ω - кутова швидкість:

$$\omega = \frac{2\pi n}{60} \quad (4.3)$$

n - оберти за хвилину.

3. Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{ел}}} \cdot 100\% \quad (4.4)$$

де

$P_{\text{ел}} = U I$ — електрична потужність.

4. Статична характеристика регулювального органа

Для лінійної засувки:

$$Q = kx \quad (4.5)$$

де

Q - витрата,

x - переміщення штока.

Виконавчі механізми повинні забезпечувати достатній момент, стабільність роботи та точність позиціонування.

Порядок виконання

1. Ознайомитися з типом виконавчого механізму.
2. Задати напругу живлення.
3. Виміряти струм споживання.
4. Визначити оберти двигуна.
5. Розрахувати момент за формулою (4.1).
6. Обчислити механічну потужність.
7. Визначити ККД.
8. Побудувати механічну характеристику $M = f(I)$.
9. Зробити висновки щодо режиму роботи.

Приклад виконання

1. Вихідні дані

Тип двигуна: постійного струму

Напруга живлення: $U = 220 \text{ В}$

Струм: $I = 3 \text{ А}$

Коефіцієнт: $k = 0,8 \text{ Н}\cdot\text{м/А}$

Оберти: $n = 1500 \text{ об/хв}$

2. Розрахунок моменту

Використовуємо формулу (4.1):

$$M = 0,8 \cdot 3$$

$$M = 2,4 \text{ Н}\cdot\text{м}$$

3. Визначення кутової швидкості

$$\omega = \frac{2\pi \cdot 1500}{60}$$

$$\omega = \frac{3000\pi}{60}$$

$$\omega = 50\pi \approx 157 \text{ рад/с}$$

4. Механічна потужність

$$P_{\text{мех}} = 2,4 \cdot 157$$

$$P_{\text{мех}} = 376,8 \text{ Вт}$$

5. Електрична потужність

$$P_{\text{ел}} = 220 \cdot 3$$

$$P_{\text{ел}} = 660 \text{ Вт}$$

6. Коефіцієнт корисної дії

$$\eta = \frac{376,8}{660} \cdot 100\%$$

$$\eta = 57,1\%$$

Примітка: Отриманий ККД 57,1% свідчить про значні втрати (на нагрів, тертя, магнітні втрати). Для промислових приводів ККД зазвичай становить 70–90%, тому в даному випадку двигун працює в неповному або перевантаженому режимі.

Контрольні питання

1. Призначення виконавчих механізмів у системах автоматизації.
2. Від чого залежить електромагнітний момент двигуна?
3. Як визначається механічна потужність?
4. Що таке ККД приводу?
5. Які види регулювальних органів застосовуються в електроенергетиці?

Варіанти завдань

№	U (В)	I (А)	n (об/хв)	k (Н·м/А)
1	110	2	1000	0,7
2	110	3	1200	0,8
3	110	4	1500	0,9
4	220	2	1000	0,7
5	220	3	1500	0,8
6	220	4	1800	0,9
7	220	5	1500	1,0
8	380	2	1000	0,8
9	380	3	1500	0,9
10	380	4	1800	1,0
11	380	5	2000	1,1
12	380	6	2200	1,2
13	500	3	1500	1,0
14	500	4	1800	1,1
15	500	5	2000	1,2

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №5
**ДОСЛІДЖЕННЯ ПРОГРАМНО-АПАРАТНИХ ЗАСОБІВ
КЕРУВАННЯ (ПЛК)**

Мета роботи: ознайомитися з принципом роботи програмованого логічного контролера (ПЛК), вивчити його структуру, дослідити цикл сканування, реалізувати алгоритм керування електроприводом у середовищі програмування, виконати розрахунок часу спрацювання та перевірити коректність логіки роботи.

Короткі теоретичні відомості

Програмований логічний контролер (ПЛК) є спеціалізованим мікропроцесорним пристроєм, призначеним для автоматичного керування технологічними процесами в режимі реального часу. Його застосування забезпечує гнучкість, надійність та високу точність автоматизації у промислових системах. Типова структура ПЛК включає центральний процесор (CPU), модулі цифрових входів і виходів, аналогові модулі (за необхідності), блок живлення та комунікаційні інтерфейси, які забезпечують взаємодію з іншими пристроями та системами.

Принцип роботи ПЛК базується на циклічному виконанні програми, що називається циклом сканування. У межах цього циклу контролер послідовно виконує зчитування стану входних сигналів, обробку даних відповідно до програми користувача, оновлення стану вихідних сигналів і проведення внутрішньої діагностики. Тривалість одного такого циклу визначається як час сканування і обчислюється за формулою:

$$T_{\text{скан}} = T_{\text{вх}} + T_{\text{прогр}} + T_{\text{вих}} \quad (5.1)$$

де $T_{\text{вх}}$ - час зчитування входів, $T_{\text{прогр}}$ - час виконання програми, $T_{\text{вих}}$ - час оновлення виходів. Значення цього параметра є критично важливим для систем реального часу, оскільки визначає швидкість реакції системи на зміну входних сигналів.

Програмування ПЛК ґрунтується на використанні базових логічних операцій, таких як AND (логічне «І»), OR (логічне «АБО») та NOT (логічне «НІ»), що дозволяють реалізовувати алгоритми керування різної складності. Крім того, широко застосовуються функціональні елементи, зокрема таймери (TON — таймер затримки включення, TOF — таймер затримки вимкнення) та лічильники (CTU — лічильник на збільшення, STD — на зменшення).

Таймер затримки включення (TON) забезпечує формування затримки між моментом подачі вхідного сигналу та активацією виходу. Час спрацювання такого таймера визначається встановленим значенням затримки:

$$t_{\text{вкл}} = t_{\text{зад}} \quad (5.2)$$

де $t_{\text{зад}}$ - заданий користувачем час затримки. Це дозволяє реалізовувати часові алгоритми керування, необхідні в багатьох технологічних процесах.

При підключенні виконавчих пристроїв до виходів ПЛК важливим є врахування електричних параметрів навантаження. Потужність навантаження визначається за формулою:

$$P = UI \quad (5.3)$$

де U - напруга, I - струм навантаження. При цьому обов'язковою умовою безпечної роботи є дотримання обмеження:

$$I_{\text{нагр}} \leq I_{\text{ном вих}} \quad (5.4)$$

де $I_{\text{нагр}}$ — струм навантаження, $I_{\text{ном вих}}$ — номінально допустимий струм виходу ПЛК. Недотримання цієї умови може призвести до перевантаження та виходу з ладу контролера.

Програмовані логічні контролери є ключовими елементами сучасних систем автоматизації, що забезпечують ефективне, надійне та безпечне керування технологічними процесами на основі логічних і часових алгоритмів.

Порядок виконання

1. Ознайомитися з технічними характеристиками ПЛК.
2. Визначити кількість входів та виходів для реалізації алгоритму.
3. Створити програму керування (Ladder Diagram або FBD).
4. Реалізувати логіку пуску двигуна через кнопку «Пуск» і «Стоп».
5. Додати таймер затримки включення.
6. Визначити час сканування.
7. Розрахувати струм навантаження виходу.
8. Перевірити працездатність програми в режимі моделювання.

Приклад виконання

1. Умова задачі

Необхідно реалізувати алгоритм керування двигуном:

- Кнопка S1 — «Пуск»
- Кнопка S2 — «Стоп»
- Затримка включення — 5 с
- Напруга живлення котушки контактора — 24 В
- Струм котушки — 0,2 А
- Номінальний струм виходу ПЛК — 0,5 А

2. Логічний алгоритм

Умова роботи двигуна:

$$Q = S1 \cdot \overline{S2}$$

Після натискання S1 запускається таймер TON (5 с), після завершення таймера активується вихід Q.

3. Розрахунок навантаження виходу

Використовуємо формулу (5.3):

$$P = 24 \cdot 0,2$$

$$P = 4,8 \text{ Вт}$$

Перевіряємо умову (5.4):

$$0,2 < 0,5$$

Умова виконується — вихід ПЛК працює в допустимому режимі.

4. Розрахунок часу сканування

Припустимо:

$$T_{\text{вх}} = 2 \text{ мс}$$

$$T_{\text{прогр}} = 5 \text{ мс}$$

$$T_{\text{вих}} = 2 \text{ мс}$$

Використовуємо формулу (5.1):

$$T_{\text{скан}} = 2 + 5 + 2$$

$$T_{\text{скан}} = 9 \text{ мс}$$

Це означає, що реакція системи відбувається з затримкою не більше 9 мс.

Аналіз роботи : Після натискання кнопки «Пуск» двигун увімкнеться через 5 секунд. При натисканні «Стоп» живлення знімається миттєво. Система працює стабільно, навантаження не перевищує допустиме.

Контрольні питання

1. Що таке цикл сканування ПЛК?
2. З яких основних блоків складається ПЛК?
3. Що таке таймер TON?
4. Як перевірити допустимість навантаження виходу ПЛК?
5. У чому переваги ПЛК порівняно з релейною схемою?

Варіанти завдань

№	Напруга котушки (В)	Струм (А)	Затримка (с)	Кількість входів
1	24	0,1	3	2
2	24	0,2	5	3
3	24	0,3	7	3
4	48	0,2	5	4
5	48	0,3	8	4

6	110	0,2	5	3
7	110	0,4	10	4
8	220	0,1	4	2
9	220	0,3	6	3
10	220	0,4	8	4
11	24	0,5	12	5
12	48	0,4	10	4
13	110	0,3	6	3
14	220	0,5	15	5
15	24	0,25	9	4

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №6

РОЗРОБКА ТА ДОСЛІДЖЕННЯ SCADA-СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНОГО ОБ'ЄКТА

Мета роботи: ознайомитися з принципами побудови SCADA-систем, розробити структуру моніторингу електроенергетичного об'єкта, створити мнемосхему, налаштувати обмін даними з контролером, виконати розрахунок швидкодії системи та оцінити навантаження на мережу передачі даних.

Короткі теоретичні відомості

SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) є програмно-апаратним комплексом, призначеним для централізованого диспетчерського контролю, збору, обробки, візуалізації та архівації технологічної інформації в реальному часі. Такі системи широко застосовуються в енергетиці та промисловості для підвищення ефективності керування технологічними процесами. Основними функціями SCADA-систем є візуалізація параметрів електромережі, архівація вимірювань, формування аварійних повідомлень, дистанційне керування обладнанням та аналіз режимів роботи системи.

Типова структура SCADA-системи є ієрархічною та включає кілька рівнів. На польовому рівні знаходяться датчики та вимірювальні перетворювачі, які здійснюють первинний збір даних. Рівень контролерів представлений програмованими логічними контролерами (ПЛК), що виконують локальну обробку сигналів і передають інформацію на верхній рівень. Центральним елементом є сервер SCADA, який забезпечує зберігання, обробку та координацію даних. Взаємодія з оператором здійснюється через автоматизовані робочі місця (АРМ), де відображається інформація у зручному графічному вигляді. Об'єднання всіх компонентів забезпечується комунікаційною мережею (Ethernet, Modbus, Profibus тощо).

Важливим параметром ефективності SCADA-системи є швидкодія, яка характеризується часом оновлення даних. Він визначається сумою часу опитування контролерів, передачі даних мережею та їх обробки і візуалізації:

$$T_{\text{оновл}} = T_{\text{опит}} + T_{\text{перед}} + T_{\text{оброб}} \quad (6.1)$$

де $T_{\text{опит}}$ - час опитування ПЛК, $T_{\text{перед}}$ - час передачі даних по мережі, $T_{\text{оброб}}$ - час обробки та відображення інформації. Зменшення цього часу є ключовим для забезпечення оперативного реагування на зміни в системі.

Обсяг переданих даних визначається кількістю параметрів, що передаються, та розміром кожного з них:

$$V = N \cdot B \quad (6.2)$$

де N - кількість параметрів, B - обсяг одного параметра в байтах. Відповідно, пропускна здатність каналу зв'язку визначається як відношення обсягу даних до часу їх передачі:

$$C = \frac{V}{T} \quad (6.3)$$

де T - час передачі. Цей показник характеризує можливості мережі щодо обробки інформаційних потоків.

Для оцінки ефективності використання мережевих ресурсів застосовують показник навантаження на канал зв'язку:

$$L = \frac{C}{C_{\text{max}}} \cdot 100\% \quad (6.4)$$

де C - фактична пропускна здатність, C_{max} - максимально допустима пропускна здатність каналу. Перевищення допустимого рівня навантаження може призвести до затримок передачі даних і зниження надійності системи.

SCADA-система повинна забезпечувати мінімальний час оновлення інформації, високу надійність передачі даних, ефективне використання мережевих ресурсів та довготривале збереження архівів, що є необхідними

умовами для стабільного та безпечного функціонування автоматизованих систем керування.

Порядок виконання

1. Визначити об'єкт моніторингу (підстанція, насосна станція, розподільчий пункт).
2. Скласти структурну схему системи.
3. Визначити перелік контрольованих параметрів.
4. Створити мнемосхему в SCADA-середовищі.
5. Налаштувати обмін з ПЛК (наприклад, Modbus TCP).
6. Визначити період опитування.
7. Розрахувати обсяг переданих даних.
8. Оцінити навантаження на мережу.
9. Зробити висновки щодо ефективності системи.

Приклад виконання

1. Умова задачі

Об'єкт: трансформаторна підстанція 10/0,4 кВ

Контрольовані параметри:

- Напруга (3 фази) — 3 параметри
- Струм (3 фази) — 3 параметри
- Потужність — 1 параметр
- Температура трансформатора — 1 параметр
- Стан вимикача — 1 параметр

Загальна кількість параметрів: $N=9$

Кожен параметр передається як число типу Float (4 байти).

Період опитування: 1 с

Максимальна пропускну здатність мережі: 100 Мбіт/с

2. Розрахунок обсягу переданих даних

Використовуємо формулу (6.2):

$$V = 9 \cdot 4$$

$$V = 36 \text{ байт}$$

- За 1 секунду передається 36 байт.

3. Пропускна здатність

$$C = \frac{36}{1}$$

$$C = 36 \text{ байт/с}$$

Переведемо у біти:

$$36 \cdot 8 = 288 \text{ біт/с}$$

4. Розрахунок навантаження

$$L = \frac{288}{100\,000\,000} \cdot 100\%$$

$$L = 0,000288\%$$

5. Час оновлення

Припустимо:

$$T_{\text{опит}} = 50 \text{ мс}$$

$$T_{\text{перед}} = 5 \text{ мс}$$

$$T_{\text{оброб}} = 20 \text{ мс}$$

$$T_{\text{оновл}} = 50 + 5 + 20$$

$$T_{\text{оновл}} = 75 \text{ мс}$$

Система оновлює дані менш ніж за 0,1 секунди.

Отримане навантаження на мережу є незначним. Час оновлення даних задовольняє вимоги оперативного моніторингу. SCADA-система забезпечує стабільний контроль параметрів підстанції.

Контрольні питання

1. Що таке SCADA-система?
2. Які рівні має архітектура SCADA?

3. Від чого залежить швидкодія системи?
4. Як розрахувати навантаження на мережу?
5. Які функції виконує сервер SCADA?

Варіанти завдань

№	Об'єкт	Кількість параметрів	Період опитування (с)	Тип даних
1	Підстанція 6/0,4 кВ	8	1	Float
2	Підстанція 10/0,4 кВ	10	1	Float
3	Підстанція 35/10 кВ	12	0,5	Float
4	Насосна станція	6	1	Float
5	Котельня	9	2	Float
6	Розподільчий пункт	7	1	Float
7	Сонячна електростанція	15	2	Float
8	Вітрова електростанція	14	1	Float
9	Дизель-генератор	5	0,5	Float
10	Підстанція 110/35 кВ	18	1	Float
11	Підстанція 330/110 кВ	25	2	Float
12	Гідроелектростанція	20	1	Float
13	ТЕС	30	2	Float
14	РП 0,4 кВ	6	1	Float
15	Промисловий цех	11	0,5	Float

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНО-КЕРОВАНОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА З АСИНХРОННИМ ДВИГУНОМ

Мета роботи: вивчити принцип роботи частотно-керованого електропривода з асинхронним двигуном, дослідити залежність швидкості обертання від частоти живлення, розрахувати ковзання, електромагнітний момент та потужність двигуна, оцінити енергетичну ефективність системи керування.

Короткі теоретичні відомості

Частотно-керований електропривод є сучасною системою електромеханічного перетворення енергії, яка забезпечує ефективне регулювання швидкості обертання електродвигуна. До його складу входять асинхронний двигун (АД), перетворювач частоти (інвертор) та система керування. Основний принцип регулювання полягає у зміні частоти живлення обмоток статора, що безпосередньо впливає на швидкість обертання магнітного поля і, відповідно, ротора двигуна.

Синхронна швидкість обертання магнітного поля визначається залежністю:

$$n_0 = \frac{60f}{p} \quad (7.1)$$

де f - частота живлення (Гц), p - кількість пар полюсів. Ця швидкість є теоретичною і характеризує швидкість обертання магнітного поля статора.

Фактична швидкість ротора завжди дещо менша за синхронну, що пояснюється наявністю ковзання. Ковзання визначається за формулою:

$$s = \frac{n_0 - n}{n_0} \quad (7.2)$$

де n - фактична швидкість ротора. Ковзання є важливим параметром, оскільки саме воно забезпечує виникнення електромагнітного моменту в асинхронному двигуні.

Електромагнітний момент двигуна у спрощеному вигляді визначається як:

$$M = \frac{9550P}{n} \quad (7.3)$$

де P - механічна потужність (кВт), n - швидкість обертання (об/хв). Дана залежність показує, що при зменшенні швидкості момент зростає за сталої потужності, що має практичне значення при регулюванні режимів роботи привода.

Для забезпечення стабільної роботи двигуна при зміні частоти використовується закон пропорційності напруги до частоти:

$$\frac{U}{f} = const \quad (7.4)$$

Дотримання цього співвідношення дозволяє підтримувати сталий магнітний потік у двигуні, що, у свою чергу, забезпечує практично незмінний електромагнітний момент у широкому діапазоні швидкостей.

Ефективність роботи електропривода оцінюється за коефіцієнтом корисної дії, який визначається як:

$$\eta = \frac{P_{\text{мех}}}{P_{\text{ел}}} \cdot 100\% \quad (7.5)$$

де $P_{\text{мех}}$ - механічна потужність на валу двигуна, $P_{\text{ел}}$ - споживана електрична потужність. Високий ККД є показником енергоефективності системи.

Частотно-керований електропривод забезпечує плавний пуск, зниження пускових струмів, точне регулювання швидкості, підвищення енергоефективності та збільшення терміну служби обладнання, що робить його невід'ємною складовою сучасних автоматизованих систем.

Порядок виконання

1. Ознайомитися з паспортними даними двигуна.
2. Встановити частоту живлення (згідно варіанта).
3. Виміряти напругу, струм та швидкість обертання.
4. Розрахувати синхронну швидкість.
5. Визначити ковзання.
6. Розрахувати момент двигуна.
7. Перевірити виконання закону U/f .
8. Обчислити ККД.
9. Зробити висновки щодо ефективності регулювання.

Приклад виконання

1. Вихідні дані

- Номінальна потужність двигуна: $P = 4$ кВт
- Кількість пар полюсів: $p = 2$
- Частота живлення: $f = 40$ Гц
- Фактична швидкість: $n = 1180$ об/хв
- Напруга: $U = 320$ В
- Струм: $I = 8$ А

2. Розрахунок синхронної швидкості

Використовуємо формулу (7.1):

$$n_0 = \frac{60 \cdot 40}{2}$$

$$n_0 = 1200 \text{ об/хв}$$

3. Визначення ковзання

Використовуємо формулу (7.2):

$$s = \frac{1200 - 1180}{1200}$$

$$s = \frac{20}{1200}$$

$$s = 0,0167 = 1,67\%$$

4. Розрахунок моменту

Використовуємо формулу (7.3):

$$M = \frac{9550 \cdot 4}{1180}$$

$$M = \frac{38200}{1180}$$

5. Перевірка закону U/f

$$\frac{U}{f} = \frac{320}{40}$$

$$\frac{U}{f} = 8$$

При номінальних умовах (400 В, 50 Гц):

$$\frac{400}{50} = 8$$

Умова виконується — магнітний потік залишається сталим.

6. Електрична потужність

$$P_{\text{ел}} = \sqrt{3}UI$$

$$P_{\text{ел}} = 1,732 \cdot 320 \cdot 8$$

$$P_{\text{ел}} \approx 4434 \text{ Вт}$$

7. ККД

$$\eta = \frac{4000}{4434} \cdot 100\%$$

$$\eta \approx 90,2\%$$

Висновок: Ковзання становить 1,67%, що відповідає нормальному режиму роботи. Закон U/f виконується, момент двигуна достатній для навантаження. ККД понад 90% свідчить про високу енергоефективність привода.

Контрольні питання

1. Що таке синхронна швидкість?
2. Що характеризує ковзання?
3. У чому суть закону U/f ?
4. Переваги частотного регулювання швидкості.
5. Як визначається момент двигуна?

Варіанти завдань

№	P (кВт)	p	f (Гц)	U (В)
1	1,5	2	25	200
2	2,2	2	30	240
3	3	2	35	280
4	4	2	40	320
5	5,5	2	45	360
6	7,5	2	50	400
7	2,2	3	25	200
8	3	3	30	240
9	4	3	35	280
10	5,5	3	40	320
11	7,5	3	45	360
12	11	3	50	400
13	4	4	30	240
14	5,5	4	40	320
15	7,5	4	50	400

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА №8

ДОСЛІДЖЕННЯ СИСТЕМ РЕЗЕРВУВАННЯ ТА ВІДМОВОСТІЙКОСТІ ТЕХНІЧНИХ ЗАСОБІВ АВТОМАТИЗАЦІЇ

Мета роботи: вивчити принципи побудови систем резервування в автоматизованих електроенергетичних системах, дослідити показники надійності, розрахувати ймовірність безвідмовної роботи, інтенсивність відмов, середній час напрацювання на відмову (MTBF) та оцінити ефективність різних схем резервування.

Короткі теоретичні відомості

Надійність технічної системи визначається як її здатність зберігати працездатність протягом заданого часу за встановлених умов експлуатації. Вона є ключовою характеристикою систем автоматизації та енергетичних установок, оскільки безпосередньо впливає на безперервність і безпеку їх роботи. Основними показниками надійності є ймовірність безвідмовної роботи $R(t)$, інтенсивність відмов λ , середній час напрацювання на відмову (MTBF) та коефіцієнт готовності.

Ймовірність безвідмовної роботи для елементів, що підпорядковуються експоненційному закону розподілу, визначається залежністю:

$$R(t) = e^{-\lambda t} \quad (8.1)$$

де λ - інтенсивність відмов (1/год), t - час роботи. Ця функція показує ймовірність того, що елемент працюватиме без відмов протягом часу t .

Середній час напрацювання на відмову є оберненою величиною до інтенсивності відмов:

$$MTBF = \frac{1}{\lambda} \quad (8.2)$$

і характеризує середню тривалість безвідмовної роботи елемента.

Для систем, що складаються з кількох елементів, надійність залежить від способу їх з'єднання. У разі послідовного з'єднання загальна ймовірність безвідмовної роботи визначається як добуток надійностей окремих елементів:

$$R_{\text{сист}} = \prod_{i=1}^n R_i \quad (8.3)$$

Якщо всі елементи мають однакову інтенсивність відмов, то:

$$R_{\text{сист}} = e^{-n\lambda t} \quad (8.4)$$

що свідчить про зниження надійності зі збільшенням кількості елементів.

Для підвищення надійності застосовується паралельне (гаряче) резервування. Для двох однакових елементів ймовірність безвідмовної роботи визначається як:

$$R_{\text{рез}} = 1 - (1 - R)^2 \quad (8.5)$$

що значно підвищує загальну надійність системи.

Коефіцієнт готовності враховує не лише відмови, але й час відновлення:

$$K_{\Gamma} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (8.6)$$

де MTTR - середній час відновлення. Цей показник характеризує частку часу, протягом якого система перебуває у працездатному стані.

Використання резервування та оптимізація параметрів надійності дозволяють суттєво підвищити ефективність і безперервність роботи систем автоматизації, зокрема підстанцій, SCADA-серверів, каналів зв'язку та програмованих контролерів.

Порядок виконання

1. Визначити інтенсивність відмов елементів системи.
2. Обрати тип структури (послідовна, паралельна, комбінована).
3. Розрахувати MTBF кожного елемента.

4. Визначити ймовірність безвідмовної роботи.
5. Розрахувати надійність системи без резервування.
6. Розрахувати надійність з резервуванням.
7. Визначити коефіцієнт готовності.
8. Порівняти результати та зробити висновки.

Приклад виконання

1. Вихідні дані

Система складається з трьох елементів (ПЛК, сервер, канал зв'язку).

Інтенсивність відмов кожного:

$$\lambda = 2 \cdot 10^{-5} \text{ 1/год}$$

Час роботи:

$$t = 1000 \text{ год}$$

Середній час відновлення:

$$MTTR = 5 \text{ год}$$

2. MTBF одного елемента

Використовуємо формулу (8.2):

$$MTBF = \frac{1}{2 \cdot 10^{-5}}$$

$$MTBF = 50000 \text{ год}$$

3. Ймовірність безвідмовної роботи одного елемента

Використовуємо формулу (8.1):

$$R = e^{-2 \cdot 10^{-5} \cdot 1000}$$

$$R = e^{-0,02}$$

$$R \approx 0,9802$$

4. Система без резервування (послідовне з'єднання)

Використовуємо формулу (8.3):

$$R_{\text{сист}} = 0,9802^3$$

$$R_{\text{сист}} \approx 0,941$$

Ймовірність безвідмовної роботи системи становить 94,1%.

5. Система з резервуванням одного елемента (подвійний сервер)

Використовуємо формулу (8.5):

$$R_{\text{рез}} = 1 - (1 - 0,9802)^2$$

$$R_{\text{рез}} = 1 - (0,0198)^2$$

$$R_{\text{рез}} = 1 - 0,000392$$

$$R_{\text{рез}} \approx 0,9996$$

Надійність підвищилась до 99,96%.

6. Коефіцієнт готовності

Використовуємо формулу (8.6):

$$K_{\Gamma} = \frac{50000}{50000 + 5}$$

$$K_{\Gamma} = \frac{50000}{50005}$$

$$K_{\Gamma} \approx 0,9999$$

Висновок: Резервування значно підвищує надійність системи (з 94,1% до 99,96%). Коефіцієнт готовності близький до одиниці, що є необхідною умовою для критичних об'єктів електроенергетики.

Контрольні питання

1. Що таке інтенсивність відмов?
2. Як визначається MTBF?
3. Чим відрізняється послідовна структура від паралельної?

4. Що таке гаряче резервування?
5. Як визначається коефіцієнт готовності?

Варіанти завдань

№	λ (1/год)	t (год)	Кількість елементів	MTTR (год)
1	$1 \cdot 10^{-5}$	500	2	4
2	$2 \cdot 10^{-5}$	1000	3	5
3	$3 \cdot 10^{-5}$	1500	3	6
4	$5 \cdot 10^{-5}$	2000	4	8
5	$1 \cdot 10^{-4}$	1000	2	5
6	$2 \cdot 10^{-4}$	500	3	4
7	$3 \cdot 10^{-4}$	800	4	6
8	$4 \cdot 10^{-5}$	1200	3	5
9	$6 \cdot 10^{-5}$	1500	4	7
10	$8 \cdot 10^{-5}$	2000	5	10
11	$1 \cdot 10^{-5}$	2000	3	3
12	$2 \cdot 10^{-5}$	3000	4	6
13	$5 \cdot 10^{-5}$	2500	5	8
14	$7 \cdot 10^{-5}$	1000	3	5
15	$9 \cdot 10^{-5}$	1500	4	7