

Міністерство освіти та науки України
Луцький національний технічний університет



МОДЕЛІ ЕЛЕМЕНТІВ **ЕЛЕКТРОПОСТАЧАЛЬНИХ СИСТЕМ**

Методичні вказівки до практичних занять
для здобувачів першого (бакалаврського) рівня вищої освіти
освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та
електромеханіка»
галузі знань G Інженерія, виробництво та будівництво
спеціальності G3 Електрична інженерія
денної та заочної форм навчання

Луцьк 2026

УДК 621.311.001.57(075.8)

М74

До друку

Голова вченої ради

факультету архітектури, будівництва та дизайну _____ О.В. Андрійчук

Електронна копія друкованого видання передана для внесення в репозитарій ЛНТУ

Директор бібліотеки _____ Н.П. Полішук

Затверджено вченою радою факультету архітектури, будівництва та дизайну ЛНТУ,

протокол № _____ від «____» березня 2026 року.

Розглянуто і схвалено на засіданні кафедри електричної інженерії ЛНТУ, протокол № _____ від «____» березня 2026 року.

Завідувач кафедри електричної інженерії _____ Ю.В. Грицюк

Укладач: _____ В.І. Волинець, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії ЛНТУ.

Рецензент: _____ А.В. Гадай, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричної інженерії ЛНТУ.

Відповідальний за випуск: _____ Ю.В. Грицюк, кандидат технічних наук, доцент, завідувач кафедри електричної інженерії ЛНТУ.

Моделі елементів електропостачальних систем : методичні вказівки до практичних занять для здобувачів першого бакалаврського рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 6 Інженерія, виробництво та будівництво спеціальності 63 Електрична інженерія денної та заочн. форм навч. / уклад. В. І. Волинець. Луцьк : ЛНТУ, 2026. 38 с.

М74

Методичне видання складене відповідно до силабусу дисципліни. У виданні подано завдання до виконання практичних робіт, вихідні дані для розрахунку, приклади виконання в середовищі *Mathcad* та перелік посилань.

© В. І. Волинець, 2026

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА.....	4
Практична робота №1.....	6
Практична робота №2.....	11
Практична робота №3.....	18
Практична робота №4.....	22
Практична робота №5.....	27
Практична робота №6.....	31
ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ.....	36

ПЕРЕДМОВА

Мета практичних занять з дисципліни «Моделі елементів електропостачальних систем» полягає у набутті практичних навичок та вмінь систематизувати та аналізувати інформацію, яка необхідна для вирішення професійних завдань у сфері електроенергетики; у закріпленні отриманих на лекційних заняттях знань про основні моделі елементів електропостачальних систем та вмінні їх використовувати для розв'язку практичних задач; вмінні застосовувати прикладне програмне забезпечення для моделювання елементів електропостачальних систем.

Математичне моделювання – один із самих потужних інструментів аналізу, які мають в наявності люди, що відповідають за розробку та функціонування складних процесів і систем.

Математичне моделювання – це потужний інструмент, що дозволяє досягти хороших результатів під час вивчення та математичному описі будь-якого предмета зі світу, що нас оточує. По суті, математичне моделювання – це опис фізичного предмета чи явища за допомогою математичних знаків, зв'язків і функцій.

На даний час існує багато підрозділів математичного моделювання, кожен з яких відокремлений в незалежну та повноцінну частину. Існують такі підрозділи математичного моделювання:

- *Статистичне моделювання* – це відтворення за допомогою ЕОМ (чи інших засобів) функціонування імовірнісної моделі деякого об'єкту. Мета такого моделювання полягає в оцінці середніх характеристик моделі. Зазвичай це – математичне сподівання величин, що характеризують систему, їх дисперсії та коваріації.
- *Динамічне моделювання* – це відтворення за допомогою ЕОМ (чи інших засобів) функціонування імовірнісної моделі деякого об'єкта з врахуванням зв'язків і функцій, що спричиняють змінність моделі адекватно до джерела в часі.
- *Стохастичне моделювання* – це відтворення за допомогою ЕОМ (чи інших засобів) функціонування моделі деякого об'єкта з врахуванням зв'язків і функцій, що спричиняють змінність моделі адекватно до джерела в часі, в умовах

ризиків та невизначеності, з врахуванням випадкових факторів.

- *Детермінантне моделювання* – це відтворення за допомогою ЕОМ (чи інших засобів) функціонування моделі деякого об'єкта з врахуванням зв'язків і функцій, що спричиняють змінність моделі адекватно до джерела в часі за визначених умов.
- *Дискретне моделювання* – це відтворення за допомогою ЕОМ (чи інших засобів) функціонування моделі деякого об'єкта в певні задані моменти часу (чи активізація моделі через певні проміжки часу).
- *Безперервне моделювання* – це відтворення за допомогою ЕОМ (чи інших засобів) функціонування моделі деякого об'єкта протягом певного часу (фіксація певного проміжку часу).
- *Натурне моделювання* – це відтворення функціонування моделі деякого об'єкта за допомогою адекватного об'єкта.
- *Аналогове моделювання* – це відтворення функціонування моделі деякого об'єкта за допомогою аналога (що відтворює поведінку предмета, але за інших вихідних і вхідних умов).
- *Символічне моделювання* – це відтворення за допомогою ЕОМ або без ЕОМ функціонування моделі деякого об'єкта за допомогою встановлення символічних функцій, що відображають властивості та методи моделі.

Для вирішення завдань моделювання використовується система комп'ютерної математики *Mathcad*. На даний час *Mathcad*, маючи зручний та зрозумілий інтерфейс, володіючи багатьма можливостями для проведення математичних розрахунків, є одним з найпоширеніших програмних засобів для інженерних розрахунків [1].

Практична робота №1

Тема: Дослідження режиму холостого ходу ЛЕП

Мета роботи: Ознайомлення з властивостями та моделями ЛЕП, отримання навичок дослідження об'єкту за його моделлю та засвоєння відповідних інструментальних засобів.

ЗАВДАННЯ:

Знайти розподіл величини напруги та струму вздовж ЛЕП в режимі холостого ходу, номінальна напруга якої $U_{ном}$, довжина лінії дорівнює L . Розрахунки та графічні побудови виконати в *Mathcad*. Значення параметрів лінії виразити в омах та сименсах. Значення параметрів режиму ЛЕП задані в кіловольтах, кілоамперах, мегаватах та мегаварах.

Порядок виконання роботи:

1. Побудувати графіки напруги та струму вздовж лінії в режимі холостого ходу ($I_2 = 0$). Відомою вважається напруга на початку лінії (U_1). Дати характеристику отриманим залежностям.
2. Оцінити допустимість режиму за величинами напруги та струму, враховуючи, що напруга не повинна перевищувати номінальну напругу ($U_{ном}$) більш як на 5%, а струм в лінії не повинен бути більшим за допустимий ($I_{дон}$) для заданої марки проводів ЛЕП.
3. Зробити висновки.

Вихідні дані до практичної роботи 1 подано в таблиці 1 та 2. Варіант видається викладачем.

Таблиця 1 – Вихідні дані до практичної роботи 1, 2 та 3

Номер варіанту	Марка проводу	Довжина, км	Погонні параметри фази ЛЕП				$U_{\text{ном}}$, кВ
			r_0 , Ом/км	x_0 , Ом/км	g_0 , мкСм/км	b_0 , мкСм/км	
1.	3хАС330/43	750	0,029	0,308	0,025	3,6	500
2.	3хАС300/66	820	0,034	0,31	0,015	3,97	500
3.	3хАС400/51	900	0,025	0,306	0,027	3,62	500
4.	3хАС500/54	550	0,02	0,304	0,034	3,64	500
5.	5хАС240/56	650	0,024	0,308	0,045	3,76	750
6.	5хАС300/66	800	0,021	0,288	0,043	4,11	750
7.	5хАС400/51	700	0,015	0,286	0,041	4,13	750
8.	4хАС400/93	800	0,019	0,289	0,039	4,13	750
9.	4хАС500/54	670	0,015	0,303	0,044	3,9	750
10.	3хАС300/66	670	0,034	0,31	0,015	3,97	500
11.	3хАС400/51	800	0,025	0,306	0,017	3,62	500
12.	3хАС330/43	750	0,029	0,308	0,025	3,6	500
13.	3хАС500/54	770	0,02	0,304	0,018	3,64	500
14.	5хАС240/56	820	0,024	0,308	0,044	3,76	750
15.	5хАС300/66	710	0,021	0,288	0,043	4,11	750
16.	5хАС400/51	800	0,015	0,286	0,041	4,13	750
17.	4хАС400/93	680	0,019	0,289	0,043	4,13	750
18.	4хАС500/54	720	0,015	0,303	0,04	3,9	750
19.	3хАС300/66	630	0,034	0,31	0,015	3,97	500
20.	3хАС330/43	640	0,029	0,308	0,025	3,6	500
21.	3хАС400/51	680	0,025	0,306	0,021	3,62	500
22.	3хАС300/66	900	0,034	0,31	0,015	3,97	500
23.	3хАС330/43	850	0,029	0,308	0,025	3,6	500
24.	3хАС300/66	920	0,034	0,31	0,015	3,97	500
25.	3хАС400/51	680	0,025	0,306	0,027	3,62	500
26.	3хАС500/54	690	0,02	0,304	0,034	3,64	500
27.	5хАС240/56	560	0,024	0,308	0,045	3,76	750
28.	5хАС300/66	900	0,021	0,288	0,043	4,11	750
29.	5хАС400/51	700	0,015	0,286	0,041	4,13	750
30.	4хАС400/93	800	0,019	0,289	0,039	4,13	750

Таблиця 2 - Вихідні дані до практичної роботи 1, 2 та 3

Номер варіанту	Напруга на початку лінії U_1 , кВ		Потужність навантаження		Максимальний струм, I_{\max} , А
	в режимі холостого ходу	в режимі навантаження	P_2 , МВт	Q_2 , МВАр	
1.	500	510	750	300	2190
2.	500	524	800	420	2040
3.	510	520	960	180	2475
4.	500	510	1000	200	2835
5.	755	760	2180	1200	3050
6.	755	760	2100	1000	3400
7.	755	760	2000	1100	4125
8.	758	760	1900	850	3400
9.	750	770	1800	900	3780
10.	500	520	900	200	2040
11.	500	525	800	400	2475
12.	500	520	850	100	2190
13.	500	515	900	230	2835
14.	750	770	2100	200	3050
15.	760	775	2000	700	3400
16.	765	770	1900	800	4125
17.	770	775	1950	400	3400
18.	750	760	2100	500	3780
19.	500	520	700	500	2040
20.	500	510	750	300	2190
21.	500	515	860	400	2475
22.	490	510	850	400	2040
23.	500	520	750	300	2190
24.	500	514	800	420	2040
25.	510	510	960	180	2475
26.	500	520	1000	200	2835
27.	755	770	2180	1200	3050
28.	755	770	2100	1000	3400
29.	755	770	2000	1100	4125
30.	758	770	1900	850	3400

Приклад виконання практичної роботи №1 в середовищі *Mathcad*.

Вихідні дані:

Довжина та погонні параметри лінії:

$$L_1 := 800 \quad r_0 := 0.034 \quad x_0 := 0.31 \quad g_0 := 0.015 \cdot 10^{-6} \quad b_0 := 3.97 \cdot 10^{-6}$$

$$z_0 := r_0 + x_0 \cdot j \quad y_0 := g_0 + b_0 \cdot j$$

Розрахункові параметри лінії:

$$Z_c := \sqrt{\frac{z_0}{y_0}} \quad \text{- хвильовий опір} \quad Z_c = 279.884 - 14.772j$$

$$\gamma_0 := \sqrt{z_0 \cdot y_0} \quad \text{- коефіцієнт розповсюдження хвилі} \quad \gamma_0 = 6.284 \times 10^{-5} + 1.111j \times 10^{-3}$$

Напруга на початку лінії в режимі холостого ходу: $U_1 := 490$

Натуральна потужність:

$$P_{\text{nat}} := \frac{(U_1)^2}{Z_c} \quad P_{\text{nat}} = 855.472 + 45.152j$$

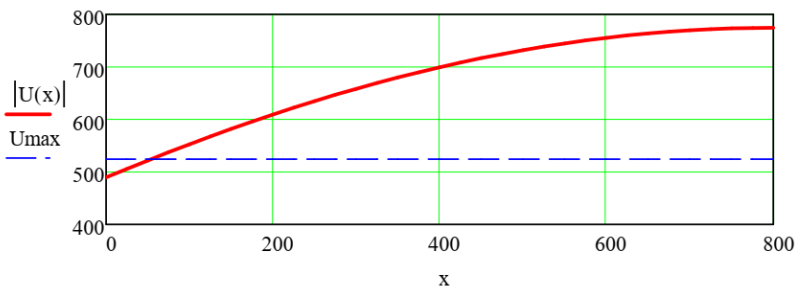
Напруга в кінці лінії:

$$U_2 := \frac{U_1}{\cosh(\gamma_0 \cdot L_1)} \quad |U_2| = 774.828$$

Побудова графіка напруги вздовж лінії в режимі холостого ходу:

$$U(x) := U_2 \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (L_1 - x)] \quad x := 0, 25 \dots L_1 \quad U_{\text{nom}} := 500$$

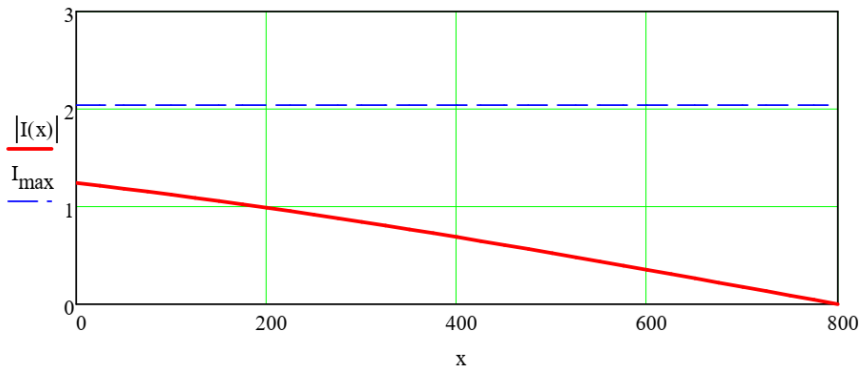
$$U_{\text{max}} := 1.05 \cdot U_{\text{nom}} \quad U_{\text{max}} = 525$$



Побудова графіку струму вздовж лінії в режимі холостого ходу:

$$I(x) := \frac{U_2 \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (L_1 - x)]}{\sqrt{3} \cdot Z_c} \quad |I(0)| = 1.242$$

$$I_{\max} := 2.040$$



ВИСНОВОК:

З отриманих залежностей можна зробити наступні висновки:

1. Напряга вздовж ЛЕП починає перевищувати допустиме значення вже на відстані близько 50 км від початку лінії.
2. Струм вздовж лінії не перевищує допустиме значення.

Практична робота №2

Тема: Дослідження режимів передачі потужностей ЛЕП

Мета роботи: Ознайомлення з властивостями та математичними моделями ЛЕП, отримання навичок дослідження об'єкту за його математичною моделлю та засвоєння відповідних інструментальних засобів.

ЗАВДАННЯ:

Знайти розподіл величини напруги та струму вздовж ЛЕП в режимі передачі потужності менше та більше натуральної, номінальна напруга якої $U_{ном}$, довжина лінії дорівнює L . Розрахунки та графічні побудови виконати в *Mathcad*. Значення параметрів лінії виразити в омах та сименсах. Значення параметрів режиму ЛЕП задані в кіловольтах, кілоамперах, мегаватах та мегаварах.

Порядок виконання роботи:

1. Побудувати графіки напруги, струму та потужності (активної та реактивної) вздовж лінії в режимі передачі навантаження менше та більше натуральної. Відомою вважається напруга на початку лінії (U_1), активні та реактивні навантаження в кінці лінії - P_2 та Q_2 . Для режиму $P_2 < P_{НАТ}$ прийняти $Q_2 = 0$. Для режиму $P_2 > P_{НАТ}$ прийняти $Q_2 = -100 \text{ МВАр}$. Дати характеристику отриманим залежностям.
2. Оцінити допустимість режиму за величинами напруги та струму, враховуючи, що напруга не повинна перевищувати номінальну напругу ($U_{ном}$) більш як на 5%, напруга U_2 повинна бути не меншою за $0,85U_{ном}$. А струм в лінії не повинен бути більшим за допустимий ($I_{дон}$) для заданої марки проводів ЛЕП.

3. Для введення режиму лінії в допустиму межу за напругою та струмом, необхідно змінювати величину реактивної потужності навантаження Q_2 .
4. Зробити висновки.

Вихідні дані до практичної роботи 2 подано в таблиці 1 та 2. Варіант видається викладачем.

Приклад виконання практичної роботи №2 в середовищі *Mathcad*.

2.1. Режим передачі потужності менше натуральної.

Вихідні дані:

Напруга на початку лінії: $U_1 := 520$ $U_{ном} := 500$

Довжина та погонні параметри лінії:

$$L_1 := 800 \quad r_0 := 0.034 \quad x_0 := 0.31 \quad g_0 := 0.015 \cdot 10^{-6} \quad b_0 := 3.97 \cdot 10^{-6}$$

$$z_0 := r_0 + x_0 j \quad y_0 := g_0 + b_0 j$$

Розрахункові параметри лінії:

$$Z_c := \sqrt{\frac{z_0}{y_0}} \quad \text{- хвильовий опір} \quad Z_c = 279.884 - 14.772j$$

$$\gamma_0 := \sqrt{z_0 \cdot y_0} \quad \text{- коефіцієнт розповсюдження хвилі} \quad \gamma_0 = 6.284 \times 10^{-5} + 1.111j \times 10^{-3}$$

Натуральна потужність:

$$P_{nat} := \frac{(U_1)^2}{Z_c} \quad P_{nat} = 963.43 + 50.85j \quad |P_{nat}| = 964.771$$

Активна потужність в кінці лінії дорівнює: $P_2 := 850$

Реактивну потужність в кінці лінії приймаємо рівною: $Q_2 := 0$

Повна потужність: $S_2 := P_2 + Q_2 j$

Активні та реактивні втрати в ЛЕП:

$$\Delta P_{12} := \frac{\left[(P_2^2 + Q_2^2) \cdot r_0 \cdot L_1 \right]}{U_{\text{ном}}^2} \quad \Delta P_{12} = 78.608$$

$$\Delta Q_{12} := \frac{\left[(P_2^2 + Q_2^2) \cdot x_0 \cdot L_1 \right]}{U_{\text{ном}}^2} \quad \Delta Q_{12} = 716.72$$

Ємнісні втрати на початку лінії:

$$Q_{c1} := \frac{(U_1^2 \cdot b_0 \cdot L_1)}{2} \quad Q_{c1} = 429.395$$

Повні втрати в ЛЕП: $\Delta S_{12} := \Delta P_{12} + (\Delta Q_{12} - Q_{c1}) \cdot j$

Повна потужність на початку лінії:

$$S_1 := S_2 + \Delta S_{12} \quad S_1 = 928.608 + 287.325j$$

Струм на початку лінії:

$$I_1 := \frac{S_1}{\sqrt{3} \cdot U_1} = 1.031 + 0.319j \quad |I_1| = 1.079$$

Знайдемо напругу та струм в кінці лінії матричним способом:

$$A_1 := \begin{pmatrix} \cosh(\gamma_0 \cdot L_1) & \sinh(\gamma_0 \cdot L_1) \cdot Z_c \\ \sinh(\gamma_0 \cdot L_1) \cdot \frac{1}{Z_c} & \cosh(\gamma_0 \cdot L_1) \end{pmatrix} \quad B_1 := \begin{pmatrix} U_1 \\ I_1 \end{pmatrix}$$

$$U_1 := A_1^{-1} \cdot B_1 \quad U_1 = \begin{pmatrix} 376.481 - 209.998j \\ 0.656 - 1.202j \end{pmatrix}$$

Результати розрахунку:

Напруга в кінці лінії:

$$U_2 := U_{1(0,0)}$$

$$U_2 = 376.481 - 209.998j \quad |U_2| = 431.089$$

Проводимо оцінку допустимості режиму за напругою.

Напруга U_2 повинна бути в межах 0,85-1,05 від номінальної.

$$U_{\text{min}} := 0.85 \cdot U_{\text{ном}} \quad |U_2| = 431.089 > U_{\text{min}} = 425 \quad \text{- умова виконується.}$$

$$U_{\text{max}} := 1.05 \cdot U_{\text{ном}} \quad |U_2| = 431.089 < U_{\text{max}} = 525 \quad \text{- умова виконується.}$$

$$I_2 := U_{1(1,0)}$$

$$I_2 = 0.656 - 1.202j \quad |I_2| = 1.369$$

Проводимо оцінку допустимості режиму за струмом.

Струм I_2 повинен бути не більшим за допустимий для данної марки проводів.

$$I_{\text{доп}} := 2.04 > |I_2| = 1.369 - \text{умова виконується.}$$

Вектор напруги в кінці лінії відстає від вектора напруги на початку лінії на кут:

$$\text{angle}(\text{Re}(U_2), \text{Im}(U_2)) - 2 \cdot \pi = -29.152^\circ$$

2.2. Режим передачі потужності більше натуральної.

Приймаємо величину активної потужності, яка передається лінії $P_{2g} = 970 \text{ МВт} > P_{\text{nat}}$

Активна потужність дорівнює: $P_{2g} := 970$

Реактивну потужність в кінці лінії приймаємо рівною: $Q_{2g} := -100$

Повна потужність: $S_{2g} := P_{2g} + Q_{2g}j$

Активні та реактивні втрати в ЛЕП:

Ємнісні втрати на початку лінії:

$$\Delta P_{g12} := \frac{\left[(P_{2g}^2 + Q_{2g}^2) \cdot r_0 \cdot L_1 \right]}{U_{\text{ном}}^2} \quad \Delta P_{g12} = 103.458$$

$$Q_{gc1} := \frac{(U_1^2 \cdot b_0 \cdot L_1)}{2}$$

$$\Delta Q_{g12} := \frac{\left[(P_{2g}^2 + Q_{2g}^2) \cdot x_0 \cdot L_1 \right]}{U_{\text{ном}}^2} \quad \Delta Q_{g12} = 943.293$$

$$Q_{gc1} = 429.395$$

Повні втрати в ЛЕП:

$$\Delta S_{g12} := \Delta P_{g12} + (\Delta Q_{g12} - Q_{gc1}) \cdot j = 103.458 + 513.898j$$

Повна потужність на початку лінії:

$$S_{1g} := S_{2g} + \Delta S_{g12} \quad S_{1g} = 1.073 \times 10^3 + 413.898j$$

Струм на початку лінії:

$$I_{1g} := \frac{S_{1g}}{\sqrt{3} \cdot U_1} = 1.192 + 0.46j$$

Знайдемо напругу та струм в кінці лінії матричним способом:

$$A_{11} := \begin{pmatrix} \cosh(\gamma_0 \cdot L_1) & \sinh(\gamma_0 \cdot L_1) \cdot Z_c \\ \sinh(\gamma_0 \cdot L_1) \cdot \frac{1}{Z_c} & \cosh(\gamma_0 \cdot L_1) \end{pmatrix} \quad B_{11} := \begin{pmatrix} U_1 \\ I_{1g} \end{pmatrix}$$

$$U_2 := A_{11}^{-1} \cdot B_{11} \quad U_2 = \begin{pmatrix} 403.713 - 247.77j \\ 0.752 - 1.107j \end{pmatrix}$$

Результати розрахунку:

Напруга в кінці лінії:

$$U_{2g} := UI_{(0,0)}$$

$$U_{2g} = 403.713 - 247.77j \quad |U_{2g}| = 473.682$$

Проводимо оцінку допустимості режиму за напругою.

Напруга U_2 повинна бути в межах 0,85-1,05 від номінальної.

$$U_{\min} := 0.85 \cdot U_{\text{ном}} \quad |U_{2g}| = 473.682 > U_{\min} = 425 \quad \text{- умова виконується.}$$

$$U_{\max} := 1.05 \cdot U_{\text{ном}} \quad |U_{2g}| = 473.682 < U_{\max} = 525 \quad \text{- умова виконується.}$$

Струм в кінці лінії:

$$I_{2g} := UI_{(1,0)}$$

$$I_{2g} = 0.752 - 1.107j \quad |I_{2g}| = 1.338$$

Проводимо оцінку допустимості режиму за струмом.

Струм I_2 повинен бути не більшим за допустимий для даної марки проводів.

$$I_{\text{доп}} := 2.04 > |I_{2g}| = 1.338 \quad \text{- умова виконується.}$$

Вектор напруги в кінці лінії відстає від вектора напруги на початку лінії на кут:

$$\text{angle}(\text{Re}(U_{2g}), \text{Im}(U_{2g})) - 2 \cdot \pi = -31.539^\circ$$

2.3. Побудова графіків напруги та струму вздовж лінії для обох режимів передачі потужності

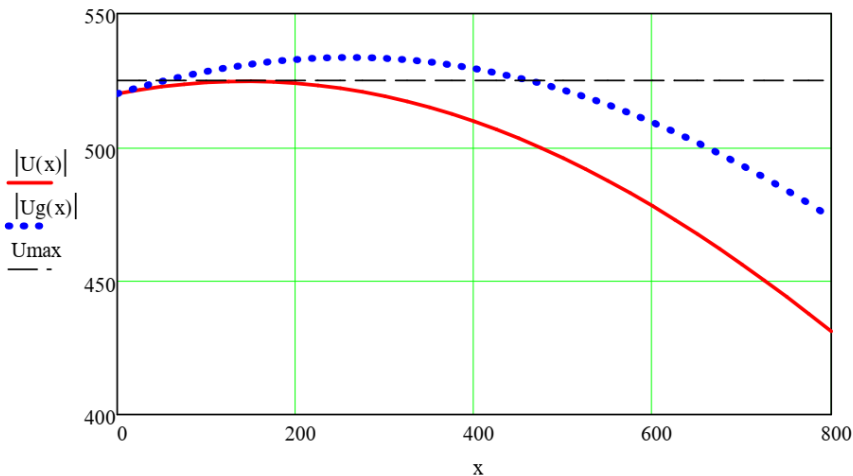
Функція напруги для $P_2 < P_{\text{нат}}$:

$$U(x) := U_2 \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (L_1 - x)] + I_2 \cdot Z_c \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (L_1 - x)]$$

Функція напруги для $P_2 > P_{\text{нат}}$:

$$U_g(x) := U_{2g} \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (L_1 - x)] + I_{2g} \cdot Z_c \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (L_1 - x)] \quad x := 0, 25 \dots L_1$$

$$U_{\max} = 525$$

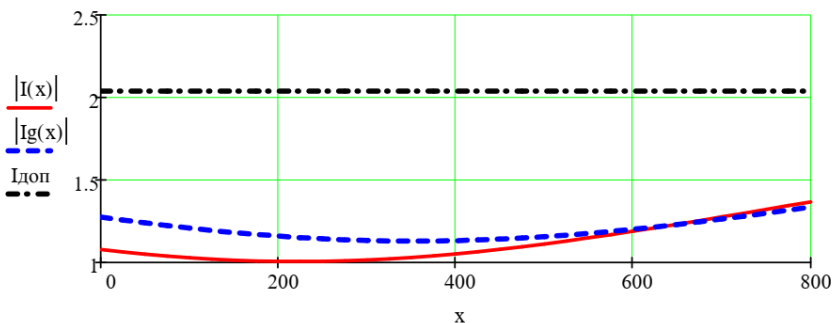


Функція струму для $P_2 < P_{nat}$:

$$I(x) := \left(\frac{U_2}{Z_c} \right) \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (L_1 - x)] + I_2 \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (L_1 - x)]$$

Функція струму для $P_2 > P_{nat}$:

$$I_g(x) := \left(\frac{U_{2g}}{Z_c} \right) \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (L_1 - x)] + I_{2g} \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (L_1 - x)]$$



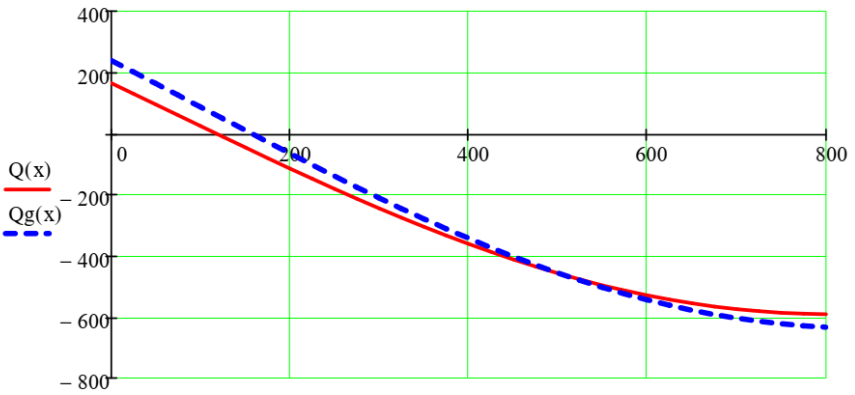
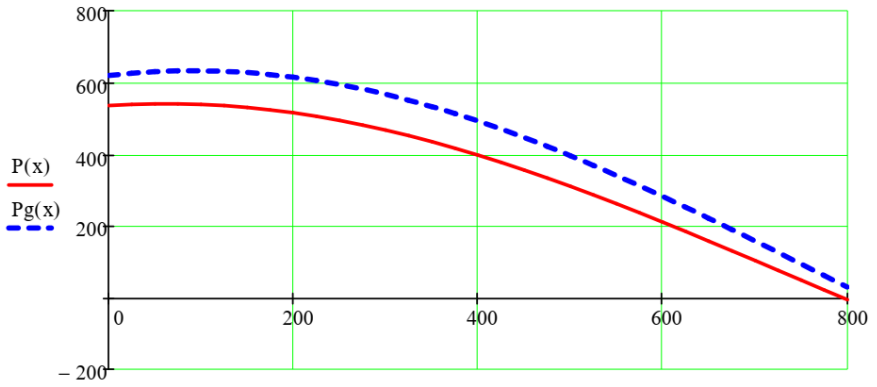
Зміна активної та реактивної потужності вздовж лінії для двох режимів:

$$P(x) := \operatorname{Re}(U(x) \cdot I(x))$$

$$Q(x) := \operatorname{Im}(U(x) \cdot I(x))$$

$$P_g(x) := \operatorname{Re}(U_g(x) \cdot I_g(x))$$

$$Q_g(x) := \operatorname{Im}(U_g(x) \cdot I_g(x))$$



x

Практична робота №3

Тема: Дослідження похибок математичних моделей ЛЕП

Мета роботи: Ознайомлення з різноманітними спрощеними математичними моделями ЛЕП та способами оцінювання похибок моделей.

ЗАВДАННЯ:

Виконати оцінку похибок для двох спрощених математичних моделей ЛЕП (рівнянь ідеальної лінії та рівнянь для П-подібної схеми заміщення без врахування розподільчих параметрів). За еталонну (точну) модель прийняти модель довгої лінії. Побудувати залежності напруги та струму на початку лінії від довжини. Розрахунки та графічні побудови виконати в *Mathcad*. Значення параметрів режиму ЛЕП задані в кіловольтах, кілоамперах, мегаватах та мегаварах.

Порядок виконання роботи:

1. Прийнявши довжину лінії рівною 1200 км, знайти напругу та струм на початку лінії (напругу та струм в кінці лінії взяти з практичної роботи №2).
2. За вказаними математичними моделями ЛЕП побудувати графіки напруги та струму на початку лінії в залежності від довжини.
3. Побудувати графіки похибок рівнянь ідеальної лінії та рівнянь моделі без врахування розподільчих параметрів у вигляді відносних похибок до рівнянь довгої лінії.
4. Зробити висновки про можливість застосування даних моделей. Граничну величину похибок прийняти на рівні 1%.

Вихідні дані до практичної роботи 3 подано в таблиці 1 та 2. Варіант видається викладачем.

Приклад виконання практичної роботи №3 в середовищі *Mathcad*.

Вихідні дані:

Потужність та напруга в кінці лінії:

$$P_2 := 850 \quad Q_2 := 400 \quad S_2 := P_2 + Q_2 \cdot j$$

$$U_2 := 431.089 \quad I_2 := 1.369 \text{ - з практичної роботи №2}$$

Довжина та погонні параметри лінії:

$$L_1 := 1200 \quad r_0 := 0.034 \quad x_0 := 0.31 \quad g_0 := 0.015 \cdot 10^{-6} \quad b_0 := 3.97 \cdot 10^{-6}$$

$$z_0 := r_0 + x_0 j \quad y_0 := g_0 + b_0 j$$

Розрахункові параметри лінії:

$$Z_c := \sqrt{\frac{z_0}{y_0}} \text{ - хвильовий опір} \quad Z_c = 279.884 - 14.772j$$

$$\gamma_0 := \sqrt{z_0 \cdot y_0} \text{ - коефіцієнт розповсюдження хвилі} \quad \gamma_0 = 6.284 \times 10^{-5} + 1.111j \times 10^{-3}$$

Для ідеальної лінії:

$$ZC := \operatorname{Re}(Z_c) \quad ZC = 279.884$$

$$\beta := \operatorname{Im}(\gamma_0) \quad \beta = 1.111 \times 10^{-3}$$

Визначаємо функції напруги та струму на початку лінії для трьох моделей ЛЕП:

$$x := 0, 25 \dots L_1$$

$$U_I(x) := \cosh(\gamma_0 \cdot x) \cdot U_2 + Z_c \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot x) \cdot I_2 \quad \text{Модель довгої лінії}$$

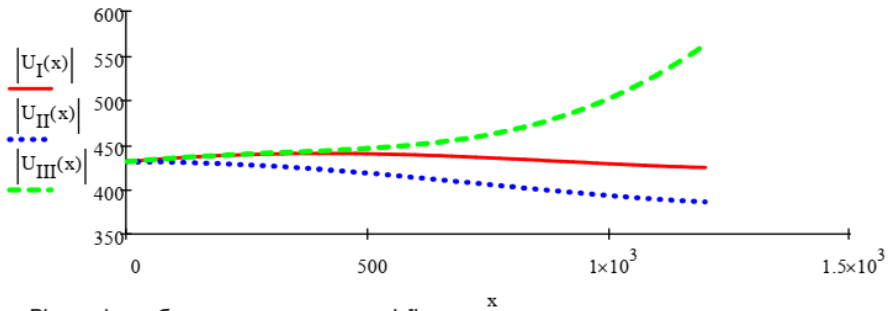
$$I_I(x) := \left(\frac{1}{Z_c} \right) \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot x) \cdot U_2 + \cosh(\gamma_0 \cdot x) \cdot I_2$$

$$U_{II}(x) := \cos(\beta \cdot x) \cdot U_2 + j \cdot ZC \cdot \sin(\beta \cdot x) \cdot I_2 \quad \text{Модель ідеальної лінії}$$

$$I_{II}(x) := j \cdot \left(\frac{1}{Z_c} \right) \cdot \sin(\beta \cdot x) \cdot U_2 + \cos(\beta \cdot x) \cdot I_2$$

$$U_{III}(x) := \left(1 + \frac{z_0 \cdot y_0 \cdot x^2}{2}\right) \cdot U_2 + z_0 \cdot x \cdot I_2 \quad \text{Модель лінії без врахування розподільних параметрів}$$

$$I_{III}(x) := y_0 \cdot x \cdot \left(1 + \frac{z_0 \cdot y_0 \cdot x^2}{4}\right) \cdot U_2 + \left(1 + \frac{z_0 \cdot y_0 \cdot x^2}{2}\right) \cdot I_2$$



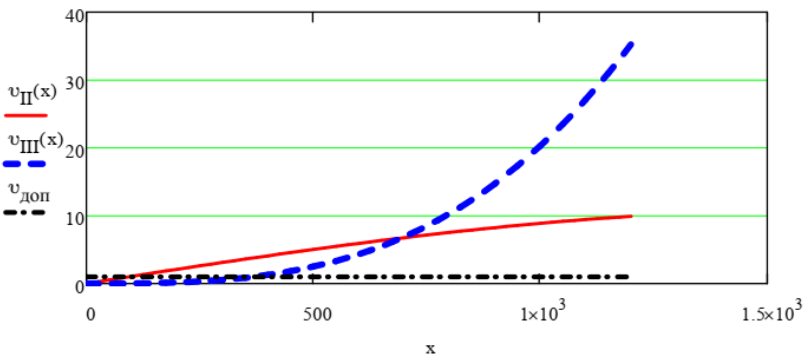
Відносні похибки напруги на початку лінії:

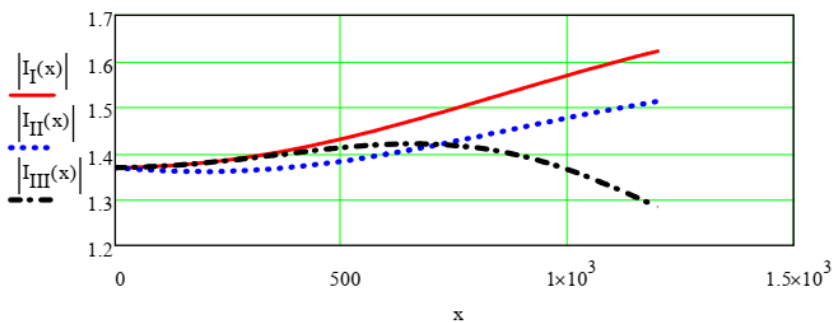
$$v_{II}(x) := \frac{\left| \left| U_{II}(x) - U_I(x) \right| \right| \cdot 100}{\left| U_I(x) \right|}$$

$$v_{III}(x) := \frac{\left| \left| U_{III}(x) - U_I(x) \right| \right| \cdot 100}{\left| U_I(x) \right|}$$

Будуємо графіки відносних похибок для спрощених математичних моделей:

Допустиме значення відносної похибки 1%. $v_{доп} := 1$



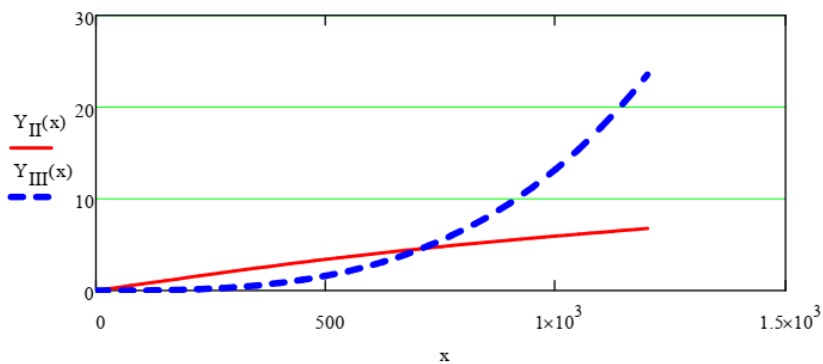


Відносні похибки струму на початку лінії:

$$Y_{II}(x) := \frac{\left| |I_{II}(x) - I_I(x)| \right| \cdot 100}{|I_I(x)|}$$

$$Y_{III}(x) := \frac{\left| |I_{III}(x) - I_I(x)| \right| \cdot 100}{|I_I(x)|}$$

Будуємо графіки відносних похибок для спрощених математичних моделей:



Практична робота №4

Тема: Дослідження математичних моделей трансформаторів

Мета роботи: Ознайомлення з математичними моделями силового трансформатора, які використовуються для аналізуванню усталених режимів ЕЕС.

ЗАВДАННЯ:

Виконати побудову зовнішньої характеристики силового трансформатора $U_2=F(I_2, \cos\varphi)$ для повної Г-подібної схеми заміщення та спрощеної схеми заміщення без активних параметрів. Виконати оцінку похибок для цих математичних моделей силового трансформатора. Розрахунки та графічні побудови виконати в *Mathcad*.

Порядок виконання роботи:

1. Побудувати залежності зовнішньої характеристики силового трансформатора $U_2=F(I_2, \cos\varphi)$ для повної Г-подібної схеми заміщення та спрощеної схеми заміщення без активних параметрів для трьох значень $\cos\varphi$: 1; 0,9 та 0,8.
2. Виконати оцінку відносної похибки спрощеної моделі відносно еталонної. Вважати допустимою похибку 1%.
3. Зробити висновки.

Вихідні дані до практичної роботи 4 подано в таблиці 3.
Варіант видається викладачем.

Таблиця 3 – Вихідні дані до практичної роботи 4

№ вар.	Тип трансформатора	$S_{ном}$, МВА	$U_{вл}$, кВ	$U_{вл}$, кВ	u_k , %	ΔP_k , кВт	ΔP_{Σ} , кВт	i_k , %	R , Ом	X , Ом	ΔQ_{Σ} , кВАр
0.	ТМ-1000/35	1	35	11	6,5	18	3,6	1,4	22,05	79,63	14,0
1.	ТМН-1600/35	1,6	35	11	6,5	26	5,1	1,1	12,44	49,77	17,6
2.	ТМН-2500/35	2,5	35	11	6,5	26	5,1	1,1	5,10	31,85	27,5
3.	ТМН-4000/35	4	35	11	7,5	33,5	6,7	1	2,56	22,97	40,0
4.	ТМН-6300/35	6,3	35	11	7,5	46,5	9,2	0,9	1,44	14,58	56,7
5.	ТД-10000/35	10	38,5	10,5	7,5	65	14,5	0,8	0,96	11,12	80,0
6.	ТДЦ-80000/110	80	121	10,5	10,5	310	70	0,6	0,71	19,22	480,0
7.	ТРДЦН-80000/110	80	115	10,5	10,5	310	70	0,6	0,64	17,36	480,0
8.	ТДЦ-125000/110	125	121	10,5	10,5	400	120	0,55	0,37	12,30	687,5
9.	ТРДЦН-125000/110	125	115	10,5	10,5	400	100	0,55	0,34	11,11	687,5
10.	ТДЦ-200000/110	200	121	13,8	10,5	550	170	0,5	0,20	7,69	1000,0
11.	ТДЦ-250000/110	250	121	15,75	10,5	640	200	0,5	0,15	6,15	1250,0
12.	ТДЦ-400000/110	400	121	20	10,5	900	320	0,45	0,08	3,84	1800,0
13.	ТДН-16000/150	16	158	11	11	85	21	0,8	8,29	171,63	128,0
14.	ТРДН-32000/150	32	158	10,5	10,5	145	35	0,7	3,53	81,91	224,0
15.	ТРДН-63000/150	63	158	10,5	10,5	235	59	0,65	1,48	41,61	409,5
16.	ТДЦ-250000/150	250	165	10,5	11	640	190	0,5	0,28	11,98	1250,0
17.	ТРДН-40000/220	40	230	11	12	170	50	0,9	5,62	158,70	360,0
18.	ТРДЦН-63000/220	63	230	11	12	300	82	0,8	4,00	100,76	504,0
19.	ТДЦ-80000/220	80	242	11	11	320	105	0,6	2,93	80,53	480,0
20.	ТРДЦН-100000/220	100	230	11	12	360	115	0,7	1,90	63,48	700,0
21.	ТДЦ-125000/220	125	242	10,5	11	380	135	0,5	1,42	51,54	625,0
22.	ТРДЦН-160000/220	160	230	11	12	525	167	0,6	1,08	39,68	960,0
23.	ТДЦ-200000/220	200	242	13,8	11	580	200	0,45	0,85	32,21	900,0
24.	ТДЦ-250000/220	250	242	13,8	11	650	240	0,45	0,61	25,77	1125,0
25.	ТДЦ-400000/220	400	242	13,8	11	880	330	0,4	0,32	16,11	1600,0
26.	ТЦ-630000/220	630	242	15,75	12,5	1300	380	0,35	0,19	11,62	2205,0
27.	ТЦ-1000000/220	1000	242	24	11,5	2200	400	0,35	0,13	6,73	3500,0
28.	ТРДНС-40000/330	40	330	10,5	11	180	80	1,4	12,25	299,48	560,0
29.	ТРДЦН-63000/330	63	330	10,5	11	265	120	0,7	7,27	190,14	441,0
30.	ТДЦ-125000/330	125	347	10,5	11	360	145	0,5	2,77	105,96	625,0
31.	ТДЦ-200000/330	200	347	10,5	11	560	220	0,45	1,69	66,22	900,0
32.	ТДЦ-250000/330	250	347	10,5	11	605	240	0,45	1,17	52,98	1125,0
33.	ТЦС-400000/330	400	347	15,75	11	810	365	0,4	0,61	33,11	1600,0
34.	ТДЦ-400000/330	400	347	15,75	11	810	365	0,4	0,61	33,11	1600,0
35.	ТЦ-630000/330	630	347	15,75	11	1300	405	0,35	0,39	21,02	2205,0

Приклад виконання практичної роботи №4 в середовищі *Mathcad*.

Вихідні дані:

Параметри трансформатора:

$$U_{1nom} := 347 \quad S_{nom} := 1000000 \quad Q_x := 4000 \quad X := 13.2$$

$$U_{2nom} := 24 \quad P_x := 480 \quad R_{\omega} := 0.26$$

Номинальний струм, коефіцієнт трансформації та параметри кола намагнічування:

$$I_{2nom} := \frac{S_{nom} \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3} \cdot U_{2nom}} \quad I_{2nom} = 24.056$$

$$n := \frac{U_{1nom}}{U_{2nom}} \quad n = 14.458$$

$$G_{\mu} := \frac{P_x \cdot 10^{-3}}{U_{1nom}^2} \quad G_{\mu} = 3.986 \times 10^{-6}$$

$$B_{\mu} := \frac{Q_x \cdot 10^{-3}}{U_{1nom}^2} \quad B_{\mu} = 3.322 \times 10^{-5}$$

Побудуємо зовнішню характеристику силового трансформатора за його повною Г-подібною схемою заміщення (еталонна модель):

Коефіцієнти $A1$ та $B1$ чотириполюсника:

$$A1 := n \quad A1 = 14.458$$

$$B1 := \frac{R + j \cdot X}{n} \quad B1 = 0.018 + 0.913j$$

Умови побудови характеристики:

$$U_1 := U_{1nom} \quad I := 0, 0.1 \cdot I_{2nom} .. I_{2nom}$$

Початкові наближення:

$$U_2 := \frac{U_1}{n} \quad U''_1 := U_1 \quad U''_1 := 0 \quad I'_2 := 0 \quad I''_2 := 0$$

Розв'язуючий блок *Given-Find*:

Given

$$U_2 = \left(\frac{U_1}{A1} \right) - \sqrt{3} \cdot \frac{(\operatorname{Re}(B1) \cdot I'_2 + \operatorname{Im}(B1) \cdot I''_2)}{A1}$$

$$0 = U''_1 - \sqrt{3} \cdot (\operatorname{Im}(B1) \cdot I'_2 - \operatorname{Re}(B1) \cdot I''_2)$$

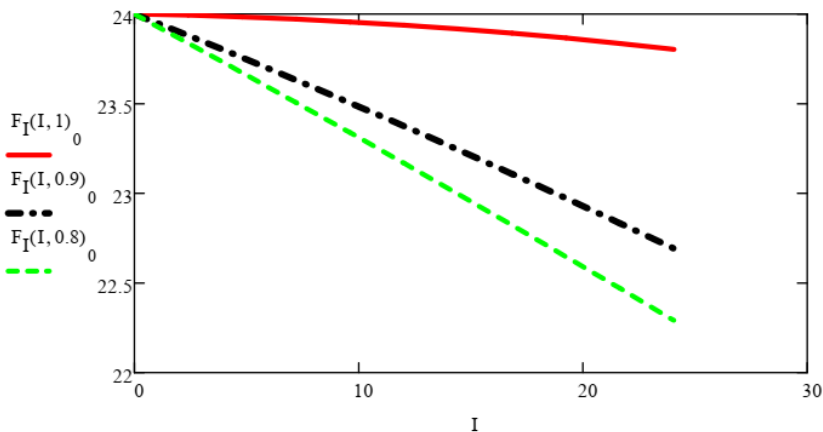
$$U_1^2 = U_1'^2 + U_1''^2$$

$$I_2 = I \cdot \cos\varphi$$

$$I_2'' = I \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$$

$$F_I(I, \cos\varphi) := \text{Find}(U_2, U_1', U_1'', I_2', I_2'')$$

Зовнішні характеристики для трьох значень коефіцієнта потужності: 1; 0,9 та 0,8:



Будемо зовнішню характеристику трансформатора для його Г-подібної спрощеної схеми заміщення, в якій не враховуються активні параметри: $R=0$ та $G_\mu=0$.

Коефіцієнти A_2 та B_2 чотириполюсника:

$$A_2 := n \quad A_2 = 14.458$$

$$B_2 := \frac{j \cdot X}{n} \quad B_2 = 0.913j$$

Умови побудови характеристики:

$$U_1 := U_{1nom} \quad I := 0, 0.1 \cdot I_{2nom} \dots I_{2nom}$$

Початкові наближення:

$$U_2 := \frac{U_1}{n} \quad U_1' := U_1 \quad U_1'' := 0 \quad I_2' := 0 \quad I_2'' := 0$$

Розв'язуючий блок *Given-Find*:

Given

$$U_2 = \left(\frac{U_1'}{A_2} \right) - \sqrt{3} \cdot \frac{(\text{Re}(B_2) \cdot I_2' + \text{Im}(B_2) \cdot I_2'')}{A_2}$$

$$0 = U_1'' - \sqrt{3} \cdot (\text{Im}(B_2) \cdot I_2' - \text{Re}(B_2) \cdot I_2'')$$

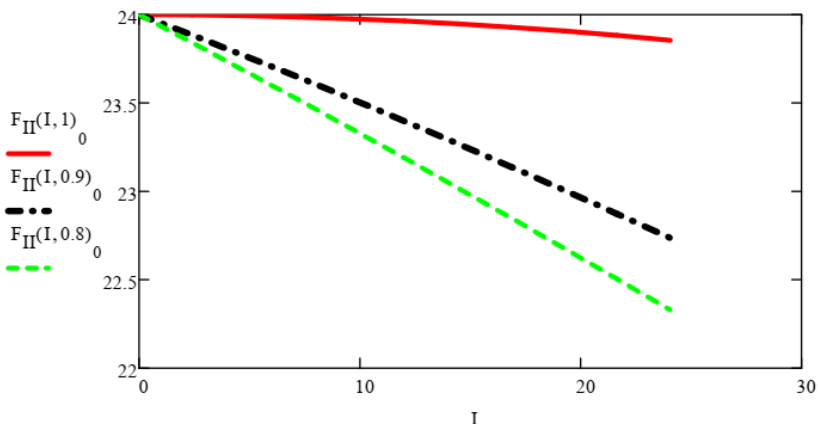
$$U_1^2 = U_1'^2 + U_1''^2$$

$$\Gamma_2 = I \cdot \cos\varphi$$

$$\Gamma_2'' = I \cdot \sqrt{1 - \cos^2\varphi}$$

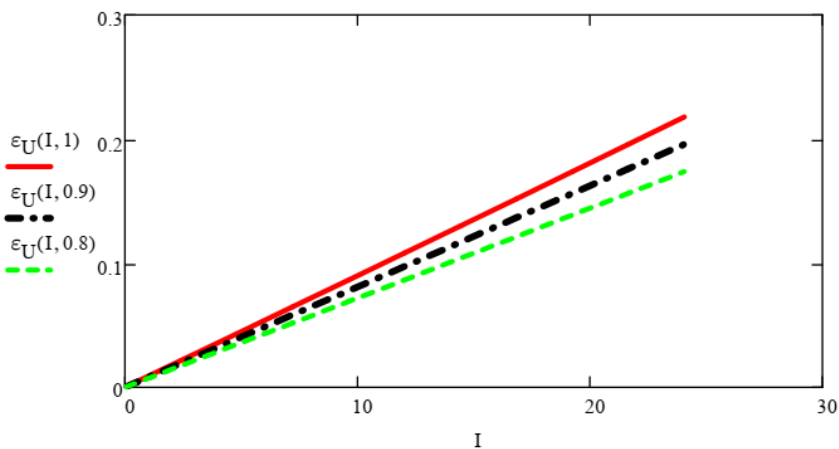
$$F_{II}(I, \cos\varphi) := \text{Find}(U_2, U_1', U_1'', \Gamma_2, \Gamma_2'')$$

Зовнішні характеристики спрощеної моделі для трьох значень коефіцієнта потужності: 1; 0,9 та 0,8:



Розрахуємо та побудуємо функції похибок зовнішніх характеристик для спрощеної моделі:

$$\varepsilon_U(I, \cos\varphi) := \frac{|F_I(I, \cos\varphi)_0 - F_{II}(I, \cos\varphi)_0| \cdot 100}{|F_I(I, \cos\varphi)_0|}$$



Практична робота №5

Тема: Дослідження математичних моделей навантажень

Мета роботи: Ознайомлення та засвоєння математичної моделі навантажень, яка подається у вигляді статичних характеристик навантаження.

ЗАВДАННЯ:

Знайти коефіцієнти статичної характеристики навантаження за експериментальними даними для активної та реактивної потужності та визначити їхні регулювальні ефекти. Для активної потужності використати лінійну модель, для реактивної потужності – параболу. Усі величини перевести у відносні одиниці. Розрахунки та графічні побудови виконати в *Mathcad*.

Порядок виконання роботи:

1. За результатами експерименту, які попередньо переведені у відносні одиниці, визначити коефіцієнти поліноміальної регресії та функції статичних характеристик і аргументів.
2. Побудувати графіки статичних характеристик та експериментальних даних.
3. Визначити регулювальні ефекти та зобразити графіки їхніх змін.
4. Зробити висновки.

Вихідні дані до практичної роботи 5 подано в таблиці 4, 5 та 6.

Варіант видається викладачем.

Таблиця 4 – Вихідні дані для практичної роботи 5 (для варіантів 1-12)

Значення номінальних параметрів	Значення експериментальних даних x_i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{ном}=200$, кВт,	$1K_30$	X_1+10	X_2+10	X_3+10	X_4+10	X_5+15	X_6+15	X_7+20
$Q_{ном}=250$, кВАр	$1K_2K_3$	X_1+20	X_2+20	X_3+20	X_4+30	X_5+30	X_6+35	X_7+35
$U_{ном}=110$, кВ	$8K_3$	X_1+5	X_2+5	X_3+5	X_4+10	X_5+10	X_6+10	X_7+10

Таблиця 5 – Вихідні дані для практичної роботи 5 (для варіантів 13-25)

Значення номінальних параметрів	Значення експериментальних даних x_i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{ном}=300$, кВт,	$2K_3K_2$	X_1+10	X_2+10	X_3+10	X_4+10	X_5+15	X_6+15	X_7+20
$Q_{ном}=350$, кВАр	$2K_1K_3$	X_1+20	X_2+20	X_3+20	X_4+30	X_5+30	X_6+35	X_7+35
$U_{ном}=220$, кВ	$1K_2K_3$	X_1+5	X_2+5	X_3+5	X_4+10	X_5+10	X_6+10	X_7+10

Таблиця 6 – Вихідні дані для практичної роботи 5 (для варіантів 26-35)

Значення номінальних параметрів	Значення експериментальних даних x_i							
	1	2	3	4	5	6	7	8
$P_{ном}=420$, кВт	$3K_3K_2$	X_1+10	X_2+10	X_3+10	X_4+10	X_5+15	X_6+15	X_7+20
$Q_{ном}=470$, квар	$3K_2K_3$	X_1+20	X_2+20	X_3+20	X_4+30	X_5+30	X_6+35	X_7+35
$U_{ном}=330$, кВ	$2K_3K_3$	X_1+5	X_2+5	X_3+5	X_4+10	X_5+10	X_6+10	X_7+10

Приклад виконання практичної роботи №5 в середовищі *Mathcad*.

Вихідні дані:

Результати експерименту для напруги, активної та реактивної потужності у відносних одиницях подані у вигляді матриці D:

$$D := \begin{pmatrix} 0.82 & 0.82 & 0.61 \\ 0.86 & 0.86 & 0.69 \\ 0.91 & 0.93 & 0.79 \\ 0.95 & 0.96 & 0.9 \\ 1 & 1 & 1 \\ 1.05 & 1.04 & 1.13 \\ 1.09 & 1.09 & 1.27 \\ 1.14 & 1.13 & 1.41 \end{pmatrix} \quad U := D^{(0)} \quad P := D^{(1)} \quad Q := D^{(2)}$$

Розв'язок

Знайдемо коефіцієнти функції поліноміальної регресії:

$$v_{sp} := \text{regress}(U, P, 1) \quad v_{sp} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 1 \\ 0.045 \\ 0.955 \end{pmatrix}$$

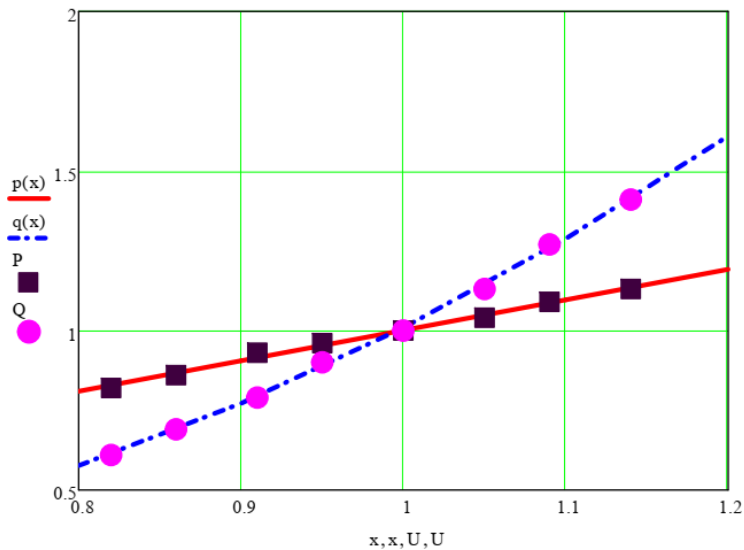
$$v_{sq} := \text{regress}(U, Q, 2) \quad v_{sq} = \begin{pmatrix} 3 \\ 3 \\ 2 \\ 0.539 \\ -1.643 \\ 2.112 \end{pmatrix}$$

Визначаємо функції статичних характеристик та аргументів:

$$p(x) := \text{interp}(v_{sp}, U, P, x) \quad x := 0.8, 0.9.. 1.2$$

$$q(x) := \text{interp}(v_{sq}, U, Q, x) \quad i := 0.. 7$$

Будуємо графіки статичних характеристик:

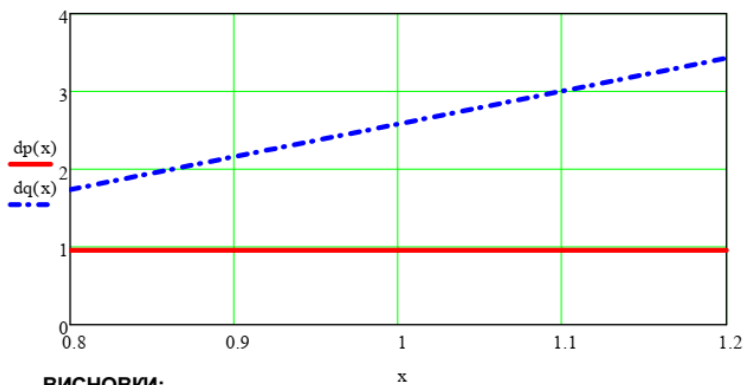


Знаходимо регулювальні ефекти:

$$dp(x) := \frac{d}{dx}p(x) \quad dp(1) = 0.955$$

$$dq(x) := \frac{d}{dx}q(x) \quad dq(1) = 2.582$$

Будуємо графік зміни регулювальних ефектів:



ВИСНОВКИ:

Практична робота №6

Тема: Розрахунок режиму електричної мережі за лінійною моделлю

Мета роботи: Ознайомлення з лінійною математичною моделлю режиму електричної мережі та розрахунок параметрів режиму.

ЗАВДАННЯ:

Розрахувати режим електричної мережі за лінійною моделлю усталеного режиму. Розрахувати напруги у вузлах та струми у вітках схеми електричної мережі, граф якої зображено на рис. 1. Розрахунки та графічні побудови виконати в *Mathcad*.

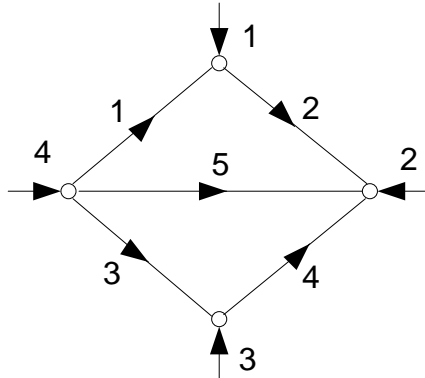


Рис. 1. Граф електричної мережі

Порядок виконання роботи:

1. Усі вітки графа є ЛЕП на напругу $U_{ном}$.
2. Усі проводи однієї марки.
3. За базисний прийняти вузол №4.
4. Напругу базисного вузла взяти на 10% більше за номінальну.
5. Зробити висновки.

Вихідні дані до практичної роботи 5 подано в таблиці 7.

Варіант видається викладачем.

Номер варіанту	Марка проводу	Довжина, км					Питомі опори, Ом/км		Струми у вузлах, А			Номінальна напруга, кВ
		L1	L2	L3	L4	L5	r_0	x_0	J_1	J_2	J_3	
1.	AC-70/11	20	25	30	35	40	0,428	0,432	800-j600	1000-j800	700-j500	35
2.	AC-70/11	22	27	32	37	42	0,428	0,444	700-j500	900-j700	600-j400	110
3.	AC-70/11	25	29	35	40	45	0,428	0,46	650-j450	850-j650	550-j350	150
4.	AC-95/16	30	35	40	45	50	0,306	0,421	805-j605	1005-j805	705-j505	35
5.	AC-95/16	32	37	42	47	52	0,306	0,434	705-j505	905-j705	605-j405	110
6.	AC-95/16	34	39	44	49	54	0,306	0,45	660-j460	860-j660	540-j360	150
7.	AC-120/19	35	40	45	50	55	0,249	0,414	810-j610	1010-j810	710-j510	35
8.	AC-120/19	36	41	46	51	56	0,249	0,427	710-j510	910-j710	610-j410	110
9.	AC-120/19	37	42	47	52	57	0,249	0,441	640-j440	840-j640	540-j340	150
10.	AC-150/24	40	45	50	55	60	0,198	0,406	820-j615	1020-j815	720-j515	35
11.	AC-150/24	42	47	52	57	62	0,198	0,42	720-j520	920-j720	620-j420	110
12.	AC-150/24	43	48	53	58	63	0,198	0,434	630-j430	830-j630	530-j420	150
13.	AC-185/29	50	55	60	65	70	0,162	0,413	725-j525	925-j725	625-j425	110
14.	AC-185/29	51	56	61	66	71	0,162	0,429	670-j470	870-j670	570-j470	150
15.	AC-240/32	52	57	62	67	72	0,12	0,405	730-j530	930-j730	630-j430	110
16.	AC-240/32	55	60	65	70	75	0,12	0,42	655-j455	855-j655	555-j432	150
17.	AC-240/32	80	85	90	95	100	0,12	0,435	535-j320	760-j380	430-j290	220
18.	AC-240/39	500	550	600	650	700	0,011	0,193	390-j250	550-j300	300-j200	1150
19.	AC-240/56	400	450	500	550	600	0,024	0,308	400-j300	600-j360	320-j220	750
20.	AC-300/39	100	120	140	160	200	0,098	0,429	545-j330	770-j390	440-j290	220
21.	AC-300/39	150	200	250	300	350	0,048	0,328	500-j300	700-j350	400-j250	330
22.	AC-300/48	800	850	900	950	1000	0,0125	0,266	380-j240	540-j310	310-j210	1150
23.	AC-300/66	500	520	540	560	600	0,034	0,31	450-j300	650-j400	350-j250	500
24.	AC-300/66	700	740	760	780	900	0,021	0,288	410-j310	610-j370	330-j230	750
25.	AC-330/43	600	630	660	670	800	0,029	0,308	460-j305	660-j405	355-j255	500
26.	AC-330/43	1200	1100	1000	950	1500	0,011	0,27	370-j230	540-j2800	280-j190	1150
27.	AC-400/51	90	100	120	140	190	0,075	0,42	550-j325	765-j385	435-j295	220
28.	AC-400/51	120	140	160	180	200	0,0375	0,323	510-j310	710-j360	410-j260	330
29.	AC-400/51	400	450	470	490	500	0,025	0,306	465-j310	650-j420	360-j255	500
30.	AC-400/51	700	750	740	650	1000	0,015	0,286	440-j340	640-j370	340-j240	750

Приклад виконання практичної роботи №6 в середовищі *Mathcad*.

Напряга базисного вузла: $U_0 := 242$

Питомі опори та довжини віток:

$$z_0 := \begin{pmatrix} 0.121 + j \cdot 0.435 \\ 0.121 + j \cdot 0.435 \\ 0.098 + j \cdot 0.429 \\ 0.075 + j \cdot 0.42 \\ 0.075 + j \cdot 0.42 \end{pmatrix} \quad \underline{\underline{L}} := \begin{pmatrix} 98 \\ 75 \\ 120 \\ 115 \\ 144 \end{pmatrix}$$

Опори віток та вузлові струми:

$$Z_b := \begin{matrix} \longrightarrow \\ (z_0 \cdot L) \end{matrix} \quad \underline{\underline{I}} := \begin{pmatrix} 0.525 - j \cdot 0.310 \\ 0.750 - j \cdot 0.370 \\ 0.420 - j \cdot 0.280 \end{pmatrix}$$
$$Z_b = \begin{pmatrix} 11.858 + 42.63i \\ 9.075 + 32.625i \\ 11.76 + 51.48i \\ 8.625 + 48.3i \\ 10.8 + 60.48i \end{pmatrix}$$

Розрахункові дані:

$$Y_b := \left(\frac{1}{Z_b} \right) \quad Y_b = \begin{pmatrix} 6.056 \times 10^{-3} - 0.022i \\ 7.914 \times 10^{-3} - 0.028i \\ 4.217 \times 10^{-3} - 0.018i \\ 3.583 \times 10^{-3} - 0.02i \\ 2.861 \times 10^{-3} - 0.016i \end{pmatrix}$$

Модель електричної мережі

1. Формування матриці інциденцій вузлів та віток M :

$$M := \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -1 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix}$$

2. Формування діагональної матриці провідностей віток Y :

$$i := 1..5$$

$$Y_{i,i} := Y_{b_i}$$

$$Y = \begin{pmatrix} 6.056 \times 10^{-3} - 0.022i & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 7.914 \times 10^{-3} - 0.028i & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 4.217 \times 10^{-3} - 0.018i & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 3.583 \times 10^{-3} - 0.02i & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 2.861 \times 10^{-3} - 0.016i \end{pmatrix}$$

3. Формування матриці-стовбця провідностей віток, які зв'язують вузли схеми з базисним вузлом Y0:

$$Y_{0i} := \begin{pmatrix} Y_{b_1} \\ Y_{b_5} \\ Y_{b_3} \end{pmatrix} \quad Y_0 = \begin{pmatrix} -6.056 \times 10^{-3} + 0.022i \\ -2.861 \times 10^{-3} + 0.016i \\ -4.217 \times 10^{-3} + 0.018i \end{pmatrix}$$

4. Отримання матриці вузлових провідностей Y1:

$$Y_1 := M \cdot Y \cdot M^T$$

$$Y_1 = \begin{pmatrix} 0.014 - 0.05i & -7.914 \times 10^{-3} + 0.028i & 0 \\ -7.914 \times 10^{-3} + 0.028i & 0.014 - 0.065i & -3.583 \times 10^{-3} + 0.02i \\ 0 & -3.583 \times 10^{-3} + 0.02i & 7.8 \times 10^{-3} - 0.039i \end{pmatrix}$$

Обчислення:

1. Розв'язок системи лінійних рівнянь методом оберненої матриці:

$$Z := Y_1^{-1}$$

$$Z = \begin{pmatrix} 6.895 + 26.549i & 3.097 + 14.243i & 1.776 + 7.346i \\ 3.097 + 14.243i & 5.467 + 25.143i & 3.134 + 12.968i \\ 1.776 + 7.346i & 3.134 + 12.968i & 6.828 + 31.619i \end{pmatrix}$$

$$U := Z \cdot (J - Y_0 \cdot U_0)$$

$$U = \begin{pmatrix} 219.755 - 23.925i \\ 217.609 - 27.92i \\ 219.92 - 23.241i \end{pmatrix}$$

2. Розрахунок інших параметрів режиму мережі:

$$\text{Напряга віток:} \quad U_b := M^T \cdot (U - U_0)$$

$$U_b = \begin{pmatrix} 22.245 + 23.925i \\ 2.146 + 3.995i \\ 22.08 + 23.241i \\ 2.312 + 4.68i \\ 24.391 + 27.92i \end{pmatrix}$$

$$\text{Струм віток:} \quad I := \overrightarrow{[Y_b \cdot U_b]}$$

$$I = \begin{pmatrix} 0.656 - 0.339i \\ 0.131 - 0.029i \\ 0.522 - 0.31i \\ 0.102 - 0.03i \\ 0.517 - 0.311i \end{pmatrix}$$

3. Перевірка результатів: сума струмів повинна дорівнювати струму балансуєного вузла з протилежним знаком.

$$J_s := \sum J$$

$$J_s = -1.695 + 0.96i$$

Струм балансуєного вузла:

$$I_w := I_1 + I_3 + I_5 \quad I = 1.695 - 0.96i$$

ПЕРЕЛІК ПОСИЛАНЬ

1. Баженов В.А. Моделювання та оптимізація електроенергетичних та електромеханічних систем. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2023. 69 с
2. Сегеда М. С., Олійник М. Й., Лисяк В. Г. Режими систем пересилання та споживання електричної енергії. Навчальний посібник / За заг. ред. проф. М. С. Сегеди. Львів : Видавництво Львівської політехніки, 2021. 304 с.
3. Математичне моделювання електроенергетичних систем в ринкових умовах: монографія / С. Є. Саух, А. В. Борисенко. К.: «Три К», 2020. 340 с.
4. Voropai Nikolai I., Stennikov Valery A. (eds.) Hierarchical Modeling of Energy Systems. Elsevier, 2023. 542 p.

Моделі елементів електропостачальних систем : методичні вказівки до практичних занять для здобувачів першого бакалаврського рівня вищої освіти освітньої програми «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» галузі знань 6 Інженерія, виробництво та будівництво спеціальності 63 Електрична інженерія денної та заочн. форм навч. / уклад. В. І. Волинець. Луцьк: ЛНТУ, 2026. 38 с.

Комп'ютерний набір: В. І. Волинець

Редактор: В. І. Волинець

Підп. до друку ___ березня 2026 р.
Формат 60x84/16. Папір офс. Гарнітура Таймс.
Ум. друк. арк. 2,4. Обл.-вид. арк. 2,15.
Тираж 50 прим.

Луцький національний технічний університет
43018 м. Луцьк, вул. Львівська, 75
Друк – ЛНТУ