

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ, МОЛОДІ ТА СПОРТУ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

Д. Ю. ШАРЕЙКО, А. М. ФОМЕНКО

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з курсу
"Комплектні електроприводи"**

У трьох частинах

Частина 1

Рекомендовано Методичною радою НУК

Електронне видання комбінованого
використання на DVD-ROM



МИКОЛАЇВ • НУК • 2011

УДК 681.5(076)
ББК 31.291
Ш 25

Укладачі: Шарейко Д. Ю., канд. техн. наук, доцент;
Фоменко А. М., старш. викладач

У підготовці методичних вказівок активну участь брали студенти
Гриднев І. Ю. (група 5371м) та Серба А. І. (група 5371)

Рецензент С. М. Новогрецький, канд. техн. наук, доцент

Шарейко Д. Ю.

Ш 25 Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Комплектні електроприводи": у 3 ч. Частина 1 / Д. Ю. Шарейко, А. М. Фоменко. – Миколаїв : Видавництво НУК, 2011. – 31 с.

Вказівки охоплюють частину курсу "Комплектні електроприводи", яка присвячена скалярному керуванню комплектних електроприводів змінного струму. Наведені опис стенду та розв'язки завдань з дослідження, налагодження параметрів регуляторів та програмування частотного перетворювача Lenze, теоретична частина та методика проведення експериментів.

Призначені для студентів спеціальностей 8.092203 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод" і 8.092201 "Електричні системи і комплекси транспортних засобів".

**УДК 681.5(076)
ББК 31.291**

Навчальне видання

**ШАРЕЙКО Дмитро Юрійович
ФОМЕНКО Андрій Миколайович**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з курсу
"Комплектні електроприводи"**

У трьох частинах

Частина 1

Технічний редактор *О.Є. Вакула*
Комп'ютерне верстання *А.Й. Лихіна*

© Шарейко Д. Ю.,
Фоменко А. М., 2011

© Видавництво НУК, 2011

Формат 60×84/16. Ум. друк. арк. 1,8. Обсяг даних 1094 кб. Тираж 14 прим. Зам. № 543.

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54025, м. Миколаїв, просп. Героїв Сталінграда, 9, e-mail : publishing@nuos.edu.ua

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру видавців,
виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції ДК № 2506 від 25.05.2006 р.

ВИМОГИ ДО ТЕХНІКИ БЕЗПЕКИ

Лабораторні роботи проводяться на ПЕОМ у комп'ютерному класі кафедри. Знаходячись у класі, кожен студент зобов'язаний дотримуватися правил техніки безпеки, які викладені в спеціальній "Інструкції з техніки безпеки в комп'ютерному класі", і правил пожежної безпеки, що також наведені в спеціальній інструкції.

Допуск до лабораторного практикуму здійснюється тільки після вивчення зазначених інструкцій і підпису у відповідному журналі.

Студенту забороняється працювати з будь-якими програмами, що не належать до теми лабораторної роботи.

Лабораторна робота № 1*

Тема: Ознайомлення зі стендом, отримання статичних характеристик елементів стенда.

Мета: вивчення принципу роботи стенда.

Для досягнення поставленої мети розв'язуються наступні задачі:

- 1) набуття базових навичок програмування перетворювача частоти;
- 2) вивчення універсального вимірювального приладу Овен ТМР1;
- 3) експериментальне дослідження статичних характеристики елементів стенду;
- 4) теоретичні побудови статичних характеристик елементів стенду та порівняння їх з експериментальними.

1. Опис лабораторної установки

Навчальний стенд являє собою систему автоматичного керування частоти обертання асинхронного двигуна. Система працює за принципом скалярного керування, де зміна всіх параметрів відбувається за допомогою перетворювача частоти (ПЧ) марки Lenze ESMD 751L4TXA. Схема установки, реальний вигляд перетворювача та опис робочих клем наведено на рис. 1.1 і 1.2 відповідно. Система замкнута за швидкістю обертання асинхронного двигуна, де головним елементом є ПЧ, який живиться від трифазної напруги 380 В. Програмування, завдання регульованої величини та моніторинг стану параметрів ПЧ відбувається за допомогою підключеного до нього промислового контролера Tesomat Foxtrot CP-1005, що зв'язаний з ПК; а також за допомогою керуючих кнопок Up/Down/Enter перетворювача частоти або безпосередньо з віддаленого пульта (рис. 1.3), винесеного на лицеву панель щитка. Завдяки створеній програмі керування, ПЧ здійснює регулювання частотою обертання асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором шляхом зміни частоти та амплітуди своєї вихідної напруги відповідно до заданого закону керування. Всі параметри захисту та виміри електричних змінних проводяться безпосередньо внутрішньою логікою ПЧ. Відстеження фактичної частоти обертання проводиться за допомогою тахогенератора та універсального датчика Овен ТРМ1.

* Усі лабораторні роботи виконуються із застосуванням обчислювальної техніки та лабораторного стенду з комплектним електроприводом Lenze.

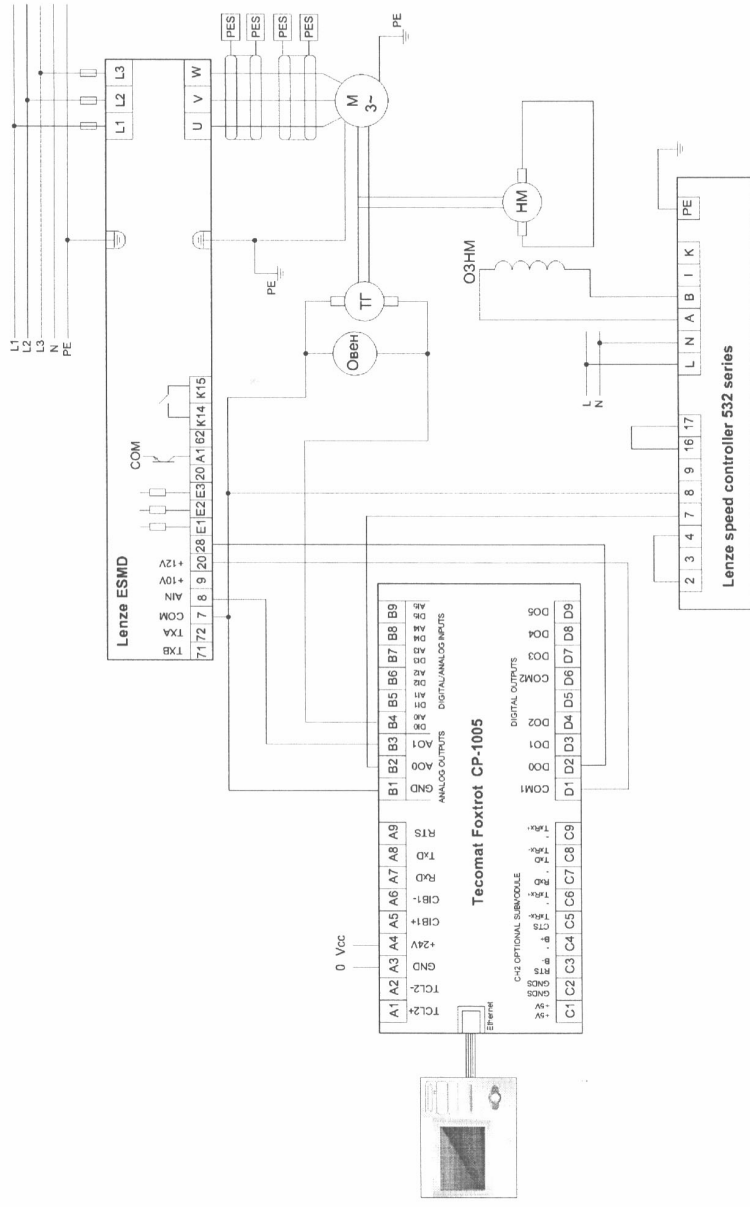


Рис. 1.1. Схема установки

Навантаження асинхронного двигуна здійснюється навантажувальною машиною (НМ), що являє собою двигун постійного струму. Щітки якоря двигуна замкнені накоротко.

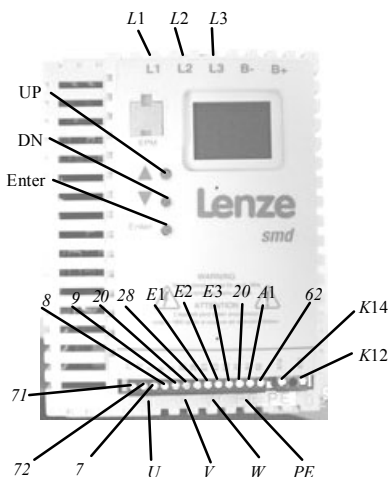


Рис. 1.2. Реальний вигляд перетворювача частоти та його опис:

$L1, L2, L3$ – фази живлення; UP/DN/Enter – кнопки програмування; 71, 72 – послідовний порт (клавіатура); 7 – загальний GND; 8 – аналоговий вхід $0 \dots +10\text{ В}$; 9 – живлення задаючого потенціометра; 20 – живлення дискретних входів; 28 – дискретний вхід Start/Stop; $E1, E2, E3$ – дискретні входи; $A1$ – конфігурація цифрових виходів; 62 – конфігурація аналогових виходів; $K12, K14$ – реле (NO контакт); U, V, W – фази керуваної напруги

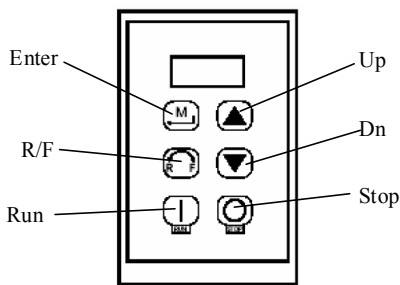


Рис. 1.3. Клавіатура віддаленого пульта

Регулювання навантаженням відбувається завдяки зміні струму обмотки збудження НМ за допомогою привода постійного струму Lenze Speed Controller 532, що керується контролером Tesomat Foxtrot CP-1005, який має зв'язок з ПК та ПЧ. За настройкою захисту НМ навантажуються не більше ніж на 80 % своєї потужності, отже, двигун працює у легкому для обмоток режимі. Керування навантажувальним моментом за допомогою виключно струму збудження дозволяє відтворювати навантаження у досить широких границях, а зв'язок з контролером дає можливість моделювати взагалі довільну форму цього навантаження, що має суттєвий науковий інтерес у дослідженні електромеханічних систем.

2. Основні теоретичні положення

Основним завданням частотного керування є дослідження роботи асинхронного двигуна (АД) при різних зв'язках між каналами управління напругою і частотою живлення статора, які називають законами керування, а також визначення законів, що забезпечують оптимальні умови роботи двигуна в статичних і перехідних режимах.

У 1925 р. академік Костенко Михайло Полієвктович сформулював загальний закон, що забезпечує оптимальні умови роботи двигуна: щоб забезпечити оптимальний режим роботи АД при всіх значеннях частоти і навантаження, необхідно відносно напругу двигуна змінювати пропорційно добутку відносної частоти на корінь квадратний з відносного моменту:

$$\gamma = \alpha \sqrt{\mu}, \quad (1)$$

де $\mu = M/M_{\text{ном}}$ – відносний електромагнітний момент. Якщо магнітне коло машини слабо насичене й активним опором статора можна знехтувати, то асинхронний двигун у цьому випадку буде працювати при практично постійному коефіцієнті потужності, запасі статичної стійкості й абсолютному ковзанні.

Закон Костенка можна отримати з таких елементарних міркувань. Якщо припустити, що коефіцієнт перевантажувальної здатності при регулюванні залишається постійним, то критичний момент, що залежить від квадрата величини магнітного потоку, також повинен залишатися постійним. Тоді відношення моментів при двох різних частотах дорівнюватиме

$$\frac{M_1}{M_2} = \frac{\Phi_1^2}{\Phi_2^2} \Rightarrow \frac{\Phi_1}{\Phi_2} = \sqrt{\frac{M_1}{M_2}}. \quad (2)$$

Але якщо знехтувати активним опором статора, то напруга статора буде врівноважуватися ЕРС основного магнітного потоку і буде лінійно зв'язана з частотою і величиною магнітного потоку. Тоді відношення напруг

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{\Phi_1 f_1}{\Phi_2 f_2}. \quad (3)$$

Підставляючи вираз (2) у вираз (3), отримаємо закон Костенка:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{f_1}{f_2} \sqrt{\frac{M_1}{M_2}} \Leftrightarrow \gamma = \alpha \sqrt{\mu}. \quad (4)$$

Для деяких простих випадків із закону Костенка можна виключити відносний момент. Вважаючи з точністю до ковзання $\omega_1 \approx \omega$, уявімо рівняння механічної характеристики навантаження степеневою функцією $M = C\omega^k$ або (у відносних одиницях) як $\mu = \alpha^k$. Тоді вираз (1) набуде вигляду

$$\gamma = \alpha^{1+k/2}. \quad (5)$$

Закони керування для типових видів навантаження наведені у табл. 1.

Таблиця. 1. Закони керування

	Вид навантаження		
	Стагичне $M = \text{const};$ $k = 0$	Вентиляторне $M = C\omega^k; k = 2$	Постійна потужність $M\omega = \text{const}; k = -1$
Закон керування	$\gamma = \alpha$	$\gamma = \alpha^2$	$\gamma = \sqrt{\alpha}$

Визначені закони керування є фактичним стандартом, закладеним у всі сучасні перетворювачі частоти широкого застосування.

Закон Костенка можна розглядати відносно розімкнутих та замкнених систем керування. Сутністю його є управління напругою (магнітним потоком) машини у функції навантаження на валу без безпосереднього її вимірювання. Якщо навантаження зменшується, то магнітний потік можна також зменшити, зменшивши напругу, але зберігши при цьому запас статичної стійкості.

Виведемо закон Костенка для випадку, коли момент навантаження невідомий:

$$M = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{\omega}; \quad (6)$$

$$\left(\frac{U_{\%}}{f_{\%}}\right)^2 = \frac{\sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi}{\omega \cdot M_n}; \quad (7)$$

$$\omega = \left(\frac{U_{\%}}{f_{\%}}\right)^2 \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot \frac{\omega_n}{\sqrt{3} \cdot U_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi} = \frac{f_{\%}^2 \cdot I_{\%}}{U_{\%}} \cdot \omega_n; \quad (8)$$

$$\omega = \frac{f^2 \cdot I_{\%} \cdot 220}{2500 \cdot U} \cdot \frac{1340}{2\pi}. \quad (9)$$

3. Порядок виконання роботи

Перетворювач частоти (ПЧ) вже має заводські налаштування на потужність двигуна, відповідну потужності ПЧ і з розрахунком на двигун 1500 об/хв, чотириполюсний.

Для першого включення достатньо подати на клема живлення $L1$, $L2$, $L3$ трифазну напругу 380 В. НЕОБХІДНО ДОТРИМУВАТИСЬ ФАЗУВАННЯ. СУВОРО ЗАБОРОНЯЄТЬСЯ ЗАЗЕМЛЮВАТИ КЛЕМИ В+ ТА (АБО) В-. Виводи 20, 28 повинні бути замкнуті (дозвіл на Start/Stop). На вихідних клеммах U , V , W з'явиться керована напруга, частоту якої можна змінювати за допомогою панелі перетворювача, віддаленого пульта або підключеного ПК. Максимальну і мінімальну частоту, струм теплового захисту, логіку і закон керування можна задавати за допомогою кодів налаштування. Налаштування ПЧ необхідно проводити при розімкнутих клеммах 20 і 28. Цифрові входи ($E1$, $E2$, $E3$), аналоговий (8) і релейні виходи ($K12$, $K14$) конфігуруються згідно з таблицею налаштувань ПЧ.

Дистанційне керування ПЧ можливе за допомогою виносної клавіатури ESMD01KP віддаленого пульта. Для цього необхідно підключити тумблер на клема 20–28 для дозволу пуску (кнопки Run і Stop неактивні при розімкнутих клеммах 20–28). Виконання лабораторних робіт проводиться виключно віддаленим пультом або за допомогою ПК.

ВИКОРИСТАННЯ КЕРУЮЧИХ КНОПОК НА ПАНЕЛІ ПЧ ЗАБОРОНЕНО. Для проведення робіт необхідно також підключити до мережі контролер для відправки сигналу дозволу на старт ПЧ.

Зняття статичних характеристик тахогенератора відбувається після перепрограмування Овен ТРМ1 на вимір вихідної напруги. Датчик у колі

тахогенератора є універсальним вимірювальним пристроєм і може бути застосований для відстеження будь-якої фізичної величини, зміна якої відбувається пропорційно струму у межах допустимих вхідних параметрів даного датчика. Для перепрограмування датчика необхідно користуватись параметрами: *b1-6* – показання приладу для верхньої межі уніфікованого вхідного сигналу; *b1-7* – положення десятинної точки при індикації. Завдяки відомим номінальним даним елементів системи встановлено необхідні значення цих параметрів. Для індикації частоти обертання верхня межа приладу складає 1580 (параметр *b1-6*), положення

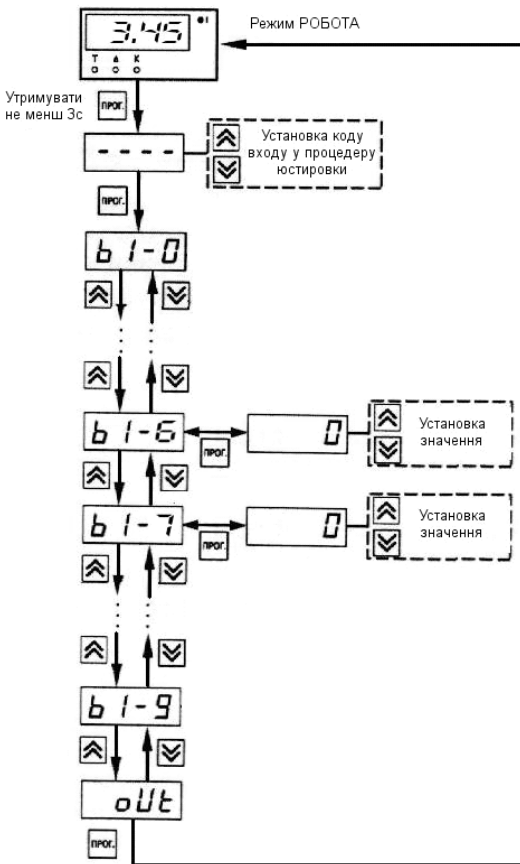


Рис. 1.4. Блок-схема порядку перепрограмування

точки – 0 (параметр *b1-7*). Для індикації напруги верхня межа приладу дорівнює 1,900 (параметр *b1-6*), положення точки – 03 (параметр *b1-7*). Порядок дій перепрограмування проілюстровано на блок-схемі (рис. 1.4), установка коду дозволяє захистити налагодження. **Установку коду виконувати не потрібно.**

4. Хід роботи

1. Зайти в меню керування приводом. Для цього натиснути кнопку Enter (див. рис. 1.3) і ввести пароль захисту налагоджень С00 (за замовчуванням відсутній).

2. Вибрати режим ручного керування. Для цього потрібно встановити значення коду С01 (регістр має значення), за допомогою керувальних кнопок Up/Down/Enter, у положення 7.

3. Установити дослідне значення частоти (Гц): код с40 (доступно від 2 до 50) та натиснути кнопку Run. Отримати значення струму двигуна у відсотках від номінального струму ПЧ, що становить 2,5А (код С54) та діюче значення вихідної напруги на вольтметрі, а також реальне значення частоти обертання двигуна за універсальним датчиком Овен ТРМ1. Зняти 5–6 точок та звести дані досліду у табл. 1 (зміну частоти на задане значення ПЧ відпрацьовує миттєво).

Таблиця 1

f , Гц	n , об/хв	U' , %	U , В	I' , %	I , А

5. Перепрограмувати Овен ТРМ1 на вимір вихідної напруги тахогенератора у порядку, зазначеному вище.

6. Змінювати значення частоти (код с40) та отримати відповідну вихідну напругу тахогенератора. Данні досліду звести у табл. 2.

Таблиця 2

f , Гц	$U_{\text{П}}$, В

7. Перепрограмувати Овен ТРМ1 на вимір частоти обертання двигуна у порядку, зазначеному вище.

Лабораторна робота № 2

Тема: Дослідження широтно-імпульсного регулювання асинхронним двигуном.

Мета: вивчення принципу роботи широтно-імпульсної модуляції (ШІМ); набуття навичок застосування методик вимірювання ШІМ сигналу та способів інтерпретації цих сигналів.

1. Основні теоретичні положення

Широтно-імпульсна модуляція (*англ.* pulse-width modulation (PWM)) – наближення бажаного сигналу (багаторівневого або безперервного) до дійсних бінарних сигналів (з двома рівнями – вкл/викл) так, що в середньому за деякий відрізок часу їх значення стають рівні. Формально це можна записати так:

$$\int_{t_1}^{t_2} x(t)dt = \sum A \cdot \Delta T_i, \quad (1)$$

де $x(t)$ – бажаний вхідний сигнал у межі від t_1 до t_2 , а ΔT_i – тривалість i -го ШІМ імпульсу з амплітудою A . Значення ΔT_i підбирається таким чином, щоб сумарні площі (енергії) обох величин були приблизно рівні за досить тривалий проміжок часу, а також були рівні середні значення величин за період:

$$\frac{\int_{t_1}^{t_2} x(t)dt}{t_2 - t_1} = \frac{\sum A \cdot \Delta T_i}{t_2 - t_1}. \quad (2)$$

ШІМ є імпульсним сигналом постійної частоти і змінної шпаруватості, тобто відношення тривалості імпульсу до періоду його проходження. За допомогою завдання шпаруватості (тривалості імпульсів) можна змінювати середнє значення напруги на виході ШІМ.

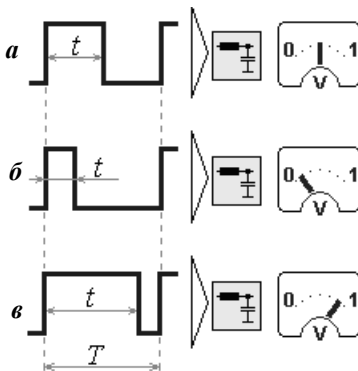


Рис. 2.1. Залежність напруги від шпаруватості ШІМ

На рис. 2.1 зображені типові графіки ШІМ сигналу. Оскільки при ШІМ частота імпульсів, а значить і період T , залишаються незмінними, то при зменшенні ширини імпульсу t збільшується пауза між імпульсами (див. рис. 2.1,*а*), і навпаки: при розширенні імпульсу пауза звужується (див. рис. 2.1,*б*).

Якщо такий сигнал пропустити через фільтр нижніх частот, то рівень напруги на виході фільтра буде визначатися шпаруватістю імпульсів ШІМ. Призначення фільтра – не пропускати несучу частоту ШІМ. Сам фільтр може складатися з найпростішого інтегруючого RC-ланцюга, або може бути відсутнім зовсім, наприклад, якщо навантаження має достатньо високу інерцію.

Таким чином, використовуючи лише два логічних рівні – "одиницю" і "нуль", можна отримати будь-яке проміжне значення аналогового сигналу.

Керованими "рівнями", як правило, є параметри живлення силової установки, наприклад напруга імпульсних перетворювачів, регуляторів постійної напруги. Основною причиною впровадження ШІМ є складність забезпечення довільною напругою. Існує базова постійна напруга живлення (в мережі, від акумуляторів та ін.), а на її основі потрібно отримати

більш низьку довільну напругу і вже нею живити електродвигуни чи інше обладнання. Найпростіший варіант – дільник напруги, але він знижує ККД підвищеним виділенням тепла і витратою енергії. Інший варіант – транзисторна схема. Вона дозволяє регулювати напругу без використання механіки. Але проблема в тому, що транзистори гріються найбільше у напіввідкритому стані (50 %). І якщо значенням ККД є ще прийнятним, то виділення тепла, особливо в промислових масштабах, призводить до втрати практичної користі при застосуванні даного варіанта. Саме тому було вирішено використовувати транзисторну схему, але тільки в граничних станах (вкл/викл), а отриманий вихід згладжувати LC -ланцюгом (фільтром) при необхідності (рис. 2.2). Такий підхід є дуже енергоефективним. Отже, ШІМ набула широкого розповсюдження сьогодні.

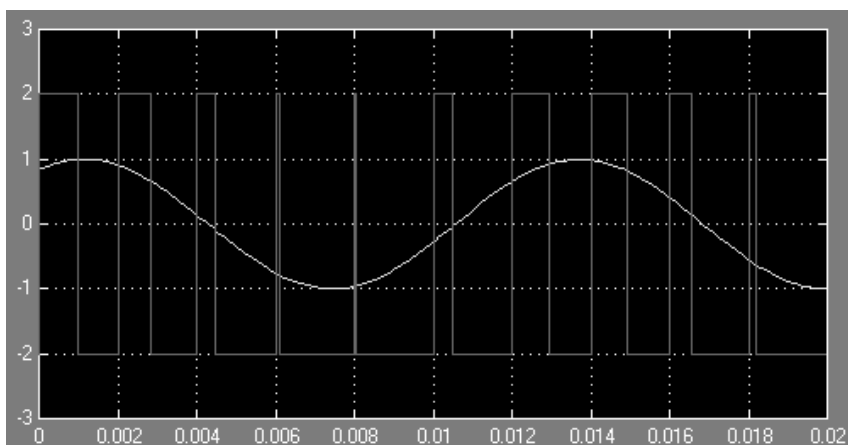


Рис. 2.2. Ідеальна широтно-імпульсна модуляція синусоїдальної напруги

2. Порядок виконання роботи

При дослідженні принципу роботи ШІМ пропонується використати схему математичної моделі, створену за допомогою програмного забезпечення Matlab, що відтворює даний процес при роботі перетворювача частоти. На рис 2.3 показана схема математичної моделі.

Для реалізації принципу широтно-імпульсної модуляції було використано стандартний підхід для створення схеми ШІМ. Вона складається з джерела живлення трифазною напругою (AC), некерованого випрямляча (VS), інвертора (INV), асинхронного двигуна та спрощеної схеми

керування, яка складається з блоку формувача трифазної напруги змінної частоти (Driver) та генератора імпульсів, що відповідають заданій напрузі (PWM Generator). За допомогою додаткових блоків реалізовано відстеження необхідних параметрів схеми та безпосереднє завдання дослідних змінних. Вхідним параметром до системи є частота бажаної вихідної напруги, що задається на вхід Freq до Driver'a. Для цього в моделі використано набір стандартних блоків, зокрема блок побудови сигналу довільної форми (Signal Builder). Частоту модуляції можна змінювати в блоці PWM Generator, а коефіцієнт модуляції на вході Amod1 Driver'a (бажано залишити стандартним). Для роботи обрано модель асинхронного двигуна з к. з. ротором потужністю 4 кВт, внутрішні параметри якого стандартно доступні з бібліотеки Simulink.

Опис вимірювальних блоків:

- 1) Scope – значення випрямленої напруги;
- 2) Scope1 – фазні струми двигуна;
- 3) Scope2 – оберти двигуна (об/хв);
- 4) Scope3 – електромагнітний момент;
- 5) Scope4 – імпульси, що відповідають задавальній напрузі;
- 6) Scope5 – задавальна напруга, струм двигуна та реальна напруга, що подається до двигуна у вигляді ШІМ;
- 7) Scope6 – імпульсна напруга та її середнє значення.

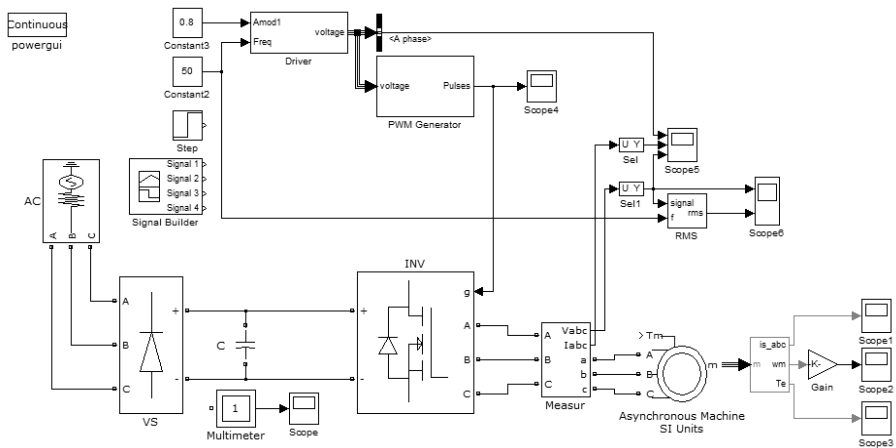


Рис. 2.3. Структурна схема математичної моделі

3. Хід роботи

1. Для теоретичного дослідження роботи ШІМ необхідно використати створену математичну модель у програмній оболонці Matlab. Для звіту необхідно побудувати графіки перехідних процесів задавальної напруги, струму двигуна та реальної напруги, що подається до двигуна у вигляді ШІМ (Scope5). Задавання частоти проводити для значень, вказаних викладачем. Для даної моделі підрахувати амплітуду, період та шпаруватість імпульсного сигналу.

2. Для практичного дослідження роботи ШІМ необхідно:

2.1) зайти в меню керування приводом. Для цього натиснути Enter;

2.2) вибрати режим ручного керування. Для цього потрібно встановити значення коду C01 за допомогою кнопок керування Up/Down/Enter у положення 7;

2.3) підключити осцилограф до фаз статора асинхронного двигуна, а також виконати настройку розгортки вхідного сигналу;

2.4) установити значення дослідної частоти у код c40;

2.5) отримати графіки перехідних процесів напруги та струму;

2.6) підрахувати амплітуду, період та шпаруватість імпульсного сигналу.

Лабораторна робота № 3

Тема: Дослідження динамічних характеристик стенда, пуск та гальмування.

Мета: зняття осцилограм перехідних процесів кола статора, визначення часу перехідних процесів.

1. Основні теоретичні положення

Пуск асинхронних двигунів. При пуску двигуна в хід мають бути задоволені наступні основні вимоги: процес пуску повинен бути простим і здійснюватися без складних пускових пристроїв, пусковий момент повинен бути досить великим, а пускові струми – по можливості малими. Іноді до цих вимог додаються й інші, обумовлені особливостями конкретних приводів, у яких використовуються двигуни: необхідність плавного пуску, найбільшого пускового моменту та інші. Практично використовуються наступні способи пуску асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором: безпосереднє підключення обмотки статора до мережі

(прямий пуск); зниження напруги, що підводиться до обмотки статора при пуску.

Пуск в хід двигуна безпосереднім включенням у мережу. Цей спосіб пуску відрізняється від інших своєю простотою. Однак у момент підключення двигуна до мережі в колі статора виникає великий пусковий струм, що в 5–7 разів перевищує номінальний струм двигуна. При малій інерційності виконавчого механізму швидкість двигуна дуже швидко зростає до встановленого значення, і струм спадає, досягаючи величини, що відповідає навантаженню двигуна. У цих умовах пусковий струм не становить небезпеку для двигуна, оскільки він швидко спадає і не може викликати перегріву обмоток машин. Але значний кидок струму в колі двигуна впливає на живильну мережу і при недостатній потужності останньої цей вплив може проявитися в помітних коливаннях напруги мережі. При необхідності зменшення пускового струму застосовують будь-який із способів пуску. Альтернативним виходом є використання напівпровідникових пристроїв плавного пуску, зокрема ПЧ, що теж здатен виконувати дану функцію. Програмування процесу пуску дозволяє в рази зменшити кидки струму і забезпечити безаварійний режим розгону двигуна.

Гальмування асинхронних двигунів. В умовах експлуатації нерідко виникає необхідність гальмування двигуна з метою прискорити його зупинку. Гальмування електродвигунів може бути механічним, електричним і електромеханічним.

Електромеханічне гальмування здійснюється за допомогою стрічкового або колодкового гальма, що діє на гальмівний шків, закріплений на валу двигуна. Ослаблення стрічки або колодок здійснюється гальмівним електромагнітом, обмотка якого з'єднана паралельно з обмоткою статора двигуна.

Динамічне гальмування (електродинамічне гальмування) – вид гальмування асинхронних електродвигунів, при якому обмотка статора відключається від мережі змінного струму і включається на постійну напругу. Цей гальмівний режим використовується для точної зупинки двигунів. На час гальмування обмотка статора відключається від мережі змінної напруги і підключається до джерела з постійною напругою. При цьому обмотка статора буде створювати постійне нерухоме магнітне поле. При обертанні ротора відносно цього магнітного поля змінюється напрямок ЕРС і струму ротора, що призведе до зміни напрямку електромагнітного моменту, тобто він стане гальмівним. Під дією цього моменту відбувається гальмування. Кінетична енергія обертчастих частин пере-

ходить у теплову, яка виділяється в колі ротора завдяки струмам, що індукуються в ньому нерухомим полем статора. Час гальмування регулюється зміною величини напруги, яка підведена до обмотки статора.

Основною перевагою цього гальмівного режиму є точна зупинка. Після зупинки двигун відключається від мережі постійного струму. Даний вид гальмування також можливо змоделювати за допомогою ПЧ. При отриманні сигналу "ОСТАНОВ" перетворювач на своїх вихідних клеммах видає напругу дуже малої частоти або напругу зі значною постійною складовою, що створює нерухоме магнітне поле. Надлишок запасеної кінетичної енергії виділяється у вигляді тепла через радіатори перетворювача і сам двигун (режим гальмування постійним струмом).

2. Порядок виконання роботи

Зняття динамічних характеристик пуску та гальмування проводиться за допомогою запам'ятовуючого осцилографа, що підключається до кола статора двигуна. Дослідження проводиться при розгоні двигуна до номінальної швидкості та швидкості, що складає 50 % від номінальної. Режим зупинки знімається при гальмуванні засобами ПЧ. За отриманими характеристиками необхідно побудувати графіки перехідних процесів та визначити час перехідних режимів.

3. Хід роботи

1. Зайти в меню керування приводом. Для цього натиснути Enter.
2. Вибрати режим керування з комп'ютера. Для цього потрібно встановити значення коду C01, за допомогою кнопок керування Up/Down/Enter, у положення 6 (див. додаток 1).
3. Підключити осцилограф до мережі та виконати настройку розгортки вхідного сигналу.
4. Здійснити пуск на номінальну швидкість:
 - 4.1) при зупиненому двигуні встановити значення дослідної частоти на рівні номінальної в програмній оболонці Reliance Runtime при таймері задавання швидкості, рівній нулю (необхідно встановити 1340);
 - 4.2) виконати пуск двигуна натисканням відповідної кнопки (див. рис. 1.3) та одержати перехідні процеси струму на екрані осцилографа, визначити час перехідного процесу.
5. Зняти перехідні процеси гальмування, змінюючи час гальмування (C13) від 0 до 100 з кроком 20. Гальмування виконувати шляхом обнуління

ня задавання швидкості в програмній оболонці Reliance Runtime при таймері задавання швидкості, рівній нулю. Одержати перехідні процеси гальмування на екрані осцилографа.

6. Повторити пункт для частоти, рівній половині номінальної.

Лабораторна робота № 4

Тема: Набуття навичок компенсації ковзання та ознайомлення з гальмівними механізмами.

Мета: вивчення принципу завдання навантаження та застосування компенсації ковзання.

Для вирішення поставленої мети розв'язуються наступні задачі:

- 1) вивчення принципу компенсації ковзання;
- 2) вивчення графобудівника програмної оболонки Mosaic;
- 3) набуття базових навичок завдання навантаження гальмівною колодкою.

1. Основні теоретичні положення

Персональний комп'ютер через рознімання (рос. – разъем) інтерфейсу під'єднано до контролера, що може керувати вихідним струмом приводу постійного струму, який збуджує навантажувальну машину. Як НМ використано машину постійного струму з накоротко замкненими щітками. Однак при зміні частоти обертання асинхронного двигуна момент навантаження змінюється, що для дослідження компенсації ковзання незручно та не наочно. Тому використовується гальмівна колодка, що притискається до муфти між АД та НМ і задає незмінний момент навантаження.

Вбудована функція перетворювача частоти дозволяє підтримувати швидкість двигуна постійною, незалежно від навантаження на валу. Забезпечується це динамічним регулюванням вихідної частоти інвертора. Режим компенсації ковзання застосовується при U/f -регулюванні. У цьому режимі швидкість двигуна менше заданої швидкості на величину ковзання. Алгоритм роботи регулятора швидкості дозволяє компенсувати ковзання, відстежуючи навантаження на валу і збільшуючи або зменшуючи вихідну частоту інвертора.

Розглянемо на прикладі. При збільшенні моменту навантаження на валу з M_1 до M_2 (рис. 4.1) швидкість двигуна зменшується з f_1 до f_2 .

У режимі компенсації ковзання Lenze вимірює струм навантаження і збільшує вихідну частоту інвертора на необхідне значення. Таким чином, робоча точка зміщується не вниз по вихідній механічній характеристиці, а переходить на нову механічну характеристику з незмінною швидкістю двигуна (на рис. 3.1 стрілками показана зміна швидкості, тобто підйом по характеристиці (показано пунктиром) і горизонтальний перехід на характеристику $f_{\text{out}}(M_2)$).

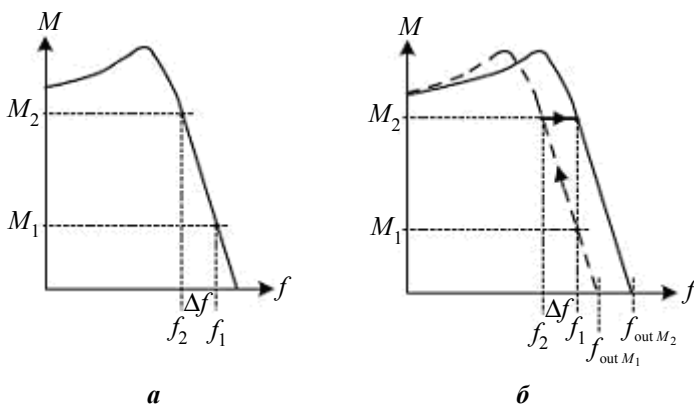


Рис. 4.1. Механічна характеристика:

a – без компенсації ковзання; *б* – з компенсацією ковзання

Для того, щоб активувати функцію компенсації ковзання в перетворювачі Lenze ESMD 751L4TXA, необхідно встановити параметр C21 > 0 (доступно від 0 до 40 %). В іншому випадку компенсація працювати не буде. Для правильного вибору параметру C21 потрібно його змінювати методом поступового наближення, доки швидкість асинхронного двигуна при холостому ході відмінна від швидкості під навантаженням.

2. Хід роботи

1. Перевести ПЧ у режим керування з віддаленого пульта.
2. Задати дослідну частоту ($c40 = 40$ Гц).
3. Запустити двигун.
4. Навантажити двигун. Для цього необхідно змінювати момент опору гальмівної колодки, затискаючи чи послабляючи гвинт (**затискання/послаблення гвинта виконується ТІЛЬКИ ВИКЛАДАЧЕМ і ТІЛЬКИ ПРИ ЗУПИНЕНОМУ ДВИГУНІ**).

5. За допомогою універсального вимірювального пристрою Овен ТРМ1 або за графіками у програмній оболонці Mosaic визначити швидкість двигуна n , об/хв.

6. Зняти навантаження, послабивши гвинт (момент навантаження створюють лише махові маси).

7. За допомогою універсального вимірювального пристрою Овен ТРМ1 або за графіками у програмній оболонці Mosaic визначити швидкість двигуна n , об/хв та порівняти її з визначеною у пункті 5.

8. Перейти до параметру С21 та змінювати його методом поступових наближень, спостерігаючи за швидкістю (повторюючи пункт 7), доки швидкість асинхронного двигуна при холостому ході відмінна від швидкості під навантаженням. Після кожної зміни С21 треба зупинити двигун та пустити в хід заново. Намагатися досягти найточнішого результату.

9. Перевірити правильність вибору параметру С21, виставивши навантаження менше, ніж задавали у пункті 4, але більше від 0 (швидкість повинна бути приблизно такою ж, як у пункті 5).

Лабораторна робота № 5

Тема: Вивчення програмних оболонок контролера, регулювання навантаження з ПК.

Мета: вивчення програми задавання навантаження та швидкості.

Для вирішення поставленої мети розв'язуються наступні задачі:

- 1) набуття базових навичок завдання навантаження і швидкості в програмній оболонці Reliance Runtime;
- 2) вивчення принципу роботи таймерної системи в програмній оболонці Reliance Runtime;
- 3) зняття механічних характеристик;
- 4) теоретичні побудови механічних характеристик асинхронного двигуна та порівняння їх з експериментальними.

1. Основні теоретичні положення

Механічна характеристика асинхронного двигуна – залежність частоти обертання від обертового моменту. При розрахунках під механічною характеристикою розуміється функція $M(S)$, де S – ковзання ротора, а M – обертовий момент.

При аналітичному описі механічної характеристики використовується формула Клосса:

$$M(S) = \frac{2M_{\max}}{S/S_{\max} + S_{\max}/S}. \quad (1)$$

Вона враховує, що

$$S_{\text{кр}} = \frac{r_2'}{\sqrt{r_1^2 + x_k^2}}; \quad (2) \quad M_{\max} = \frac{m_1 U_1^2 p}{\omega \sqrt{r_1^2 + \sqrt{r_1^2 + x_k^2}}}. \quad (3)$$

Опір обмотки ротора сучасних АД, що мають колбоподібну форму або виконані у вигляді подвійної білячої клітки, мають опори (r_2' та x_k), що залежать від ковзання. Якщо знехтувати r_1 , малим у порівнянні з x_k , то можна записати:

$$\frac{M(s)}{M_{\max}} = \frac{2s\psi_1(s)}{s^2\psi_2^2(s) + \psi_1^2(s)},$$

де M_{\max} – максимальний обертальний момент на всій механічній характеристиці (табличне значення), а $\psi_1(s)$ та $\psi_2(s)$ – деякі функції ковзання, пропорційні опорам ротора.

Механічна характеристика АД може бути побудована не тільки як залежність швидкості обертання двигуна від моменту на валу $M=f(n)$, а і як залежність ковзання від моменту $M=f(s)$, бо ковзання s однозначно пов'язане з частотою обертання n (рис. 5.1).

Природна механічна характеристика асинхронного двигуна відповідає основній (паспортній) схемі його включення і номінальним параметрам живлячої напруги. Штучні характеристики отримують включенням будь-яких додаткових елементів: резисторів, реакторів, конденсаторів. При живленні двигуна не номіналь-

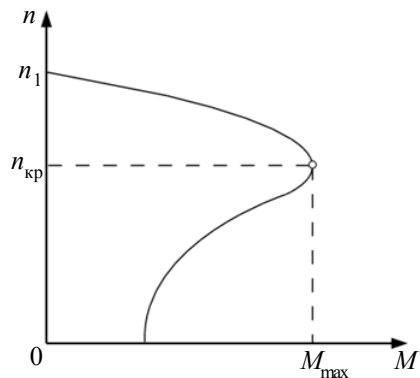


Рис. 5.1. Механічна характеристика

ною напругою характеристики також відрізняються від природної механічної характеристики.

Механічні характеристики є дуже зручним і корисним інструментом при аналізі статичних і динамічних режимів електропривода. Момент навантаження створюється навантажувальною машиною, яка являє собою машину постійного струму з короткозамкненими щітками, напруга на обмотку збудження якої подається відповідно до задавання навантаження у відсотках. При обертанні обмотки якоря у магнітному полі, створеному обмоткою збудження, в ній протікає струм, який прямо пропорційний швидкості обертання приводним двигуном. Отже, при зменшенні частоти обертання АД момент навантаження (у Н·м) буде зменшуватися (при незмінній його величині, заданій у %). Це потрібно перевірити дослідно, тому знімаються механічні характеристики, які будуть мати пряmlinійний характер. Для побудови класичних механічних характеристик АД необхідно змінювати момент опору гальмівної колодки, затискаючи чи послабляючи гвинт.



Меню програмної оболонки **Reliance Runtime**

Меню (рис. 5.2) надає всю основну інформацію про операції, які можуть виконуватися в режимі реального часу. Після старту програми в режимі реального часу з'являється головне меню (див. рис. 5.2), яке містить розділи СЕРВІС (Services) і ДОВІДКА (Help). Крім цього, відображається панель інструментів, на якій знаходяться кнопки, описані в таблиці 5.1.



Рис. 5.2. Головне меню і панель інструментів

Таблиця 5.1. Кнопки панелі інструментів

	Вхід у систему	Виконує вхід користувача в систему
	Вихід із системи	Виконує вихід користувача із системи

Продовж. табл. 5.1

	Відображення списку архівних повідомлень	Відображає вікно з усіма архівними повідомленнями
	Відображення списку поточних повідомлень	Відображає вікно з поточними повідомленнями
	Попереднє вікно	Відображає попереднє вікно
	Наступне вікно	Відображає наступне вікно
	Підключені графіки	Відображає список графіків (трендів), підключених до комп'ютера
	Підключені звіти	Відображає список звітів, підключених до комп'ютера
	Підключені звіти для друку	Відображає список звітів для друку, підключених до комп'ютера

2. Хід роботи

1. Перевести ПЧ у режим керування з віддаленого пульта.
2. Запустити двигун.
3. Задавати частоту на ПЧ $s_{40} = 50$ Гц.
4. У програмній оболонці Reliance Runtime змінювати навантаження у відсотках від номінального, від 0 до 100 % з кроком $h = 10$ %. Для цього виставляти при таймері $T = 0$ навантаження на значення: 0, 10, ..., 100.
5. Слідкувати за графіком перехідного процесу та занотовувати значення усталеної швидкості при кожному моменті навантаження.
6. Занотувати показання амперметра в колі якоря НМ при кожному моменті навантаження.

7. Повторити пункт 4 при різних дослідних частотах ($s_{40} = 5, 10, \dots$, 50 Гц).

8. Зняти механічну характеристику з використанням гальмівної колодки. Для цього у програмній оболонці Reliance Runtime задати навантаження 0 при таймері навантаження $T = 0$. Слідкувати за графіком перехідного процесу та занотовувати значення усталеної швидкості при кожному моменті навантаження, що задається гвинтом.

3. Оформлення результатів роботи

1. Побудувати сімейство експериментальних механічних характеристик $M(\omega)$. Побудову виконати у відносних одиницях. Для цього момент залишити без змін, а швидкість двигуна поділити на синхронну:

$$v = n/n_c.$$

Для асинхронного двигуна типу MS7124: $P_{\text{ном}} = 0,37$ кВт, $n_{\text{ном}} = 1340$ об/хв, $n_c = 1500$ об/хв, $\lambda = 2,1$, $M_{\text{ном}} = 2,64$ Нм, $I_{\text{ном}} = 1,06$ А, $\cos \varphi = 0,75$.

2. Побудувати теоретичну механічну характеристику $M_{\text{теор}}(\omega)$ у відносних одиницях. Для побудови використовують спрощену формулу Клосса:

$$M = \frac{2 M_{\text{кр}}}{S/S_{\text{кр}} + S_{\text{кр}}/S}. \quad (4)$$

Максимальний (критичний) момент знаходять зі співвідношення, вказаного в паспортних даних:

$$\lambda = \frac{M_{\text{кр}}}{M_{\text{ном}}}. \quad (5)$$

Критичне ковзання (ковзання, при якому двигун має максимальний момент):

$$s_{\text{кр}} = s_{\text{ном}} \left(\lambda + \sqrt{\lambda^2 - 1} \right). \quad (6)$$

Ковзання

$$s = \frac{\omega_c - \omega}{\omega_c}. \quad (7)$$

Кутова швидкість ротора

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi \cdot n}{60}, \quad (8)$$

де n задається в об/хв.

3. Зробити висновки.

Лабораторна робота № 6

Тема: Налаштування ПІД-регулятора швидкості за допомогою контролера.

Мета: вивчення програми налаштування ПІД-регулятора швидкості, що реалізований у ПЛК.

Для вирішення поставленої мети розв'язуються наступні задачі:

- 1) набуття базових навичок налаштування ПІД-регулятора швидкості в програмній оболонці Reliance Runtime;
- 2) вивчення принципу вимірювання перерегулювань у програмній оболонці Reliance Runtime;
- 3) зняття механічних характеристик.

1. Основні теоретичні положення

Типові регулятори і регулювальні характеристики

Для регулювання об'єктами управління, як правило, використовують типові регулятори, назви яких відповідають назвам типових ланок:

1) П-регулятор, пропорційний регулятор.

Передавальна функція П-регулятора: $W_P(s) = K_P$. Принцип дії полягає в тому, що регулятор виробляє дію, що керує, на об'єкт пропорційно величині помилки (чим більше помилка ϵ , тим більше дія регулятора);

2) І-регулятор, інтегруючий регулятор.

Передавальна функція І-регулятора: $W_I(s) = K_0/s$. Дія, що керує, пропорційна інтегралу від помилки;

3) Д-регулятор, диференціюючий регулятор.

Передавальна функція Д-регулятора: $W_D(s) = K_2 s$. Д-регулятор генерує дію, що керує, тільки при зміні регульованої величини:

$$Y = K_2 \frac{d\varepsilon}{dt}.$$

На практиці прості П-, І-, Д-регулятори комбінуються в регулятори виду ПІ, ПД, ПІД (рис. 6.1):

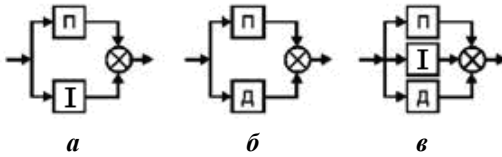


Рис. 6.1. Види безперервних регуляторів

Залежно від вибраного виду регулятор може мати пропорційну (П), пропорційно-інтегральну (ПІ), пропорційно-диференціальну (ПД) або пропорційно-інтегральну характеристику з дією по похідній (ПІД-регулятор);

4) ПІ-регулятор, пропорційно-інтегральний регулятор (див. рис. 6.1,а).

ПІ-регулятор є поєднанням П- та І-регуляторів. Передавальна функція ПІ-регулятора: $W_{PI}(s) = K_1 + K_0/s$;

5) ПД-регулятор, пропорційно-диференціальний регулятор (див. рис. 6.1,б).

ПД-регулятор є поєднанням П- та Д-регуляторів. Передавальна функція ПД-регулятора: $W_{PD}(s) = K_1 + K_2 s$;

6) ПІД-регулятор, пропорційно-інтегрально-диференціальний регулятор (див. рис. 6.1,в).

ПІД-регулятор є поєднанням П-, І- та Д-регуляторів. Передавальна функція ПІД-регулятора: $W_{PID}(s) = K_1 + K_0/s + K_2 s$.

Найчастіше використовується ПІД-регулятор, оскільки він поєднує в собі переваги всіх трьох типів регуляторів.

У даному ПЛК ПІД-регулятор реалізовано за передаточною функцією

$$W_{PID}(s) = K(K_1 + K_0/s + K_2 s) = \frac{1000}{K_D} \left(\frac{1000}{K_{PI}} + \frac{10 \cdot T_I}{s} + 10 \cdot T_D \cdot s \right).$$

Така реалізація задавання коефіцієнтів забезпечує можливість їх точного підбору.

2. Хід роботи

1. Перевести ПЧ у режим керування з комп'ютера.
2. Запустити двигун (дати дозвіл з ПЧ).
3. У програмній оболонці Reliance Runtime змінювати навантаження у відсотках від номінального (від 0 до 100 %) з кроком $h = 10$ %. Для цього зручно виставити таймери швидкості та навантаження на значення: 10, 20, 30, 40, 50; при кожному таймері швидкості задати дослідну швидкість, а при кожному таймері навантаження задати значення: 10, 20, 30, 40, 50 відповідно. Оскільки їх лише 5, зміни потрібно зробити кілька разів.
4. Слідкувати за графіком перехідного процесу та занотовувати значення усталеної швидкості при кожному моменті навантаження.
5. Повторити пункти 3 та 4 при різних налаштуваннях ПД-регулятора.
6. Зняти механічну характеристику з використанням гальмівної колдки. Для цього у програмній оболонці Reliance Runtime задати навантаження 0 при таймері навантаження $T = 0$. Слідкувати за графіком перехідного процесу та занотовувати значення усталеної швидкості при кожному моменті навантаження, що задається гвинтом.
7. Побудувати сімейство експериментальних механічних характеристик $M(\omega)$.

Лабораторна робота № 7

Тема: Налаштування ПД-регулятора швидкості у перетворювачі частоти.

Мета: вивчення програми налаштування ПД-регулятора швидкості, що реалізований у ПЧ.

Для вирішення поставленої мети розв'язуються наступні задачі:

- 1) набуття базових навичок налаштування ПД-регулятора швидкості за допомогою кодів ПЧ;
- 2) вивчення принципу вимірювання перерегулювань у програмній оболонці Reliance Runtime;
- 3) зняття механічних характеристик.

1. Основні теоретичні положення

Типові регулятори і регульовальні характеристики

Для регулювання об'єктами управління, як правило, використовують типові регулятори, назви яких відповідають назвам типових ланок:

1) П-регулятор, пропорційний регулятор.

Передавальна функція П-регулятора: $W_{\text{П}}(s) = K_1$. Принцип дії полягає в тому, що регулятор виробляє дію, що керує, на об'єкт пропорційно величині помилки (чим більше помилка ϵ , тим більше дія регулятора);

2) І-регулятор, інтегруючий регулятор.

Передавальна функція І-регулятора: $W_1(s) = K_0/s$. Дія, що керує, пропорційна інтегралу від помилки;

3) ПІ-регулятор, пропорційно-інтегральний регулятор.

ПІ-регулятор є поєднанням П- та І-регуляторів. Передавальна функція ПІ-регулятора: $W_{\text{ПІ}}(s) = K_1 + K_0/s$.

Залежно від вибраного виду регулятор може мати пропорційну характеристику (П), пропорційно-інтегральну характеристику (ПІ), пропорційно-диференціальну характеристику (ПД) або пропорційно-інтегральну характеристику з дією по похідній (ПІД-регулятор).

Для роботи регулятора система повинна бути замкненою. Зворотний зв'язок за швидкістю реалізується з допомогою тахогенератора, напруга якого подається на універсальний датчик Овен ТРМ1 та на контролер Tesomat Foxtrot CP-1005. Отже, необхідно зробити таку передачу цього сигналу, щоб працював не ПІД-регулятор контролера, а лише ПІ-регулятор ПЧ. Це можна зробити відключенням дротів тахогенератора від аналогових входів контролера та підключенням їх до відповідних входів ПЧ, або зробити це програмно.

Для програмної реалізації ставиться задача вимкнути ПІД-регулятор в ПЛК та надати на вхід ПЧ сигнал 0-10В, що дорівнює сигналу з тахогенератора. Для реалізації задачі вводиться Булева змінна `pid_stop`, яка пізніше використовується в кнопці "ПІД в ПЛК" у Reliance Runtime. Оскільки параметри ПІД-регулятора вираховуються та відстежуються за допомогою вмонтованої в Mosaic оболонки PID-Maker і внесення змін туди неможливе, то на вхід ПЧ подається не вихідний сигнал ПІД-регулятора, а змінна, що відповідає напрузі тахогенератора. Сигнал у формі 0-10В може бути змінений і на струмовий сигнал (або 0-5В), однак це потребуватиме перепрограмування універсального вимірюючого пристрою Овен ТРМ1 та деяких змін у схемі підключення тахогенератора.

Після виконання таких змін контролер майже не використовується (він надає високий рівень на клему 28 релейним контактом та пропускає сигнал 0-10В через себе без математичних операцій – використовується АЦП та ЦАП. Використання ПІ-регулятора ПЧ значно знижує наванта-

ження на контролер (оскільки він може керувати десятками приводів відразу). В технологічних процесах, де ПІД-регулятор не є необхідним, дуже часто використовують можливості ПЧ щодо регулювання, тобто сигнал з тахогенератора напряму подається на ПЧ з точки зору економії.

2. Хід роботи

1. Перевести ПЧ у режим керування з віддаленого пульта ПЧ.
2. Зупинити двигун (STOP з ПЧ).
3. У програмній оболонці Reliance Runtime зайти в настройки ПІД-регулятора та натиснути кнопку "ПІД в ПЛК" (напис повинен змінитися на "ПІ в ПЧ").
4. Увімкнути ПІ-регулятор у ПЧ ($d38 = 1$, для вимикання – 0).
5. Задати навантаження у відсотках від номінального від 0 до 100 % (задається викладачем) при задаванні таймера навантаження $T = 0$.
6. Виставити завдання ПІ-регулятора $s81 = 50$.
7. Виставити пропорційну складову $S70 = 5 \%$.
8. Підібрати зміною $S71$ від 0 до 2,5 % з кроком 0,5 % таку інтегральну складову, при якій буде мінімальний час перехідного процесу при повністю відсутньому перерегулюванні.
9. Уточнити пропорційну складову $S70$ при обраній інтегральній складовій за тим же критерієм.

Список літератури

1. **Белов, М. П.** Автоматизированный электропривод типовых производственных механизмов и технологических комплексов [Текст] / М. П. Белов, В. А. Новиков, Н. Л. Рассудов; учебник для студ. высш. учеб. заведений. – 3-е изд., испр. – М. : Издательский центр "Академия", 2007. – 576 с.

2. **Попович, М. Г.** Електромеханічні системи автоматичного керування та електроприводи [Текст] : навч. посібник / М. Г. Попович, О. Ю. Лозинський, В. Б. Клепиков [та ін.] ; за ред. М. Г. Поповича, О. Ю. Лозинського. – К. : Либідь, 2005. – 680 с.

3. Lenze Инструкция по эксплуатации [Текст] 16 с.

Зміст

Вимоги до техніки безпеки	3
Лабораторна робота № 1. Ознайомлення зі стендом, отримання статичних характеристик елементів стенда.	4
Лабораторна робота № 2. Дослідження широтно-імпульсного регулювання асинхронним двигуном.	11
Лабораторна робота № 3. Дослідження динамічних характеристик стенда, пуск та гальмування.	15
Лабораторна робота № 4. Набуття навичок компенсації ковзання та ознайомлення з гальмівними механізмами.	18
Лабораторна робота № 5. Вивчення програмних оболонок контролера, регулювання навантаження з ПК.	20
Лабораторна робота № 6. Налаштування ПД-регулятора швидкості за допомогою контролера.	25
Лабораторна робота № 7. Налаштування ПІ-регулятора швидкості у перетворювачі частоти.	27
Список літератури	30