

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ**  
**ХАРКІВСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**  
**МІСЬКОГО ГОСПОДАРСТВА імені О. М. БЕКЕТОВА**

**МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ**  
до виконання лабораторних робіт  
з навчальної дисципліни

**«ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ І МЕРЕЖІ»**

*(для студентів денної та заочної форм навчання  
та слухачів другої вищої освіти спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

**Харків**  
**ХНУМГ ім. О. М. БЕКЕТОВА**  
**2018**

Методичні рекомендації до виконання лабораторних робіт з  
початкової дисципліни «Електричні системи і мережі» (для студентів  
денної та курсів заочної форм навчання та слухачів другої вищої освіти  
спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та  
електромеханіка) / Харків. нац. ун-т міськ. госп-ва ім. О. М. Бекетова ,  
уклад. В. О. Перепечений. – Харків : ХНУМГ ім. О. М. Бекетова, 2018. –  
39 с.

Укладач канд. техн. наук, доц. В. О. Перепечений

Рецензент канд. техн. наук, доц. І. Т. Карпалюк

Рекомендовано кафедрою систем електропостачання та  
електроспоживання міст , протокол № 7 від 25.04.2016.

## ЗМІСТ

Вступ .....	4
Лабораторна робота № 1 Застосування пакету <i>Simulink</i> для моделювання електричних мереж і систем.....	5
Лабораторна робота № 2 Створення моделей ЛЕП в пакеті <i>Matlab</i> .....	14
Лабораторна робота № 3 Схеми заміщення трансформаторів. Їх моделі в пакеті <i>Matlab</i> .....	25
Лабораторна робота № 4 Дослідження ліній електропередачі з розподіленим навантаженням.....	33
Список рекомендованих джерел.....	39

## ВСТУП

Ці методичні вказівки складено для проведення циклу лабораторних робіт з дисципліни «Електричні системи та мережі» для студентів денної та курсів заочної форм навчання та слухачів другої вищої освіти спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Лабораторні роботи дають змогу студентам, що вивчають курс, перевірити теорію, яку подано в підручниках, навчальних посібниках та лекціях з використанням комп'ютерного моделювання. Вони допоможуть студентам закріпити навички з:

- розрахунку параметрів схем заміщення ліній електропередачі (ЛЕП) та трансформаторів;
- розрахунку нормальних та післяаварійних усталених режимів роботи електричних мереж;
- розрахунку втрат потужності та напруги в елементах електричних мереж.

Під час лабораторних занять студенти аналізують результати дослідів, вчать стисло та якісно оформляти звіти з виконаних робіт.

# Лабораторна робота № 1

## Застосування пакету *Simulink* для моделювання електричних мереж і систем

**Мета роботи:** ознайомитися з пакетом схемотехнічного моделювання *Simulink*, навчитися складати схеми та використовувати основні вимірювальні прилади.

### Порядок виконання роботи

1. Зібрати модель простого розгалуженого електричного кола відповідно до вказівок викладача.
2. Послідовно провести вимірювання миттєвого, діючого та амплітудного значень струмів та напруг на елементах.
3. Ознайомитися з основними режимами блоку *Powergui*.
4. Зняти осцилограми виміряних величин та порівняти їх з отриманими у пункті 2.
5. Перевірити, як впливає зміна параметрів процесу моделювання режиму на осцилограми та показання приладів.
6. Зробити висновки по роботі.

### Теоретичні положення

#### *Запуск програми*

Після запуску програми файлом *matlab.exe* створення нової моделі можливе двома способами:

- 1) вибрати меню *File/New/Model*, після чого з'явиться робоче поле для створення моделі. Піктограма бібліотеки блоків (*Library Browser*) знаходиться на панелі інструментів даного вікна (рис. 1.1 та 1.2);
- 2) відкрити бібліотеку блоків (піктограма *Simulink* на панелі інструментів), а потім створити нову модель (*Create a new model*) (рис. 1.3 та 1.4).



Рисунок 1.1 – Головне меню програми. Створення нової моделі

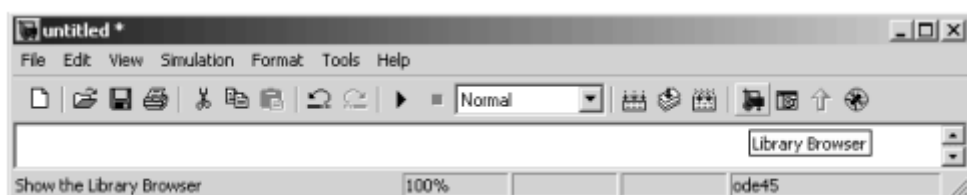


Рисунок 1.2 – Головне меню Simulink з панеллю інструментів



Рисунок 1.3 – Головне меню програми з панеллю інструментів



Рисунок 1.4 – Створення нової моделі за допомогою панелі інструментів

### ***Основні принципи створення моделей***

Для створення моделі електричного кола необхідно розташувати всі необхідні блоки на робочому полі, задати їх параметри, після чого з'єднати їх а задати параметри розрахунку моделі в цілому [8]. Для з'єднання між собою блоки мають входи та виходи (рис. 1.5).



Рисунок 1.5 – Блок з одним входом та виходом

З'єднувати блоки можна за допомогою мишки наступним чином: навести курсор на вхід (вихід) одного з блоків, натиснути ліву кнопку мишки та, не відпускаючи її, пересунути курсор на вихід (вхід) іншого блоку і відпустити кнопку мишки. Інший спосіб: одиночним натисканням лівої кнопки мишки виділяємо один з блоків, натискаємо клавішу *CTRL* та не відпускаючи її виділяємо інший з'єднуваний блок. **При використанні даного способу може утворитися некоректне з'єднання у випадку, коли входів (виходів) декілька.** Для утворення вузлів електричної схеми використовуються спеціальні блоки – з'єднуючі елементи (*Connectors*).

При створенні моделей силових електроенергетичних систем використовуються два класи блоків: *Simulink*-блоки (*S*-блоки) та *SimPowerSystems*-блоки (*SPS*-блоки) [9]. Різниця між цими класами блоків полягає в тому, що в *S*-блоках відбувається перетворення інформаційного сигналу і вони мають однозначний напрямок його проходження. Входи та виходи *SPS*-блоків фактично є еквівалентами електричних контактів, а з'єднувальні лінії між ними є аналогами електричних проводів, по яких струм може протікати в двох напрямках.

Безпосередньо з'єднувати *S*- та *SPS*-блоки не дозволяється. Сигнал від *S*-блоку до *SPS*-блоку можна передати за допомогою керованих джерел струму або напруги (*Controlled Current Source, Controlled Voltage Source*), а навпаки – за допомогою вимірювачів струму або напруги (*Current Measurement, Voltage Measurement*).

Зміна параметрів деяких блоків змінює вид інформації, що відображається. На рис. 1.6 показаний блок *Display*, підключений до лінії вимірювання трифазної величини. Зліва на рисунку 1.6 зображено блок *Display*. Чорний трикутник в нижньому куті вказує на те, що інформація виведена не повністю. Справа на рисунку 1.6 зображено блок *Display* після його розтягування за будь-який кут.



Рисунок 1.6 – Блок *Display Simulink Library Browser* містить більше двадцяти спеціалізованих бібліотек

Бібліотека **SimPowerSystem** призначена для моделювання силових електроенергетичних систем. Вона складається з наступних модулів:

- *Connectors* – елементи для з'єднання блоків.
- *Electrical Sources* – джерела електричної енергії.
- *Elements* – електротехнічні елементи.
- *Extra Library* – додаткові електротехнічні пристрої.
- *Machines* – електричні машини.
- *Measurements* – вимірювальні та контрольні пристрої.
- *Power Electronics* – пристрої силової електроніки.

### **Модуль *Connectors***

Основними блоками модуля *Connectors* є (рис. 1.7):

- *Bus Bar* (шина) – для об'єднання декількох вхідних та вихідних ліній.
- *Ground* (заземлення) – забезпечує з'єднання з землею. Для зручності користування є два блоки *Ground* – з входом та з виходом.
- *L connector* (L-подібне з'єднання) – для з'єднання двох вхідних ліній.
- *Neutral* (нейтраль) – дозволяє встановлювати точки однакового потенціалу в різних частинах схеми.
- *T connector* (Т-подібне з'єднання) – дозволяє з'єднати два входи з одним виходом.

На рисунку 1.8 наведено декілька прикладів створення однієї схеми за допомогою блоків модуля *Connectors*.



Рисунок 1.7 – Блоки модуля *Connectors*

- а) шина; б) заземлення; в) L-подібне з'єднання; г) нейтраль;  
д) Т-подібне з'єднання



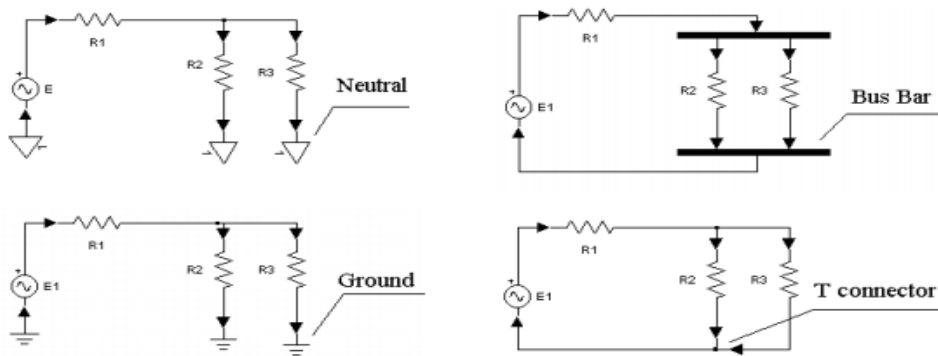


Рисунок 1.8 – Приклади використання блоків модуля *Connectors*

### Модуль *Electrical Sources*

В модулі *Electrical Sources* міститься сім блоків джерел електричної енергії, з яких для моделювання силових електроенергетичних систем змінного струму використовуються тільки два [7]:

- *AC Voltage Source* – ідеальне джерело синусоїдальної напруги (рис. 1.9, а).
- *3-Phase Source* – трифазне джерело напруги (рис. 1.9, б).



Рисунок 1.9 – Блоки модулю *Electrical Sources*  
а) *AC Voltage Source*; б) *3-Phase Source*

Після перенесення блоків з бібліотеки у вікно моделі необхідно ввести їх параметри. Параметри блоку *AC Voltage Source* наведені в таблиці 1.1, а вікно параметрів зображене на рисунку 1.10.

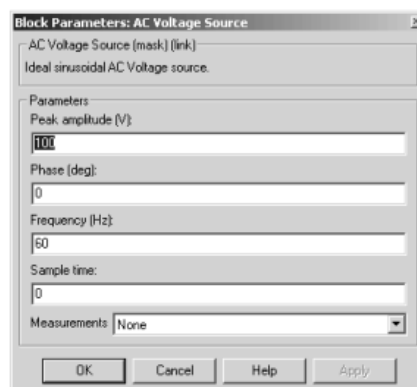


Рисунок 1.10 – Вікно параметрів блоку *AC Voltage Source*

Таблиця 1.1 – Параметри блоку *AC Voltage Source*

Англійський варіант	Український варіант
Peak amplitude	Амплітудне значення напруги, В
Phase	Початкова фаза, градусів
Frequency	Частота, Гц
Sample time	Крок дискретизації за часом (лише для дискретних моделей), секунд
Measurements	Дозволяє вибрати змінні, які будуть передані для відображення блоком <i>Multimeter</i>

Блок є ідеальним джерелом е.р.с., в якого внутрішній опір дорівнює нулю. Вікно вводу параметрів блоку *3-Phase Source* в різних режимах зображене на рисунках 1.11 та 1.12.

Таблиця 1.2 – Параметри блоку *AC Voltage Source*

Англійський варіант	Український варіант
Phase-to-phase rms voltage	Діюче значення лінійної напруги, В
Phase angle of phase A	Початкова фаза напруги в фазі А, градусів
Frequency	Частота, Гц
Internal connection	Спосіб з'єднання фаз джерела живлення. Значення обирається зі списку: – Y – зірка; – Yn – зірка з нейтраллю; – Yg – зірка з заземленою нейтраллю;
Specify impedance using short-circuit level	Дозволяє задати повний внутрішній опір джерела з використанням параметрів короткого замикання. Якщо цей прапорець знятий – параметри мають вид, зображений на рис. 1.11, а якщо встановлений – на рис. 1.12.
Source resistance	внутрішній активний опір джерела, Ом
Source inductance	внутрішня індуктивність джерела, Гн
3-Phase short-circuit level at base voltage	потужність короткого замикання при базисному значенні напруги, $S_{кз}$ , В·А
Base voltage	діюче значення базисної лінійної напруги, для якої визначено потужність короткого замикання, $U_{кз}$ , В
X/R ratio	відношення індуктивного опору до активного ( $k$ )

Імпеданс джерела живлення може бути заданий через потужність короткого замикання. В такому випадку його реактивний опір визначається за формулою:

$$x = \frac{U_{\text{КЗ}}^2}{S_{\text{КЗ}}}.$$

Активний опір джерела знаходиться за формулою:

$$R = \frac{x}{k}.$$

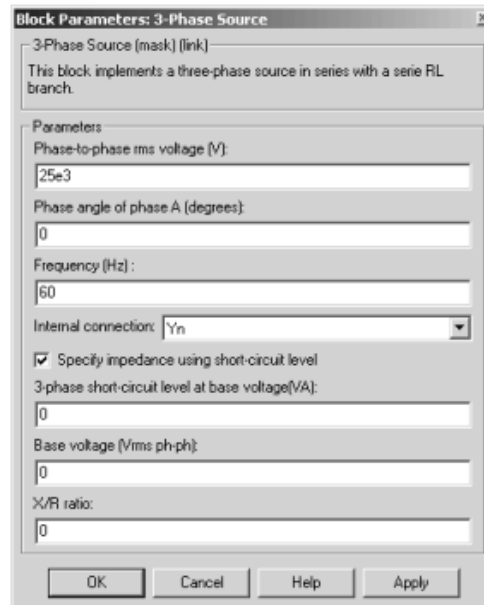


Рисунок 1.11 – Вікно параметрів блоку *3-Phase Source*

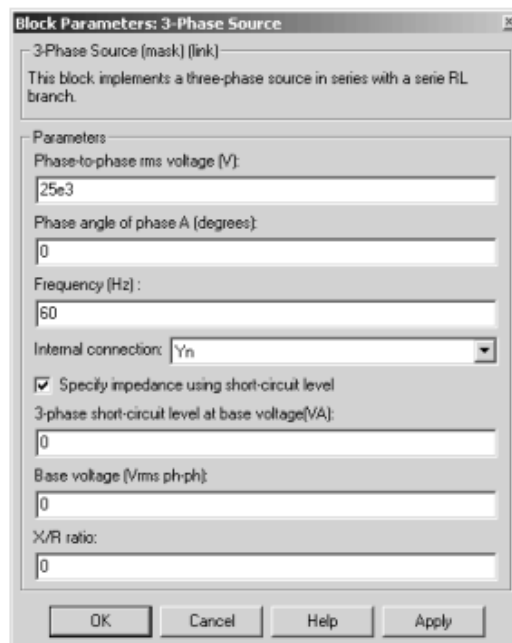


Рисунок 1.12 – Вікно параметрів блоку *3-Phase Source*

### **Встановлення параметрів процесу моделювання режиму**

Перед запуском моделі (*Simulation*) необхідно задати параметри моделювання (*Simulation parameters*). Для цього слід вибрати в меню *Simulation* пункт *Simulation parameters*, або натиснути комбінацію клавіш *Ctrl+E*.

У вікні, що з'явилося, (рис. 1.13) у вкладці *Solver* (спосіб розв'язку) задаються наступні параметри [7]:

- час початку та закінчення процесу моделювання режиму, секунд (*Start time* та *Stop time*);
- величина кроку дискретизації – змінний (*Variable step*) або фіксований крок (*Fixed step*);
- математичний метод розрахунку режимів роботи моделі;
- відносна та абсолютна похибки (*Relative* та *Absolute tolerance*).

Як правило, більш точним є метод зі змінним кроком дискретизації (*Variable step*), оскільки при виборі цього режиму крок дискретизації автоматично збільшується або зменшується в залежності від швидкості зміни функції. Використання фіксованого кроку (*Fixed step*) потрібне лише для вузького кола задач, наприклад при необхідності знаходження значень параметру через фіксовані інтервали часу.

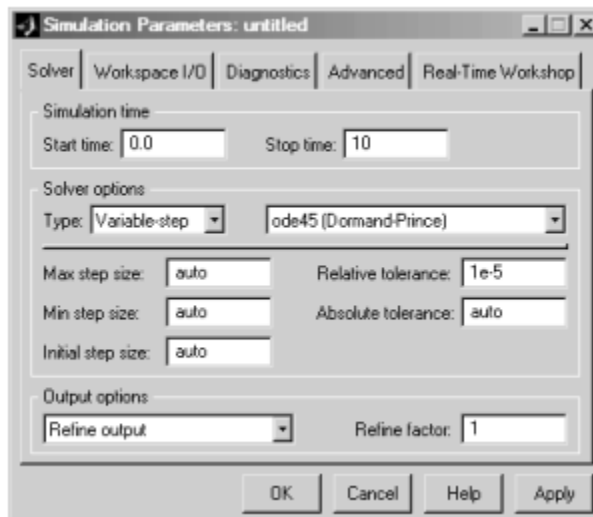


Рисунок 1.13 – Вікно *Simulation parameters*

Для розрахунку режимів роботи моделі можна обрати один з наступних математичних методів:

– *ode45* – однокроковий явний метод Рунге-Кутта 4-го та 5-го порядків;

– *ode23* – однокроковий явний метод Рунге-Кутта 2-го та 3-го порядків;

– *ode113* – багатокроковий метод Адамса-Башворта-Мултон змінного порядку;

– *ode15s* – багатокроковий метод змінного порядку (від 1 до 5), що використовує формули чисельного диференціювання;

– *ode23s* – однокроковий метод, який використовує модифіковану формулу Розенброка другого порядку;

– *ode23t* – метод трапецій з інтерполяцією;

– *ode23tb* – використання неявного методу Рунге-Кутта на початку розв'язку та зворотне диференціювання другого порядку потім. Методи *ode15s*, *ode23t*, *ode23tb* використовуються для розв'язку систем диференціальних рівнянь з жорсткими обмеженнями (при наявності в моделях нелінійних елементів, наприклад, ключів, діодів, транзисторів тощо).

### ***Формули для переходу з іменованих одиниць вимірювання до відносних***

В Simulink параметри деяких елементів задаються у відносних одиницях. Перехід від іменованих до відносних одиниць (р.у.) для опорів і індуктивностей здійснюється за формулами:

$$R_{(p.u.)} = \frac{R\{\Omega\}}{R_{base}};$$
$$L_{(p.u.)} = \frac{L\{H\}}{L_{base}},$$

де  $R\{\Omega\}$ ,  $L\{H\}$  – значення активного опору та індуктивності в іменованих одиницях (Ом і Гн відповідно);  $R_{base}$ ,  $L_{base}$  – базисні значення активного опору та індуктивності, які визначаються за формулами:

$$R_{base} = \frac{U_H^2}{P_H};$$
$$L_{base} = \frac{R_{base}}{2\pi \cdot f_H},$$

де  $U_H$ ,  $P_H$ ,  $f_H$  – номінальна напруга, потужність та частота.

### Контрольні питання

1. Сфера застосування пакету *MATLAB*?
2. Що таке відносні одиниці? Переваги їх використання?
3. Структура та призначення бібліотеки *Simulink*?
4. Структура та призначення бібліотеки *SimPowerSystems*?
5. Яке призначення блоку *Powergui*?
6. Які є способи відображення результатів у блоці *Display*?
7. За допомогою якого блоку можна отримати графік зміни модельованої величини? Які параметри має цей блок?

### Лабораторна робота № 2

#### Створення моделей ЛЕП в пакеті *Matlab*

**Мета роботи:** ознайомитися зі схемами заміщення повітряних та кабельних ліній та їх моделями в пакеті схемотехнічного моделювання *Matlab Simulink*. Навчитися створювати власні моделі.

#### Порядок виконання роботи

1. Отримати у викладача завдання для розрахунку параметрів схем заміщення (декілька марок проводів для ЛЕП певної напруги).
2. З довідника, наприклад [6], виписати необхідні параметри: питомий активний опір  $r_0$ , Ом/км та діаметр  $d$ , мм. Параметри занести до таблиці 2.1 у графу «Довідкові параметри».

Таблиця 2.1 – Параметри схем заміщення ЛЕП

Марка проводу $U_n$ , кВ	Довідкові параметри			Розрахункові параметри						
				Теоретичні			Експериментальні			
	$r_0$ , Ом/км	$d$ , мм	$\Delta P_{0к}$ , кВт/км	$x_0$ , Ом/км	$g_0$ , См/км	$b_0$ , См/км	$r_0$ , Ом/км	$x_0$ , Ом/км	$g_0$ , См/км	$b_0$ , См/км

3. Визначити параметри схем заміщення для заданих проводів ЛЕП. Результати занести до таблиці 2.1 в графу «Розрахункові параметри (Теоретичні)».

4. В програмному пакеті MATLAB створити моделі ЛЕП відповідно до завдання та задати їх параметри

5. В пакеті MATLAB скласти модель для перевірки параметрів схем заміщення ЛЕП (рис. 2.1). За отриманими величинами показань приладів розрахувати параметри схем заміщення ЛЕП та занести їх до таблиці 2.1 в графу «Розрахункові параметри (Експериментальні)».

6. Порівняти довідкові та розрахункові параметри з виміряними та зробити висновки по роботі.

### Теоретичні відомості

Для моделювання ліній електропередачі в бібліотеці програмного модуля **Simulink** призначено три різних блоки:

– *PI Section Line* – для моделювання однофазної лінії з зосередженими параметрами (рис. 2.1, а);

– *3-Phase PI Section* – для моделювання трифазної лінії з зосередженими параметрами (рис. 2.1, б);

– *Distributed Parameters Line* – для моделювання лінії з розподіленими параметрами (рис. 2.2, в).

Ці блоки знаходяться у програмному модулі **Simulink** бібліотеці **SimPowerSystems** у підмодулі **Elements**. При моделюванні ЛЕП низької та середньої напруги незначної протяжності для досягнення інженерної точності достатньо застосовувати лінію з зосередженими параметрами.

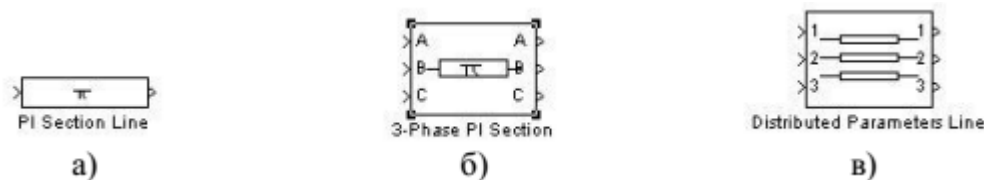


Рисунок 2.1 – Піктограми блоків ЛЕП

а) *PI Section Line*; б) *3-Phase PI Section*;

в) *Distributed Parameters Line*

Кожен блок має свої унікальні параметри, що характеризують його. Для виклику вікна параметрів блоку достатньо навести на нього курсор та зробити подвійне натискання на ліву клавішу мишки. Вікно параметрів блоку *3-Phase PI Section* зображено на рисунку 2.2, а відповідні параметри наведені в таблиці 2.2.

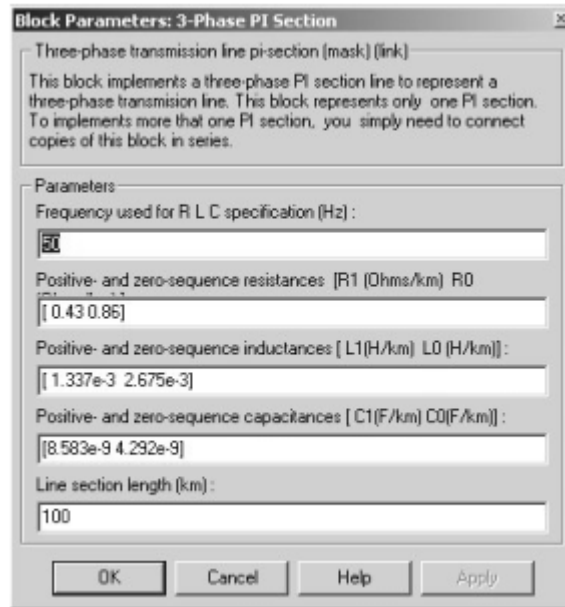


Рисунок 2.2 – Вікно параметрів блоку *3-Phase PI Section Line*

Таблиця 2.2 – Параметри блоку *3-Phase PI Section Line* параметри блоку

Англійський варіант	Український варіант
Frequency used for R L C specification (Hz):	Частота струму у лінії (Гц)
Positive- and zero-sequence resistances [R1 (Ohms/km) R0 (Ohms/km) ]	Активний опір прямої та нульової послідовності лінії на 1 км довжини (Ом/км)
Positive- and zero-sequence inductances [ L1(H/km) L0 (H/km)]	Індуктивність прямої та нульової послідовності лінії на 1 км довжини (Гн/км)
Positive- and zero-sequence capacitances [ C1(F/km) C0(F/km)]:	Ємність прямої та нульової послідовності лінії на 1 км довжини (Ф/км)
Line section length (km):	Довжина лінії (км)

\*Усі параметри, приведені у таблиці, задаються у вигляді вектора.



Для ЛЕП усіх класів напруги погонний активний опір прямої послідовності  $r^{(1)}$  залежить від перерізу проводу і приводиться у довідниках (табл. 2.3) [4, 7]. Активний опір нульової послідовності дорівнює активному опору прямої послідовності.

$$r^{(0)} = r^{(1)}$$

Таблиця 2.3 – Конструктивні і розрахункові дані неізолюваних алюмінієвих і сталевалюмінієвих проводів

Марка проводу	Номинальний переріз, мм <sup>2</sup>	Розрахунковий переріз, мм <sup>2</sup>		Розрахунковий діаметр, мм	Активний опір, Ом/км	Вага проводу, кг/км
		Алюмінієвої частини	Стальної частини			
A-16	16	15,9		5,1	1,98	44
A-25	25	24,7		6,4	1,28	68
A-35	35	34,4		7,5	0,92	95
A-50	50	49,5		9	0,64	136
A-70	70	68,3		10,7	0,46	191
A-95	95	93,3		12,4	0,34	257
АС-25	25	22,8	3,8	6,6	1,38	92
АС-35	35	36,9	6,2	8,4	0,85	150
АС-50	50	48,3	8	9,6	0,65	196
АС-70	70	68	11,3	11,4	0,46	275
АС-95	95	95,4	15,9	13,5	0,33	386
АС-120	120	115	22	15,2	0,27	492
АС-150	150	148	26,6	17	0,21	617
АС-185	185	181	34,4	19	0,17	771
АС-240	240	238	43,1	21,6	0,132	997

Погонний індуктивний опір проводу є опором прямої послідовності і визначається за формулою:

$$x^{(1)} = x_{\text{пр}} = 0,1445 \cdot \lg \frac{2 \cdot D_{\text{сер}}}{d} + 0,015, \text{ Ом/км}, \quad (2.1)$$

де  $D_{\text{сер}} = \sqrt[3]{D_{AB}D_{BC}D_{CA}}$  – середньгеометрична відстань між проводами, м;  
 $d$  – розрахунковий діаметр проводу (табл. 2.3). При розташуванні проводів у вершинах рівностороннього трикутника  $D_{\text{сер}} = D$ , а при горизонтальному розташуванні –  $D_{\text{сер}} = \sqrt[3]{D^2 \cdot D}$  (див. табл. 2.4).

Таблиця 2.4 – Середні відстань між фазами для ПЛ різних номінальних напруг

Номинальна напруга лінії, кВ	до 1	6÷10	35	110	220	330	500	750
Середня відстань між фазами лінії, м	0,5	1,0	3,0	4,0	7,0	9,0	12,0	15,0

Слід не забувати, що величина  $x_{np}$  практично не залежить від перерізу проводу та класу напруги лінії (переріз проводу та відстань між фазними проводами знаходяться під знаком логарифма) і лежить у межах 0,32...0,43 Ом/км.

Погонна ємнісна провідність прямої послідовності визначається за формулою:

$$b^{(1)} = \frac{7.58 \cdot 10^{-6}}{lg \frac{2 \cdot D_{сер}}{d}}, \text{См/км.} \quad (2.2)$$

Вікно параметрів блоку *Distributed Parameters Line* моделювання ЛЕП з розподіленими параметрами зображено на рисунку 2.3, а відповідні параметри наведені в таблиці 2.5.

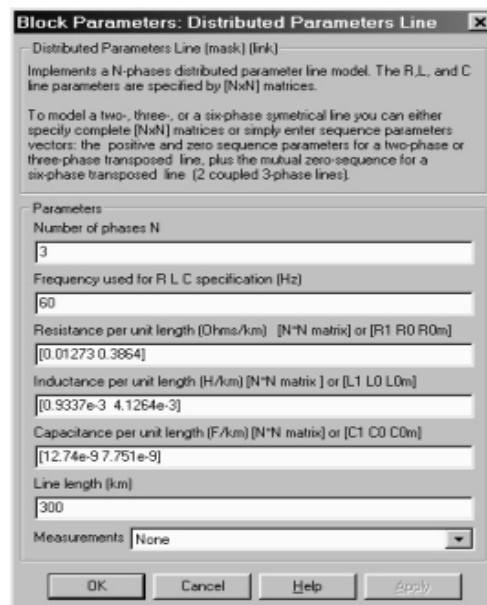


Рисунок 2.3 – Вікно параметрів блоку *Distributed Parameters Line*

Універсальна однолінійна схема заміщення трифазної лінії зображена на рисунку 2.4.

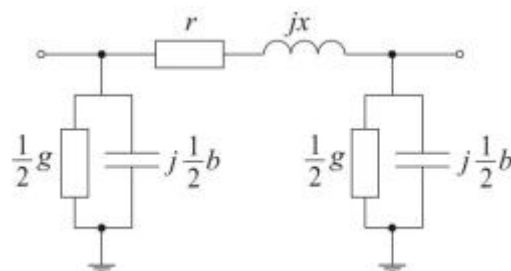


Рисунок 2.4 – Універсальна схема заміщення ліній електропередачі

Таблиця 2.5 – Параметри блоку *Distributed Parameters Line*

Англійський варіант	Український варіант
Number of phases N:	Кількість фаз
Frequency used for R L C specification (Hz):	Частота струму в лінії (Гц)
Resistance per unit length (Ohms/km) [N*N matrix] or [R1 R R0m]:	Активний опір лінії на 1 км довжини (Ом/км)
Inductance per unit length (H/km) [N*N matrix ] or [L1 L0 L0m]:	Індуктивність лінії на 1 км довжини (Гн/км)
Capacitance per unit length (F/km) [N*N matrix] or [C1 C0 C0m]:	Ємність лінії на 1 км довжини (Ф/км)
Line length (km):	Довжина лінії (км)
Measurements: – None – Phase-to-ground voltages	Вимірювані змінні. Значення параметра вибираються із списку: – немає змінних для вимірювання; – фазна напруга на вході і на виході лінії.

Створимо модель ЛЕП з використанням блоків *3-Phase Series RLC Branch* та *3-Phase Parallel RLC Branch* (див. рис. 2.5).

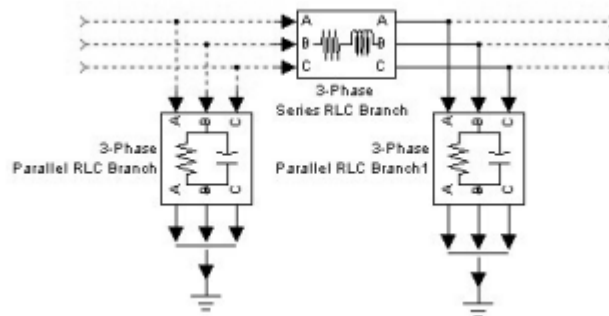


Рисунок 2.5 – Модель трифазної лінії електропередачі

Для створення універсальної моделі у вікнах параметрів блоків *3-Phase Series RLC Branch* (рис. 2.6) та *3-Phase Parallel RLC Branch* (рис. 2.7) необхідно ввести формули, за якими будуть розраховуватися відповідні параметри (див. табл. 2.6).

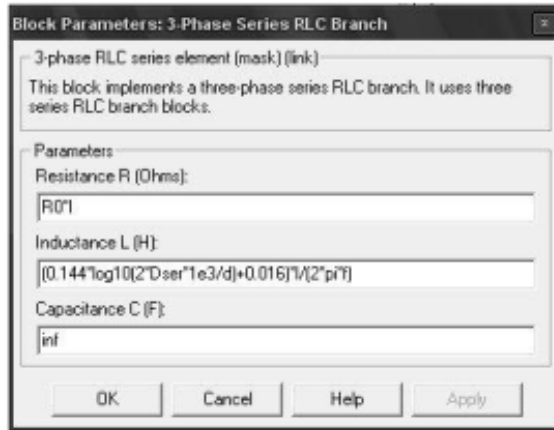


Рисунок 2.6 – Вікно параметрів блоку *3-Phase Series RLC Branch*

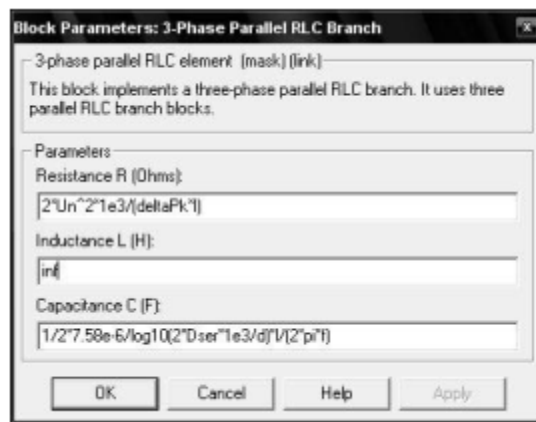


Рисунок 2.7 – Вікно параметрів блоку *3-Phase Parallel RLC Branch*

Таблиця 2.6 – Формули для розрахунку параметрів блоків *3-Phase Series RLC Branch* та *3-Phase Parallel RLC Branch*

Параметр блоку	Формула
<i>3-Phase Series RLC Branch</i>	
Resistance R (Ohms):	$R_x = r_0 \cdot l$
Inductance L (H):	$L_x = \frac{X_x}{2\pi f} = \frac{x_0 \cdot l}{2\pi f} = \frac{\left(0,144 \cdot \lg \frac{2D_{cep}}{d} + 0,016\right) \cdot l}{2\pi f}$
Capacitance C (F):	inf
<i>3-Phase Parallel RLC Branch</i>	
Resistance R (Ohms):	$R_{np.x} = \frac{2}{G_x} = \frac{2}{g_0 \cdot l} = \frac{2}{\frac{\Delta P_{ок}}{U_n^2} \cdot l}$
Inductance L (H):	inf
Capacitance C (F):	$C_x = \frac{1}{2} \cdot \frac{B_x}{2\pi f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{b_0 \cdot l}{2\pi f} = \frac{1}{2} \cdot \frac{\frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{2 \cdot D_{cp}}{d}} \cdot l}{2\pi f}$

Об'єднаємо створену модель в підсистему: виділимо всю модель та, натиснувши праву клавішу мишки, виберемо команду *Create subsystem* в контекстному меню (рис. 2.8). На екрані з'явиться піктограма підсистеми (рис. 2.9).

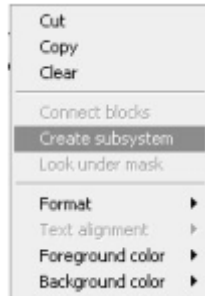


Рисунок 2.8 – Контекстне меню

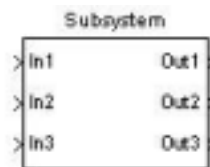


Рисунок 2.9 – Піктограма блоку *Subsystem* універсальної моделі ЛЕП

Входи блоку *Subsystem* In1, In2, In3 відповідають фазам А, В та С початку ЛЕП, а виходи – Out1, Out2, Out3 – відповідним фазам кінця ЛЕП.

Для створення вікна параметрів блоку *Subsystem* необхідно в контекстному меню цього блоку вибрати команду *Edit mask* (див. рис. 2.10). На екрані з'явиться діалогове меню для програмування параметрів створеного блоку (див. рис. 2.11), в якому необхідно вибрати вкладку *Parameters*.

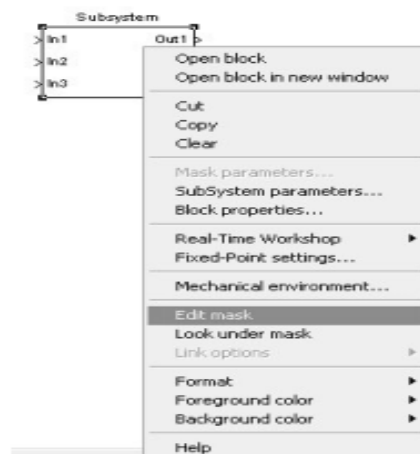


Рисунок 2.10 – Контекстне меню блоку *Subsystem*

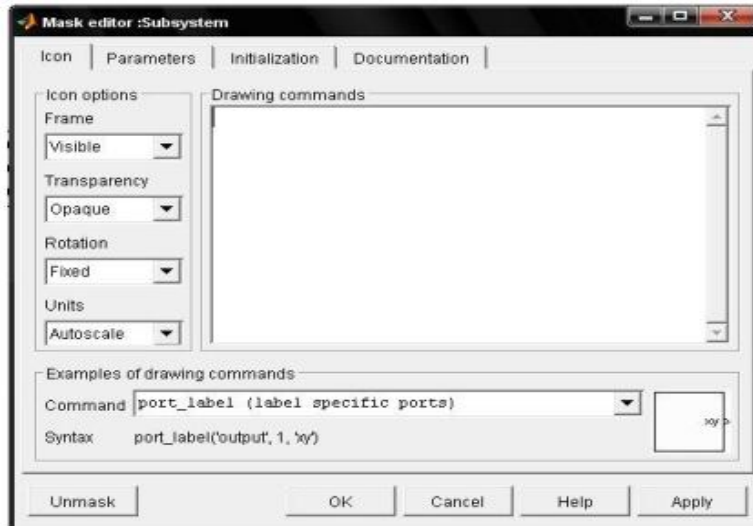




Рисунок 2.11 – Діалогове меню блоку *Subsystem* для програмування параметрів

Натиснувши на піктограму  можна вводити перший параметр нашого блоку. В колонку *Prompt* вводиться текстовий коментар, який буде присутній у вікні параметрів створеного блоку (наприклад: назва параметру, одиниця виміру тощо). В колонку *Variable* вводиться символічне позначення параметра, яке використовується у формулах (див. рис. 2.7 і табл. 2.6). На рисунку 2.12 зображено діалогове меню з запрограмованою номінальною напругою ЛЕП. Для вводу наступного параметру необхідно знову натиснути на піктограму .

На рисунку 2.13 зображено діалогове меню блоку *Subsystem* універсальної моделі ЛЕП.

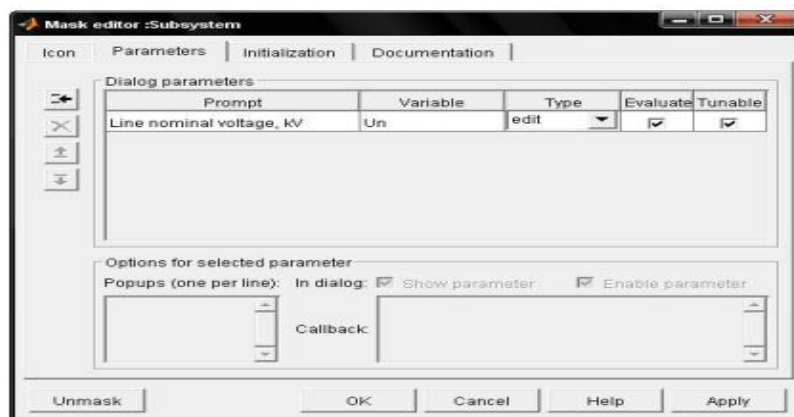


Рисунок 2.12 – Діалогове меню блоку *Subsystem* з запрограмованим параметром номінальної напруги ЛЕП

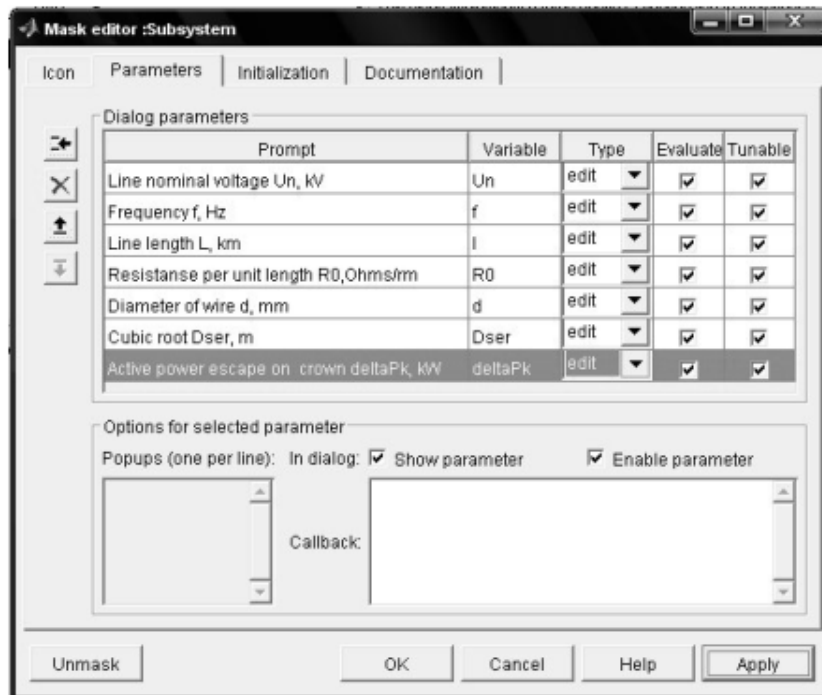


Рисунок 2.13 – Діалогове меню блоку *Subsystem* універсальної моделі ЛЕП

На рисунку 2.14 приведенне вікно параметрів створеного блоку з введеними параметрами для лінії напругою 110 кВ довжиною 20 км, яка виконана проводом марки АС-240.

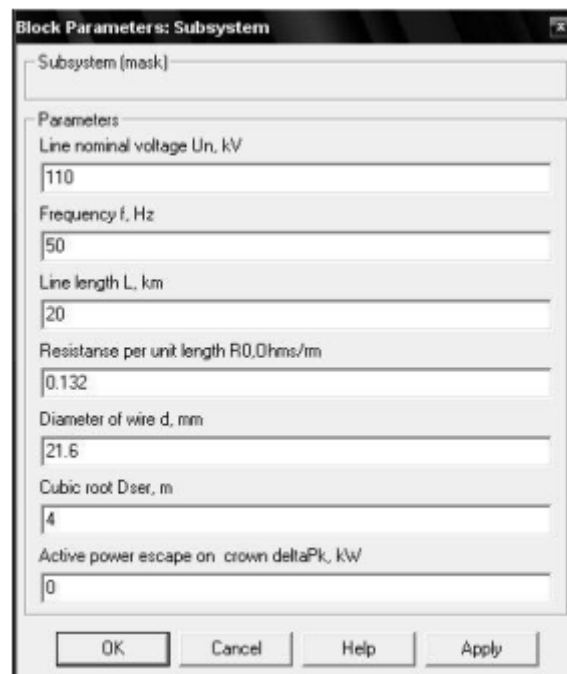


Рисунок 2.14 – Вікно параметрів блоку *Subsystem* універсальної моделі ЛЕП

**Приклад** Розрахувати погонні параметри схеми заміщення повітряної лінії напругою 110 кВ з розміщенням проводів у вершинах рівностороннього трикутника, яка виконана проводом марки АС-240.

### Розв'язок

З [6] для проводу марки АС-240 відомі наступні параметри:  $r_0 = 0,132$  Ом/км;  $d = 21,6$  мм. З таблиці 2.3 для лінії напругою 110 кВ відстань між фазами  $D = 4$  м. У зв'язку з тим, що проводи лінії розміщені у вершинах рівностороннього трикутника, середньгеометрична відстань між фазами  $D_{сер} = D = 4$  м (див. табл. 2.4).

Погонний індуктивний опір лінії:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{2D_{сер}}{d} + 0,016 = 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^3}{21,6} + 0,016 = 0,386 \text{ Ом/км.}$$

Погонна ємнісна провідність лінії:

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{2 \cdot D_{сер}}{d}} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg \frac{2 \cdot 4 \cdot 10^3}{21,6}} = 2,95 \cdot 10^{-6} \text{ См/км.}$$

Погонна зарядна потужність лінії:

$$Q_{зар0} = b_0 \cdot U_n^2 = 2,95 \cdot 10^{-6} \cdot 110^2 = 0,0357 \text{ МВАр/км.}$$

Відповідно до [1, 5] для повітряної лінії напругою 110 кВ при перерізі проводу  $> 70$  мм<sup>2</sup>, втратами на корону в ній можна знехтувати –  $\Delta P_{ок} \approx 0$  кВт.

### Контрольні питання

1. Яким чином визначаються активні та індуктивні опори проводів та кабелів?
2. Для чого застосовують розщеплення проводів? Як воно враховується при визначенні індуктивних та активних опорів?
3. Від яких величин залежать активні та реактивні провідності ЛЕП?
4. Які заходи застосовують для зменшення втрат на корону?
5. Порівняйте індуктивні опори і ємнісні струми у повітряних та кабельних ЛЕП. Де вони більші? Чому?



## Лабораторна робота № 3

### Схеми заміщення трансформаторів. Їх моделі в пакеті *Matlab*

**Мета роботи:** ознайомитися з моделями трансформаторів в пакеті схемотехнічного моделювання *Matlab Simulink*.

#### Порядок виконання роботи :

1. Отримати у викладача завдання для розрахунку параметрів схем заміщення (декілька марок трансформаторів).

2. З довідника, наприклад [6], вписати необхідні параметри: номінальну потужність  $S_n$ , кВА; активні втрати в міді  $\Delta P_{кз}$ , кВт; напругу короткого замикання  $u_{кз}$ , %; активні втрати холостого ходу  $\Delta P_{хх}$ , кВт; струм холостого ходу  $I_{хх}$ , %.

Параметри занести до таблиці 3.1 у графу «Довідкові параметри».

Таблиця 3.1 – Параметри схем заміщення трансформаторів

Марка трансформатора	Довідкові параметри				Розрахункові параметри			Виміряні параметри			
	$\Delta P_{кз}$ , кВт	$u_{кз}$ , %	$\Delta P_{хх}$ , кВт	$I_{хх}$ , %	$r_T$ , Ом	$x_T$ , Ом	$\Delta Q_{хх}$ , кВАр	$\Delta P_{кз}$ , кВт	$u_{кз}$ , %	$\Delta P_{хх}$ , кВт	$\Delta Q_{хх}$ , кВАр

3. Визначити параметри схем заміщення для заданих трансформаторів.

Результати занести до таблиці 3.1 в графу «Розрахункові параметри».

4. В програмному пакеті MATLAB створити моделі трансформаторів відповідно до завдання з використанням блоків *Three-phase Transformer (Two Windings)* та (або) *Three-phase Transformer (Three Windings)*.

5. В пакеті MATLAB скласти модель для перевірки параметрів трансформаторів. Показання приладів занести до таблиці 3.1 в графу «Виміряні параметри».

6. Порівняти довідкові та розрахункові параметри з виміряними та зробити висновки.

### Теоретичні відомості :

Для моделювання трифазних трансформаторів в бібліотеці програмного модуля *Simulink* призначено блоки:

- *Three-phase Transformer (Two Windings)* – трифазний двообмотковий трансформатор (рис. 3.1, а).
- *Three-phase Transformer (Three Windings)* – трифазний три обмотковий трансформатор (рис. 3.1, б).



Рисунок 3.1 – Піктограми блоків трифазних трансформаторів

а) *Three-phase Transformer (Two Windings)*;

б) *Three-phase Transformer (Three Windings)*

Ці блоки знаходяться у програмному модулі *Simulink* бібліотеці *SimPowerSystems* у підмодулі *Elements*.

Параметри блоку *Three-phase Transformer (Two Windings)* наведені в таблиці 3.2, а вікно параметрів зображено на рисунку 3.2.

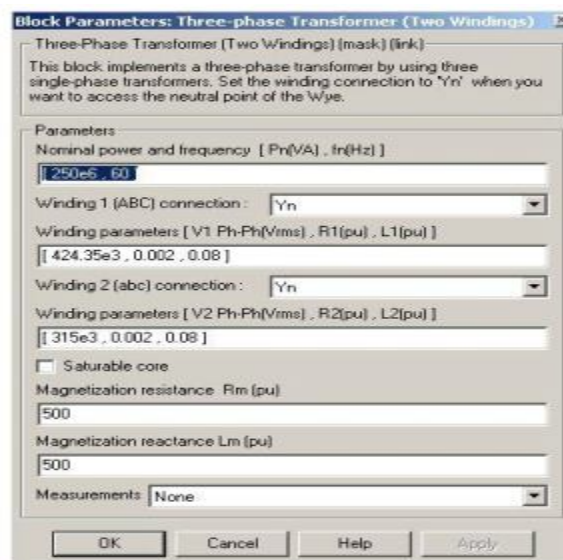


Рисунок 3.2 – Вікно параметрів блоку *Three-phase Transformer (Two Windings)*

Таблиця 3.2 – Параметри блоку *Three-phase Transformer (Two Windings)*

Англійський варіант	Український варіант
Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:	Номінальна потужність (ВА) і частота (Гц)
Winding 1 (ABC) connection: – Y – Yn – Yg – Delta(D1) – Delta(D11)	Схема з'єднання первинної обмотки. Значення цього параметра вибирається з списку: – зірка; – зірка з нейтраллю; – зірка з заземленою нейтраллю; – трикутник першої групи; – трикутник одинадцятої групи
Winding 1 parameters [V1 Ph-Ph(V), R1(pu), L1(pu)]	Параметри первинної обмотки. Лінійна напруга (В), активний опір обмотки у відносних одиницях (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.).
Winding 2 (abc) connection: – Y – Yn – Yg – Delta(D1) – Delta(D11)	Схема з'єднання вторинної обмотки. Значення цього параметра вибирається з списку: – зірка; – зірка з нейтраллю; – зірка з заземленою нейтраллю; – трикутник першої групи; – трикутник одинадцятої групи
Winding 2 parameters [U2 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu) ]:	Параметри вторинної обмотки. Лінійна напруга (В), активний опір обмотки (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.).
Saturable core:	Осердя з насиченням. При встановленні прапорця використовується нелінійна модель трансформатора.
Magnetization resistance Rm(pu):	Опір намагнічування (в.о.)
Magnetization inductance Lm(pu):	Індуктивність намагнічування (в.о.). Цей параметр використовується тільки при моделюванні лінійного трансформатора (прапорець Saturable core не встановлений).
Saturation characteristic (pu) [i1, phi1; i2, phi2 ;...]	Характеристика насичення осердя. Значення струму намагнічування і магнітного потоку задаються у відносних одиницях. Цей параметр використовується тільки при моделюванні нелінійного трансформатора (прапорець Saturable core встановлений).
Simulate hysteresis:	Моделювати гістерезис. При встановленому прапорці у характеристиці намагнічування враховується гістерезис
Specify initial fluxes [phi0A, phi0B, phi0C]:	Початкові потоки для фаз ABC. Цей параметр використовується при моделюванні нелінійного трансформатора (прапорець Saturable core встановлений)
Measurements: – Winding voltages – Winding currents – Flux and excitation current (Imag_IRm) – Flux and magnetization current (Imag) – All Measurements (V, I, Flux)	Параметри вимірювання. Значення параметрів вибираються зі списку: – напруги обмоток; – струми обмоток; – магнітний потік і струм холостого ходу; – намагнічування; – усі напруги, струми і потік.

Активний опір первинної і вторинної обмотки трифазного двохобмоткового трансформатора у відносних одиницях визначається за формулою:

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta P_{кз}}{S_{ТН}}, \quad (3.1)$$

де  $\Delta P_{кз}$  – потужність короткого замикання трансформатора, кВт;

$S_{ТН}$  – номінальна потужність трансформатора, кВА.

Індуктивність первинної і вторинної обмотки трансформатора у відносних одиницях визначається за формулою:

$$L_1 = L_2 \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{U_{кз}^{\%}}{100}, \quad (3.2)$$

де  $u_{кз}^{\%}$  – напруга короткого замикання трансформатора у % .

Слід пам'ятати про те, що формула (3.2) справедлива тільки для трансформаторів великої потужності. У разі, коли створюється модель трансформатора потужністю до 630 кВА у формулу (3.2) замість  $u_{кз}^{\%}$  слід підставляти реактивну складову напруги короткого замикання  $u_p^{\%}$  :

$$u_p^{\%} = \sqrt{u_{кз}^{\%2} - u_a^{\%2}},$$

де  $u_a^{\%} = \Delta P_{кз} = \frac{\Delta P_{кз}}{S_{ТН}} \cdot 100$  .

Активний опір та індуктивність намагнічування трансформатора у відносних одиницях визначаються за формулами:

$$R_m = \frac{S_{ТН}}{\Delta P_{xx}}; \quad (3.3)$$

$$L_m = X_m = \frac{100}{I_{xx}^{\%}}, \quad (3.4)$$

де  $\Delta P_{xx}$  – втрати потужності холостого ходу, кВт;

$I_{xx}^{\%}$  – струм холостого ходу, у % від номінальної потужності.

**Приклад** Розрахувати параметри схеми заміщення трифазного двохобмоткового трансформатора марки ТДН-10000/110 для блоку *Three-phase Transformer (Two Windings)*.

#### Розв'язок

З [6] для трансформатора марки ТДН-10000/110 відомі наступні параметри:  $S_{ТН} = 10000$  кВА;  $U_{ВН} = 115$  кВ;  $U_{НН} = 11$  кВ;  $\Delta P_{кз} = 60$  кВт;  $u_{кз}^{\%} = 10,5\%$ ;  $\Delta P_{xx} = 14$  кВт;  $I_{xx}^{\%} = 0,7\%$ .

Використовуючи вищенаведені формули знаходимо параметри схеми заміщення двообмоткового трансформатора:

$$R_1 = R_2 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta P_{\text{кз}}}{S_{\text{TH}}} = \frac{1}{2} \cdot \frac{60}{10000} = 0,003 \text{ в.о.};$$

$$L_1 = L_2 \approx \frac{1}{2} \cdot \frac{u_{\text{кз}\%}}{100} = \frac{1}{2} \cdot \frac{10,5}{100} = 0,0525 \text{ в.о.};$$

$$R_m = \frac{S_{\text{TH}}}{\Delta P_{\text{xx}}} = \frac{10000}{14} = 714,286 \text{ в.о.};$$

$$L_m = X_m = \frac{100}{I_{\text{xx}\%}} = \frac{100}{0,7} = 142,857 \text{ в.о.}$$

На рисунку 3.3 зображено вікно параметрів блоку *Three-phase Transformer (Two Windings)* для моделювання трансформатора ТДН-10000/110.

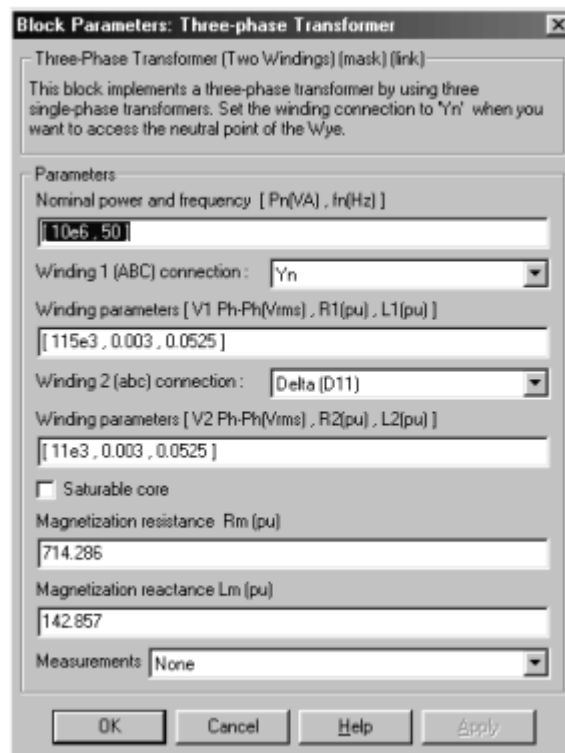


Рисунок 3.3 – Вікно параметрів блоку *Three-phase Transformer (Two Windings)* для моделювання трифазного двообмоткового трансформатора марки ТДН-10000/110

При використанні блоку *Three-phase Transformer (Three Windings)* трифазного триобмоткового трансформатора необхідно ввести параметрами у вікно, зображене на рисунок 3.4.

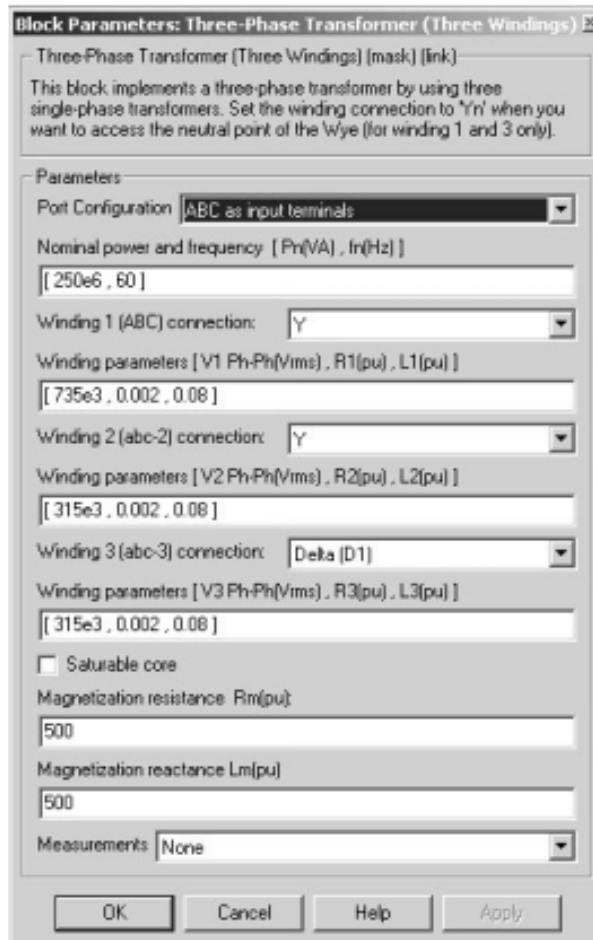


Рисунок 3.4 – Вікно параметрів блоку *Three-phase Transformer (Three Windings)*

Трифазний триобмотковий трансформатор має параметри, аналогічні трифазному двообмотковому трансформатору. Різниця полягає у наявності опорів третьої обмотки трансформатора, та параметра, який відповідає напрямку протікання енергії (див. табл. 3.3).

Для триобмоткових трансформаторів, які виготовляються в даний час, співвідношення потужностей обмоток складає 100/100/100%. Для такого випадку активний опір у відносних одиницях визначається за формулою, аналогічною формулі (3.1):

$$R_1 = R_2 = R_3 = \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta P_{\kappa 3}}{S_{TH}}. \quad (3.5)$$

Таблиця 3.3 – Додаткові параметри блоку *Three-phase Transformer (Three Windings)* у порівнянні з блоком *Three-phase Transformer (Two Windings)*

Англійський варіант	Український варіант
Port configuration: – ABC as input terminals – ABC as output terminals	Конфігурація портів. Параметр дозволяє змінити тип портів блоку (вхідні або вихідні). Значення параметра вибирається зі списку: – затискачі первинної обмотки (А, В і С) є вхідними. Затискачі вторинних обмоток (abc) при цьому будуть вихідними; – затискачі первинної обмотки (А, В и С) є вихідними. Затискачі вторинних обмоток (abc) при цьому будуть вхідними.
Winding 3 (abc) connection: – Y – Yn – Yg – Delta(D1) – Delta(D11)	Схема з'єднання третьої обмотки. Значення цього параметра вибирається з списку: – зірка; – зірка з нейтраллю; – зірка з заземленою нейтраллю; – трикутник першої групи; – трикутник одинадцятої групи.
Winding parameters [U3 Ph-Ph(V), R2(pu), L2(pu)]	Параметри третьої обмотки. Лінійна напруга (В), активний опір обмотки (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.).

Для співвідношень потужностей відмінних від 100/100/100%, у паспортних даних наводяться три значення потужностей короткого замикання для пар обмоток:  $\Delta P_{кзВ-С}$ ,  $\Delta P_{кзВ-Н}$ ,  $\Delta P_{кзС-Н}$ . За цими величинами необхідно попередньо розрахувати значення потужностей короткого замикання для кожної з обмоток трансформатора за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P_{кзВ} &= \frac{1}{2} \cdot (\Delta P_{кзВ-С} + \Delta P_{кзВ-Н} - \Delta P_{кзС-Н}); \\ \Delta P_{кзС} &= \frac{1}{2} \cdot (\Delta P_{кзВ-С} - \Delta P_{кзВ-Н} + \Delta P_{кзС-Н}); \\ \Delta P_{кзН} &= \frac{1}{2} \cdot (-\Delta P_{кзВ-С} + \Delta P_{кзВ-Н} + \Delta P_{кзС-Н}). \end{aligned} \right\} \quad (3.6)$$

Активний опір кожної з обмоток у такому випадку у відносних одиницях визначається за формулою:

$$R_i = \frac{\Delta P_{к.з.i}}{S_{TH}}, \quad (3.7)$$

де  $\Delta P_{к.з.i}$  – потужність короткого замикання  $i$ -ї обмотки трансформатора.

Для визначення індуктивності відповідної обмотки необхідно знати її напругу короткого замикання:

$$\left. \begin{aligned} u_{кзВ\%} &= \frac{1}{2} \cdot (u_{кзВ-С\%} + u_{кзВ-Н\%} - u_{кзС-Н\%}); \\ u_{кзС\%} &= \frac{1}{2} \cdot (u_{кзВ-С\%} - u_{кзВ-Н\%} + u_{кзС-Н\%}); \\ u_{кзН\%} &= \frac{1}{2} \cdot (-u_{кзВ-С\%} + u_{кзВ-Н\%} + u_{кзС-Н\%}). \end{aligned} \right\} \quad (3.8)$$

де  $u_{кзВ-С\%}$ ,  $u_{кзВ-Н\%}$ ,  $u_{кзС-Н\%}$  – напруги короткого замикання у % для пар обмоток.

Індуктивність обмоток у відносних одиницях визначається за формулою:

$$L_i = \frac{u_{кз\%i}}{100}, \quad (3.9)$$

де  $u_{кз\%i}$  – напруга короткого замикання у % для  $i$ -ї обмотки.

**Слід не забувати про те, що для деяких автотрансформаторів перед визначенням потужностей та напруг короткого замикання для кожної з обмоток за формулами (3.6) та (3.8), необхідно попередньо привести до номінальної потужності автотрансформатора їх довідкові значення для пар обмоток В – Н та С – Н :**

$$\begin{aligned} \Delta P'_{кзВ-Н} &= \frac{\Delta P'_{кзВ-Н}}{\alpha^2}; \\ \Delta P'_{кзС-Н} &= \frac{\Delta P'_{кзС-Н}}{\alpha^2}; \\ u'_{кзВ-Н\%} &= \frac{u'_{кзВ-Н\%}}{\alpha}; \\ u'_{кзС-Н\%} &= \frac{u'_{кзС-Н\%}}{\alpha}, \end{aligned}$$

де  $\Delta P'_{кзВ-Н}$ ,  $\Delta P'_{кзС-Н}$ ,  $u'_{кзВ-Н\%}$ ,  $u'_{кзС-Н\%}$  – довідкові параметри автотрансформатора;  $\alpha$  – частка потужності обмотки низької напруги автотрансформатора по відношенню до його номінальної потужності. Визначається з довідника [6].

Активний опір та індуктивність намагнічування трансформатора у відносних одиницях визначаються за формулами (3.3), (3.4).



### Контрольні питання

1. Які втрати потужності залежать від навантаження трансформатора, а які не залежать? З чим це пов'язано?
2. Як залежать індуктивні і активні опори трансформаторів, а також їх провідності від напруги?
3. Чи відрізняються провідності двообмоткового трансформатора від триобмоткового?
4. Як залежать опори та провідності трансформаторів від їх номінальної потужності?
5. В чому полягає особливість розрахунку опорів для триобмоткового трансформатора у порівнянні з двообмотковим?
6. Які особливості розрахунку параметрів схеми заміщення автотрансформатора?
7. Що таке типова та номінальна потужність автотрансформатора? Яка з них більша?

### Лабораторна робота № 4

#### Дослідження ліній електропередачі з розподіленням навантаженням

**Мета роботи:** провести аналіз втрат активної та реактивної потужностей та напруги в лініях електропередач напругою 0,38 кВ з рівномірно та нерівномірно розподіленням навантаженням з використанням пакету схемотехнічного моделювання *Matlab Simulink*.

#### Порядок виконання роботи :

1. Отримати у викладача схеми ЛЕП з рівномірно та нерівномірно розподіленням навантаженням з вихідними параметрами.
2. Розрахувати втрати активної та реактивної потужностей та напруги на ділянках заданої схеми. Результати розрахунків занести до таблиці 4.1 в графу «Розрахункові параметри».
3. В програмному пакеті MATLAB зібрати моделі для вимірювання втрат активної та реактивної потужностей та напруги на ділянках. Показання приладів занести до таблиці 4.1 в графу «Виміряні параметри».

4. Порівняти величини втрат активної та реактивної потужностей та напруги на ділянках ЛЕП з рівномірно та нерівномірно розподіленим навантаженням. Зробити висновки.

Таблиця 4.1 – Втрати активної та реактивної потужностей та напруги на ділянках електричної мережі з рівномірно та нерівномірно розподіленим навантаженням

$\Delta P_{0-1}$ , Вт	$\Delta Q_{0-1}$ , ВАр	$\Delta U_{0-1}$ , В	...	...	...	$\Delta P_{(n-1)-n}$ , Вт	$\Delta Q_{(n-1)-n}$ , ВАр	$\Delta U_{(n-1)-n}$ , В
<b>Електрична мережа з рівномірно розподіленим навантаженням</b>								
<b>Розрахункові параметри</b>								
<b>Вимірні параметри</b>								
<b>Електрична мережа з нерівномірно розподіленим навантаженням</b>								
<b>Розрахункові параметри</b>								
<b>Вимірні параметри</b>								

### Теоретичні відомості

Досить часто зустрічаються лінії, в яких приблизно однакові за величиною навантаження розташовані на однакових відстанях один від одного.

До таких ліній можуть бути віднесені лінії вуличного освітлення, стояки багатопверхових будинків, повітряні лінії напругою 0,38/0,22 кВ уздовж вулиць з одноповерховими будинками, живлення верстатів, що розташовані уздовж цеху і т.п. Такі лінії називають лініями з рівномірно розподіленим навантаженням.

Втрати активної та реактивної потужності на ділянці трифазної лінії змінного струму з зосередженим навантаженням розраховуються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= 3 \cdot I^2 \cdot r = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot r; \\ \Delta Q &= 3 \cdot I^2 \cdot x = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot x, \end{aligned} \right\} \quad (4.1)$$

де  $I$  – струм, що протікає в лінії;  $r$ ,  $x$  – активний та індуктивний опори лінії;  $P$ ,  $Q$  – активна та реактивна потужності.

Розглянемо випадок, коли навантаження активне та рівномірно розподілене уздовж всієї довжини лінії (див. рис. 4.1). Також припустимо,

що уся лінія виконана проводом однакового перерізу. Втрати активної потужності в такій лінії зі струмом навантаження  $i_0 \cdot l$ , що протікатиме по ділянці  $dl$  з погонним активним опором проводу  $r_0$  визначаються [3]:

$$\Delta P = 3 \int_0^L (i_0 \cdot l)^2 r_0 dl = 3i_0^2 \cdot r_0 \int_0^L l^2 dl = 3i_0^2 \cdot r_0 \frac{L^3}{3} = 3 \frac{I^2}{L^2} \cdot r_0 \cdot \frac{L^3}{3} = I^2 \cdot r_0 \cdot L = I^2 \cdot r, \quad (4.2)$$

де  $i_0$  – погонна величина струму, А/км, що визначається як  $i_0 = I / L$ ;  $L$  – довжина лінії.

Втрати реактивної потужності визначаються аналогічно.

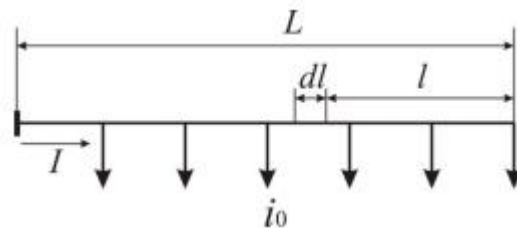


Рисунок 4.1 – Лінія електропередачі з рівномірно розподіленим навантаженням

При навантаженні, яке задане активною та реактивною потужністю, втрати потужностей у лінії з рівномірно розподіленим навантаженням визначаються за формулами:

$$\left. \begin{aligned} \Delta P &= \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot r; \\ \Delta Q &= \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot x. \end{aligned} \right\} \quad (4.3)$$

Порівнюючи формули (4.3) та (4.1) можна заключити, що **втрати потужності в лінії з рівномірно розподіленим навантаженням в три рази менші, ніж в такій же лінії з зосередженим навантаженням.**

Втрата напруги на ділянці трифазної лінії з зосередженим навантаженням розраховуються за формулою:

$$\Delta U = \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U} = \frac{P \cdot r_0 + Q \cdot x_0}{U} \cdot L. \quad (4.4)$$

У випадку рівномірно навантаженої лінії через ділянку  $dl$ , протікатиме струм навантаження  $i_0 \cdot l$  (див. рис. 4.1). Втрата напруги на цій ділянці [3]:

$$d(\Delta U) = \sqrt{3} i_0 \cdot l \cdot r_0 \cdot dl.$$

Визначимо втрату напруги в лінії з рівномірно розподіленим навантаженням:

$$\Delta U = \int_0^L d(\Delta U) = \sqrt{3} \cdot i_0 \cdot r_0 \cdot \int_0^L l \cdot dl = \sqrt{3} \cdot i_0 \cdot r_0 \cdot \frac{L^2}{2} = \sqrt{3} \cdot r_0 \cdot I \cdot \frac{L}{2}. \quad (4.5)$$

При навантаженні, яке задане потужностями формула (4.5) набуває вигляду:

$$\Delta U = \frac{P \cdot r_0 + Q \cdot x_0}{U} \cdot \frac{L}{2}. \quad (4.6)$$

Отже, *втрата напруги в лінії з рівномірно розподіленим навантаженням вдвічі менша, ніж в такій же лінії з зосередженим навантаженням.*

**Приклад 4.1** Розрахувати втрати активної та реактивної потужностей та напруги в лінії електропередачі, яка виконана проводом марки АС-50, напругою 0,38 кВ з рівномірно розподіленим навантаженням (рис. 4.2).

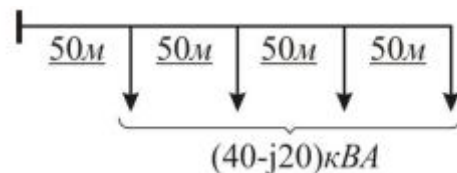


Рисунок 4.2 – Лінія електропередачі з рівномірно розподіленим навантаженням

**Розв’язок.** З [6] для проводу марки АС-35:  $d = 9,6 \text{ мм}^2$ ;  $r_0 = 0,603 \text{ Ом/км}$ . У зв’язку з тим, що провідники розміщені по вершинах рівностороннього трикутника  $D = D_{сер} = 0,5 \text{ м}$ . Погонний індуктивний опір фази лінії:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot D_{сер}}{d} + 0,016 = 0,144 \cdot \lg \frac{2 \cdot 0,5}{9,6 \cdot 10^{-3}} + 0,016 = 0,31 \text{ Ом/км}.$$

Активний та індуктивний опори лінії довжиною 200 м буде дорівнювати:

$$r = r_0 \cdot l = 0,603 \cdot 0,2 = 0,121 \text{ Ом};$$

$$x = x_0 \cdot l = 0,31 \cdot 0,2 = 0,062 \text{ Ом}.$$

За формулою (4.3) визначаємо втрати активної та реактивної потужності в лінії з рівномірно розподіленим навантаженням:

$$\Delta P = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot r = \frac{1}{3} \cdot \frac{40^2 + 20^2}{0,38^2} \cdot 0,121 = 559 \text{ Вт};$$

$$\Delta Q = \frac{1}{3} \cdot \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot x = \frac{1}{3} \cdot \frac{40^2 + 20^2}{0,38^2} \cdot 0,062 = 286 \text{ ВАр}.$$

Для розрахунку втрати напруги в лінії з рівномірно розподіленим навантаженням скористаємося формулою (4.6), тоді

$$\Delta U = \frac{P \cdot r_0 + Q \cdot x_0}{U} \cdot \frac{L}{2} = \frac{40 \cdot 0,603 + 20 \cdot 0,31}{0,38} \cdot \frac{0,2}{2} = 8 \text{ В}.$$

**Приклад 4.2** Розрахувати втрати активної та реактивної потужності та напруги в лінії електропередачі, яка виконана проводом марки АС-50, напругою 0,38 кВ з зосередженим навантаженням (рис. 4.3).

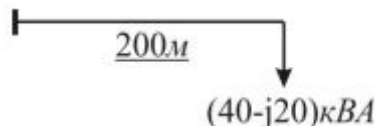


Рисунок 4.3 – Лінія електропередачі з зосередженим навантаженням

**Розв’язок.** З прикладу 4.1 відомо, що  $r = 0,121$  Ом,  $x = 0,062$  Ом. За формулою (4.1) визначаємо втрати активної та реактивної потужностей в лінії з зосередженим навантаженням:

$$\Delta P = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot r = \frac{40^2 + 20^2}{0,38^2} \cdot 0,121 = 1676 \text{ Вт};$$

$$\Delta Q = \frac{P^2 + Q^2}{U^2} \cdot x = \frac{40^2 + 20^2}{0,38^2} \cdot 0,062 = 859 \text{ ВАр}.$$

За формулою (4.3) розраховуємо втрати напруги:

$$\Delta U = \frac{P \cdot r + Q \cdot x}{U} = \frac{40 \cdot 0,121 + 20 \cdot 0,062}{0,38} = 16 \text{ В}.$$

### **Контрольні питання**

1. Які основні переваги електричних мереж з двохстороннім живленням?
2. Яким чином розраховується поточкорозподіл в електричній мережі з двохстороннім живленням?
3. Що таке точка поточкорозподілу?
4. В чому відмінність електричної мережі з двохстороннім живленням від кільцевої?
5. Яким чином визначається зрівнююча потужність? Корисна вона чи шкідлива?

## СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Блок В. М. Электрические сети и системы / В. М. Блок. – М. : Высшая школа, 1986. – 430 с.
2. Быстрицкий Г. Ф. Выбор и эксплуатация силовых трансформаторов / Г. Ф. Быстрицкий. – М. : Академия, 2003. – 176 с.
3. Глазунов А. А. Электрические сети и системы / А. А. Глазунов. – М. : Госэнергоиздат, 1960. – 368 с.
4. Гук Ю. Б. Проектирование электрической части станций и подстанций : учебное пособие для вузов / Ю. Б. Гук. – Л. : Энергоатомиздат, 1985. – 312 с.
5. Зорін В. В. Електричні мережі та системи (окремі розділи) : навчальний посібник для студентів вищ. техн. навч. закл. / В. В. Зорін, Є. А. Штогрин, Р. О. Буйний. – Ніжин : ТОВ «Видавництво «Аспект-Поліграф», 2011. – 248 с.
6. Справочник по проектированию электроэнергетических систем/ Под ред. С. С. Рокотяна и И. М. Шапиро. – М. : Энергоатомиздат, 1985. – 352 с.
7. Черных И. В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB, SimPowerSystems и Simulink / И. В. Черных. – М. : ДМК Прес; СПб. : Питер, 2008. – 288 с.
8. <http://matlab.exponenta.ru/simpower/book1/index.php> – Черных И. В. SimPowerSystems: Моделирование электротехнических устройств и систем в Simulink.

*Виробничо-практичне видання*

МЕТОДИЧНІ РЕКОМЕНДАЦІЇ  
до виконання лабораторних робіт  
з навчальної дисципліни

**«ЕЛЕКТРИЧНІ СИСТЕМИ І МЕРЕЖІ»**

*(для студентів денної та заочної форм навчання  
та слухачів другої вищої освіти спеціальності  
141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка)*

Укладач **ПЕРЕПЕЧЕНИЙ** Віталій Олександрович

Відповідальний за випуск *П. П. Рожков*

За авторською редакцією

Комп'ютерне верстання *І. В. Волосожарова*

План 2017, поз. 205 М

---

Підп. до друку 25.04.2017 р. Формат 60×84/16

Друк на ризографі. Ум. друк. арк. 1,0

Тираж 50 пр. Зам. №

Видавець і виготовлювач:

Харківський національний університет  
міського господарства імені О. М. Бекетова,  
вул. Маршала Бажанова, 17, Харків, 61002.

Електронна адреса: [rectorat@kname.edu.ua](mailto:rectorat@kname.edu.ua)

Свідоцтво суб'єкта видавничої справи:

ДК № 5328 від 11.04.2017.