

УКРАЇНА
НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ БІОРЕСУРСІВ
І ПРИРОДОКОРИСТУВАННЯ УКРАЇНИ
НАВЧАЛЬНО-НАУКОВИЙ ІНСТИТУТ ЕНЕРГЕТИКИ І
АВТОМАТИКИ
Кафедра електропривода та електротехнологій

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до виконання лабораторних робіт з дисципліни
"Регульований електропривод в АПК"

для студентів напряму підготовки 6.100101
"Енергетика та електротехнічні системи в АПК"

Київ - 2015

УДК 631:371:62(73)

Наведено теоретичні основи і методичні вказівки з підготовки, проведення та оформлення лабораторних робіт з дисципліни „Регульований електропривод в АПК” для студентів денної та заочної форми навчання факультету енергетики і автоматики освітньо-кваліфікаційного рівня "Бакалавр" напряму підготовки "Енергетика та електротехнічні системи в АПК".

Рекомендовано вченою радою ННІ енергетики і автоматики НУБіП України.

Укладачі: І.М.Голодний, Ю.М. Лавріненко, О.В. Санченко,
О.І. Романенко

Рецензенти:

Навчальне видання

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни
"Регульований електропривод в АПК"

для студентів напряму підготовки 6.100101
"Енергетика та електротехнічні системи в АПК"

Укладачі: ГОЛОДНИЙ Іван Михайлович,
ЛАВРІНЕНКО Юрій Миколайович,
САНЧЕНКО Олександр Володимирович.
РОМАНЕНКО Олексій Іванович

Відповідальний за випуск доц. І.М. Голодний

Зав. Видавничим центром НУБіП України

Редактор

Підписано до друку

Ум. друк. арк.

Тираж 100 пр.

А.П.Колесніков

Формат 60x84 1/16.

Обл.-вид. арк.

Зам.№

Видавничий центр НУБіП України

03041, Київ-41, Героїв Оборони, 15

ЗМІСТ

Вступ	4
1. Лабораторна робота № 1РП ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО ЗБУДЖЕННЯ В СИСТЕМІ ГЕНЕРАТОР-ДВИГУН (Г-Д).....	5
2. Лабораторна робота № 2РП ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РЕГУЛЮВАННЯ СИСТЕМИ ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НАПРУГИ-ДВИГУН (ТПН-Д)	14
3. Лабораторна робота № 3РП ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА ПРИ ЖИВЛЕННІ ВІД ПЕРЕТВОРЮВАЧА ЧАСТОТИ	24
4. Лабораторна робота № 4РП ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З КРОКОВИМ ДВИГУНОМ	31
5. Лабораторна робота № 5РП ОЗНАЙОМЛЕННЯ З КОМП'ЮТЕРНИМ МОДЕЛЮВАННЯМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА В СИСТЕМІ MatLab	61

ВСТУП

При вивченні дисципліни "Регульований електропривод в АПК" студентам необхідно отримати не тільки теоретичні знання, а й навчитися проектувати, досліджувати та налагоджувати сучасні регульовані електроприводи. Тому основним завданням курсу є закріплення отриманих знань та набуття практичних навичок з дослідження, проектування та налагодження сучасного регульованого електропривода.

Студенти повинні:

знати:

- основні положення регульованого електропривода;
- призначення та характеристики апаратів для регулювання та захисту;
- типові схеми регульованого електропривода постійного та змінного струму;
- способи економії електроенергії при експлуатації регульованого електропривода.

вміти:

- вибирати електродвигуни, перетворювальні пристрої, апарати захисту і регулювання, раціональні інженерні рішення регульованого електропривода;
- складати та аналізувати схеми регулювання;
- досліджувати системи регульованого електропривода;
- проводити налагодження регульованих електроприводів.

В даних вказівках викладено основні теоретичні відомості регульованого електропривода та методичні вказівки по виконанню лабораторних робіт з регульованого електропривода постійного і змінного струму та електропривода з кроковим двигуном.

В методичних вказівках враховані положення вітчизняних та міжнародних стандартів, таких, як ІЕС 6180-1(1997), ІЕС 61800-2(1998), ІЕС 61800-3(2004).

Лабораторна робота № 1РП
ДОСЛІДЖЕННЯ ЕЛЕКТРОПРИВОДА
З ДВИГУНОМ ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НЕЗАЛЕЖНОГО
ЗБУДЖЕННЯ В СИСТЕМІ ГЕНЕРАТОР-ДВИГУН

Програма роботи

1. Ознайомитися з обладнанням робочого місця. Записати паспортні дані двигуна $M1$ і генератора $M3$.
2. Виміряти опори обмоток якорів машин $M1$ і $M3$.
3. Скласти схему для дослідження електромеханічних (ЕМХ) характеристик двигуна $M1$ (рис. 1.2).
4. Дослідити електромеханічні характеристики двигуна $M1$ при номінальному струмі збудження і напругах генератора $M3$, що відповідають швидкостям 1500, 1000, 500 об/хв. при номінальному навантаженні. При дослідженні електромеханічних характеристик струм навантаження двигуна змінювати від 0 до максимально можливого, але не більше $2I_H$.
5. Розрахувати за каталожними даними частоту обертання ідеального холостого ходу і частоту обертання на природній електромеханічній характеристиці двигуна $M1$ при номінальному струмі.
6. Побудувати на графіку розрахункову і експериментальні електромеханічні характеристики двигуна $n = f(I)$.
7. Розрахувати і побудувати графік $\eta = f(n), P = f(n)$ при $I_A = I_{Я.Н.}$.
8. Визначити показники регулювання досліджуваного двигуна:
 - діапазон регулювання;
 - плавність;
 - стабільність швидкості;
 - напрямок регулювання;
 - допустимий момент навантаження;
 - економічність (згідно п.8 програми).

Загальні методичні вказівки

Опори обмоток якорів двигуна і генератора вимірюються методом вольтметра-амперметра (рис. 1.1). Струм у коло подається з мережі постійного струму напругою 24 В. Особливу увагу слід приділити вибору реостата R . Він повинен мати такий опір, щоб не перегрівався робочим струмом під час дослідів. Вимірювання опору якірного кола машин необхідно виконувати при струмах, близьких до

номінального, а саме $(0,5...1,0)I_H$, щоб опір щіток був близьким до робочого. Вимірювання необхідно провести тричі при різних струмах, а потім визначити середнє арифметичне виміряного опору.

Вимірний опір потрібно привести до розрахункової робочої температури ($75\text{ }^{\circ}\text{C}$ для обмоток з ізоляцією класу А, Е, В) за рівнянням:

$$R_{75} = R_{t_1} \frac{235 + 75}{235 + t_1} = R_{t_1} \frac{310}{235 + t_1},$$

де R_{t_1} – опір при вимірюванні, Ом; t_1 – температура обмотки при вимірюванні, $^{\circ}\text{C}$.

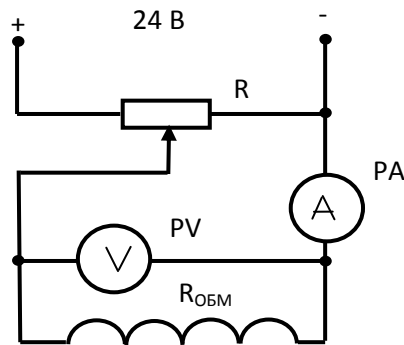


Рис. 1.1. Схема вимірювання опору якірних кіл

Природну електромеханічну характеристику двигуна постійного струму з незалежним збудженням можна побудувати за координатами двох точок: 1) $I = 0, n = n_0$; 2) $I = I_{НОМ}, n = n_{НОМ}$.

Швидкість ідеального холостого ходу n_0 визначають за каталожними даними двигуна:

$$n_0 = n_{НОМ} \frac{U_{НОМ}}{U_{НОМ} - I_{НОМ.Я} \cdot R_Я},$$

де $n_{НОМ}$ – номінальна частота обертання двигуна, об/хв.; $U_{НОМ}$ – номінальна напруга, В; $I_{НОМ}$ – номінальний струм, А; $R_Я$ – опір якоря при температурі $75\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження (ДПС НЗ) в системі Г-Д зображена на рис. 1.2.

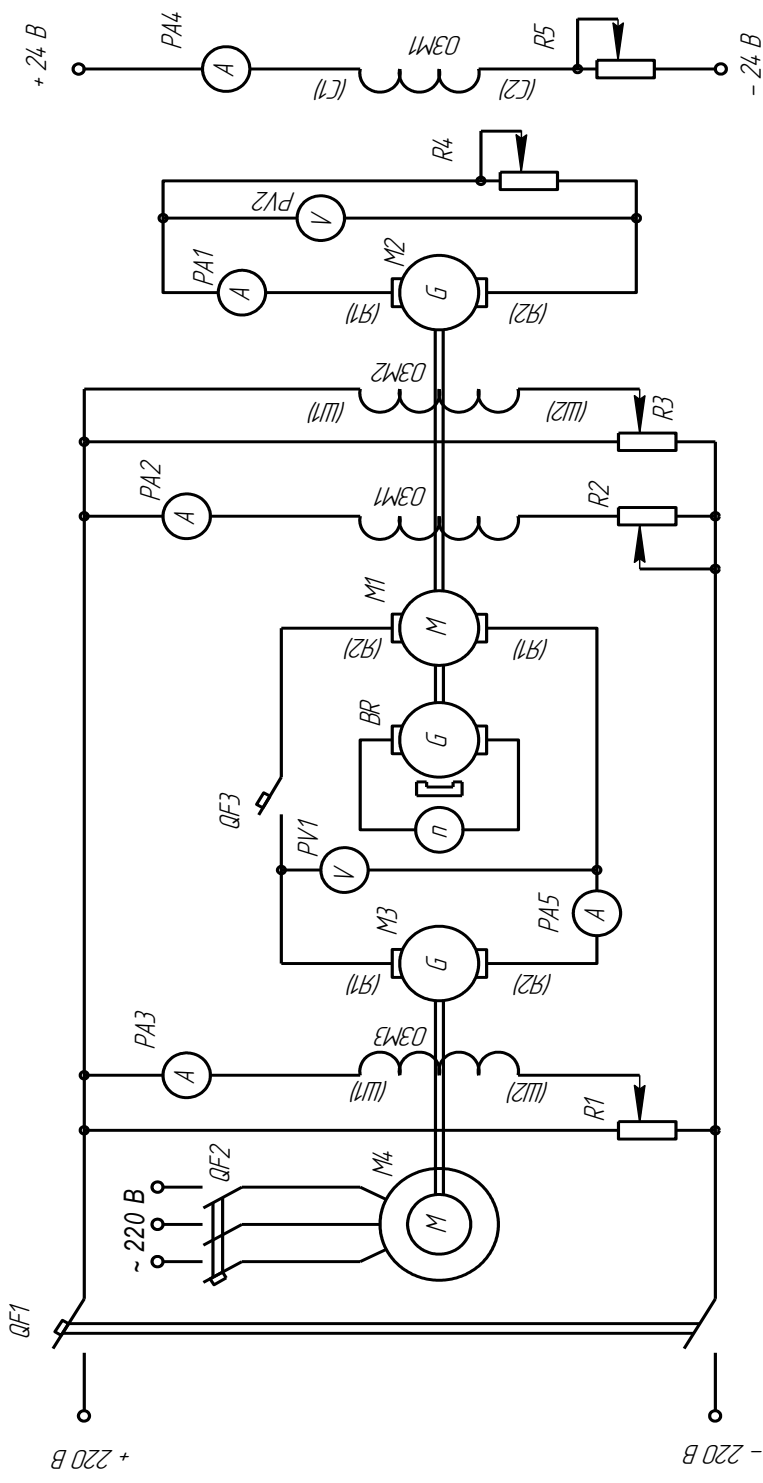


Рис. 1.2. Схема вмикання двигуна постійного струму незалежного збудження в системі Г-Д

Досліджуваний двигун є машиною із змішаним збудженням. Для дослідження його як двигуна паралельного (незалежного) збудження послідовну обмотку (C1-C2) потрібно увімкнути в мережу постійного струму напругою 24 В і реостатом R5 встановити в ній номінальний струм, підтримуючи його постійним протягом дослідів.

Напруга на якорі двигуна M1 регулюється за допомогою електромашинного генератора M3, який приводиться трифазним асинхронним двигуном M4. Навантаженням двигуна M1 служить генератор M2, якор якого замкнено на реостат R4. Струм збудження машин M1, M2 і M3 подається від мереж постійного струму напругою 220 В і 24 В. ЕРС генератора M3 регулюється потенціометром R1. З теорії електроприводу відомо, що при регулюванні швидкості обертання зміною підведеної напруги допустимий момент при тривалому режимі роботи двигуна постійного струму незалежного збудження з примусовим охолодженням дорівнює номінальному моменту, тобто:

$$M_{\text{доп}} = M_H = 9550 P_H / n_H = \text{const.} \quad (1.1)$$

При зниженні напруги знижується і кутова швидкість (частота обертання), тому статична потужність двигуна, що віддається, також знижується:

$$P_2 = 30 M_{\text{доп}} / \pi n, \quad (1.2)$$

де n – частота обертання якоря двигуна, об/хв.

У приводах без підвищених вимог до стабільності роботи на мінімальній частоті обертання допускається зупинка двигуна при подвійному номінальному моменті (рис. 1.3).

Визначення показників регулювання електропривода.

Діапазон регулювання кутової швидкості визначається відношенням усталених швидкостей, максимальної $n_{\text{макс}}$ до мінімальної $n_{\text{мін}}$, при збереженні заданої перевантажувальної здатності двигуна.

При заданій точності регулювання із заданим статичним падінням швидкості електропривода для встановлених меж зміни моменту діапазон можна визначити графо-аналітичним методом. За максимальну $n_{\text{макс}}$ приймають швидкість при номінальному моменті на характеристиці, дослідженій при номінальній нарузі 220 В. Для визначення $n_{\text{мін}}$ через точку $2M_{\text{ном}}$ на осі абсцис проводять пряму,

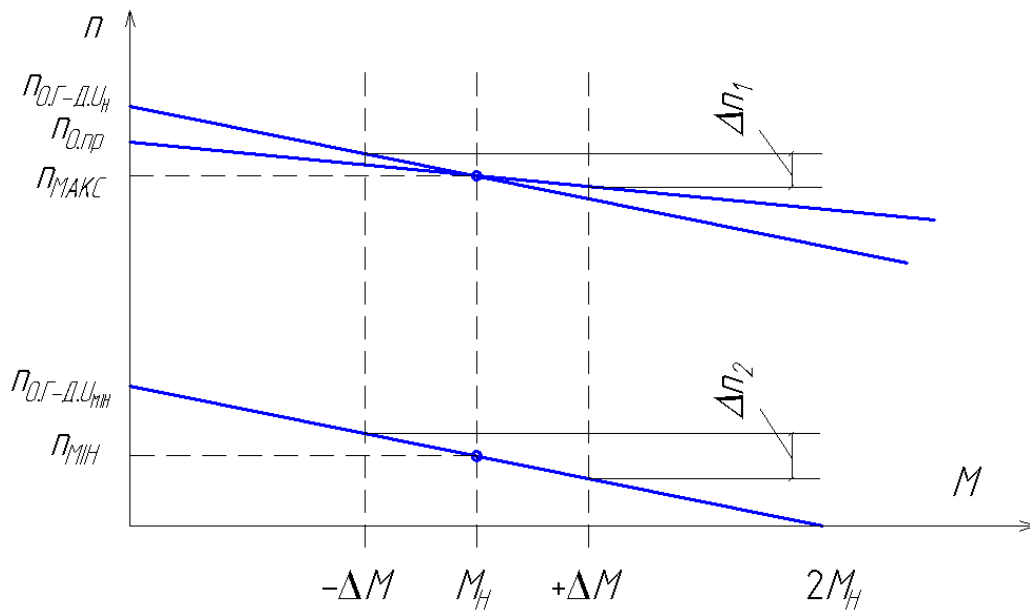


Рис. 1.3. Механічні характеристики для визначення показників регулювання швидкості обертання двигуна:

$n_{0.ПР}$ – швидкість обертання ідеального холостого ходу двигуна на природній характеристиці при живленні від мережі; $n_{0.Г-Д.Ун}$, $n_{0.Г-Д.Умін}$ – те ж, при живленні від генератора, відповідно з номінальною і мінімально допустимою згідно вимог напругою; $n_{МАКС}$, $n_{МИН}$ – максимальна і мінімальна швидкості обертання двигуна

паралельну електромеханічній характеристиці, дослідженій при номінальній напрузі 220 В. Мінімальну швидкість $n_{МИН}$ знаходять на пересіченні цієї прямої з лінією номінального моменту. Діапазон регулювання визначають за рівнянням:

$$D = \frac{n_{МАКС}}{n_{МИН}}. \quad (1.3)$$

Плавність регулювання – це стрибок швидкості при переході від певної швидкості до найближчої можливої. На лабораторній установці плавність наближено можна визначити так. При номінальній частоті обертання двигуна 1500 об/хв. і струмі якоря 6 А перемістити движок реостата RI в який-завгодно бік на один виток намотки. Відновити струм якоря 6 А і записати нове значення частоти обертання n_1 . Плавність регулювання визначити за виразом:

$$\varphi_{ПЛ} = \frac{n_{НОМ}}{n_1}.$$

Чим ближчий $\varphi_{ПЛ}$ до одиниці, тим плавність вища.

Статизм – це відхилення швидкості обертання двигуна при зміні моменту навантаження на одиницю. При умові $M_{\text{МАКС}}=2M_H$ статизм визначається за рівнянням:

$$\delta_{\text{СТ}} = \pi n_{0,\Gamma\text{-Д.Умін}} / 60 \cdot M_H. \quad (1.3)$$

Швидкість $n_{0,\Gamma\text{-Д.Умін}}$ визначають графічно. Для цього на рисунку з експериментальними електромеханічними характеристиками з точки на горизонтальній вісі $M=2M_H$ паралельно до характеристик проводять лінію. Точка її перетину з вертикальною віссю і буде шуканою швидкістю $n_{0,\Gamma\text{-Д.Умін}}$.

Напрямок регулювання – вгору, вниз або вгору і вниз від номінальної швидкості. В системі Г-Д регулювання швидкості змінюється шляхом зміни напруги. Напругу генератора можна змінювати в межах від 0 до номінальної 220 В. Студентам надається можливість самим визначити можливий напрямок регулювання двигуна в лабораторній установці.

Допустимим навантаженням є найбільший момент, який може розвивати електродвигун у тривалому режимі роботи з номінальним струмом при незмінному номінальному охолодженні. При регулюванні в зоні I допустимим є номінальний момент двигуна $M_{\text{НОМ}}$.

Економічність регулювання оцінюється за техніко-економічними показниками привода: вартість привода, вартість обслуговування, втрати енергії на регулювання, продуктивність машини, якість продукту та ін. Одним із показників економічності регулювання є зміна ККД привода при роботі на регульовальних характеристиках, який визначається через втрати потужності.

Основними втратами потужності в системі Г-Д є втрати в якорях двигуна і генератора:

$$\Delta P \approx I_{\text{Я}}^2 (R_{\text{Я.Д.}} + R_{\text{Я.Г}}), \quad (1.5)$$

де $I_{\text{Я}}$ – струм якоря двигуна; $R_{\text{Я.Д.}}$, $R_{\text{Я.Г}}$ – відповідно опори якорного кола двигуна і генератора.

Тобто, при незмінному навантаженні втрати в якорях незмінні.

Таким чином, при зниженні напруги і роботі з допустимим моментом ККД системи Г-Д знижується:

$$\eta = P_2 / (P_2 + \Delta P). \quad (1.6)$$

Вказівки щодо виконання роботи

Дослідження показників регулювання ДПС НЗ у системі Г-Д виконується в такій послідовності:

- 1) скласти електричне коло дослідної установки за схемою (рис. 1.2);
- 2) встановити струм збудження в обмотках машини $M1$: в обмотці $C1-C2$ 5,9 А, в обмотці $III1-III2$ 0,25 А. Подільниками напруги $R1$ і $R3$ встановити мінімальний струм в обмотках збудження машин $M3$ і $M2$;
- 3) увімкнути асинхронний двигун $M4$;
- 4) змінюючи напругу генератора подільником напруги $R1$, встановити номінальну швидкість обертання ($n_H = 1500$ об/хв.) двигуна $M1$ при номінальному його навантаженні;
- 5) змінюючи навантаження двигуна $M1$ реостатами $R3$ і $R4$, дослідити ЕМХ при зміні струму якоря двигуна від 0 до 10А:
 - 1-й варіант – напруга генератора в процесі дослідів подільником напруги $R1$ стабілізується на рівні, виставленому згідно п. 4;
 - 2-й варіант – напруга генератора в процесі дослідів не стабілізується.
- 6) такі ж дослідів провести при напругах генератора $M3$, що відповідають швидкостям 1000 і 500 об/хв. при номінальному навантаженні;
- 7) результати досліджень і розрахунків записувати у таблицю:

$U_{M3}, \text{В}$ (PV1)	$n,$ об/хв.	$I_{Я}, \text{А}$ (PA5)	Навантаження двигуна $M1$				$\eta,$ в.о.
			$U_{M2}, \text{В}$ (PV2)	$I_{M2}, \text{А}$ (PA1)	$I_0,$ А	$P_2 =$ $U_{M2}(I_{M2} + I_0),$ Вт	

I_0 – струм холостого ходу навантажувальної машини $M2$ залежить від частоти обертання n і визначається за формулою:

$$I_0 = 0,21 + 0,00014n; \quad (1.5)$$

- 8) за результатами досліджень побудувати електромеханічні характеристики двигуна $n = f(I_{Я})$;
- 9) за формулою (1.6) знайти ККД і побудувати залежність ККД від швидкості обертання двигуна при номінальному моменті (струмі) двигуна $\eta = f(n)$;

- 10) за експериментальними даними побудувати залежність $P_2 = f(n)$ при $I_A = I_{A.H}$;
- 11) визначити показники регулювання, перелік яких наведено в п.7 завдання на виконання роботи.

Паспортні дані електричних машин

М1

Тип П22; $P_H = 1$ кВт; $U_H = 220$ В; $I_H = 5,9$ А; $n_H = 1500$ об/хв.;
ККД = 0,767; режим роботи – S1; $I_{3.H} = 0,25$ А; $J = 0,014$ кг·м²;
 $m = 43,8$ кг.

М2

Тип П31; $P_H = 1,5$ кВт; $U_H = 220$ В; $I_H = 8,65$ А; $n_H = 1500$ об/хв.;
ККД = 0,79; режим роботи – S1; $J = 0,022$ кг·м²; $m = 54,5$ кг.

М3

Тип ПН-45; $P_H = 3,3$ кВт; $U_H = 230$ В; $I_H = 14,4$ А; $n_H = 1440$ об/хв.;
режим роботи – S1; $J = 0,14$ кг·м²; $m = 170$ кг.

М4

A02-32-4; $P_H = 4$ кВт; $U_H = 220/380$ В; $I_H = 11,2/6,5$ А;
 $n_H = 1430$ об/хв.; ККД = 0,835; $\cos\phi = 0,84$; режим роботи – S1.

Контрольні питання

1. Визначити тип досліджуваного електродвигуна і показати його на електричній схемі.
2. Що є джерелом живлення двигуна М1?
3. Як можна регулювати швидкість обертання двигуна в системі Г-Д?
4. Який вигляд мають електромеханічні (механічні) характеристики досліджуваного двигуна?
5. Чому жорсткість природної ЕМХ двигуна постійного струму з незалежним збудженням більша, ніж при роботі в системі Г-Д?
6. При якому навантаженні допускається зупинка двигуна в приводах без підвищених вимог до стабільності роботи на мінімальній частоті обертання?
7. Як визначити діапазон регулювання?
8. Що таке статизм? Як його визначити?

9. Оцініть плавність регулювання в системі Г-Д лабораторної установки.
10. Пояснити, що таке напрямок регулювання?
11. З яким допустимим навантаженням може працювати двигун в системі Г-Д?
12. За якими показниками оцінюється економічність регулювання?
13. Як змінюється ККД системи Г-Д при зменшенні швидкості обертання?

Лабораторна робота №2РП
ДОСЛІДЖЕННЯ ПОКАЗНИКІВ РЕГУЛЮВАННЯ СИСТЕМИ
ТИРИСТОРНИЙ ПЕРЕТВОРЮВАЧ НАПРУГИ – ДВИГУН
(ТПН-Д)

Програма роботи

1. Ознайомитися з обладнанням робочого місця. Ознайомитися з тиристорним перетворювачем напруги, вивчити призначення і принцип дії окремих його елементів, вузлів і органів керування. Записати паспортні дані електричних машин *M5* і *M6* та тиристорного перетворювача напруги.

2. Виміряти опір обмотки якоря машини *M5* за методикою, наведеною в лабораторній роботі №1РП.

3. Скласти схему для дослідження регульованого електропривода постійного струму з тиристорним перетворювачем напруги (рис. 2.2).

4. Налагодити ТПН перед роботою.

5. Дослідити електромеханічні характеристики двигуна *M5* при номінальному струмі збудження і різних напругах на виході тиристорного перетворювача, що відповідають швидкостям двигуна при ненавантаженому генераторі *G* (машина *M6*) 500, 1000 і 1500 об/хв., спочатку з системою керування двигуна з $I \times R$ -компенсацією, а потім – з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю. Струм навантаження двигуна змінювати від 0 до максимально можливого, але не більше $2I_{H,ДВ}$.

6. За отриманими експериментальними даними побудувати електромеханічні характеристики двигуна $n = f(I)$.

7. Визначити показники регулювання досліджуваного двигуна:

- діапазон регулювання;
- плавність;
- стабільність швидкості;
- напрямок регулювання;
- допустимий момент навантаження.

Загальні методичні вказівки

Для керування двигуном постійного струму найчастіше застосовують тиристорні перетворювачі, які перетворюють напругу змінного струму у регульовану напругу постійного струму. Значення електрорушійної сили перетворювача $e_{ТП}$ залежить від величини

керуючої напруги u_K . Для зменшення пульсації струму в коло якоря двигуна часто вмикають дросель. У загальному випадку тиристорний перетворювач напруги (ТПН) складається з силового блока (СБ) і блока керування тиристорами (БК).

Переваги системи ТПН-Д:

- високі швидкодія і коефіцієнт корисної дії;
- відсутність додаткових обертових електричних машин.

Недоліки системи ТПН-Д:

- спотворення форми струму, що надходить із мережі;
- низький $\cos \varphi$;
- складність системи.

У лабораторній роботі використано тиристорний перетворювач напруги німецької фірми Lenze серії 534 (рис. 2.1). Ці перетворювачі мають чотири модифікації з вихідними потужностями від 0,36 до 2 кВт і призначені для роботи з двигунами постійного струму незалежного збудження в I квадранті.

На лицьовій стороні пристрою розміщені регулятори: I_{MAX} – установка максимально допустимого струму навантаження; $I \times R$ – регулятор настроювання зворотного зв'язку за напругою якоря ($I \times R$ -компенсація); n_{MAX} , n_{MIN} – обмеження максимальної і мінімальної швидкості двигуна; T_i – установка часу перехідного процесу.

Швидкість обертання регулюється задатчиком, яким може бути потенціометр $R = 10$ кОм або зовнішнє регульоване джерело напруги керування $U_K = 0 \dots 10$ В. При налагодженні привода для роботи з від'ємним зворотним зв'язком за швидкістю перемичку між клемми 2-4 знімають, а до клем 3-4 приєднують тахометр U_{TT} .

Перед початком роботи електропривода необхідно налагодити ТРН у такій послідовності:

1. Регулятором „ I_{MAX} ” виставити максимальний струм навантаження. Для цього регулятор „ I_{MAX} ” встановити в крайнє ліве положення, а регулятор „ n_{MIN} ” – в крайнє праве. Амперметр постійного струму включити в коло якоря. Відключити обмотку збудження двигуна. Перемичку між клемми 2–4 зняти. Подати напругу на ТРН і увімкнути вимикач SA (рис. 2.2). Регулятором „ I_{MAX} ” встановити допустиме ($I_{MAX} = 9,5$ А) значення струму в колі якоря двигуна. Після цього відключити живлення, повернути „ n_{MIN} ” у ліве положення, підключити обмотку збудження до джерела живлення, замкнути клемми 2–4.



Рис. 2.1. Зовнішній вигляд тиристорного перетворювача напруги серії 530 фірми Lenze

2. Регуляторами „ n_{MIN} ” і „ n_{MAX} ” встановити заданий викладачем діапазон регулювання швидкості. Напруга на виході тиристорного регулятора задається потенціометром R_{Π} , який встановлює керуючу напругу в межах $U_K = 0 \dots 10$ В. Максимальна швидкість встановлюється при керуючій напрузі $U_K = 10$ В, а мінімальна – при $U_K = 0$ В. Згідно з паспортними характеристиками даного регулятора $n_{MIN} = (0 \dots 0,25)n_H$, а $n_{MAX} = (0,75 \dots 1)n_H$. В лабораторній установці треба встановити $n_{MIN} = 200$ об/хв, $n_{MAX} = 2300$ об/хв.

3. Час перехідного процесу встановлюється регулятором T_i .

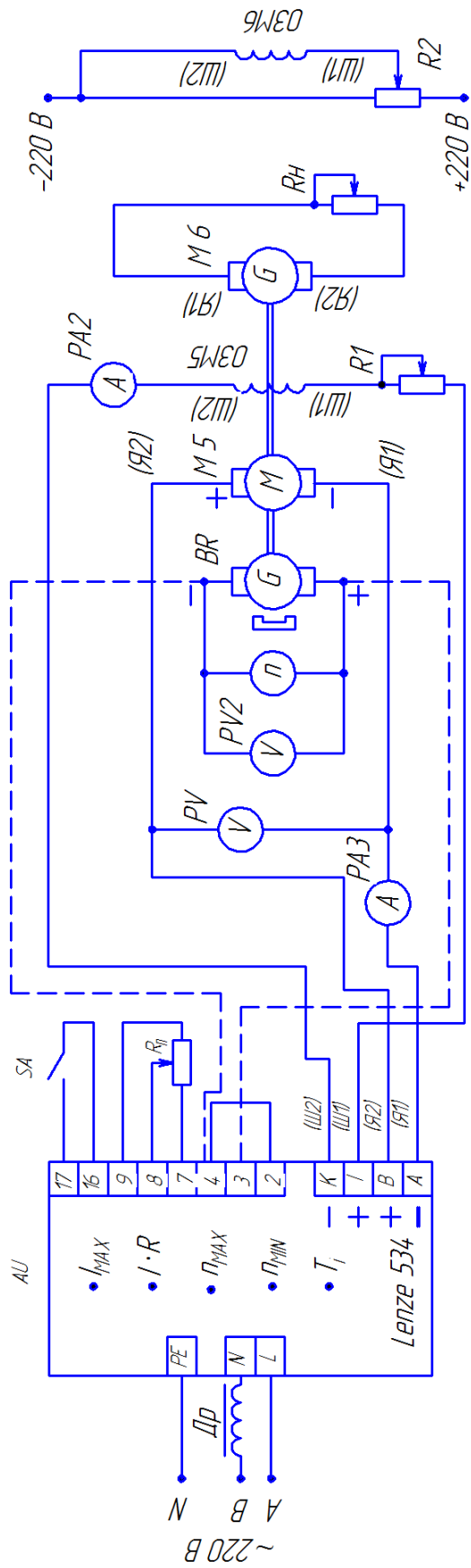


Рис. 2.2. Схема для дослідження двигуна постійного струму незалежного збудження в системі тиристорний перетворювач напруги-двигун

Структурна схема двоконтурної системи "тиристорний перетворювач напруги – двигун" з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і напругою якоря або напругою тахогенератора наведена на рис. 2.3. Введенням в систему електропривода зворотного зв'язку за струмом досягається обмеження струму і моменту, а за напругою якоря чи тахогенератора – автоматична стабілізація швидкості.

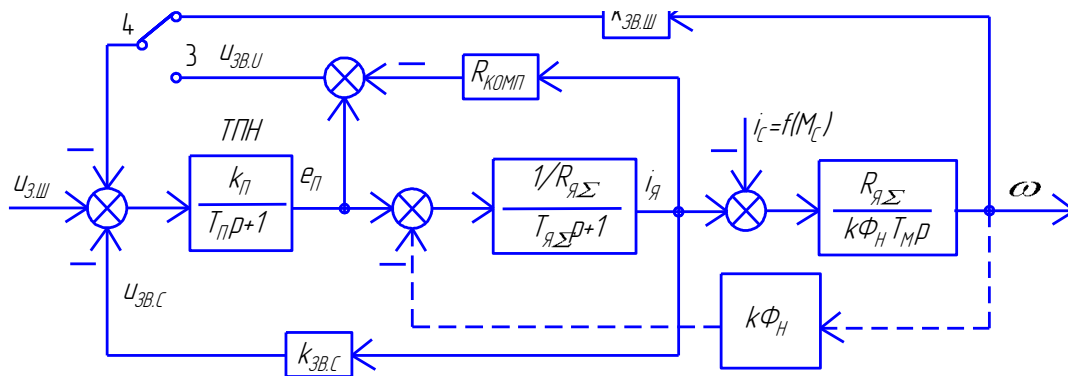


Рис. 2.3. Двоконтурна структурна схема електропривода в системі ТПН-Д з від'ємними зворотними зв'язками за струмом і швидкістю (перемичка 2-4 замкнена) або напругою якоря (перемичка 3-4 замкнена):

$u_{z,ш}$ – задаючий сигнал швидкості; $u_{zv,ш}$, $u_{zv,u}$ – сигнали зворотного зв'язку відповідно за швидкістю та напругою якоря; $u_{zv,c}$ – сигнал зворотного зв'язку за струмом; $R_{комп}$ – компенсаційний опір; $R_{яΣ}$ – сумарний опір якорного кола; ТПН – тиристорний перетворювач напруги; $k_{п}$ – коефіцієнт підсилення ТПН; $k_{φ_H}$ – номінальний магнітний потік двигуна; $k_{zv,c}$, $k_{zv,ш}$ – коефіцієнти зворотного зв'язку відповідно за струмом та швидкістю; $T_{п}$, $T_{яΣ}$ – електромагнітні сталі часу ТПН та якорного кола; T_M – електромеханічна стала часу; $e_{п}$ – ЕРС тиристорного перетворювача напруги; $i_{я}$, i_c – миттєві значення струму якорного кола та струму, пропорційного статичному опору робочої машини; p – оператор Лапласа

Стабілізація ЕРС ТПН здійснюється шляхом подачі узгодженого сигналу від'ємного зворотного зв'язку $u_{zv,u} = e_{п} - i_{я} R_{комп}$ на вхід задатчика швидкості $u_{z,ш}$. Змінюючи величину $R_{комп}$, змінюють величину коефіцієнта зворотного зв'язку. При збільшенні навантаження напруга на затискачах двигуна знижується за рахунок втрат в якорному колі. При цьому зростає падіння напруги на опорі $R_{комп}$, сигнал з якого віднімається від $e_{п}$ і узгоджено подається на вхід $u_{z,ш}$. Напруга на виході ТРН автоматично збільшується.

Вказівки щодо виконання роботи

Лабораторна установка складається з ТПН Lenze 534 і електромашинного агрегату (двигун $M5$ і генератор $M6$) (рис. 2.2). Навантаженням генератора служить реостат R_H .

При подачі напруги змінного струму на ТПН одночасно струм надходить в обмотку збудження двигуна $M5$. Для подачі напруги на якір двигуна необхідно замкнути вимикач SA . При такому порядку вмикання привода магнітний потік встановлюється номінальним до початку роботи двигуна.

Дослідження ДПС НЗ у системі ТПН-Д виконуються в такій послідовності:

- 1) скласти електричне коло лабораторної установки (рис. 2.2);
- 2) встановити перемичку 2–4, тахометр BR до перетворювача не підключати;
- 3) потенціометр R_{II} встановити в крайнє ліве положення;
- 4) подати напругу змінного струму на перетворювач AU типу Lenze 534, увімкнути вимикач SA ;
- 5) при холостому ході агрегату потенціометром R_{II} встановити на виході ТРН напругу, яка відповідає швидкості 500 об/хв.;
- б) змінюючи навантаження двигуна M реостатами R_H і R_2 , дослідити електромеханічні характеристики при зміні струму якоря двигуна від 0 до 10 А:
 - а) при мінімальній компенсації збурення (регулятор "I-R" у лівому положенні);
 - б) при оптимальній компенсації збурення (регулятором "I-R" досягають мінімального перепаду швидкості при збільшенні навантаження);
- 7) такі ж досліди провести при напругах ТРН, що відповідають швидкостям 1000 і 1500 об/хв.;
- 8) досліди п.6 і п.7 провести при від'ємному зворотному зв'язку за швидкістю. Для цього перемичку 2–4 зняти і на клеми 3-4 підключити тахогенератор BR (на рис. 2.2 показано пунктирними лініями);
- 9) результати досліджень записати у таблицю;

$U_{TP}, В$	$n, об/хв.$	$I_{я}, А$	$U_{TR}, В$	$\eta, \%$	Режим роботи

10) побудувати залежності $n = f(I_{я})$ при різних значеннях напруги на виході ТРН;

11) визначити показники регулювання.

Показники регулювання електропривода

Діапазон регулювання кутової швидкості визначається відношенням усталених швидкостей, максимальної $n_{МАКС}$ до мінімальної $n_{МИН.}$, при збереженні заданої перевантажувальної здатності двигуна.

При заданій точності регулювання із заданим статичним падінням швидкості електропривода для встановлених меж зміни моменту діапазон можна визначити графо-аналітичним методом. За максимальну $n_{МАКС}$ прийняти швидкість при $I_H = 8,2$ А на характеристиці, дослідженій при напрузі, яка відповідає швидкості 1500 об/хв. (рис. 2.4).

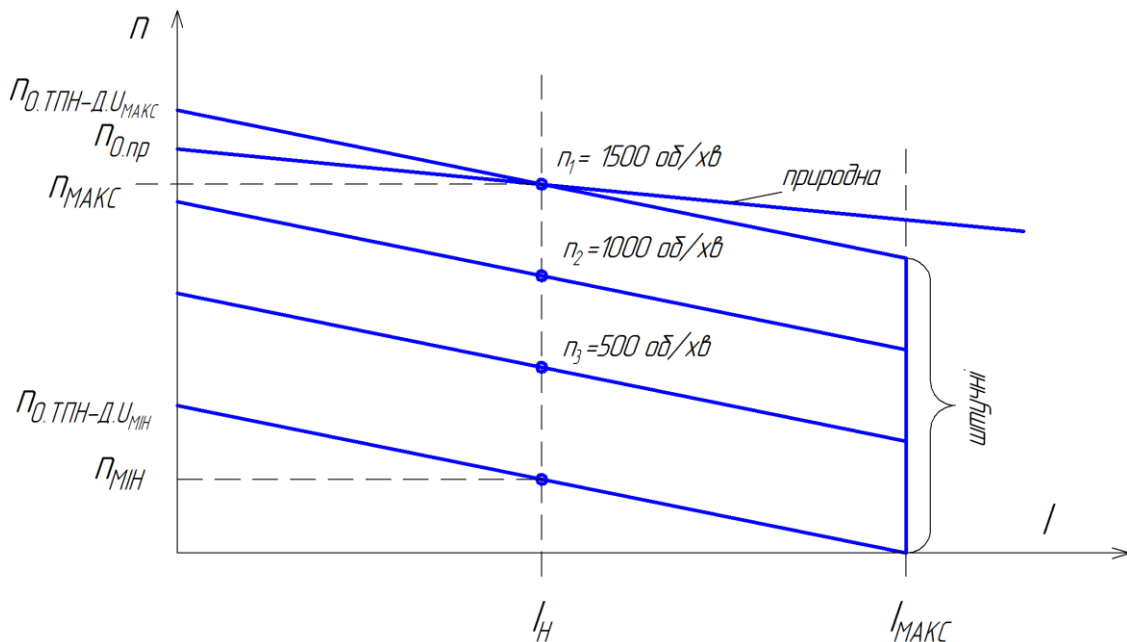


Рис. 2.4. Сімейство електромеханічних характеристик двигуна в системі ТПН-Д

Для визначення $n_{МИН}$ через точку $I_{МАКС}$ на осі абсцис проводять пряму, паралельну вказаній електромеханічній характеристиці. Мінімальну швидкість $n_{МИН}$ знаходять на пересіченні цієї прямої з лінією номінального струму. Діапазон регулювання визначають за рівнянням:

$$D = \frac{n_{МАКС}}{n_{МИН}}. \quad (2.1)$$

Плавність регулювання – це стрибок швидкості при переході від певної швидкості до найближчої можливої. На лабораторній

установці плавність наближено можна визначити так. При частоті обертання двигуна 1500 об/хв. і струмі якоря 8,2 А повернути движок реостата R_{II} в сторону зниження швидкості на мінімальний крок. Відновити струм якоря 8,2 А і записати нове значення частоти обертання n_1 . Плавність регулювання визначити за виразом:

$$\varphi_{ПЛ} = \frac{n_{НОМ}}{n_1}. \quad (2,2)$$

Чим ближчий $\varphi_{ПЛ}$ до одиниці, тим плавність вища.

Статизм (стабільність швидкості) визначається відношенням перепаду швидкості при зміні навантаження від нуля до номінального до кутової швидкості ідеального холостого ходу:

$$\delta_{СТ} = \frac{\Delta\omega}{\omega_0}. \quad (2.3)$$

Напрямок регулювання – вгору, вниз або вгору і вниз від номінальної швидкості. В системі ТПН-Д регулювання швидкості змінюється шляхом зміни напруги. Напругу перетворювача можна змінювати в межах від 0 до номінальної 110 В. Студентам надається можливість самим визначити можливий напрямок регулювання.

Допустимий момент навантаження. З теорії електроприводу відомо, що при регулюванні швидкості обертання зміною підведеної напруги допустимий момент при тривалому режимі роботи двигуна постійного струму незалежного збудження з примусовим охолодженням дорівнює номінальному моменту, тобто:

$$M_{ДОП} = M_H = 9550 P_H / n_H = const. \quad (2.4)$$

При зниженні напруги знижується і кутова швидкість, тому статична потужність двигуна, що віддається, також знижується:

$$P_2 = 30 M_{ДОП} / \pi n, \quad (2.5)$$

де n – швидкість обертання якоря двигуна, об/хв.

Паспортні дані обладнання

Тиристорний перетворювач напруги серії Lenze 530

Тип		531	532	533	534	
Вихідна потужність	P, Вт	360		720	1360	2040
Напруга живлення	U ₁ , В	190...265				
Струм якоря (для 534 можна змінювати)	I _{яmax} , А	2		4	8	12
Напруга якоря при живленні U ₁ =230 В	U _я , В	180		180	180	170
Напруга збудження	U _з , В	0,9U ₁				
Максимальний струм збудження	I _{зmax} , А	0,3		0,6	1,5	
Коефіцієнт форми	F _{Fmax}	1,4		1,4	1,6	1,2
I-R- компенсація	R _я , Ом	0...20		0...10	0...0,5	0...2,5
Максимальна напруга керування	U _к , В	10				
Номинальна напруга тахогенератора	U _{тг} , В	10...120				
Час пуску	t _п , с	1...10				
Мінімальна швидкість	n _{min} , об./хв.	(0...0,25)n _H				
Максимальна швидкість	n _{max} , об./хв.	(0,75...1)n _H				
Температура середовища	T, °С	0...45				
Маса	m, кг	0,4				1,2
Запобіжник		FF6,3/250 V	FF8/250 V	FF20/250 V		
Вхідний дросель (мережевий дросель)		-	-	-	2,5 мН, 18 А ELN1-02550H018	
Вихідний дросель (якірний дросель)		Узгоджується з електродвигуном ELK-440H004, 40 мН, 4,4 А ELK-500H002, 50/15 мН, 2/10 А ELA-400H010, 40/12 мН, 10/18 А				
Фільтр РЧ-перешкод		EZF1-004A001			EZF1-018A001	
Блок для згладжування імпульсів напруги RC-фільтр		EZ00341588				
Оксидно-цинковий варістор		S20 R275			B32 K275	

Електродвигун M5:

Тип MI-32 314-02; U_H= 110 В; P_H= 0,76 кВт; I_H= 8,2 А;

n_H= 2500 об/хв.; U_з= 110 В; I_{зБ}= 0,35 А; η_H= 80%; J= 0,053 кг·м²;

маса 38 кг.

Генератор М6:

Тип П21 У4; $U_H = 220$ В; $P_H = 1,5$ кВт; $I_H = 8,8$ А; $n_H = 3000$ об/хв.;
 $n_{МАКС} = 3450$ об/хв.; $U_3 = 220$ В; $\eta_H = 77\%$; $J = 0,01$ кг·м².

Контрольні питання

1. З яких основних елементів складається регульований електропривод ТПН-Д?
2. Який тип досліджуваного електродвигуна?
3. Який принцип регулювання швидкості двигуна в системі ТПН-Д?
4. Яким чином створюється навантаження досліджуваного двигуна?
5. Для чого потрібен додатковий вимикач SA у перетворювачі напруги серії Lenze 534?
6. Який вигляд мають електромеханічні характеристики електродвигуна в системі ТПН-Д?
7. Перерахуйте показники регулювання електропривода.
8. З якими зворотними зв'язками може працювати електропривод постійного струму серії Lenze 534?
9. Що дає використання зворотних зв'язків в системі регульованого електропривода?
10. Як графо-аналітично визначити діапазон регулювання?
11. Що характеризує плавність регулювання?
12. Пояснити, що таке напрямок регулювання?
13. Пояснити суть допустимого навантаження та економічності регулювання.

Лабораторна робота № 3РП
ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННОГО ЕЛЕКТРОПРИВОДА
З ПЕРЕТВОРЮВАЧЕМ ЧАСТОТИ

Програма роботи

1. Ознайомитися з будовою, технічними характеристиками та основними оперативними заходами програмування перетворювача частоти.

2. Скласти електричне коло за рис. 3.4, увімкнути двигун $M1$ і перевірити його роботу на холостому ході при різних частотах перетворювача AF . Провести програмування перетворювача частоти: час розгону, тип навантаження, верхню та нижню межу частоти та інші за вказівкою викладача.

3. Дослідити при холостому ході двигуна $M1$ залежність напруги на затискачах перетворювача від частоти $U = f(f)$ при різних уставках параметра 14 (0 – навантаження з постійним моментом; 0 – при вентиляторному навантаженні). Частоту струму змінювати від 5 до 60 Гц через кожні 5 Гц.

4. За допомогою осцилографа дослідити форму кривих вихідної лінійної напруги і струму холостого ходу при значеннях вихідної частоти 50, 35, 25 Гц.

5. Дослідити механічні характеристики $n = f(M)$ асинхронного електродвигуна ($M1$) при значеннях вихідної частоти 50, 35, 25 Гц. Навантаження на двигун змінювати від 0 до M_H .

6. За даними досліджень побудувати залежності $U = f(f)$, $n = f(M)$.

7. Оформити звіт по роботі.

Загальні методичні вказівки

Основні способи регулювання частоти обертання асинхронних електродвигунів з короткозамкненим ротором впливають з формули визначення синхронної частоти обертання магнітного поля статора:

$$n_c = \frac{60 \cdot f}{p}, \quad (3.1)$$

де n_c – частота обертання магнітного поля статора, об/хв.; f – частота струму, Гц; p – кількість пар полюсів.

Тобто, регулювати частоту обертання можна зміною частоти струму f і зміною числа пар полюсів p обмотки статора багатошвидкісного двигуна.

Регулювання частоти струму вимагає одночасного регулювання напруги. При регулюванні частоти струму на затискачах двигуна змінюється його індуктивний опір. При зниженні частоти і незмінній напрузі збільшується струм намагнічування, зростає струм ротора, внаслідок чого двигун перегрівається. Збільшення частоти при незмінній напрузі призводить до зменшення струму, магнітного потоку двигуна та його перевантажувальної здатності. Закон регулювання напруги залежить від виду механічної характеристики приводного механізму.

Для регулювання частоти струму широко використовуються перетворювачі частоти з різною елементною базою і схемами керування. В останній час на зміну тиристорним схемам перетворювачів частоти розроблені схеми на силових IGBT транзисторах. На рис. 3.1 показана функціональна схема інвертора змінної напруги і змінної частоти (VVVF), який є основою для побудови перетворювача частоти. Силова схема складається з трифазного (або однофазного) випрямляча, конденсатора фільтра і силового модуля з шести IGBT транзисторів, які керуються мікропроцесорною системою. Система керування дозволяє змінювати частоту і діюче значення вихідної напруги за різними законами регулювання. Необхідні вихідні параметри перетворювача частоти можна програмувати системою команд, наведеною в експлуатаційній документації.

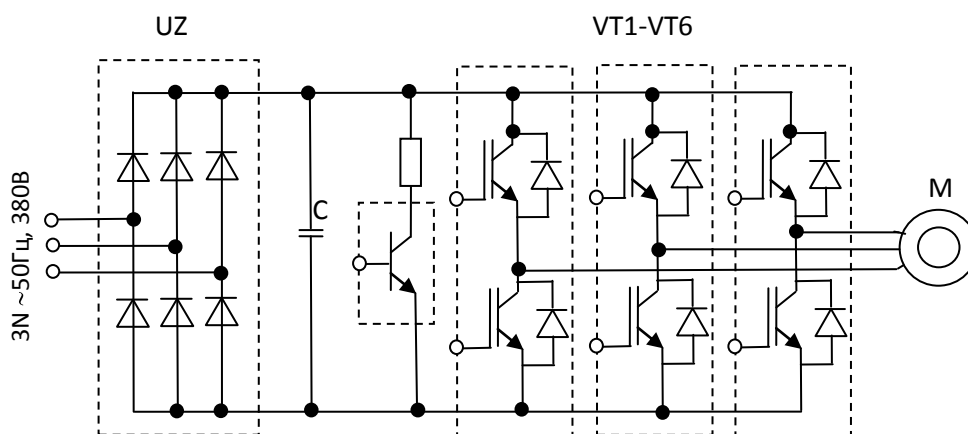


Рис. 3.1. Схема інвертора змінної напруги і змінної частоти (VVVF)

У лабораторній роботі використано перетворювач частоти фірми

Mitsubishi FR-S520S- 1,5K -EC(R):

S520S – однофазне живлення 220 В;

1,5K – потужність перетворювача, кВт;

EC – європейська версія;

(R) – з функцією RS-485 (порт для підключення персонального комп'ютера).

На рис. 3.2 і 3.3 зображено пульт керування перетворювача частоти та основні операції, які він виконує.

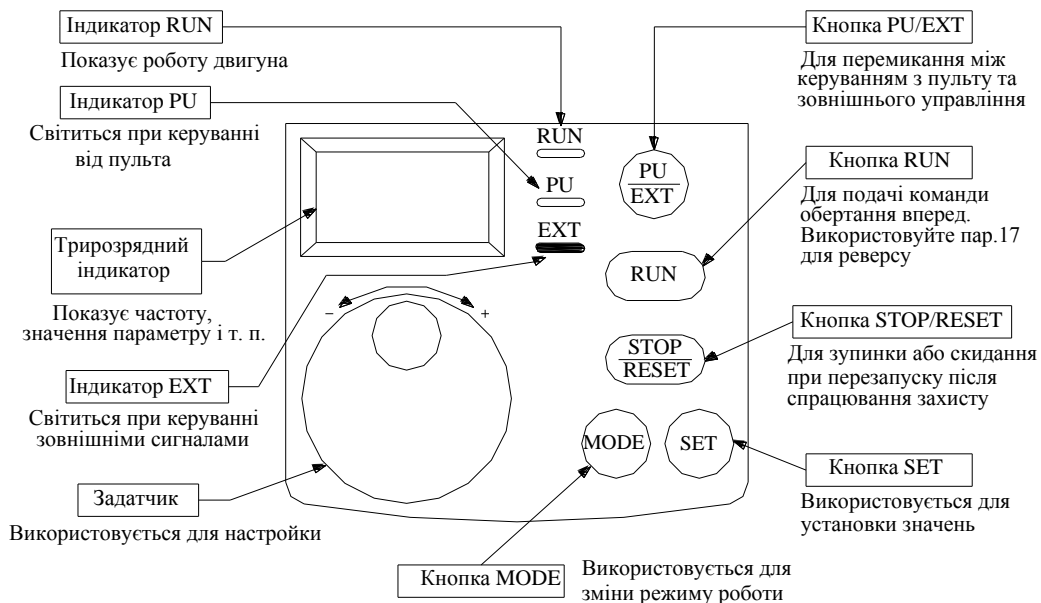


Рис. 3.2. Пульт керування перетворювача частоти

Установка параметрів.

1.1. *Задавання частоти.*

1. Натисніть кнопку PU/EXT для вибору режиму керування з пульта. Засвітиться індикатор PU.
2. Натисніть кнопку RUN для початку роботи.
3. Обертайте задатчик до появи необхідної частоти. Значення частоти моргає близько 5с (у даному випадку задатчик використовується як потенціометр для установки частоти при роботі. При цьому необхідно, щоб було встановлено „1” у пар. 30 і пар. 53).
Обертаючи задатчик у процесі роботи, можна встановлювати іншу частоту.
4. Для зупинки роботи натисніть кнопку STOP/RESET.

2.1. *Установка параметрів.* Приклад: Установка часу розгону (параметр 7):

1. Перевірте стан індикаторів RUN і способу керування.
Перетворювач повинен бути вимкнений і знаходитися в режимі керування з пульта.
(Натисніть кнопку PU/EXT).
2. Натисніть кнопку MODE для вибору режиму задавання параметрів.
3. Обертайте задатчик до появи необхідного номера параметра.
Приклад: Пар. 7 „час розгону”.
4. Натисніть кнопку SET, щоб побачити вже встановлену величину. Приклад: „5” (заводська установка).
5. Обертайте задатчик до появи бажаного значення. Зміна настройки від 0 до 999 с.
6. Натисніть кнопку SET, щоб зафіксувати вибране значення. Покази моргають. Настройка параметра закінчена.
7. Після закінчення настройки параметра, натисніть кнопку MODE двічі, щоб повернутися до екрана індикації.

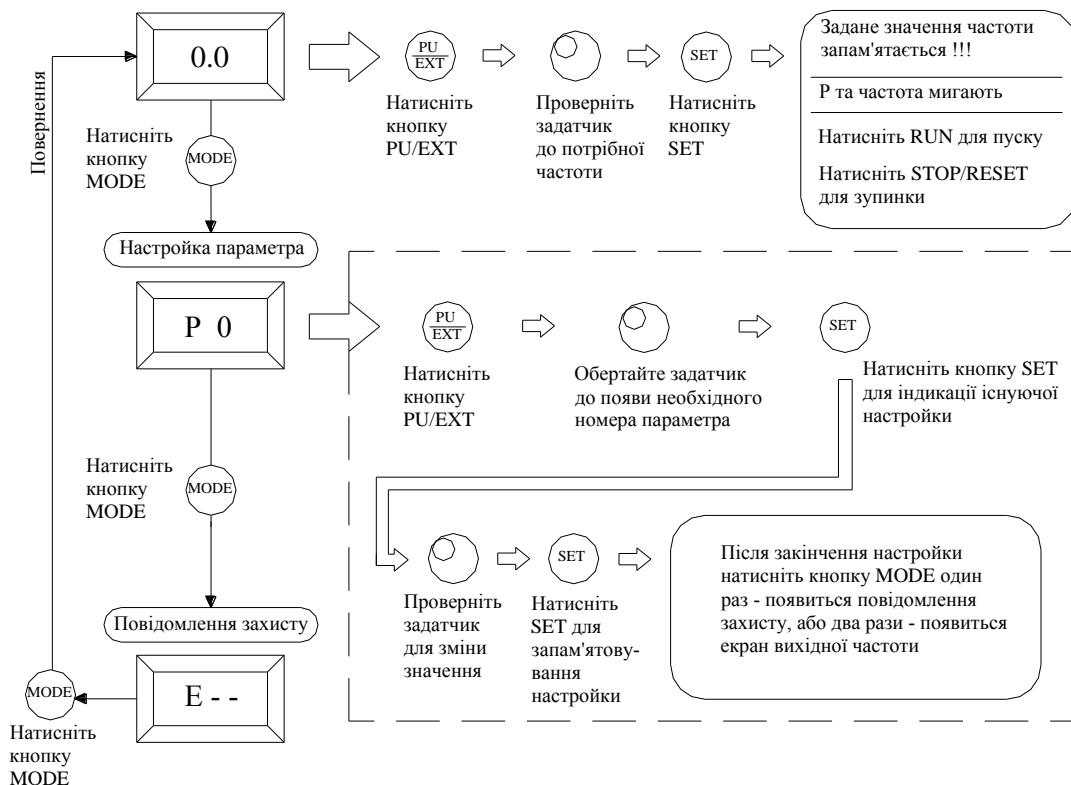


Рис. 3.3. Основні операції пульта керування

Основні параметри перетворювача частоти FR-S520S-1,5K-EC(R) наведені в табл. 3.1.

3.1. Перелік основних параметрів

Параметр	Назва	Короткий опис	Заводська установка
<i>P0</i>	Стартовий момент	Діапазон змінювання 0-15%	6%
<i>P1</i>	Верхня межа частоти	Діапазон змінювання 0-120 Гц	50 Гц
<i>P2</i>	Нижня межа частоти	Діапазон змінювання 0-120 Гц	0 Гц
<i>P3</i>	Номінальна частота	Діапазон змінювання 0-120 Гц	50 Гц
<i>P4</i>	Багатошвидкісний режим (висока швидкість)	Діапазон змінювання 0-120 Гц	50 Гц
<i>P5</i>	Багатошвидкісний режим (середня швидкість)	Діапазон змінювання 0-120 Гц	30 Гц
<i>P6</i>	Багатошвидкісний режим (низька швидкість)	Діапазон змінювання 0-120 Гц	10 Гц
<i>P7</i>	Час розгону	Діапазон змінювання 0-999 с	5 с
<i>P8</i>	Час гальмування	Діапазон змінювання 0-999 с	5 с
<i>P9</i>	Електронний захист від струмового перевантаження двигуна	Діапазон змінювання 0-50 А	Ном. вихідний струм
<i>P14</i>	Тип навантаження	Вибір вигляду U/f-характеристики залежно від типу навантаження: 0 – для навантаження з постійним моментом; 1 – вентиляторне навантаження; 2 – постійне навантаження без підсилення моменту при реверсному обертанні; 3 – те ж, без підсилення моменту при прямому обертанні	0
<i>P17</i>	Напрямок обертання від кнопки RUN	Параметр визначає напрямок обертання при пуску від кнопки RUN: 0 – пряме обертання; 1 - реверс	0

Вказівки щодо виконання роботи

Механічні характеристики асинхронного двигуна з короткозамкненим ротором досліджують методом зворотної роботи за схемою, наведеною на рис. 3.4. Частоту обертання вимірюють електротехометром *BR*. Для дослідження форми кривої струму двигуна в коло статора вмикають шунт *RS1*. Обертальний момент досліджуваного двигуна визначають за формулою:

$$M = C_M \cdot (I_0 + I_{M2}), \quad (3.2)$$

де C_M – коефіцієнт моменту навантажувальної машини $M2$, Н·м/А;
 I_0 – струм якоря навантажувальної машини $M2$ при холостому ході, А;
 I_{M2} – струм якоря навантажувальної машини $M2$ при навантаженні, А.

Оскільки асинхронний двигун з короткозамкненим ротором при дослідженні механічної характеристики працюватиме при великих ковзаннях, то навіть при зниженій напрузі живлення можливе перегрівання двигуна. Тому всі дослідження проводять швидко, двигун вмикають лише на час досліджень, а його статор обдувають окремим вентилятором, що приводиться в рух двигуном $M5$ (рис. 3.4).

Для пуску двигуна $M1$ вмикають автоматичний вимикач $QF1$, а потім натискають кнопку "RUN", яка розташована на лицевій панелі керування перетворювача частоти. Лінійну напругу на статорі досліджуваного двигуна вимірюють вольтметром $PV2$.

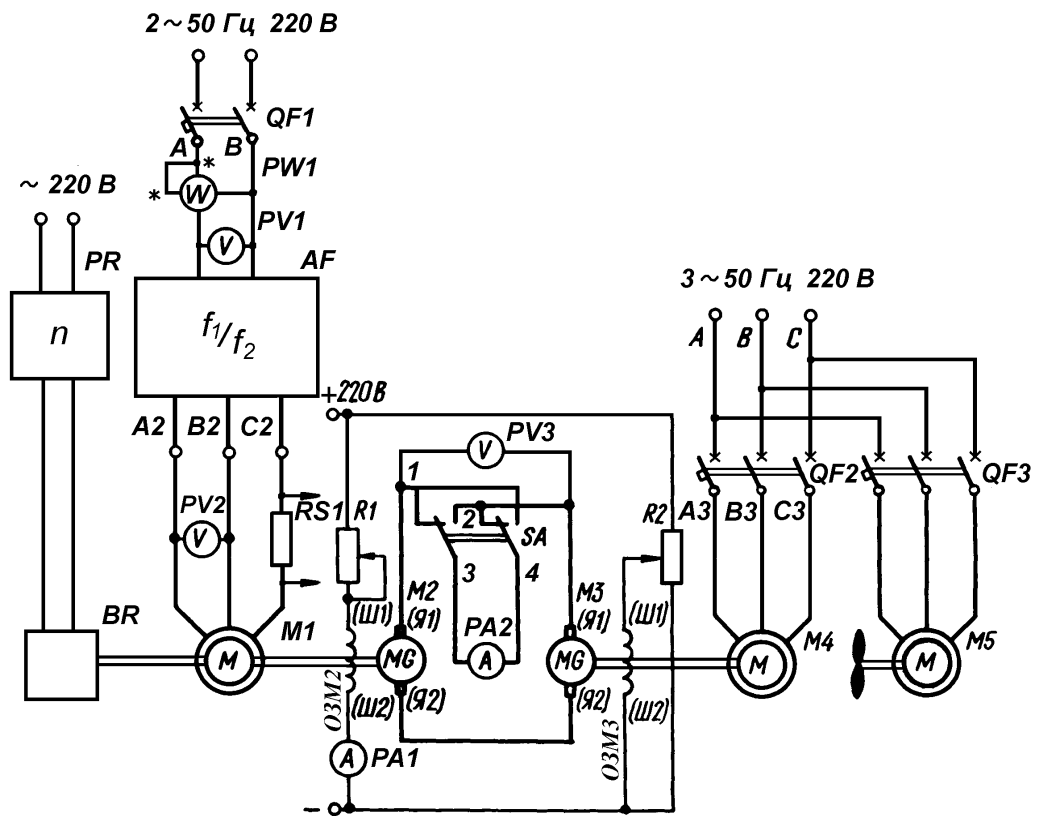


Рис. 3.4. Схема вмикання трифазного асинхронного електродвигуна з короткозамкненим ротором, що живиться від перетворювача частоти, при дослідженні механічних характеристик

Механічні характеристики в режимі двигуна досліджують так (рис. 3.4). Встановити частоту струму перетворювача 50 Гц. При

розімкненому перемикачі SA вмикають досліджуваний двигун $M1$, потім двигун $M4$. Встановивши машині $M2$ номінальне збудження ($0,3$ А), дають машині $M3$ таке збудження, при якому вольтметр $PV3$, ввімкнений паралельно вимикачу SA , показує нуль. Після цього вмикають перемикач SA , реостатом $R2$ повільно зменшують збудження машини $M3$ і досліджують залежність $I_{M2}=f(n)$ при зміні частоти обертання досліджуваного двигуна від n_c до n_H . Після закінчення дослідження струм I_{M2} зменшують до нуля і вимикають перемикач SA . Далі змінюють вихідну частоту перетворювача і встановлюють таке збудження машині $M3$, при якому вольтметр $PV3$, ввімкнений паралельно вимикачу SA , показує нуль. Знову досліджують залежність $I_{M2} = f(n)$ при зміні частоти обертання досліджуваного двигуна від n_c до n_H

Дані дослідів заносять у таблицю.

Частота струму, f , Гц	Частота обертання n , об/хв.	Напруга на статорі U_c , В	Струм I_{M2} , А	Струм I_0 , А	Момент $M = C_M \times (I_0 \pm I_{M2})$, Н·м
-----------------------------	-----------------------------------	---------------------------------	--------------------	-----------------	--

Паспортні дані обладнання лабораторної роботи

Асинхронного електродвигуна М1:

АИР80А4У3; $f_H = 50$ Гц; Δ/Y ; $U_H = 220/380$ В; $I_H = 4,9/2,8$ А;
 $P_H = 1,1$ кВт; $n_H = 1395$ об/хв.; $\eta_H = 76,5$ %; $\cos\varphi = 0,77$; режим S1;
 клас ізоляції F; ступінь захисту IP54; ГОСТ 183-74.

$$\mu_K = \frac{M_{MAX}}{M_H} = 2,2; \quad \mu_{ПУСК} = \frac{M_{ПУСК}}{M_H} = 2,2; \quad \mu_{MIN} = \frac{M_{MIN}}{M_H} = 1,6.$$

Навантажувальної машини М2:

$$I_0 = 0,35 + 0,00013n \text{ при } I_{ЗБ} = 0,3 \text{ А; } C_M = 1,184 \text{ Н·м/А.}$$

Перетворювач частоти FR-S520S-1,5K-EC(R)

Потужність двигуна, що підключається	0,4кВт	0,75кВт	1,5кВт	2,2кВт
Номинальний струм	2,5 А	4,1 А	7,0 А	10,0 А
Перевантажувальна здатність	200% (0,5с), 150% (1хв)			
Захист від перевантаження	За допомогою контролю вихідного струму			
Вхідна напруга	Однофазна, 200...240 VAC (-15%/+10%), 50/60 Гц			
Вхідна потужність	1,5кВА	2,5кВА	4,4кВА	5,2кВА
Вихідна напруга	Трифазна, регулюється (від 0 до 220 VAC)			
Вихідна частота	0,2...400 Гц			
Спосіб управління	Векторне управління з самоналагодженням на двигун або U/f – управління			
Спосіб модуляції	Синусоїдальна ШІМ, «м'яка» ШІМ			
Частота модуляції	Програмується (0,7...14,5 кГц)			
Пристрій гальмування	Вбудований гальмівний транзистор, під'єднувальний резистор-гасник, зовнішня опція гальмування			
Сигнали задавання швидкості	1) аналогові 0-5В, 0-10В, 4-20мА 2) цифрові через пульт управління 3) через RS-485			
Ступінь захисту	IP 20			
Температура зовнішнього середовища	-10°C...+50°C			
Маса	1,9 кг	1,9 кг	2,0 кг	2,0 кг

Контрольні питання

1. Назвіть основні силові вузли перетворювача частоти.
2. Які перетворення відбуваються в інверторі змінної напруги і змінної частоти?
3. Як можна змінювати частоту обертання магнітного поля статора асинхронного двигуна?
4. Що являється навантаженням досліджуваного двигуна в лабораторній установці?
5. Як налагодити лабораторну установку для дослідження механічних характеристик двигуна?
6. Як змінюються механічні характеристики асинхронного двигуна при зміні частоти струму?
7. Назвіть основні типи характеристик навантаження.
8. Чому необхідно проводити корекцію напруги на виході перетворювача частоти зі зміною частоти струму?

Лабораторна робота № 4РП

ДОСЛІДЖЕННЯ РОБОТИ ЕЛЕКТРОПРИВОДА З КРОКОВИМ ДВИГУНОМ

Програма роботи

1. Ознайомитися з обладнанням робочого місця. Записати паспортні дані крокового двигуна, контролера, силового драйвера.
2. Вивчити загальні методичні вказівки.
3. Скласти схему електропривода з кроковим двигуном за рис. 4.6.
4. За вказівкою викладача задати параметри та скласти алгоритм роботи електропривода.
5. Оформити звіт по лабораторній роботі.

Загальні методичні вказівки

Крокові двигуни вже давно і успішно застосовуються в найрізноманітніших пристроях. Їх можна зустріти в дисководах, принтерах, плоттерах, сканерах, факсах, а також в різноманітному промисловому і спеціальному обладнанні. В даний час випускається безліч різних типів крокових двигунів на всі випадки життя. Однак правильно вибрати тип двигуна - це ще пів-справи. Не менш важливо правильно вибрати схему драйвера і алгоритм його роботи, який найчастіше визначається програмою мікроконтролера.

Кроковий двигун - це електромеханічний пристрій, який перетворює електричні імпульси в дискретні механічні переміщення.

Кроковий двигун має як переваги, так і недоліки.

Переваги:

- кут повороту ротора визначається числом імпульсів, які подані на двигун;
- двигун забезпечує повний момент в режимі зупинки (якщо обмотки під напругою);
- високоточне позиціонування і повторюваність. Хороші крокові двигуни мають точність 3-5% від величини кроку. Ця помилка не накопичується від кроку до кроку;
- можливість швидкого старту/зупинки/реверсування;
- висока надійність, пов'язана з відсутністю щіток, термін служби крокового двигуна фактично визначається терміном служби підшипників;

- однозначна залежність положення від вхідних імпульсів забезпечує позиціонування без зворотного зв'язку;
- можливість отримання дуже низьких швидкостей обертання під навантаженням, приєднаним безпосередньо до валу двигуна без проміжного редуктора;
- може бути перекритий досить великий діапазон швидкостей,
- швидкість пропорційна частоті вхідних імпульсів.

Недоліки:

- кроковим двигунам притаманне явище резонансу;
- можлива втрата контролю положення внаслідок роботи без зворотного зв'язку;
- споживання енергії не зменшується навіть без навантаження;
- ускладнена робота на високих швидкостях;
- невисока питома потужність;
- відносно складна схема управління.

Типи крокових двигунів:

- двигуни із змінним магнітним опором;
- двигуни з постійними магнітами;
- гібридні двигуни.

Двигуни із змінним магнітним опором.

Крокові двигуни із змінним магнітним опором мають декілька полюсів на статорі, а ротор виконаний зубчастої форми з магнітом'якого матеріалу (рис. 4.1). Намагніченість ротора відсутня. Для простоти на малюнку ротор має чотири зубці, а статор має шість полюсів. Двигун має три незалежні обмотки, кожна з яких намотана на двох протилежних полюсах статора. Такий двигун має крок 30° .

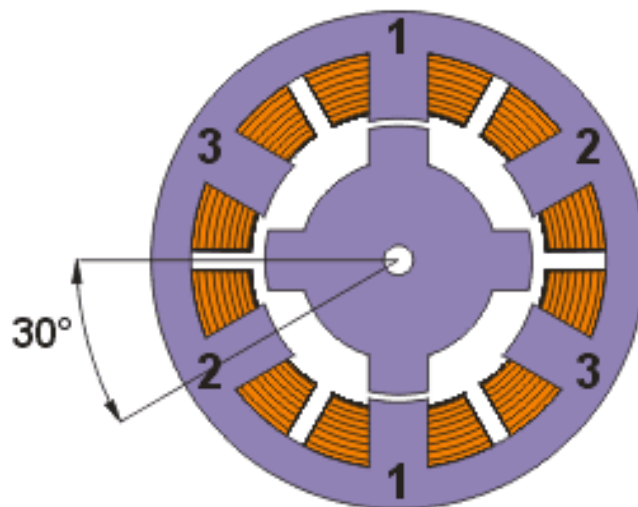


Рис. 4.1. Двигун із змінним магнітним опором

При подачі струму в одну із котушок ротор прагне зайняти положення, коли магнітний потік замкнений, тобто зубці ротора будуть знаходитися навпроти тих полюсів, на яких знаходиться ввімкнена обмотка. Якщо вимкнути цю обмотку і ввімкнути наступну, ротор поміняє положення, знову замкнувши своїми зубцями магнітний потік. Таким чином, щоб здійснити безперервне обертання, потрібно вмикати фази поперемінно. Двигун не чутливий до напрямку струму в обмотках. Реальний двигун може мати більшу кількість полюсів статора і більшу кількість зубців ротора, що відповідає більшій кількості кроків на оберт. Іноді поверхню кожного полюса статора виконують зубчастою, що разом з відповідними зубцями ротора забезпечує дуже маленьке значення кута кроку, порядку декількох градусів.

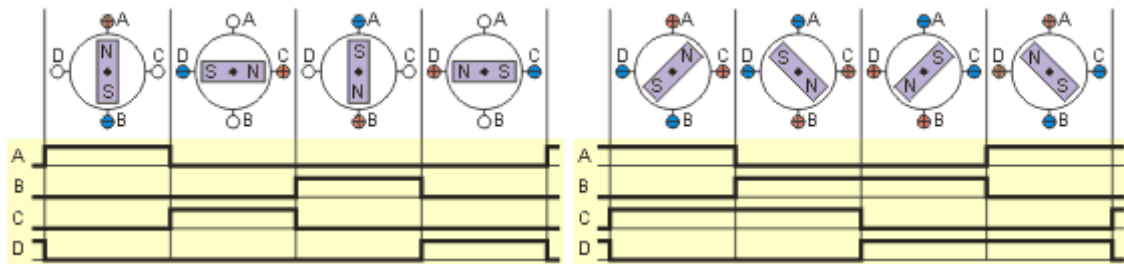
Способи керування фазами крокового двигуна.

Існує декілька способів керування кроковим двигуном. Перший спосіб забезпечується поперемінною комутацією фаз, при цьому вони не перекриваються, в один момент часу ввімкнена тільки одна фаза (рис. 4.2, *a*). Цей спосіб називають "one phase on" full step або wave drive mode. Точки рівноваги ротора для кожного кроку збігаються з «природними» точками рівноваги ротора при вимкненому двигуні. Недоліком цього способу керування є те, що для біполярного двигуна в один і той же момент часу використовується 50% обмоток, а для уніполярного – тільки 25%. Це означає, що в такому режимі не може бути отриманий повний момент.

Другий спосіб - управління фазами з перекриттям: дві фази ввімкнені одночасно. Його називають "two-phase-on" full step або просто full step mode. При цьому способі управління ротор фіксується в проміжних позиціях між полюсами статора (рис. 4,2 *б*) і забезпечується приблизно на 40% більший момент, ніж у випадку вмикання однієї фази. Цей спосіб управління забезпечує такий же кут кроку, як і перший спосіб, але положення точок рівноваги ротора зміщений на пів-кроку.

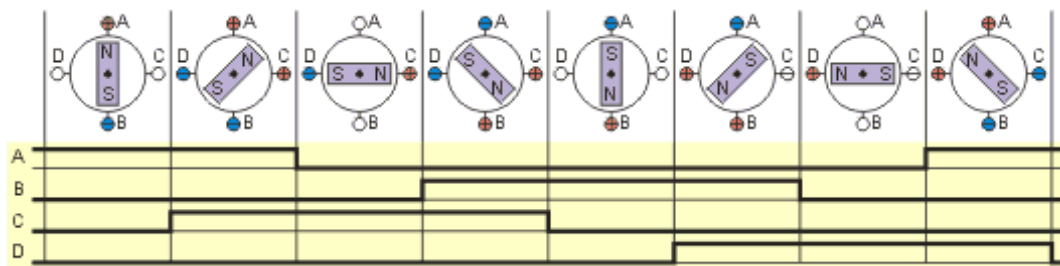
Третій спосіб є комбінацією перших двох і називається напівкроковим режимом, "one and two-phase-on" half step або просто half step mode, коли двигун робить крок рівним половині основного. Цей метод управління досить поширений, оскільки двигун з меншим кроком коштує дорожче і дуже заманливо отримати від 100-крокового двигуна 200 кроків на оберт. На кожному другому кроці ввімкнена лише одна фаза, а в інших випадках – дві (рис. 4,2 *в*). В результаті кутове переміщення ротора становить половину кута кроку для

перших двох способів управління. Крім зменшення розміру кроку цей спосіб керування дозволяє частково позбутися явища резонансу. Напівкроковий режим зазвичай не дозволяє отримати повний момент, хоча найбільш досконалі драйвери реалізують модифікований напівкроковий режим, в якому двигун забезпечує практично повний момент, при цьому розсіювана потужність не перевищує номінальної.



a – повнокроковий режим, ввімкнена одна фаза "one phase on" full step (wave drive mode)

б – повнокроковий режим, ввімкнено дві фази "two-phase-on" full step (full step mode)



в – напівкроковий режим "one and two-phase-on" half step (half step mode)

Рис. 4.2. Способи керування фазами крокового двигуна

У порівнянні з повнокроковим режимом напівкроковий має переваги і недоліки.

Переваги:

- краща роздільна здатність без застосування дорогих двигунів;
- менші проблеми з явищем резонансу. Резонанс призводить лише до часткової втрати моменту, що зазвичай не заважає нормальній роботі привода.

Недоліки:

- значне коливання моменту від кроку до кроку. У тих положеннях ротора, коли ввімкнена одна фаза, момент складає приблизно 70% від повного при ввімкнених двох фазах;
- коливання моменту спричиняють підвищену вібрацію і шум, хоча вони менші, ніж у повнокроковому режимі.

Мікрокроковий режим керування.

При цьому способі управління струм у фазах потрібно змінювати невеликими кроками, забезпечуючи таким чином дроблення половинного кроку на ще менші мікрокроки. Коли одночасно увімкнені дві фази, а їх струми не рівні, то положення рівноваги ротора буде лежати не в середині кроку, а в іншому місці, визначеному співвідношенням струмів фаз. Змінюючи це співвідношення, можна забезпечити деяку кількість мікрокроків всередині одного кроку. Крім збільшення роздільної здатності мікрокроків режим забезпечує менші вібрації і практично безшумну роботу аж до нульової частоти (рис. 4.3). Але для реалізації мікрокрокового режиму потрібні значно складніші драйвери, що дозволяють задавати струм в обмотках з необхідною дискретністю.

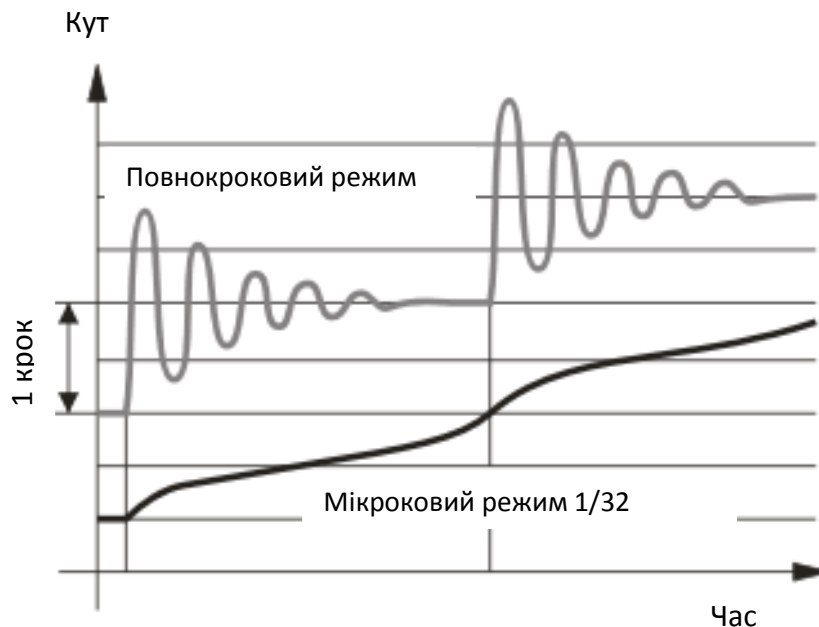


Рис. 4.3. Переміщення ротора в повнокроковому і мікрокроковому режимах

Для керування кроковим двигуном потрібен драйвер. Драйвер являє собою силову частину з вбудованим найпростішим інтерфейсом, оснований на комбінації "крок-напрямок". Драйвер крокового двигуна – це і підсилювач потужності, який перетворює імпульси, одержувані від джерела електричного струму, в переміщення вала. При цьому кожен імпульс викликає переміщення вала на 1 крок (або на 1 мікрокрок).

Драйвер крокового двигуна призначений для виконання трьох основних завдань:

1. Вмикати і вимикати струм в обмотках, а також змінювати його напрямок. При виконанні цього завдання системи керування електроприводом працюють без збоїв.
2. Підтримувати задане значення струму.
3. Забезпечувати якомога швидше наростання і спад струму для досягнення необхідних швидкісних характеристик. Швидкісні характеристики в свою чергу якісним чином впливають на управління кроковим двигуном.

Крім драйвера, однією з важливих частин привода є контролер, що розширює можливості керування двигуном (інтелектуальна частина). Як правило, контролери для крокового двигуна виготовляють на базі промислових мікроконтролерів і можуть бути як програмними, так і апаратними. Програмні контролери для крокового двигуна застосовують тоді, коли коло розв'язуваних ними завдань невелике. Ціна такого програмного контролера набагато нижча апаратного.

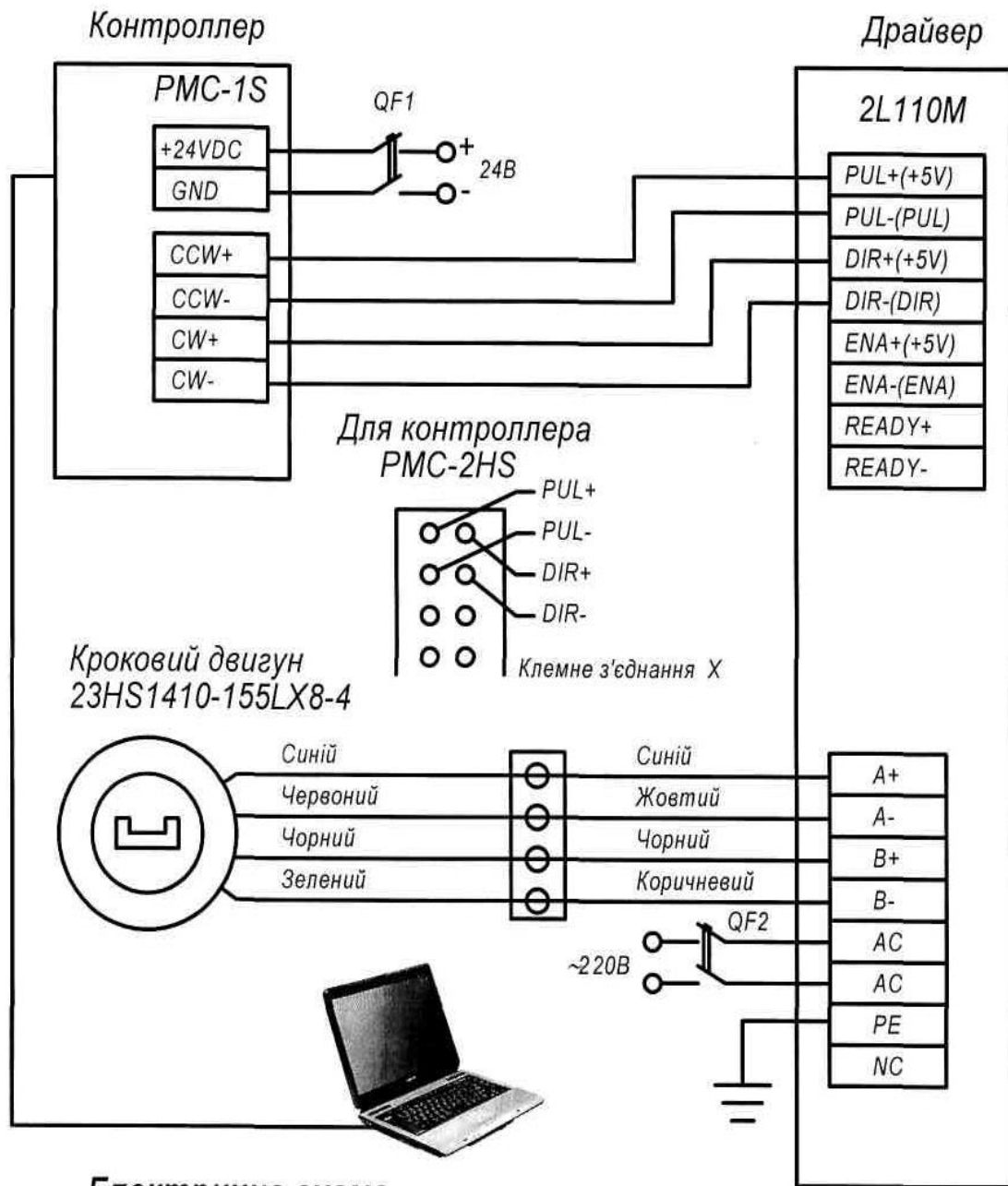
Переваги використання контролерів для крокового двигуна:

1. Можливість підключення до комп'ютера.
2. Багаторазове перепрограмування. Зараз досить купити тільки один контролер крокового двигуна. При цьому при переорієнтації виробництва або розширення переліку завдань його можна перепрограмувати для виконання нових функцій.
3. Широкий модельний ряд контролерів як вітчизняних, так і зарубіжних виробників дозволяє купити контролер крокового двигуна з розширеними функціями. Контролери з розширеними функціями мають у своєму складі програмований логічний контролер (привод працює в автономному режимі за записаною в нього програмі, що дозволяє отримати готовий пристрій для виконання певного технологічного процесу на основі одного лише контролера крокового двигуна).

Пристрої керування кроковими двигунами можуть функціонувати як on-line (тобто за командами комп'ютера) так і off-line (за допомогою програми з зовнішнього пристрою, наприклад, флеш-накопичувача). Застосовується також суміщений режим (він особливо вигідний при управлінні однаковими процесами з мінливими параметрами, управлінні контрольними процедурами та опитуванні параметрів, здійснюваному з комп'ютера).

Вказівки щодо виконання роботи

Скласти електричну схему електропривода (рис. 4.4), який складається з крокового двигуна 23HS1410-155LX8-4 (табл. 4.1, рис. 4.5), силового драйвера 2L110M (рис. 4.6) та контролера PMC-2HS (рис. 4.7).



Електрична схема керування кроковим двигуном

ENA - блокування роботи при надходженні нульового сигналу; READY - вихід

Рис. 4.4. Схема електропривода з кроковим двигуном

Таблиця 4.1

Технічні характеристики крокового двигуна 23HS1410-155LX8-4

Тип	Крок, град./мм	Довжи- на, мм	I_{ϕ} , А	R_{ϕ} , Ом	L_{ϕ} , мГн	M , Н·см	J , г·см ²	К-сть виводів	Маса, кг
23HS1410- 155LX8-4	1,8/0,04	100	4,2	0,8	3,0	250	680	4	1,45

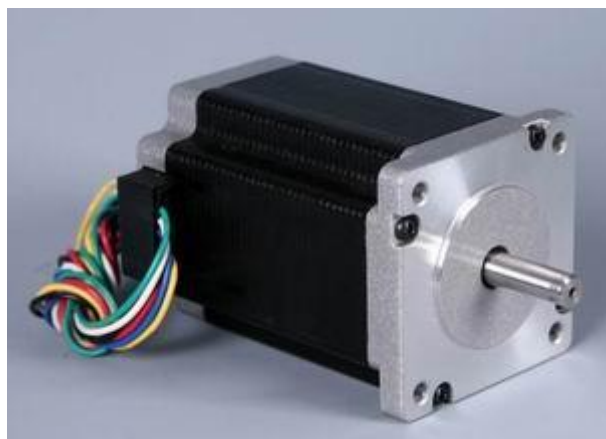


Рис. 4.5. Зовнішній вигляд
крокових двигунів різного виконання

Основні характеристики силового драйвера моделі 1L110M.

Мікрокрок, імп./оберт: 400, 500, 600, 800, 1000, 1200, 1600, 2000, 2400,
3200, 4000, 5000, 6000, 6400, 8000, 10000 (16 варіантів).

Піковий струм - 7,8 А.

Напруга живлення - ~80-220 В.

Захист від перенапруги, короткого замикання, перевантаження.

Автоматичне зниження струму холостого ходу.

Забезпечує захист від радіоперешкод.

Низький рівень шуму.



Рис. 4.6. Загальний вигляд силового драйвера 2L110M

Налаштування роботи контролера проводять за допомогою комп'ютера. Для цього запускають стартове вікно (головний екран) програми (рис. 4.8) та вводять параметри у вікні редагування програми.

Контролер типу PMC-1HS можна програмувати максимально в 64 регістри (REG 0-63), типу PMC-2HS має можливість налаштувань як по вісі X, так і по вісі Y.

Головний екран програмного забезпечення Motion Controller.

Запустіть програму роботи для відображення головного екрана. На цьому екрані можна виконати:

1) ручне керування по осям "X" або "Y" (сканування, безперервний рух і рух у задане положення);

- 2) виконання процедури пошуку нульової мітки, керування по індексах і виконання програми переміщення;
- 3) збереження і відкриття файлів режимів роботи, файлів параметрів і програм.

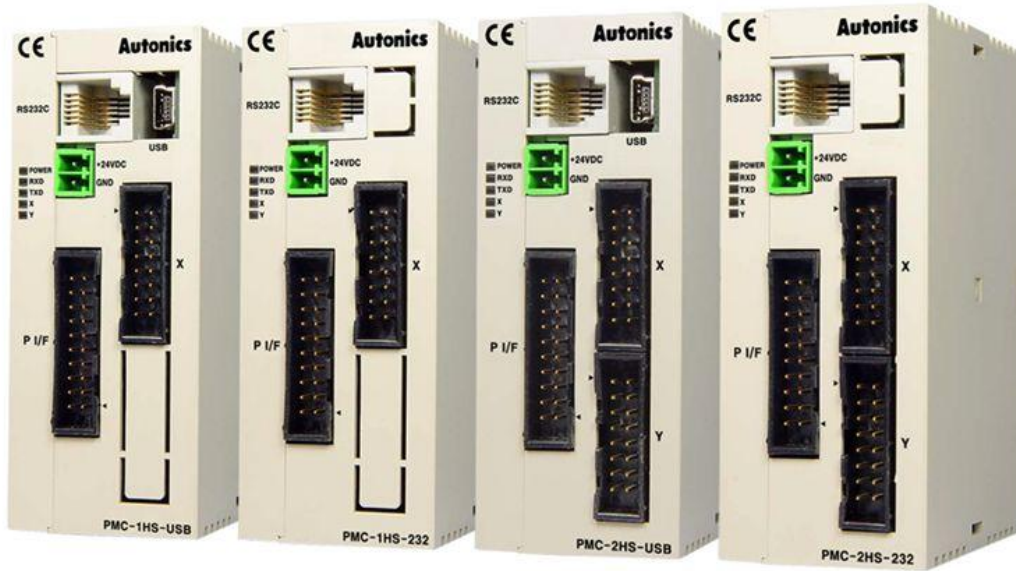


Рис. 4.7. Контролери типу PMC для крокового двигуна 23HS

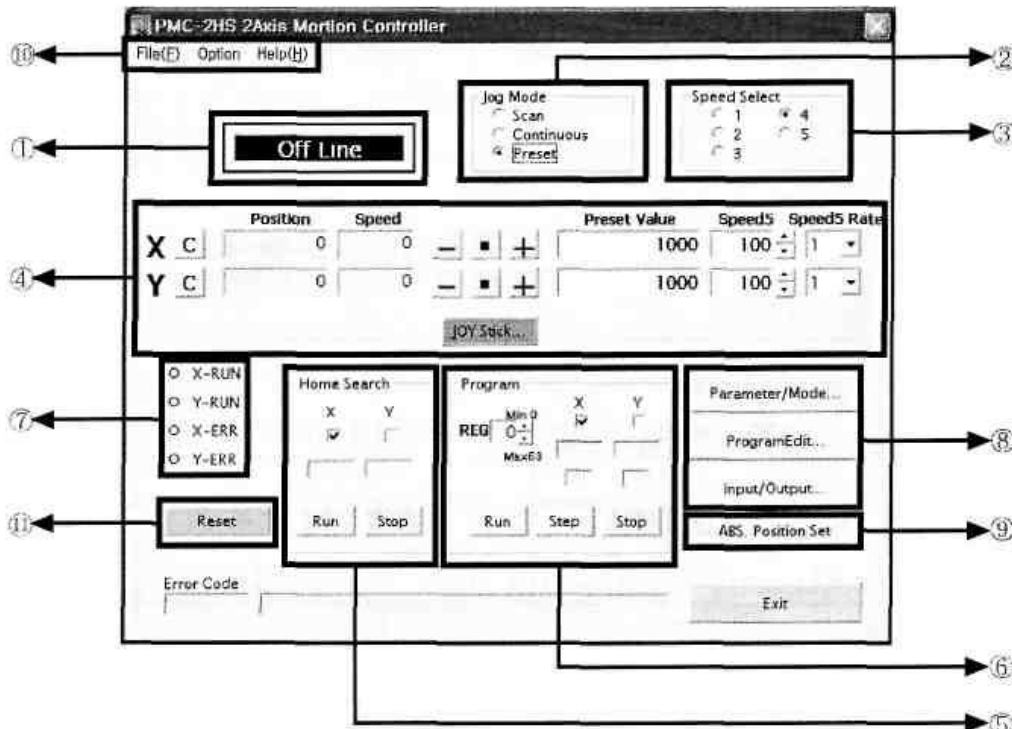


Рис. 4.8. Головний екран програмування контролера

1. Стан підключення приладу до ПК.

Якщо на головному екрані відображається он-лайн режим, програма з'єднана з контролером і послідовно з силовим драйвером та кроковим двигуном.

В автономному ж режимі off-лайн навіть на не з'єднаному з основним приладом комп'ютері можна написати програму роботи.

В автономному режимі в меню "File" можна переглядати файли з жорсткого диска за допомогою команди "Open" або зберегти письмову програму за допомогою команди "Save".

2. Вибір ручного JOG режиму керування.

Керувати JOG на головному екрані можна трьома способами:

Дисплей	Операція	Опис дії
Scan Сканування	Сканування	Рух тільки при натисканні кнопки "Напрямок"
Continuous Безперервний рух	Безперервний	Рух почнеться, коли натиснете кнопку "Напрямок" і триватиме, доти не натиснете кнопку зупинки
Preset Рух у задане положення	Рух у задане положення	Переміщується у задане положення при натисненій кнопці "Напрямок"

3. Вибір швидкості приводу.

За цією функцією вибирається швидкість приводу в ручному режимі керування. Швидкості 1-4 визначаються у вікні параметрів. Швидкість 5 задається у головному вікні програмного середовища. Швидкість 5 може бути змінена в процесі руху.

4. Робота в ручному режимі керування.

Дисплей	Операції
"+" кнопка	Рух в напрямку "+".
"-" кнопка	Рух в напрямку "-".
<input type="checkbox"/> кнопка	Зупинка руху.
Preset value Попередньо встановлене значення	Налаштовує величину переміщення у режимі "Рух у задане положення". На значення заданого положення впливає функція масштабування та визначається масштабом чисельника у конфігурації параметрів.

Speed 5 Швидкість 5	Настроює значення швидкості 5. Діапазон значень 1-8000. Якщо натиснути на кнопку збільшення/зменшення ($\Delta\nabla$), значення конфігурації збільшується або зменшується в залежності від вибору напрямку зміни швидкості. Фактична швидкість імпульсу приводу визначається цим значенням, помноженим на множник швидкості (див. конфігурацію параметрів). Вибране значення швидкості 5 може бути змінена під час руху відповідно до зміни сконфігурованого значення.
Speed 5 Rate Темп зміни швидкості 5	Визначає величину приросту швидкості 5. Якщо вибране число 10, значення швидкості 5 збільшується/зменшується на стільки разів, скільки зроблено натиснень кнопки збільшення/зменшення ($\Delta\nabla$).
Position Положення	Показує поточну позицію. Є не активним при виконанні команди "Пошук нульової точки при вмиканні живлення". Якщо виконується процедура пошуку нульової точки, у вікні відображається нуль. Якщо натиснути на кнопку обнуління положення (кнопка С), можна очистити поточну позицію в будь-якому положенні. На це значення впливає функція масштабування (див. пункт масштабування чисельника імпульсів в конфігурації параметрів).
Speed	Показує поточну швидкість у русі
С кнопка	Переводить значення "Положення" (поточний стан) у нуль.

■ JOY Stick джойстик

Якщо натиснути на кнопку джойстика на головному екрані, відкриється наступне вікно (рис. 4.9). У джойстику можна вільно налаштувати переміщення як окремо по осях з кнопок X +, X-, Y + і Y-, так і по осях X і Y одночасно з кнопок XY.

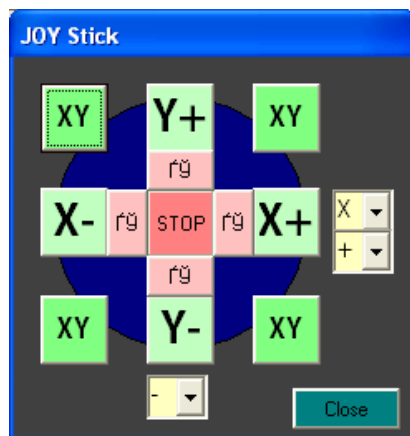


Рис. 4.9 Вікно джойстика

5. Виконання процедури пошуку нульової точки.

Ця функція виконує пошук нульової точки для кожної осі переміщення.

Вибір режиму процедури пошуку або швидкості пошуку здійснюється у вікні налагоджень параметрів і режиму роботи:

Display	Operation
X, Y	Вибирає вісь, по якій здійснюється пошук нульової точки
Run (старт)	Запускає процедуру пошуку
Stop	Зупиняє процедуру пошуку

6. Виконання програми.

Ця функція виконує програму. Програма повинна бути написана на екрані "Program Edit" (редагування програми), а параметри окремих елементів налаштовані на екрані "Parameter/Mode" (параметр і режим роботи):

Display	Operation
REG	Налаштовує стартовий номер регістра.
X, Y	Вибирає вісь для виконання.
Run	Запуск програми з налаштованого регістра.
Step	Виконує тільки команди з вибраних номерів регістрів (доступні тільки команди ABC, INC, HOM, OUT, OTP).
Stop	Якщо натиснути цю кнопку "Stop" після натискання кнопки "Run", виконання поточної команди припиниться. Щоб закрити програму, треба натиснути кнопку "Stop" ще раз. Якщо натиснути кнопку "Run", програма почне виконуватися з регістра REG.

[Увага] Не змінюйте програму, параметр або режим, коли програма запущена.

7. Відображення стану привода.

Display	Operation
n-RUN	Горить LED, коли по відповідній вісі виконується переміщення або запущена програма.
n-ERR	Загоряється LED, коли перевищено програмну або апаратну межу переміщення. Коли виникає помилка, в нижній частині головного екрана відображається повідомлення про неї (табл. 4.2).

Таблиця 4.2

Перелік та опис помилок

Код помилки	Повідомлення про помилку	Опис
208	SOFTWARE LIMIT + ERROR	Виникла помилка «SOFTWARE LIMIT+». В процесі роботи вал двигуна перемістився за межу, що визначається змінною SOFTWARE LIMIT+ у прямому напрямку.

209	SOFTWARE LIMIT - ERROR	Виникла помилка «SOFTWARE LIMIT-». В процесі роботи вал двигуна перемістився за межу, що визначається змінною SOFTWARE LIMIT- у зворотному напрямку.
210	HARDWARE LIMIT + ERROR	Активний рівень сигналу nLMT+. Спрацював аварійний кінцевий вимикач, під'єднаний до дискретного входу nLMT+.
211	HARDWARE LIMIT - ERROR	Активний рівень сигналу nLMT-. Спрацював аварійний кінцевий вимикач, під'єднаний до дискретного входу nLMT-.
212	ALARM ERROR	Активний сигнал nALARM виник під час роботи приводу. Спрацював аварійний вихід драйвера для крокового двигуна, що під'єднаний до дискретного входу nALARM.
213	EMG ERROR	Низький рівень сигналу EMG (підключення до GEX). На дискретний вхід EMG надійшов сигнал аварійної зупинки. Забезпечує аварійне вимикання імпульсів керування незалежно від заданої програми.
214	PROGRAM ERROR	Помилка виконання програми. Під час виконання програми виникла помилка. Слід перевірити відсутність порожніх полів програми та наявність команди закінчення програми END.
215	HOME ERROR	Помилка виконання процедури пошуку Home. Під час виконання процедури пошуку Home не спрацювали відповідні кінцеві вимикачі нульової мітки або невірно задані параметри пошуку.
401	Break signal was received	Отримано сигнал зупинки. При виникненні внутрішньої помилки контролер формує команду на вимикання імпульсів керування.
402	Frame error	Помилка кадру виконання програми. При внутрішній помилці під час виконання певного кадру програми контролер формує цю помилку.
403	Port Overrun error	Помилка переповнення порту. Виникає при наявності перешкод в роботі з підключеною панеллю керування та несправності контролера.
404	Recive buffer Overflow	Отримано повідомлення про переповнення буферу даних. Виникає при наявності перешкод в роботі з підключеною панеллю керування та несправності контролера.
405	Parity error	Помилка контролю парності. Виникає при наявності перешкод в роботі з підключеною панеллю керування та несправності контролера.
406	Send buffer Full	Буфер відправки даних заповнений. Виникає при наявності перешкод в роботі з підключеною панеллю керування та несправності контролера.
407	Device control block of Port was	Несподіване повідомлення щодо виникнення помилки порту блоку керування приладом (БКП).

	received	Можливе виникнення при несправності контролера.
408	There is no response	Немає відповіді на команду. Виникає при наявності перешкод в роботі з підключеною панеллю керування та несправності контролера.
501	X Axis is already driving now	Отримана команда запуску осі X при вже запущеній X. Надійшов передній фронт дискретного входу X Axis при вже запущеній програмі переміщення приводу по осі X.
502	Y Axis is already driving now	Отримана команда запуску осі Y при вже запущеній Y. Надійшов передній фронт дискретного входу Y Axis при вже запущеній програмі переміщення приводу по осі Y.
503	Please select Axis	Було запущено процедуру пошуку Home або виконання програми без вибору якоїсь осі на основному екрані. Не повністю введено дані для процедури пошуку Home.
504	Please input number from 0-63 for REG	Було введено значення, що відрізняється від 0-63 в полі REG.
505	Please input number	Не було введено значення переміщення.
506	Please input number within the limits	Не було введено значення переміщення, що знаходиться в допустимих межах. Введено задане значення переміщення, що виходить за межі значень SOFTWARE LIMIT- і SOFTWARE LIMIT+.

8. Відкриття вікон редагування параметрів та програми

Display	Operation
Parameter/Mode	Запускає екран редагування параметрів і режиму.
Program Edit	Запускає екран редагування програми.
Input/Output	Запускає екран відображення сигналів ввходів/виводів

9. Реєстрація поточного положення

Дозволяє записувати команду переміщення ABS у поточне положення в номер реєстру у вікні (6). Дані записуються тільки для осі, вибраної у вікні програми переміщення.

- Швидкість приводу встановлюється згідно зі значенням, вибраним у вікні "Вибрана швидкість приводу (3)". Слід пам'ятати, якщо вибрана швидкість 5, то в команді ABS встановлюється швидкість 4.
- Параметри TIM і END.P встановлюються у нульові значення.

- Якщо натиснута клавіша «Реєстрація поточного положення», то в «Виконання програми (6)» записується команда ABS, а число REG збільшується на одиницю.

10. Конфігурація управління файлами і зв'язок з ПК.

Меню File має функції, перераховані в таблиці нижче. Дані, що можуть бути передані, складаються з вікна параметрів і режиму роботи, а також вікна виконавчої програми. При передачі даних до приладу можуть бути відправлені всі дані разом або вибірккові дані.

File menu	Function	Description
Open	Відкриття файлу	Дані зчитуються з файлу на диску. Дані відкритого файлу записуються в прилад у стані он-лайн. Ім'я розширення файлу даних є *.nvd.
Save	Збереження файлу	Дані зберігаються в диску разом з його ім'ям. Ім'я розширення файлу даних є *.nvd.
Upload Завантажити	Читання з PMC-1HS/PMC-2HS	Дані зчитуються з основного корпусу. Всі дані Програма-Всі дані програми Програма-вісі X Дані програми на вісі X Програма-вісі Y Дані програми на вісі Y. Параметр-Всі Всі параметр/режим Параметр-вісі X Параметр/режим на вісі X Параметр-вісі Y Параметр/режим на вісі Y [Увага!] Якщо виконавча програма почалася в режимі он-лайн, зчитування даних відбувається автоматично.
Download	Додати в PMC-1HS/PMC-2HS	Дані додаються до основного корпусу. Всі дані Програма-Всі дані програми Програма-вісі X Дані програми на вісі X Програма-вісі Y Дані програми на вісі Y. Параметр-Всі Всі параметр/режим Параметр-вісі X Параметр/режим на вісі X Параметр-вісі Y Параметр/режим на вісі Y [Увага!] Якщо дані додані або змінені на екрані параметр/режим або екрані редагування програми в он-лайн, вони автоматично передаються в прилад. Таким чином, додаткового завантаження даних не потрібно.

У меню Option можна визначити послідовний комунікаційний порт та швидкість передачі даних. Можливий послідовний порт зв'язку, що може бути використаний, відображається в переліку COM-

портів. Для зв'язку необхідно помітити COM-порт, до якого приєднаний прилад.

Якщо використовується USB-зв'язок необхідно вибрати: "Мій комп'ютер → Властивості (натиснути праву кнопку миші) → Комплектуючі → Диспетчер пристроїв" та перевірити номер COM-порт, який буде визначено, наприклад, як "Prolific USB-to-Serial Comm Port" в переліку портів (COM і LPT). Швидкість передачі даних має діапазон від 9600 до 115200 біт (імп/с). Значення за замовчуванням 9600 біт. Швидкість передачі даних в основному забезпечує швидкий відгук від приладу, проте є вірогідність отримати вплив шуму при з'єднанні. Меню Help вказує версію приладу або програми роботи. Верхній напис і нижній напис вказують версії апаратного і програмного забезпечення відповідно.

11. Перезавантаження приладу

Ця функція використовується для перезавантаження PMC-1HS/PMC-2HS.

Налаштування параметрів керування

Натиснути кнопку "Parameter/Mode" на головному екрані (рис. 4.8), а потім на вкладці (рис. 4.10) натиснути "Parameter" для активації параметрів екрану.

The screenshot shows a window titled "PMC 2HS Parameter/Mode" with three tabs: "Mode", "Parameter", and "Home Search Mode". The "Parameter" tab is active, displaying a table of parameters for X and Y axes. A "Range of Value" box on the right indicates a range of 1 to 500. At the bottom, there are "On Line" and "Close" buttons.

	Xaxis	Yaxis
Speed Multiplier	10	10
Acceleration Rate	400	400
Deceleration Rate	400	400
Start Speed	50	50
Drive Speed 1	10	10
Drive Speed 2	100	100
Drive Speed 3	1,000	1,000
Drive Speed 4	8,000	8,000
Post Timer 1	1,000	1,000
Post Timer 2	2,000	2,000
Post Timer 3	3,000	3,000
Home Search Low Speed	1,000	1,000
Home Search High Speed	1,001	1,001
Home Search Offset	1,000	1,000
Soft Ware Limit +	1,000,000	1,000,000
Soft Ware Limit -	-1,000,000	-1,000,000
End Pulse Width(msec)	1,000	1,000
Pulse Scale Numerator	1,000	1,000
Pulse Scale Denominator	1,000	1,000

Рис. 4.10. Параметри керування

Таблиця 4.3

Діапазон налаштування параметрів

Display <i>Параметри</i>	Setting range <i>Діапазон налаштування</i>	Default value <i>Значення за замовчуванням</i>
Speed Multiplier <i>Множник швидкості</i>	1 – 500	10
Acceleration Rate <i>Темп прискорення П</i>	1 – 8000	400
Deceleration Rate <i>Темп уповільнення У</i>	1 – 8000	400
Start Speed SV <i>Стартова швидкість SV</i>	1 – 8000	50
Drive Speed V1 <i>Швидкість V1</i>	1 – 8000	10
Drive Speed V2 <i>Швидкість V2</i>	1 – 8000	100
Drive Speed V3 <i>Швидкість V3</i>	1 – 8000	1000
Drive Speed V4 <i>Швидкість V4</i>	1 – 8000	8000
Post Timer 1 <i>Таймер 1</i>	1 – 65535	10
Post Timer 2 <i>Таймер 2</i>	1 – 65535	100
Post Timer 3 <i>Таймер 3</i>	1 – 65535	1000
Home Search Low Speed <i>Пошук нульової точки на низькій швидкості</i>	1 – 8000	20
Home Search High Speed <i>Пошук нульової точки на високій швидкості</i>	1 – 8000	1000
Home Search Offset <i>Зміщення відносно нульової точки</i>	-8388608 – +8388607	+100
Software Limit + <i>Програмне обмеження у напрямку "+"</i>	-8388608 – +8388607	+8388607
Software Limit - <i>Програмне обмеження у напрямку "-"</i>	-8388608 – +8388607	-8388607
End Pulse Width <i>Тривалість імпульсу закінчення програми</i>	1 – 65535(мілісекунд)	100

Pulse Scale Numerator <i>Чисельник параметрів імпульсів</i>	1 – 65535	1000
Pulse Scale Denominator <i>Знаменник параметрів імпульсів</i>	1 – 65535	1000

Коментарі до табл. 4.3.

Множник швидкості є параметр для збільшення значень руху, таких як швидкість, прискорення/уповільнення.

Параметри швидкості, такі як швидкість привода, темп прискорення/уповільнення задаються у межах 1..8000. При необхідності використання значення, що виходить за ці межі, використовується множник швидкості. При збільшенні множника швидкості двигун працює на вищій швидкості, але зменшується роздільна здатність завдання. Необхідно задати мінімальне значення множника для отримання діапазону зміни швидкості двигуна.

Темп прискорення є параметр, який визначає прискорення швидкості.

Для темпу гальмування в режимі настройки встановлюють значення за замовчуванням, тобто використовують встановлений рівень прискорення і для гальмування.

$$\text{Фактичний темп прискорення (імп/с)} = P \times 125 \times \text{Множник швидкості}$$

P – налаштоване значення прискорення, задане в параметрі "Acceleration Rate".

Щоб запустити привод з встановленою швидкістю, потрібно налаштувати чотири швидкісних параметри: початкову швидкість привода, робочу швидкість привода, темпи прискорення та уповільнення. **Увага!**: не потрібно налаштовувати темп уповільнення привода, в якому темп уповільнення виставлений рівним темпу прискорення.

Наприклад, якщо ви хочете запустити привод за 0,3 с від початку 500 імп/с до швидкості руху 20000 імп/с, налаштуйте швидкісні параметри таким чином:

$$\text{Фактичний темп прискорення (імп/с)} = (20000 - 500) / 0,3 = 65000 \text{ (імп/с)}.$$

Якщо множник швидкості 10, тоді:

налаштуйте в параметрі «Acceleration Rate»

значення прискорення

$$P = 65000 / (125 \times 10) = 52;$$

стартова швидкість (запуску) $SV = 500/10 = 50$;
значення швидкості руху привода $V = 20000/10 = 2000$.

Темп уповільнення є параметром, який вказують таким, як і темп прискорення.

Фактичний темп уповільнення (імн/с) = $U \times 125$ множник швидкості

U – налаштоване значення уповільнення, що задається в параметрі "Deceleration Rate".

Оскільки за замовчуванням задане значення розгону використовують і в режимі гальмування, співмірність встановлюваних швидкостей залишається такою ж. Для асиметричної роботи привода з регульованою швидкістю налаштуйте значення режиму уповільнення на гальмування.

Стартова швидкість це швидкість запуску привода з встановленою швидкістю або кінцева швидкість.

Фактична початкова швидкість є добуток стартової швидкості (SV) на множник швидкості:

Фактична початкова швидкість (імн/с) = SV множник швидкості.

Якщо встановлена швидкість руху більша, ніж початкова, привод працює з регульованою швидкістю. У цьому випадку потрібно налаштувати параметри швидкості. Якщо встановлена швидкість руху менша, ніж стартова, привод буде працювати на встановленій швидкості без регулювання. Пошук домашньої точки на високій швидкості проводиться таким же чином.

Швидкість V1–4 є швидкість руху привода з відповідно встановленою швидкістю.

Чотири значення швидкості для обох осей. Для руху виберіть одну з чотирьох швидкостей. Фактична швидкість привода є добуток швидкості V на множник швидкості:

Фактична швидкість руху (імн/с) = V множник швидкості

Якщо встановлена швидкість руху більша, ніж початкова, привод працює з регульованою швидкістю. У цьому випадку потрібно налаштувати параметри швидкості. Якщо встановлена швидкість руху менша, ніж стартова, привод буде працювати на встановленій швидкості без регулювання. Пошук домашньої точки на високій швидкості проводиться таким же чином.

Таймер 1–3 вказує час очікування для запуску наступної команди після виконання команд ABS або INC.

Пошук нульової (початкової, домашньої) точки на низькій швидкості – налаштування швидкості пошуку заданої початкової точки.

Пошук нульової точки на низькій швидкості налаштовує швидкість пошуку на кроках 2 і 3 процедури пошуку.

Процедура пошуку проводиться на кроках 1 (швидкий рух) і 2 (низький рух) рух в один бік та на низьких швидкостях 3 і 4 в інший бік.

Фактична швидкість приводу – це добуток встановленої величини на множник швидкості.

Фактична швидкість

пошуку нульової точки на низькій швидкості (імп./с) = встановлене значення x множник швидкості

Зверніть увагу! Пошук нульової точки на низькій швидкості: швидкість налаштовується меншою, ніж початкова швидкість.

Пошук на високій швидкості нульової точки налаштовує швидкість пошуку на кроках 1 і 4 процедури пошуку.

Фактична швидкість приводу - це значення добутку встановленої величини на множник швидкості.

Фактична швидкість

пошук нульової точки на високій швидкості (імп./с) = встановлене значення x множник швидкості

Пошук нульової точки на високій швидкості: швидкість налаштовується більшою, ніж початкова швидкості.

Зміщення відносно нульової точки – налаштовує кількість імпульсів переміщення після проведення процедури пошуку. Якщо значення дорівнює нулю, переміщення не відбувається.

Задане значення пов'язане з чисельником/знаменником діапазону імпульсів.

Вищезазначений діапазон імпульсів може бути отриманий при співвідношенні чисельник/знаменник = 1000/1000.

Програмне обмеження у напрямку "+" – налаштовує значення програмного забезпечення межі в прямому напрямку.

Задане значення пов'язане з чисельником/знаменником діапазону імпульсів.

Вищезазначений діапазон імпульсів може бути отриманий при співвідношенні чисельник/знаменник = 1000/1000.

Значення активується в режимі конфігурування виставленням значення "Enable" в параметрі "Software Limit +"

Програмне обмеження у напрямку "-" – налаштовує значення програмного забезпечення межі у зворотному напрямку.

Задане значення пов'язане з чисельником/знаменником діапазону імпульсів.

Вищезазначений діапазон імпульсів може бути отриманий при співвідношенні чисельник/знаменник = 1000/1000.

Значення активується в режимі конфігурування виставленням значення «Увімкнути» в параметрі "Software Limit –".

Тривалість імпульсу закінчення програми. Коли закінчується переміщення, параметр "End Pulse Width" визначає тривалість кінцевого імпульсу на виході nDrive/END (24 В на виходах "+"14 та "-"15 відносно виходу 19).

Вмикання кінцевого імпульсу активують за допомогою установки "Drive End Pulse" в режимі конфігурації "Увімкнути".

Чисельник параметрів імпульсів – здійснює масштабування даних про місцезнаходження робочого органу.

Чисельник параметрів імпульсів конвертує дані про місцезнаходження, які вводяться чи відображаються у значенні імпульсу. Ця функція дозволяє даним про місцезнаходження бути подані в мм або дюймах.

Наприклад, якщо 1 мм переміщення відповідають 5 імпульсів, то необхідно задати співвідношення "чисельник/знаменник" рівним 5/1 для завдання переміщення у міліметрах. Коли вхідне значення, що задається у основному вікні або у програмі дорівнює 10 мм, воно конвертується в 50 імпульсів і відображається у вікні поточного положення у вигляді 10,0. Якщо результат операції має десятковий дріб, відображений результат округляється до 1 імпульсу найближчого числа.

Це значення впливає на параметри, які знаходяться в:

Екран	Масштабування даних позиції
Головний екран	Позиція, задане значення
Екран параметрів	Ліміт програмного забезпечення зміщення допустимого пошуку +/-
Екран редагування програми	Локаційні дані ABS, INC команд

Знаменник параметрів імпульсів – здійснює масштабування даних про місцезнаходження.

Після установки параметрів необхідно їх записати в пам'ять контролера:

File → Download → Parameter → Xaxis.

Для роботи з програмою на головному екрані (рис. 4.8) натисніть Program Edit, у відкритому вікні відобразяться операції програми (рис. 4.11).

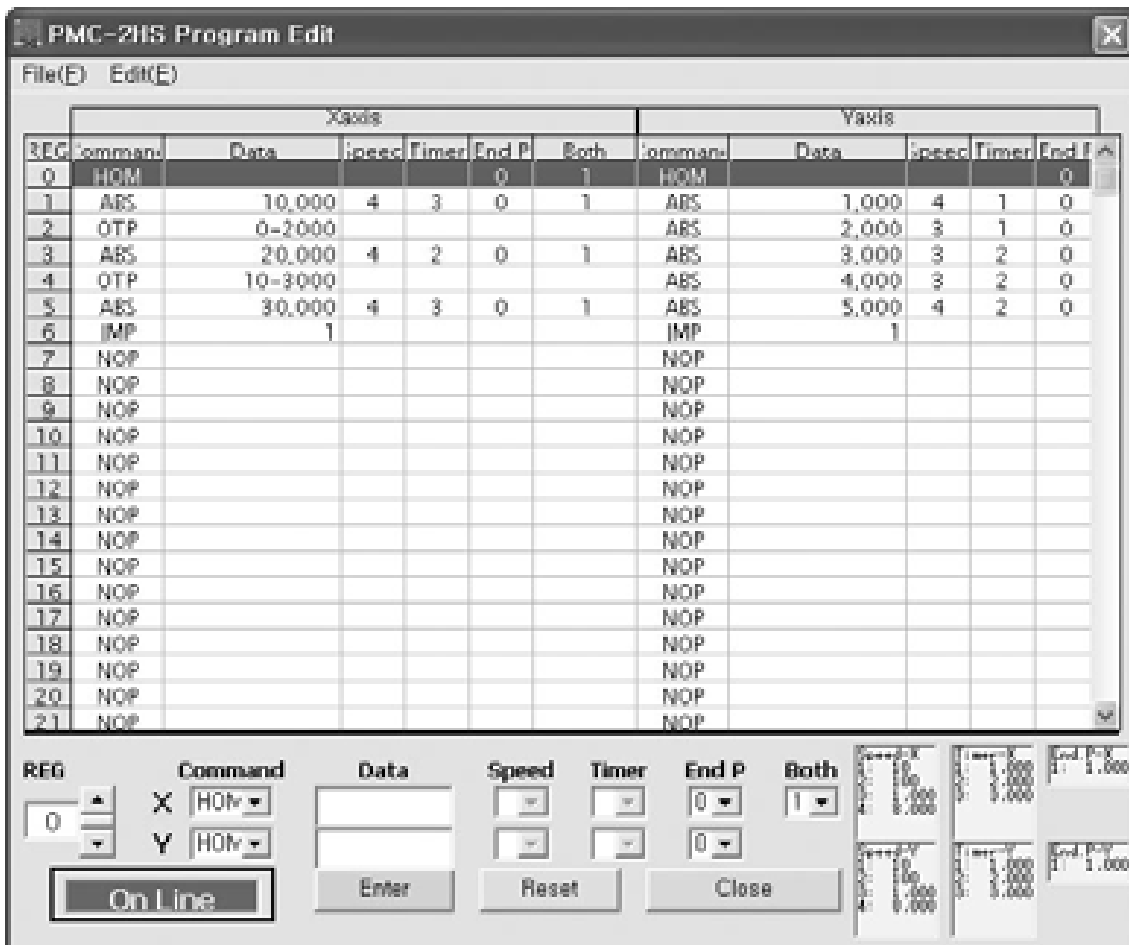


Рис. 4.11. Вікно операцій програми

В програмі є 12 команд (табл. 4.3).

Таблиця 4.3

Перелік команд для програмування контролера

Тип команди	Скорочене позначення (код)	Опис
Команди переміщення	ABS	Абсолютне переміщення
	INC	Відносне переміщення
	HOM	Процедура пошуку початкової точки
I/O Команди вмикання виходів	I/P	Умова вмикання переходу при спрацюванні дискретного входу
	OUT	Вмикання/вимикання виходу
	OTF	Формування імпульсу на виході
Команди управління програмою	JMP	Перехід до вказаного регістру
	REP	Початок повторення
	RPE	Кінець повторення
	END	Кінець програми
Інші команди	TIM	Таймер [мілісекунди]
	NOP	Немає операції

Опис програм до табл. 3.

ABS – перемістить у задане положення відносно нульової точки.

CMD	Data	SPD	TIM	END.P	Both
ABS	Абсолютне положення (-8388606 ~ +8388607)	1-4	0-3	0/1	0/1

Data: вказують значення абсолютного переміщення. Це значення може бути вказане у мм або дюймах, якщо імпульс чисельник/знаменник налаштований 1000/1000. Значення за замовчуванням рівне значенню імпульсу. Якщо мм чи дюйм, то необхідно вказувати розмірність в Data.

SPD: значення швидкості руху. Швидкостей може бути від 1 до 4, вибирається у вкладці конфігурування параметрів руху.

TIM: значення вказує час очікування до виконання дії наступного регістру (програми) після завершення руху. Діапазон значень TIM від 1 до 3 (згідно параметрів конфігурації). Якщо час очікування не вказаний, в цьому випадку значенню TIM присвоюється 0.

END.P: Якщо вказана 1, то при завершенні руху з nDRIVE/END (n=X або Y) порту паралельного підключення I/F надходить кінцевий імпульс. Такий імпульс повинен бути попередньо налаштований в параметрах конфігурації.

Both: Коли ABS працює тільки по вісі X, значення дорівнює 0. Коли ABS працює по осях X та Y і очікує зупинки, необхідно встановити значення 1. Дана функція застосовується тільки для ABS, INC та HOM при роботі по X-вісі. Якщо Both= 1, вісь Y з тим же числом регістрів повинна мати ті ж команди (ABS, INC та HOM) для переміщення по вісі X одночасно. Якщо команди відрізняються одна від одної, виникає помилка. Коли команди відповідають, а величина переміщення різна, то наступний регістр буде виконуватись при завершенні обох переміщень.

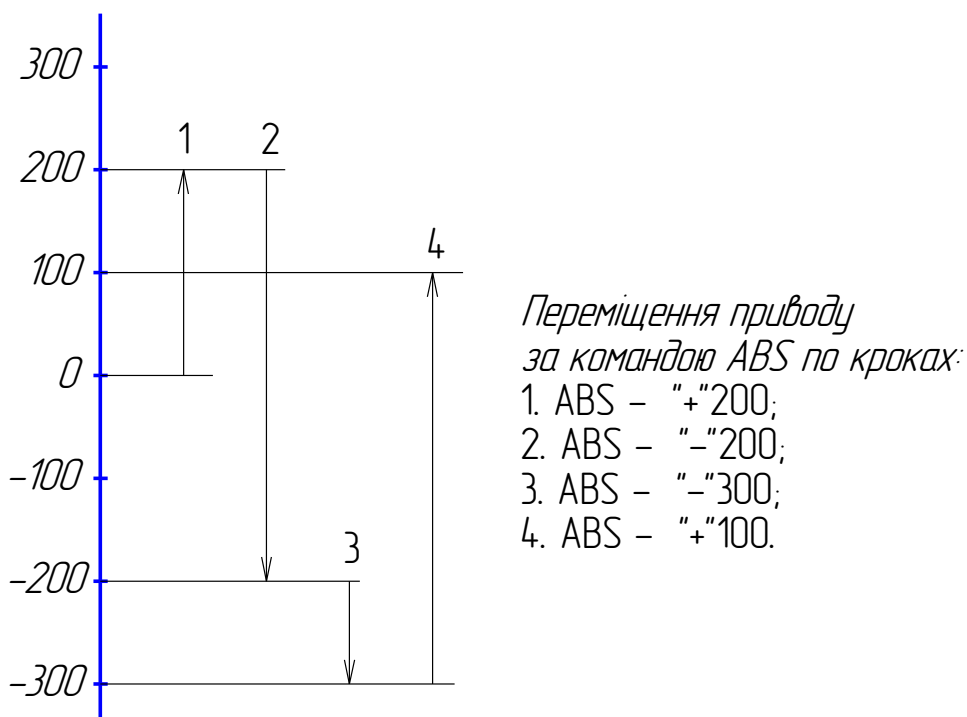


Рис. 4.12. Приклад переміщення приводу за командою ABS

INC: переміщення у задане положення відносно поточної точки знаходження приводу.

Параметри задаються аналогічно команді **ABS**.

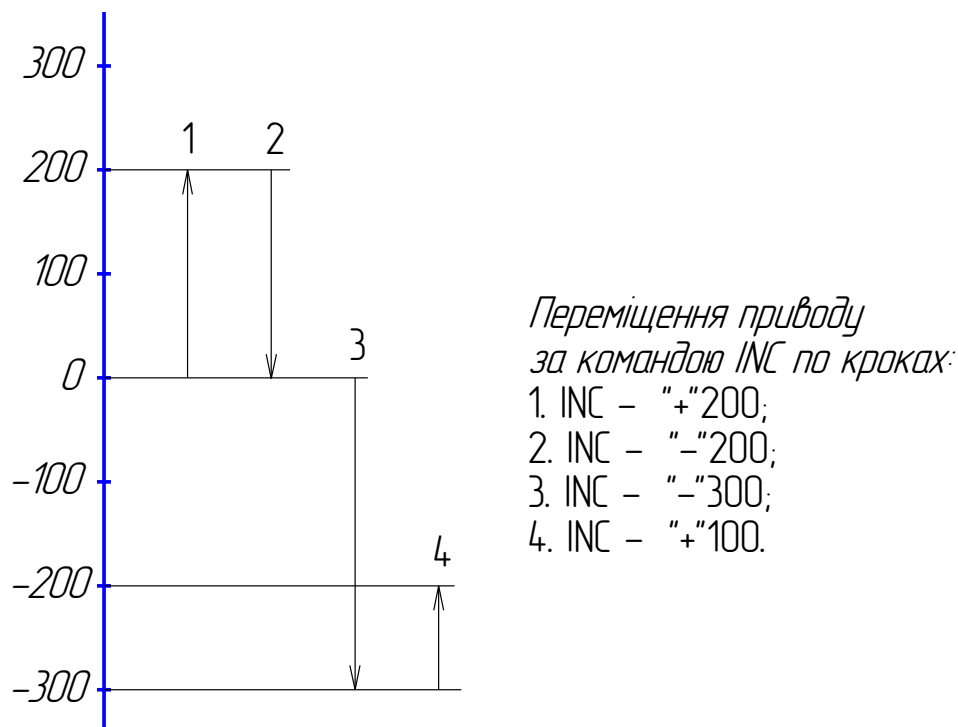


Рис. 4.13. Приклад переміщення приводу за командою INC

НОМ: процедура пошуку нульової точки. Відповідно до послідовності, налаштовується в режимі Home Search (конфігурація параметрів)

CMD	Data	SPD	TIM	END.P	Both
НОМ	-	-	-	0/1	0/1

Параметри END.P та Both налаштовують аналогічно команді ABS.

JMP: перехід до вказаного регістру. В процесі програмування в Data вказується номер регістру для переходу. Діапазон 0-63.

CMD	Data
JMP	Номер регістру для переходу

Якщо вказаний регістр буде менший регістра, де розміщений **JMP**, то програма буде працювати по колу.

REP: Початок повторення. Повтор виконання команд з наступного реєстру. Вказане число разів повторень відбудуватиметься до команди RPE "кінець повторень".

CMD	Data
REP	Кількість повторень

В процесі програмування в Data вказується кількість повторень. Діапазон 1-255. Команда RPE "Кінець повторень" повинна замикати в нижньому реєстрі (реєстраційний номер більший, ніж команда RPE). Повторення циклів можна налаштувати до трьох разів.

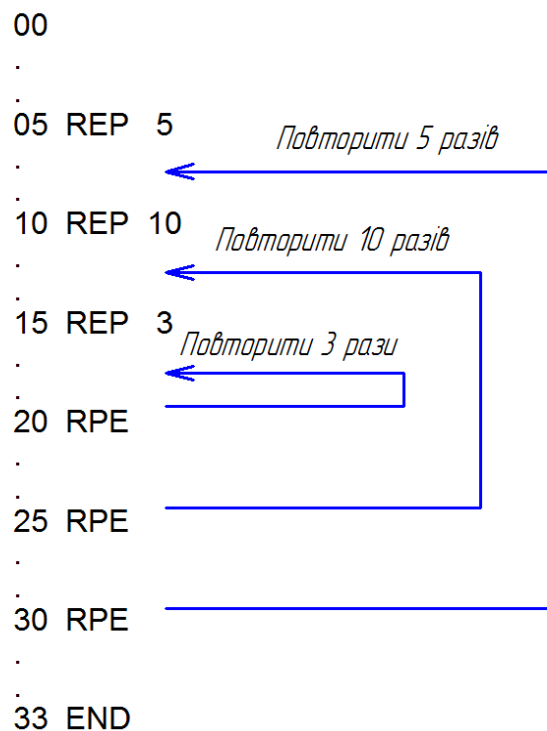


Рис. 4.14. Алгоритм роботи привода з циклом повторень

RPE: кінець повторення.

CMD	Data
RPE	-

END: кінець програми. Ця команда повинна бути записана в кінці програми.

CMD	Data
END	-

TIM: таймер. Привод знаходиться в режимі очікування до зазначеного часу. В процесі програмування в Data вказується час очікування. Діапазон 0-65535 мс.

CMD	Data
TIM	Час очікування

NOP: Пропуск регістра.

Після установки параметрів їх слід записати в пам'ять контролера:

File → Download → Program → Xaxis.

Після налаштування параметрів керування та алгоритму роботи привода випробувати його роботу в ручному і автоматичному режимах.

Оформити звіт про виконану роботу:

вказати номер, назву та програму виконання лабораторної роботи, навести головне вікно програмування контролера, параметри та основні команди для програмування роботи крокового двигуна.

Контрольні питання

1. Як працює кроковий двигун?
2. Які переваги крокового двигуна?
3. Які недоліки крокового двигуна?
4. Які прилади потрібні для роботи крокового двигуна?
5. Як створити мікрокроковий режим роботи крокового двигуна за допомогою силового драйвера?
6. Які переваги мікрокрокового керування кроковим двигуном?
7. Для чого призначений контролер?
8. Яке призначення силового драйвера?
9. Який захист виконує силовий драйвер?
10. Пояснити призначення команд головного екрану програмування контролера.
11. Назвати основні команди для програмування контролера та пояснити їх значення.

Практична робота №5РП

ОЗНАЙОМЛЕННЯ З КОМП'ЮТЕРНИМ МОДЕЛЮВАННЯМ ЕЛЕКТРОПРИВОДА В СИСТЕМІ MatLab

Програма роботи

1. Вступ.
2. Пакет MatLab.
3. Побудова моделей в системі MatLab.
4. Моделювання теплових режимів роботи електродвигуна.

Вступ

Електропривод є одним з найбільш енергоємних споживачів і перетворювачів електричної енергії. В зв'язку з цим питання підвищення коефіцієнта корисної дії електропривода з метою економії енергії є більш ніж актуальним. Вирішення цієї проблеми можливе шляхом узгодження вихідних параметрів електропривода з параметрами навантаження – це регулювання швидкості і моменту на виході електропривода.

Теорія регульованого електропривода існує не один десяток років і постійно вдосконалюється з вдосконалення конструктивних рішень. Особливо інтенсивний розвиток вона отримала після створення нових силових керованих напівпровідникових приладів, інтегральних схем, розвитку інформаційних технологій.

Володіння теорією в області регульованого електропривода є важливою складовою професійної підготовки і необхідністю спеціаліста даного профілю на ринку праці. Сьогодні досягнення такої мети можливе тільки при застосуванні нових форм навчання з використанням комп'ютерних технологій.

Реалізація комп'ютерних моделей для розгляду систем є задачею творчою. Основною проблемою дослідження стає адекватне використання прикладних програм для вирішення конкретної задачі. Тому поряд з обов'язковим вивченням фізичних процесів, які протікають в системах напівпровідникового електропривода, необхідно знати можливості і особливості прикладних пакетів моделювання.

В якості основного інструменту для вивчення електропривода взята система MatLab (матрична лабораторія) із своїми пакетами розширення (Toolboxes), основними з яких є Simulink і Power System Blockset.

Пакет MatLab

Перша версія пакету MatLab була розроблена більше 20 років тому. На даний час пакет має велику бібліотеку функцій (більше 800). Ті з них, які носять більш загальний характер, входять до складу ядра MatLab. Функції, специфічні для конкретної області, включені до склад додаткових розділів, які носять назву *toolboxes*. Наприклад, повна комплектація бібліотеки Simulink вміщує біля 30 розділів інструментарію. Нижче коротко наведені ті з них, які орієнтовані на дослідження і проектування електропривода з напівпровідниковими перетворювачами.

В бібліотеці Simulink (рис. 5.1, ліве поле) наводиться набір візуальних об'єктів, використовуючи які можна дослідити практично всяку систему автоматичного регулювання. Практично для всіх блоків є можливість настройки параметрів. Параметри настройки відображаються в панелі вікна настройки вибраного блоку. Кнопка Help на панелі вікна настройки відкриває детальну інформацію про блок і його параметри настройки.

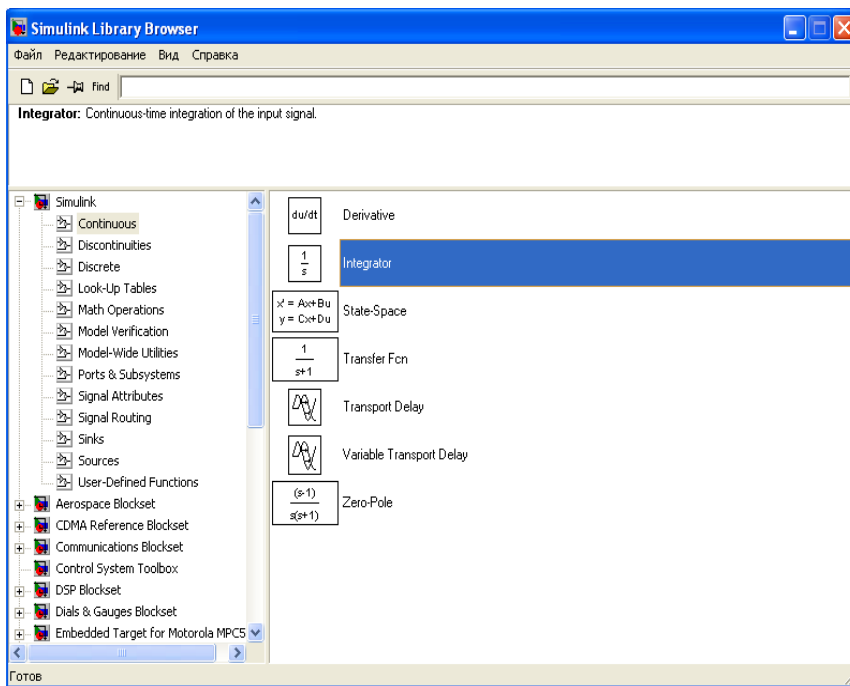


Рис. 5.1. Бібліотека Simulink і додаткові пакети

Вся бібліотека Simulink розбита на тринадцять розділів. Вміст виділеного розділу знаходиться в правому полі вікна бібліотеки (на

рисунку це розділ Continuous (Неперервні блоки), в якому, в свою чергу, виділений блок Integrator (Аналоговий інтегратор), опис якого знаходиться у верхньому полі).

Нижче при описі бібліотек буде наведена інформація тільки для тих блоків, які найчастіше використовуються при моделюванні електропривода.

Continuous (Неперервні блоки)

Неперервні блоки найбільш широко використовуються при моделюванні систем керування електроприводом. Основні з них:

Integrator – аналоговий інтегратор;

Derivate – ланка аналогового диференціювання;

Transfer Fcn – лінійна аналогова ланка, яка задана своєю передаточною функцією.

Вікно настройки блоку Integrator наведено на рис. 5.2, де задаються:

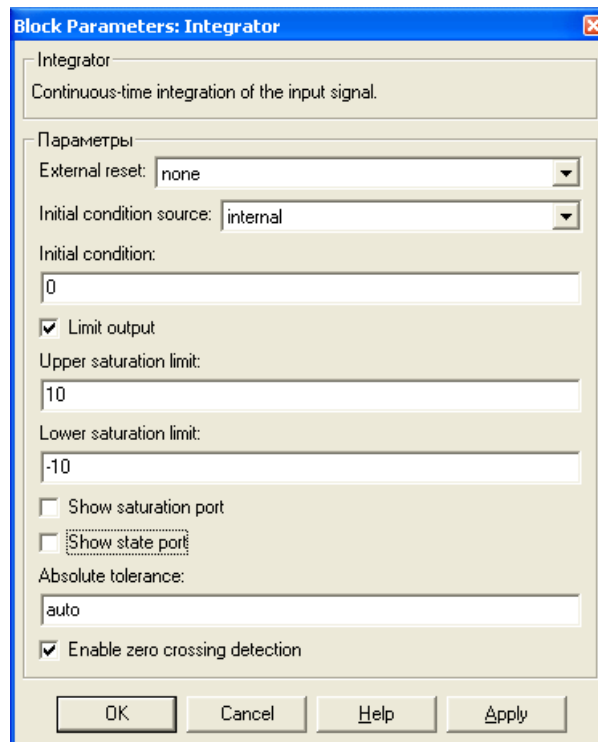


Рис. 5.2. Вікно настройки інтегратора

External reset – зовнішнє скидання напруги на виході інтегратора в нуль при наростанні або зменшенні сигналу;

Initial condition source – зовнішня установка початкових умов;

Limit output – обмеження вихідного сигналу;

Upper saturation limit – верхній рівень обмеження;
 Lower saturation limit – нижній рівень обмеження;
 Вікно настройки блоку Transfer Fcn наведено на рис. 5.3.

Передаточна функція лінійної ланки автоматичного регулювання в загальному вигляді записується так:

$$W(s) = \frac{a_m p^m + a_{m-1} p^{m-1} + \dots + a_1 p + a_0}{b_n p^n + b_{n-1} p^{n-1} + \dots + b_1 p + b_0}.$$

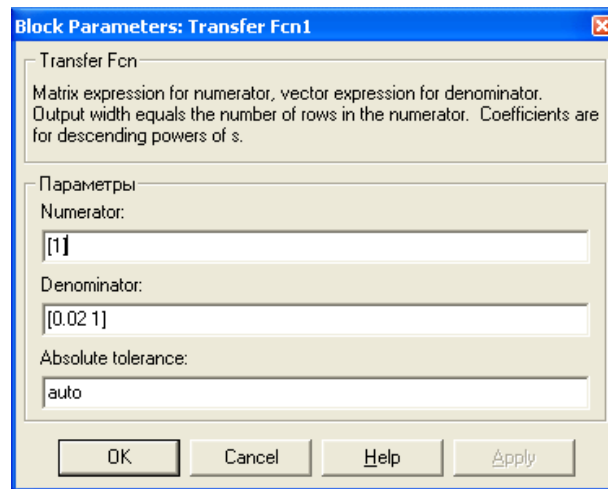


Рис. 5.3. Панель настройки Transfer Fcn

Коефіцієнт чисельника цієї функції a_i необхідно ввести в поле Numerator, розпочинаючи з коефіцієнта a_m при старшому показнику степеня. Аналогічно заповнюється поле знаменника передаточної функції Denominator, розпочинаючи з коефіцієнта b_n .

Math (Математичні функції)

Основні блоки бібліотеки Math:

Sum – аналоговий суматор, який дозволяє алгебраїчно додавати будь-яку кількість сигналів;

Product – формує на виході результат множення або ділення двох і більше вхідних сигналів. В настройці параметрів вказується число входів і вид виконання операції (рис. 5.4);

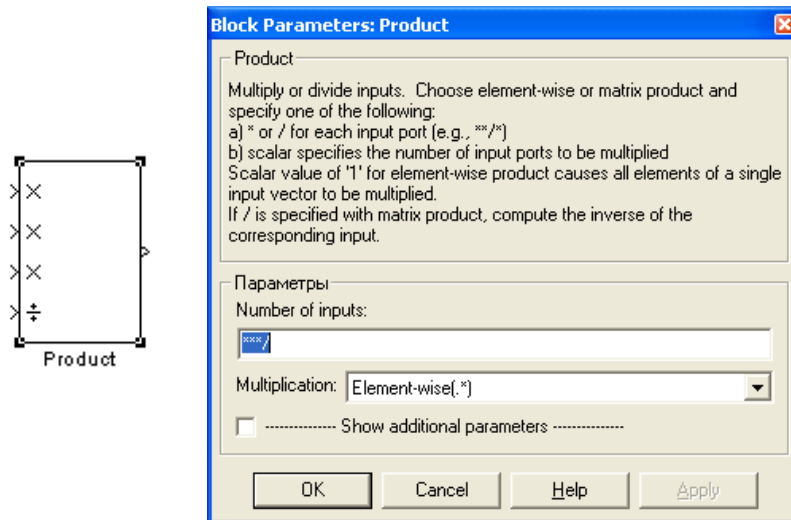


Рис. 5.4. Блок Product і вікно його настройки

Gain – аналоговий підсилювач;

Mat Function - Блок дозволяє вибрати одну із математичних функцій в полі настройки і включити її в модель.

Sinks (Віртуальні прилади для спостереження і реєстрації процесів)

До складу віртуальних приладів входять (рис.5.5):

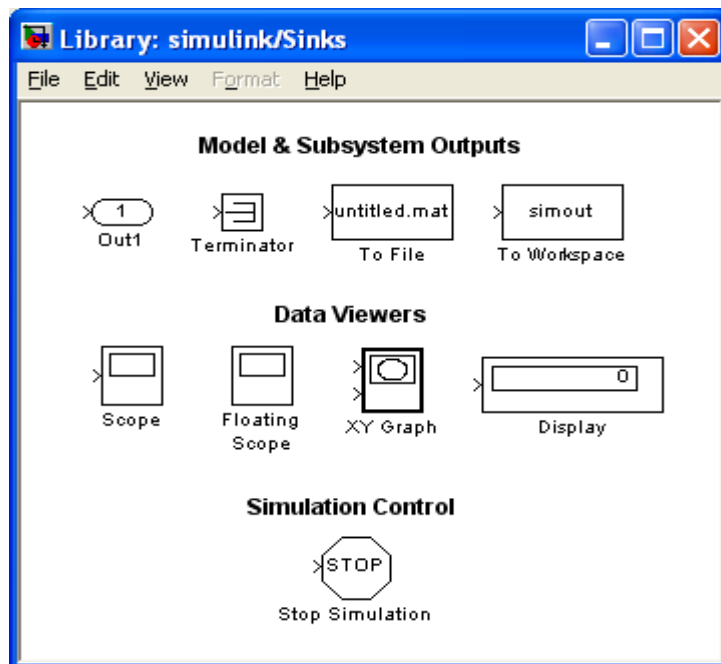


Рис. 5.5. Бібліотека Sinks

Scope – осцилограф для спостереження залежностей в часі;
XY Graph – графобудувач в системі прямокутних координат;
Display – пристрій для виводу на екран дисплея.

Sources (Джерела сигналів)

Склад цього розділу наведено на рис. 5.6.

Набір блоків практично вміщує всі необхідні джерела сигналів для дослідження електропривода. З кожним графічним елементом зв'язано вікно настройки.

Вікно настройки Step показано на рис. 5.7. На полях настройки задаються момент подачі сигналу (Step time), початкові значення сигналу (Initial value), кінцеві значення сигналу (Final value).

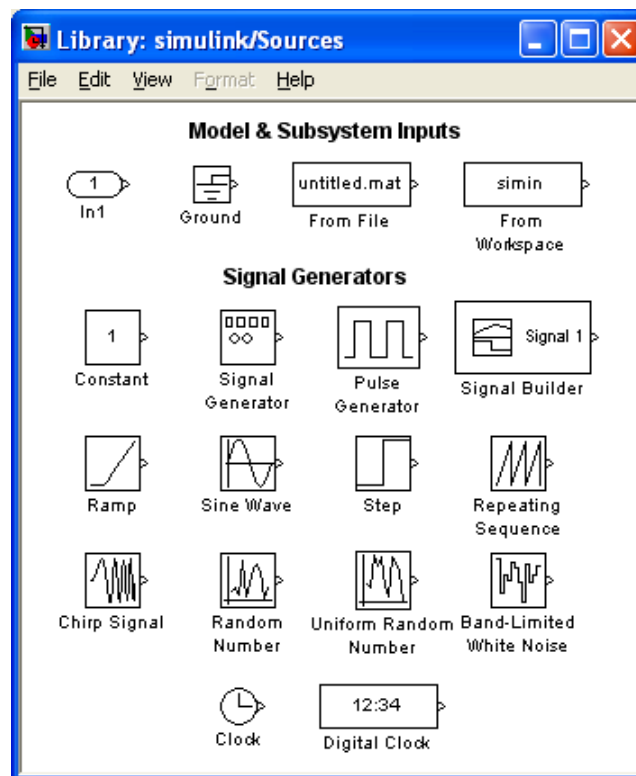


Рис. 5.6. Бібліотека Sources (Джерела сигналів)

SimPower Systems Elements (Бібліотека пасивних силових елементів), рис. 5.8.

Основні з них:

1- Послідовні і паралельні пасивні елементи R, L, C, які можуть бути задані одиницями вимірювання цих елементів Ом, Гн, Ф (RLC

Branch), або активною, реактивною індуктивною чи реактивною ємнісною потужностями (RLC Load).

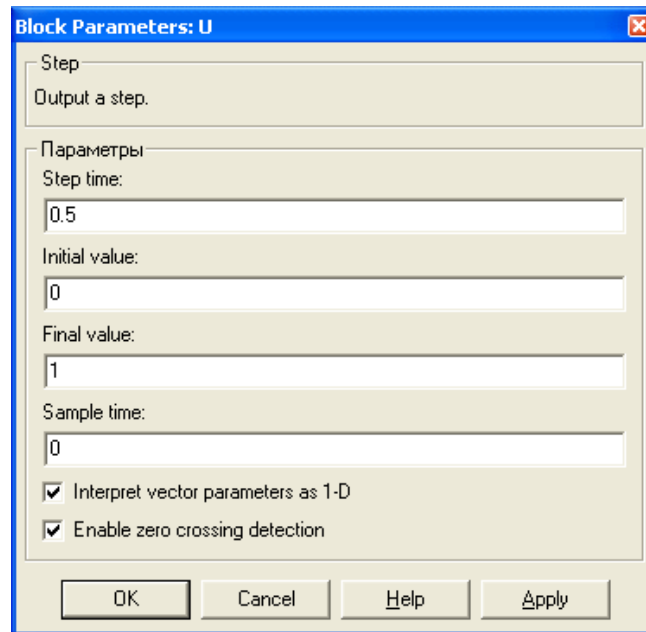


Рис. 5.7. Вікно настройки блоку Step

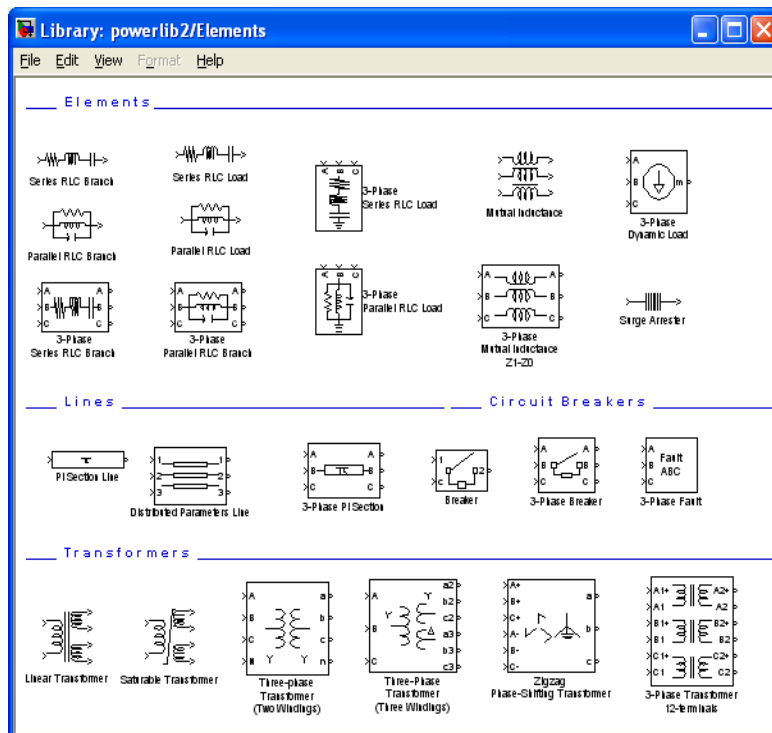


Рис. 5.8. Бібліотека SimPower Systems Elements

2-Лінійний трансформатор (Linear Transformer); трансформатор з реальним магнітним осердям, який враховує його насичення (Saturable Transformer).

3-Однофазні і трифазні лінії електропередач (PI Section Line).

4-Трифазний двохобмотковий і трьохобмотковий трансформатори (Three-Phase Transformer – Two windings; Three windings).

Power Electronics (Бібліотека силових елементів напівпровідникових перетворювачів)

Ця бібліотека (рис. 5.9) вміщує сім типів одиничних силових елементів і моделі різних напівпровідникових перетворювачів, які показані одним універсальним блоком (Universal Bridge).

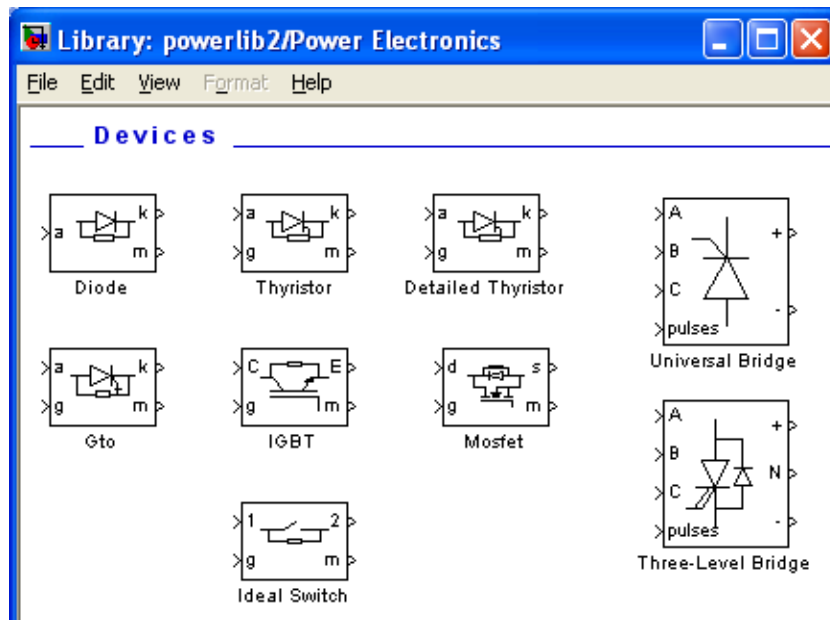


Рис. 5.9. Бібліотека Power Electronics

Кожний одиничний напівпровідниковий елемент має вихід „m”, на якому можна подивитися форму напруги і струму на елементі і заміряти їх значення. Всі блоки мають керуючий вхід „g”.

Універсальний напівпровідниковий перетворювач наведений на рис. 5.10, в полях вікна настройки якого задаються:

- кількість плеч універсального мосту (Numbers of bridge arms);
- конфігурація входних і вихідних портів (Port configuration).
Вхідними можуть бути ABC, а вихідними – порти + і -;
- тип силового напівпровідника (Power Electronic device);

- параметри кіл формування траєкторії перемикачів задаються в полях Snubber resistance, Snubber capacitance.
- поле Measurement призначено для вибору вимірюваних змінних величин універсального напівпровідникового мосту.
- керуючий вхід “pulses”.

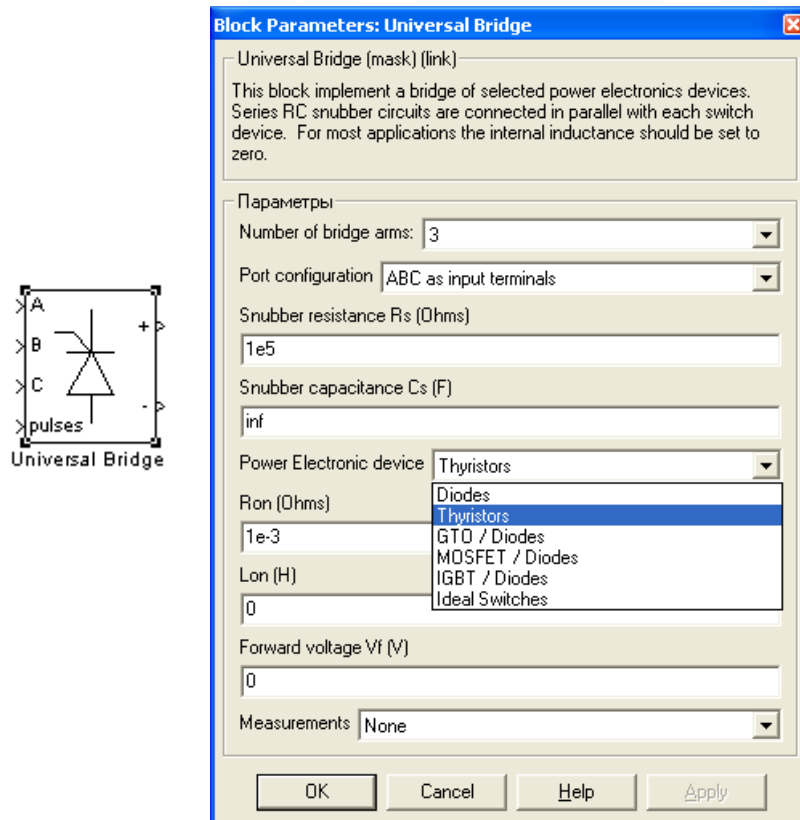


Рис. 5.10. Блок Universal Bridge і його вікно настройки

Machines (Бібліотека електричних машин)

Ця бібліотека (рис. 5.11) вміщує синхронні, асинхронні машини і машини постійного струму. Параметри всіх електродвигунів можуть бути подані як в абсолютних одиницях, так і у відносних. Універсальний блок вимірювання (Machines measurement) дозволяє виміряти необхідні змінні величини двигуна.

Для прикладу на рис. 5.12 наведена модель асинхронної машини і панель її настройки:

- перше поле настройки – тип ротора;
- друге поле – координатна система відліку;
- третє поле – потужність, діюче значення лінійної напруги;

- четверте, п'яте і шосте поле – параметри класичної схеми заміщення;
- сьоме поле – момент інерції ротора; коефіцієнт тертя; число пар полюсів;
- восьме поле – початкові умови.

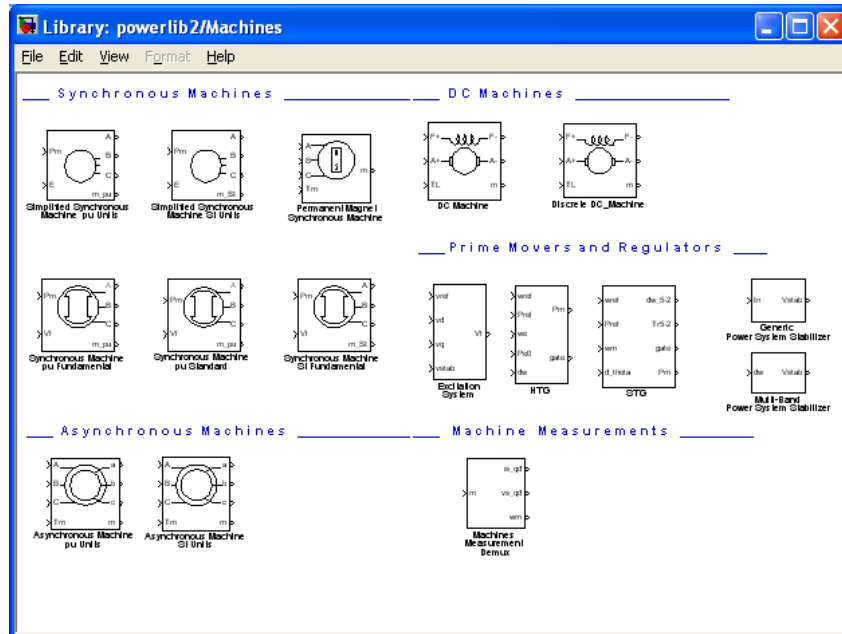


Рис. 5.11. Бібліотека Machines

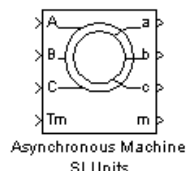
Побудова моделей в системі MatLab

Виділення об'єктів

Щоб виділити окремий об'єкт, необхідно лівою кнопкою мишки натиснути один раз. В результаті по кутах виділеного об'єкту або на початку і в кінці лінії появляться маленькі квадратні чорні мітки. При цьому всі інші раніше виділені об'єкти стануть невиділеними.

Щоб виділити декілька об'єктів, які вибрані довільно, необхідно натиснути клавішу [Shift] і, утримуючи її, натиснути мишкою на кожному виділеному об'єкті. Після цього клавішу [Shift] відпустити.

Групу об'єктів можна виділити за допомогою рамки. Для цього необхідно установити курсор мишки в точку, яка буде початковою точкою рамки, натиснути ліву кнопку мишки і, не відпускаючи її, перемістити мишку в напрямку діагоналі прямокутника. В результаті на екрані з'явиться прямокутна рамка і, коли кнопка мишки буде відпущена, всі об'єкти і лінії, обхвачені рамкою, будуть виділені.



Параметры:

Rotor type: **Wound**

Reference frame: Rotor

Nom. power, L-L volt. and freq. [Pn(WA), Vn(Vrms), fn(Hz)]:
[3*746, 220, 60]

Stator [Rr(ohm) Lls(H)]:
[0.435 2.0e-3]

Rotor [Rr'(ohm) Llr'(H)]:
[0.816 2.0e-3]

Mutual inductance Lm (H):
69.31e-3

Inertia, friction factor and pairs of poles [J(kg.m²) F(N.m.s) p()]:
[0.089 0 2]

Initial conditions (read the details in the description above)
[1,0 0,0,0 0,0,0]

Рис. 5.12. Блок Asynchronous Machine і його вікно настройки

Якщо потрібно виділити всю модель, тобто всі об'єкти в активному вікні блок-схеми, необхідно скористатися командою Select All (Вибрати все) із меню Edit (Правка) або комбінацією [Ctrl+A].

Операції з блоками

Копіювання блоків із одного вікна в інше проводиться наступним чином: відкривається потрібна бібліотека або вікно моделі-прототипу і потрібний блок перетягується мишкою у вікно моделі, що створюється чи редагується.

Блоки можна копіювати і за допомогою команд меню:

- у вікні бібліотеки чи моделі виділити блок (блоки), який необхідно копіювати;
- вибрати команду Copy (Копіювання) в меню Edit (Правка) активного вікна;
- зробити активним вікно, в яке необхідно скопіювати блок, і вибрати в ньому команду Paste (Вставити) із меню Edit (Правка).

Кожному скопійованому блоку Simulink надається ім'я. Користувачі можуть перейменовувати блоки. При копіюванні блок отримує ті ж самі значення параметрів, що і блок-оригінал.

Перестановка блоків моделі

Перестановка блоку усередині моделі здійснюється шляхом

перетягування його мишкою. При цьому Simulink автоматично перемальовує лінії, які зв'язують цей блок з іншими блоками. Щоб переставити декілька блоків разом із з'єднувальними лініями і зберегти відносну відстань, необхідно їх виділити і перетягти мишкою один із блоків. Всі інші виділені блоки також займають нові місця.

Копіювання блоків однієї моделі можна виконати двома способами:

- утримуючи клавішу [Ctrl], перетягнути блок в потрібне положення;
- утримуючи натиснутою праву кнопку мишки, перетягнути блок. При цьому новому блоку додається черговий порядковий номер.

Установка параметрів блоку

Функції, які виконує блок, залежать від значень блоку. Установка цих значень здійснюється у вікні настройки, яке викликається подвійним натисканням мишки на образі блока в блок-схемі.

Вилучення блоків

Для вилучення непотрібних блоків із блок-схеми достатньо виділити ці блоки як було вказано раніше і натиснути клавішу [Del] або [Backspace]. Можна також скористатися командою Clear (Очистити) або Cut (Вирізати) із меню Edit (Правка) вікна блок-схеми. Якщо використана команда Cut, то в подальшому вилучені блоки можна скопіювати в модель за допомогою команди Paste (Вставити) того ж меню.

Від'єднання блоків

Щоб від'єднати блок від ліній, достатньо натиснути клавішу [Shift] і, не відпускаючи її, перетягнути блок в інше місце.

Зміна кутової орієнтації блоку

В початковому стані сигнал проходить через блок зліва направо (зліва розміщуються входи блоку, а справа – виходи). Щоб змінити кутову орієнтацію блоку, необхідно:

- виділити блок, який необхідно повернути;

- вибрати в меню Format (Формат) вікна блок-схеми одну із наступних команд: Flip Block (Поворот блоку на 180 градусів) або Rotate Block (Поворот блоку по годинниковій стрілці на 90 градусів).

Зміна розмірів блоку

Для зміни розмірів блоку необхідно виділити і установити покажчик мишки на одну із кутових міток блоку. Форма покажчика при цьому зміниться – він прийме вигляд двонаправленої стрілки. Необхідно захопити мишкою цю мітку і перетягнути її в нове положення.

Зміна і переміщення імені блоку

Щоб змінити ім'я блоку, необхідно натиснути мишкою на імені, а потім, використовуючи звичайні прийоми редагування, внести необхідні зміни.

Самостійно ім'я блоку розміщується так. Якщо блок орієнтований зліва направо, то ім'я знаходиться під блоком, якщо справа наліво – над блоком; якщо зверху вниз або знизу вверх – справа від блоку.

Змінити місцезнаходження імені виділеного блоку можна двома способами:

- перенести ім'я мишкою на протилежну сторону блоку;
- використати команду Flip Name із меню Format вікна моделі.

Приховати ім'я блоку можна командою Hide Name (Приховати ім'я) меню Format вікна моделі, відновити – командою Show Name (Показати ім'я).

Створення з'єднувальних ліній

Щоб з'єднати вихідний порт одного блоку з вхідним портом другого, необхідно:

- установити покажчик мишки на вихідний порт першого блоку (при цьому курсор повинен прийняти форму перехрестя);
- натиснути ліву кнопку мишки і, утримуючи її, перемістити покажчик до вхідного порту другого блоку;
- відпустити кнопку мишки.

Simulink малює з'єднувальні лінії у вигляді горизонтальних і вертикальних сегментів. Щоб побудувати лінію під кутом 45° , необхідно в процесі малювання утримувати клавішу [Shift].

Створення розгалуження ліній

- установити курсор в точку розгалуження;
- натиснути праву кнопку мишки і утримувати її;
- провести лінію до вхідного порту потрібного блоку, відпустити праву кнопку мишки.

Створення сегмента лінії

Для створення наступного сегмента необхідно установити курсор в кінець попереднього сегмента і намалювати наступний, утримуючи ліву кнопку мишки.

Ділення лінії на сегменти

- виділити лінію і установити курсор в точку зламу лінії;
- натиснути клавішу [Shift] і ліву кнопку мишки, курсор при цьому прийме форму кола, а на лінії утвориться злам;
- перемістити курсор (злам) в нове положення;
- відпустити клавішу [Shift] і кнопку мишки.

Розстановка міток сигналів і коментаріїв

Щоб створити мітку сигналів, необхідно двічі клацнути на сегменті лінії, а потім ввести текст мітки. Подвійне клацання необхідно виконати точно на лінії, інакше буде створено коментарій до моделі.

Переміщення мітки здійснюється шляхом перетягування її на нове місце. Якщо при цьому утримувати натиснутою клавішу [Ctrl], то мітка буде скопійована в нове місце. Копіювання мітки можна здійснити подвійним клацанням на другому сегменті лінії.

Редагування мітки проводиться після клацання на ній правою кнопкою мишки.

Щоб видалити мітку, необхідно її виділити, а потім натиснути клавішу [Del] або [Backspace].

Для супроводження блок-схем текстовою інформацією про моделі створюються коментарії. Коментарії встановлюються в будь-якому вільному місці блок-схеми. Після подвійного клацання мишкою

у вибраному місці блок-схеми з'являється прямокутна рамка, в яку можна занести текст коментарію.

Копіювання, редагування, перенесення коментаріїв проводиться аналогічно міткам.

Створення підсистем

Якщо блок-схема моделі складна і має великі розміри, її можна спростити шляхом групування блоків в підсистеми:

- виділити за допомогою рамки блоки і з'єднувальні їх лінії, які необхідно включити в склад підсистеми;
- вибрати команду Create Subsystem (Створити підсистему) із меню Edit (Правка). В результаті Simulink замінить виділені блоки одним блоком Subsystem.

Щоб побачити блок-схему створеної підсистеми, необхідно двічі клацнути на блоці Subsystem.

Записування і друкування моделі

Для записування моделі на диск необхідно викликати команду Save (Зберегти) або Save As (Зберегти як) із меню File (Файл) вікна моделі. При цьому файл записується у вказану папку з розширенням .mdl.

Для друкувати моделі використовують команду Print (Друк) із меню File (Файл) вікна моделі.

Модель можна вставити в документ будь-якого текстового редактора, наприклад, Word. Для цього необхідно спочатку викликати команду Copy Model (Копіюй модель) із меню Edit (Правка) вікна моделі, перенести у вікно текстового редактора і натиснути комбінацію клавіш [Shift+Ins].

Моделювання теплових режимів роботи електродвигуна

Із курсу електропривода відомо, що рівняння теплового балансу за нескінченно малий проміжок часу dt має вигляд:

$$\Delta P dt = A \pi dt + C d\tau, \quad (5.1)$$

де ΔP – втрати потужності в електродвигуні, Вт; A – тепловіддача двигуна (кількість теплоти, що віддається охолоджуючому середовищу за 1 с при різниці температур двигуна і навколишнього

середовища в 1°C), Дж/(с $\cdot^{\circ}\text{C}$); τ – перевищення температури двигуна над температурою охолоджуючого середовища, $^{\circ}\text{C}$; C – теплоємність двигуна, Дж/ $^{\circ}\text{C}$; $d\tau$ – приріст температури двигуна за нескінченно малий проміжок часу, $^{\circ}\text{C}$.

Запишемо рівняння (5.1) у відносній формі, ввівши базове значення максимального перевищення температури двигуна над температурою охолоджуючого середовища $\tau_{MAX} = 80^{\circ}\text{C}$ і отримаємо:

$$T_H \frac{d\tau_*}{dt} + \tau_* = \Delta P_*, \quad (5.2)$$

де $T_H = \frac{C}{A}$ – стала часу нагрівання електродвигуна, с; $\tau_* = \frac{\tau}{\tau_{MAX}}$ –

відносна температура ($\tau_{MAX} = 80^{\circ}\text{C}$), в.о.; $\Delta P_* = \frac{\Delta P}{P_{MAX}} = \frac{\Delta P}{A\tau_{MAX}}$ – відносна

потужність теплових втрат в двигуні, в.о.

Величину T_H можна визначити за каталожними даними:

$$T_H = 6,0 \frac{G\tau_{MAX}\eta_H}{P_H(1-\eta_H)}, \quad (5.3)$$

де G – маса електродвигуна, кг; η_H – номінальне значення коефіцієнта корисної дії двигуна, в.о.; P_H – номінальна потужність двигуна, кВт.

Тепловіддача асинхронного двигуна практично не залежить від його навантаження і визначається за формулою:

$$A = \frac{\Delta P_H}{\tau_{MAX}} = \frac{P_H(1-\eta_H)}{\tau_{MAX}\eta_H}. \quad (5.4)$$

Рівняння (5.2) перетворимо в форму Коші, а потім представимо в операторній формі:

$$\begin{aligned} \frac{d\tau_*}{dt} &= \frac{1}{T_H} \Delta P_* - \frac{1}{T_H} \tau_*; \\ p\tau_* &= \frac{1}{T_H} \Delta P_* - \frac{1}{T_H} \tau_* \text{ або } \tau_* = \frac{1}{T_H} \frac{1}{p} (\Delta P_* - \tau_*), \end{aligned} \quad (5.5)$$

де $p = \frac{d}{dt}$ – оператор Лапласа.

Послідовність розрахунку теплового режиму електродвигуна

Відкриваємо MatLab, Simulink і три необхідні бібліотеки Sources (Джерела сигналів), Sinks (Прилади) і Continuous (Неперервні блоки). Одночасно відкриваємо поле для побудови структурної схеми (рис. 5.13) відповідно рівнянню (5.5). Блоки із бібліотеки в набірне поле Untitled (Без імені) переносять відомим способом Drag-and Drop (Перенеси і залиш), про що описано раніше.

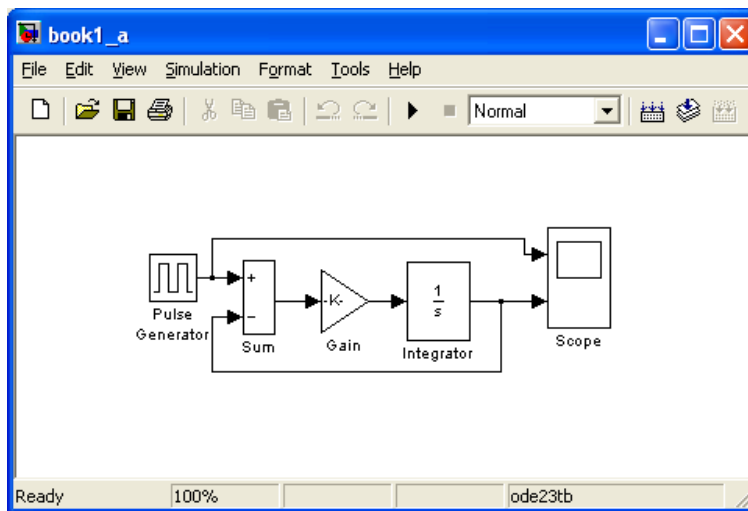


Рис. 5.13. Модель нагрівання двигуна в повторно-короткочасному режимі

Після створення структурної схеми послідовно (подвійним клацанням на блоці) встановлюють параметри підсилювача (Gain) і інтегратора (Integrator).

Коефіцієнт підсилювача дорівнює величині, оберненій сталій часу нагрівання ($1/T_H$).

В полі настройки інтегратора задають початковий стан відносної температури

$$\tau_{Поч*} = \frac{\tau_{Поч}}{\tau_{МАХ}}$$

В розділі головного меню Simulation вибирають команду Parameters, за якою проводять настроювання моделювання. На вкладці Solver встановлюють початковий (Start time=0) і кінцевий [Stop time=(3-4) T_H] час моделювання. Решту параметрів рекомендується залишити такими, які запропонував комп'ютер.

У вікні настройки генератора вказується період циклу, відносний час ввімкненого стану, амплітуда і початок роботи.

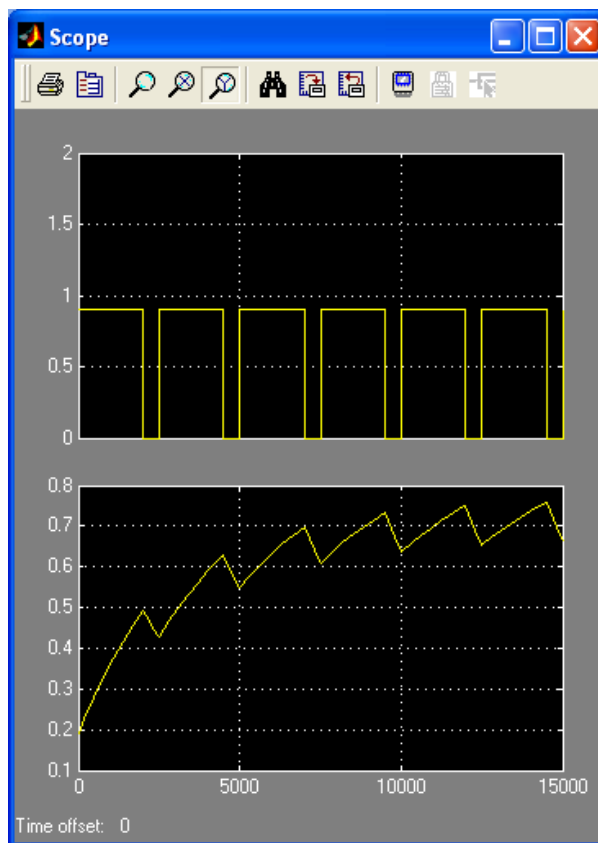


Рис. 5.14. Результати моделювання теплових процесів у двигуні при $T_H=3600$ с

При зміні потужності на валу двигуна, а відповідно і втрат випадковим образом, приймають, що випадкова функція втрат підпорядкована нормальному закону розподілення Гауса. Тоді густина ймовірності описується наступним рівнянням:

$$\Delta P_*(t) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-a)^2}{2\sigma^2}}, \quad (5.6)$$

де a – параметр, який показує найбільш ймовірне значення відносних втрат ΔP_* (для даного випадку $a = 1$); σ – середньоквадратичне відхилення (дисперсія), приймаємо $\sigma = 5$.

Для побудови вибираємо блок Random Number із бібліотеки Sources головної бібліотеки Simulink.

Завдання на практичну роботу

Скласти структурну схему для дослідження теплового режиму двигуна.

Ввести параметри настройки, які задаються викладачем.

Побудувати залежності $\Delta P_* = f(t); \tau_* = f(t)$.

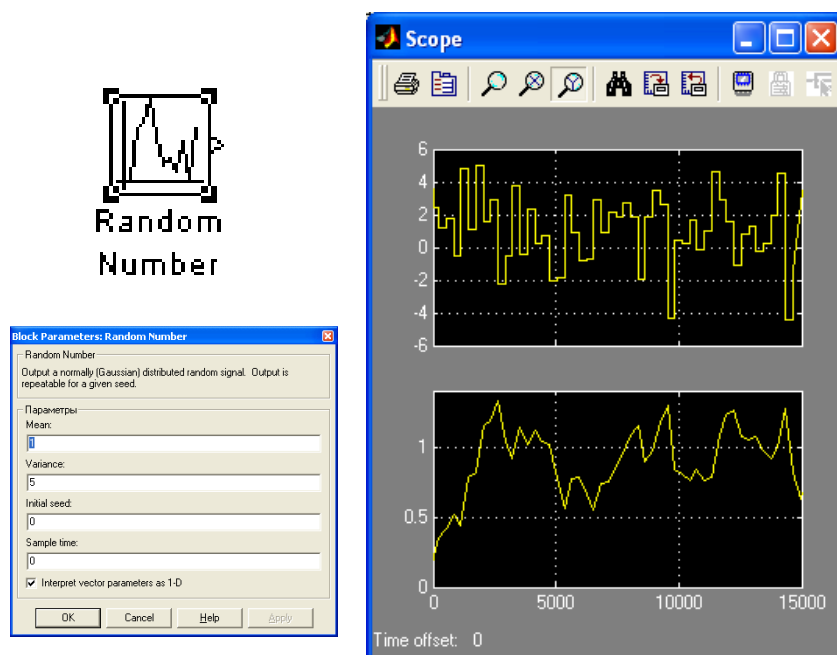


Рис. 5.15. Вікно настройки і результати моделювання теплових процесів у двигуні в режимі випадкового навантаження

Література:

1. Регульований електропривод. Теорія. Моделювання: Навчальний посібник/ І.М. Голодний, Ю.М. Лаврінченко, М.В. Синявський та ін. За ред.. Голодного І.М. – К.: Аграр Медіа Груп, 2012. – 513 с.
2. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых систем в MatLab 6.0. Санкт-Петербург: Корона принт, 2001. – 320 с.
3. Технічний каталог Володимирського електромоторного заводу. Ч1.- Володимир, 2003. Сайт: www.vemp.ru

Контрольні питання

1. Які основні розділи бібліотеки Simulink використовують для дослідження електропривода?
2. Які операції можна робити з блоками?
3. Як створити з'єднувальні лінії між блоками?
4. Які блоки використані в моделі для дослідження теплових режимів електродвигуна?

Додаток А.

Таблиця А.1.

Технічні дані асинхронних двигунів серії 5А основного виконання, ступінь захисту IP54, клас ізоляції „F”, $U_H = 380$ В

Тип двигуна	P_H , кВт	n_H , об/хв	ККД, %	$\cos\varphi$	I_H , А	M_H , Нм	$M_{П}/M_H$, в.о.	$I_{П}/I_H$, в.о.	M_{MAX}/M_H ,	J_P , кг·м ²	Маса, кг	Сервіс- фактор
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
2p=2; $n_C = 3000$ об/хв.												
5A80MA2	1,5	2850	80,0	0,84	3,4	5,4	2,4	6,5	2,5	0,0018	14,0	1,15
5A80MB2	2,2	2850	81,0	0,85	4,9	7,4	2,7	6,5	2,8	0,0021	15,5	1,15
5AM112M2	7,5	2895	87,5	0,89	14,6	24,7	2,9	7,5	3,3	0,0131	56,5	1,15
АИРМ132M2	11	2915	88,5	0,90	21,0	36	2,5	8,0	3,3	0,024	77,5	1,15
5A160S2	15	2920	90,0	0,89	28,5	49	2,2	6,8	3,0	0,039	122	1,15
5A160M2	18,5	2920	90,5	0,89	34,9	60,5	2,2	7,0	3,0	0,045	133	1,15
АИР180S2	22	2930	90,5	0,89	41,5	72	2,0	6,8	2,9	0,063	160	1,15
АИР180M2	30	2940	91,5	0,89	56,3	97	2,4	8,0	3,3	0,076	180	1,10
2p=4; $n_C = 1500$ об/хв.												
5A80MA4	1,1	1410	73,0	0,79	2,9	7,5	2,0	4,8	2,3	0,0034	13	1,15
5A80MB4	1,5	1410	75,0	0,81	3,8	10	1,9	5,5	2,2	0,0036	14,7	1,15
5AM112M4	5,5	1440	86,0	0,83	11,7	36,5	2,6	6,7	2,9	0,02	56,5	1,15
АИРМ132S4	7,5	1450	87,5	0,85	15,4	49,4	2,1	7,0	2,8	0,032	70	1,15
АИРМ132M4	11	1455	89,0	0,85	22,1	72,2	2,2	7,3	3,0	0,045	83,5	1,15
5A160S4	15	1450	89,5	0,86	29,6	99	2,2	6,1	2,6	0,075	127	1,15
5A160M4	18,5	1450	90,0	0,86	36,3	122	2,2	6,5	2,6	0,087	140	1,15
АИР180S4	22	1465	90,5	0,84	44	143	1,7	6,8	2,6	0,16	170	1,10
АИР180M4	30	1470	91,5	0,87	57,5	195	1,7	7,0	2,6	0,20	190	1,10
2p=6; $n_C = 1000$ об/хв.												
5A80MA6	0,75	930	70,0	0,68	2,4	7,7	2,0	4,5	2,3	0,0033	14	1,15
5A80MB6	1,1	930	71,0	0,69	3,4	11,3	2,0	4,5	2,3	0,0048	16	1,15
5AM112MA6	3	950	81,0	0,80	7,0	30	2,3	5,5	2,6	0,024	50,5	1,15
5AM112MB6	4	955	82,0	0,81	9,2	40	2,3	5,5	2,6	0,029	55	1,15
АИРМ132S6	5,5	960	84,5	0,80	12,4	54,7	2,0	5,8	2,5	0,048	68,5	1,15
АИРМ132M6	7,5	960	85,5	0,80	16,7	74,6	2,2	6,3	2,8	0,067	81,5	1,15
5A160S6	11	970	87,0	0,82	23,4	108	1,9	6,5	2,5	0,11	122	1,15
5A160M6	15	970	88,5	0,83	31,0	148	2,0	6,8	2,7	0,15	150	1,15
АИР180M6	18,5	980	89,5	0,84	37,5	180	1,9	6,5	2,7	0,27	180	1,15
5A200M6	22	975	90,5	0,83	44,5	215	2,2	6,0	2,2	0,41	245	1,15
5A200L6	30	975	90,5	0,84	60,0	294	2,4	6,0	2,2	0,46	280	1,10
2p=8; $n_C = 750$ об/хв.												
5A80MA8	0,37	695	56,0	0,62	1,6	5,1	2,0	3,5	2,2	0,0036	13,5	1,15

5A80MB8	0,55	700	58,0	0,60	2,4	7,5	2,0	3,5	2,2	0,0047	15,7	1,15
5AM112MA8	2,2	710	79,0	0,70	6,0	29	2,0	4,8	2,5	0,024	50,0	1,15
5AM112MB8	3,0	710	79,0	0,70	8,3	40	2,2	4,6	2,5	0,029	54,5	1,15
АИРМ132S8	4,0	715	82,0	0,70	10,6	53,4	2,0	4,8	2,5	0,053	68,5	1,15
АИРМ132M8	5,5	715	83,0	0,73	13,8	73,4	2,0	5,3	2,5	0,074	82,0	1,15
5A160S8	7,5	725	86,0	0,72	18,4	99	1,6	5,0	2,2	0,11	120	1,15
5A160M8	11	725	87,0	0,74	26,0	145	1,6	5,0	2,2	0,15	145	1,15
АИР180M8	15	730	88,0	0,78	33,0	196	1,6	5,3	2,2	0,27	180	1,10
5A200M8	18,5	735	90,0	0,76	41,0	240	2,0	6,4	2,7	0,41	240	1,15
5A200L8	22	735	90,0	0,77	48,5	286	2,0	6,2	2,6	0,46	260	1,10
5A225M8	30	735	91,0	0,78	64,5	389	2,1	5,5	2,2	0,70	340	1,15

Таблиця А.2.

Технічні дані асинхронних двигунів з підвищеним ковзанням,
ступінь захисту IP54, клас ізоляції „F”, $U_H = 380$ В,
режим роботи S3 40%

Тип двигуна	P_H , кВт	n_H , об/хв	ККД, %	$\cos\varphi$	I_H , А	M_H , Нм	M_{II}/M_H , в.о.	I_{II}/I_H , в.о.	M_{MAX}/M_H , в.о.	J_P , кг·м ²	Маса, кг
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
2p=2; n _c = 3000 об/хв.											
АИРСМ132M2	12,5	2840	86,5	0,89	24,7	42,0	2,6	6,5	2,8	0,024	77,5
2p=4; n _c = 1500 об/хв.											
АИРСМ132S4	8,5	1400	83,0	0,85	18,4	58,0	2,9	6,0	2,9	0,032	70,0
АИРСМ132M4	11,8	1400	86,5	0,83	24,4	80,5	3,4	6,5	3,5	0,045	83,5
5АС160M4	20	1400	86,0	0,87	40,5	136	2,4	5,0	2,6	0,087	140
АИРС180M4	22	1425	88,5	0,88	43,0	147	3,0	7,0	3,2	0,200	190
2p=6; n _c = 1000 об/хв.											
АИРСМ132S6	6,3	925	81,0	0,80	14,8	65,0	2,6	5,5	2,6	0,048	68,5
АИРСМ132M6	8,5	930	82,0	0,80	19,7	87,2	2,9	6,0	3,1	0,067	81,5
5АС160M6	16	930	84,0	0,85	34,0	164	2,2	5,5	2,5	0,150	150
АИРСМ180M6	18,5	925	84,0	0,85	39,4	191	2,8	6,5	2,8	0,270	180
2p=8; n _c = 750 об/хв.											
АИРСМ132S8	4,5	685	76,5	0,70	12,8	62,7	2,5	4,5	2,5	0,082	65,8
АИРСМ132M8	6,0	690	79,0	0,70	16,5	83,0	2,8	4,5	2,8	0,045	81,5
АИРС180M8	15	675	82,0	0,80	35,1	212	2,8	5,0	2,8	0,270	180
5АС225M8	26,0	680	84,0	0,80	60,0	372	2,9	5,5	2,9	0,700	340

Таблиця А.3.

ККД і $\cos\varphi$ електродвигунів при навантаженні P/P_H , %.

ККД при P/P_H				$\cos\varphi$ при P/P_H			
50	75	100	125	50	75	100	125
94,5	96,0	96,0	95,0	0,88	0,90	0,92	0,92
93,5	95,0	95,0	94,0	0,87	0,89	0,91	0,91
93,0	94,0	94,0	93,0	0,84	0,88	0,90	0,90
92,5	93,0	93,0	92,0	0,80	0,86	0,89	0,89
92,0	92,5	92,0	91,0	0,78	0,85	0,88	0,89
91,0	91,5	91,0	90,0	0,76	0,83	0,87	0,88
89,0	90,0	90,0	89,0	0,74	0,82	0,86	0,87
88,0	89,0	89,0	88,0	0,73	0,81	0,85	0,86
87,0	88,0	88,0	87,0	0,71	0,80	0,84	0,86
86,5	87,5	87,0	86,0	0,70	0,79	0,83	0,84
85,5	86,5	86,0	85,0	0,68	0,78	0,82	0,83
83,5	85,5	85,0	84,0	0,66	0,71	0,81	0,82
82,5	84,5	84,0	83,0	0,65	0,73	0,80	0,81
81,5	83,0	83,0	81,5	0,62	0,74	0,79	0,80
80,5	82,0	82,0	80,5	0,60	0,72	0,78	0,80
79,0	81,0	81,0	79,0	0,58	0,70	0,77	0,80
78,0	80,0	80,0	78,0	0,57	0,69	0,76	0,80
77,0	79,0	79,0	76,5	0,56	0,69	0,75	0,80
76,0	78,0	78,0	75,5	0,54	0,67	0,73	0,78
75,0	77,0	77,0	75,0	0,52	0,65	0,72	0,77
50	75	100	125	50	75	100	125
73,5	75,5	76,0	74,5	0,49	0,63	0,71	0,77
71,0	74,5	75,0	73,5	0,47	0,61	0,70	0,76
70,0	73,5	74,0	72,5				
67,5	72,5	73,0	71,5				
66,0	71,5	72,0	70,5				
65,0	70,5	71,0	69,5				
64,5	69,5	70,0	68,5				
63,5	68,5	69,0	67,5				
63,0	67,5	68,0	66,0				
62,0	66,5	67,0	65,0				
61,0	65,0	66,0	64,0				
60,0	64,0	65,0	63,0				
59,0	63,0	64,0	62,0				
57,0	62,0	63,0	61,0				
56,0	60,5	62,0	60,5				
55,0	59,5	61,0	59,5				
53,5	58,5	60,0	58,5				
51,5	57,5	59,0	58,0				
50,0	56,5	58,0	57,0				
49,0	55,0	57,0	56,0				