

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет інженерії  
Кафедра електричної інженерії

**ПОЯСНЮВАЛЬНА ЗАПИСКА**

до кваліфікаційної магістерської роботи

галузі знань 14 Електрична інженерія

спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

спеціалізації Електротехнічні системи електроспоживання

освітнього ступеня - магістр

на тему

**Розробка математичних моделей для дослідження  
трансформаторів та електричних машин при моделюванні систем  
електроспоживання**

Виконав: здобувач вищої освіти групи ЕЕ-22дм

Каменюка Микола Володимирович

(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Керівник

доц. Мелконова І.В.

(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Завідувача кафедри

доц. Руднєв Є.С.

(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Рецензент

(прізвище, та ініціали)

(підпис)

Київ-2023

СХІДНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
ІМЕНІ ВОЛОДИМИРА ДАЛЯ

Факультет \_\_\_\_\_ інженерії \_\_\_\_\_  
Кафедра \_\_\_\_\_ електричної інженерії \_\_\_\_\_  
Освітній ступень \_\_\_\_\_ магістр \_\_\_\_\_  
Галузь знань \_\_\_\_\_ 14 \_\_\_\_\_ Електрична інженерія \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)  
Спеціальність \_\_\_\_\_ 141 \_\_\_\_\_ Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)  
Спеціалізація \_\_\_\_\_ Електротехнічні системи електроспоживання \_\_\_\_\_  
(шифр і назва)

ЗАТВЕРДЖУЮ

Завідувача кафедри  
доц. Руднев Є.С.

“ \_\_\_\_\_ ” \_\_\_\_\_ 2023 року

**З А В Д А Н Н Я**  
**НА КВАЛІФІКАЦІЙНУ МАГІСТЕРСЬКУ РОБОТУ ЗДОБУВАЧА ВИЩОЇ ОСВІТИ**

\_\_\_\_\_ Каменюка Микола Володимирович \_\_\_\_\_

(прізвище, ім'я, по батькові)

1. Тема роботи: Розробка математичних моделей для дослідження трансформаторів та електричних машин при моделюванні систем електроспоживання

**Спец. завдання:** створення віртуальних навчальних стендів за допомогою прикладних пакетів моделей; проведення досліджень на створених навчальних стендах

**Керівник роботи** \_\_\_\_\_ к.т.н., доц. Мелконова І.В. \_\_\_\_\_,  
(прізвище, ім'я, по батькові, науковий ступінь, вчене звання)

затверджені наказом вищого навчального закладу від “23” жовтня 2023 року № 564/15.23-С

2. Строк подання студентом роботи 06.12.2023

3. Вихідні дані до роботи: Провести дослідження трансформаторів, асинхронних машин, синхронних машин та машин постійного струму.

4. Зміст пояснювальної записки (перелік питань, які потрібно розробити): Вступ. 1. Дослідження трансформаторів на віртуальних моделях. 2. Дослідження асинхронних машин на віртуальних моделях. 3. Дослідження синхронних машин на віртуальних моделях. 4. Дослідження машин постійного струму на віртуальних моделях. Загальні висновки.

5. Перелік графічного матеріалу: 1.Схема віртуального стенду для дослідження однофазного трансформатора (A1). 2. Схема віртуального стенду для дослідження паралельної роботи трансформаторів (A1). 3. Схема віртуального стенду для дослідження асинхронних машин (A1). 4. Схема віртуального стенду для дослідження синхронних машин (A1). 5. Схема віртуального стенду для дослідження машин постійного струму (A1).

6. Дата видачі завдання \_\_\_\_\_ 05.09.2023р. \_\_\_\_\_

### КАЛЕНДАРНИЙ ПЛАН

№ з/п	Назва етапів	Строк виконання етапів	Примітка
1	Дослідження трансформаторів на віртуальних моделях		
2	Дослідження асинхронних машин на віртуальних моделях		
3	Дослідження синхронних машин на віртуальних моделях		
4	Дослідження машин постійного струму на віртуальних моделях		
5	Оформлення пояснювальної записки та плакатів	10.11.2023	
6	Захист роботи	За графіком захисту	

Студент \_\_\_\_\_ Микола КАМЕНЮКА  
( підпис ) ( прізвище та ініціали )

Керівник роботи \_\_\_\_\_ Інна МЕЛКОНОВА  
( підпис ) ( прізвище та ініціали )

**Примітки:**

- 1.Форму призначено для видачі завдання студенту на виконання кваліфікаційної магістерської роботи і контролю за ходом роботи з боку кафедри
- 2.Розробляється керівником кваліфікаційної магістерської роботи. Видається кафедрою.

## РЕФЕРАТ

Пояснювальна записка містить 95 стор., 61рис., 31 табл., 15 библ. найм.

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ, КОМП'ЮТЕРНЕ  
МОДЕЛЮВАННЯ, ВІРТУАЛЬНІ ЛАБОРАТОРІЇ, ТРАНСФОРМАТОР,  
ЕЛЕКТРИЧНІ МАШИНИ, ОДНОФАЗНА МЕРЕЖА, ЕЛЕКТРОСПОЖИ-  
ВАННЯ

В роботі розроблені програмні моделі для дослідження трансформаторів та електричних машин змінного та постійного струму, а також віртуальні стенди та програма для проведення лабораторних робіт з напрямку електроспоживання. Під час виконання роботи сформовано та розв'язано питання щодо створення навчальних стендів за допомогою віртуальних моделей, питання з розробки та дослідження навчальних стендів.

По ходу вирішення цих завдань використовувалися різноманітні методи моделювання електротехнічних систем, а також диференціальне та інтегральне числення. Теоретичні дослідження виконувалися як аналітичними методами так і з застосуванням комп'ютерного моделювання.

In the work, software models for the study of transformers and electric machines of AC and DC, as well as virtual stands and a program for conducting laboratory work in the field of electrical consumption have been developed. In the course of work, the question of creating training stands with the help of virtual models, preparation and study of training stands was formed and solved.

In the course of solving these problems, various methods of simulation of electrical engineering systems, as well as differential and integral calculus were used. Theoretical research was carried out both analytically and with the use of computer simulation.

## ЗМІСТ

ВСТУП.....	6
РОЗДІЛ 1 ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ВІРТУАЛЬ - НИХ МОДЕЛЯХ.....	8
1.1 Математична модель трансформатора.....	8
1.2 Дослідження однофазного трансформатора.....	13
1.3 Дослідження трифазного трансформатора.....	19
1.4 Дослідження паралельної роботи трансформаторів.....	24
РОЗДІЛ 2 ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН НА ВІРТУ- АЛЬНИХ МОДЕЛЯХ.....	29
2.1 Математична модель асинхронної машини.....	29
2.2 Дослідження трифазної асинхронної машини з коротко- замкненим ротором.....	34
2.3 Дослідження трифазної асинхронної машини з фазним ротором.....	42
2.4 Дослідження трифазної асинхронної машини з короткозам- кненим ротором при живленні від однофазної мережі.....	42
РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННИХ МАШИН НА ВІРТУ- АЛЬНИХ МОДЕЛЯХ.....	50
3.1 Математична модель синхронної машини.....	50
3.2 Дослідження трифазної магнітоелектричної синхронної машини.....	55
3.3 Дослідження синхронного генератора.....	61
3.4 Дослідження синхронного компенсатора при роботі на “жорстку” мережу.....	69
РОЗДІЛ 4 ДОСЛІДЖЕННЯ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ВІРТУАЛЬНИХ МОДЕЛЯХ.....	72
4.1 Математична модель машини постійного струму.....	72
4.2 Дослідження машин постійного струму з незалежним збудженням.....	77
4.3 Дослідження машин постійного струму з послідовним збудженням.....	83
4.4 Дослідження машин постійного струму з паралельним збудженням.....	87
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	93
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	94

## ВСТУП

Основним завданням розвитку промисловості України є стабілізація і збільшення випуску продукції, і поліпшення якості. У тому числі за рахунок створення нових серій електричних машин та апаратів.

При розробці та дослідженні сучасних електромеханічних систем, електричних машин і апаратів, машинно-вентильних систем та інших пристроїв електромагнітної техніки виникають завдання, вирішення яких, як правило, пов'язане з аналізом нелінійних диференціальних рівнянь вищих порядків. Використання аналітичних методів дослідження для вирішення таких завдань є надзвичайно трудомістким, а в деяких випадках і неможливим, тому застосування сучасних швидкодіючих обчислювальних машин стає необхідним.

*Актуальність теми* полягає у удосконаленні обчислювальних машин та прийомів програмування, що зробили в останні роки обчислювальну техніку надбанням інженерно-технічних і наукових працівників практично всіх галузей науки і техніки. ЕОМ не тільки прискорює розрахункові роботи, а й відкриває зовсім нові можливості в галузі досліджень.

Прискорено комп'ютеризується сфера освіти, створюються все нові й нові комп'ютерні лабораторії та комплекси. Це відкриває нові можливості для освіти в тій частині, що студенту вже не потрібен дорогий стенд для досліджень. Цілу стендову лабораторію можна вмістити на CD-диску. Це дає значний імпульс для впровадження в процес освіти так званій дистанційний підхід.

Комп'ютеризація значно здешевлює відкриття нових філій ВНЗ та підвищує якість освіти в структурних підрозділах.

*Мета та завдання дослідження.* Метою дослідження є аналіз роботи електричних машин на віртуальних моделях в програмному пакеті MATLAB.

Для досягнення поставленої мети визначені наступні завдання:

- створення навчальних стендів за допомогою віртуальних моделей;
- розробка та дослідження навчальних стендів.

**Методи дослідження.** Для вирішення поставлених завдань застосовувалися:

- методи моделювання електромеханічних систем;
- диференціальне та інтегральне числення.

Теоретичні дослідження виконувалися як аналітичними методами так і з застосуванням комп'ютерного моделювання.

**Новизна отриманих результатів** полягає в наступному:

- розроблені програмні моделі для дослідження електричних машин;
- створена віртуальна навчальна лабораторія;

# РОЗДІЛ 1

## ДОСЛІДЖЕННЯ ТРАНСФОРМАТОРІВ НА ВІРТУАЛЬНИХ МОДЕЛЯХ

### 1.1 Математична модель трансформатора

Трансформатор представляє собою статичний електромагнітний пристрій, призначений для перетворення змінного струму однієї напруги в змінний струм іншої напруги тієї ж частоти.

Схему трансформатора можна отримати зі схеми узагальненої машини, коли  $\omega_p=0$  і між рухливими обмотками статора і ротора, зсунутими на електричний кут, рівний  $90^\circ$ , магнітні зв'язку відсутні.

Розглянемо спочатку рівняння ненасиченого однофазного двообмоткового трансформатора, у якого число витків первинної обмотки  $w_1$  дорівнює числу витків вторинної обмотки  $w_2$ . На рис. 1.1 дана схема однофазного трансформатора, на якій для зручності зображення первинна і вторинна обмотки розташовані на різних стрижнях. У реальних трансформаторах для забезпечення кращого магнітного зв'язку обмотки розташовуються на одному стрижні.

Для аналізу процесів перетворення енергії в трансформаторі зручно уявити, що є робочий потік  $\Phi_m$ , зчеплений з обома обмотками, і потоки розсіювання первинної  $\Phi_{\sigma 1}$  та вторинної  $\Phi_{\sigma 2}$  обмоток. Потоки розсіювання  $\Phi_{\sigma 1}$  і  $\Phi_{\sigma 2}$  зчеплені лише з однією обмоткою;  $u_1$  та  $i_1$  - напруга і струм первинної обмотки;  $u_2$  та  $i_2$  - напруга і струм вторинної обмотки.

Для двообмоткового трансформатора можуть бути записані такі рівняння:

$$\begin{vmatrix} u_1 \\ -u_2 \end{vmatrix} = \begin{vmatrix} r_1 + pL_1 & pM \\ pM & r_2 + pL_2 \end{vmatrix} \times \begin{vmatrix} i_1 \\ i_2 \end{vmatrix} \quad (1.1)$$

де  $p=d/dt$ ;  $r_1$  та  $r_2$  – активні опори первинної і вторинної обмоток;

$M$  – взаємна індуктивність між первинною і вторинною обмотками (ви



значається робочим потоком  $\Phi_m$ );

$L_1$  та  $L_2$  – відповідно індуктивності первинної і вторинної обмоток.

Знак мінус перед напругою  $u_2$  показує, що активна потужність передається з первинної обмотки у вторинну, до якої приєднане навантаження.

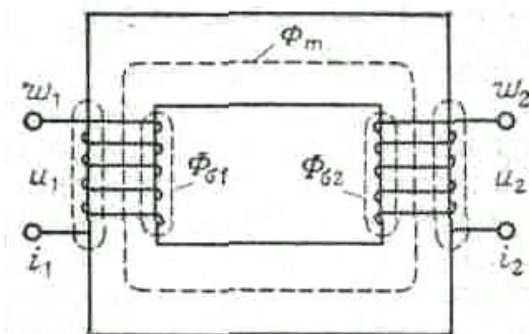


Рис. 1.1 □□ Схема однофазного трансформатора.

Для посилення зв'язку обмотки розташовуються на феромагнітній осерді – магнітопроводі.

Аналіз рівнянь трансформатора почнемо з рівнянь ідеального трансформатора. В ідеальному трансформаторі  $r_1=0$  та  $r_2=0$  і втрати в сталі магнітопроводу не враховуються. Магнітна проникність сталі  $\mu_{ст}=\infty$ , весь потік замикається по сталі, і потоки розсіяння дорівнюють нулю. Електромагнітний зв'язок між обмотками трансформатора характеризується коефіцієнтом електромагнітного зв'язку.

$$c = \frac{M}{\sqrt{L_1 \cdot L_2}} \quad (1.2)$$

Для ідеального трансформатора, в якому немає втрат і весь потік зчеплений з первинною і вторинною обмотками (розсіяння відсутнє),  $c=1$ , тобто зв'язок між обмотками повний.

В реальних трансформаторах існують потоки розсіяння первинної  $\Phi_{\sigma 1}$  та вторинної  $\Phi_{\sigma 2}$  обмоток, тому електромагнітний зв'язок в них неповний і  $c<1$ . У зв'язку з цим вводиться поняття коефіцієнта електромагнітного розсіювання:

$$\sigma = 1 - c^2 = 1 - \frac{M^2}{L_1 L_2} \quad (1.3)$$

Потоки розсіювання мають важливе значення для процесів електромагнітного перетворення в трансформаторах, і вважати, що вони шкідливі, і намагатися звести їх до нуля не слід.

У силових трансформаторах має місце високий коефіцієнт електромагнітного зв'язку ( $c=0,93 - 0,999$ ), відповідно невелике і розсіювання ( $\sigma = 0,07 - 0,001$ ).

В ідеальному трансформаторі при синусоїдально змінюваному магнітному потоці

$$\left. \begin{aligned} u_1 = -e_1 &= \frac{d\psi_1}{dt} = w_1 \cdot \frac{d}{dt} (\Phi_m \cdot \sin \omega t) = \omega \cdot w_1 \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t; \\ u_2 = e_2 &= -\frac{d\psi_2}{dt} = -w_2 \cdot \frac{d}{dt} (\Phi_m \cdot \sin \omega t) = -\omega \cdot w_2 \cdot \Phi_m \cdot \cos \omega t. \end{aligned} \right\} \quad (1.4)$$

У (1.4)  $\Phi_m$  – амплітудне значення потоку трансформатора, а  $u \sim e$ , тому що падіння напруги на обмотках дорівнюють нулю. При цьому діючі значення ЕРС

$$\left. \begin{aligned} E_1 &= \frac{\omega \cdot w_1 \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f \cdot w_1 \cdot \Phi_m; \\ E_2 &= \frac{\omega \cdot w_2 \cdot \Phi_m}{\sqrt{2}} = \pi \cdot \sqrt{2} \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_m = 4,44 \cdot f \cdot w_2 \cdot \Phi_m; \end{aligned} \right\} \quad (1.5)$$

де  $\omega=2\pi f$ .

Відношення напруг в ідеальному трансформаторі називається коефіцієнтом трансформації:

$$n_{12} = U_1 / U_2 = E_1 / E_2 = w_1 / w_2 \quad (1.6)$$

Оскільки в ідеальному трансформаторі  $U_2 \cdot I_2 = U_1 \cdot I_1$ , то струми в первинній і вторинній обмотках можна визначити за формулами

$$I_1 / I_2 = n_{12}; I_2 = n_{12} I_1 \quad (1.7)$$

В реальних трансформаторах ці співвідношення практично не порушуються, тому що в силових трансформаторах потоки розсіювання і активні опори обмоток відносно невеликі.

Рівняння (1.1) можуть бути переписані у вигляді

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= i_1 \cdot r_1 + p \cdot L_1 \cdot i_1 + p \cdot M \cdot i_2; \\ -u_2 &= p \cdot M \cdot i_1 + i_2 \cdot r_2 + p \cdot L_2 \cdot i_2. \end{aligned} \right\} \quad (1.8)$$

Рівняння (1.1) і (1.8) описують перехідні і усталені режими роботи трансформатора. Щоб отримати комплексні рівняння трансформатора, що характеризують лише усталені режими роботи, потрібно в (1.1) або (1.8) замінити  $p=d/dt=j\omega$ . Після заміни  $p=j\omega$  з (1.8) маємо

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= I_1 \cdot r_1 + j\omega \cdot L_1 \cdot I_1 + j\omega \cdot M \cdot I_2; \\ -U_2 &= I_2 \cdot r_2 + j\omega \cdot L_2 \cdot I_2 + j\omega \cdot M \cdot I_1. \end{aligned} \right\} \quad (1.9)$$

Повний індуктивний опір первинної обмотки

$$\omega L_1 = \omega M + \omega L_{\sigma 1}, \quad (1.10)$$

де  $L_{\sigma 1}$  – індуктивність розсіювання первинної обмотки, відповідна потоку

розсіювання  $\Phi_{\sigma 1}$ ;

$\omega L_{\sigma 1}$  – індуктивний опір розсіювання первинної обмотки;

$\omega M$  – індуктивний опір взаємної індукції. Індуктивний опір вторинної обмотки

$$\omega L_2 = \omega M + \omega L_{\sigma 2}, \quad (1.11)$$

де  $\omega L_{\sigma 2}$  – індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки;  $L_{\sigma 2}$  – індуктивність розсіювання вторинної обмотки.

Підставляючи (1.10) до першого рівняння (1.9), отримуємо

$$U_1 = I_1 \cdot r_1 + j\omega \cdot M \cdot I_1 + j\omega \cdot L_{\sigma 1} \cdot I_1 + j\omega \cdot M \cdot I_2 \quad (1.12)$$

Вводячи струм  $I_0$ , дорівнюючий

$$I_0 = I_1 + I_2 \quad (1.13)$$

і підставляючи (1.13) у (1.12), маємо

$$U_1 = I_1 \cdot r_1 + j\omega \cdot M \cdot I_0 + j\omega \cdot L_{\sigma 1} \cdot I_2 \quad (1.14)$$

У (1.14)  $\omega M I_0 = -E_1$ ,  $\omega L_{\sigma 1} = x_1$

Тоді

$$U_1 = -E_1 + I_1 \cdot z_1 \quad (1.15)$$

де опір первинної обмотки

$$z_1 = r_1 + jx_1 \quad (1.16)$$

Перетворюючи друге рівняння у (1.9), як це було зроблено для першого рівняння, отримуємо

$$-U_2 = I_2 \cdot r_2 + j\omega \cdot M \cdot I_0 + j\omega \cdot L_{\sigma 2} \cdot I_2 \quad (1.17)$$

У (1.17)  $\omega L_{\sigma 2}$  – індуктивний опір розсіювання вторинної обмотки і  $x_2 = \omega L_{\sigma 2}$ , тоді

$$-U_2 = E_2 + I_2 \cdot z_2, \quad (1.18)$$

де опір вторинної обмотки

$$z_2 = r_2 + jx_2, \quad (1.19)$$

а ЕРС первинної і вторинної обмоток

$$E_1 = E_2 = -j\omega M I_0 \quad (1.20)$$

Тоді комплексні рівняння трансформатора з однаковим числом витків первинної і вторинної обмоток приймуть вигляд:

$$\left. \begin{aligned} U_1 &= -E_1 + I_1 \cdot z_1; \\ U_2 &= E_2 - I_2 \cdot z_2; \\ I_0 &= I_1 + I_2. \end{aligned} \right\} \quad (1.21)$$

Якщо до рівняння трансформатора (1.21) додати рівняння навантаження

$$U_2 = I_2 \cdot z, \quad (1.22)$$

отримаємо рівняння, що описують роботу трансформатора у сталих режимах.

## 1.2 Дослідження однофазного трансформатора

*Мета дослідження*

Дослідити однофазний трансформатор, навантажений активним опором.

*Зміст дослідження*

Визначення параметрів схеми заміщення за допомогою дослідів холостого ходу і короткого замикання

Зняття навантажувальної і робочої характеристик трансформатора:

*Опис віртуальної лабораторної установки*

Віртуальна лабораторна установка представлено на рис.1.2.

Модель містить:

- джерело змінної напруги  $E_1$  з бібліотеки *Power System Blockset / Electrical Sources*;

- вимірювачі напруги  $V_1$ ,  $V_2$  та вимірювачі струму  $I_1$ ,  $I_2$  в первинному та вторинному ланцюгах трансформатора з бібліотеки *Power System Blockset / Measurement*;

- досліджуваний трансформатор (*Linear Transformer*) і навантаження ( $R$  Load) з бібліотеки *Power System Blockset / Elements*;

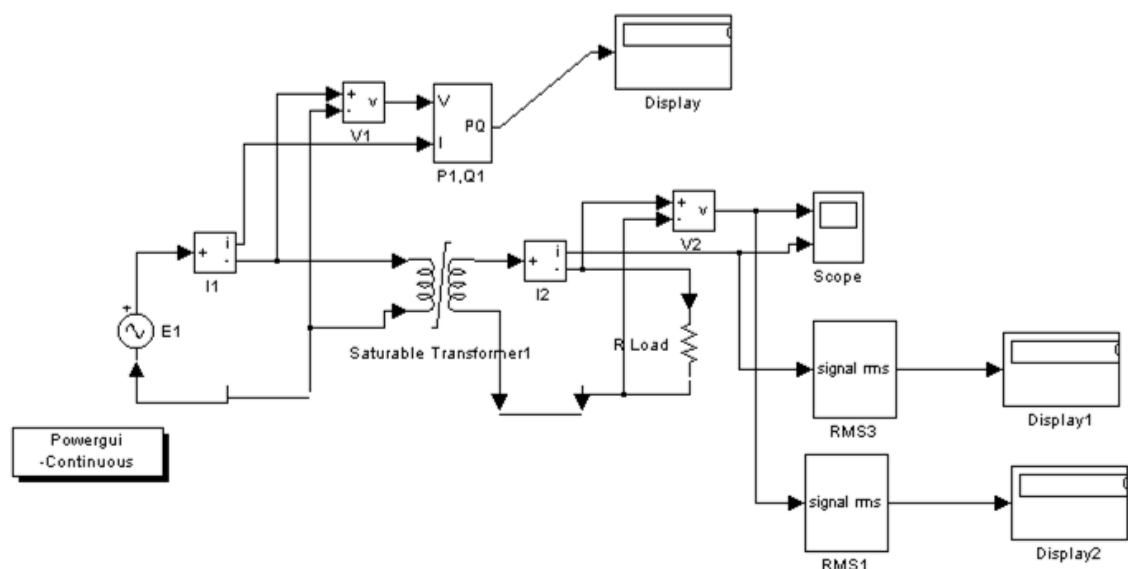


Рис.1.2 □ Модель для дослідження однофазного трансформатора

- вимірювачі активної та реактивної потужності в первинному та вторинному ланцюгах трансформатора ( $P_1, Q_1, P_2, Q_2$ ) з бібліотеки *Power System Blockset / Extras / Measurement*;

- блок користувача (*Powergui*), який вимірює значення  $V_1, V_2, I_1, I_2$ ;

- блоки *Display1, Display2* для кількісного представлення обмірюваних потужностей і блок *Scope* для спостереження форми кривих струму і напруги у вторинному ланцюзі є блокам головної бібліотеки *Simulink / Sinks*.

Параметри трансформаторів для виконання лабораторної роботи наведено в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Параметри трансформаторів

Тип трансформатора	$S_n$ [кВА]	$U_k$ [%]	$P_k$ [Вт]	$P_{10}$ [Вт]	$I_{10}$ [%]
ТС-10/066	10	4,5	280	90	7
ТС-16/066	16	4,5	400	125	5,8
ТС-25/066	25	4,5	560	180	4,8
ТС-40/066	40	4,5	800	250	4,0
ТС-63/066	63	4,5	1090	355	3,3
ТС-100/066	100	4,5	1500	500	2,7
ТС-160/066	160	4,5	2060	710	2,3

Нижче досліджується трансформатор типу ТС-100/066. Розрахунок параметрів схеми заміщення трансформатора здійснюється за формулами (1.23-1.26).

$$R_n(pu) = \frac{R_n}{Z_{bn}}; L_n(pu) = \frac{x_n}{Z_{bn}}, Z_{bn} = \frac{U_n^2}{S} \quad (1.23)$$

$$R_m = \frac{R_0}{Z_b} = \frac{S}{U_1 \cdot I_{10} \cos \varphi_0}, L_m = \frac{x_0}{Z_b} = \frac{S}{U_1 I_{10} \sin \varphi_0}, \varphi_0 = \arccos \frac{P_{10}}{U_1 I_{10}} \quad (1.24)$$

$$R_1 = R_2' = \frac{R_k}{2Z_b} = \frac{S U_k \cos \varphi_k}{2U_1^2 I_n}, L_{p1} = L_{p2}' = \frac{x_k}{2Z_b} = \frac{S U_k \sin \varphi_k}{2U_1^2 I_n}, \varphi_k = \arccos \frac{P_k}{U_k I_n} \quad (1.25)$$

$$I_n = \frac{S}{U_1} \quad (1.26)$$

Вікно налаштування параметрів трансформатора показано на рис. 1.3.

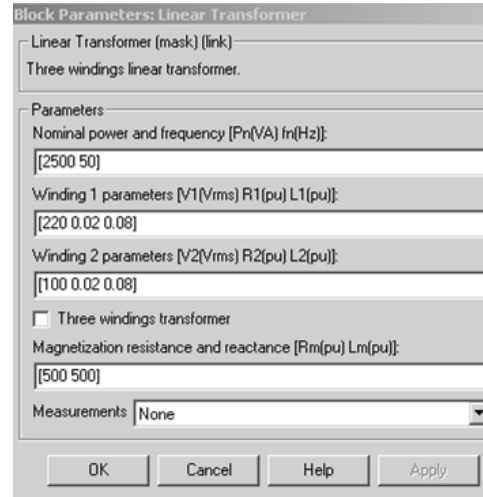


Рис. 1.3 □ Вікно налаштування параметрів трансформатора.

У полях вікна послідовно задаються:

- потужність трансформатора і частота;
- діюча напруга і відносні параметри схеми заміщення первинної обмотки;
- діюча напруга і відносні параметри схеми заміщення вторинних обмоток;
- відносні параметри гілки намагнічування;
- змінні стану трансформатора, які вимірюються блоком *Multimeter*.

Оскільки блок *Multimeter* не використовується, то в полі *Measurement* з випадаючого меню обрана опція *None*.

Вікно налаштування параметрів джерела живлення показано на рис. 1.4.

У полях вікна задаються:

- амплітуда джерела (В);
- початкова фаза в градусах;
- частота (Гц);
- зразок часу (с);

- змінні, вимірювані блоком Multimeter.

Напруга і частота джерела повинні відповідати параметрам трансформатора.

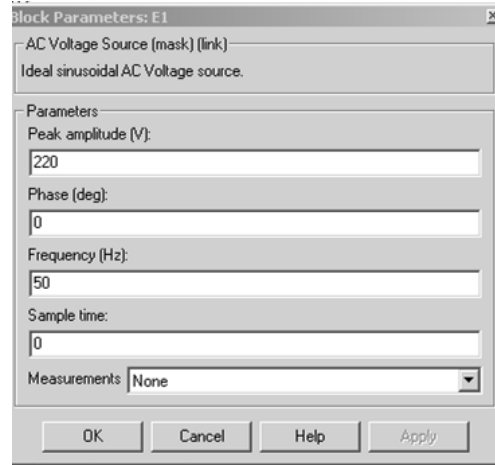


Рис.1.4 □ □ Вікно налаштування параметрів джерела живлення.

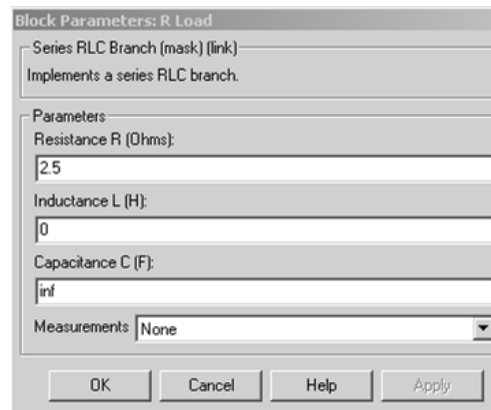


Рис.1.5 □ Вікно налаштування параметрів навантаження.

Вікно налаштування параметрів навантаження показано на рис.1.5. В полях вікна задаються  $R$ ,  $L$ ,  $C$  параметри навантаження. Для виключення реактивних елементів індуктивність повинна бути задана рівною нулю, а місткість – нескінченності ( $inf$ ). У вікні налаштування параметрів вимірювача потужності (рис. 1.6) вказується частота, на якій вимірюється активна і реактивна потужність.



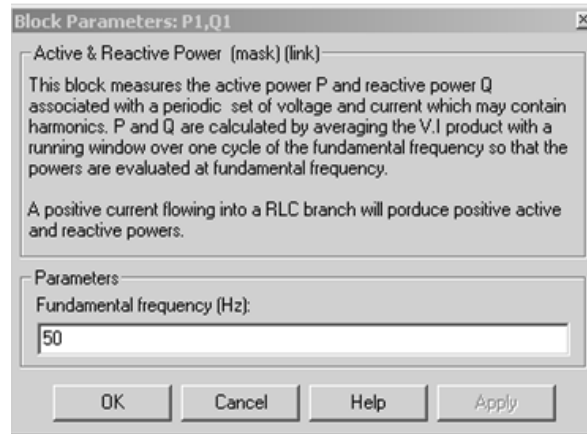


Рис.1.6 □□ Вікно настройки вимірювача активної та реактивної потужності

### *Порядок виконання роботи*

Тип трансформатора для виконання роботи задається викладачем. При самостійній роботі ці дані можна взяти з табл. 1.1. Вікно налаштування параметрів моделювання показано на рис. 1.7.

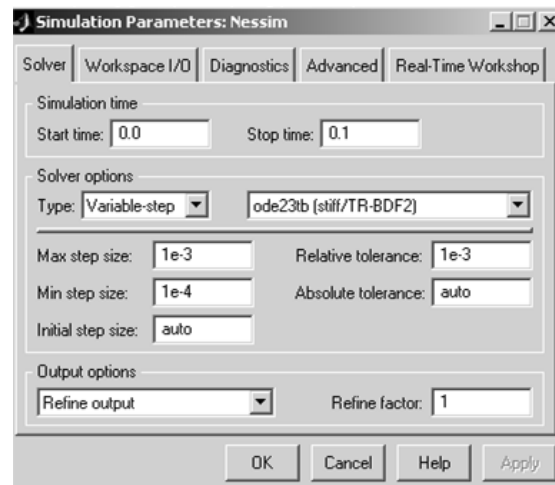


Рис.1.7 □ Вікно налаштування параметрів моделювання

При холостому ході навантаження відключене, трансформатор живиться номінальною напругою. Діючі значення напруг і струмів трансформатора при холостому ході визначаються у вікні блоку *Powergui*.

Нагадаємо, що активна потужність в режимі холостого ходу дорівнює втратам в осерді трансформатора.

Відносні параметри гілки намагнічування розраховуються за виразами (2.18-2.21).

Дослід короткого замикання проводиться при короткому замиканні у вторинному ланцюзі. При цьому напруга джерела живлення повинна дорівнювати напрузі короткого замикання трансформатора, ( $U=52$  В).

Нагадаємо, що активна потужність в режимі короткого замикання при первинному струмі короткого замикання рівному номінальному, визначає втрати в обмотках трансформатора. Після проведення дослідів і розрахунку параметрів слід порівняти їх з тими, які були введені в вікно параметрів (рис. 1.3).

Зняття навантажувальної і робочої характеристик трансформатора проводиться на моделі (рис. 1.2) при зміні опору навантаження  $(0,2-1,2)R_n$ . При цьому для кожного значення опору навантаження здійснюється моделювання. Номінальний опір навантаження розраховується за формулою

$$R_{ном} \approx \frac{U_1^2}{S} \quad (1.27)$$

При проведенні досліджень заповнюється таблиця 1.2.

Таблиця 1.2.

Навантаження	Виміри								Обчислення		
	$P_1$	$Q_1$	$U_1$	$I_1$	$P_2$	$Q_2$	$U_2$	$I_2$	$\varphi_1$	$\cos\varphi_1$	$\eta$
$R_n$ [Ом]	[Вт]	[ВАр]	[В]	[А]	[Вт]	[ВАр]	[В]	[А]	[град]	[град]	

Обчислення проводяться за виразами:

$$\eta = \frac{P_2}{P_1}; \varphi_1 = \arctg \frac{Q_1}{P_1} \quad (1.28)$$

За даними таблиці будується навантажувальна характеристика трансформатора і на окремому малюнку – робочі характеристики. Форми напруги і

струму на вторинній обмотці трансформатора, отримані за допомогою осцилоскопа *Scope* представлені на рис. 1.8.

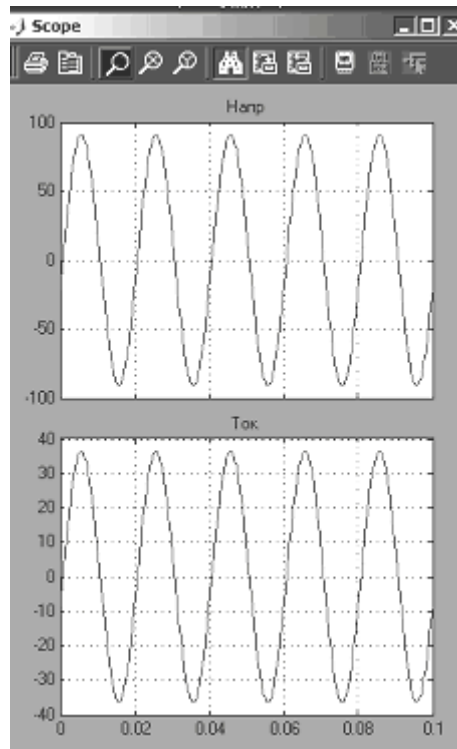


Рис. 1.8 □ Форми напруги і струму на вторинній обмотці трансформатора.

#### *Зміст звіту*

1. Схема моделі та опис віртуальних блоків.
2. Порівняльна таблиця заданих і визначених з дослідів холостого ходу і короткого замикання параметрів трансформатора.
3. Навантажувальна характеристика трансформатора  $U_2=f(I_2)$ .
4. Робочі характеристики трансформатора  $\eta$ ,  $\cos\varphi$ ,  $I_1$ ,  $U_2=f(I_2)$ .

### **1.3 Дослідження трифазного трансформатора**

#### *Мета дослідження*

Дослідження трифазного трансформатора при різних значеннях навантаження.

#### *Зміст дослідження*

Визначити первинні лінійні струми, первинні та вторинні фазні та лінійні напруги при заданих первинних лінійних напругах і вторинному струмі навантаження для:

- Двофазного навантаження для схеми  $Y/Y$ ;
- Однофазного навантаження для схеми  $Y/Y_0$ .

*Опис віртуальної лабораторної установки*

Віртуальну лабораторну установку представлено на рис. 1.10.

У порівнянні з моделлю однофазного трансформатора (рис. 1.2) тут не використовуються блоки для вимірювання основних характеристик (основні характеристики трифазного трансформатора або однофазного трансформатора ідентичні), але додано блок *Multimeter*, що вимірює струми і напруги трансформатора. Значення цих струмів зчитуються з вікна блоку Powergui. Там ж знімаються значення вхідного  $U_x$  і вихідного  $U_2$  напруг і різниця фаз між ними.

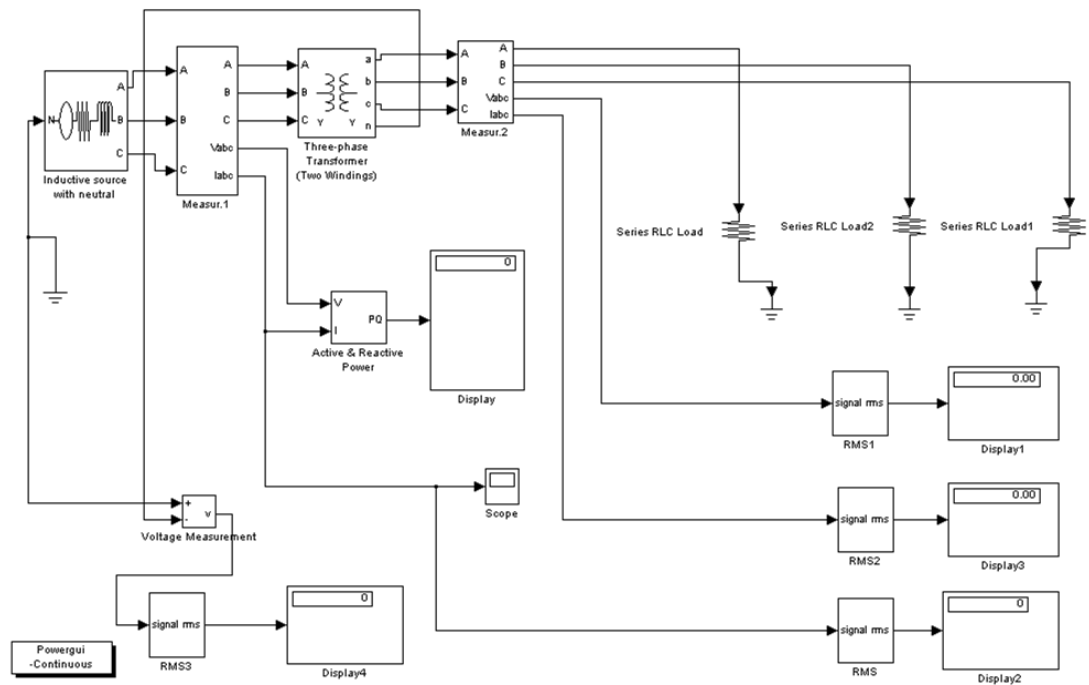


Рис. 1.9 □ Модель трифазного трансформатора

Вікно налаштування параметрів трифазного трансформатора показано на рис. 1.10. На відміну від вікна налаштування параметрів однофазного трансформатора воно містить два додаткових поля:

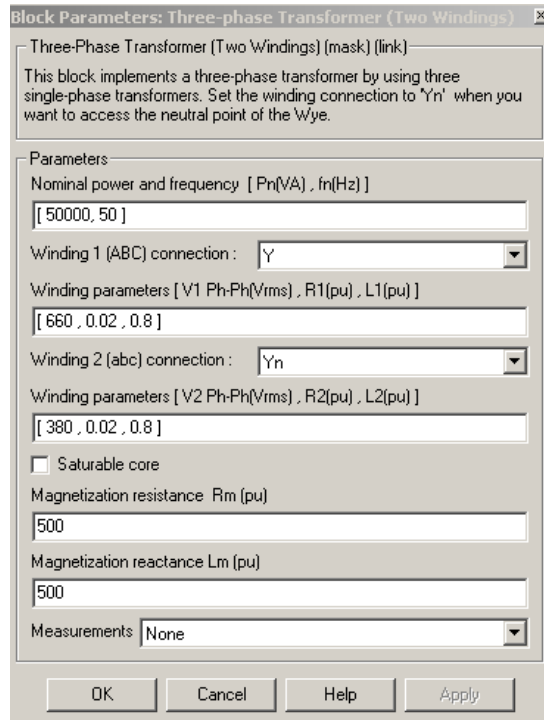


Рис. 1.10 □ Вікно налаштування параметрів трифазного трансформатора

– *Winding 1 (ABC) connection* – схема з'єднання первинних обмоток;

– *Winding 2 (abc) connection* – схема з'єднання вторинних обмоток.

У випадаючому меню цих полів задається схема з'єднання. У полі *Measurement* обрана опція *Winding Voltage*, при якій вимірюються напруги обмоток.

### *Порядок виконання роботи*

Тип трансформатора для виконання роботи задається викладачем. При самостійній роботі ці дані можна взяти з таб.1.1. Вікно налаштування параметрів моделювання показано на рис. 1.11.

1. Навантажити дві фази трансформатора, не перевищуючи її розрахункового струму на 20%.

2. Результати вимірювання занести в табл. 1.3 для схеми Y/Y .

Таблиця 1.3

Схема	$I_{2H}$	$I_A$		$I_B$		$I_C$		$U_{AB}$	$U_{BC}$	$U_{CA}$
		рознр.	експер.	рознр.	експер.	рознр.	експер.			
Y/Y										
Y/Y <sub>0</sub>										

Продовження табл. 1.3

Схема	$U_A$	$U_B$	$U_C$	$U_{ab}$	$U_{bc}$	$U_{ca}$	$U_a$	$U_b$	$U_c$
Y/Y									
Y/Y <sub>0</sub>									

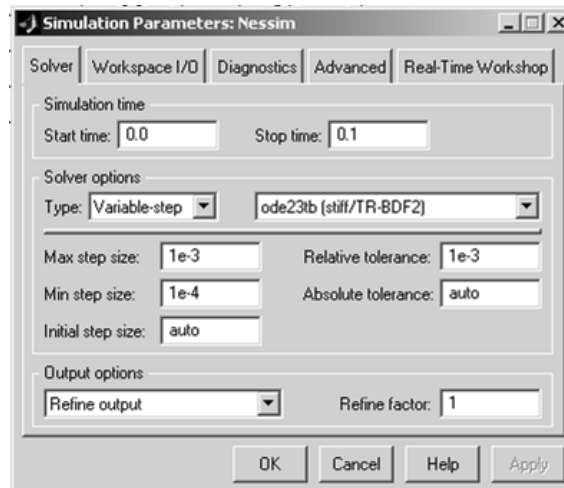


Рис. 1.11 □ Вікно налаштування параметрів моделювання

3. Навантажити одну фазу трансформатора, не перевищуючи її розрахункового струму на 20-30%.
4. Результати вимірювань занести в табл. 1 для схеми Y/Y<sub>0</sub>.
5. За даними досвіду можна визначити:

$$Z_H = \frac{U_0}{3I_0}; \quad r_H = \frac{P_0}{3I_0^2}; \quad x_H = \sqrt{Z_H^2 - r_H^2}.$$

Форми напруги і струму на вторинній обмотці трансформатора, отримані за допомогою осцилоскопа *Scope* представлені на рис. 1.12.

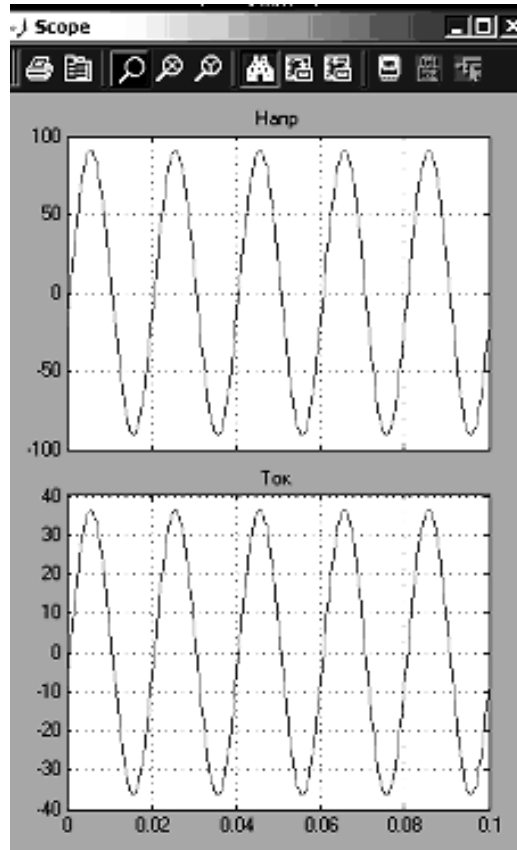


Рис. 1.12 □ Форми напруги і струму на вторинній обмотці трансформатора

### Зміст звіту

#### 1. Двофазна навантаження для схеми Y/Y .

Струм вторинного ланцюга  $\underline{I}_{a2} = S/U_2 = -\underline{I}_{b2} = I_{2\text{нач}}$ ;  $\underline{I}_c = 0$  нехтуючи струмом, що намагнічує, визначити струми в первинному колі:

$$\begin{aligned} \underline{I}_A = S/U_1 = -(\underline{I}_A / K) = I_{2\text{нач}} / K; \quad \underline{I}_B = \underline{I}_b = -(\underline{I}_B / K) = I_2 / K; \\ \underline{I}_c = -(\underline{I}_c / K) = 0; \end{aligned}$$

де  $I_{2\text{нач}}$  – струм навантаження,  $K = U_1 / U_2 = W_1 / W_2$  – коефіцієнт трансформації трансформатора.

Побудувати в масштабі векторні діаграми лінійних і фазних напруг первинної та вторинної ланцюга.

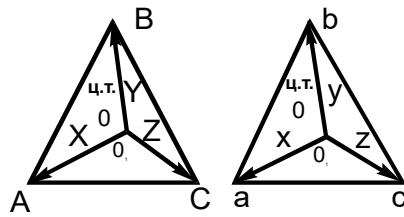


Рис. 1.13 □ Векторна діаграма при визначенні двофазного навантаження

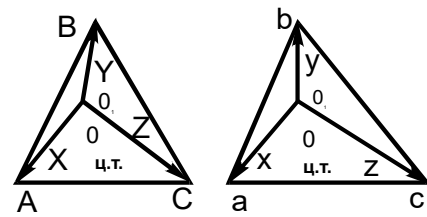


Рис. 1.14 □ Векторна діаграма при однофазному навантаженні

2. Однофазне навантаження для схеми  $Y/Y_0$ .
3. Схема моделі та опис віртуальних блоків.
4. Заповнені таблиці.
5. Векторні діаграми для кожного пункту роботи.

#### 1.4 Дослідження паралельної роботи трансформаторів

##### *Мета дослідження*

Дослідження трифазних трансформаторів.

##### *Зміст дослідження*

Вивчити умови паралельної роботи трансформаторів і перевірити вплив окремих факторів на режим паралельної роботи.

##### *Опис віртуальної лабораторної установки*

Віртуальну лабораторну установку представлено на рис. 1.15. Модель містить:

- джерело змінної напруги  $E_1$  з бібліотеки *Power System Blockset / Electrical Sources*;
- вимірювачі напруги  $V_1$ ,  $V_2$  та вимірювачі струму  $I_1$ ,  $I_2$  в первинної та вторинної ланцюгах трансформатора з бібліотеки *Power System Blockset / Measurement*;
- досліджуваний трансформатор (*Linear Transformer*) і навантаження (*R Load*) з бібліотеки *Power System Blockset / Elements*;



- вимірювачі активної та реактивної потужності в первинній та вторинній ланцюгах трансформатора ( $P_1, Q_1, P_2, Q_2$ ) з бібліотеки *Power System Blockset / Extras / Measurement*;
- блок користувача (*Powergui*), який вимірює значення  $V_1, V_2, I_1, I_2$ ;
- блоки *Display1, Display2* для кількісного представлення обмірюваних потужностей і блок *Scope* для спостереження форми кривих струму і напруги у вторинному ланцюзі є блокам головної бібліотеки *Simulink / Sinks*.

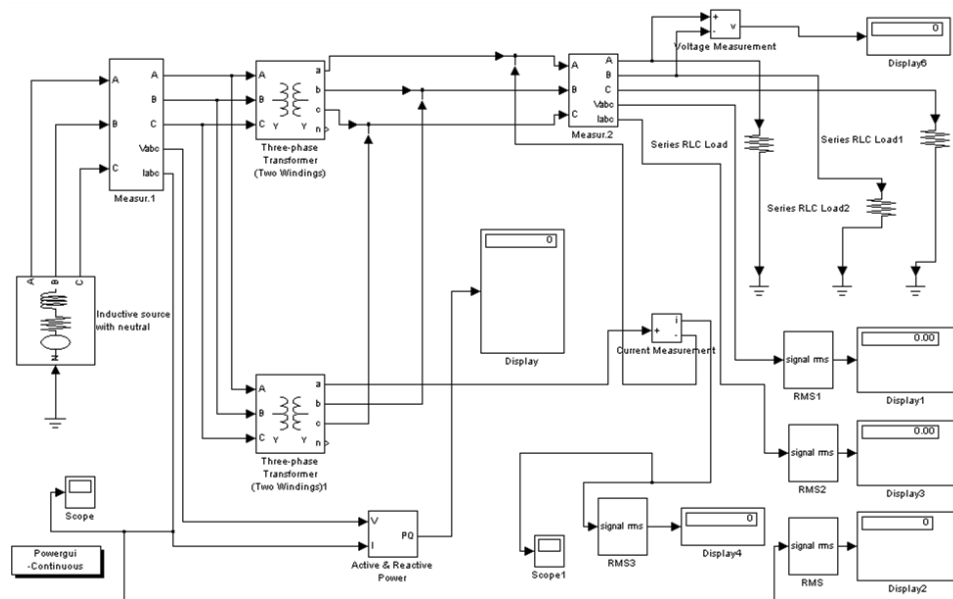


Рис. 1.15 □ Модель для дослідження паралельної роботи трансформаторів

### Порядок виконання роботи

Тип трансформатора для виконання роботи задається викладачем. При самостійній роботі ці дані можна взяти з табл. 1.1. Вікно налаштування параметрів моделювання показано на рис. 1.16.

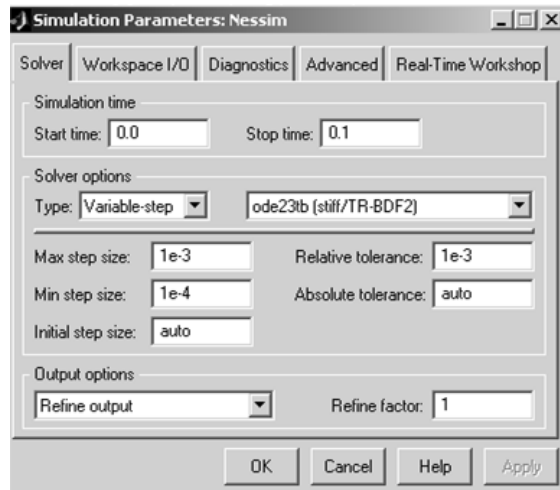


Рис. 1.16 □ Вікно налаштування параметрів моделювання

1. Умови рівності коефіцієнтів трансформації.
2. Змінюючи навантаження, занести показання приладів у табл. 1.4

$U_{abc}$	$U$							$K_1 = U_H / U_{abc}$
$I_{abc}$	$I_a$							

3. Змінити параметри трансформатора 2 (*Winding parameters V2*) див. рис.1.17, змінюючи навантаження, занести показання приладів у табл.1.5, звернути увагу на *Scope1*.

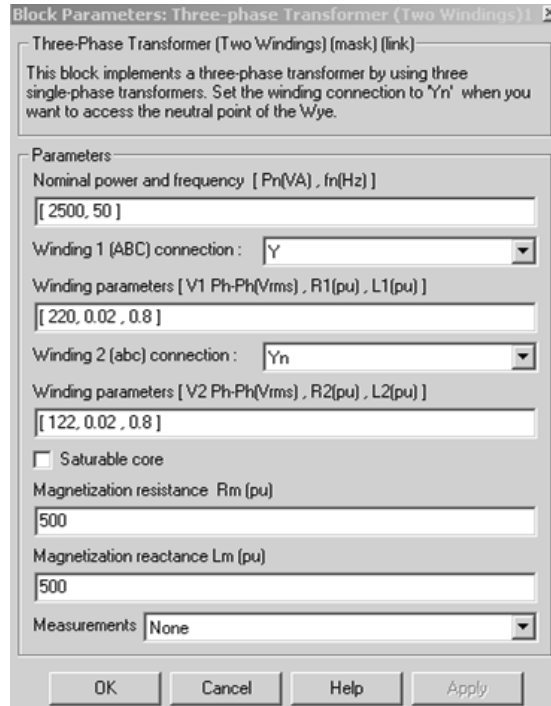


Рис. 1.17 □□ Вікно налаштування параметрів трансформатора

Таблиця 1.5

$U_{abc}$								$K_2 = U_H / U_{abc}$
$I_{abc}$								

4 Змінити місцями фазу А з фазою В трансформатора 2, змінюючи навантаження, занести показання приладів у табл. 1.6.

Таблиця 1.6

$U_{abc}$								$K_3 = U_H / U_{abc}$
$I_{abc}$								

### Зміст звіту

1. На підставі табл. 1.4-1.6 побудувати залежність в одній координатній системі і позначити коефіцієнти трансформації для кожної залежності.
2. Зробити висновок щодо табл. 1.5, 1.6 про можливість включення трансформатора на паралельну роботу (укладення повідомити викладачу).
3. Схема моделі та опис віртуальних блоків.

4. Заповнені таблиці.
5. Векторні діаграми для кожного пункту роботи.
6. Форми напруги і струму на вторинній обмотці трансформатора, отримані за допомогою осцилоскопа *Scope* представлені на рис. 1.18.

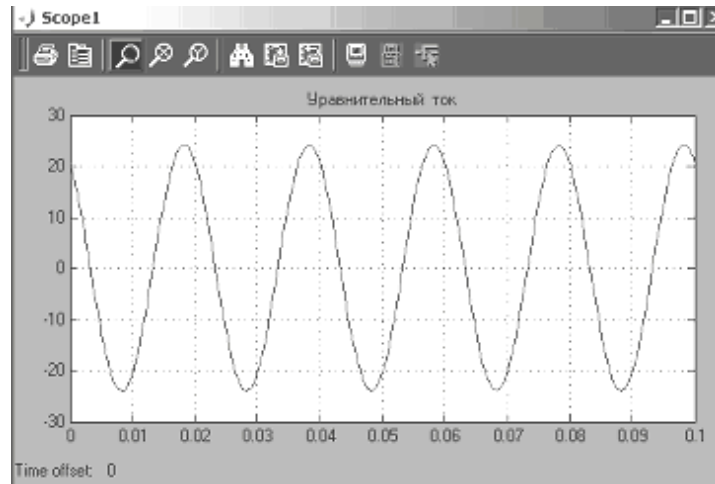


Рис. 1.18 □□ Амплітуда зрівняльного струму на холостому ході

## РОЗДІЛ 2

### ДОСЛІДЖЕННЯ АСИНХРОННИХ МАШИН НА ВІРТУАЛЬНИХ МОДЕЛЯХ

#### 2.1 Математична модель асинхронної машини

Для того щоб отримати рівняння асинхронної машини, ми розглянемо ідеалізовану двофазну асинхронну машину. В ідеалізованій машині у повітряному зазорі кругове поле та вищі гармоніки відсутні. Розглянемо двофазну симетричну машину з однаковим числом витків на статорі та роторі  $w_{\alpha}^s = w_{\beta}^s = w_{\alpha}^r = w_{\beta}^r$  (рис. 2.1).

Рівняння асинхронної машини виходять з рівнянь узагальненої машини. Для нерухомого щодо статора спостерігача в системі координат  $\alpha, \beta$  диференціальні рівняння асинхронної машини з замкнутою накоротко обмоткою ротора  $u_{\alpha}^r = u_{\beta}^r = 0$  мають наступний вигляд

$$\begin{pmatrix} u_{\alpha}^s \\ 0 \\ 0 \\ u_{\beta}^s \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r_{\alpha}^s + \frac{d}{dt} L_{\alpha}^s & \frac{d}{dt} M & 0 & 0 \\ \frac{d}{dt} M & r_{\alpha}^r + \frac{d}{dt} L_{\alpha}^r & L_{\beta}^r \omega_p & M \omega_p \\ -M \omega_p & -L_{\alpha}^r \omega_p & r_{\beta}^r + \frac{d}{dt} L_{\beta}^r & \frac{d}{dt} M \\ 0 & 0 & \frac{d}{dt} M & r_{\beta}^s + \frac{d}{dt} L_{\beta}^s \end{pmatrix} \times \begin{pmatrix} i_{\alpha}^s \\ i_{\alpha}^r \\ i_{\beta}^r \\ i_{\beta}^s \end{pmatrix}; \quad (2.1)$$

$$M_{\text{эм}} = \frac{m}{2} M (i_{\beta}^s i_{\alpha}^r - i_{\alpha}^s i_{\beta}^r), \quad (2.2)$$

де  $u_{\alpha}^s, u_{\beta}^s$  – напруга на обмотках статора;  $i_{\alpha}^s, i_{\alpha}^r, i_{\beta}^r, i_{\beta}^s$  – струм в обмотках ротора і статора по осям  $\alpha$  і  $\beta$ .

Повні індуктивності

$$L = M + L_{\sigma},$$

де  $M$  – взаємна індуктивність між обмотками статора і ротора по осях  $\alpha$  і  $\beta$ ;  $L_\sigma$  – індуктивність розсіяння обмотки.

Рівняння (2.1) і (2.2) описують процеси перетворення енергії в асинхронних машинах в перехідних та усталених режимах.

Рівняння напруги в не перетвореному записі виглядають наступним чином:

$$\left. \begin{aligned} u_\alpha^s &= r_\alpha^s \cdot i_\alpha^s + \frac{d}{dt} \cdot L_\alpha^s \cdot i_\alpha^s + \frac{d}{dt} \cdot M \cdot i_\alpha^r; \\ 0 &= \frac{d}{dt} \cdot M \cdot i_\alpha^s + r_\alpha^r \cdot i_\alpha^r + \frac{d}{dt} \cdot L_\alpha^r \cdot i_\alpha^r + L_\beta^r \cdot \omega_p \cdot i_\beta^r + M \cdot \omega_p \cdot i_\beta^s; \\ 0 &= -M \cdot \omega_p \cdot i_\alpha^s - L_\alpha^r \cdot \omega_p \cdot i_\alpha^r + r_\beta^r \cdot i_\beta^r + \frac{d}{dt} \cdot L_\beta^r \cdot i_\beta^r + \frac{d}{dt} \cdot M \cdot i_\beta^s; \\ u_\beta^s &= \frac{d}{dt} \cdot M \cdot i_\beta^r + r_\beta^s \cdot i_\beta^s + \frac{d}{dt} \cdot L_\beta^s \cdot i_\beta^s; \end{aligned} \right\} \quad (2.3)$$

Рівняння для нерухомих обмоток записуються так само, як і для трансформаторів, а в напругах обертаючихся обмоток є трансформаторні ЕРС та ЕРС обертання.

$$\begin{aligned} &L_\beta \omega_p i_\beta^r + M \omega_p i_\beta^s; \\ &- M \omega_p i_\alpha^s - L_\alpha^r \omega_p i_\alpha^r. \end{aligned} \quad (2.4)$$

Рівняння (2.1) та (2.2) записані для псевдонерухомих обмоток ротора за умови збереження тих самих струмів, втрат та реактивної потужності, що і в реальній машині. Напруга на обмотках статора і ротора машини врівноважуються трансформаторними ЕРС та ЕРС обертання.

Диференційні рівняння (2.1), (2.2) не мають аналітичного розв'язання, тому що мають перемножені змінні (2.2). Тому можливі приблизні вирішення, і для дослідження цих рівнянь широко застосовуються комп'ютери. Щоб отримати із диференційних рівнянь асинхронної машини (2.1),(2.2) комплексні рівняння, які описують усталені режими роботи асинхронної машини,

треба замінити оператор диференціювання  $\frac{d}{dt} \Leftrightarrow j\omega$ . Рівняння напруг асинхронної машини з (2.1) мають наступний вигляд

$$\left. \begin{aligned} U_{\alpha}^s &= r_{\alpha}^s I_{\alpha}^s + j\omega L_{\alpha}^s I_{\alpha}^s + j\omega M I_{\alpha}^r; \\ 0 &= j\omega M I_{\alpha}^s + r_{\alpha}^r I_{\alpha}^r + j\omega L_{\alpha}^r I_{\alpha}^r + L_{\beta}^r \omega_p I_{\beta}^r + M \omega_p I_{\beta}^s; \\ 0 &= -M \omega_p I_{\alpha}^s - L_{\alpha}^r \omega_p I_{\alpha}^r + r_{\beta}^r I_{\beta}^r + j\omega L_{\beta}^r I_{\beta}^r + j\omega M I_{\beta}^s; \\ U_{\beta}^s &= j\omega M I_{\beta}^r + r_{\beta}^s I_{\beta}^s + j\omega L_{\beta}^s I_{\beta}^s. \end{aligned} \right\} \quad (2.5)$$

Рівняння напруг і рівняння руху в усталеному режимі можуть розглядатися незалежно одне від одного, тому проаналізуємо тільки рівняння напруги.

Оскільки розглядається симетрична машина, доцільно параметри обмоток статора позначити  $L_s = L_{\alpha}^s = L_{\beta}^s$ , та  $R_s = r_{\alpha}^s = r_{\beta}^s$ , а ротора  $L_r = L_{\alpha}^r = L_{\beta}^r$  та  $R_r = r_{\alpha}^r = r_{\beta}^r$ . Переходячи в усталеному режимі до індуктивних опорів, отримуємо

$$\begin{aligned} j\omega L_s &= j\omega M + j\omega L_{\sigma}^s; \\ j\omega L_r &= j\omega M + j\omega L_{\sigma}^r, \end{aligned} \quad (2.6)$$

де  $\omega L_s$  і  $\omega L_r$  – повні індуктивні опору обмоток статора і ротора;

$x_0 = \omega M$  – індуктивний опір взаємної індукції;

$x_s = \omega L_{\sigma}^s$ ,  $x_r = \omega L_{\sigma}^r$  – індуктивні опори розсіювання обмоток статора і ротора.

Від чотирьох рівнянь напруг (2.5) при аналізі усталених процесів в асинхронній машині можна перейти до двох, якщо звернутися до узагальнюючих векторів напруг, струмів та опорів. Ввівши позначення для результируючих ве-

кторів напруг статора і ротора  $U_s, U_r$ , струмів  $I_s$  та  $I_r$ , а також для опорів  $R_s, R_r$  і індуктивностей  $L_s, L_r$ , з (2.5) – отримаємо

$$\left. \begin{aligned} U_s &= R_s I_s + j\omega L_s I_s + j\omega M I_r; \\ 0 &= R_r I_r + j\omega L_r I_r + j\omega M I_s - jM\omega_p I_s - jL_r\omega_p I_r. \end{aligned} \right\} \quad (2.7)$$

Враховуючи, що потужність в асинхронному двигуні передається від обмотки статора до обмотки ротора, і враховуючи, що

$x_0 = \omega M, x_s = \omega L_s^s, x_r = \omega L_r^r$  і відносна частота обертання  $v = \omega_p / \omega$ , маємо

$$\left. \begin{aligned} U_s &= R_s I_s + jx_s I_s + jx_0 I_s + jx_0 I_r; \\ 0 &= -R_r I_r - jx_r I_r - jx_0 I_r - jx_0 I_s + jx_0 I_s v + jx_0 I_r v + jx_r I_r v. \end{aligned} \right\} \quad (2.8)$$

Вводячи заміну змінних,  $I_0 = I_s + I_r$  з (2.8) отримуємо

$$\left. \begin{aligned} U_s &= R_s I_s + jx_s I_s + jx_0 I_0; \\ 0 &= -R_r I_r - jx_r I_r (1 - v) - jx_0 I_0 (1 - v). \end{aligned} \right\} \quad (2.9)$$

Використовуючи в (2.9) вираз для ковзання  $s = (\omega_c - \omega_p) / \omega_c = 1 - v$ , знаходимо

$$\left. \begin{aligned} U_s &= R_s I_s + jx_s I_s + jx_0 I_0; \\ 0 &= -R_r I_r - jx_r I_s - jx_0 I_0 s. \end{aligned} \right\} \quad (2.10)$$

Далі, вводячи ЕРС при холостому ході  $E_0 = -jx_0 I_0$ , переходимо до рівнянь асинхронній машини в наступному вигляді:

$$\left. \begin{aligned} U_s &= -E_0 + R_s I_s + jx_s I_s; \\ 0 &= E_0 s - R_r I_r - jx_r I_r s; \\ I_0 &= I_s + I_r. \end{aligned} \right\} \quad (2.11)$$

Електрорушійна сила  $E_0$ , або, як її іноді називають, проти-ЕРС, врівноважує напругу мережі. Коли машина підключена до мережі при навантаженні



на валу, що дорівнює нулю  $U_s \approx -E_0$ , і в обмотках машини струми близькі до нуля.

При подальшому розгляді теорії усталених режимів асинхронній машини доцільно користуватися опорами статора і ротора

$$z_s = R_s + jx_s; z_r = R_r + jx_r.$$

Поділивши друге рівняння в (2.11) на  $s$ , отримаємо рівняння асинхронній машини

$$\left. \begin{aligned} U_s &= -E_0 + I_s z_s; \\ 0 &= E_0 - I_r \frac{R_r}{s} - jx_r I_r; \\ I_0 &= I_s + I_r. \end{aligned} \right\} \quad (2.12)$$

Оскільки  $\frac{R_r}{s} = R_r + R_r \frac{1-s}{s}$ , то підставивши цей вираз в (2.12), отримаємо рівняння асинхронної машини, схожі на рівняння трансформатора:

$$\left. \begin{aligned} U_s &= -E_0 + I_s z_s; \\ 0 &= E_0 - I_r z_r - I_r R_r \frac{1-s}{s}; \\ I_0 &= I_s + I_r. \end{aligned} \right\} \quad (2.13)$$

Рівняння (2.13) описують процеси електромеханічного перетворення енергії в асинхронних машинах в усталених режимах. Для них запропоновані векторні діаграми, кругові діаграми та схеми заміщення асинхронних машин. За рівнянням (2.13) теорія асинхронної машини розглядається як теорія трансформатора, у вторинну обмотку якого вводиться активний опір  $R_r \frac{1-s}{s}$ . Активна потужність, яка виділяється на цьому опорі, пропорційна корисній потужності на валу машини.

## 2.2 Дослідження трифазної асинхронної машини з короткозамкненим ротором

### *Мета дослідження*

Дослідження трифазної асинхронної машини з короткозамкненим ротором.

### *Зміст дослідження*

1. Зняття механічної характеристики машини в режимах двигуна і генератора.
2. Зняття робочих характеристик машини в режимі двигуна.

### *Опис віртуальної лабораторної установки*

Віртуальну лабораторну установку представлено на рис. 2.1.

Вона містить:

- джерело змінної трифазної напруги *Source* з бібліотеки *Power System Blockset / Extras / Electrical Sources*;
- вимірювач трифазної напруги і струму *Three-Phase VI Measurement* з бібліотеки *Power System Blockset / Extras / Measurement*;
- досліджувану трифазну асинхронну машину *Asynchronous Machine* з бібліотеки *Power System Blockset / Machines*;
- вимірювач активної та реактивної потужності  $P_1$   $Q_1$  з бібліотеки *Power System Blockset / Extras / Measurement*;
- блок *Display* для кількісного представлення обмірюваних потужностей і блок *Scope* для спостереження струму ротора і статора, а також швидкості і моменту асинхронної машини з головної бібліотеки *Simulink / Sinks*;

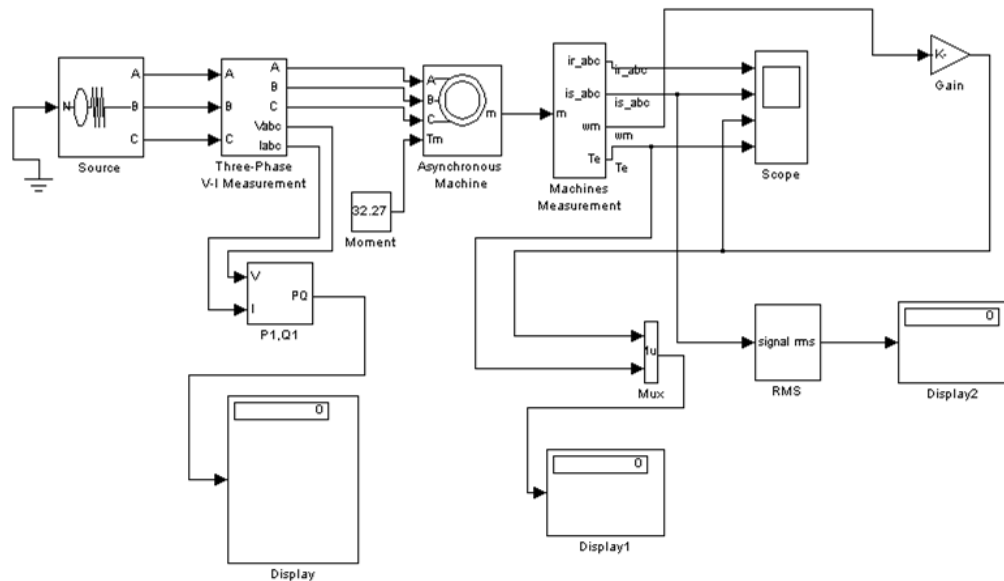


Рис. 2.1 □ Модель для дослідження асинхронної машини

- блок *Moment* для завдання механічного моменту на валу машини з головної бібліотеки *Simulink / Source*;
- блок *Machines Measurement* з бібліотеки *Power System Blockset / Machines*;
- блок *Display1* для кількісного представлення обмірюваних електромагнітного моменту (Нм) і швидкості (рад / с) машини з головної бібліотеки *Simulink / Sinks*;
- блок *Mux*, що об'єднує три сигнали в один векторний з головної бібліотеки *Simulink / Signal & System*.

Вікно налаштування параметрів асинхронної машини показано на рис. 2.2.

У полях вікна послідовно задаються:

- тип ротора (*Rotor Type*), у випадаючому меню цього поля можна задати або короткозамкнений, або фазний ротор;
- система відліку при аналізі (*Reference frame*);
- потужність, номінальне діюче лінійна напруга і частота;

- параметри схеми заміщення статора;
- параметри схеми заміщення ротора;
- параметри гілки намагнічування;
- момент інерції, коефіцієнт в'язкого тертя, число пар полюсів;
- початкові умови для моделювання (ковзання, положення ротора, струми статора та їх початкові фази).

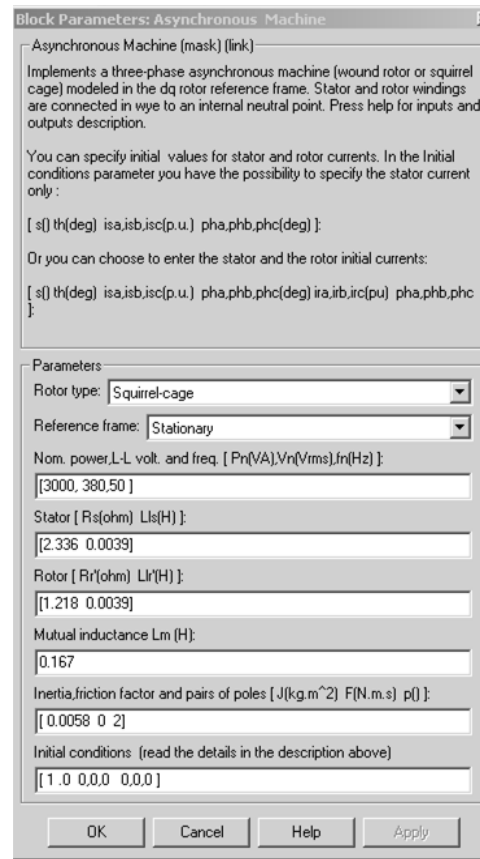


Рис. 2.2 □ Вікно налаштування параметрів асинхронної машини

Параметри машини частково беруться з паспортних даних, а частково розраховуються за рівняннями 2.14-2.17.

Таблиця 2.1 Параметри двигунів

Тип двигуна	$P_n$ [кВт ]	$n$ [об/хв]	$\eta$ [%]	$\cos$ $\varphi$	$I_n$ [А ]	$k_i =$ $I_n/I_H$	$m_n =$ $M_n/M_H$	$m_{\max} =$ $M_{\max}/M_n$	$J$ [кГм]
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
RA71B2	0.55	2850	74	0.84	1.8	6.5	2.3	2.4	0.0005

RA80A2	0.75	2820	74	0.83	2	5.3	2.5	2.7	0.0008
RA80B2	1.1	2800	77	0.86	2	5.2	2.6	2.8	0.0012
RA80A4	0.55	1400	71	0.8	1	5	2.3	2.8	0.0018
RA80B4	0.75	1400	74	0.80	2	5	2.5	2.8	0.0023
RA90S2	1.5	2835	79	0.87	3	6.5	2.8	3	0.0010
RA90L2	2.2	2820	82	0.87	4	6.5	2.9	3.4	0.0015
RA100L4	2.2	1420	79	0.82	5	6	2.2	2.6	0.0048
RA100L4	3	1420	81	0.81	7	6.2	2.2	2.6	0.0058
RA112M2	4	2895	84	0.87	9	6.8	2.2	3.3	0.0082
RA112M4	4	1430	86	0.84	9	6.5	2.2	2.9	0.0103
RA132S2	5.5	2880	89	0.89	11	6.5	2.4	3	0.0155
RA132S2	7.5	2890	89	0.89	15	7	2.5	3.2	0.0185

$$s_n = \frac{n_1 - n_2}{n_1}, \omega_n = \frac{pn^2}{30}, \omega_1 = \frac{2\pi f_1}{p} \quad (2.14)$$

$$M_n = \frac{P_n}{\omega_n}, s_{кр} = s_n (m_{\max} + \sqrt{m_{\max} - 1}), R_r = \frac{1}{3} \cdot \frac{(P_n + \Pi_{\text{мех}})}{I_n^2 \frac{1 - s_n}{s_n}} \quad (2.15)$$

$$\Pi_{\text{эл}} = 3I_n^2 R_s, R_s = \frac{U \cos \varphi (1 - \eta)}{I_n} - C^2 R_r - \frac{\Pi_{\text{мех}}}{3I_n^2} \quad (2.16)$$

$$L_{sp} = L_{rp} = \frac{U}{4\pi f (1 + C^2) k_1 I_n}, L_s = \frac{U}{2\pi f_1 I_n \sqrt{1 - (\cos \varphi)^2} - \frac{2}{3} \frac{2\pi f_1 M_{\max} s_n}{pU s_{кр}}}, L_m = L_s - L_{sp} \quad (2.17)$$

\* Лінійна номінальна напруга для усіх машин 380 В.

Вікно налаштування параметрів універсального блоку вимірювання змінних машини показано на рис. 2.3. У випадаючому меню поля *Machine type* задається тип машини. Прапорцями вибираються змінні для вимірювання.

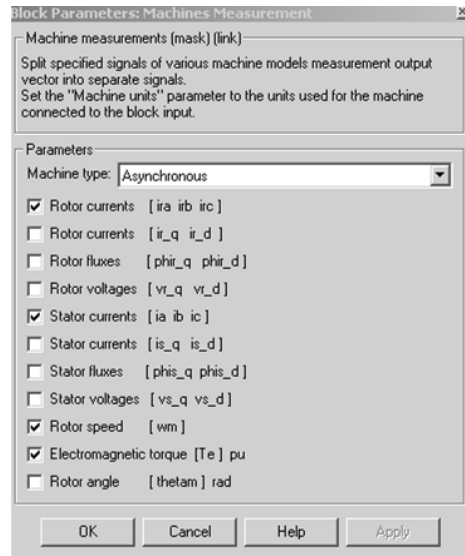


Рис. 2.3 □ Вікно налаштування параметрів блоку вимірювання

Вікно налаштування параметрів джерела живлення показано на рис. 2.4.

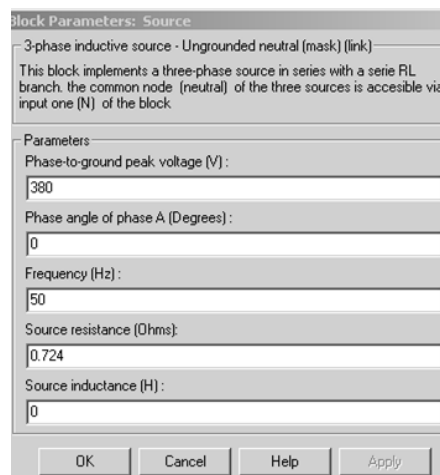


Рис. 2.4 □ Вікно налаштування параметрів трифазного джерела живлення

У полях вікна задаються:

- амплітуда фазної напруги джерела (В);
- початкова фаза в градусах;
- частота (Гц);
- внутрішній опір (Ом) і індуктивність джерела (Гн).

Напруга і частота джерела повинні відповідати параметрам асинхронної машини.

Вікно налаштування параметрів блоку вимірювання активної та реактивної потужності показано на рис. 2.5.

Тут задається тільки один параметр - частота, яка повинна дорівнювати частоті джерела живлення.

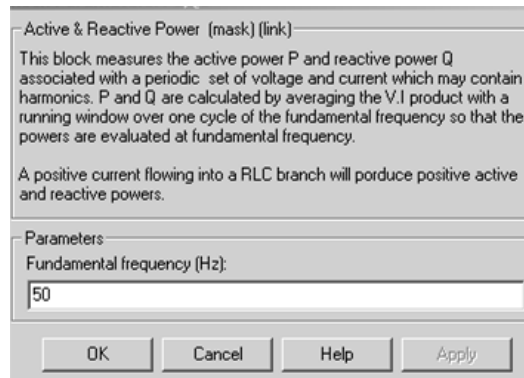


Рис. 2.5 □ □ Вікно налаштування блоку вимірювання потужності

Вікно налаштування дисплея показано на рис. 2.6. У полях вікна налаштування вказується формат представлення числових результатів, в полі *Decimation* (розбивка) задається число кроків обчислення, через які значення виводяться на дисплей. Установка в полі *Sample time* значення -1 синхронізує роботу блоку з кроком обчислень.

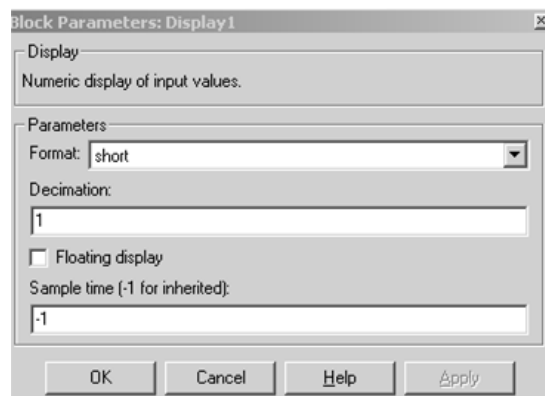
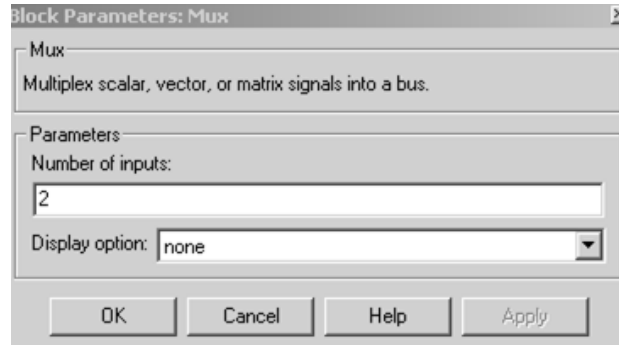


Рис. 2.6 □ Вікно налаштування параметрів дисплея

### *Порядок виконання роботи*

Вікно налаштування блоку *Mux*, що об'єднує два сигнали в один векторний, показано на рис. 2.7. У полях вікна налаштування задаються число входів і зовнішній вигляд представлення блоку.

Рис. 2.7 □ Вікно налаштування блоку *Mux*

Параметри асинхронної машини для виконання роботи задаються викладачем. При самостійній роботі ці дані вибираються з таблиці 2.1 і розраховуються, користуючись паспортними даними. Вікно налаштування параметрів моделювання показано на рис. 2.8.

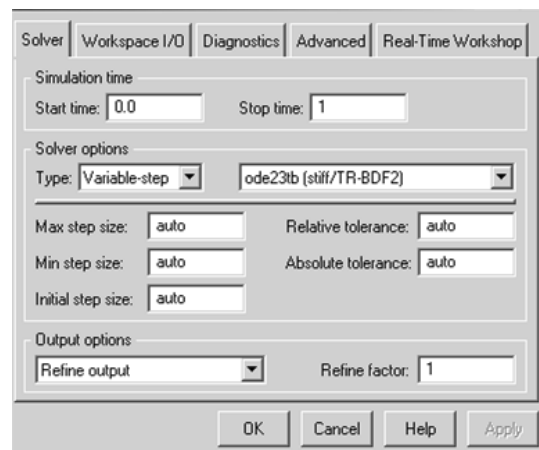


Рис. 2.8 □ Вікно налаштування параметрів моделювання

Зняття механічної характеристики машини в режимах двигуна і генератора відповідно до п. 1 змісту дослідження проводиться на моделі (рис. 2.1) при змінній навантажувальній моменту у всьому діапазоні  $-1,5$ – $1,5$  від номінального. При цьому для кожного значення моменту навантаження здійснюється моделювання. При проведенні досліджень заповнюється таблиця 2.2.

Таблиця 2.2

$M$ [Нм]	$\omega$ [рад/с]



Зняття робочих характеристик двигуна відповідно до п.2 змісту дослідження проводиться на моделі (рис. 2.1) при змінненні навантажувального моменту в межах 0–1,2 від номінального. При цьому для кожного значення моменту навантаження здійснюється моделювання. При проведенні досліджень заповнюється таблиця 2.3.

Таблиця 2.3

Виміри						Розрахунки				
M	P1	Q1	U1	I1	$\omega$	$\varphi$	$\cos\varphi$	P2	$\eta$	s
[Нм]	[Вт]	[ВАр]	[В]	[А]	[рад/с]	[град]		[Вт]	[%]	[%]

Розрахунки проводяться згідно з формулами:

$$\varphi = \arctg \frac{Q_1}{P_1}, P_2 = M\omega, \eta = \frac{P_2}{P_1}, s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \quad (2.18)$$

За даними таблиць будується механічна характеристика машини і, на окремому графіку, – робочі характеристики.

Тимчасові залежності змінних стану машини можна спостерігати на екрані осцилографа (рис. 2.9). Тут видно і перехідний процес при пуску машини, і усталені процеси.

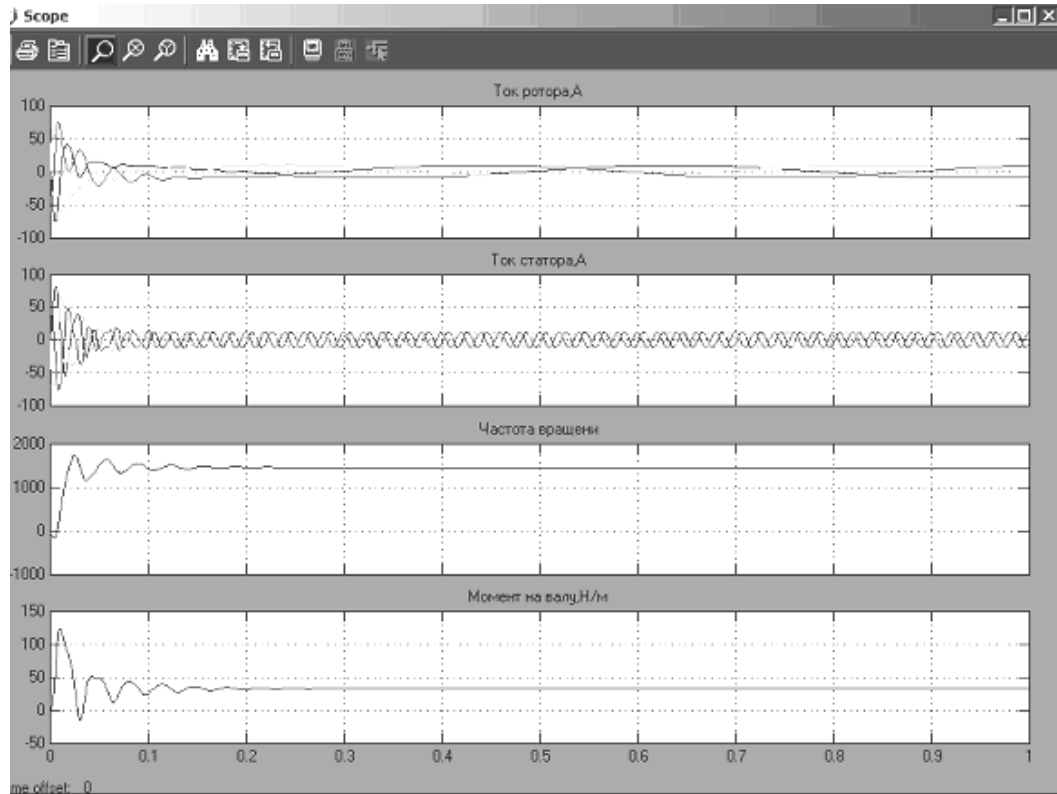


Рис. 2.9 □ Часові залежності змінних стану машини при роботі

### *Зміст звіту*

1. Схема моделі та опис віртуальних блоків.
2. Механічна характеристика машини в режимах двигуна і генератора.
3. Робочі характеристики машини в руховому режимі.

## **2.3 Дослідження трифазної асинхронної машини з фазним ротором**

### *Мета дослідження*

Дослідження трифазної асинхронної машини з фазним ротором.

### *Зміст дослідження*

Зняття механічних характеристик машини в режимі двигуна.

### *Опис віртуальної лабораторної установки*

Віртуальну лабораторну установку представлено на рис. 2.10. Порівнюючи модель (рис. 2.1) з представленою можна переконатися в їх повній аналогії. Різниця полягає в тому, що в коло ротора включені однакові за величиною опори  $R_1 = R_2 = R_3$ .

Всі інші блоки і їх налаштування залишилися без змін (см.п.2.2).

### Порядок виконання роботи

Параметри асинхронної машини для виконання роботи задаються ви-кладачем. При самотійній роботі ці дані можна розрахувати, користуючись паспортними даними.

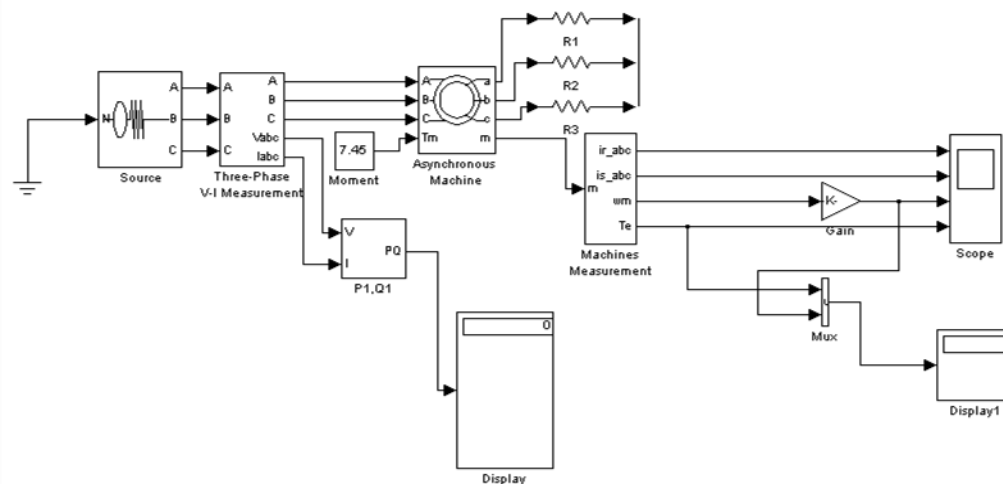


Рис. 2.10 □□Модель для дослідження асинхронної машини з фазним ротором

Зняття механічних характеристик машини в режимі двигуна відповідно до п. 2 змісту роботи проводиться на моделі (рис. 2.10) при зміні навантажувального моменту від 0 до 1,4 номінального і зміні опору в колі ротора від 0 до  $5 R_s$ .

При цьому послідовність виконання роботи наступна:

- задається значення опору в роторі;
- для кожного значення моменту навантаження здійснюється моделювання.
- При проведенні досліджень заповнюється таблиця 2.4.

Таблиця 2.4

M[Нм]	$\omega$ [рад/с]

За даними таблиці будуються механічні характеристики двигуна при різних додаткових опорах в колі ротора.

Тимчасові залежності змінних стану машини можна спостерігати на екрані осцилографа (рис. 2.11). Тут видно і перехідний процес при пуску машини, і усталені процеси.

### *Зміст звіту*

1. Схема моделі та опис віртуальних блоків.
2. Механічні характеристики машини в режимі двигуна.

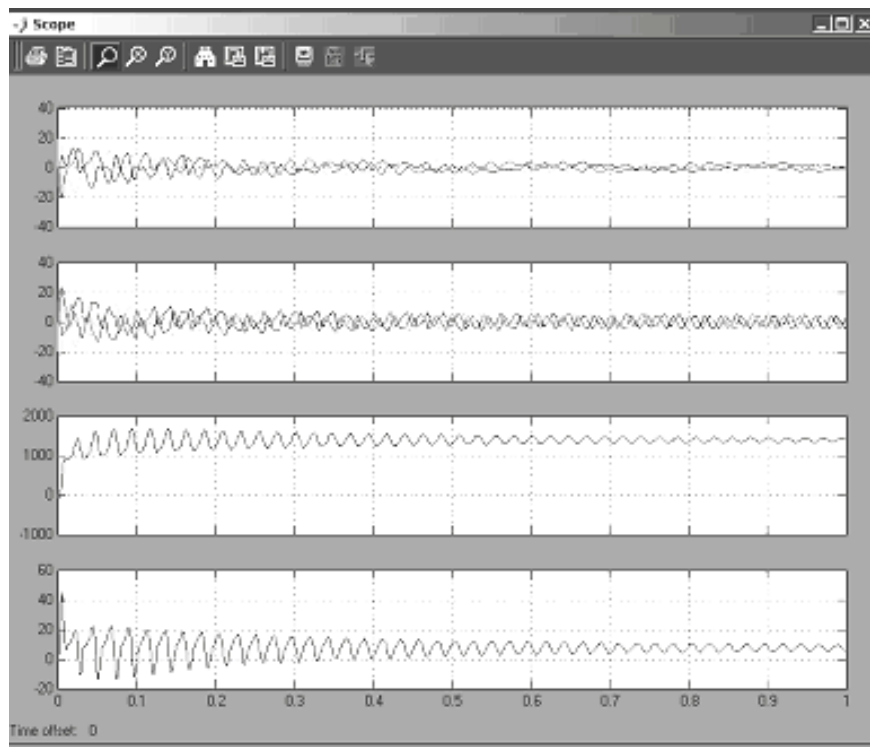


Рис. 2.11 □ Часові залежності змінних стану машини при роботі в руховому режимі

## **2.4 Дослідження трифазної асинхронної машини з короткозамкненим ротором при живленні від однофазної мережі.**

### *Мета дослідження*

Дослідження трифазної асинхронної машини з короткозамкненим ротором при живленні від однофазної мережі.

### Зміст дослідження

1. Зняття механічної характеристики машини в режимі двигуна.
2. Зняття робочих характеристик машини в режимі двигуна.

### Опис віртуальної лабораторної установки

Віртуальну лабораторну установку представлено на рис. 2.10. Вона містить:

- джерело змінної однофазної напруги;
- конденсатор (C) у колі живлення;
- вимірювач напруги і струму в джерелі живлення  $V_1, I_1$ ;
- досліджувану трифазну асинхронну машину *Asynchronous*;
- вимірювач активної та реактивної потужності  $P, Q$  в джерелі живлення;
- блок *Display1* для кількісного представлення обмірюваних потужностей;
- блок *Moment* для завдання механічного моменту на валу машини з головної бібліотеки *Simulink / Sininks*;
- блок *Machines Measurement*;

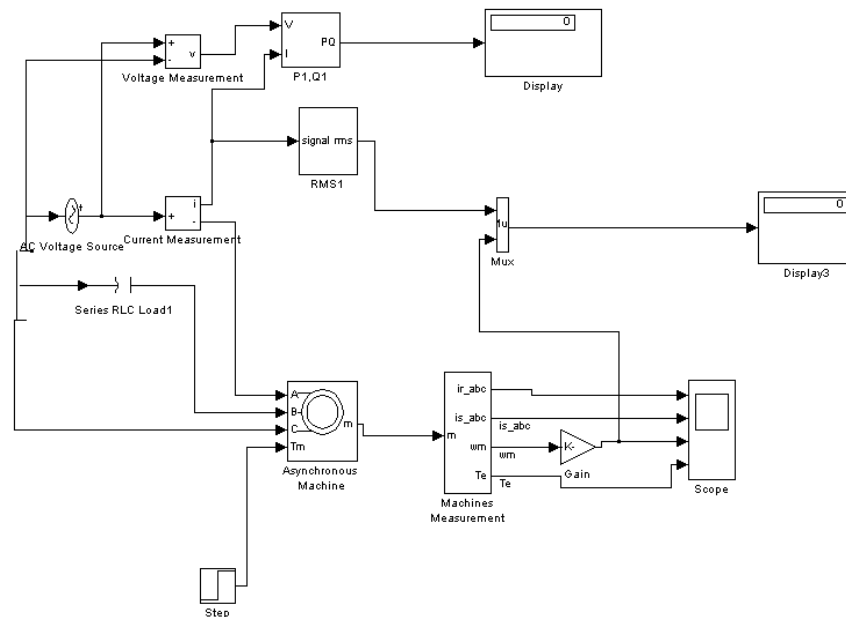


Рис. 2.12 □□ Модель для дослідження асинхронної машини

- блок *RMS* для вимірювання діючого струму в джерелі;

- блок *Display2* для кількісного представлення діючого струму в джерелі (A) і швидкості (рад / с);
- блок *Mux*, об'єднуючий два сигналу в один векторний;
- блок *Scope* для спостереження струмів статора, а також швидкості і моменту асинхронної машини.

Вікно налаштування параметрів двигуна представлено на рис. 2.13.

У випадаючому меню поля *Machine type* задається тип машини. Прапорцями вибираються змінні для вимірювання.

Вікно налаштування параметрів джерела живлення показано на рис. 2.14.

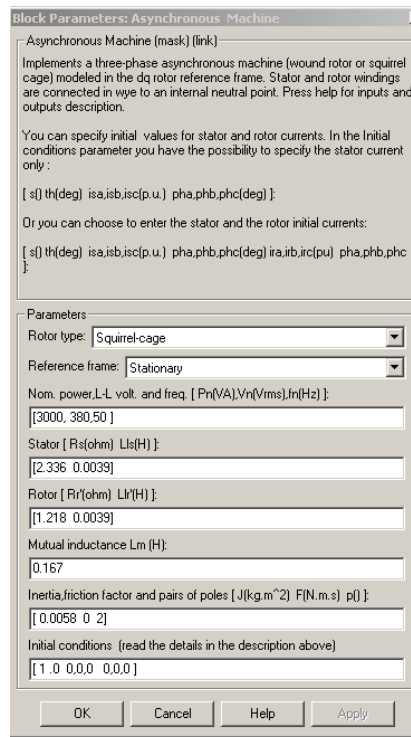


Рис. 2.13 □ Вікно налаштування параметрів асинхронної машини

У полях вікна задаються:

- амплітуда напруги джерела (В);
- початкова фаза в градусах;
- частота (Гц).

Напруга і частота джерела повинні відповідати параметрам асинхронної машини.

Решта блоків вже була описана в п. 2.2.

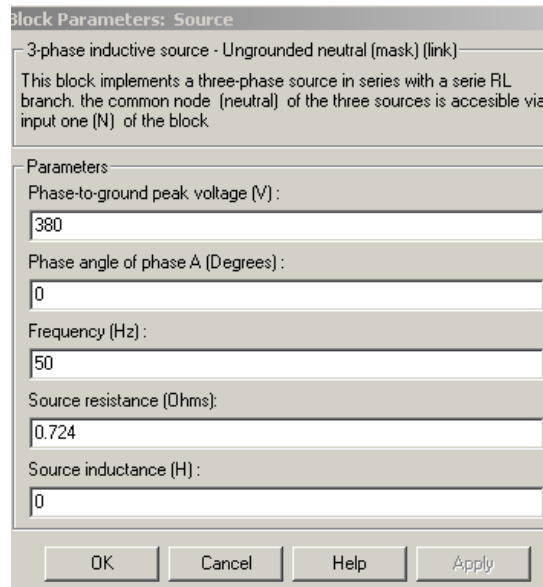


Рис. 2.14 □□ Вікно налаштування параметрів джерела живлення

### *Порядок виконання роботи*

Параметри асинхронної машини для виконання роботи задаються викладачем. При самостійній роботі ці дані вибираються з таблиці 2.1 і розраховуються за паспортними даними. Вікно налаштування параметрів моделювання показано на рис. 2.15.

Зняття механічної характеристики машини в руховому режимі відповідно до п. 2.1 змісту роботи проводиться на моделі (рис. 2.12) при зміні навантажувального моменту від нуля до номінального. При цьому для кожного значення моменту навантаження здійснюється моделювання. Накид моменту навантаження здійснюється із затримкою по відношенню до початку моделювання з тим, аби перехідні процеси при пуску закінчилися.

При проведенні досліджень заповнюється таблиця 2.15.

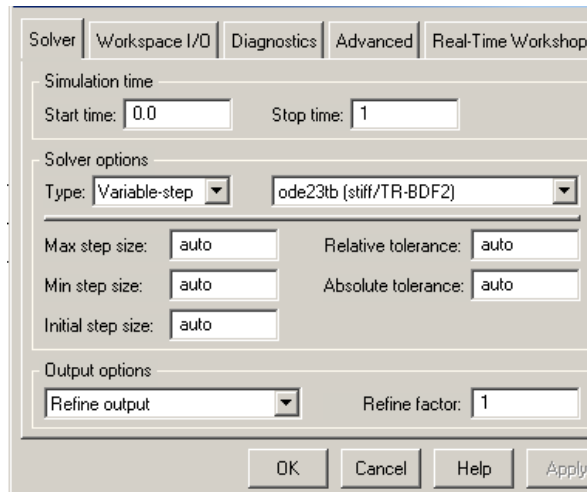


Рис. 2.15 □□Вікно налаштування параметрів моделювання

Таблиця 2.5

M[Нм]	ω[рад/с]

Зняття робочих характеристик двигуна у відповідності до п. 2.2. змісту роботи проводиться на моделі (рис. 2.12) при зміні навантажувального моменту від нуля до номінального. При цьому для кожного значення моменту навантаження здійснюється моделювання. При проведенні досліджень заповнюється таблиця 2.6.

Таблиця 2.6

Виміри						Розрахунки				
M	P <sub>1</sub>	Q <sub>1</sub>	U <sub>1</sub>	I <sub>1</sub>	ω	φ[град]	cosφ	P <sub>2</sub>	η	s
[Нм]	[Вт]	[ВАр]	[В]	[А]	[рад/с]			[Вт]	[%]	[%]

Обчислення виконуються за формулами:

$$\varphi = \arctg \frac{Q_1}{P_1}, P_2 = M\omega, \eta = \frac{P_2}{P_1}, s = \frac{\omega_1 - \omega}{\omega_1} \quad (2.19)$$

За даними таблиць будується механічна характеристика машини і на окремому графіку – робочі характеристики.



Часові залежності змінних стану машини можна спостерігати на екрані осцилографа (рис. 2.16.). Тут видно і перехідний процес при пуску машини, і перехідний процес при накиді моменту навантаження, і усталені процеси.

### *Зміст звіту*

1. Схема моделі та опис віртуальних блоків.
2. Механічна характеристика машини в руховому режимі.
3. Робочі характеристики машини в руховому режимі.

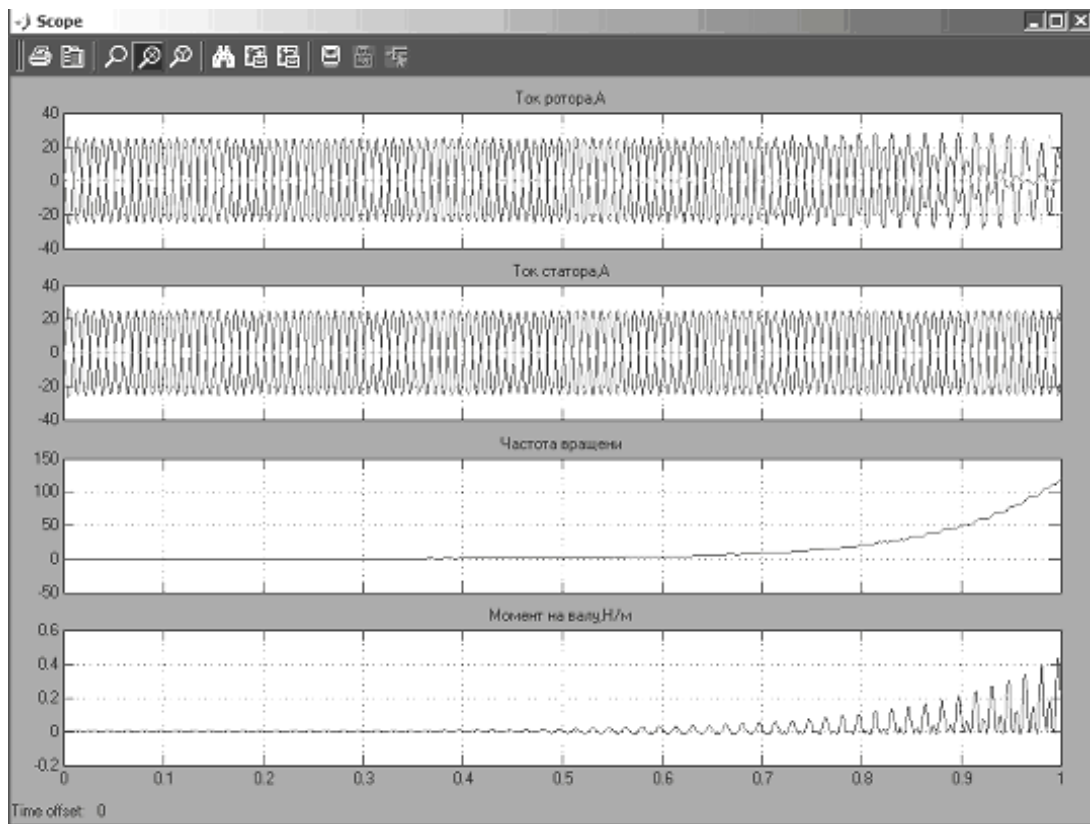


Рис. 2.16 □□ Часові залежності змінних стану машини при роботі в режимі двигуна

## РОЗДІЛ 3

### ДОСЛІДЖЕННЯ СИНХРОННИХ МАШИН НА ВІРТУАЛЬНИХ МОДЕЛЯХ

#### 3.1 Математична модель синхронної машини

Схема неявнополюсної синхронної машини основного виконання представлено на рис. 3.1, а. Обмотка якоря 1 розташована в пазах статора, а обмотка збудження 2 – на роторі. Демпферною обмоткою є пазові клини і сталевий масивний ротор 3. Потужність збудження складає декілька відсотків потужності машини, тому в цьому виконанні щітковий апарат працює надійно, а так як в обмотці збудження протікає постійний струм, для його підведення потрібні два кільця і дві щітки.

У зверненої конструкції (рис. 3.2, б) обмотка якоря 1 розташована на частині, що обертається, а обмотка збудження 2 – на статорі. Демпферна обмотка 3, що представляє собою мідні зварні шини, укладається в пазах полюсних наконечників і створює короткозамкнені контури в поздовжній і поперечній осях машини. Для наочності звернена конструкція дана як явнополюсна конструкція, яка в такому виконанні більше поширена. Недоліком зверненої конструкції є наявність щіткового апарата, що розраховується на повну потужність машини.

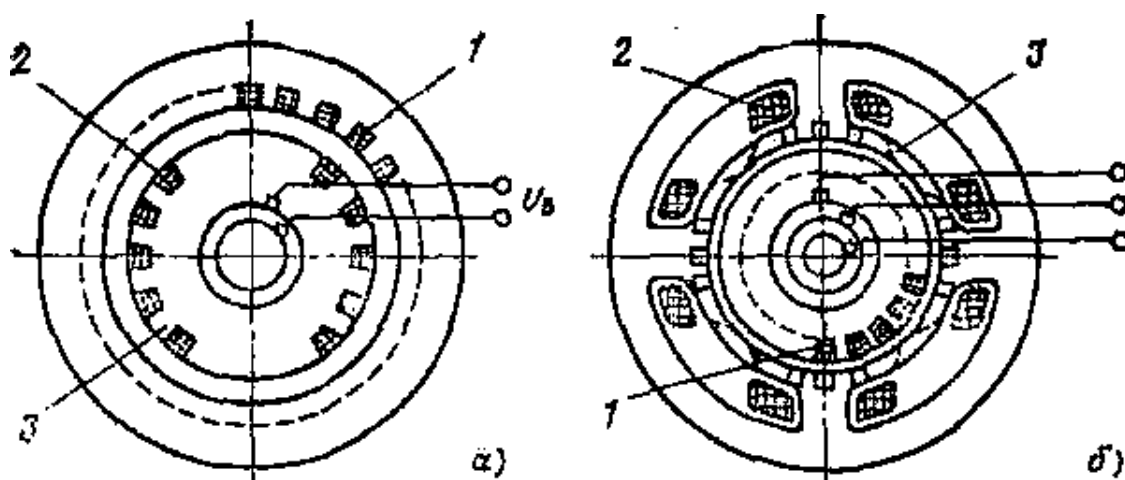


Рис. 3.1 □ Основні конструктивні схеми виконання синхронних машин

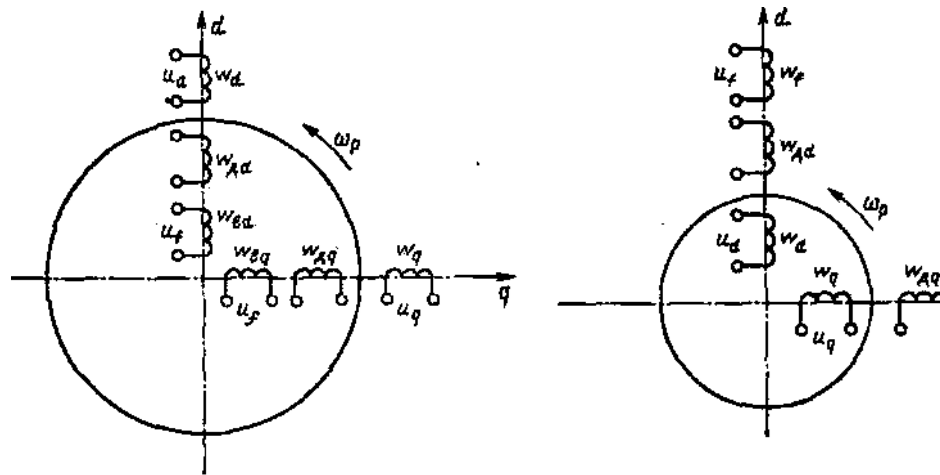


Рис. 3.2 □ Схема синхронної машини

У великих синхронних генераторах звернена конструкція не застосовується через неможливість виконання струмознімального пристрою.

Найпростішу модель синхронної машини можна отримати з моделі узагальненої машини, якщо  $\omega_p = \omega_c$ . Синхронні машини мають на роторі демпферну обмотку і обмотку збудження. Тому синхронну машину без урахування вихрових струмів необхідно розглядати як машину з однією обмоткою на статорі і двома обмотками на роторі.

На рис. 3.2 прийняті позначення:  $w_d$  і  $w_q$  – обмотки якоря по осях  $d$  і  $q$ ,  $u_d$  і  $u_q$  – напруги, докладені до цих обмоток;  $w_{dd}$ ,  $w_{dq}$  – демпферні обмотки по осях  $d$  і  $q$  (зазвичай це короткозамкнені обмотки і напруги на них рівні нулю)  $w_{fd}$ ,  $w_{fq}$  – обмотки збудження;  $u_f$  – напруга обмотки збудження.

Обмотка збудження в синхронних машинах виконується в одній осі, як правило, по поздовжній осі. При розташуванні витків по одній осі досягається економія міді, а процеси перетворення енергії в машині при цьому не змінюються.

Щоб у рівняннях було менше членів, що містять ЕРС обертання, зручніше розглядати звернену машину з обертовою обмоткою якоря. Процеси електромеханічного перетворення енергії відбуваються в повітряному зазорі,

вони не змінюються від того, обертаються або нерухомі обмотки. Важливо відносно переміщення обмоток.

При складанні рівнянь синхронних машин зручніше записувати їх в системі координат  $d, q$ , пов'язаних обмотками ротора. Спостерігач, розташований на роторі машини, "бачить" у повітряному зазорі нерухоме щодо ротора магнітне поле, створене змінними струмами обмоток статора. Картина не зміниться, якщо зупинити ротор і магнітне поле. Щоб у загальмованою машині струми залишилися тими ж, що і в машині, що обертається, треба ввести ЕРС обертання в обмотки якоря, а частоту струмів зробити рівною нулю. Система координат  $d, q$  для синхронних машин зручна, так як моделювання здійснюється на постійному струмі.

Для схеми синхронної машини з приведеними обмотками (рис. 3.2) може бути записана наступна система рівнянь напруг:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= \frac{d\psi_d}{dt} - \psi_q \omega_p + r_a i_d; \\ u_q &= \frac{d\psi_q}{dt} + \psi_d \omega_p + r_a i_q; \\ u_f &= \frac{d\psi_f}{dt} + r_f i_f; \\ 0 &= \frac{d\psi_{dd}}{dt} + r_{dd} i_{dd}, \end{aligned} \right\} \quad (3.1)$$

де  $r_a$  – активний опір обмотки якоря;

$r_f$  – активний опір обмотки збудження;

$r_{dd}, r_{dq}$  – активні опори демпферного обмотки по осях  $d$  і  $q$ ;

$i_d$  і  $i_q$  – струми в обмотках якоря по поздовжній і поперечній осях,

$i_f$  – струм в обмотці збудження;

$i_{dd}$  і  $i_{dq}$  – струми в демпферного обмотці по поздовжній і поперечній осях машини;

$\omega_p = \omega_c$  – кутова швидкість ротора.

Потокозчеплення обмоток в (3.1) визначаються у вигляді:

$$\left. \begin{aligned} \psi_d &= L_d i_d + M_{ad} i_f + M_{ad} i_{dd}; \\ \psi_q &= L_q i_q + M_{aq} i_{dq}; \\ \psi_f &= L_f i_f + M_{ad} i_d + M_{ad} i_{dd}; \\ \psi_{dd} &= L_{dd} i_{dd} + M_{ad} i_d + M_{ad} i_f; \\ \psi_{dq} &= L_{dq} i_{dq} + M_{aq} i_q. \end{aligned} \right\} \quad (3.2)$$

де  $L_d, L_q$  – індуктивності обмоток якоря по поздовжній і поперечній осях машини;

$L_f$  – індуктивність обмотки збудження;

$L_{dd}, L_{dq}$  – індуктивності демпферної обмотки по поздовжній і поперечній осях машини;

$M_{ad}, M_{aq}$  – взаємні індуктивності між обмотками по поздовжній і поперечній осях.

Як і у всіх машинах, повна індуктивність дорівнює сумі взаємної індуктивності й індуктивності розсіювання:  $L = M + L\sigma$ . При цьому передбачається, що є загальний потік по поздовжній і поперечній осях машини, зчеплений з усіма обмотками, і в кожній обмотці є потоки розсіювання, зчеплені тільки з однією обмоткою.

Через потокозчеплення і струми електромагнітний момент визначається наступним чином:

$$M_{\text{эм}} = M(i_f i_q + i_q i_{dd} - i_d i_{dq}), \quad (3.3)$$

де  $M = M_{ad} = M_{aq}$ , що має місце в неявнополісній машині.

Через потокозчеплення і струми електромагнітний момент визначається наступним чином:

$$M_{\text{эм}} = \psi_d i_q - \psi_q i_d. \quad (3.4)$$

Рівняння синхронної машини складніше рівнянь асинхронної машини. Їх можна спростити, якщо розглядати синхронну машину без демпферної обмотки:

$$\left. \begin{aligned} u_d &= L_{\sigma d} \frac{d}{dt} i_d + M_{ad} \frac{d}{dt} (i_f + i_d) - E_q + r_a i_d; \\ u_q &= L_{\sigma d} \frac{d}{dt} i_q + M_{aq} \frac{d}{dt} i_q + E_d + r_a i_q; \\ u_f &= L_{\sigma f} \frac{d}{dt} i_f + M_{ad} \frac{d}{dt} (i_f + i_d) + r_f i_f; \end{aligned} \right\} \quad (3.5)$$

Отримані рівняння описують перехідні і усталені процеси в синхронній машині без урахування демпферної обмотки.

Вводити в (3.5) заміну змінних  $i_f + i_d = i$  не має сенсу, так як в усталених режимах струм збудження в синхронних машинах не залежить від завантаження і змінюється за довільним законом. Рівняння (3.5) більше спростити не вдається, а при дослідженні динаміки слід працювати з (3.5).

Щоб отримати з диференціальних рівнянь синхронної машини рівняння для усталеного режиму, необхідно в (3.5) так само як це виконувалося для трансформаторів і асинхронних машин, замінити оператор диференціювання  $\frac{d}{dt} \Leftrightarrow j\omega$ .

Без урахування демпферної обмотки і з урахуванням того, що в обмотці збудження протікає постійний струм, рівняння для усталеного режиму мають вигляд:

$$\begin{aligned} U_d &= j\omega L_{\sigma d} I_d + j\omega M_{ad} I_d - E_q + r_a I_d; \\ U_q &= j\omega L_{\sigma q} I_q + j\omega M_{aq} I_q + E_d + r_a I_q. \end{aligned} \quad (3.6)$$

Так як опір в поздовжній осі

$$x_q = \omega L_{\sigma q} + \omega M_{aq}, \quad (3.7)$$

то отримаємо

$$\left. \begin{aligned} U_d &= jx_d I_d - E_q + r_a I_d; \\ U_q &= jx_q I_q + E_d + r_a I_q. \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

Рівняння для кола збудження, в якому протікає постійний струм, з урахуванням тільки активного опору обмотки збудження

$$u_f = I_f r_f. \quad (3.9)$$

Рівняння (3.8) і (3.9) описують процеси електромеханічного перетворення енергії в синхронній машині.

### 3.2 Дослідження трифазної магнітоелектричної синхронної машини

#### *Мета дослідження*

Дослідження трифазної явнополюсної магнітоелектричної синхронної машини.

#### *Зміст дослідження*

1. Зняття робочих характеристик машини в режимі двигуна.
2. Зняття залежності споживаної з мережі потужності від потоку збудження машини.

#### *Опис віртуальної лабораторної установки*

Віртуальну лабораторну установку приведено на рис. 3.3. Вона містить:

- джерело змінної трифазної напруги *Source* з бібліотеки *Power System Blockset / Extras / Electrical Sources*;
- вимірювач трифазних напруги і струму *Three-Phase VI Measurement* з бібліотеки *Power System Blockset / Extras / Measurement*;

- досліджувану трифазну синхронну машину *Permanent Magnet Synchronous Machine* з бібліотеки *Power System Blockset/Machines*;
- вимірювач активної та реактивної потужності  $P_1, Q_1$  з бібліотеки *Power System Blockset / Extras / Measurement*;
- вимірювальний блок змінних стану машини *Machines Measurement* з бібліотеки *Power System Blockset / Machines*;
- блок *Display* для кількісного представлення обмірюваних потужностей (у трьох перших вікнах блоку представлені активні потужності в кожній фазі машини, в трьох останніх - реактивні потужності);
- блок *RMS* з бібліотеки *Power System Blockset / Extras / Measurement*, що вимірює діючий струм у фазі машини;
- блок *Moment* для завдання механічного моменту на валу машини з головної бібліотеки *Simulink / Source*;
- блок *Product* з головної бібліотеки *Simulink / Math*, який обчислює механічну потужність на валу машини;
- блок *Scope* для спостереження струму статора, моменту і механічної потужності синхронної машини з головної бібліотеки *Simulink / Sinks*;
- блок *Display1* для кількісного представлення обмірюваних струму (А) та електромагнітного моменту (Нм) машини з головної бібліотеки *Simulink/Sinks*;
- блок *Mux*, об'єднуючий два сигнали в один векторний з головної бібліотеки *Simulink / Signal & System*.



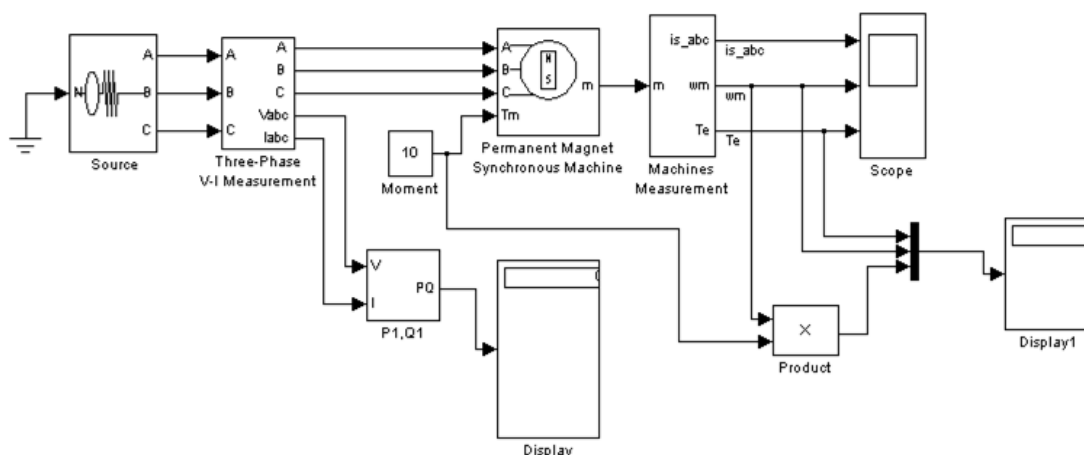


Рис. 3.3 □□Модель для дослідження синхронної машини

Вікно налаштування параметрів синхронної машини показано на рис. 3.4.

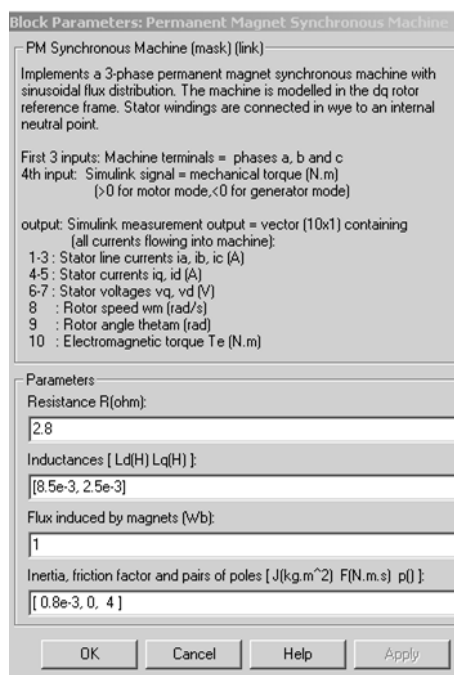


Рис. 3.4 □□Налаштування параметрів синхронної машини

У полях вікна послідовно задаються:

- активний опір обмотки статора (Ом);
- індуктивності по поздовжній і поперечній осях (Гн);
- максимальний потік в машині (Вб);

- момент інерції (кгм<sup>2</sup>), коефіцієнт в'язкого тертя (НМС), число пар полюсів.

Вікно налаштування блоку вимірювання змінних стану машини показано на рис. 3.5. Тип машини вибирається в полі *Machine type*. У випадяючому меню цього поля слід вибрати *Permanent magnet synchronous*. Прапорці зліва включаються у тих змінних стану, що підлягають вимірюванню.

Вікно налаштування параметрів джерела показано на рис. 3.6. Напруга і частота джерела повинні бути погоджені з напругою, швидкістю і числом пар полюсів машини.

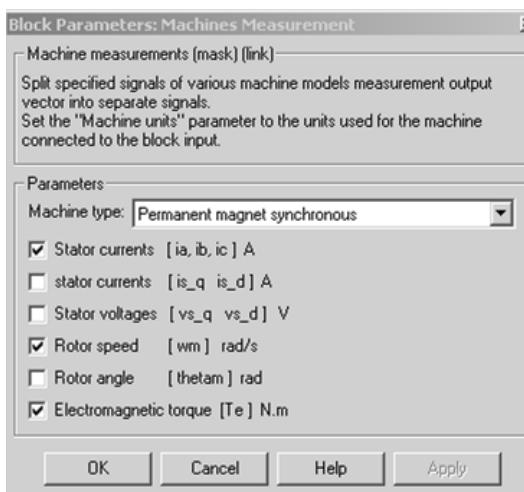


Рис. 3.5 □□ Вікно налаштування вимірювача змінних стану машини

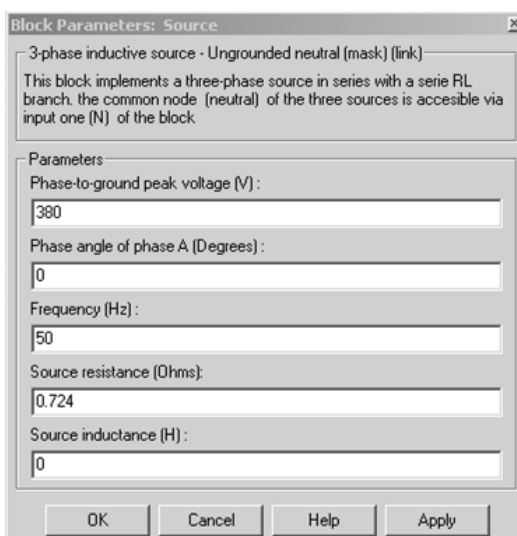


Рис. 3.6 □ Вікно налаштування параметрів джерела живлення

### Порядок виконання роботи

Параметри синхронної машини і джерела живлення для виконання роботи задаються викладачем. При самостійній роботі дані машини можна прийняти такими, як на рис. 3.4., а дані джерела - як на рис. 3.6. Вікно налаштування параметрів моделювання показано на рис. 3.7.

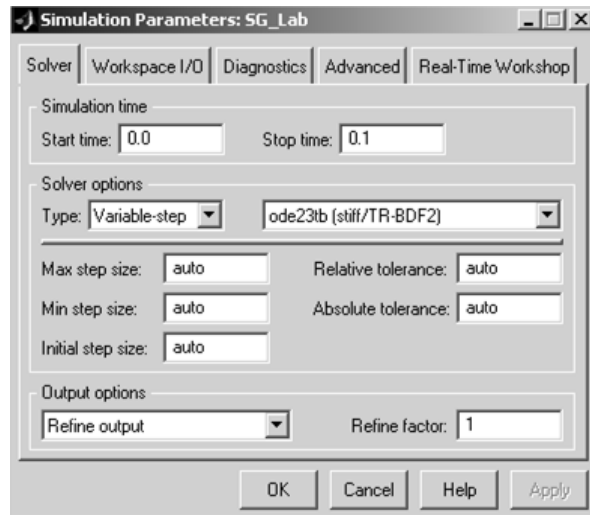


Рис. 3.7 □ Вікно налаштування параметрів моделювання

Зняття механічної та робочих характеристик машини в руховому режимі відповідно до п. 1 змісту дослідження проводиться на моделі (рис. 3.3.) при зміні навантажувального моменту від нуля до 1,4 від номінального. Номінальний момент визначається з виразу:

$$M_H \approx \frac{\sqrt{3} \cdot U_m (U_m - \omega \Phi_m)}{\sqrt{2} \cdot \omega R_s}$$

де  $U_m, \omega = 2\pi f$  – амплітуда і частота джерела живлення,

$\Phi_m, R_s, p$  – максимальний потік, опір статора і число пар полюсів машини.

Для кожного значення моменту навантаження здійснюється моделювання. При проведенні досліджень заповнюється таблиця 3.1.

Таблиця 3.1

Виміри						Розрахунки				
M	P1	Q1	U1	I1	$\omega$	P2	I	$\Phi$	$\cos\varphi$	$\eta$
[Нм]	[Вт]	[Вар]	[В]	[А]	[рад/с]	[Вт]	[А]	[град]		[%]

Обчислення здійснюються згідно з формул:

$$\varphi = \arctg \frac{Q_1}{P_1}, \eta = \frac{P_2}{P_1}, P_1 = P_A + P_B + P_C, Q_1 = Q_A + Q_B + Q_C$$

За даними таблиці будуються робочі характеристики  $I, \cos \varphi, h = f(P_2)$ .

На рис. 3.8. видні залежності змінних стану машини.

Зняття залежності споживаної з мережі потужності від потоку збудження машини відповідно до п. 2 змісту роботи здійснюється на моделі (рис. 3.1) при постійному моменті навантаження (задається викладачем). Максимальний потік в полі *Flux induced magnets* слід задавати в діапазоні 0,6-1,2 Вб з кроком 0,05 Вб. Для кожного значення потоку проводити моделювання, за результатами заповнити таблицю 3.2.

Таблиця 3.2

$\Phi_m$	Q1	P1	$\cos\varphi$
[Вб]	[ВАр]	[Вт]	

#### Зміст звіту

1. Схема моделі та опис віртуальних блоків.
2. Робочі характеристики машини в руховому режимі.
3. Залежності  $P_1, Q_1, \cos \varphi, \Phi_m$ .

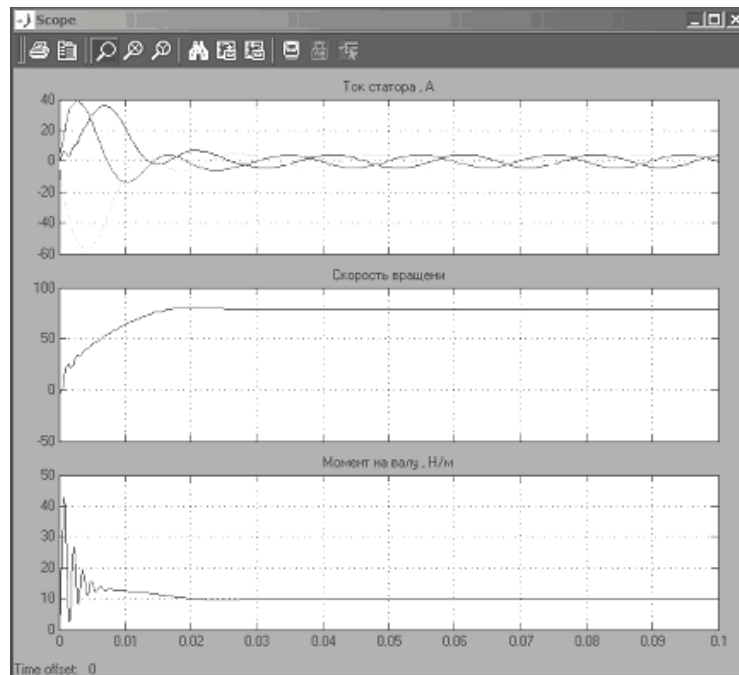


Рис. 3.8 □□ Часові залежності змінних стану машини

### 3.3 Дослідження синхронного генератора

#### *Мета дослідження*

Дослідження синхронного генератора з електромагнітним збудженням при роботі на пасивне навантаження.

#### *Зміст дослідження*

1. Зняття кутової характеристики генератора.
2. Зняття зовнішньої (навантажувальної) і робочих характеристик генератора при активному навантаженні.
3. Зняття зовнішньої (навантажувальної) характеристики генератора при активно-індуктивному навантаженні.
4. Зняття зовнішньої (навантажувальної) характеристики генератора при активно-ємнісному навантаженні.

#### *Опис віртуальної лабораторної установки*

Віртуальну лабораторну установку представлено на рис. 3.9. Вона містить:

- досліджувану трифазну синхронну машину *SimplifiedSynchronous Machine* з бібліотеки *Power System Blockset / Machines*;
- вимірювач параметрів стану машини *Machines Measurement* з бібліотеки *Power System Blockset / Machines*;
- трифазне навантаження *3-Phase Load* з бібліотеки *Power System RW.kset / Extras / Tthree-Phase Library*;
- блок *RMS. Vs*, для вимірювання діючого значень напруги на навантаженні;
- блоки *Fourier, Fourier 1*, вимірюють амплітуди і початкові фази напруги на навантаженні і ЕРС генератора з бібліотеки *Power System Blockset / Extras / Measurements*;
- блоки *Display1, Display2, Display* для кількісного представлення обмірюваних величин і блок *Scope* для спостереження струму якоря, швидкості та електромагнітної потужності синхронної машини з головної бібліотеки *Simulink / Sinks*;
- блок *En* для завдання ЕРС збудження з головної бібліотеки *Simulink / Source*;
- блоки *Mux, Demux* з головної бібліотеки *Simulink / Signal & System*.

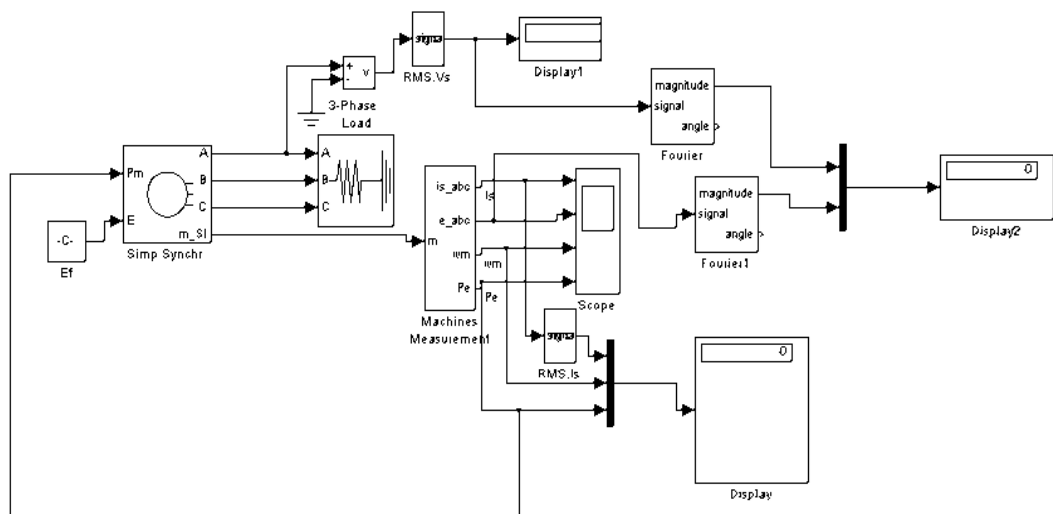


Рис. 3.9 □□ Модель для дослідження синхронного генератора

Вікно налаштування параметрів синхронної машини показано на рис.

3.10.

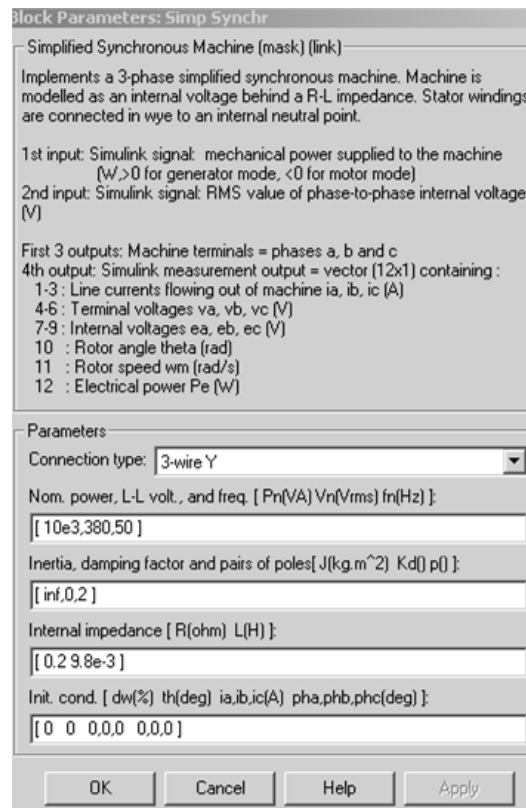


Рис. 3.10 □□Вікно налаштування параметрів синхронної машини

У полях вікна послідовно задаються:

- схема з'єднання обмоток статора машини. У випадаючому меню цього поля можна обрати з'єднання зіркою без нульового і з нульовим проводом;
- повна потужність (ВА), що діюча напруга і частота;
- момент інерції (кгм<sup>2</sup>), коефіцієнт демпфування, число пар полюсів;
- активний опір і індуктивність обмотки якоря (статора);
- початкові умови при пуску моделі.

Вікно налаштування блоку вимірювання змінних стану машини показано на рис. 3.11.

Тип машини вибирається в полі *Machine type*. Прапорці зліва включаються у тих змінних стану, що підлягають вимірюванню.

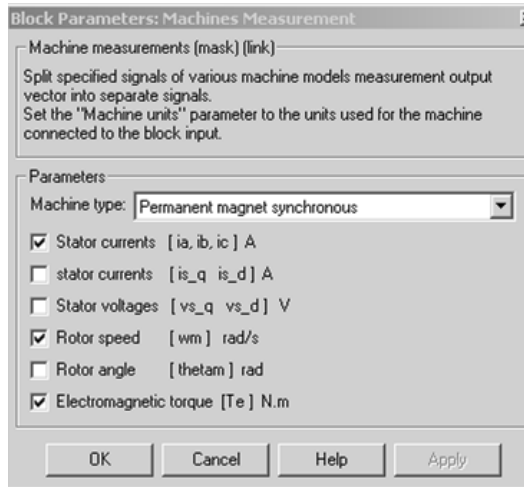


Рис. 3.11 □ Вікно налаштування блоку вимірювання змінних стану машини

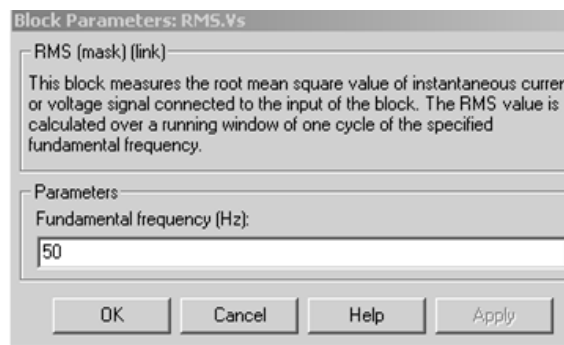


Рис. 3.12 □ Вікно настройки вимірювача діючих значень

Блок налаштування вимірювача діючих значень зображений на рис. 3.12. У вікні налаштування цього блоку задається частота, на якій проводяться вимірювання.

Вікно налаштування блоків *Fourier*, *Fourier* показано на мал. 3.13. У полях вікна задається частота і перша гармоніка вимірюваної напруги. Різниця фаз між вимірюваними напругою і ЕРС –  $\epsilon$  кут навантаження.

Вікно налаштування параметрів навантаження показано на рис. 3.14.



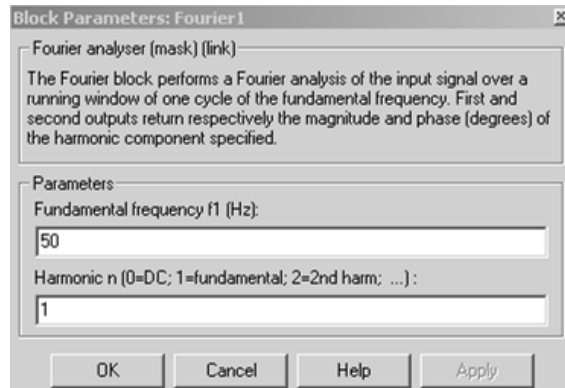


Рис. 3.13 □ □ Вікно налаштування блоків *Fourier*

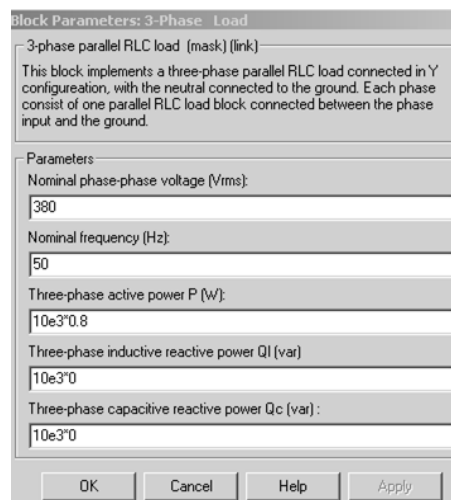


Рис. 3.14 □ Вікно налаштування параметрів навантаження

У поля вікна вводяться чинне лінійна напруга і частота, які повинні бути узгоджені з напругою і частотою генератора (рис. 3.10), активна, реактивна (індуктивна) і реактивна (ємність) потужності навантаження. Зручніше ці потужності задавати як номінальну потужність генератора, помножену на коефіцієнт.

Зміст і налаштування інших блоків моделі докладно описані раніше.

### *Порядок виконання роботи*

Параметри синхронної машини і джерела живлення для виконання роботи задаються викладачем. При самостійній роботі дані машини можна прийняти такими, як на мал. 3.10. Значення ЕРС збудження (блок  $E_o$ , рис. 3.9)

при проведенні вимірювань залишається постійним, рівним 380 В (номінальна лінійна напруга генератора в режимі холостого ходу). Вікно налаштування параметрів моделювання показано на рис. 3.15.

Зняття кутової характеристики генератора відповідно до п. 1 змісту роботи проводиться на моделі (рис. 3.9) при зміні активної потужності навантаження від 0 до 1,6 від номінальної потужності генератора. При цьому коефіцієнт при активній потужності змінюється від 0 до 1,6 з кроком 0,2. Коефіцієнти при реактивних потужностях дорівнюють нулю.

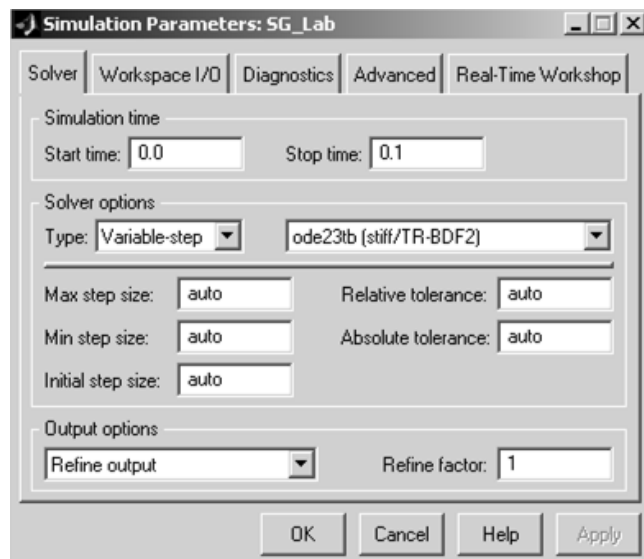


Рис. 3.15 □ Вікно налаштування параметрів моделювання.

Для кожного значення активної потужності здійснюється моделювання. При проведенні досліджень заповнюється таблиця 3.3.

Таблиця 3.3

Виміри			Розрахунки
$P_{\Gamma}$ [Вт]	$\omega$ [рад/с]	$\theta$ [град]	$M$ [Нм]

Момент на валу генератора обчислюється за формулою  $M = \frac{P_{\Gamma}}{\omega}$ .

За даними таблиці будується залежність  $M = f(\theta)$ .

Зняття зовнішньої і робочих характеристик генератора при активному навантаженні проводиться на моделі (рис. 3.9) при зміні активної потужності навантаження в діапазоні 0-1,2 від номінальної з кроком 0,2  $P_n$ . За даними вимірювань заповнюється таблиця 3.4.

Таблиця 3.4

Виміри					Розрахунки	
$P_{нагр}$ [Вт]	$Q_{нагр}$ [ВАр]	$\omega$ [рад/с]	$P_r$ [Вт]	$U_1$ [В]	$\cos\varphi$	$I_a$ [А]

Обчислення проводяться згідно формул:

$$\varphi = \arctg \frac{Q_{нагр}}{P}, I_a = \frac{P_{нагр}}{U_1 \cos \varphi}.$$

За результатами вимірювань і обчислень будується зовнішня характеристика  $U_1=f(I_a)$  і робочі характеристики  $U_1, \cos \varphi, I_a = f(P_r)$ .

Зняття зовнішніх характеристик при активно-індуктивного й активно-емнісний навантаженнях у відповідності до пп. 3, 4 виробляються аналогічно попередньому пункту. При зміні потужності навантаження необхідно дотримуватися умови  $\frac{Q_{нагр}}{P_{нагр}} = \text{const}$ . За результатами вимірювань заповнюється таблиця, аналогічна таблиці 3.4, і будуються зовнішні характеристики на тому ж графіку, на якому побудована зовнішня характеристика попереднього досвіду.

Миттєві значення струмів у фазах якоря генератора, швидкість і потужність генератора можна спостерігати на екрані осцилоскопа (рис. 3.16).

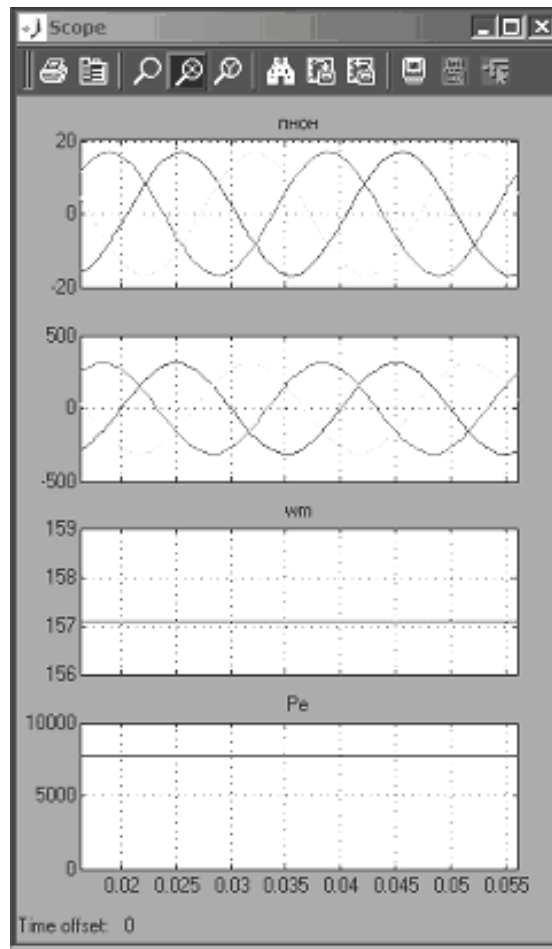


Рис. 3.16 □□ Миттєві значення струмів у фазах якоря генератора, швидкість і потужність генератора

### *Зміст звіту*

1. Схема моделі та опис віртуальних блоків.
2. Кутова характеристика генератора.
3. Зовнішні характеристики генератора при різних коефіцієнтах потужності навантаження.
4. Робочі характеристики генератора.

### 3.4 Дослідження синхронного компенсатора при роботі на “жорстку” мережу

#### Мета дослідження

Дослідження синхронної машини з електромагнітним збудженням, працюючій в режимі синхронного компенсатора.

#### Зміст дослідження

Зняття характеристик синхронного компенсатора.

#### Опис віртуальної лабораторної установки

Віртуальну лабораторну установку представлено на рис. 3.17.

У даній моделі замість навантаження увімкнено джерело трифазної напруги *Source*, блок для вимірювання струму і блок для вимірювання активної та реактивної потужності (*Active & Reactive Power*). Додаткові блоки *Gain* і *Display4* обчислюють і представляють в цифровому вигляді потужність трифазної машини.

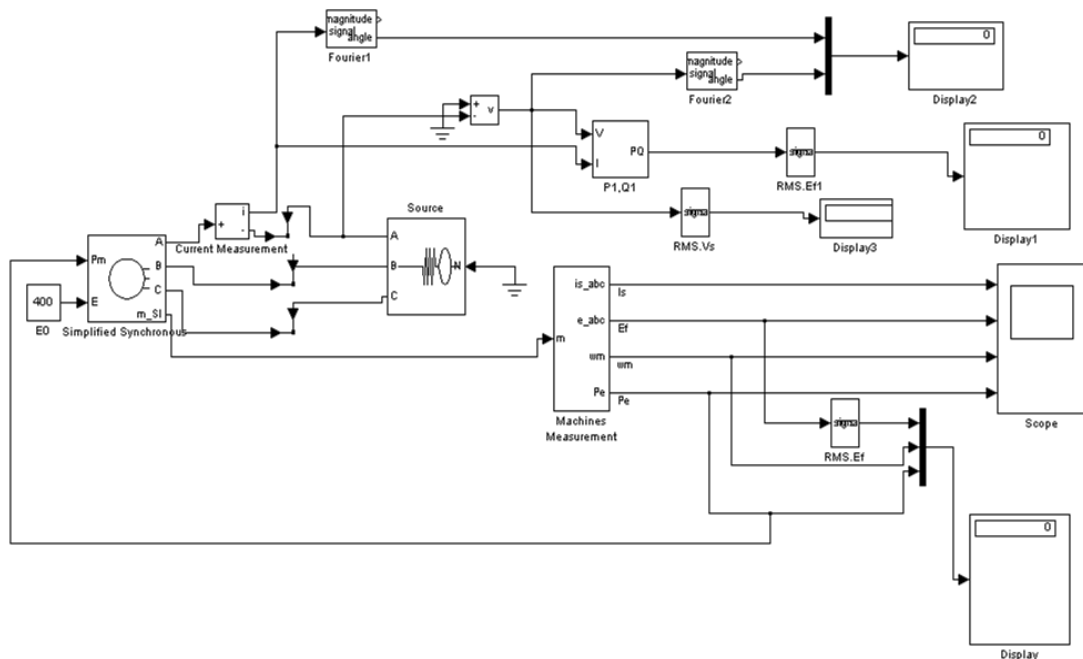


Рис. 3.17 □□ Модель для дослідження синхронного компенсатора

Вікно налаштування параметрів джерела живлення показано на рис. 3.17. Напруга джерела, яке задається в першому полі вікна повинна бути погоджено з параметрами машини ( $V = \frac{\sqrt{2 \cdot V_n}}{\sqrt{3}}$ ).

Початкова фаза напруги фази А (друге поле вікна), по суті, визначає кут моменту  $\beta$ , знак цієї фази визначає режим роботи машини. Він негативний для генераторного режиму і позитивний для рухового режиму. При дослідженні машини в режимі синхронного компенсатора цей параметр встановлюється рівним нулю. Внутрішній параметр джерела  $R_i$ , повинен бути узгоджений з параметрами машини  $R$ ,  $L$  так, щоб дотримувалися нерівність  $\sqrt{R^2 + (2\pi fL)^2} \geq 10R_i$ , параметр  $L$  джерела повинен бути рівним нулю.

У вікні налаштування блоку *Active & Reactive Power* задається частота, на якій здійснюються вимірювання (рис. 3.18).

#### *Порядок виконання роботи*

Параметри синхронної машини і джерела живлення для виконання роботи задаються викладачем. При самостійній роботі дані машини можна прийняти такими, як на мал. 3.10.

Зняття характеристик синхронного компенсатора відповідно до п. 2.1 змісту роботи проводиться на моделі (рис. 3.16) при зміні ЕРС збудження (блок *Eo*, рис. 3.16) від 200 до 500 В через кожні 50 В. Для кожного значення *Eo* здійснюється моделювання і визначаються:

- діюче значення напруги в мережі (блок *Dislayl*);
- реактивна потужність в мережі (блок *Dislayl*);
- зсув по фазі між струмом і напругою в мережі.

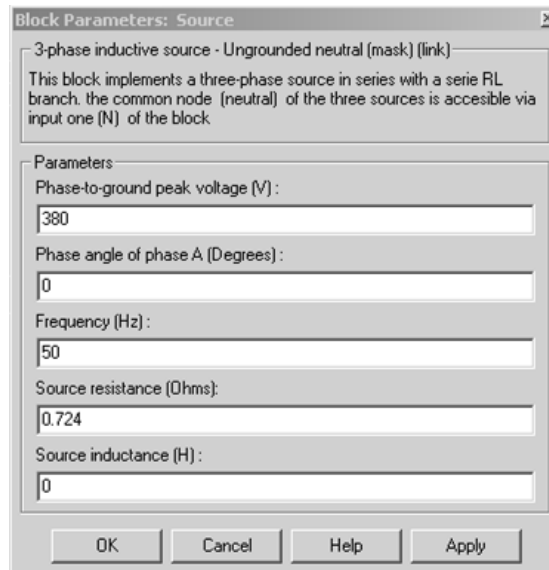


Рис. 3.18 □□ Вікно налаштування параметрів джерела живлення

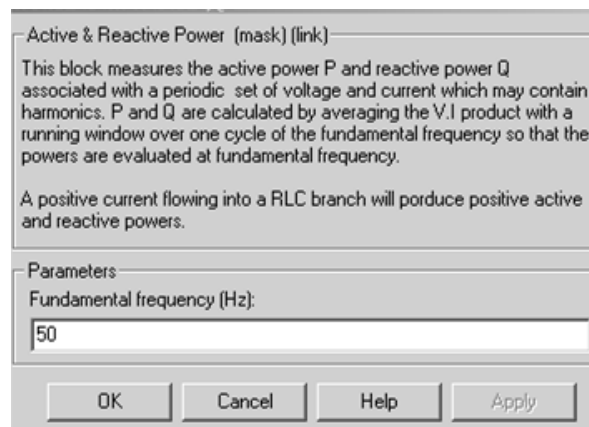


Рис. 3.19 □□ Вікно налаштування блоку *Active & Reactive Power*

При проведенні досліджень заповнюється таблиця 3.5.

Таблиця 3.5.

$E_0$ [В]	$U_1$ [В]	$Q$ [Вар]	$\varphi$ [град]

За даними з таблиці будуються залежності  $U_1$ ,  $Q$ ,  $q = f(E_0)$ .

### Зміст звіту

1. Схема моделі та опис віртуальних блоків.
2. Характеристики синхронного компенсатора.

## РОЗДІЛ 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ МАШИН ПОСТІЙНОГО СТРУМУ НА ВІРТУАЛЬНИХ МОДЕЛЯХ

#### 4.1 Математична модель машини постійного струму

Машини постійного струму – багатообмотувальні електричні машини. На статорі машини може бути виконано декілька обмоток збудження: обмотка незалежного збудження  $w_b$ , обмотка послідовного (серієсна)  $w_c$  або паралельного збудження (шунтова)  $w_{ш}$ , компенсаційна обмотка  $w_k$ , обмотка додаткових полюсів  $w_{dp}$  (рис 4.1).

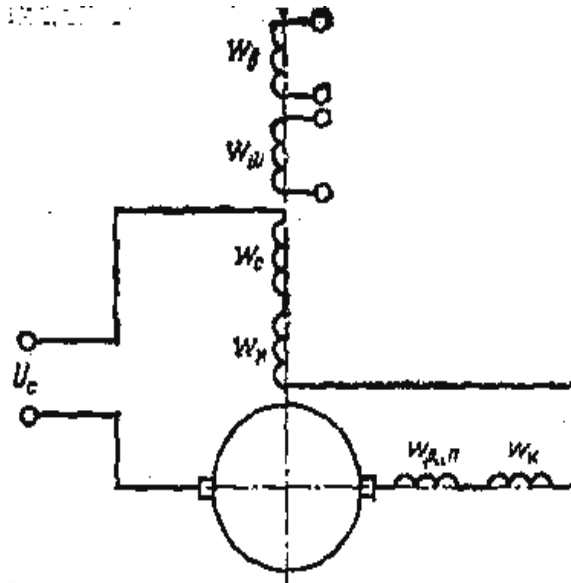


Рис. 4.1 □ Схема машини постійного струму

Хоча на якорі і розташовується одна обмотка, іноді необхідно враховувати контури вихрових струмів. У перехідних процесах слід враховувати контури в сталевих ділянках муздраттеатру статора.

Багатофазна обмотка якоря приведена до двофазної і позначена  $w_{яd}$  і  $w_{яq}$ . Як і синхронні, машини постійного струму краще досліджувати в координатах  $dq$ , для них можуть бути записані такі диференціальні рівняння.



$$\left. \begin{aligned} u_B &= \frac{d\psi_B}{dt} + i_B r_B; \\ u_C &= \frac{d\psi_C}{dt} + i_{я} r_C; \\ u_{дп} &= \frac{d\psi_{дп}}{dt} + i_{я} r_{дп}; \\ u_K &= \frac{d\psi_K}{dt} + i_{я} r_K; \\ u_{я} &= \frac{d\psi_{я}}{dt} + i_{я} r_{я} + e. \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

де  $u_B, u_C, u_{дп}, u_K, u_{я}$  – відповідно напруги на обмотці незалежного збудження, послідовного збудження, додаткових полюсів, компенсаційної обмотки і обмотки якоря;

$i_B, i_{я}$  – струми в обмотці незалежного збудження і в якорі (в обмотках  $w_C, w_{дп}, w_K$ , з'єднаних послідовно з якорем, протікає струм якоря), при цьому струми в обмотках  $w_{яd}$  і  $w_{яq}$  однакові, рівні  $i_{я}$ ;

$r_B, r_C, r_{дп}, r_K, r_{я}$  – активні опори обмотки незалежного збудження, послідовного збудження, додаткових полюсів, компенсаційної обмотки якоря;

$e$  – ЕРС обертання:

$$e = c\omega_p \Phi; \quad (4.2)$$

де  $c$  – коефіцієнт, що залежить від конструкції машини;

$\Phi$  – магнітний потік у зазорі;

$\omega_p$  – частота обертання якоря.

Падіння напруги під щітками враховується в ЕРС обертання;  $\psi_B, \psi_C, \psi_{дп}, \psi_K$  і  $\psi_{я}$ , – потокозчеплення обмотки незалежного, послідовного збудження, додаткових полюсів, компенсаційної обмотки якоря.

Обмотка якоря машин постійного струму має одну пару щіток, розташованих на геометричній нейтралі. Для визначення напруги на щітках досить знати потокозчеплення по поздовжній осі. електричних машин, буде описувати процеси перетворення енергії в перехідних і сталих режимах. Однак ці рівняння досить громіздкі, з нелінійними коефіцієнтами, і рідко застосовуються для дослідження машин постійного струму.

При вивченні машин постійного струму для аналізу процесів перетворення енергії достатньо розглянути найпростішу схему з однією обмоткою збудження на статорі і однією обмоткою на роторі:

$$\left. \begin{aligned} u_B &= L_B \frac{di_B}{dt} + M_{BЯ} \frac{di_Я}{dt} + i_B r_B; \\ u_Я &= L_Я \frac{di_Я}{dt} + M_{ЯВ} \frac{d}{dt} + i_Я r_{ЦЯ} + e. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

де  $u_B, u_Я$  – напруги на обмотках збудження і якоря (розглядається тільки напруга якоря по поздовжній осі машини, який позначено  $u_Я$ );

$L_B, L_Я$  – повні індуктивності обмоток збудження і якоря;

$M_{BЯ}, M_{ЯВ}$  – взаємні індуктивності між обмотками збудження і якоря і обмотками якоря і збудження;

$r_{ЦЯ}$  – активний опір ланцюга обмотки якоря

$$r_{ЦЯ} = r_Я + r_C + r_{ДП} + r_K, \quad (4.4)$$

яке включає активні опори обмоток якоря, послідовної обмотки збудження, додаткових полюсів і компенсаційної обмотки. Падіння напруги під щітками входить до (4.3) в ЕРС обертання. Щоб від диференційних рівнянь (4.3), що описують перехідні і усталені режими, перейти до рівнянь усталеного режиму, достатньо в (4.3) прирівняти члени з похідними нулю, а не множити їх на  $j\omega$ , як це робилося в машинах змінного струму. Так як машина підключена до

мережі постійного струму і розрахунки ведуться по струму якоря, що протікає по відношенню до перетворювача частоти - колектору з боку постійного струму, аналіз процесів перетворення енергії в усталеному режимі можна вести тільки з урахуванням постійних струмів.

Рівняння машини постійного струму в усталеному режимі з (4.3):

$$\begin{aligned} U_B &= I_B R_B; \\ U^* &= E \pm I_A R_A; \\ E &= c \omega_p \Phi, \end{aligned} \quad (4.5)$$

де  $R_B$  – опір обмотки збудження і регульовального резистора, включеного в контур збудження;

$R_A$  – внутрішній опір машини, що включає всі послідовні опору в ланцюзі якоря;

$E$  – ЕРС обертання (напруга при холостому ході машини), (4.2).

При навантаженні поле в машині створюється як струмом обмотки збудження, так і струмом якоря. Результуючий потік в машині залежить від навантаження та схеми з'єднання обмоток збудження. Щоб уникнути значного впливу струму навантаження на поле збудження, в машинах постійного струму виконують компенсаційну обмотку. При зміні навантаження потік у повітряному зазорі змінюється: Зміна потоку при зміні навантаження враховується при конструюванні машин постійного струму.

По суті (4.5), нелінійна залежність магнітного потоку від струмів, що протікають в обмотках машини, і є математичною моделлю процесів перетворення енергії в машинах постійного струму.

У генераторному режимі  $E > U$ , де  $U$  – напруга мережі. У режимі двигуна  $U > E$ . Тому в (4.5) перед падінням напруги на внутрішньому опорі стоять знаки плюс і мінус.

Момент на валу машини постійного струму

$$M_{эм} = c\Phi I_{я}. \quad (4.6)$$

Рівняння можуть бути отримані з уявлення машини у вигляді чотириполюсника з двома електричними і двома механічними виводами (рис. 4.5). У даній машині, так само як і в машинах змінного струму, на електричних виводах присутня частота  $f$ , яка може бути віднесена до мережі ( $f = 0$ ) або до струмів в обмотці якоря, де  $f = pn/60$ .

При холостому ході генератора постійного струму ( $I_{я} = 0$ ) поле в машині створюється обмоткою збудження, в якій протікає постійний струм  $I_{в}$ . При цьому  $U = E$ . Електрорушійна сила обертання (або проти-ЕРС) врівноважує напругу мережі. У генераторному режимі для машини з незалежним збудженням струм в якорі генератора

$$I_{я} = (EU)/R_{вн}. \quad (4.7)$$

Механічна енергія, що підводиться до валу машини, перетворюється в електричну.

У режимі двигуна електрична енергія перетворюється в механічну. Струм в режимі двигуна

$$I_{я} = (U-E)/R_{вн}. \quad (4.8)$$

У режимі роботи двигуном при холостому ході машина споживає електричну потужність з мережі, яка йде на покриття втрат холостого ходу, і  $I_{я} \neq 0$ , а  $U \neq E$ .

## 4.2 Дослідження машин постійного струму з незалежним збудженням

### *Мета дослідження*

Дослідження машини постійного струму при роботі в режимах двигуна та генератора

### *Зміст дослідження*

1. Зняття механічної і розрахунок робочих характеристик машини в руховому режимі роботи.
2. Зняття механічної і розрахунок робочих характеристик машини в генераторному режимі роботи.
3. Зняття механічних характеристик при різних напругах живлення в колі якоря.
4. Зняття механічних характеристик при різних опорах в колі якоря.
5. Зняття механічних характеристик при різних потоках збудження.
6. Зняття регулювальних характеристик при зміні напруги якоря.

### *Опис віртуальної лабораторної установки*

Віртуальну лабораторну установку представлено на рис. 4.2. Вона містить:

- джерела постійної напруги ( $V_1$  для живлення якоря машини,  $V_2$  для живлення обмотки збудження з бібліотеки Power System Blockset / Electrical Sources);

- блок Moment для завдання моменту навантаження (блок Constant з бібліотеки Simulink / Sources), саму машину постійного струму (блок DC Machine з бібліотеки Power System Blockset / Machines);

- блок для вимірювання змінних стану машини Display;

- осцилограф Scope для візуального спостереження процесів з бібліотеки Simulink / Sinks.

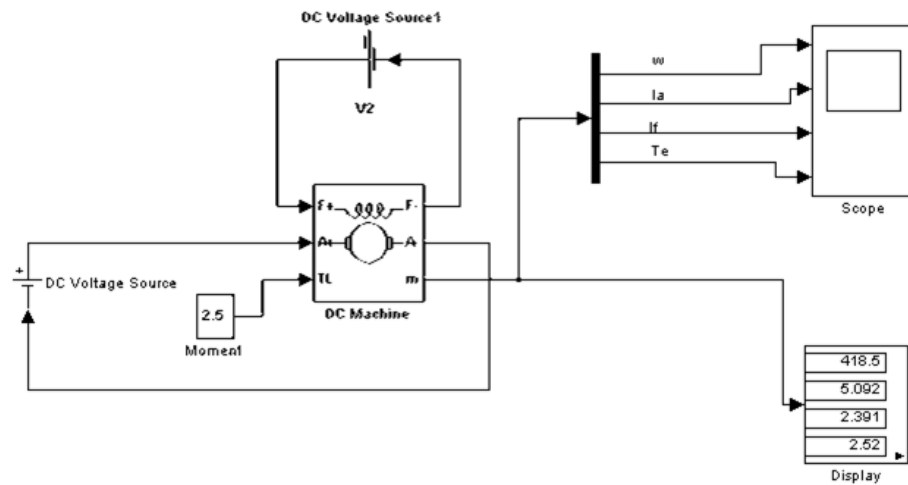


Рис. 4.2 □□Модель для дослідження машини постійного струму з незалежним збудженням.

Коло якоря і коло збудження видно із графічного зображення блоку, на вхід  $TL$  подається момент навантаження, вихід  $m$  призначений для вимірювання та спостереження змінних стану машини в такій послідовності:

- кутова швидкість (рад / с),
- струм якоря в (А),
- струм збудження (А),
- електромагнітний момент (Нм).

У полях налаштування машини (мал. 4.3) задаються:

- параметри обмотки якоря -  $R_a$  (Ом),  $L_a$  (Гн);
- параметри обмотки збудження -  $R_f$  (Ом),  $L_f$  (Гн);
- коефіцієнт  $L_{af}$ ,
- сумарний момент інерції машини і навантаження -  $J$  (кгм<sup>2</sup>).
- коефіцієнт в'язкого тертя -  $B_m$  (Нм \* с);
- коефіцієнт сухого тертя -  $T_F$  (Нм);
- початкова швидкість.

Слід підкреслити, що параметри ( $L_{fi}$ ,  $J$ ) важливі при дослідженні перехідних процесів. На усталені режими вони не впливають.

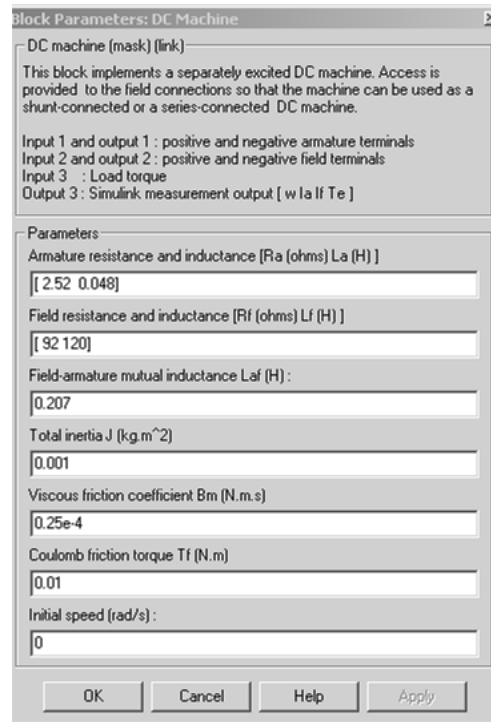


Рис. 4.3 □□ Вікно налаштування параметрів машини постійного струму

Всі ці параметри розраховуються за виразами:

$$I_{\phi} = \frac{U_{\phi}}{R_{\phi}}, M_n = \frac{P_n}{\omega_n} = \frac{30P_n}{\pi n_n}, I_{ян} = \frac{P_n}{U_{ян} \eta_n} - I_{\phi}, L_{af} = \frac{M_n}{I_{ян} I} \quad (4.9)$$

$$L_{\phi} \geq (2-5) \frac{L_{я} R_{\phi}}{R_{я}}, J \geq \frac{(5-10) L_{я} P_n^2}{R_{я}^2 \omega_n^2 I_{ян}^2} \quad (4.10)$$

Паспортні параметри машин постійного струму наведено в таблиці 4.1.

Таблиця 4.1

Тип дви-гуна	$P_n$ [кВт]	$U_n$ [В]	$N_n$ [об/хв]	$\eta_n$ [%]	$R_{я}$ [Ом]	$R_{в}$ [Ом]	$L_{я}$ [мГн]
1	2	3	4	5	6	7	8
2ПН-0,17	0,17	220	750	48,5	27,2	162	514
2ПН-0,25	0,25	220	1120	57	15,47	612	297
2ПН-0,37	0,37	220	1500	61,5	10,61	612	190
2ПН-0,71	0,71	220	2360	70	3,99	123	70

2ПН-1,0	1	220	3000	72,5	2,52	92	48
---------	---	-----	------	------	------	----	----

Вікно налаштування параметрів моделювання показано на рис. 4.4.

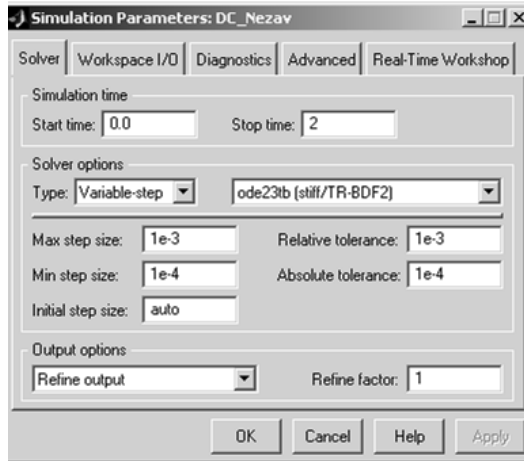


Рис. 4.4 □□ Вікно завдання параметрів моделювання

### Порядок виконання роботи

1. Для заданої викладачем (або вибраної при самостійній роботі) машини розрахувати значення параметрів і заповнити поля вікна налаштування параметрів машини.

2. Вказати параметри моделювання (рис. 4.4).

3. При знятті характеристик за п. 1 порядку виконання роботи у вікні налаштування блоку *Moment* послідовно задаються значення моменту від 0 до  $1,2 M_n$  з кроком  $0,2 M_n$ . Для кожного значення моменту здійснюється моделювання і заповнюється таблиця 4.2 вимірних і розрахованих значень.

Таблиця 4.2

Завдання	Виміри			Розрахунки		
	$\omega$ [рад/с]	$I_A$ [А]	$I_B$ [А]	$P_1$ [Вт]	$P_2$ [Вт]	$\eta$
$M$ [Нм]						

Обчислення здійснюється за виразами:

$$P_1 = U(I_B + I_A), P_2 = M_i \omega, \eta = \frac{P_2}{P_1}$$



4. При знятті характеристик за п. 2 порядку виконання роботи у вікні настрійки блоку *Moment* послідовно задаються значення моменту від 0 до  $-1,2 M_n$  з кроком  $-0,2 M_n$ . Для кожного значення моменту здійснюється моделювання і заповнюється таблиця 4.2. виміряних і розрахованих значень. 4.4.

5. Зняття механічних характеристик при різних напругах живлення в колі якоря за п. 3 змісту роботи слід провести для двох значень напруги на якорі  $0,6 U_n$  і  $0,8 U_n$ , де  $U_n$ -первісне напруга на якорі, при якому виконувалися п.п. 1, 2. При цьому момент навантаження слід змінювати від  $-1,2 M_n$  до  $1,2 M_n$  з кроком  $0,2 M_n$ . Для кожного значення напруги на якорі і моменту проводиться моделювання і заповнюється таблиця 4.3.

Таблиця 4.3

M [Нм]	$\omega$ [рад/с]

6. Зняття механічних характеристик при різних опорах в колі якоря за п. 4 змісту роботи слід провести для двох значень опору якоря  $2R_n$  і  $4R_n$  де  $R_n$  первісне значення опору. Зміна опору якоря здійснюється в полі вікна налаштування параметрів машини. При цьому момент навантаження слід змінювати від  $-1,2 M_n$  до  $1,2 M_n$  з кроком  $0,2 M_n$ . Для кожного значення опору якоря і моменту проводиться моделювання і заповнюється таблиця 4.3.

7. Зняття механічних характеристик при різних потоках порушення по п. 5 змісту роботи слід провести для двох значень потоку  $0,6 \Phi_n$  і  $0,8 \Phi_n$ . Для цього в полі *Field-armature mutual inductance* необхідно встановити значення  $L_{af}$  спочатку  $0,6$ , а потім  $0,8$  від початкової величини. При цьому момент навантаження слід змінювати від  $-1,2 M_n$  до  $1,2 M_n$  з кроком  $0,2 M_n$ . Для кожного значення потоку і моменту проводиться моделювання і заповнюється таблиця 4.3.

8. Зняття регулювальних характеристик при зміні напруги якоря за п. 6 змісту роботи проводиться для постійного моменту навантаження, рівного номінальному, і зміні напруги в кола якоря від 0,4 до 1,2 вихідного значення з кроком 0,2 вихідного значення напруги. Для кожного значення напруги проводиться моделювання і заповнюється таблиця 4.4.

Таблиця 4.4

$U_{я}$ [Нм]	$\omega$ [рад/с]

Миттєві значення струмів у фазах якоря машини, швидкість і потужність машини можна спостерігати на екрані осцилоскопа (рис. 4.5).

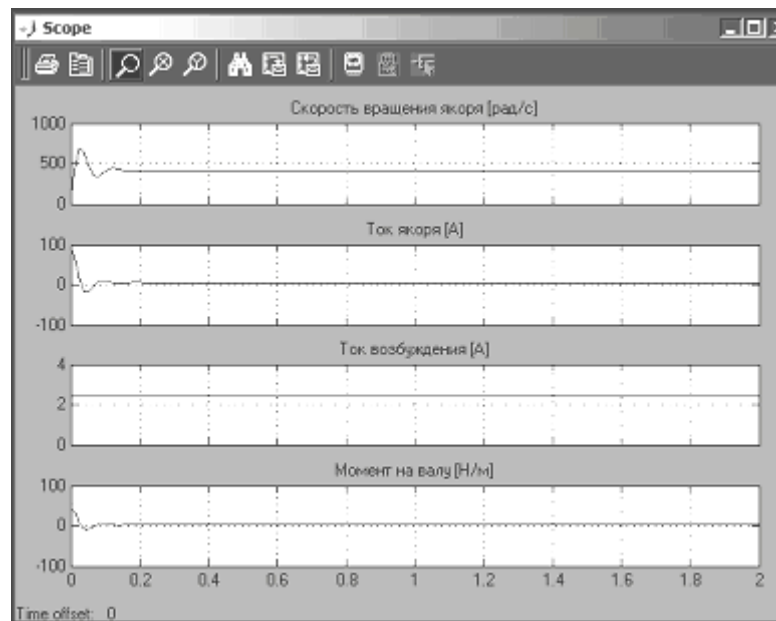


Рис. 4.5 □□ Миттєві значення струмів у фазах якоря машини, швидкість машини

### *Зміст звіту*

1. Схема моделі для проведення лабораторної роботи.
2. Розрахункові формули параметрів машини.
3. Розрахункові формули для потужностей  $P_1$   $P_2$  і ККД.
4. Заповнені таблиці.

5. Графіки робочих характеристик машини в режимах двигуна і генератора.
6. Графіки механічної характеристики машини при різних напругах на якорі.
7. Графіки механічної характеристики машини при різних опорах якоря.
8. Графіки механічної характеристики машини при різних потоках.
9. Регульовальна характеристика двигуна.

### 4.3 Дослідження машини постійного струму з послідовним збудженням

#### *Мета дослідження*

Дослідження машини постійного струму при роботі в режимі двигуна.

#### *Зміст дослідження*

Зняття механічної і розрахунок робочих характеристик машини в режимі роботи двигуна.

#### *Опис віртуальної лабораторної установки*

Віртуальну лабораторну установку представлено на рис. 4.6.

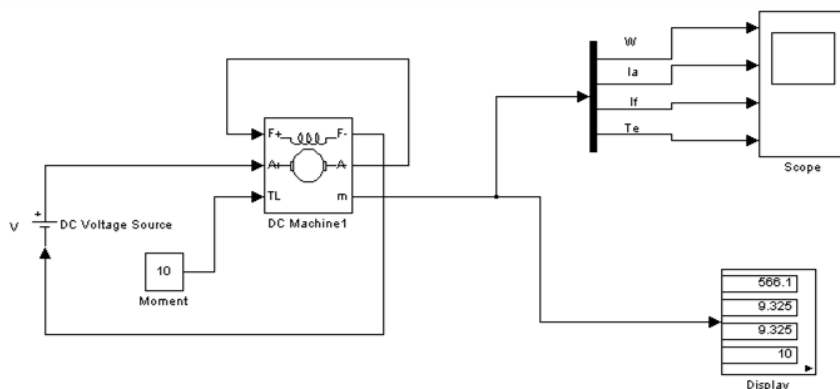


Рис. 4.6 □□ Модель для дослідження машини постійного струму з послідовним збудженням

Вона містить:

- джерела постійної напруги ( $V_1$  для живлення якоря машини,  $V_2$  для живлення обмотки збудження з бібліотеки *Power System Blockset / Electrical Sources*);

- блок *Moment* для завдання моменту навантаження (блок *Constant* з бібліотеки *Simulink / Sources*), саму машину постійного струму (блок *DC Machine* з бібліотеки *Power System Blockset / Machines*);

- блок для вимірювання змінних стану машини *Display*;

- осцилограф *Scope* для візуального спостереження процесів з бібліотеки *Simulink / Sinks*.

Вікно налаштування параметрів машини постійного струму показано на рис.4.7.

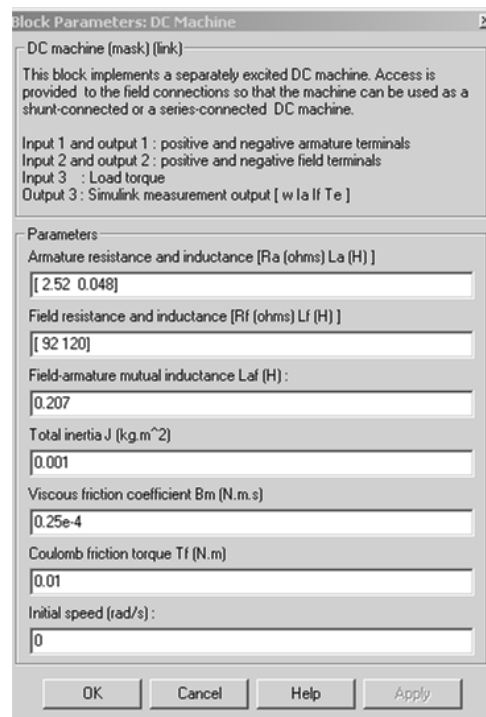


Рис. 4.7 □□ Вікно налаштування параметрів машини

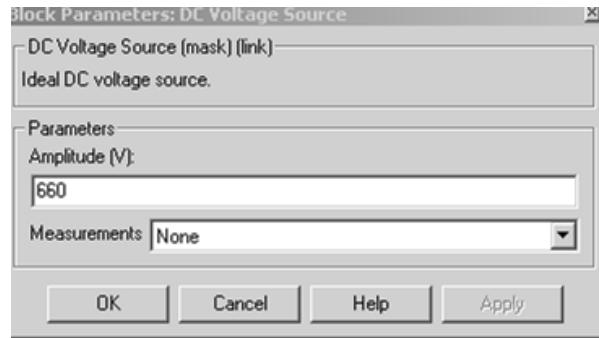


Рис. 4.8 □ □ Вікно налаштування параметрів джерела живлення

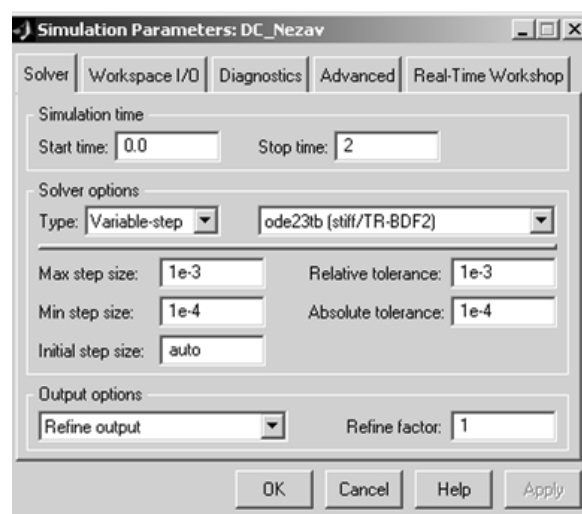


Рис. 4.9 □ Вікно завдання параметрів моделювання

### *Порядок проведення дослідження*

Параметри машини і джерела задаються такими, як на рис. 4.7,4.8.

Вказати параметри моделювання (рис. 4.9).

При знятті характеристик у вікні настройки блоку *Moment* послідовно задаються значення моменту від 5 Нм до 100 Нм з кроком 10 Нм. Для кожного значення моменту здійснюється моделювання і заповнюється таблиця 4.5 вимірних і розрахованих значень.

Таблиця 4.5

Завдання	Вимір			Розрахунок			
	М[Нм]	$\omega$ [рад/с]	Ія[А]	Ів[А]	P1[Вт]	P2[Вт]	$\eta$

Розрахунок здійснюється за виразами:

$$P_1 = UI, P_2 = M\omega, \eta = \frac{P_2}{P_1}$$

Миттєві значення струмів у фазах якоря машини, швидкість і потужність машини можна спостерігати на екрані осцилоскопа (рис. 4.10).

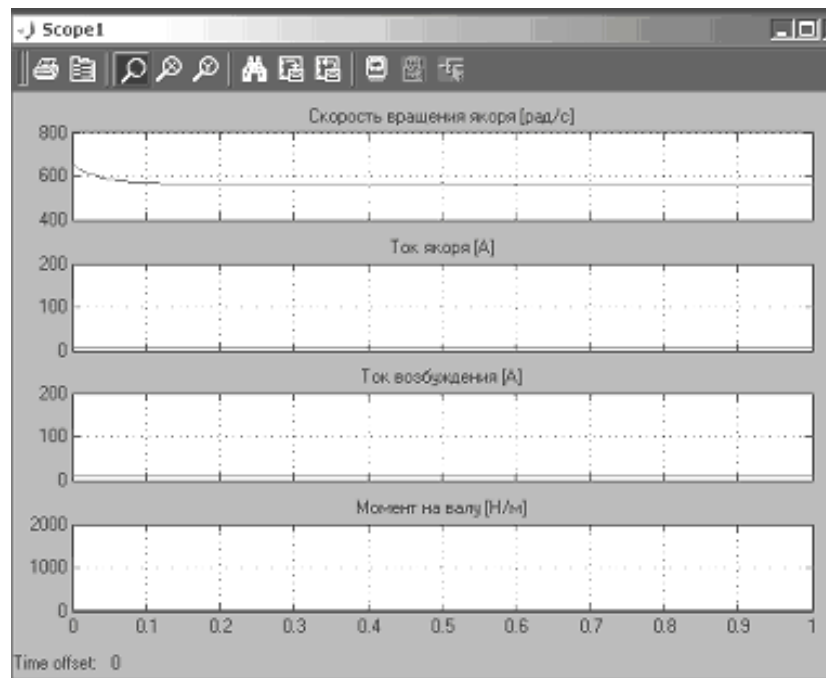


Рис. 4.10 Миттєві значення струмів у фазах якоря машини, швидкість машини

### Зміст звіту

1. Схема моделі та опис блоків.
2. Заповнені таблиці.
3. Механічні характеристики машини  $\omega = f(M)$ .
4. Робочі характеристики машини  $\omega, I, M, P_1, \eta = f(P_2)$ .

#### 4.4 Дослідження машини постійного струму з паралельним збудженням

##### *Мета дослідження*

Дослідження машини постійного струму при роботі в руховому і генераторному режимах.

##### *Зміст дослідження*

1. Зняття механічної і розрахунок робочих характеристик машини в двигунному режимі роботи.
2. Зняття механічної і розрахунок робочих характеристик машини в генераторному режимі роботи.
3. Зняття механічних характеристик при різних напругах живлення в ланцюзі якоря.
4. Зняття механічних характеристик при різних опорах в ланцюзі якоря.
5. Зняття механічних характеристик при різних потоках збудження.
6. Зняття регульовальних характеристик при зміні напруги якоря.

##### *Опис віртуальної лабораторної установки*

Віртуальну лабораторну установку представлено на рис. 4.11. Вона містить:

- джерела постійної напруги ( $V_1$  для живлення якоря машини,  $V_2$  для живлення обмотки збудження з бібліотеки *Power System Blockset / Electrical Sources*);
- блок *Moment* для завдання моменту навантаження (блок *Constant* з бібліотеки *Simulink / Sources*), саму машину постійного струму (блок *DC Machine* з бібліотеки *Power System Blockset / Machines*);
- блок для вимірювання змінних стану машини *Display*;

- осцилограф *Scope* для візуального спостереження процесів з бібліотеки *Simulink / Sinks*.

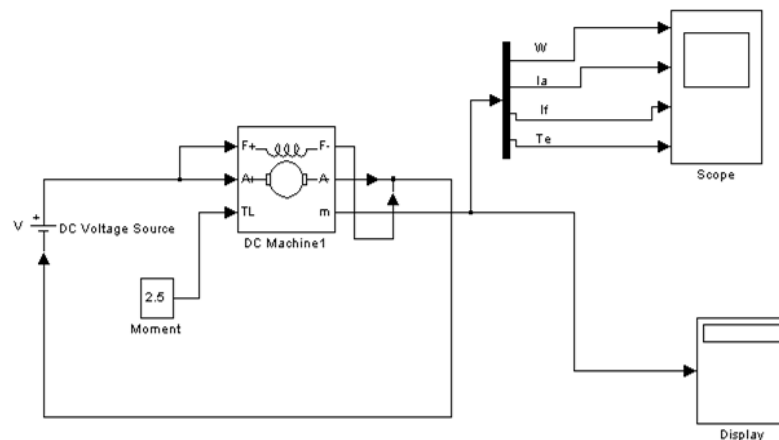


Рис. 4.11 □□ Модель для дослідження машини постійного струму з паралельним збудженням

Коло якоря і коло збудження видно із графічного зображення блоку, на вхід TL подається момент навантаження, вихід m призначений для вимірювання та спостереження змінних стану машини в такій послідовності:

- кутова швидкість (рад / с),
- струм якоря в (А),
- струм збудження (А),
- електромагнітний момент (Нм).

У полях налаштування машини (мал. 4.12) вказуються:

- параметри обмотки якоря -  $R_a$  (Ом),  $L_a$  (Гн);
- параметри обмотки збудження -  $R_f$  (Ом),  $L_f$  (Гн);
- коефіцієнт  $L_{af}$ ,
- сумарний момент інерції машини і навантаження -  $J$  (кгм<sup>2</sup>).
- коефіцієнт в'язкого тертя -  $B_m$  (Нм \* с);
- коефіцієнт сухого тертя -  $T_F$  (Нм);
- початкова швидкість;

Паспортні параметри машин постійного струму наведено в таблиці 4.1.



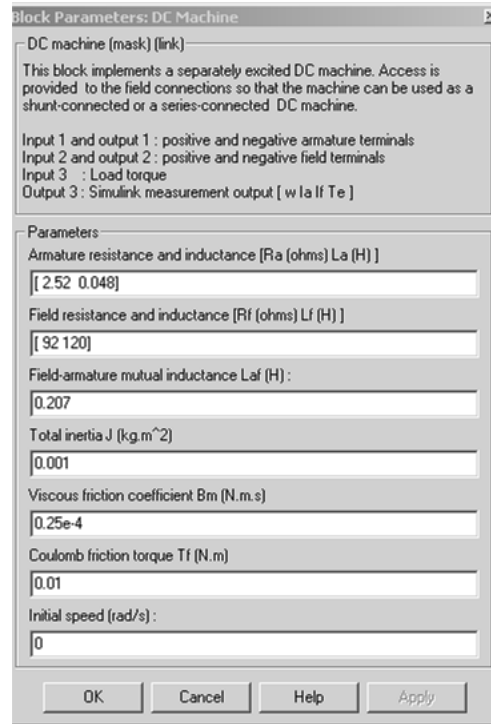


Рис. 4.12 □ Вікно налаштування параметрів машини постійного струму

Вікно налаштування параметрів моделювання показано на рис. 4.13.

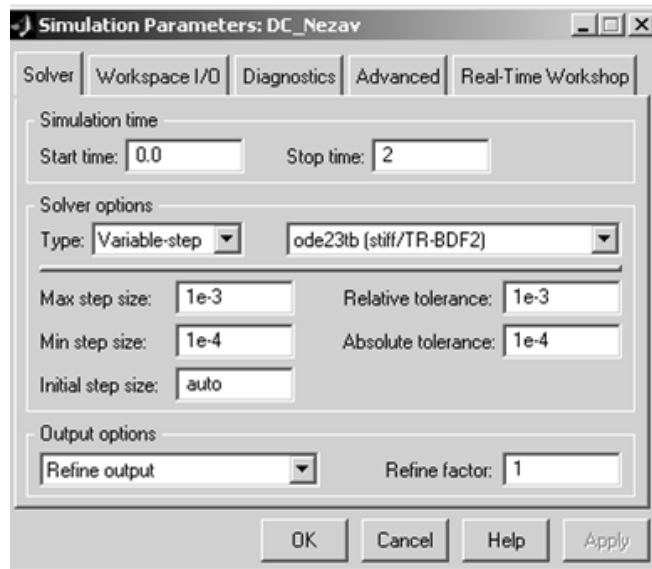


Рис. 4.13 □□ Вікно завдання параметрів моделювання

### Порядок виконання роботи

1. Для заданої викладачем (або вибраної при самостійній роботі) машини розрахувати значення параметрів і заповнити поля вікна налаштування параметрів машини.

2. Вказати параметри моделювання (рис. 4.4).

3. При знятті характеристик за п. 1 порядку виконання роботи у вікні налаштування блоку *Moment* послідовно задаються значення моменту від 0 до  $1,2 M_n$  з кроком  $0,2 M_n$ . Для кожного значення моменту здійснюється моделювання і заповнюється таблиця 4.6 вимірних і розрахованих значень.

Таблиця 4.6.

Завдання	Виміри			Розрахунок		
	M[Нм]	$\omega$ [рад/с]	I <sub>я</sub> [А]	I <sub>в</sub> [А]	P <sub>1</sub> [Вт]	P <sub>2</sub> [Вт]

Обчислення здійснюється за виразами:

$$P_1 = U(I_\beta + I_A), P_2 = M_f \omega, \eta = \frac{P_2}{P_1}$$

3. При знятті характеристик за п. 2 порядку виконання роботи у вікні налаштування блоку *Moment* послідовно задаються значення моменту від 0 до  $-1,2 M_n$  з кроком  $-0,2 M_n$ . Для кожного значення моменту здійснюється моделювання і заповнюється таблиця 4.7. вимірних і розрахованих значень.

4. Зняття механічних характеристик при різних напругах живлення в колі якоря за п. 3 змісту роботи слід провести для двох значень напруги на якорі  $0,6 U_n$  і  $0,8 U_n$ , де  $U_n$ -первісне напруга на якорі, при якому виконувалися п.п. 1, 2. При цьому момент навантаження слід змінювати від  $-1,2 M_n$  до  $1,2 M_n$  з кроком  $0,2 M_n$ . Для кожного значення напруги на якорі і моменту проводиться моделювання і заповнюється таблиця 4.8.

Таблиця 4.7

М [Нм]	$\omega$ [рад/с]

5. Зняття механічних характеристик при різних опорах в колі якоря за п. 2.4 змісту роботи слід провести для двох значень опору якоря  $2R_{я}$  і  $4R_{я}$  де  $R_{я}$  первісне значення опору. Зміна опору якоря здійснюється в полі вікна налаштування параметрів машини. При цьому момент навантаження слід змінювати від  $-1,2 M_{н}$  до  $1,2 M_{н}$  з кроком  $0,2 M_{н}$ . Для кожного значення опору якоря і моменту проводиться моделювання і заповнюється таблиця 4.3.

6. Зняття механічних характеристик при різних потоках порушення по п. 2.5 змісту роботи слід провести для двох значень потоку  $0,6 \Phi_{н}$  і  $0,8 \Phi_{н}$ . Для цього в полі Field-armature mutual inductance необхідно встановити значення  $L_{af}$  спочатку  $0,6$ , а потім  $0,8$  від початкової величини. При цьому момент навантаження слід змінювати від  $-1,2 M_{н}$  до  $1,2 M_{н}$  з кроком  $0,2 M_{н}$ . Для кожного значення потоку і моменту проводиться моделювання і заповнюється таблиця 4.3.

7. Зняття регулювальних характеристик при зміні напруги якоря за п. 2.6 змісту роботи проводиться для постійного моменту навантаження, рівного номінальному, і зміні напруги в кола якоря від  $0,4$  до  $1,2$  вихідного значення з кроком  $0,2$  вихідного значення напруги. Для кожного значення напруги проводиться моделювання і заповнюється таблиця 4.4.

Таблиця 4.8

Уя [Нм]	$\omega$ [рад/с]

Миттєві значення струмів у фазах якоря машини, швидкість і потужність машини можна спостерігати на екрані осцилоскопа (рис. 4.14).

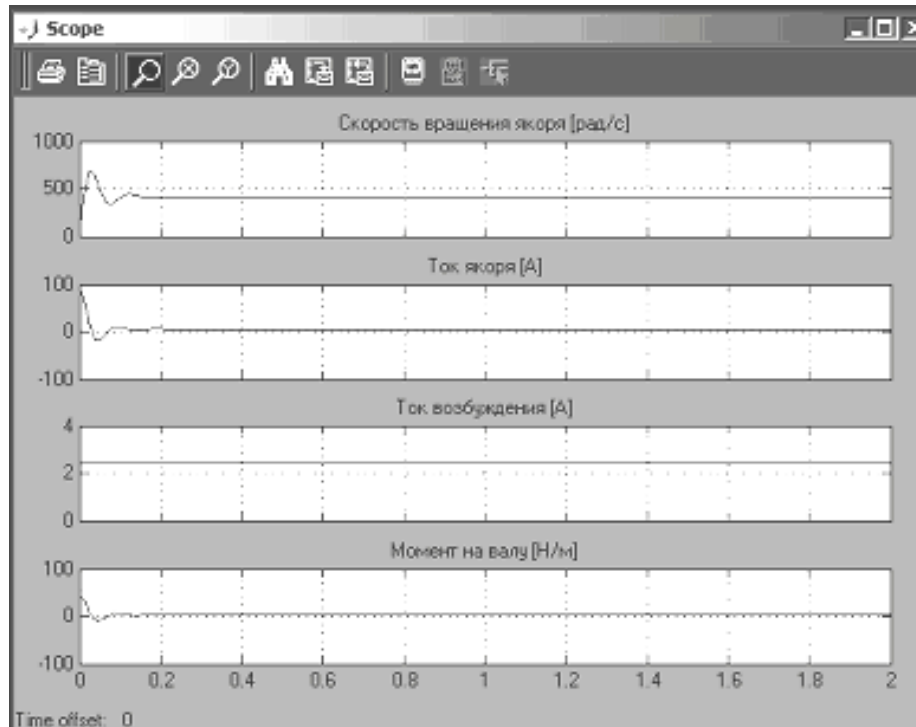


Рис. 4.14 □ Миттєві значення струмів у фазах якоря машини, швидкість машини

### *Зміст звіту*

1. Схема моделі для проведення лабораторної роботи.
2. Розрахункові формули параметрів машини.
3. Розрахункові формули для потужностей  $P_1$   $P_2$  і ККД.
4. Заповнені таблиці.
5. Графіки робочих характеристик машини в руховому і генераторному режимах.
6. Графіки механічної характеристики машини при різних напругах на якорі.
7. Графіки механічної характеристики машини при різних опорах якоря.
8. Графіки механічної характеристики машини при різних потоках.
9. Регульовальна характеристика двигуна.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

В даній магістерській роботі розроблені програмні моделі для дослідження роботи трансформатора та електричних машин змінного та постійного струму. Розроблена матеріальна база (програмне забезпечення) для впровадження в навчальний процес віртуальної лабораторії електричних машин.

Проведено аналіз та дослідження роботи трансформаторів та електричних машин на віртуальних моделях в програмному пакеті MATLAB. Під час виконання роботи сформовано та розв'язано питання щодо створення навчальних стендів за допомогою віртуальних моделей, питання з розробки та дослідження навчальних стендів.

По ходу вирішення цих завдань використовувалися різноманітні методи моделювання електротехнічних систем, а також диференціальне та інтегральне числення. Теоретичні дослідження виконувалися як аналітичними методами так і з застосуванням комп'ютерного моделювання.

При впровадженні в навчальний процес розробленої матеріальної бази можна виділити наступні переваги:

- непотрібні дорогі стенди для проведення досліджень;
- впровадження у навчання дистанційного підходу;
- можливість самостійної підготовки студентів до лабораторних робіт;
- необмежений ресурс для проведення студентами різноманітних досліджень.

Результати роботи можуть бути впроваджені в навчальний процес для вивчення дисциплін напряму електроспоживання в умовах обмеженої навчально-лабораторної бази.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Правила улаштування електроустановок / 5-е вид. переробл. й доповн. – Харків: Форт, 2017. – 760 с.
2. Мілих В.І. Електропостачання промислових підприємств : Підручник для студентів електромеханічних спеціальностей / В.І. Мілих, Т.П. Павленко. – Харків : ФОП Панов А. М., 2016. – 272 с.
3. Бурбело, М. Й. Системи електропостачання. Елементи теорії та приклади розрахунків : навчальний посібник / М. Й. Бурбело, О. О. Бірюков, Л. М. Мельничук – Вінниця : ВНТУ, 2011. – 204 с.
6. Лук'яненко Ю.В., Остапчук Ж.І., Кулик В.В. Розрахунки електричних мереж при їх проектуванні. Навчальний посібник. – Вінниця: ВДТУ, 2002. – 116 с.
8. Електропостачальні системи та їх проектування [Текст]: Конспект лекцій для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / уклад. Т.І. Коменда., Н.В. Коменда. – Луцьк: Луцький НТУ, 2016. – 190 с.
10. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів. Наказ Мінпаливенерго від 25.07.2006 р. №258 – Київ.: 2006. – 181 с.
11. Настанова з проектування систем електропостачання промислових підприємств. ДСТУ НБВ.2.5-80:2015 Київ Мінрегіон 2016. – 83 с.
13. Правила безпечної експлуатації електроустановок споживачів. ДНАОП 0.00–1.21–98. – Київ: Державний комітет України по нагляду за охороною праці, 1998. – 91 с.

15. Дмитренко, О. О., & Шкурат, А. І. (2018). ВІТЧИЗНЯНІ МІКРО-ПРОЦЕСОРНІ ПРИСТРОЇ РЕЛЕЙНОГО ЗАХИСТУ ТА АВТОМАТИКИ. Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики", 88-90.

15. Матесенко, Ю. П., & Афанасьєв, М. Ю. (2016). КОМПЛЕКСНИЙ ПІДХІД ДО ОЦІНКИ НАДІЙНОСТІ ЕЛЕКТРИЧНОЇ СТАНЦІЇ. Міжнародний науково-технічний журнал "Сучасні проблеми електроенерготехніки та автоматики", 130-132.

16. Правила улаштування електроустановок. - Видання офіційне. Міне-нерговугілля України. - Х. : Видавництво "Форт", 2017. - 760 с.

17. Бурбело М.Й. Проектування систем електропостачання. Приклади розрахунків. Навчальний посібник. – 2-е вид., перероб. і доп. – Вінниця: УНІВЕРСУМ – Вінниця, 2005. – 148 с.

18. Лук'яненко Ю. В. Розрахунки електричних мереж при їх проектуванні : Навч. посіб. / Ю. В. Лук'яненко, Ж. І. Остапчук, В. В. Кулик; Вінниц. держ. техн. ун-т. - Вінниця, 2002. - 111 с. 77 23.

19. Зорін В.В., Штогрін Є.А., Буйний Р.О. Електричні мережі та системи: навчальний посібник для студентів вищ. техн. навч. закл.– Ніжин ТОВ “Видавництво”Аспект-поліграф”, 2011. – 248 с.

20. Правила технічної експлуатації електроустановок споживачів [Текст] : [затв. ... Наказ М-ва палива та енергетики України 25.07.2006 № 258 ] / М-во палива та енергетики України. - Х. : Індустрія : Енергетичні рішення, 2012. - 318 с.