

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ
імені ІГОРЯ СІКОРСЬКОГО»

**ПАКЕТИ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ
ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ
РОЗРАХУНКІВ
КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ**

Навчальний посібник

Рекомендовано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського
як навчальний посібник для здобувачів ступеня бакалавра
спеціальності 141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Укладачі: В. В. Чижевський, В. І. Моссаковський

Електронне мережне навчальне видання

Київ
КПІ ім. Ігоря Сікорського
2022

Пакети прикладних програм для електротехнічних розрахунків: Комп'ютерний практикум [Електронний ресурс]: навч.- метод. посіб. для студ. спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка» / КПІ ім. Ігоря Сікорського ; уклад.: В. В. Чижевський, В. І. Моссаковський – Електронні текстові дані (1 файл: 12,8 Мбайт). – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 242 с.

Рецензент *Пушкар М. В.*, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

Відповідальний редактор *Кацадзе Т.Л.*, доцент, кандидат технічних наук, доцент кафедри електричних мереж та систем

Гриф надано Методичною радою КПІ ім. Ігоря Сікорського (протокол № 6 від 24.06.2022 р.) за поданням Вченої ради факультету електроенерготехніки та автоматики (протокол № 10 від 20.06.2022 р.)

ПАКЕТИ ПРИКЛАДНИХ ПРОГРАМ ДЛЯ ЕЛЕКТРОТЕХНІЧНИХ РОЗРАХУНКІВ КОМП'ЮТЕРНИЙ ПРАКТИКУМ

Укладач: *Чижевський Володимир Валерійович*, кандидат техн. наук, доц.
Моссаковський Вадим Ігорович, асистент

Навчально-методичний посібник містить теоретичні засади, методику виконання та індивідуальні завдання для роботи в програмних середовищах MathCAD, MatLab та SVC з дисципліни «Пакети прикладних програм для електротехнічних розрахунків» для студентів, які навчаються за спеціальністю 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньою програмою «Електричні системи і мережі».

© В.В. Чижевський, В.І. Моссаковський
© КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022

ЗМІСТ

ВСТУП.....	5
Тема №1	
РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЛАНЦЮЖКОВОЇ СХЕМИ ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	6
Тема №2	
РЕЖИМ ОДНОБІЧНОГО УВІМКНЕННЯ ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	15
Тема №3	
РЕЖИМ НЕНАВАНТАЖЕНОЇ ЛІНІЇ.....	21
Тема №4	
РЕЖИМ МАКСИМАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	27
Тема №5	
ПОБУДОВА КРУГОВОЇ ДІАГРАМИ ТА РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ	34
Тема №6	
МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ОДНОГО КЛАСУ НОМІНАЛЬНОЇ НАПРУГИ В СЕРЕДОВИЩІ SIMPLE VOLTAGE CALCULATOR.....	44
Тема №7	
ВИБІР ПЕРЕРІЗІВ ПРОВОДІВ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ОДНОГО КЛАСУ НОМІНАЛЬНОЇ НАПРУГИ.....	60
Тема №8	
МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ТРАНСФОРМАТОРНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ.....	90
Тема №9	
ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВОЛЬТОДОДАТКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ, ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ ТА УСТАНОВОК ПОВЗДОВЖНЬОЇ КОМПЕНСАЦІЇ.....	103
Тема №10	
SIMULINK ТА SIMSCAPE. СИЛОВІ КОЛА ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ЗВ'ЯЗКИ ТА ВЗАЄМОДІЯ МІЖ НИМИ В СЕРЕДОВИЩІ	

MATLAB.....	114
Тема №11	
РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ. ПЕРЕВІРКА ВИКОНАННЯ ЗАКОНІВ ОМА ТА КІРХГОФА, ВИКОНАННЯ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТЕЙ.....	130
Тема №12	
РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ З ПЕРІОДИЧНИМИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕРС.....	146
Тема №13	
МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ ТА СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	158
Тема №14	
МОДЕЛЮВАННЯ ЗАМКНЕНИХ СХЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ. ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ.....	171
Тема №15	
ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	189
Тема №16	
МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ТА НАПРУГИ. ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ.....	201
Тема №17	
МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ	224
СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ.....	237
ДОДАТОК А. ДОВІДКОВА ІНФОРМАЦІЯ ЗА ТЕМАТИКОЮ ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ.....	238

ВСТУП

Практичні заняття з навчальної дисципліни «Пакети прикладних програм для електротехнічних розрахунків» виконуються згідно до силабусу дисципліни, складеного відповідно до освітньої програми «Електричні системи і мережі» підготовки бакалавра зі спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Метою навчальної дисципліни є формування у здобувачів наступних здатностей: використовувати у професійній діяльності базові знання у галузі природничих наук; використовувати у професійній діяльності комп'ютерну техніку та програмне забезпечення; застосовувати різні методи розрахунку для визначення режимних параметрів електричних мереж та електроенергетичних систем на етапах проектування; забезпечувати моделювання електротехнічних об'єктів і технологічних процесів виробництва, передачі та розподілу електричної енергії з використанням стандартних пакетів і засобів автоматизації інженерних розрахунків, проводити експерименти за заданими методиками з обробкою й аналізом результатів.

Предмет навчальної дисципліни – забезпечення ефективного розв'язання задач в межах компетенції освітньої програми «Електричні системи і мережі» за допомогою систем комп'ютерної алгебри «MathCAD», «MatLab», «SVC».

Вивчення дисципліни «Пакети прикладних програм для електротехнічних розрахунків» впродовж семестру структурно розділене на три частини, кожна з яких пов'язана із виконанням робіт у визначеному програмному середовищі:

1 частина – MathCAD – розрахунок протяжної ЛЕП надвисокої напруги, дослідження основних режимів роботи;

2 частина – Simple Voltage Calculator – моделювання схем електричних мереж різних класів номінальної напруги, врахування трансформаторних зв'язків в схемі, регулювання напруги;

3 частина – MatLab – моделювання електротехнічних схем, моделювання районних електричних мереж, дослідження електромашинних комплексів.

Матеріал даного навчального посібника може виявитися корисним для студентів спеціальності 141 «Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка», освітньої програми «Електричні системи і мережі» під час виконання електричних розрахунків режимів роботи електричних мереж та систем в процесі курсового та дипломного проектування.

Тема №1

РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ ЛАНЦЮЖКОВОЇ СХЕМИ ДАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Мета роботи: розрахунок погонних параметрів ліній електропередавання; вибір типу та потужності обладнання компонентів ланцюжкової схеми ДЕП; розрахунок параметрів схеми заміщення силового обладнання; розрахунок сталих чотиріполюсника компонентів ланцюжкової схеми ДЕП.

Теоретичні положення та практична частина

Розрахунок погонних параметрів ділянок ліній електропередавання, параметрів схеми заміщення елементів електропередачі, визначення коефіцієнтів чотиріполюсника елементів ланцюжкової схеми та безпосереднє формування ланцюжкової схеми дальньої електропередачі розглядатиметься на даному конкретному прикладі. Зовнішній вигляд розрахунку є відображенням його у програмному середовищі MathCAD.

Електропередача номінальною напругою $U_H := 500 \cdot \text{кВ}$ для транзиту активної потужності $P_H := 1000 \cdot \text{МВт}$. Довжина електропередачі становить $L_{\text{ПЛ}} := 900 \text{ км}$. Лінію виконано провідником АС-400/93, кількість провідників в фазі $n_{\text{пар}} := 3$, діаметр провідника $d_{\text{АС-400}} := 29.1 \cdot \text{мм}$, крок розщеплення фази становить $a := 600 \cdot \text{мм}$. Втрати на корону $\Delta P_0 := 7.2 \cdot \frac{\text{кВт}}{\text{км}}$.

Розрахунок погонного активного опору (резистансу)

АС-400/93 містить $n_{\text{Al}} := 54$ алюмінієві проволочки $d_{\text{Al}} := 3.07 \cdot \text{мм}$. Питомий опір алюмінію становить $\rho_{\text{Al}} := 28.5 \cdot \text{Ом} \cdot \frac{\text{мм}^2}{\text{км}}$. Для даної кількості проволочок існує необхідність врахування коефіцієнту укрутки, який становить $k_1 := 0.01894$.

$$r_0 := \left(\frac{\rho_{\text{Al}} \cdot k_1}{0.25 \cdot \pi \cdot d_{\text{Al}}^2} \right) \cdot \frac{1}{n_{\text{пар}}} = 0.024 \cdot \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

Розрахунок погонного індуктивного опору (реактансу)

Заданося опором ЛЕП.

Як видно з рис.1.1, відстань між фазами А і В становить

$D_{\text{А-В}} := 6.3 \cdot \text{м} + 6.5 \cdot \text{м} = 12.8 \cdot \text{м}$. Відстань між В та С така сама: $D_{\text{В-С}} := 12.8 \cdot \text{м}$.

Відстань між фазами А і С становить тоді

$D_{\text{А-С}} := 2 \cdot (6.3 \cdot \text{м} + 6.5 \cdot \text{м}) = 25.6 \cdot \text{м}$

Середньогометрична відстань між фазами

$$D_g := \sqrt[3]{D_{A-B} \cdot D_{B-C} \cdot D_{A-C}} = 16.13 \cdot \text{м.}$$

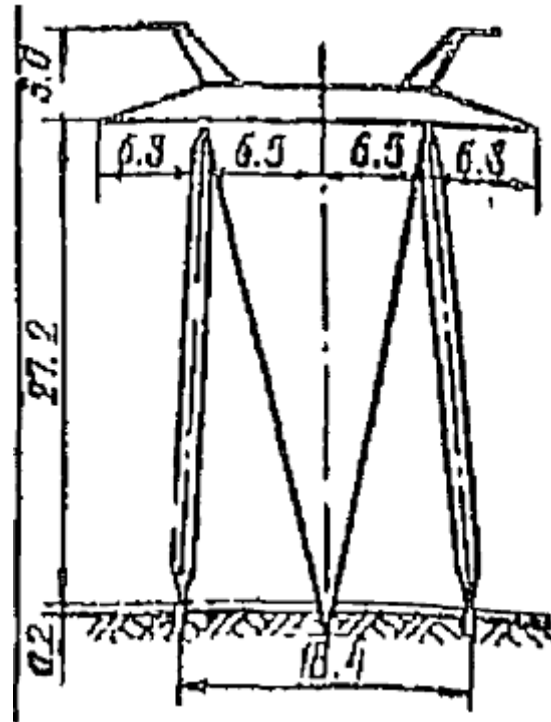


Рисунок 1.1. Опора 500 кВ

Еквівалентний радіус розщепленої фази за $n_{\text{пар}} = 3$ паралельних провідників у фазі, кроку розщеплення фази $a = 600 \cdot \text{мм}$ та з врахуванням коефіцієнту середньогометричного радіусу $k_g := 0.81$

$$R_g := \sqrt[3]{\frac{d_{AC-400}}{2 \cdot \text{мм}} \cdot \left(\frac{a}{2 \cdot \sin\left(\frac{\pi}{n_{\text{пар}}}\right) \cdot \text{мм}} \right)^{n_{\text{пар}}-1} \cdot n_{\text{пар}} \cdot k_g \cdot \text{мм}} = 140.67 \cdot \text{мм}$$

шуканий реоктанс

$$x_0 := \left(0.02 \cdot \pi \cdot \ln\left(\frac{D_g}{R_g}\right) \right) \cdot \frac{\text{Ом}}{\text{км}} = 0.298 \cdot \frac{\text{Ом}}{\text{км}}$$

Розрахунок погонної активної провідності (кондуктансу)

Є питомі втрати на корону (тут задано, без вимоги здійснювати додаткові розрахунки) та номінальна напруга електропередачі:

$$g_0 := \frac{\Delta P_0}{U_H^2} = 2.88 \times 10^{-8} \cdot \frac{\text{См}}{\text{км}}$$

Розрахунок погонної ємнісної провідності (сусцептансу)

Спочатку виконаємо розрахунок довжини ізоляційного підвісу. Прийmemo другий ступінь забруднення оточуючого середовища, що в свою чергу

вимагає питомої довжини витоку $\lambda_e := 20 \cdot \frac{\text{мм}}{\text{кВ}}$. Прийmemo ізолятор ПС160Д, з

монтажною довжиною $H_{\text{in}} := 170 \cdot \text{мм}$ та номінальним шляхом витоку

$l_e := 370 \cdot \text{мм}$. Звідси довжина ізоляційного підвісу становитиме

$$L_{\text{in}} := \frac{\lambda_e \cdot U_H}{l_e} \cdot H_{\text{in}} + 2 \cdot H_{\text{in}} = 4.9 \cdot \text{м}. \text{ Причому } \frac{\lambda_e \cdot U_H}{l_e} \cdot H_{\text{in}} = 4.6 \text{ м, тобто похибка}$$

округлення є мінімальною.

Для ліній 500 кВ габарит приймається з діапазону 6,7..8 м. Прийmemo $D_{\text{im}} := 8 \cdot \text{м}$. Як видно із рис.1.1., висота опори $H := 27.2 \cdot \text{м}$. Таким чином

$$\text{висота розташування центру мас становить } h_g := \frac{H - L_{\text{in}} + 2 \cdot D_{\text{im}}}{3} = 12.8 \cdot \text{м}.$$

Тепер потрібні відстані між фазою А та дзеркальним відображення фазі В, між фазою В та дзеркальним відображення фазі С, між фазою С та дзеркальним відображення фазі А. В свою чергу це визначатиметься за рис.1.2.

$$D_{A-B'} := \sqrt{(2 \cdot h_g)^2 + D_{A-B}^2} = 28.5 \cdot \text{м}$$

$$D_{B-C'} := \sqrt{(2 \cdot h_g)^2 + D_{B-C}^2} = 28.5 \cdot \text{м}$$

$$D_{C-A'} := \sqrt{(2 \cdot h_g)^2 + D_{A-C}^2} = 36.14 \cdot \text{м}$$

Середньогогеометрична відстань для фаз і їх дзеркальних відображень становить:

$$D'_g := \sqrt[3]{D_{A-B'} \cdot D_{B-C'} \cdot D_{C-A'}} = 30.88 \cdot \text{м}$$

Задавшись відносною діелектричною провідністю повітря на рівні

$\varepsilon := 1.00059$ можна обчислити сусцептанс

$$b_0 := \frac{2 \cdot 10^2 \cdot \pi^2 \cdot \varepsilon_0 \cdot \varepsilon}{\ln \left(\frac{2 \cdot h_g \cdot k_g \cdot D_g}{R_g \cdot D'_g} \right) \cdot c} = 4.029 \times 10^{-6} \cdot \frac{\text{См}}{\text{км}}$$

Хвильові параметри лінії, такі як хвильовий опір та коефіцієнт поширення становитимуть:

$$Z_0 := \sqrt{\frac{r_0 + i \cdot x_0}{g_0 + i \cdot b_0}} = (272.18 - 10.11i) \cdot \text{Ом}$$

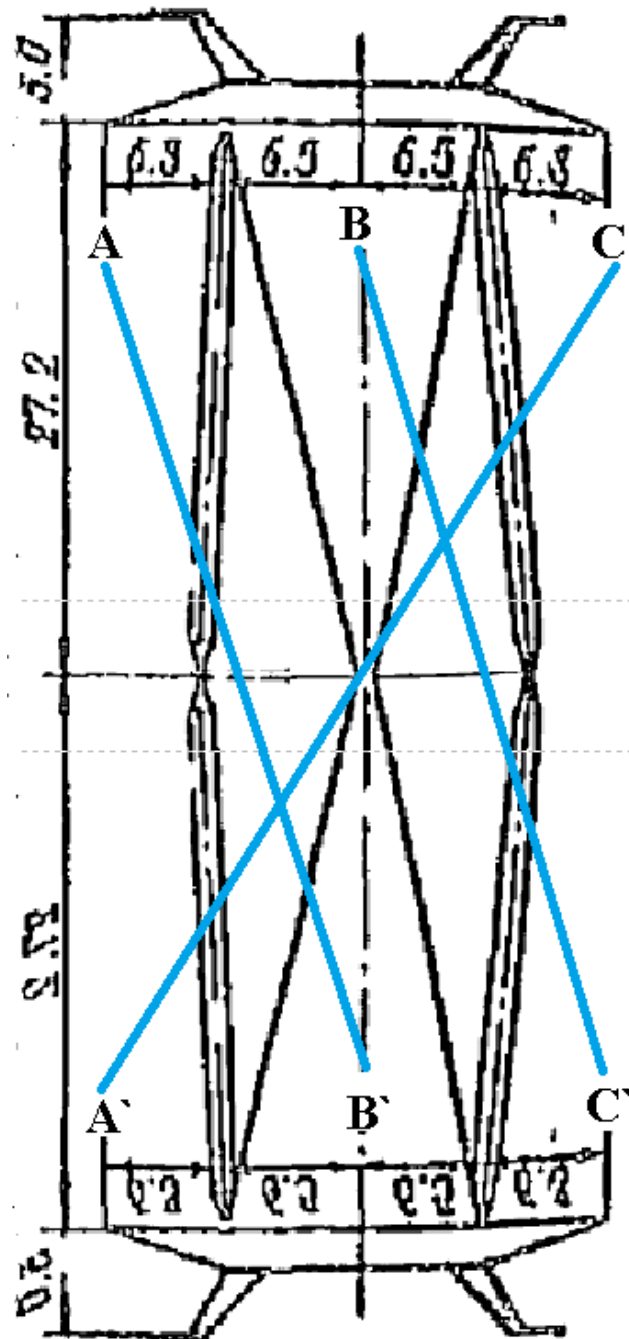


Рисунок 1.2. Опора 500 кВ та її дзеркальне відображення

$$\gamma_0 := \sqrt{(r_0 + i \cdot x_0) \cdot (g_0 + i \cdot b_0)} = (4.858 \times 10^{-5} + 1.096i \times 10^{-3}) \cdot \frac{1}{\text{км}}$$

Типова величина хвильового опору 250 Ом з емнісним кутом до 5° .

Коефіцієнт фази близько 0.06° на км довжини.

В даному випадку хвильовий опір $|Z_0| = 272.372$ Ом з фазовим кутом

$\arg(Z_0) = -0.6^\circ$. Коефіцієнт фази $\text{Im}(\gamma_0) = 0.063 \frac{^\circ}{\text{км}}$. Локальну перевірку

виконано.

Ділянка лінії

Після розрахунку погонних параметрів, лінію можна представити у вигляді чотирипольосника для формування ланцюжкової схеми. Лінію поділено на три частини. Представляємо лінію чотирипольосником з такими сталими:

$$A_{\text{ПЛ}} := \cosh\left(\gamma_0 \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{3}\right) = 0.946 + 1.822i \times 10^{-3}$$

$$B_{\text{ПЛ}} := Z_0 \cdot \sinh\left(\gamma_0 \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{3}\right) = (2.33 + 87.78i) \cdot \text{Ом}$$

$$C_{\text{ПЛ}} := \frac{1}{Z_0} \cdot \sinh\left(\gamma_0 \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{3}\right) = (7.746 \times 10^{-6} + 1.187i \times 10^{-3}) \cdot \text{См}$$

$$D_{\text{ПЛ}} := \cosh\left(\gamma_0 \cdot \frac{L_{\text{ПЛ}}}{3}\right) = 0.946 + 1.822i \times 10^{-3}$$

$$\text{Перевірка: } A_{\text{ПЛ}} \cdot D_{\text{ПЛ}} - B_{\text{ПЛ}} \cdot C_{\text{ПЛ}} = 1$$

Засоби поперечної компенсації

По кінцях електропередачі а також на перемикальних пунктах буде встановлено установки поперечної компенсації - шунтувальні реактори, з наступними параметрами:

$$Q_{\text{реактор}} := 60 \cdot \text{МВАр}$$

$$U_{\text{реактор}} := \frac{525}{\sqrt{3}} \cdot \text{кВ}$$

$$\Delta P_{\text{реактор}} := 108 \cdot \text{кВт}$$

Звідси кондуктанс та сусцептанс однієї реакторної групи

$$g_{\text{реактор}} := \frac{3 \cdot \Delta P_{\text{реактор}}}{(\sqrt{3} \cdot U_{\text{реактор}})^2} = 1.176 \times 10^{-6} \cdot \text{См}$$

$$b_{\text{реактор}} := \frac{-3 \cdot Q_{\text{реактор}}}{(\sqrt{3} \cdot U_{\text{реактор}})^2} = -6.531 \times 10^{-4} \cdot \text{См}$$

адмінтанс реакторної групи

$$Y_{\text{реактор}} := g_{\text{реактор}} + i \cdot b_{\text{реактор}} = (1.176 \times 10^{-6} - 6.531i \times 10^{-4}) \cdot \text{См}$$

Даний реактор, як чотирипольосник: $A_{\text{реак}} := 1$, $D_{\text{реак}} := 1$, $B_{\text{реак}} := 0$,

$$C_{\text{реак}} := Y_{\text{реактор}}$$

Тут добре візуально видно, що виконується умова $AD-BC=1$

Установка повздовжньої компенсації

Мінімальний ступінь компенсації реактансу лінії становить 20 %. Якщо за розрахунками потрібно компенсувати 2 %, 5 %, 11 % реактансу тощо, то рівень компенсації підвищується до 20 %.

В даному випадку для забезпечення пропускної здатності електропередачі на заданому рівні потрібно поставити установку повздовжньої компенсації з мінімально можливим значенням опору. Таким чином, прийнявши ступінь компенсації $\alpha := 20\%$, розрахункове значення реактансу установки становитиме $X_{\text{УПК розр}} := \alpha \cdot L_{\text{ПЛ}} \cdot x_0 = 53.63 \cdot \text{Ом}$.

Для набору установки буде використано конденсатори КЕКП-2,1-150, що мають наступні паспортні дані:

- номінальна напруга одиначної банки $U_0 := 2.1 \cdot \text{кВ}$,

- номінальна потужність одиначної банки $Q_0 := 150 \cdot \text{кВАр}$.

Розраховується кількість паралельних та послідовних елементів.

Кількість паралельних елементів визначається струмом навантаження.

Компоновка банок для електроустановок напругою понад 330 кВ передбачає їх комбінацію по 4 од. в блоці, тому округлення розрахункової кількості паралельних елементів здійснюється до найближчого більшого кратного 4 числа. Прийнявши коефіцієнт потужності 0,95 в місці встановлення УПК, кількість паралельних елементів

$$n_{\text{УПК пар}} := \text{Ceil} \left(\frac{P_{\text{II}} \cdot U_0}{0.95 \sqrt{3} \cdot U_{\text{H}} \cdot Q_0}, 4 \right) = 20 \text{ од.}$$

Кількість послідовних елементів визначається, виходячи зі значення розрахункового опору установки

$$n_{\text{УПК пос}} := \text{ceil} \left(\frac{X_{\text{УПК розр}} \cdot n_{\text{УПК пар}} \cdot Q_0}{U_0^2} \right) = 37 \text{ од.}$$

Звідси опір установки, виходячи з опору одиначної банки та кількості паралельних і послідовних елементів становить

$$Z_{\text{УПК}} := \frac{U_0^2 \cdot n_{\text{УПК пос}}}{Q_0 \cdot n_{\text{УПК пар}}} = 54.39 \cdot \text{Ом}$$

Установка повздовжньої компенсації, як чотириполюсник, має наступні значення сталих: $A_{\text{УПК}} := 1$, $B_{\text{УПК}} := -i \cdot Z_{\text{УПК}} = -54.39i \cdot \text{Ом}$, $C_{\text{УПК}} := 0$,

$D_{\text{УПК}} := 1$.

Візуально помітно, що перевірка $AD-BC=1$ виконується.

Автотрансформатори на приймальній стороні

Прийmemo, що дальню електропередачу 500 кВ потрібно з'єднати з приймальною системою номінальної напруги 330 кВ. З цією метою використовується АОДЦТН-167000/500/330 з такими паспортними даними:

- номінальна потужність $S_{AT-2} := 167 \cdot \text{МВА}$

- номінальна напруга ВН $U_0_{AT-2} := \frac{500}{\sqrt{3}} \cdot \text{кВ}$

- втрати потужності холостого ходу $\Delta P_{XX AT-2} := 50 \cdot \text{кВт}$

- втрати потужності короткого замикання ВН-СН $\Delta P_{КЗ AT-2} := 280 \cdot \text{кВт}$

- напруга короткого замикання ВН-СН $u_{КВ-С AT-2} := 9.5\%$

- струм холостого ходу $I_{XX AT-2} := 0.2\%$

Розрахункова кількість автотрансформаторних груп, виходячи з коефіцієнту

потужності навантаження $0.95 \frac{P_{II}}{0.95 \cdot (3 \cdot S_{AT-2})} = 2.1$, тобто дві або три групи.

Прийнявши три групи в роботі а дві - на випадок аварії, пересвідчуємося у витримці 30% перевантаження двома групами: $1.3 \cdot 2 \cdot (3 \cdot S_{AT-2}) = 1302.6 \cdot \text{МВА}$

проти $\frac{P_{II}}{0.95} = 1052.6 \cdot \text{МВА}$ необхідного транзиту. Тобто перевірка виконується.

Приймається $n_{AT-2} := \text{ceil} \left[\frac{P_{II}}{0.85 \cdot (3 \cdot S_{AT-2})} \right] = 3$ групи

АОДЦТН-167000/500/330.

Параметри схеми заміщення трьох груп автотрансформаторів:

$$r_{AT-2} := \frac{3 \cdot \Delta P_{КЗ AT-2} \cdot U_0_{AT-2}^2}{n_{AT-2} \cdot (3 \cdot S_{AT-2})^2} = 0.09 \cdot \text{Ом}$$

$$x_{AT-2} := \frac{u_{КВ-С AT-2} \cdot U_0_{AT-2}^2}{n_{AT-2} \cdot (3 \cdot S_{AT-2})} = 5.27 \cdot \text{Ом}$$

$$g_{AT-2} := n_{AT-2} \cdot \frac{3 \cdot \Delta P_{XX AT-2}}{U_0_{AT-2}^2} = 5.4 \times 10^{-6} \cdot \text{См}$$

$$b_{AT-2} := -n_{AT-2} \cdot \frac{I_{XX AT-2} \cdot (3 \cdot S_{AT-2})}{U_0_{AT-2}^2} = -3.607 \times 10^{-5} \cdot \text{См}$$

Автотрансформатор у вигляді чотириполюсника:

$$A_{AT-2} := 1$$

$$B_{AT-2} := (r_{AT-2} + i \cdot x_{AT-2}) = (0.09 + 5.27i) \cdot \text{Ом}$$

$$C_{AT-2} := g_{AT-2} + i \cdot b_{AT-2} = (5.4 \times 10^{-6} - 3.607i \times 10^{-5}) \cdot \text{См}$$

$$D_{AT-2} := 1 + (r_{AT-2} + i \cdot x_{AT-2}) \cdot (g_{AT-2} + i \cdot b_{AT-2}) = 1 + 2.509i \times 10^{-5}$$

$$\text{перевірка } A_{AT-2} \cdot D_{AT-2} - B_{AT-2} \cdot C_{AT-2} = 1$$

Автотрансформатори на приймальній стороні

Прийемо, що дальню електропередачу 500 кВ потрібно під'єднати до передавальної системи номінальної напруги 220 кВ. З цією метою використовується АОДЦТН-167000/500/220 з такими паспортними даними:

- номінальна потужність $S_{AT-1} := 167 \cdot \text{МВА}$

- номінальна напруга ВН $U_0 \text{ AT-1} := \frac{500}{\sqrt{3}} \cdot \text{кВ}$

- втрати потужності холостого ходу $\Delta P_{XX} \text{ AT-1} := 77 \cdot \text{кВт}$

- втрати потужності короткого замикання ВН-СН $\Delta P_{КЗ} \text{ AT-1} := 285 \cdot \text{кВт}$

- напруга короткого замикання ВН-СН $u_{КВ-С} \text{ AT-1} := 11 \cdot \%$

- струм холостого ходу $I_{XX} \text{ AT-1} := 0.11 \cdot \%$

Через автотрансформаторні групи має пройти потужність покриття втрат на корону та нагрів провідників. Прийнявши коефіцієнт потужності 0,95, втрати потужності становитимуть

$$\Delta P := \Delta P_0 \cdot L_{ПЛ} + \left(\frac{P_{II}}{0.95 \cdot U_H} \right)^2 \cdot r_0 \cdot L_{ПЛ} = 103.44 \cdot \text{МВт}$$

Розрахункова кількість автотрансформаторних груп $\frac{P_{II} + \Delta P}{0.95 \cdot (3 \cdot S_{AT-1})} = 2.3$,

тобто дві або три групи.

Прийнявши три групи в роботі а дві - на випадок аварії, пересвідчуємося у витримці 30% перевантаження двома групами: $1.3 \cdot 2 \cdot (3 \cdot S_{AT-1}) = 1302.6 \cdot \text{МВА}$

проти $\frac{P_{II}}{0.95} + \Delta P = 1156.1 \cdot \text{МВА}$ необхідного транзиту. Тобто перевірка

виконується.

Приймається $n_{AT-1} := \text{ceil} \left[\frac{\frac{P_{II}}{0.95} + \Delta P}{(3 \cdot S_{AT-1})} \right] = 3$ групи АОДЦТН-167000/500/220.

Параметри схеми заміщення трьох груп автотрансформаторів:

$$r_{AT-1} := \frac{3 \cdot \Delta P_{K3 AT-1} \cdot U_{0 AT-1}^2}{n_{AT-1} \cdot (3 \cdot S_{AT-1})^2} = 0.09 \cdot \text{Ом}$$

$$x_{AT-1} := \frac{u_{K B-C AT-1} \cdot U_{0 AT-1}^2}{n_{AT-1} \cdot (3 S_{AT-1})} = 6.1 \cdot \text{Ом}$$

$$g_{AT-1} := n_{AT-1} \cdot \frac{3 \cdot \Delta P_{XX AT-1}}{U_{0 AT-1}^2} = 8.316 \times 10^{-6} \cdot \text{См}$$

$$b_{AT-1} := -n_{AT-1} \cdot \frac{I_{XX AT-1} \cdot (3 \cdot S_{AT-1})}{U_{0 AT-1}^2} = -1.984 \times 10^{-5} \cdot \text{См}$$

Автотрансформатор у вигляді чотирипол'юсника:

$$A_{AT-1} := 1$$

$$B_{AT-1} := (r_{AT-1} + i \cdot x_{AT-1}) = (0.09 + 6.1i) \cdot \text{Ом}$$

$$C_{AT-1} := g_{AT-1} + i \cdot b_{AT-1} = (8.316 \times 10^{-6} - 1.984i \times 10^{-5}) \cdot \text{См}$$

$$D_{AT-1} := 1 + (r_{AT-1} + i \cdot x_{AT-1}) \cdot (g_{AT-1} + i \cdot b_{AT-1}) = 1 + 4.884i \times 10^{-5}$$

Автотрансформатор у вигляді чотирипол'юсника:

$$A_{AT-1} := 1$$

$$B_{AT-1} := (r_{AT-1} + i \cdot x_{AT-1}) = (0.09 + 6.1i) \cdot \text{Ом}$$

$$C_{AT-1} := g_{AT-1} + i \cdot b_{AT-1} = (8.316 \times 10^{-6} - 1.984i \times 10^{-5}) \cdot \text{См}$$

$$D_{AT-1} := 1 + (r_{AT-1} + i \cdot x_{AT-1}) \cdot (g_{AT-1} + i \cdot b_{AT-1}) = 1 + 4.884i \times 10^{-5}$$

$$\text{перевірка } A_{AT-1} \cdot D_{AT-1} - B_{AT-1} \cdot C_{AT-1} = 1$$

Індивідуальне завдання

Для обраної марки провідника відповідного класу напруги електропередачі дослідити залежність реохтансу, сусцептансу, хвильового опору, коефіцієнту фази від кроку розщеплення та відстані між фазами. Побудувати графічні залежності та зробити висновки. Дальня електропередача в дисципліні «Пакети прикладних програм для електротехнічних розрахунків» перетинається з дисципліною «Регулювання режимів електричних систем-3» у частині електротехнічних розрахунків. Студенти ладні обирати вихідні дані для виконання індивідуального завдання з курсового проекту «Регулювання режимів» або з контрольної роботи «Пакетів прикладних програм».

Тема №2

РЕЖИМ ОДНОБІЧНОГО УВІМКНЕННЯ ДАЛЬНОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Мета роботи: побудова ланцюжкової схеми дальньої електропередачі; вибір місця розташування та кількості груп шунтувальних реакторів; виконання розрахунку режиму роботи ДЕП; визначення режимних параметрів у вузлових точках; моніторинг розподілу напруги вздовж ділянок ліній.

Теоретичні положення

В даному режимі роботи дальня електропередача одним з кінців під'єднується до однієї з двох систем, протилежний кінець передачі відокремлений. Зазвичай, приєднання відбувається до приймальної системи, тобто до тієї системи, куди має бути забезпечено транзит активної потужності у необхідному обсязі. В режимі однобічного увімкнення транзит активної потужності відсутній. Споживання активної потужності має місце – це втрати активної потужності на корону, втрати холостого ходу в автотрансформаторних групах по кінцях ДЕП, втрати холостого ходу в реакторних групах та втрати активної потужності на нагрівання провідників через протікання зарядного ємнісного струму.

Під'єднання ДЕП саме до приймальної системи зазвичай здійснюється через те, що саме на передавальній стороні зосереджуються потужні електростанції і під час синхронізації їх силові агрегати потрібно захистити від можливого короткого замикання додатковим опором лінії. Також наявні генератори забезпечують широкі регульовальні можливості рівнів напруги для під'єднання електропередачі до системи.

Режим однобічного увімкнення є найнесприятливішим за умовами перенапруги. Зарядна потужність, стікаючи із електропередачі в приймальну систему легко спричиняє двократне зростання рівня напруги. Для боротьби із надлишковою зарядною потужністю використовуються шунтувальні реактори, які підключаються по кінцях ДЕП та на усіх перемикальних пунктах, якщо такі є. Напруга зі сторони приймальної системи підтримується на мінімально допустимому рівні.

В даному режимі визначають кількість та місце розташування реакторних груп та слідкують за рівнем напруги вздовж ДЕП з метою дотримання рівнів напруги у допустимих межах $\pm 5\%$.

Практична частина

Продовжується робота з дальньою електропередачею, розпочата з теми №1. Розрахунки виконуються у програмному середовищі MathCAD і в даній роботі ці розрахунки відображаються саме з MathCAD.

Розподіл реакторів для даного режиму: на передавальній стороні $N_{\text{перед}} := 2$, на першому перемикальному пункті $N_{\text{ПП-1}} := 1$, на другому перемикальному пункті $N_{\text{ПП-2}} := 1$. На приймальній стороні реакторні групи відсутні, тому в подальшому не враховуються.

Напруга на приймальній стороні фіксується на мінімально допустимому рівні $U_{\text{II одн ув}} := 0.95 \cdot U_{\text{H}} = 475 \cdot \text{kV}$

Елементи ланцюжкової схеми в режимі однобічного увімкнення:

1 - автотрансформатор на передавальній стороні

$$AT-1 := \begin{pmatrix} A_{AT-1} & B_{AT-1} \cdot \text{Cm} \\ C_{AT-1} \cdot \text{Om} & D_{AT-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.095 + 6.099i \\ 8.316 \times 10^{-6} - 1.984i \times 10^{-5} & 1 + 4.884i \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

2 - реактор на передавальній стороні

$$P_{\text{перед}} := \begin{pmatrix} A_{\text{реак}} & B_{\text{реак}} \cdot \text{Cm} \\ N_{\text{перед}} \cdot C_{\text{реак}} \cdot \text{Om} & D_{\text{реак}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 2.351 \times 10^{-6} - 1.306i \times 10^{-3} & 1 \end{pmatrix}$$

3 - ділянка повітряної лінії

$$Л1 := \begin{pmatrix} A_{\text{ПЛ}} & B_{\text{ПЛ}} \cdot \text{Cm} \\ C_{\text{ПЛ}} \cdot \text{Om} & D_{\text{ПЛ}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.946 + 1.822i \times 10^{-3} & 2.333 + 87.782i \\ 7.746 \times 10^{-6} + 1.187i \times 10^{-3} & 0.946 + 1.822i \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

4 - реактор на перемикальному пункті №1

$$P_{\text{ПП-1}} := \begin{pmatrix} A_{\text{реак}} & B_{\text{реак}} \cdot \text{Cm} \\ N_{\text{ПП-1}} \cdot C_{\text{реак}} \cdot \text{Om} & D_{\text{реак}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1.176 \times 10^{-6} - 6.531i \times 10^{-4} & 1 \end{pmatrix}$$

5 - установка повздовжньої компенсації

$$УПК := \begin{pmatrix} A_{\text{УПК}} & B_{\text{УПК}} \cdot \text{Cm} \\ C_{\text{УПК}} \cdot \text{Om} & A_{\text{УПК}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -54.39i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

6 - ділянка повітряної лінії

$$Л2 := \begin{pmatrix} A_{\text{ПЛ}} & B_{\text{ПЛ}} \cdot \text{Cm} \\ C_{\text{ПЛ}} \cdot \text{Om} & D_{\text{ПЛ}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.946 + 1.822i \times 10^{-3} & 2.333 + 87.782i \\ 7.746 \times 10^{-6} + 1.187i \times 10^{-3} & 0.946 + 1.822i \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

7 - реактор на перемикальному пункті №2

$$P_{\text{ПП-2}} := \begin{pmatrix} A_{\text{реак}} & B_{\text{реак}} \cdot \text{Cm} \\ N_{\text{ПП-2}} \cdot C_{\text{реак}} \cdot \text{Om} & D_{\text{реак}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 1.176 \times 10^{-6} - 6.531i \times 10^{-4} & 1 \end{pmatrix}$$

8 - ділянка повітряної лінії

$$Л3 := \begin{pmatrix} A_{\text{ПЛ}} & B_{\text{ПЛ}} \cdot \text{Cm} \\ C_{\text{ПЛ}} \cdot \text{Om} & D_{\text{ПЛ}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.946 + 1.822i \times 10^{-3} & 2.333 + 87.782i \\ 7.746 \times 10^{-6} + 1.187i \times 10^{-3} & 0.946 + 1.822i \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

9 - автотрансформатор на приймальній стороні

$$AT-2 := \begin{pmatrix} A_{AT-2} & B_{AT-2} \cdot C_M \\ C_{AT-2} \cdot O_M & D_{AT-2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.093 + 5.267i \\ 5.4 \times 10^{-6} - 3.607i \times 10^{-5} & 1 + 2.509i \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Еквівалентний чотириполосник, як результат добутку складових ланцюжкової схеми

$$\begin{pmatrix} A_{одн\ ув} & B_{одн\ ув} \\ C_{одн\ ув} & D_{одн\ ув} \end{pmatrix} := AT-1 \cdot P_{перед} \cdot Л1 \cdot P_{III-1} \cdot УПК \cdot Л2 \cdot P_{III-2} \cdot Л3 \cdot AT-2$$

$$\begin{pmatrix} A_{одн\ ув} & B_{одн\ ув} \\ C_{одн\ ув} & D_{одн\ ув} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.795 + 0.012i & 6.192 + 210.171i \\ 4.423 \times 10^{-5} + 1.018i \times 10^{-3} & 0.989 + 5.221i \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

Переприсвоєння одиниць вимірювання

$$B_{одн\ ув} := B_{одн\ ув} \cdot O_M = (6.192 + 210.171i) \cdot O_M$$

$$C_{одн\ ув} := C_{одн\ ув} \cdot C_M = (4.423 \times 10^{-5} + 1.018i \times 10^{-3}) \cdot C_M$$

перевірка

$$A_{одн\ ув} \cdot D_{одн\ ув} - B_{одн\ ув} \cdot C_{одн\ ув} = 1$$

Струм в кінці ДЕП

$$I_{II\ одн\ ув} := \frac{-C_{одн\ ув} \cdot U_{II\ одн\ ув}}{D_{одн\ ув}} = (-23.816 - 488.516i) \text{ A}$$

Повна потужність в кінці ДЕП

$$S_{II\ одн\ ув} := I_{II\ одн\ ув} \cdot \overline{U_{II\ одн\ ув}} = (-11.312 - 232.045i) \cdot \text{MVA}$$

Втрати потужності

$$\Delta S_{одн\ ув} := 0 - S_{II\ одн\ ув} = (11.312 + 232.045i) \cdot \text{MVA}$$

Напруга та струм на відкритому кінці ДЕП

$$U_{I\ одн\ ув} := A_{одн\ ув} \cdot U_{II\ одн\ ув} + B_{одн\ ув} \cdot I_{II\ одн\ ув} = (480.11 - 2.53i) \cdot \text{kV}$$

$$\text{діюче значення напруги } |U_{I\ одн\ ув}| = 480.11 \cdot \text{kV}$$

$$I_{I\ одн\ ув} := C_{одн\ ув} \cdot U_{II\ одн\ ув} + D_{одн\ ув} \cdot I_{II\ одн\ ув} = 0 \text{ A}$$

Проглядаючи схему від приймальної сторони до передавальної, по черзі розглядається кожний чотириполосник окремо для отримання режимних параметрів.

Параметри перед автотрансформатором приймальної сторони:

$$U_9 := A_{AT-2} \cdot U_{II\ одн\ ув} + B_{AT-2} \cdot I_{II\ одн\ ув} = (477.57 - 0.17i) \cdot \text{kV}$$

$$I_9 := C_{AT-2} \cdot U_{II\ одн\ ув} + D_{AT-2} \cdot I_{II\ одн\ ув} = (-21.24 - 505.74i) \text{ A}$$

у випадку необхідності можна додати значення потужності

$$S_9 := \overline{U_9} \cdot I_9 = (-11.29 - 241.51i) \cdot \text{MVA}$$

В діючих значеннях $|U_9| = 477.57 \cdot \text{kV}$, $|I_9| = 506.256 \text{ A}$

Параметри перед третьою ділянкою лінії

$$U_8 := A_{\text{ПЛ}} \cdot U_9 + B_{\text{ПЛ}} \cdot I_9 = (496.25 - 3.57i) \cdot \text{kV}$$

$$I_8 := C_{\text{ПЛ}} \cdot U_9 + D_{\text{ПЛ}} \cdot I_9 = (-16.81 + 88.21i) \text{ A}$$

$$|U_8| = 496.26 \cdot \text{kV}$$

$$|I_8| = 89.8 \text{ A}$$

Параметри перед реактором на другому перемикальному пункті

$$U_7 := A_{\text{реак}} \cdot U_8 + B_{\text{реак}} \cdot I_8 = (496.25 - 3.57i) \cdot \text{kV}$$

$$I_7 := N_{\text{ПП-2}} \cdot C_{\text{реак}} \cdot U_8 + D_{\text{реак}} \cdot I_8 = (-18.56 - 235.87i) \text{ A}$$

$$|U_7| = 496.26 \cdot \text{kV}$$

$$|I_7| = 236.6 \cdot \text{A}$$

Параметри перед другою ділянкою лінії

$$U_6 := A_{\text{ПЛ}} \cdot U_7 + B_{\text{ПЛ}} \cdot I_7 = (490.29 - 4.33i) \cdot \text{kV}$$

$$I_6 := C_{\text{ПЛ}} \cdot U_7 + D_{\text{ПЛ}} \cdot I_7 = (-8.96 + 365.76i) \text{ A}$$

$$|U_6| = 490.31 \cdot \text{kV}$$

$$|I_6| = 365.87 \cdot \text{A}$$

Параметри перед установкою повздожньої компенсації
на першому перемикальному пункті

$$U_5 := A_{\text{УПК}} \cdot U_6 + B_{\text{УПК}} \cdot I_6 = (510.18 - 3.84i) \cdot \text{kV}$$

$$I_5 := C_{\text{УПК}} \cdot U_6 + D_{\text{УПК}} \cdot I_6 = (-8.96 + 365.76i) \text{ A}$$

$$|U_5| = 510.19 \cdot \text{kV}$$

$$|I_5| = 365.87 \cdot \text{A}$$

Параметри перед реактором на першому перемикальному
пункті

$$U_4 := A_{\text{реак}} \cdot U_5 + B_{\text{реак}} \cdot I_5 = (510.18 - 3.84i) \cdot \text{kV}$$

$$I_4 := N_{\text{ПП-1}} \cdot C_{\text{реак}} \cdot U_5 + D_{\text{реак}} \cdot I_5 = (-10.86 + 32.58i) \text{ A}$$

$$|U_4| = 510.19 \cdot \text{kV}$$

$$|I_4| = 34.34 \cdot \text{A}$$

Параметри перед першою ділянкою лінії

$$U_3 := A_{\text{ПЛ}} \cdot U_4 + B_{\text{ПЛ}} \cdot I_4 = (479.96 - 1.96i) \cdot \text{kV}$$

$$I_3 := C_{\text{ПЛ}} \cdot U_4 + D_{\text{ПЛ}} \cdot I_4 = (-2.52 + 636.43i) \text{ A}$$

$$|U_3| = 479.97 \cdot \text{kV}$$

$$|I_3| = 636.44 \cdot \text{A}$$

Параметри перед реактором на передавальній стороні

$$U_2 := A_{\text{реак}} \cdot U_3 + B_{\text{реак}} \cdot I_3 = (479.96 - 1.96i) \cdot \text{kV}$$

$$I_2 := N_{\text{перед}} \cdot C_{\text{реак}} \cdot U_3 + D_{\text{реак}} \cdot I_3 = (-3.95 + 9.54i) \text{ A}$$

$$|U_2| = 479.97 \cdot \text{kV}$$

$$|I_2| = 10.32 \cdot \text{A}$$

Параметри перед автотрансформатором на передавальній стороні

$$U_1 := A_{\text{АТ-1}} \cdot U_2 + B_{\text{АТ-1}} \cdot I_2 = (479.9 - 1.98i) \cdot \text{kV}$$

$$I_1 := C_{\text{АТ-1}} \cdot U_2 + D_{\text{АТ-1}} \cdot I_2 = 0 \text{ A}$$

$$|U_1| = 479.91 \cdot \text{kV}$$

$$|I_1| = 0 \cdot \text{A}$$

Напруга та струм на передавальній стороні, раніше обчислені через еквівалентний чотирьохполюсник ДЕП. Як видно, результати співпадають, розрахунок правильний.

$$U_{\text{I одн ув}} = (479.9 - 1.98i) \text{ kV}$$

$$I_{\text{I одн ув}} = 0 \text{ A}$$

Індивідуальне завдання

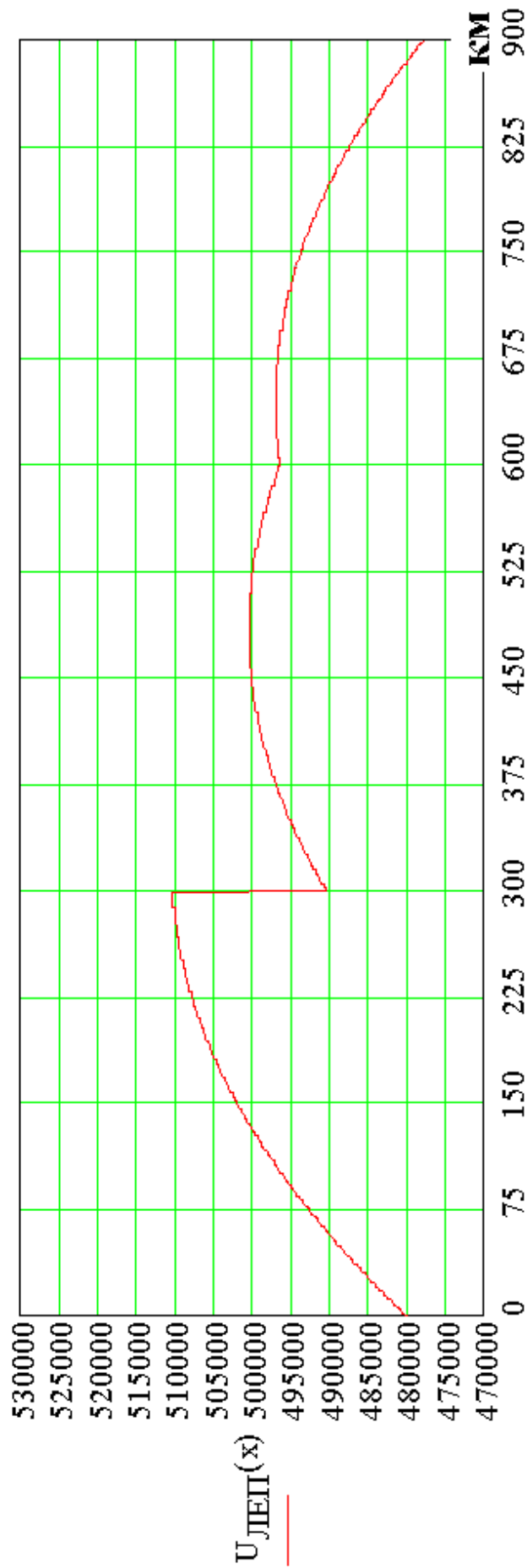
Побудувати ланцюжкову схему дальньої електропередачі. Розрахувати режим роботи ДЕП. Побудувати та навести графіки розподілу напруги вздовж ділянок ліній та величину сумарних втрат потужності для усіх можливих варіантів розташування шунтувальних реакторів вздовж ДЕП. Потрібно представити мінімум чотири варіанти розташування груп реакторів.

Дальня електропередача в дисципліні «Пакети прикладних програм для електротехнічних розрахунків» перетинається з дисципліною «Регулювання режимів електричних систем-3» у частині електротехнічних розрахунків. Студенти ладні обирати вихідні дані для виконання індивідуального завдання з курсового проекту «Регулювання режимів» або з контрольної роботи «Пакетів прикладних програм».

Побудова графіку розподілу напруги вздовж лінії. Довжина лінії 900 км і прийнято по три рівні відрізки

$x := 0..900$

$$U_{\text{ЛІНІЯ}}(x) := \begin{cases} |U_3 \cdot \cosh(\gamma_0 \cdot x \cdot \text{km}) - Z_0 \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot x \cdot \text{km}) \cdot I_3| & \text{if } 0 \leq x \leq 300 \\ |U_6 \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (x - 300) \cdot \text{km}] - Z_0 \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (x - 300) \cdot \text{km}] \cdot I_6| & \text{if } 300 \leq x \leq 600 \\ |U_8 \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (x - 600) \cdot \text{km}] - Z_0 \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (x - 600) \cdot \text{km}] \cdot I_8| & \text{if } 600 \leq x \leq 900 \end{cases}$$



Тема №3

РЕЖИМ НЕНАВАНТАЖЕНОЇ ЛІНІЇ

Мета роботи: забезпечення фіксації напруги на бажаному рівні по кінцях дальньої електропередачі; оптимізація кількості шунтувальних реакторів; виконання розрахунку режиму роботи ДЕП; визначення режимних параметрів у вузлових точках; моніторинг розподілу напруги вздовж ділянок ліній.

Теоретичні положення

В даному режимі роботи дальня електропередача під'єднана до двох систем: до передавальної і приймальної. Транзит активної потужності відсутній, проте має місце споживання активної потужності через корону, холостий хід в автотрансформаторних групах по кінцях ДЕП, холостий хід в реакторних групах та втрати активної потужності на нагрівання провідників через протікання зарядного ємнісного струму.

Даний режим більш сприятливий за умовами перенапруги, в порівнянні із режимом однобічного увімкнення, оскільки зарядна потужність стікає вже в дві системи. Тим не менш, є надлишок зарядної потужності, стікання якої викликає підвищення рівня напруги в ДЕП, і для боротьби із цим продовжують використовуватися шунтувальні реактори, які підключаються по кінцях ДЕП та на усіх перемикальних пунктах, якщо такі є. Напруга зі сторони приймальної системи підтримується на тому ж рівні, що був в режимі однобічного увімкнення. Напругу зі сторони передавальної системи варто підтримувати також на мінімально допустимому рівні.

В даному режимі слідкують за рівнем напруги вздовж ДЕП з метою дотримання рівнів напруги у допустимих межах $\pm 5\%$.

Практична частина

Продовжується робота з дальньою електропередачею з тем №1 та №2. Розрахунки виконуються у програмному середовищі MathCAD і в даній роботі ці розрахунки відображаються саме з MathCAD.

Розподіл реакторів для даного режиму: на передавальній стороні $N_{\text{перед}} = 2$, на першому перемикальному пункті $N_{\text{ПП-1}} = 1$, на другому перемикальному пункті $N_{\text{ПП-2}} = 1$. На приймальній стороні реакторні групи відсутні, і в подальшому їх поява не передбачається.

Напруга на приймальній стороні фіксується на мінімально допустимому рівні $U_{\text{П н.л.}} := 0.95 \cdot U_{\text{Н}} = 475 \cdot \text{кВ}$, напруга на передавальній стороні має такий самий мінімальний рівень $U_{\text{І н.л.}} := 0.95 \cdot U_{\text{Н}} = 475 \cdot \text{кВ}$, транзит активної потужності відсутній $P_{\text{П н.л.}} := 0 \cdot \text{МВт}$.

Ланцюжкова схема залишається з режиму однобічного увімкнення, має ті ж самі компоненти та значення сталих чотириполюсника. Для наочності сталі чотириполюсника в режимі ненавантаженої лінії підписано відповідним чином.

$$\begin{pmatrix} A_{\text{екв н.л.}} & B_{\text{екв н.л.}} \\ C_{\text{екв н.л.}} & D_{\text{екв н.л.}} \end{pmatrix} := AT-1 \cdot P_{\text{перед}} \cdot L1 \cdot P_{\text{III-1}} \cdot UPK \cdot L2 \cdot P_{\text{III-2}} \cdot L3 \cdot AT-2$$

$$\begin{pmatrix} A_{\text{екв н.л.}} & B_{\text{екв н.л.}} \\ C_{\text{екв н.л.}} & D_{\text{екв н.л.}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.795 + 0.027i & 18.772 + 210.33i \\ 5.081 \times 10^{-5} + 1.018i \times 10^{-3} & 0.99 + 4.084i \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{екв н.л.}} := V_{\text{екв н.л.}} \cdot Om = (18.77 + 210.33i) \cdot Om$$

$$C_{\text{екв н.л.}} := C_{\text{екв н.л.}} \cdot Cm = (5.081 \times 10^{-5} + 1.018i \times 10^{-3}) \cdot Cm$$

$$A_{\text{екв н.л.}} \cdot D_{\text{екв н.л.}} - B_{\text{екв н.л.}} \cdot C_{\text{екв н.л.}} = 1$$

Струм в кінці ДЕП

розв'язок квадратного рівняння з двома коренями, двома значеннями супровідної реактивної потужності, яка виконує фіксацію рівнів напруги по кінцях ДЕП

$$Q'_{\text{II н.л.}} := \frac{-\text{Im}(A_{\text{екв н.л.}} \cdot \overline{B_{\text{екв н.л.}}})}{(|B_{\text{екв н.л.}}|)^2} \cdot U_{\text{II н.л.}}^2 + \sqrt{\left(\frac{U_{\text{I н.л.}} \cdot U_{\text{II н.л.}}}{|B_{\text{екв н.л.}}|}\right)^2 - \left[P_{\text{II н.л.}} + \frac{\text{Re}(A_{\text{екв н.л.}} \cdot \overline{B_{\text{екв н.л.}}})}{(|B_{\text{екв н.л.}}|)^2} \cdot U_{\text{II н.л.}}^2\right]^2} = 1907 \cdot \text{MVAp}$$

$$Q''_{\text{II н.л.}} := \frac{-\text{Im}(A_{\text{екв н.л.}} \cdot \overline{B_{\text{екв н.л.}}})}{(|B_{\text{екв н.л.}}|)^2} \cdot U_{\text{II н.л.}}^2 - \sqrt{\left(\frac{U_{\text{I н.л.}} \cdot U_{\text{II н.л.}}}{|B_{\text{екв н.л.}}|}\right)^2 - \left[P_{\text{II н.л.}} + \frac{\text{Re}(A_{\text{екв н.л.}} \cdot \overline{B_{\text{екв н.л.}}})}{(|B_{\text{екв н.л.}}|)^2} \cdot U_{\text{II н.л.}}^2\right]^2} = -219.79 \cdot \text{MVAp}$$

для обрання найменшого з коренів буде написано невеличку програму

$$Q_{\text{II н.л.}} := \begin{cases} Q'_{\text{II н.л.}} & \text{if } |Q'_{\text{II н.л.}}| < |Q''_{\text{II н.л.}}| \\ Q''_{\text{II н.л.}} & \text{otherwise} \end{cases} = -219.79 \cdot \text{MVAp}$$

тепер струм в кінці ДЕП

$$I_{\text{II н.л.}} := \frac{P_{\text{II н.л.}} + i \cdot Q_{\text{II н.л.}}}{U_{\text{II н.л.}}} = -462.72i \text{ A}$$

Повна потужність в кінці ДЕП

$$S_{\text{П н.л.}} := I_{\text{П н.л.}} \cdot U_{\text{П н.л.}} = -219.79i \cdot \text{МВА}$$

Напруга та струм на передавальній стороні

$$U_{\text{І н.л.}} := A_{\text{екв н.л.}} \cdot U_{\text{П н.л.}} + B_{\text{екв н.л.}} \cdot I_{\text{П н.л.}} = (474.98 + 4.06i) \cdot \text{кВ}$$

$$I_{\text{І н.л.}} := C_{\text{екв н.л.}} \cdot U_{\text{П н.л.}} + D_{\text{екв н.л.}} \cdot I_{\text{П н.л.}} = (26.023 + 25.595i) \text{ А}$$

абсолютні величини струму та напруги $|U_{\text{І н.л.}}| = 475 \cdot \text{кВ}$,

$$|I_{\text{І н.л.}}| = 36.5 \text{ А}$$

Повна потужність на початку

$$S_{\text{І н.л.}} := I_{\text{І н.л.}} \cdot U_{\text{І н.л.}} = (12.464 + 12.052i) \cdot \text{МВА}$$

Втрати потужності

$$\Delta S_{\text{н.л.}} := S_{\text{І н.л.}} - S_{\text{П н.л.}} = (12.46 + 231.84i) \cdot \text{МВА}$$

Проглядаючи схему від приймальної сторони до передавальної, по черзі розглядається кожний чотириполюсник окремо для отримання режимних параметрів.

Параметри перед автотрансформатором приймальної сторони:

$$U_9 := A_{\text{АТ-2}} \cdot U_{\text{П н.л.}} + B_{\text{АТ-2}} \cdot I_{\text{П н.л.}} = (477.44 - 0.04i) \cdot \text{кВ}$$

$$I_9 := C_{\text{АТ-2}} \cdot U_{\text{П н.л.}} + D_{\text{АТ-2}} \cdot I_{\text{П н.л.}} = (2.58 - 479.94i) \text{ А}$$

Параметри перед третьою ділянкою лінії

$$U_8 := A_{\text{ІІІ}} \cdot U_9 + B_{\text{ІІІ}} \cdot I_9 = (494.04 - 0.94i) \cdot \text{кВ}$$

$$I_8 := C_{\text{ІІІ}} \cdot U_9 + D_{\text{ІІІ}} \cdot I_9 = (7.89 + 112.55i) \text{ А}$$

$$|U_8| = 494.04 \cdot \text{кВ}$$

$$|I_8| = 112.83 \text{ А}$$

Параметри перед реактором на другому перемикальному пункті

$$U_7 := A_{\text{реак}} \cdot U_8 + B_{\text{реак}} \cdot I_8 = (494.04 - 0.94i) \cdot \text{кВ}$$

$$I_7 := N_{\text{ІІІ-2}} \cdot C_{\text{реак}} \cdot U_8 + D_{\text{реак}} \cdot I_8 = (7.86 - 210.09i) \text{ А}$$

$$|U_7| = 494.04 \cdot \text{кВ}$$

$$|I_7| = 210.23 \cdot \text{А}$$

Параметри перед другою ділянкою лінії

$$U_6 := A_{\text{ІІІ}} \cdot U_7 + B_{\text{ІІІ}} \cdot I_7 = (486.11 + 0.65i) \cdot \text{кВ}$$

$$I_6 := C_{\text{ІІІ}} \cdot U_7 + D_{\text{ІІІ}} \cdot I_7 = (12.79 + 387.7i) \text{ А}$$

$$|U_6| = 486.11 \cdot \text{кВ}$$

$$|I_6| = 387.91 \cdot \text{А}$$

Параметри перед установкою повздовжньої компенсації на першому перемикальному пункті

$$\underline{U}_5 := A_{\text{УПК}} \cdot U_6 + B_{\text{УПК}} \cdot I_6 = (507.2 - 0.04i) \cdot \text{кВ}$$

$$\underline{I}_5 := C_{\text{УПК}} \cdot U_6 + D_{\text{УПК}} \cdot I_6 = (12.79 + 387.7i) \text{ А}$$

$$|U_5| = 507.2 \cdot \text{кВ}$$

$$|I_5| = 387.91 \cdot \text{А}$$

Параметри перед реактором на першому перемикальному пункті

$$\underline{U}_4 := A_{\text{реак}} \cdot U_5 + B_{\text{реак}} \cdot I_5 = (507.2 - 0.04i) \cdot \text{кВ}$$

$$\underline{I}_4 := N_{\text{ПП-1}} \cdot C_{\text{реак}} \cdot U_5 + D_{\text{реак}} \cdot I_5 = (13.36 + 56.47i) \text{ А}$$

$$|U_4| = 507.2 \cdot \text{кВ}$$

$$|I_4| = 58.02 \cdot \text{А}$$

Параметри перед першою ділянкою лінії

$$\underline{U}_3 := A_{\text{ПЛ}} \cdot U_4 + B_{\text{ПЛ}} \cdot I_4 = (475.19 + 3.92i) \cdot \text{кВ}$$

$$\underline{I}_3 := C_{\text{ПЛ}} \cdot U_4 + D_{\text{ПЛ}} \cdot I_4 = (15.76 + 655.64i) \text{ А}$$

$$|U_3| = 475.21 \cdot \text{кВ}$$

$$|I_3| = 655.83 \cdot \text{А}$$

Параметри перед реактором на передавальній стороні

$$\underline{U}_2 := A_{\text{реак}} \cdot U_3 + B_{\text{реак}} \cdot I_3 = (475.19 + 3.92i) \cdot \text{кВ}$$

$$\underline{I}_2 := N_{\text{перед}} \cdot C_{\text{реак}} \cdot U_3 + D_{\text{реак}} \cdot I_3 = (21.99 + 34.98i) \text{ А}$$

$$|U_2| = 475.21 \cdot \text{кВ}$$

$$|I_2| = 41.32 \cdot \text{А}$$

Параметри перед автотрансформатором на передавальній стороні

$$\underline{U}_1 := A_{\text{АТ-1}} \cdot U_2 + B_{\text{АТ-1}} \cdot I_2 = (474.98 + 4.06i) \cdot \text{кВ}$$

$$\underline{I}_1 := C_{\text{АТ-1}} \cdot U_2 + D_{\text{АТ-1}} \cdot I_2 = (26.02 + 25.59i) \text{ А}$$

$$|U_1| = 475 \cdot \text{кВ}$$

$$|I_1| = 36.5 \cdot \text{А}$$

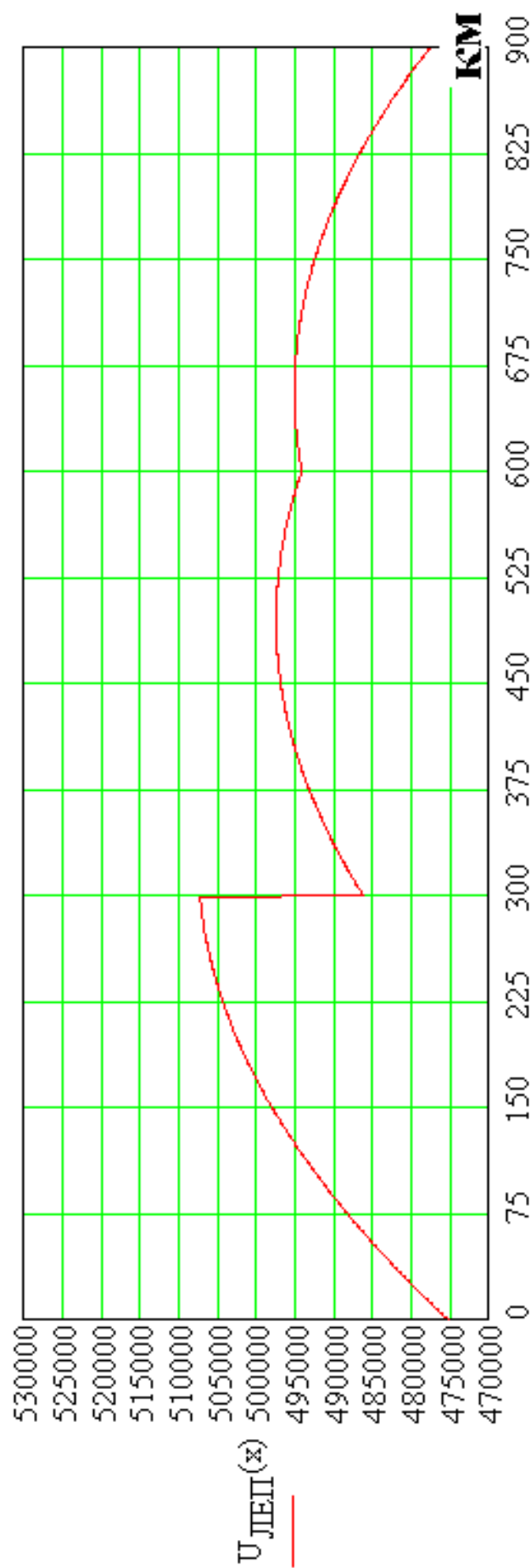
Напруга та струм на передавальній стороні, раніше обчислені через еквівалентний чотириполюсник ДСП. Як видно, результати співпадають, розрахунок правильний.

$$U_{\text{І н. л.}} = (474.98 + 4.06i) \cdot \text{кВ}$$

$$I_{\text{І н. л.}} = (26.02 + 25.59i) \text{ А}$$

Графік розподілу напруги вздовж трьох ділянок ліній

$$U_{\text{ЛЕП}}(x) := \begin{cases} |U_3 \cdot \cosh(\gamma_0 \cdot x \cdot \text{km}) - Z_0 \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot x \cdot \text{km}) \cdot I_3| & \text{if } 0 \leq x \leq 300 \\ |U_6 \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (x - 300) \cdot \text{km}] - Z_0 \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (x - 300) \cdot \text{km}] \cdot I_6| & \text{if } 300 \leq x \leq 600 \\ |U_8 \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (x - 600) \cdot \text{km}] - Z_0 \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (x - 600) \cdot \text{km}] \cdot I_8| & \text{if } 600 \leq x \leq 900 \end{cases}$$



Індивідуальне завдання

Розрахувати режим роботи ДЕП. Побудувати та навести графіки розподілу напруги вздовж ділянок ліній та величину сумарних втрат потужності при зміні рівня напруги на приймальній стороні від 95 % до 105 % номінальної з кроком 2,5 %. Okремо навести графік розподілу напруги, отриманий за результатом розрахунку режиму ненавантаженої лінії. Напруга на приймальній стороні залишається незмінною і на рівні, прийнятому в режимі однобічного увімкнення.

Дальня електропередача в дисципліні «Пакети прикладних програм для електротехнічних розрахунків» перетинається з дисципліною «Регулювання режимів електричних систем-3» у частині електротехнічних розрахунків. Студенти ладні обирати вихідні дані для виконання індивідуального завдання з курсового проекту «Регулювання режимів» або з контрольної роботи «Пакетів прикладних програм».

Тема №4

РЕЖИМ МАКСИМАЛЬНОГО НАВАНТАЖЕННЯ

Мета роботи: забезпечення фіксації напруги на бажаному рівні по кінцях дальньої електропередачі; визначення кількості комутованих шунтувальних реакторів; виконання розрахунку режиму роботи ДЕП; визначення режимних параметрів у вузлових точках; моніторинг розподілу напруги вздовж ділянок ліній.

Теоретичні положення

В даному режимі роботи дальня електропередача під'єднана до двох систем: до передавальної і приймальної, транзит активної потужності має бути забезпечений в повному обсязі.

Зростання втрат реактивної потужності в ДЕП, викликане протіканням струму навантаження, призводить до зменшення рівнів напруги, що додатково погіршується підключеними наявними реакторними групами. Частина реакторних груп, а то й усі реакторні групи, має бути вимкнено, і таким чином робиться висновок щодо кількості комутованих реакторних груп. Напруги по кінцях ДЕП піднімають до номінального рівня; традиційно, бажано прийняти рівень напруги на передавальній стороні більшим у порівнянні з рівнем на приймальній стороні з метою зменшення втрат активної потужності.

Також в цьому режимі спливає висновок про необхідність застосування установки повздовжньої компенсації, розрахунок параметрів якої вже здійснювався. Необхідність в УПК впливає з комплексно спряжених коренів розв'язку квадратичного рівняння визначення величини реактивної потужності, що супроводжує транзит активної потужності та виконує фіксацію рівнів напруги по кінцях ДЕП.

Вимоги до рівня напруги електропередачі надвисоких та ультра високих класів напруги є досить жорсткими, потрібно слідкувати за дотриманням перебування рівня напруги ДЕП в межах $\pm 5\%$ від номінального рівня.

Практична частина

Продовжується робота з дальньою електропередачею за темами №№ 1 – 3. Розрахунки виконуються у програмному середовищі MathCAD і в даній роботі ці розрахунки відображаються саме з MathCAD.

В даному режимі усі реакторні групи вимкнено і в ланцюжковій схемі не наводяться. Таким чином усі реакторні групи є комутованими

Напруга на приймальній стороні фіксується на рівні $U_{\Pi} := U_{\text{H}} = 500 \cdot \text{кВ}$, тобто на номінальному, напруга на передавальній стороні становить 102 % номінальної $U_{\Gamma} := 1.02 \cdot U_{\text{H}} = 510 \cdot \text{кВ}$, транзит активної потужності

забезпечується у повному обсязі $P_{\Pi} = 1000 \text{ МВт}$

Елементи ланцюжкової схеми в режимі максимального навантаження:

1 - автотрансформатор на передавальній стороні

$$AT-1 := \begin{pmatrix} A_{AT-1} & B_{AT-1} \cdot C_{\text{м}} \\ C_{AT-1} \cdot \text{Ом} & D_{AT-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.095 + 6.099i \\ 8.316 \times 10^{-6} - 1.984i \times 10^{-5} & 1 + 4.884i \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

2 - ділянка повітряної лінії

$$Л1 := \begin{pmatrix} A_{Л1} & B_{Л1} \cdot C_{\text{м}} \\ C_{Л1} \cdot \text{Ом} & D_{Л1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.946 + 4.708i \times 10^{-3} & 7.02 + 87.793i \\ 6.575 \times 10^{-6} + 1.187i \times 10^{-3} & 0.946 + 4.708i \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

3 - установка повздовжньої компенсації

$$УПК := \begin{pmatrix} A_{УПК} & B_{УПК} \cdot C_{\text{м}} \\ C_{УПК} \cdot \text{Ом} & A_{УПК} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & -54.39i \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$$

4 - ділянка повітряної лінії

$$Л2 := \begin{pmatrix} A_{Л2} & B_{Л2} \cdot C_{\text{м}} \\ C_{Л2} \cdot \text{Ом} & D_{Л2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.946 + 4.708i \times 10^{-3} & 7.02 + 87.793i \\ 6.575 \times 10^{-6} + 1.187i \times 10^{-3} & 0.946 + 4.708i \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

5 - ділянка повітряної лінії

$$Л3 := \begin{pmatrix} A_{Л3} & B_{Л3} \cdot C_{\text{м}} \\ C_{Л3} \cdot \text{Ом} & D_{Л3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.946 + 4.708i \times 10^{-3} & 7.02 + 87.793i \\ 6.575 \times 10^{-6} + 1.187i \times 10^{-3} & 0.946 + 4.708i \times 10^{-3} \end{pmatrix}$$

6 - автотрансформатор на приймальній стороні

$$AT-2 := \begin{pmatrix} A_{AT-2} & B_{AT-2} \cdot C_{\text{м}} \\ C_{AT-2} \cdot \text{Ом} & D_{AT-2} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0.093 + 5.267i \\ 5.4 \times 10^{-6} - 3.607i \times 10^{-5} & 1 + 2.509i \times 10^{-5} \end{pmatrix}$$

Еквівалентний чотириполюсник

$$\begin{pmatrix} A_{\text{макс}} & B_{\text{макс}} \\ C_{\text{макс}} & D_{\text{макс}} \end{pmatrix} := AT-1 \cdot Л1 \cdot УПК \cdot Л2 \cdot Л3 \cdot AT-2$$

$$\begin{pmatrix} A_{\text{макс}} & B_{\text{макс}} \\ C_{\text{макс}} & D_{\text{макс}} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.655 + 0.038i & 15.818 + 193.43i \\ -1.365 \times 10^{-5} + 3.178i \times 10^{-3} & 0.59 + 0.039i \end{pmatrix}$$

$$B_{\text{макс}} := B_{\text{макс}} \cdot \text{Ом} = (15.818 + 193.43i) \cdot \text{Ом}$$

$$C_{\text{макс}} := C_{\text{макс}} \cdot C_{\text{м}} = (-1.365 \times 10^{-5} + 3.178i \times 10^{-3}) \cdot C_{\text{м}}$$

$$A_{\text{макс}} \cdot D_{\text{макс}} - B_{\text{макс}} \cdot C_{\text{макс}} = 1$$

Струм в кінці ДЕП

супровідна реактивна потужність, яка виконує фіксацію рівнів напруги по кінцях ДЕП

$$Q'_{II} := \frac{-\text{Im}(A_{\text{макс}} \cdot \overline{B_{\text{макс}}})}{(|B_{\text{макс}}|)^2} \cdot U_{II}^2 + \sqrt{\left(\frac{U_I \cdot U_{II}}{|B_{\text{макс}}|}\right)^2 - \left[P_{II} + \frac{\text{Re}(A_{\text{макс}} \cdot \overline{B_{\text{макс}}})}{(|B_{\text{макс}}|)^2} \cdot U_{II}^2\right]^2} = 1528.74 \cdot \text{МВАр}$$

$$Q''_{II} := \frac{-\text{Im}(A_{\text{макс}} \cdot \overline{B_{\text{макс}}})}{(|B_{\text{макс}}|)^2} \cdot U_{II}^2 - \sqrt{\left(\frac{U_I \cdot U_{II}}{|B_{\text{макс}}|}\right)^2 - \left[P_{II} + \frac{\text{Re}(A_{\text{макс}} \cdot \overline{B_{\text{макс}}})}{(|B_{\text{макс}}|)^2} \cdot U_{II}^2\right]^2} = 145.1 \cdot \text{МВАр}$$

для обрання найменшого з коренів буде написано невеличку програму

$$Q_{II} := \begin{cases} Q'_{II} & \text{if } |Q'_{II}| < |Q''_{II}| \\ Q''_{II} & \text{otherwise} \end{cases} = 145.1 \cdot \text{МВАр}$$

тепер струм на початку ДЕП

$$I_{II} := \frac{P_{II} + i \cdot Q_{II}}{U_{II}} = (2000 + 290.2i) \text{ A}$$

Повна потужність в кінці ДЕП

$$S_{II} := I_{II} \cdot \overline{U_{II}} = (1000 + 145.1i) \cdot \text{МВА}$$

Напруга та струм на передавальній стороні

$$U_I := A_{\text{макс}} \cdot U_{II} + B_{\text{макс}} \cdot I_{II} = (302.98 + 410.25i) \cdot \text{кВ}$$

$$I_I := C_{\text{макс}} \cdot U_{II} + D_{\text{макс}} \cdot I_{II} = (1162.28 + 1837.91i) \text{ A}$$

абсолютні величини струму та напруги $|U_I| = 510 \cdot \text{кВ}$, $|I_I| = 2174.58 \text{ A}$

Повна потужність на початку

$$S_I := I_I \cdot \overline{U_I} = (1106.15 + 80.02i) \cdot \text{МВА}$$

Втрати потужності

$$\Delta S_{\text{макс}} := S_I - S_{II} = (106.15 - 65.08i) \cdot \text{МВА}$$

Проглядаючи схему від приймальної сторони до передавальної, по черзі розглядається кожний чотириполосник окремо для отримання режимних параметрів.

Параметри перед автотрансформатором приймальної сторони:

$$U_6 := A_{\text{АТ-2}} \cdot U_{II} + B_{\text{АТ-2}} \cdot I_{II} = (498.66 + 10.56i) \cdot \text{кВ}$$

$$I_6 := C_{\text{АТ-2}} \cdot U_{II} + D_{\text{АТ-2}} \cdot I_{II} = (2 \times 10^3 + 272.26i) \text{ A}$$

у випадку необхідності можна додати значення потужності

$$S_6 := U_6 \cdot I_6 = (1001.72 + 114.61i) \cdot \text{МВА}$$

В діючих значеннях $|U_6| = 498.77 \cdot \text{кВ}$, $|I_6| = 2021.49 \text{ A}$

Параметри перед третьою ділянкою лінії

$$\underline{U}_5 := A_{\text{ПЛ}} \cdot U_6 + B_{\text{ПЛ}} \cdot I_6 = (462.08 + 190.11i) \cdot \text{kV}$$

$$\underline{I}_5 := C_{\text{ПЛ}} \cdot U_6 + D_{\text{ПЛ}} \cdot I_6 = (1885.35 + 859.19i) \text{ A}$$

$$|U_5| = 499.66 \cdot \text{kV}$$

$$|I_5| = 2071.89 \text{ A}$$

Параметри перед другою ділянкою лінії

$$\underline{U}_4 := A_{\text{ПЛ}} \cdot U_5 + B_{\text{ПЛ}} \cdot I_5 = (374.27 + 353.66i) \cdot \text{kV}$$

$$\underline{I}_4 := C_{\text{ПЛ}} \cdot U_5 + D_{\text{ПЛ}} \cdot I_5 = (1557.76 + 1371.91i) \text{ A}$$

$$|U_4| = 514.93 \cdot \text{kV}$$

$$|I_4| = 2075.75 \cdot \text{A}$$

Параметри перед установкою повздовжньої компенсації на першому перемикальному пункті

$$\underline{U}_3 := A_{\text{УПК}} \cdot U_4 + B_{\text{УПК}} \cdot I_4 = (448.89 + 268.94i) \cdot \text{kV}$$

$$\underline{I}_3 := C_{\text{УПК}} \cdot U_4 + D_{\text{УПК}} \cdot I_4 = (1557.76 + 1371.91i) \text{ A}$$

$$|U_3| = 523.28 \cdot \text{kV}$$

$$|I_3| = 2075.75 \cdot \text{A}$$

Параметри перед першою ділянкою лінії

$$\underline{U}_2 := A_{\text{ПЛ}} \cdot U_3 + B_{\text{ПЛ}} \cdot I_3 = (314.09 + 403.05i) \cdot \text{kV}$$

$$\underline{I}_2 := C_{\text{ПЛ}} \cdot U_3 + D_{\text{ПЛ}} \cdot I_3 = (1151.62 + 1840.5i) \text{ A}$$

$$|U_2| = 510.98 \cdot \text{kV}$$

$$|I_2| = 2171.1 \cdot \text{A}$$

Параметри перед автотрансформатором на передавальній стороні

$$\underline{U}_1 := A_{\text{АТ-1}} \cdot U_2 + B_{\text{АТ-1}} \cdot I_2 = (302.98 + 410.25i) \cdot \text{kV}$$

$$\underline{I}_1 := C_{\text{АТ-1}} \cdot U_2 + D_{\text{АТ-1}} \cdot I_2 = (1162.28 + 1837.91i) \text{ A}$$

$$|U_1| = 510 \cdot \text{kV}$$

$$|I_1| = 2174.58 \cdot \text{A}$$

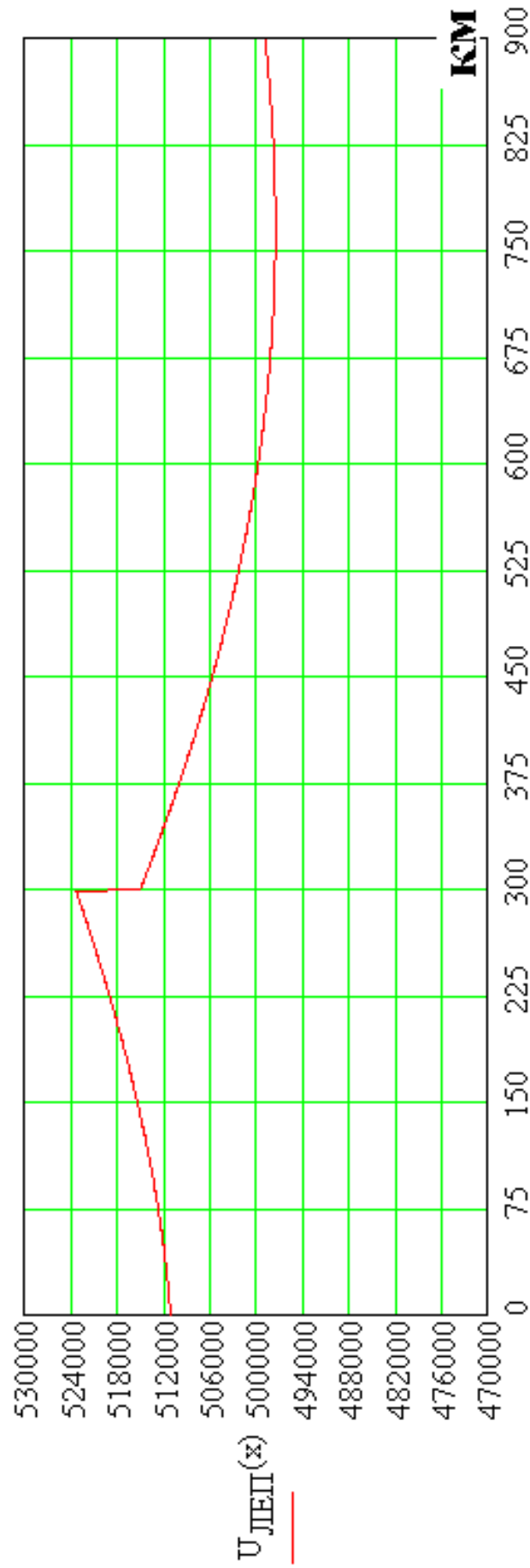
Напруга та струм на передавальній стороні, раніше обчислені через еквівалентний чотириполюсник ДСП. Як видно, результати співпадають, розрахунок правильний.

$$U_{\text{I}} = (302.98 + 410.25i) \cdot \text{kV}$$

$$I_{\text{I}} = (1162.28 + 1837.91i) \text{ A}$$

Графік розподілу напруг вздовж ділянок ліній

$$U_{\text{ЛЕП}}(x) := \begin{cases} |U_2 \cdot \cosh(\gamma_0 \cdot x \cdot \text{km}) - Z_0 \cdot \sinh(\gamma_0 \cdot x \cdot \text{km}) \cdot I_2| & \text{if } 0 \leq x \leq 300 \\ |U_4 \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (x - 300) \cdot \text{km}] - Z_0 \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (x - 300) \cdot \text{km}] \cdot I_4| & \text{if } 300 \leq x \leq 600 \\ |U_5 \cdot \cosh[\gamma_0 \cdot (x - 600) \cdot \text{km}] - Z_0 \cdot \sinh[\gamma_0 \cdot (x - 600) \cdot \text{km}] \cdot I_5| & \text{if } 600 \leq x \leq 900 \end{cases}$$



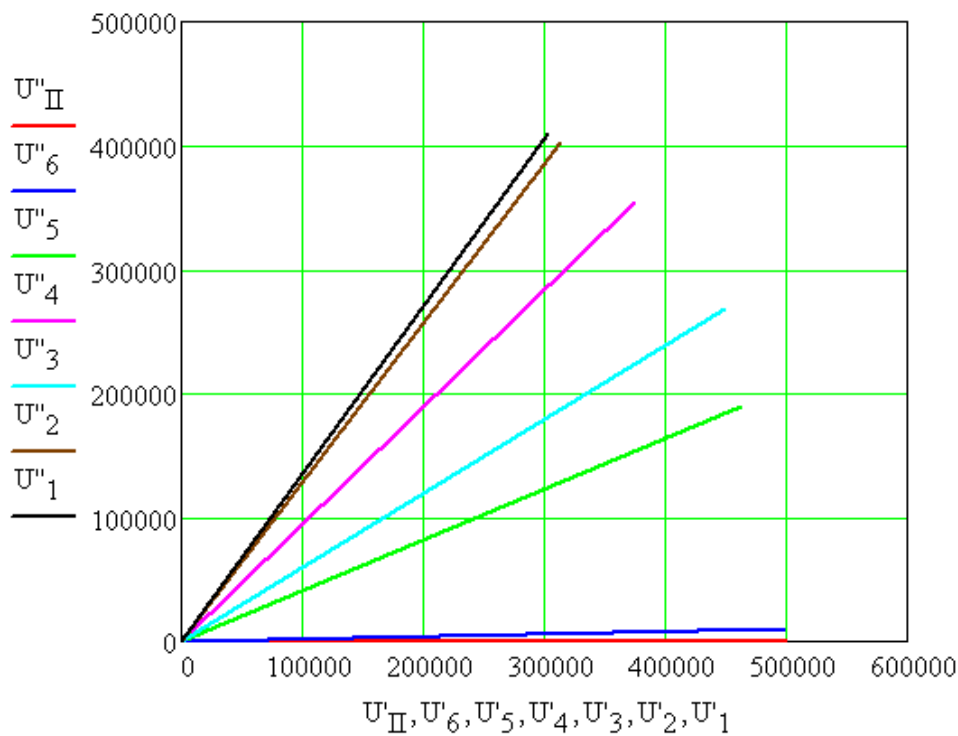
Розрахунок режиму максимальних навантажень буде завершено побудовою векторних діаграм стумів та напруг, значення яких було отримано у вузлових точках дальньої електропередачі.

Для напруги:

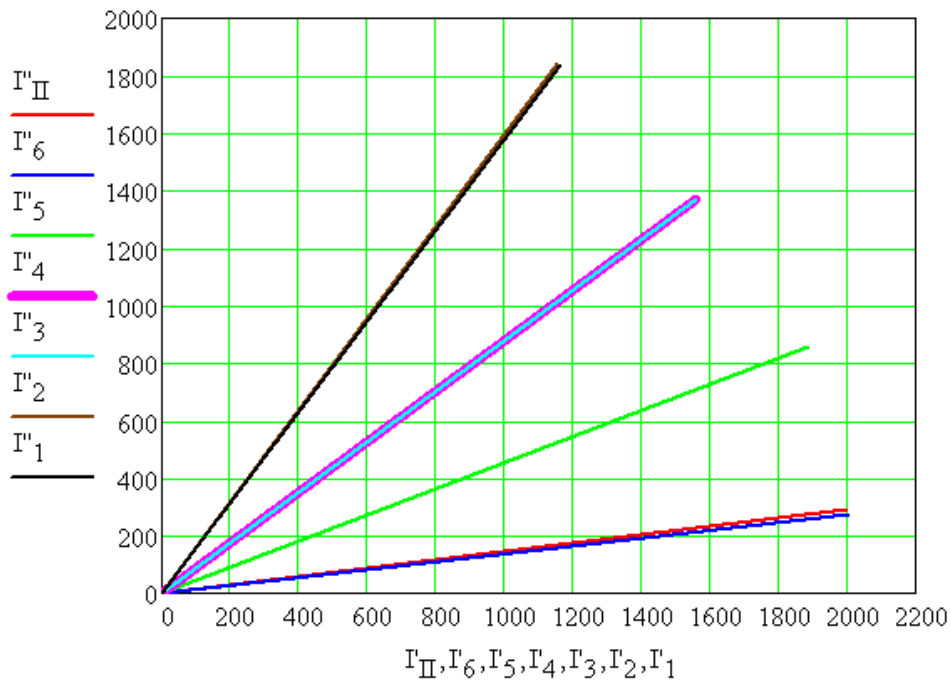
$$\begin{aligned}
 U'_{II} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(U_{II}) \end{pmatrix}, & U''_{II} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(U_{II}) \end{pmatrix} \\
 U'_6 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(U_6) \end{pmatrix}, & U''_6 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(U_6) \end{pmatrix} \\
 U'_5 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(U_5) \end{pmatrix}, & U''_5 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(U_5) \end{pmatrix} \\
 U'_4 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(U_4) \end{pmatrix}, & U''_4 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(U_4) \end{pmatrix} \\
 U'_3 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(U_3) \end{pmatrix}, & U''_3 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(U_3) \end{pmatrix} \\
 U'_2 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(U_2) \end{pmatrix}, & U''_2 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(U_2) \end{pmatrix} \\
 U'_1 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(U_1) \end{pmatrix}, & U''_1 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(U_1) \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$

Для струмів

$$\begin{aligned}
 I'_{II} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(I_{II}) \end{pmatrix}, & I''_{II} &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(I_{II}) \end{pmatrix} \\
 I'_6 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(I_6) \end{pmatrix}, & I''_6 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(I_6) \end{pmatrix} \\
 I'_5 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(I_5) \end{pmatrix}, & I''_5 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(I_5) \end{pmatrix} \\
 I'_4 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(I_4) \end{pmatrix}, & I''_4 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(I_4) \end{pmatrix} \\
 I'_3 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(I_3) \end{pmatrix}, & I''_3 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(I_3) \end{pmatrix} \\
 I'_2 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(I_2) \end{pmatrix}, & I''_2 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(I_2) \end{pmatrix} \\
 I'_1 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Re}(I_1) \end{pmatrix}, & I''_1 &:= \begin{pmatrix} 0 \\ \operatorname{Im}(I_1) \end{pmatrix}
 \end{aligned}$$



Векторна діаграма напруг у вузлових точках ДЕП



Векторна діаграма струмів у вузлових точках ДЕП

Індивідуальне завдання

Розрахувати режим роботи ДЕП. Зробити висновок щодо кількості комутованих реакторних груп. Побудувати та навести графіки розподілу напруги вздовж ділянок ліній та величину сумарних втрат потужності при зміні рівнів напруги на передавальній та приймальній сторонах від 95 % до 105 % номінальної з кроком 5 %. Окремо навести графік розподілу напруги, отриманий за результатом розрахунку режиму максимальних навантажень.

Дальня електропередача в дисципліні «Пакети прикладних програм для електротехнічних розрахунків» перетинається з дисципліною «Регулювання режимів електричних систем-3» у частині електротехнічних розрахунків. Студенти ладні обирати вихідні дані для виконання індивідуального завдання з курсового проекту «Регулювання режимів» або з контрольної роботи «Пакетів прикладних програм».

Тема №5

ПОБУДОВА КРУГОВОЇ ДІАГРАМИ ТА РОБОЧИХ ХАРАКТЕРИСТИК

Мета роботи: здійснювати розрахунок режиму роботи дальньої електропередачі графоаналітичним методом; побудова алгоритму розрахунку режиму роботи ДЕП при зміні об'єму транзиту активної потужності, зміні складу обладнання та перемиканні рівнів напруги на кінцевих підстанціях.

Теоретичні положення

Кругова діаграма потужності є графоаналітичним методом розрахунку режимних параметрів лінії за умовами початку або кінця за незалежного регулюванні рівнів напруги на кінцевих підстанціях. З математичної точки зору, діаграма представляє собою рівняння кола зі зміщеним центром. В процесі розрахунку обчислюються радіус кола, координата зміщення по осі абсцис та осі ординат. Радіус кола вказує на граничну величину активної потужності за пропускну здатністю ДЕП. Для побудови діаграми потрібні рівні напруги по кінцях ДЕП, стала холостого ходу еквівалентного чотириполюсника, A , та стала короткого замикання, B .

В процесі експлуатації дальньої електропередачі можливе виникнення аварійних ситуацій, які викличуть відключення частини технологічного обладнання та призведуть до значного зниження пропускну здатності електропередачі. В зазначених умовах необхідно забезпечити максимально можливу величину транзиту активної потужності з дотриманням вимог до рівнів напруги в усіх вузлових точках та вздовж ділянок ліній. Вирішення зазначеної задачі за допомогою кругових діаграм потужності дозволяє визначити режим напруги на кінцях передачі, які забезпечать максимально можливу величину транзиту активної потужності по лінії в реальному післяаварійному режимі.

Застосування кругових діаграм може допомогти у вирішенні ряду інженерних завдань, пов'язаних з визначенням потужності засобів компенсації реактивної потужності, наприклад, на приймальній стороні, визначення регулювальних діапазонів напруги трансформаторів на кінцевих підстанціях тощо.

Робочі характеристики електропередачі являють собою відображення функціональної залежності технологічних показників роботи електропередачі від величини транзиту активної потужності, що передається ДЕП. До таких показників зазвичай відносять: активну, реактивну, повну потужності, коефіцієнти потужності на початку та в кінці електропередачі, рівні напруги та величини струмів на її початку та в кінці, втрати активної та реактивної потужності, коефіцієнт корисної дії. Перераховані показники режиму роботи

передачі визначаються на підставі попередніх раніше виконаних розрахунків робочих режимів дальньої електропередачі.

В роботі цікавитиме залежність активної та реактивної потужності на початку та в кінці, коефіцієнтів навантаження на початку та в кінці, втрат активної та реактивної потужності, коефіцієнту корисної дії від частки об'єму транзиту активної потужності в ДЕП за умовами кінця.

Практична частина

Продовжується робота з дальньою електропередачею за темами №№ 1 – 5. Розрахунки виконуються у програмному середовищі MathCAD і в даній роботі ці розрахунки відображаються саме з MathCAD.

Спочатку буде розглянуто кругову діаграму, потім робочі характеристики. Така послідовність зумовлена переприсвоєнням значень змінних. Кругова діаграма в студентських розрахунках базується саме на режимі максимальних навантажень параметри повинна брати звідти.

Для початку розглянемо рівняння кола

Given

$$(x_{\text{cir}} - x_a)^2 + (y_{\text{cir}} - y_a)^2 = R_{\text{cir}}^2$$

$$\text{Find}(y_{\text{cir}}) \rightarrow \left(y_a + \sqrt{R_{\text{cir}}^2 - (x_{\text{cir}} - x_a)^2}, y_a - \sqrt{R_{\text{cir}}^2 - (x_{\text{cir}} - x_a)^2} \right)$$

Із неявного виразу потрібно зробити явний, тобто $y_{\text{cir}}(x_{\text{cir}})$. MathCAD трохи ускладнив, направді тут вираз простіший:

$$y_a + \sqrt{R_{\text{cir}}^2 - (x_{\text{cir}} - x_a)^2}$$

$$y_a - \sqrt{R_{\text{cir}}^2 - (x_{\text{cir}} - x_a)^2}$$

під "cir" мається на увазі "коло" англійською мовою.

$$\text{Радіус даного кола: } R_{\text{cir}} := \frac{(1.02 \cdot U_H) \cdot U_H}{|B_{\text{макс}}|} = 1313.92 \cdot \text{МВА}$$

Як видно, розрахунок здійснюється з використанням рівня напруг з режиму максимальних навантажень. Напруга на передавальній стороні зафіксована на рівні 102 % від номінальної. Напруга на приймальній стороні дорівнює номінальній.

Координата зміщення центру кола по осі абсцис, вісь активної потужності

$$x_a := \frac{\text{Re}(A_{\text{макс}} \cdot \overline{B_{\text{макс}}})}{(|B_{\text{макс}}|)^2} \cdot U_H^2 = 117.039 \cdot \text{МВт}$$

координата зміщення по осі ординат вісь реактивної потужності

$$y_a := \frac{-\text{Im}(A_{\text{макс}} \cdot \overline{B_{\text{макс}}})}{(|B_{\text{макс}}|)^2} \cdot U_H^2 = 836.918 \cdot \text{МВт}$$

Звідси функціональна залежність має вигляд:

$$Y(P) := y_a - \sqrt{R_{\text{cir}}^2 - (P + x_a)^2}$$

На графіку нанесено буде лише четверту чверть.

Тепер безпосередньо наноситься об'єм транзиту активної потужності.

Активна змінюється від нуля до заданого транзиту.

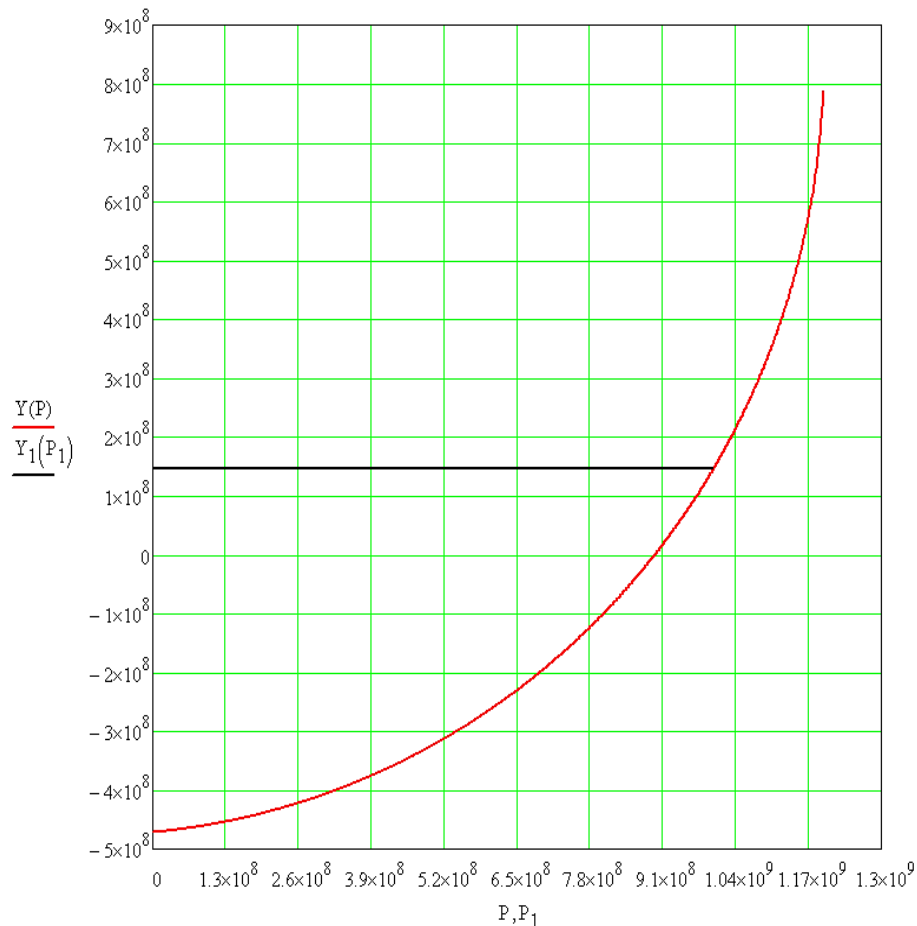
$$P_1 := \begin{pmatrix} 0 \\ P_{\text{II}} \end{pmatrix}$$

Реактивна потужність, яка виконує фіксацію напруги, залишається незмінною, отриманою за розрахунками

$$Y_1(P_1) := \begin{pmatrix} Q_{\text{II}} \\ Q_{\text{II}} \end{pmatrix}$$

Для побудови графіку зазначимо граничний об'єм транзиту активної потужності:

$$R_{\text{cir}} - x_a = 1196.88 \cdot \text{МВт}$$



Кругова діаграма. Четверта чверть кола

Розглянемо варіант та надамо відповідь на питання, чому зображається саме четверта чверть кола та чому з двох значень коренів реактивної потужності обирається найменше за модулем значення. Перепишемо рівняння кола, змінивши знак перед коренем на протилежний:

$$Y_{\text{Верх}}(P) := y_a + \sqrt{R_{\text{cir}}^2 - (P + x_a)^2}$$

тоді реактивна потужність, що виконує фіксацію рівнів напруги по кінцях ДЕП та супроводжує активну потужність, буде (тобто більший з коренів)

$$Y_2(P_1) := \begin{pmatrix} Q'_{\text{II}} \\ Q'_{\text{II}} \end{pmatrix}$$

Повна потужність у випадку прийняття найменшого з коренів рівняння реактивної потужності

$$S'_{\text{мін}} := \begin{pmatrix} 0 \\ P_{\text{II}} \end{pmatrix}, S''_{\text{мін}} := \begin{pmatrix} 0 \\ Q_{\text{II}} \end{pmatrix}$$

Повна потужність у випадку прийняття найменшого з коренів рівняння реактивної потужності

$$S'_{\text{макс}} := \begin{pmatrix} 0 \\ P_{\text{II}} \end{pmatrix}, S''_{\text{макс}} := \begin{pmatrix} 0 \\ Q'_{\text{II}} \end{pmatrix}$$

Тобто необхідність вибору саме найменшого за модулем значення реактивної потужності очевидне. Також очевидно, що у першій чверті кола ніхто не працюватиме.

Побудова робочих характеристик

Порціями в ДЕП направляється задана потужність: $\alpha := 0,5\%..100\%$.

Звідси об'єм транзиту активної потужності: $P_{\text{II}}(\alpha) := \alpha \cdot P_{\text{II}}$

В процесі набору транзиту активної потужності дальня електропередача здійснила перехід між режимами роботи: від ненавантаженої лінії до максимального навантаження.

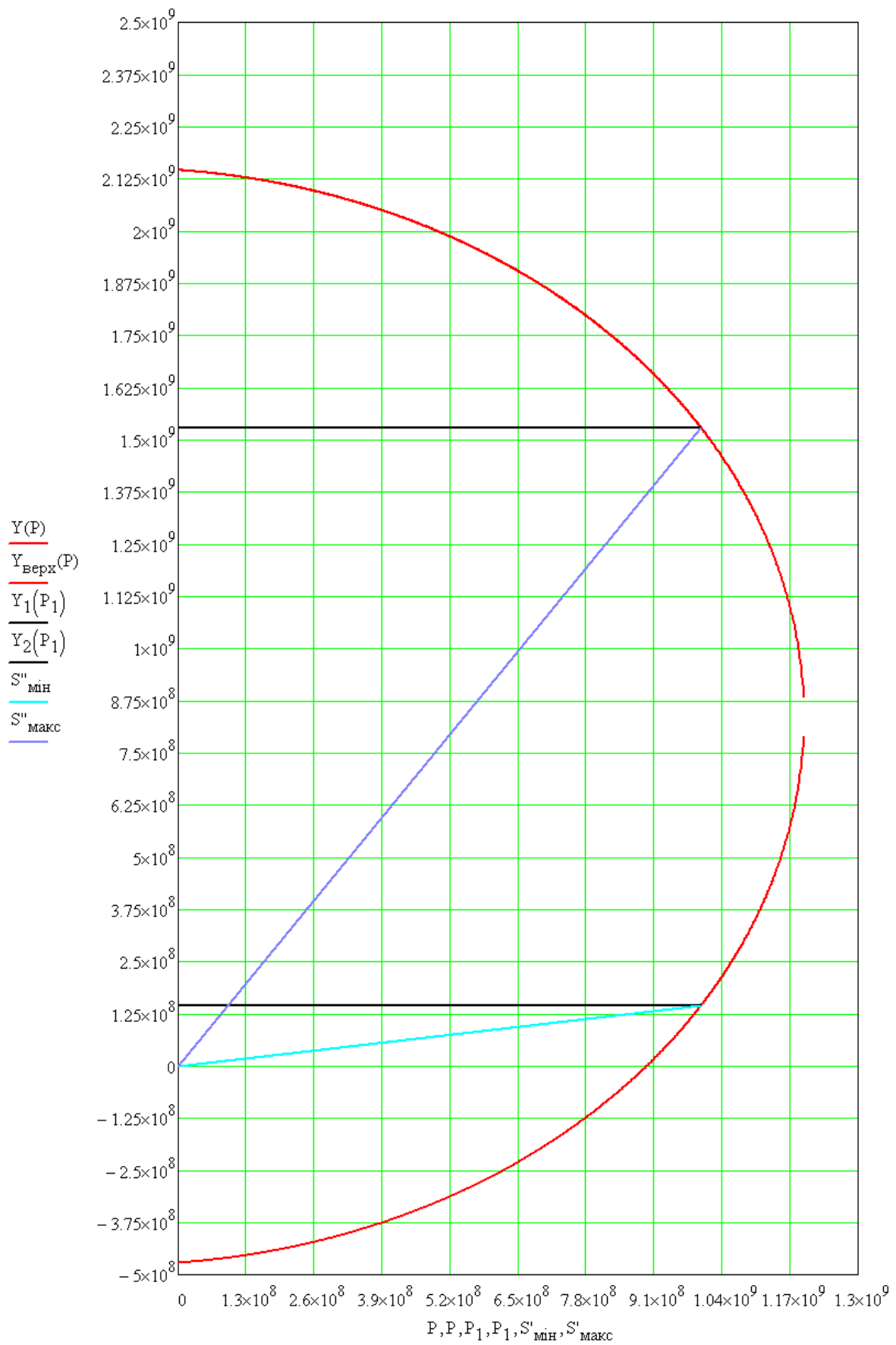
В режимі ненавантаженої лінії було увімкнено дві реакторні групи на передавальній стороні, одна реакторна група на першому перемикальному пункті і одна реакторна група на другому перемикальному пункті.

В режимі максимальних навантажень усі реакторні групи були вимкнені.

В режимі ненавантаженої лінії напруги по кінцях були зафіксовані на рівні 95% від номінальної величини. В режимі максимальних навантажень напруга на передавальній стороні становила 102% від номінальної і напруга на приймальній стороні становила номінальну 500 кВ.

Таким чином потрібно знайти, за яких об'ємів транзиту:

- вимикається перша з двох реакторних груп на передавальній стороні
- вимикається друга остання реакторна група на передавальній стороні
- вимикається реакторна група на першому перемикальному пункті



Кругова діаграма. Перша та четверта чверті кола

- вимикається реакторна група на другому перемикальному пункті

- напруга на передавальній стороні перемикається з 95% номінальної до 97,5% від номінальної (приймемо кроки 2% і 3%)

- напруга на передавальній стороні перемикається на номінальну 500 кВ

- напруга на передавальній стороні перемикається на 102% від номінальної

- напруга на приймальній стороні перемикається з 95% номінальної до 97,5% від номінальної (приймемо кроки 2% і 3%)

- напруга на приймальній стороні перемикається на номінальну 500 кВ

З метою відповіді на ці питання та врахувати зміни у складі обладнання і перемикання рівнів напруги, вручну, починаючи з 0 МВт, додаючи кожного разу 100 МВт транзиту пробуються комбінації із вимиканням реакторів та перемиканням напруги, обов'язково відслідковуючи недопущення перенапруги та орієнтуючись на зменшення втрат активної потужності.

Таким чином, вручну, пробуючи різні комбінації, було визначено:

Одразу після під'єднання ДЕП до передавальної системи вимикаються обидві реакторні групи на передавальній стороні

За транзиту 600 МВт вимикається реакторна група на першому перемикальному пункті

За транзиту 600 МВт на передавальній стороні напругу підвищують до 97 % від номінальної

За транзиту 700 МВт вимикається реакторна група на другому перемикальному пункті

За транзиту 700 МВт на приймальній стороні напругу підвищують до 97 % від номінальної

За транзиту 800 МВт на передавальній і приймальній стороні напругу підвищують до номінальної

За транзиту 900 МВт на передавальній стороні напругу підвищують до 102 % від номінальної

Задаються границі зміни рівнів напруги по кінцях ДЕП

$$U_I(\alpha) := \begin{cases} 0.95 \cdot U_H & \text{if } \alpha < 60\% \\ 0.97 \cdot U_H & \text{if } 60\% \leq \alpha < 70\% \\ U_H & \text{if } 70\% \leq \alpha \leq 80\% \\ 1.02 \cdot U_H & \text{if } 80\% < \alpha \end{cases}$$

$$U_{II}(\alpha) := \begin{cases} 0.95 \cdot U_H & \text{if } \alpha < 70\% \\ 0.97 \cdot U_H & \text{if } 70\% \leq \alpha \leq 80\% \\ U_H & \text{if } 80\% < \alpha \end{cases}$$

Потрібно сформулювати ланцюжкову схему та обчислити сталі еквівалентного чотириполюсника для врахування наявності реакторної групи на першому та другому перемикальному пункті і лише на другому перемикальному пункті.

$$\begin{pmatrix} A_{0-1-1} & B_{0-1-1} \\ C_{0-1-1} & D_{0-1-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{AT-1} & B_{AT-1} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{AT-1} \cdot \Omega & D_{AT-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{III} & B_{III} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{III} \cdot \Omega & D_{III} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{peak} & B_{peak} \cdot \Omega^{-1} \\ 1 \cdot C_{peak} \cdot \Omega & D_{peak} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{YUK} & B_{YUK} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{YUK} \cdot \Omega & A_{YUK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{III} & B_{III} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{III} \cdot \Omega & D_{III} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{peak} & B_{peak} \cdot \Omega^{-1} \\ 1 \cdot C_{peak} \cdot \Omega & D_{peak} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{III} & B_{III} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{III} \cdot \Omega & D_{III} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{AT-2} & B_{AT-2} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{AT-2} \cdot \Omega & D_{AT-2} \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} A_{0-0-1} & B_{0-0-1} \\ C_{0-0-1} & D_{0-0-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} A_{AT-1} & B_{AT-1} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{AT-1} \cdot \Omega & D_{AT-1} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{III} & B_{III} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{III} \cdot \Omega & D_{III} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{YUK} & B_{YUK} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{YUK} \cdot \Omega & A_{YUK} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{III} & B_{III} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{III} \cdot \Omega & D_{III} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{peak} & B_{peak} \cdot \Omega^{-1} \\ 1 \cdot C_{peak} \cdot \Omega & D_{peak} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{III} & B_{III} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{III} \cdot \Omega & D_{III} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A_{AT-2} & B_{AT-2} \cdot \Omega^{-1} \\ C_{AT-2} \cdot \Omega & D_{AT-2} \end{pmatrix} \\
\begin{pmatrix} A_{0-1-1} & B_{0-1-1} \\ C_{0-1-1} & D_{0-1-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.789 + 0.027i & 18.601 + 208.704i \\ 1.431 \times 10^{-5} + 2.065i \times 10^{-3} & 0.723 + 0.028i \end{pmatrix}$$

$$B_{0-1-1} := B_{0-1-1} \cdot \text{Om}$$

$$C_{0-1-1} := C_{0-1-1} \cdot \text{Cm}$$

$$\begin{pmatrix} A_{0-0-1} & B_{0-0-1} \\ C_{0-0-1} & D_{0-0-1} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 0.731 + 0.03i & 17.156 + 200.81i \\ 1.562 \times 10^{-6} + 2.648i \times 10^{-3} & 0.642 + 0.036i \end{pmatrix}$$

$$B_{0-0-1} := B_{0-0-1} \cdot \text{Om}$$

$$C_{0-0-1} := C_{0-0-1} \cdot \text{Cm}$$

Задаються границі зміни еквівалентних параметрів чотирьохполюсника

$$A_{p.x.}(\alpha) := \begin{cases} A_{p.x.} \leftarrow A_{0-1-1} & \text{if } \alpha < 60\% \\ A_{p.x.} \leftarrow A_{0-0-1} & \text{if } 60\% \leq \alpha < 70\% \\ A_{p.x.} \leftarrow A_{\text{макс}} & \text{if } 70\% \leq \alpha \end{cases}$$

$$B_{p.x.}(\alpha) := \begin{cases} B_{p.x.} \leftarrow B_{0-1-1} & \text{if } \alpha < 60\% \\ B_{p.x.} \leftarrow B_{0-0-1} & \text{if } 60\% \leq \alpha < 70\% \\ B_{p.x.} \leftarrow B_{\text{макс}} & \text{if } 70\% \leq \alpha \end{cases}$$

$$C_{p.x.}(\alpha) := \begin{cases} C_{p.x.} \leftarrow C_{0-1-1} & \text{if } \alpha < 60\% \\ C_{p.x.} \leftarrow C_{0-0-1} & \text{if } 60\% \leq \alpha < 70\% \\ C_{p.x.} \leftarrow C_{\text{макс}} & \text{if } 70\% \leq \alpha \end{cases}$$

$$D_{p.x.}(\alpha) := \begin{cases} D_{p.x.} \leftarrow D_{0-1-1} & \text{if } \alpha < 60\% \\ D_{p.x.} \leftarrow D_{0-0-1} & \text{if } 60\% \leq \alpha < 70\% \\ D_{p.x.} \leftarrow D_{\text{макс}} & \text{if } 70\% \leq \alpha \end{cases}$$

Реактивна потужність, що виконує фіксацію рівнів напруги по кінцях ДЕП

$$Q'_{II}(\alpha) := \frac{-\text{Im}(A_{p.x.}(\alpha) \cdot \overline{B_{p.x.}(\alpha)})}{(|B_{p.x.}(\alpha)|)^2} \cdot U_{II}(\alpha)^2 + \sqrt{\left(\frac{U_I(\alpha) \cdot U_{II}(\alpha)}{|B_{p.x.}(\alpha)|}\right)^2 - \left[P_{II}(\alpha) + \frac{\text{Re}(A_{p.x.}(\alpha) \cdot \overline{B_{p.x.}(\alpha)})}{(|B_{p.x.}(\alpha)|)^2} \cdot U_{II}(\alpha)^2\right]^2}$$

$$Q''_{II}(\alpha) := \frac{-\text{Im}(A_{p.x.}(\alpha) \cdot \overline{B_{p.x.}(\alpha)})}{(|B_{p.x.}(\alpha)|)^2} \cdot U_{II}(\alpha)^2 - \sqrt{\left(\frac{U_I(\alpha) \cdot U_{II}(\alpha)}{|B_{p.x.}(\alpha)|}\right)^2 - \left[P_{II}(\alpha) + \frac{\text{Re}(A_{p.x.}(\alpha) \cdot \overline{B_{p.x.}(\alpha)})}{(|B_{p.x.}(\alpha)|)^2} \cdot U_{II}(\alpha)^2\right]^2}$$

$$Q_{II}(\alpha) := \begin{cases} Q'_{II}(\alpha) & \text{if } |Q'_{II}(\alpha)| < |Q''_{II}(\alpha)| \\ Q''_{II}(\alpha) & \text{otherwise} \end{cases}$$

Струм в кінці передачі

$$I_{II}(\alpha) := \frac{P_{II}(\alpha) + i \cdot Q_{II}(\alpha)}{\overline{U_{II}(\alpha)}}$$

Повна потужність на початку ДЕП

$$S_I(\alpha) := \left(A_{p.x.}(\alpha) \cdot U_{II}(\alpha) + B_{p.x.}(\alpha) \cdot I_{II}(\alpha)\right) \cdot \left(\overline{C_{p.x.}(\alpha) \cdot U_{II}(\alpha) + D_{p.x.}(\alpha) \cdot I_{II}(\alpha)}\right)$$

Активна та реактивна потужності

$$P_I(\alpha) := \text{Re}(S_I(\alpha)), \quad Q_I(\alpha) := \text{Im}(S_I(\alpha))$$

Втрати активної та реактивної потужності

$$\Delta P(\alpha) := P_I(\alpha) - P_{II}(\alpha), \quad \Delta Q(\alpha) := Q_I(\alpha) - Q_{II}(\alpha)$$

Коефіцієнт потужності на початку ДЕП

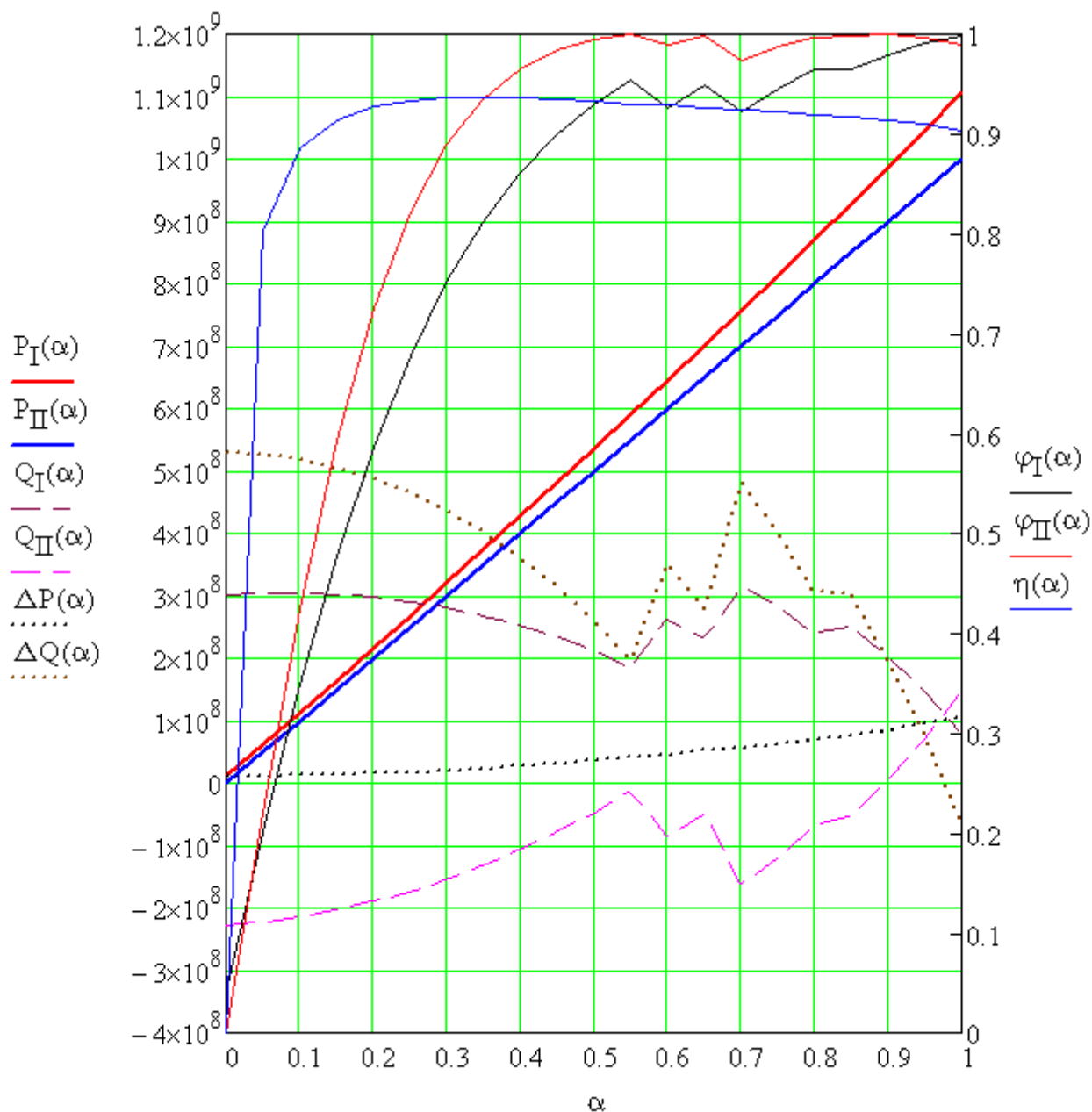
$$\varphi_I(\alpha) := \frac{P_I(\alpha)}{|S_I(\alpha)|}$$

Коефіцієнт потужності в кінці ДЕП

$$\varphi_{II}(\alpha) := \frac{P_{II}(\alpha)}{|P_{II}(\alpha) + i \cdot Q_{II}(\alpha)|}$$

Коефіцієнт корисної дії ДЕП

$$\eta(\alpha) := \frac{P_{II}(\alpha)}{P_I(\alpha)}$$



Робочі характеристики ДЕП

Індивідуальне завдання

Частина 1. Кругова діаграма. За результатами розрахунку режиму максимальних навантажень побудувати кругову діаграму. Змінюючи рівень напруги на приймальній стороні в діапазоні від 95 % до 105 % номінальної напруги з кроком 5 %, побудувати сімейство кругових діаграм, на кожній з яких розмістивши транзит активної потужності. Показати зміну розташування вектора транзиту активної потужності при зміні рівня напруги на приймальній стороні.

Частина 2. Робочі характеристики. Вказати зміни у складі реакторних груп при переході від режиму ненавантаженої лінії до режиму максимальних навантажень. За наявності, вказати на перемикання напруги при переході ДЕР між режимами роботи. Визначити відповідні значення транзиту активної потужності за яких відбувалися зміни у складі реакторних груп та перемикання напруги, побудувати робочі характеристики з урахуванням зазначених змін.

Дальня електропередача в дисципліні «Пакети прикладних програм для електротехнічних розрахунків» перетинається з дисципліною «Регулювання режимів електричних систем-3» у частині електротехнічних розрахунків. Студенти ладні обирати вихідні дані для виконання індивідуального завдання з курсового проекту «Регулювання режимів» або з контрольної роботи «Пакетів прикладних програм».

Тема №6

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ОДНОГО КЛАСУ НОМІНАЛЬНОЇ НАПРУГИ В СЕРЕДОВИЩІ SIMPLE VOLTAGE CALCULATOR

Мета роботи: формування практичних навичок у використанні програмного середовища SimpleVoltageCalculator шляхом створення та роботи з довідником напруг, провідників, створення пунктів навантаження та генерації, утворення ділянок ліній.

Теоретичні положення

Simple Voltage Calculator (SVC) – відносно проста програма розрахунку ustalених режимів роботи електричних мереж з використанням вузлової моделі методом Зейделя. Розрахункові схеми за конфігурацією можуть бути замкнені і розімкнені, можуть містити кілька класів номінальної напруги, тобто здійснюється розрахунок схеми з трансформаторними зв'язками, в схемі за необхідності, враховуються ділянки з нульовим опором. Робоче середовище SVC представлено на рис.6.1. Меню «Файл» містить стандартний набір інструментів, як то «Створити новий файл», «Зберегти», «Відкрити існуючий файл», тому цим моментам увага особливо не приділятиметься

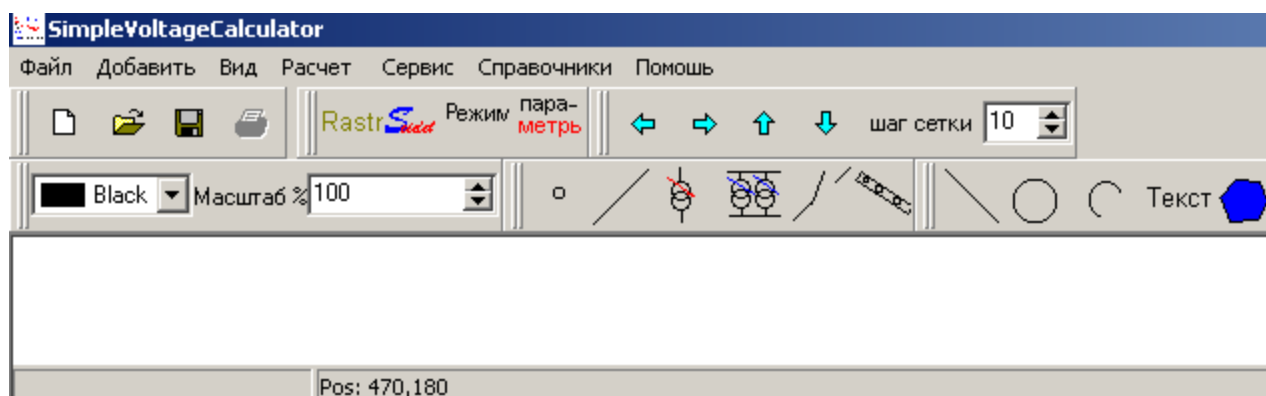


Рисунок 6.1. Робоча область SVC

Меню «Додати» пропонує користувачу розмістити в робочій області вузол навантаження, ділянку лінії, трансформаторний зв'язок або трансформаторну підстанцію. Додатково, з панелі інструментів можна додати комутатор – роз'єднувач, та шину, яка по суті є тим самим вузлом навантаження, рис. 6.2.

В меню «Вид» надається можливість вмикати чи вимикати панелі інструментів на робочій області і цьому моменту особлива увага також не приділятиметься. Розрахунок режиму роботи створеної схеми мережі виконується з

використанням меню «Розрахунок» або з панелі інструментів, рис. 6.3. Де Rastr – призначення потрібного пункту балансуєчим та вказівка рівня напруги балансуєчого пункту. Sield – запуск розрахунку методом Зейделя. Режим – отримання результатів розрахунку. Параметри на панелі інструментів – інструментарій для корегування точності розрахунку та кількості ітерацій. Цей же пункт зустрічається в меню «Сервіс».



Рисунок 6.2. Основні елементи збірки схеми мережі

В меню «Вид» надається можливість вмикати чи вимикати панелі інструментів на робочій області і цьому моменту особлива увага також не приділятиметься. Розрахунок режиму роботи створеної схеми мережі виконується з використанням меню «Розрахунок» або з панелі інструментів, рис. 6.3. Де Rastr – призначення потрібного пункту балансуєчим та вказівка рівня напруги балансуєчого пункту. Sield – запуск розрахунку методом Зейделя. Режим – отримання результатів розрахунку. Параметри на панелі інструментів – інструментарій для корегування точності розрахунку та кількості ітерацій. Цей же пункт зустрічається в меню «Сервіс».



Рисунок 6.3. Інструменти запуску моделювання

Меню «Сервіс», рис.6.4, містить в своєму складі три інструменти: калькулятор, здійснює найпростіший арифметичний розрахунок, раніше згаданий інструмент корегування точності розрахунку та кількості ітерацій, рис. 6.5, та інструмент для здійснення автоматичної зміни в сторону зменшення навантаження усіх пунктів.

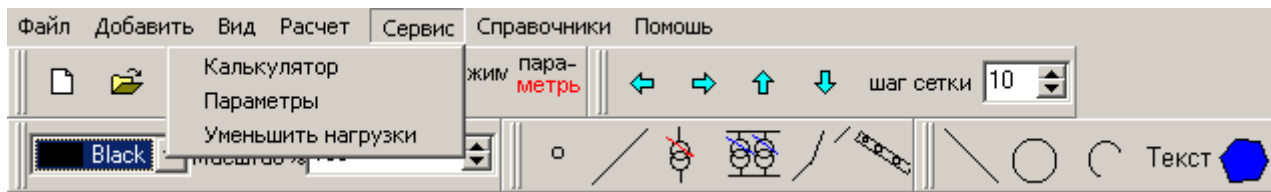


Рисунок 6.4. Меню «Сервіс»

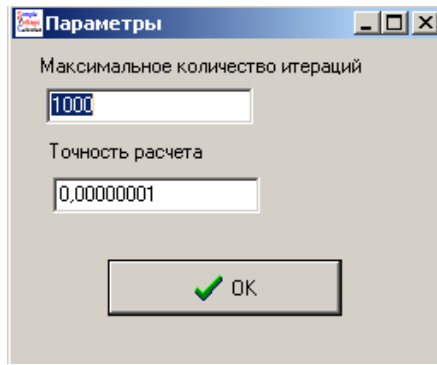


Рисунок 6.5. Параметры точности итерационного расчета

На рис. 6.6 окремо винесено інструмент зменшення навантаження. Як видно, зменшення активної та реактивної складової навантаження відбувається незалежно. В даному розділі створюються переліки вузлів, для яких навантаження залишається незмінним (права колонка, червоний колір) та перелік вузлів, для яких, як видно з рис. 6.6., активна та реактивна складова навантаження зменшаться в два рази (ліва колонка, чорний колір). Переміщення вузлів між колонками можлива за бажанням (зелена клавіша).

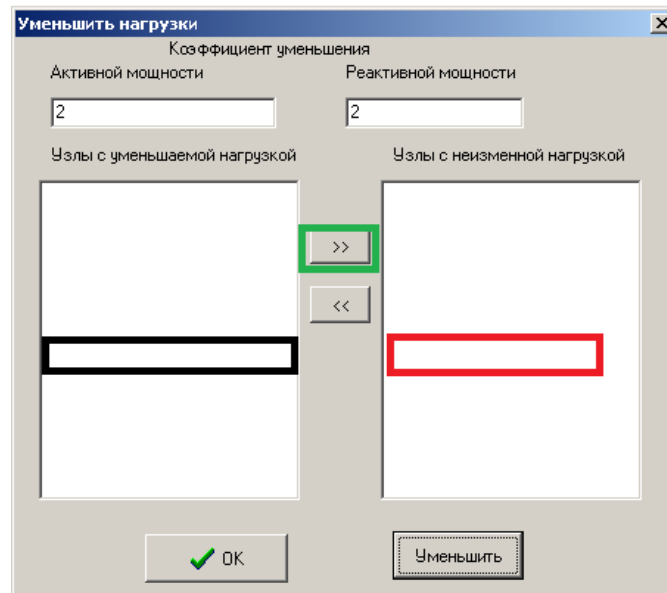


Рисунок 6.6. Инструмент снижения навантаження пунктів

Головним елементом для створення робочої моделі є вузол. Він же може бути представлений шиною. Для наочності, на рис. 6.7. взято вже існуючу схему-приклад.

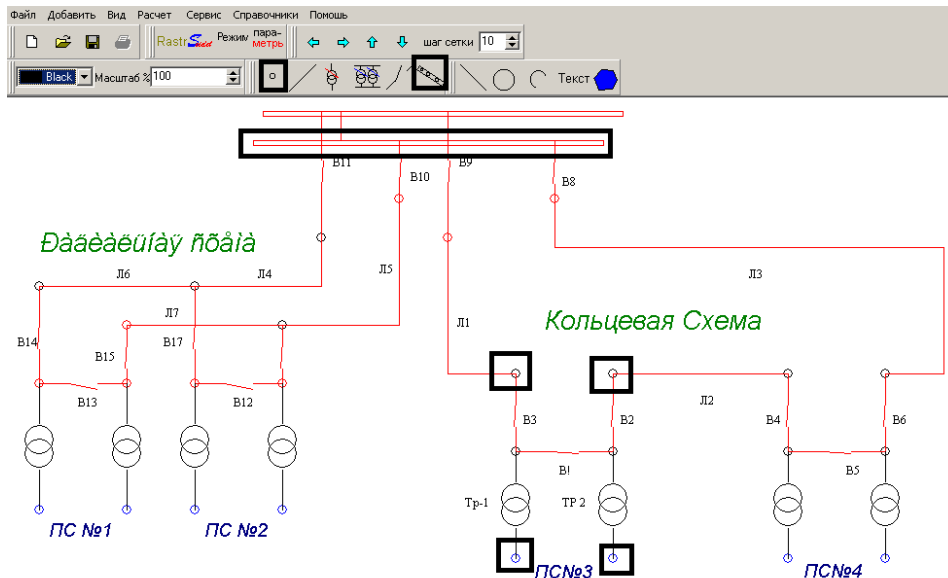


Рисунок 6.7. Люстрация узла на схеме

Для узла, рис.6.8., необходимо задать перш за все номінальну напругу, до якої він належатиме. Решта параметрів може і не вказуватися. Якщо вузол є навантаженням або генерацією, то вказується активна та реактивна потужності, МВт, МВАр. Реактивна потужність за замовчуванням вважається індуктивною за характером і має знак «+». Ємнісна реактивна потужність має знак «-». Для моделювання установки поперечної компенсації чи урахуванні струму витоків передбачається можливість вказувати провідність вузла. Одинці вимірювання – мікроСименс, тобто множник 10^{-6} вже врахований. Провідність шунта за замовчуванням має активно-індуктивний характер. Ємнісна реактивна провідність вказується знаком «-».

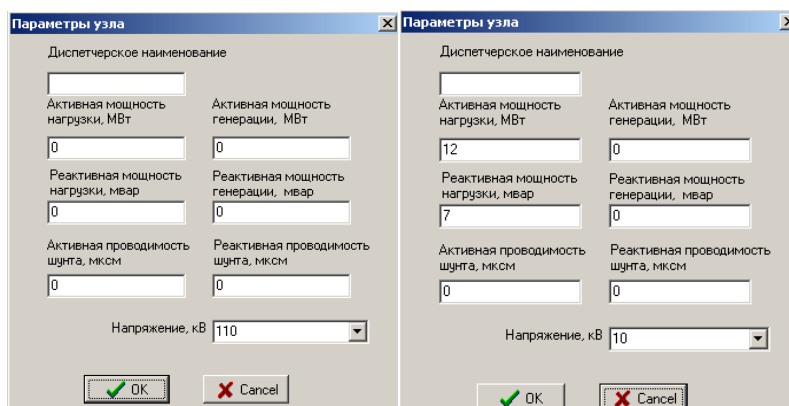


Рисунок 6.8. Параметры узла

Для появи у випадіючому вікні «Напруга, кВ» власне рівня напруги, його потрібно створити у довіднику. Меню «Довідники», рис. 6.9. містить і дає змогу створити перелік необхідних марок провідників з параметрами, рівні напруги з

допустимими відхиленнями та двохобмоткові трансформатори з параметрами схеми заміщення та регульовальними можливостями.

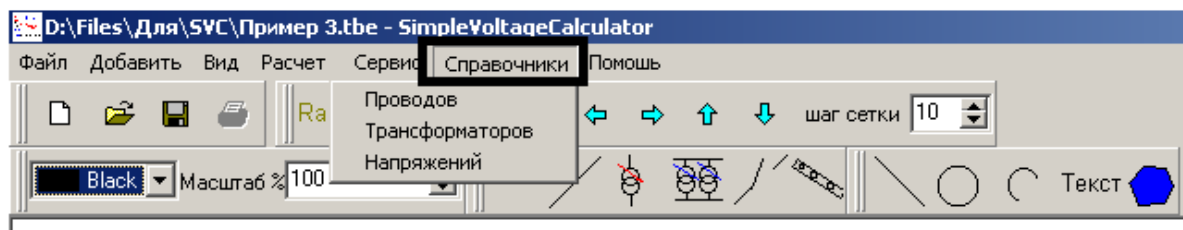


Рисунок 6.9. Вміст меню «Довідники»

На рис. 6.10 представлено можливий перелік рівнів номінальних напруг в довіднику, а також параметри, як задаються для номінальної напруги. Як видно, вказується власне номінальна напруга, найменше та найбільше допустиме значення для даного класу напруги і колір, яким відобразатиметься та частина схеми, що до цього класу напруги належатиме. Для створення нового необхідного класу напруги у довіднику напруги натискається «Додати». Для редагування параметрів обраного класу напруги, виділивши даний клас напруги в переліку довідника, натискається «Змінити». Видалення рівня напруги чи повне очищення довідника здійснюється натисканням клавіші «Видалити». В табл. 6.1 представлено класи номінальної напруги та допустимі межі.

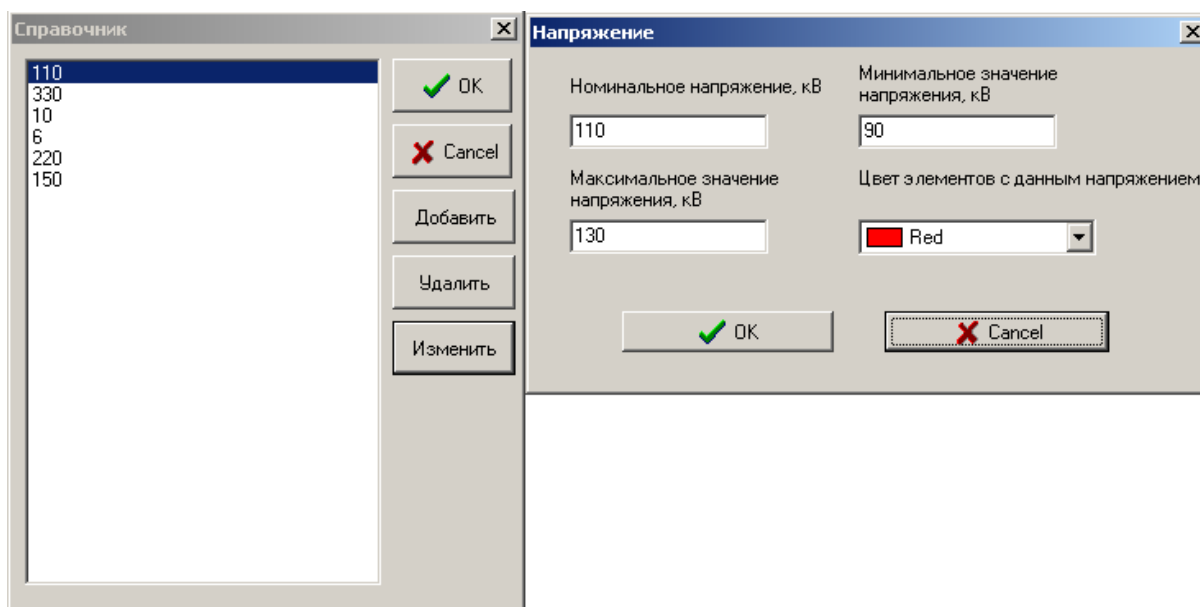


Рисунок 6.10. Довідник напруг

Таблиця 6.1. Допустимий діапазон номінальних напруг

Номінальна напруга, кВ	Найбільше значення, кВ	Найменше значення, кВ		Номінальна напруга, кВ	Найбільше значення, кВ	Найменше значення, кВ
6	7,2	5,4		220	252	198
10	12	9		330	363	297
20	24	18		400	420	360
35	40,5	31,5		500	525	450
110	126	99		750	787	712,5
150/154	172	135		1150	1200	1092,5

Ще один пункт довідника до розгляду – довідник провідників, рис. 6.11. Основні необхідні параметри для вказування – це погонні опори; програмний комплекс використовує вузлову модель. Програмний комплекс оперує індуктивним опором, активною та реактивною провідністю замість реоктансу, кондуктансу та суццептансу.

Поперечною провідністю можна нехтувати. Для кабельних ліній ємнісну провідність потрібно враховувати для напруги 35 кВ і вище, а для повітряних – 110 кВ і вище. Втрати на корону необхідно враховувати для напруги 330 кВ і вище.

Назва провідника є доцільною для орієнтування, інакше буде порожнє місце, також доцільно вказати, для якої напруги цей провідник. Так, АС-70 використовується і на 35 кВ і на 110 кВ. Формуючи довідник, також доцільно вказувати найбільше допустиме значення струму для даного провідника, табл.6.2.

Погонний активний опір провідника можна знайти у відповідній довідниковій літературі. Погонний індуктивний опір та погонну ємнісну провідність у більшості випадків необхідно розрахувати:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot D_{c.z.}}{d_0}\right) + \frac{0,016 \cdot \mu}{n} \quad (6.1)$$

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{2 \cdot D_{c.z.}}{d_0}\right)} \quad (6.2)$$

де $D_{c.g.}$ – середньгеометрична відстань між фазами, мм;

d_0 – діаметр провідника, мм;

$\mu=1$ – відносна магнітна проникність алюмінію;

n – кількість провідників у розщеплений фазі; для задач в цьому розділі $n=1$.

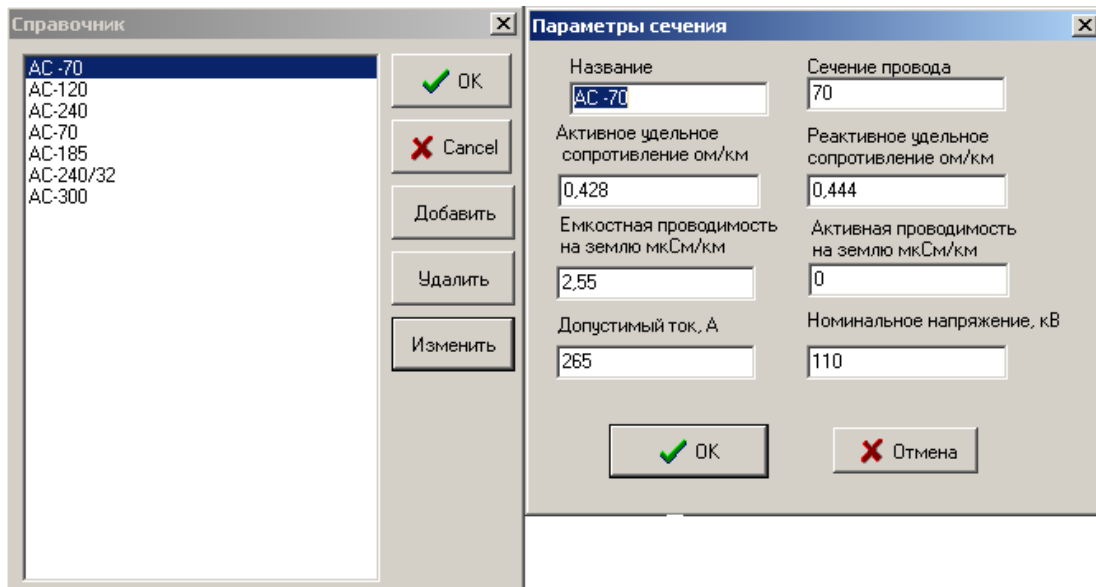


Рисунок 6.11. Довідник провідників

Для визначення середньгеометричної відстані між фазами можна скористуватися зразками опор класів напруг 10 кВ, 35 кВ та 110 кВ, представлених на рис. 6.12 – 6.14.

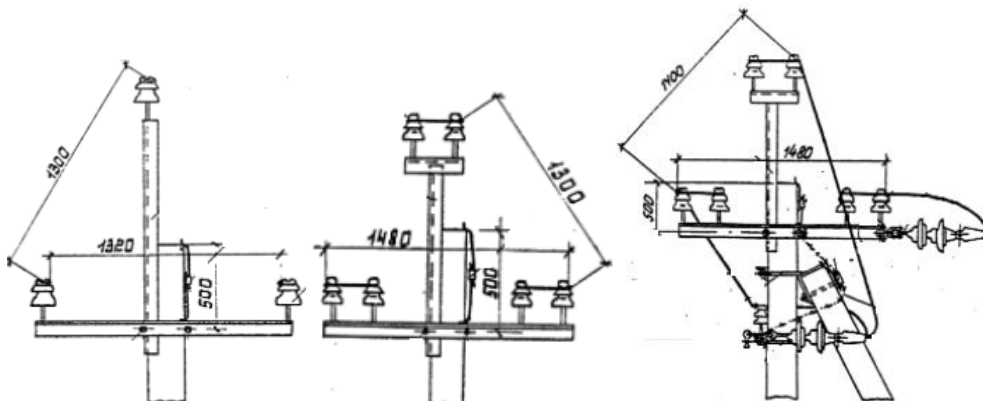


Рисунок 6.12. Опори 10 кВ

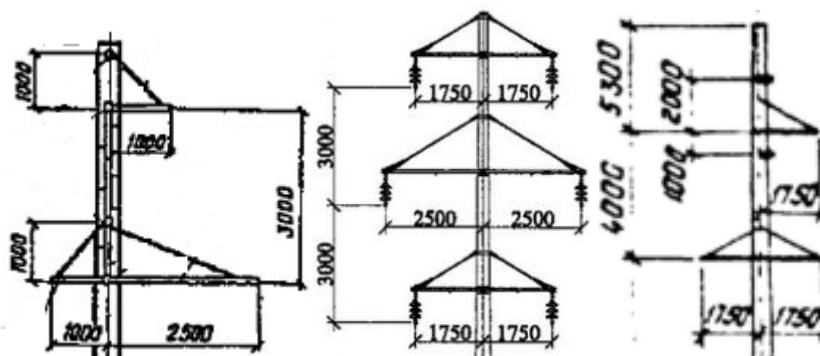


Рисунок 6.13. Опори 35 кВ

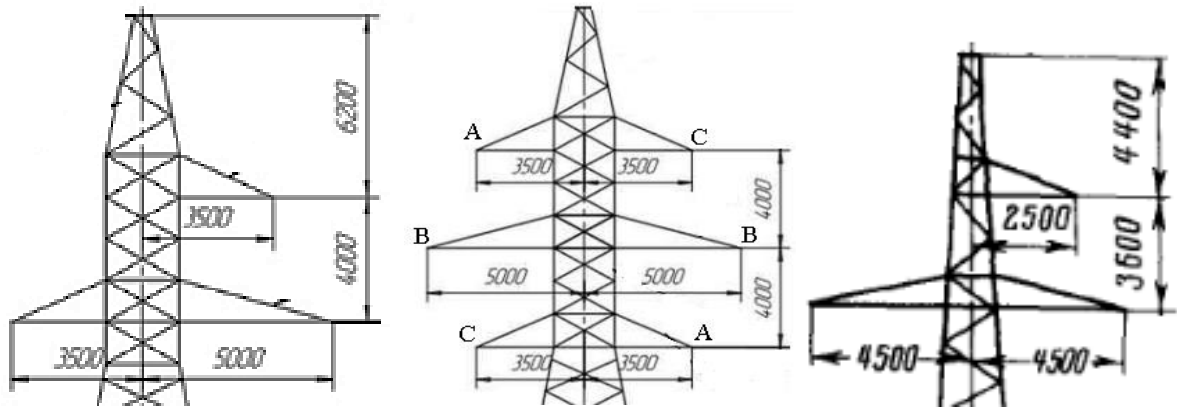


Рисунок 6.14. Опори 110 кВ

Таблиця 6.2. Розрахункові дані сталевалюмінієвих проводів марки АС

Номинальний переріз (алюміній/сталь)	Переріз, мм ²	Діаметр проводу, мм	Опір постійному струму при +20°C, Ом/км	Допустимий тривалий струм, А
35/6,2	36,9	8,4	0,790	175
50/8	48,2	9,6	0,603	210
70/11	68,0	11,4	0,422	265
95/16	95,4	13,5	0,301	330
120/19	118,0	15,2	0,244	390
150/24	149,0	17,1	0,204	450
185/43	185,0	19,6	0,156	510
240/32	244,0	21,6	0,118	610

Практична частина

Зібрати замкнену схему електричної мережі напругою 110 кВ, виконати моделювання та отримати режимні параметри. Конфігурація схеми, навантаження пунктів, довжини ділянок та марка проводів цих ділянок представлена на рис. 6.15.

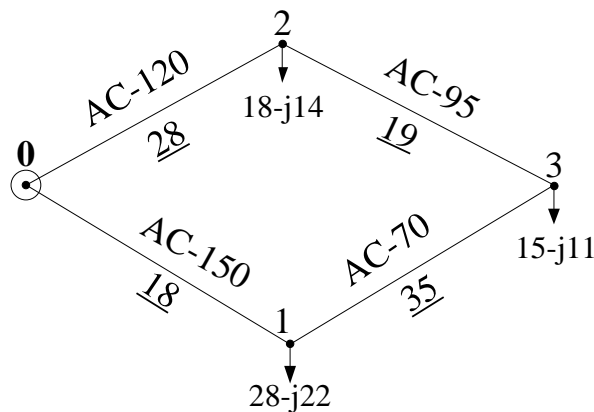


Рисунок 6.15. Робоча схема

Допустимий діапазон значень для напруги 110 кВ в довіднику буде взято з табл. 6.1. Переріз провідників, діаметр, погонний активний опір та тривалий допустимий струм буде взято із табл. 6.2.

Для визначення погонного індуктивного опору та погонної ємнісної провідності буде використано опору, рис. 6.16.

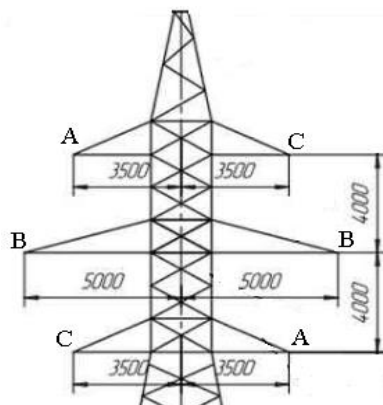


Рисунок 6.16. Варіант опори 110 кВ для прикладу

Розрахунок середньгеометричної відстані між фазами:

$$D_{A-B} = \sqrt{(5000 - 3500)^2 + 4000^2} = 4272 \text{ (мм)}$$

$$D_{B-C} = \sqrt{(5000 - 3500)^2 + 4000^2} = 4272 \text{ (мм)}$$

$$D_{A-C} = 4000 + 4000 = 8000 \text{ (мм)}$$

$$D_{c.z.} = \sqrt[3]{D_{A-B} \cdot D_{B-C} \cdot D_{A-C}} = \sqrt[3]{4272 \cdot 4272 \cdot 8000} = 5265,64 \text{ (мм)}$$

Параметри провідника для довідника. На прикладі АС-120:

$$r_0 = 0,244 \text{ Ом/км}$$

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot 5265,64}{15,2}\right) + \frac{0,016 \cdot 1}{1} = 0,425 \left(\frac{\text{Ом}}{\text{км}}\right)$$

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{2 \cdot 5265,64}{15,2}\right)} = 2,668 \cdot 10^{-6} \left(\frac{\text{Ом}}{\text{км}}\right)$$

На рис. 6.17 показано створений довідник для рівня напруги 110 кВ.

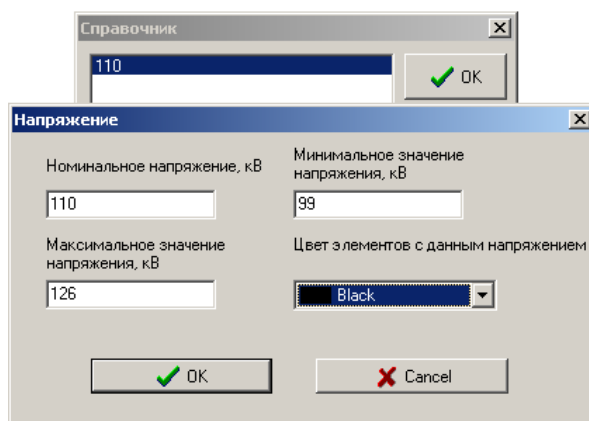


Рисунок 6.17. Номінальна напруга 110 кВ

На рис. 6.18 показано введені в довідник параметри провідників, що використовуються в схемі мережі на ділянках 0–1, 0–2, 1–3 та 2–3.

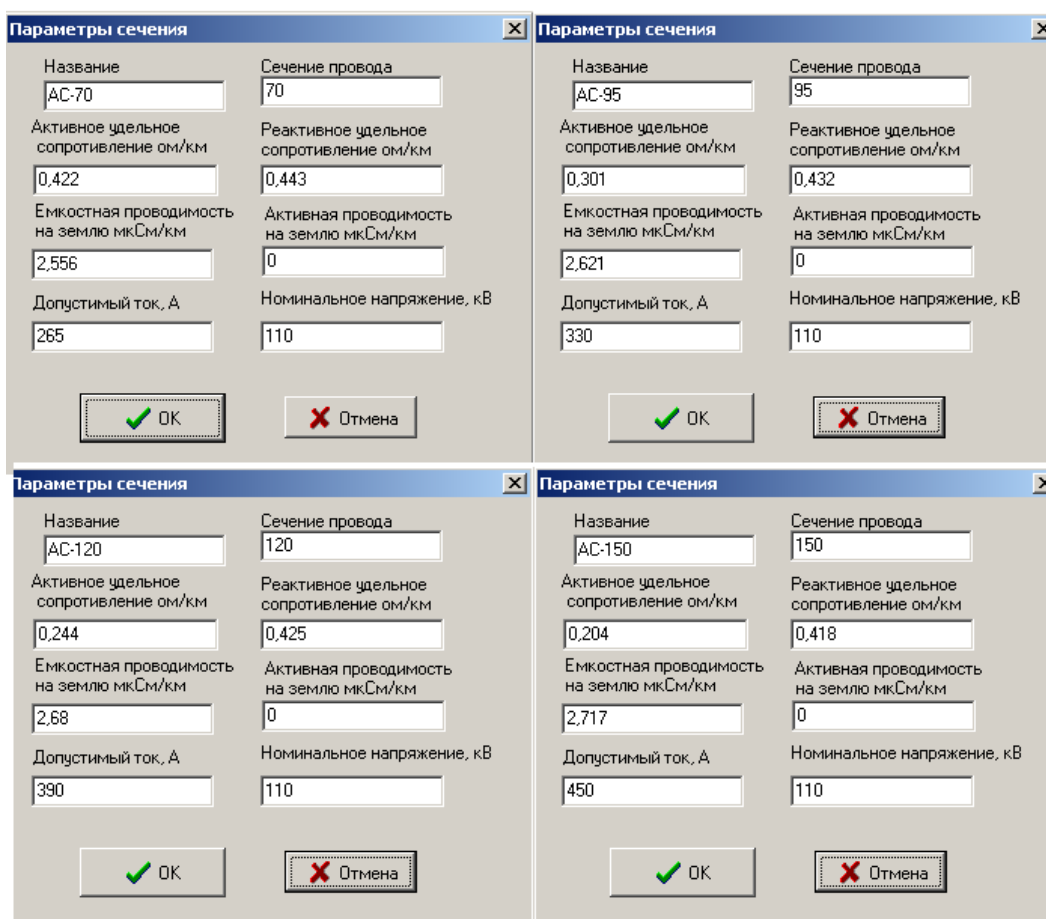


Рисунок 6.18. Довідник провідників схеми мережі

На рис.6.19 показано параметри пунктів, як балансууючого так і звичайних пунктів навантаження. Вказано диспетчерське найменування, належність до класу напруги, активне та індуктивне навантаження.

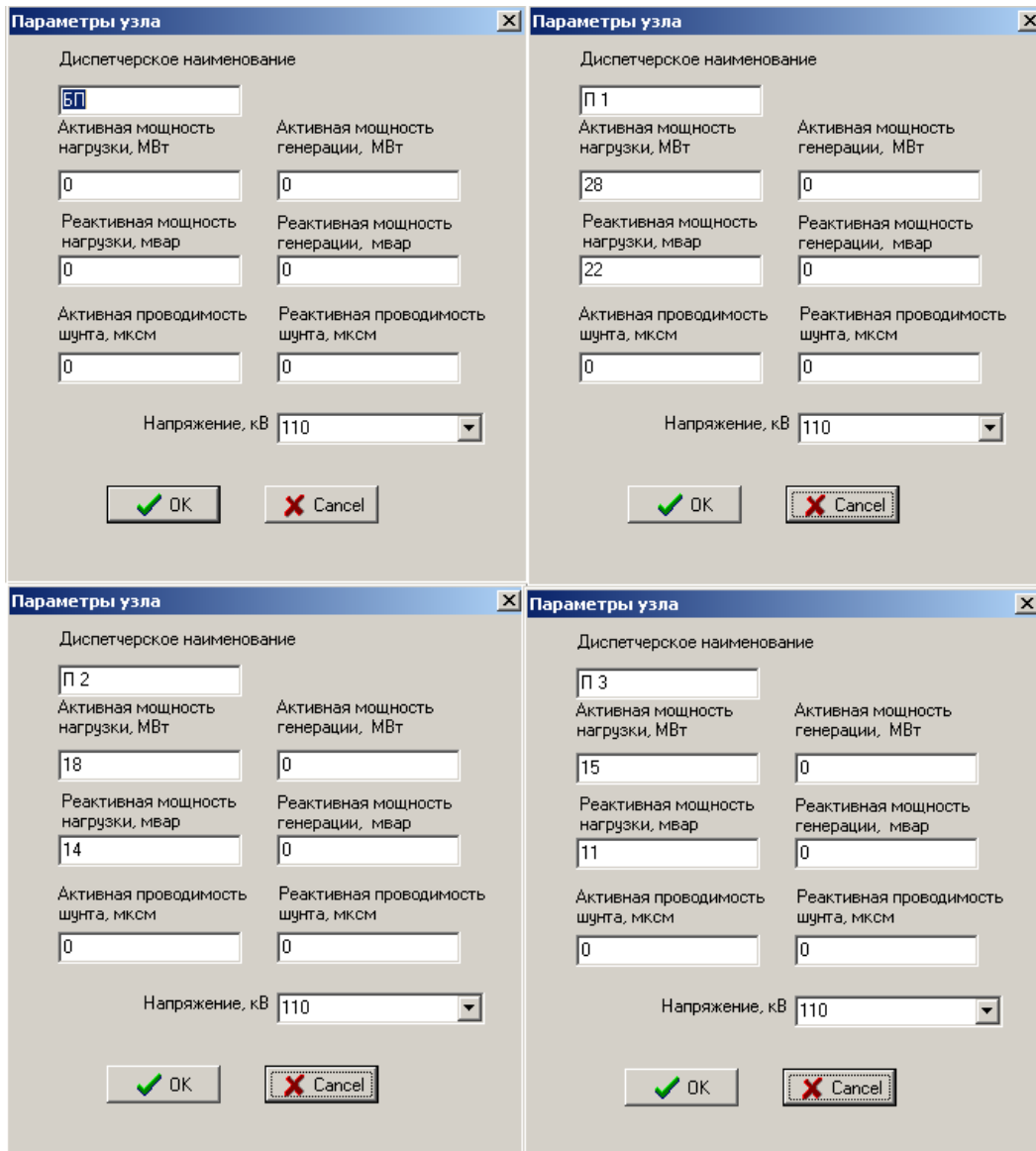


Рисунок 6.19. Параметры пунктов схемы мережі

Ділянки схеми можна проводити лише після розстановки пунктів. На рис. 6.20 вказані параметри усіх ділянок. Вказується диспетчерське найменування ділянки, задається її довжина, обирається марка провідника та кількість паралельних кіл. За замовчуванням усі ділянки виконуються одноколовими.

Послідовність дій для запуску моделювання проілюстровано на рис. 6.21. Перша дія: натискається Rastr – натискається БП – у діалоговому вікні вказується рівень напруги БП – натискається ОК.

Друга дія: натискається Sield – натискається БП – у діалоговому вікні натискається ОК.

Для отримання результатів моделювання натискається Режим.

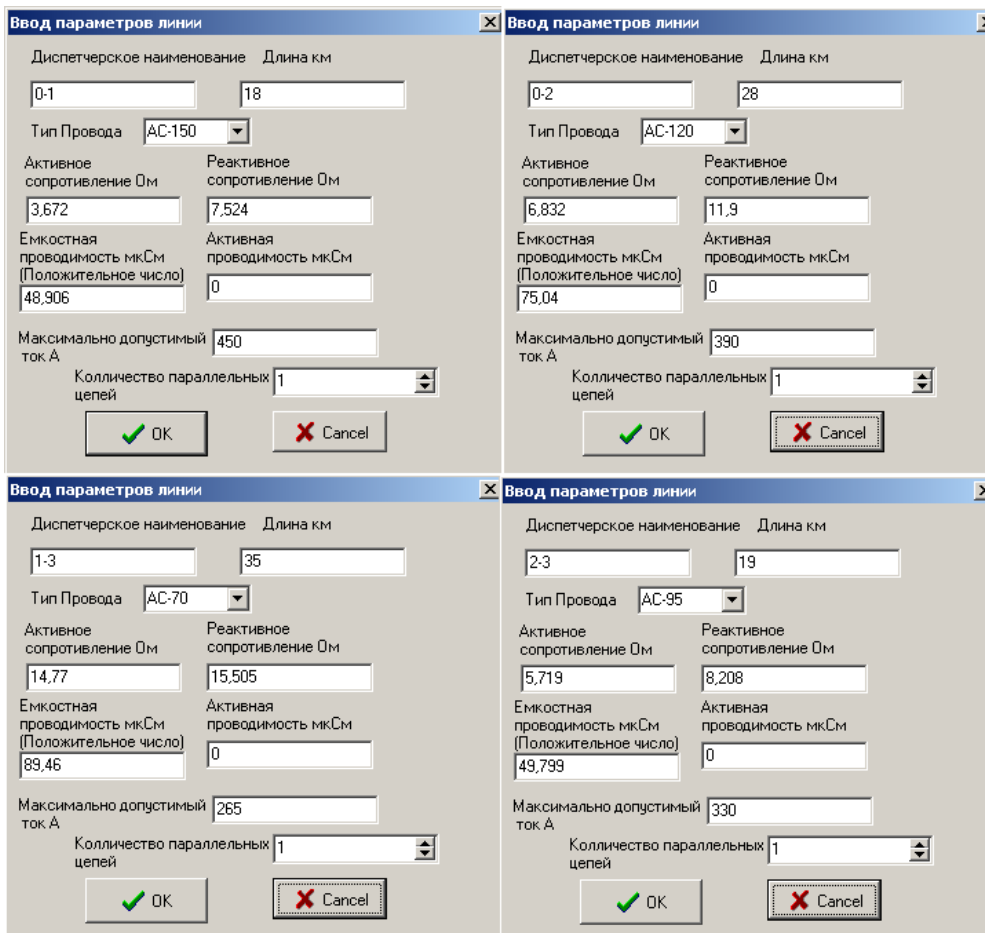


Рисунок 6.20. Параметры ділянок схеми мережі.

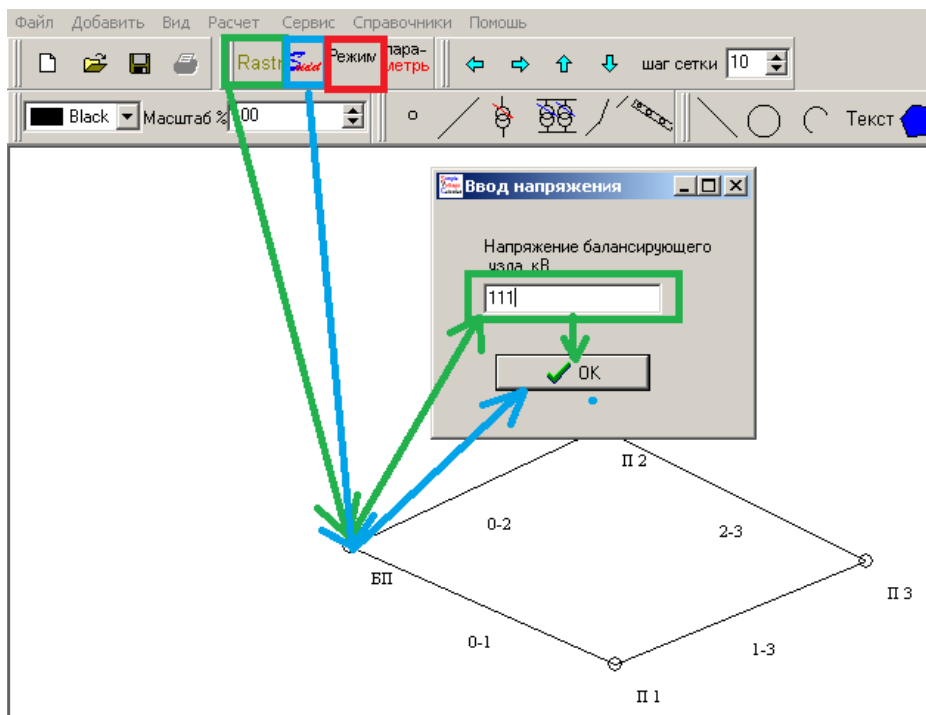


Рисунок 6.21. Запуск моделювання

Результати моделювання в робочому середовищі SVC та після експорту у Microsoft Excel виглядають однаково. В табл.6.3 показано результати моделювання, експортовані у Microsoft Excel.

По вузлах. Дається диспетчерське найменування пункту з необов'язковістю дотримання послідовності порядкових номерів; клас напруги, до якого належить пункт; модуль рівня напруги; фазовий кут рівня напруги; активна та реактивна потужності споживання; активна та реактивна потужності генерації.

По ділянках. Дається диспетчерське найменування ділянки з необов'язковістю дотримання будь-якої послідовності; активна та реактивна потужності на початку; втрати активної та реактивної потужності; втрата напруги; струм на початку; активна та реактивна потужності в кінці.

Таблиця 6.3. Результати моделювання

Вузли							
Пункт	Uном, кВ	U,кВ	Дельта град	Pн, МВт	Qн, мвар	Pген, МВт	Qген, мвар
БП	110	111	0	0	0	0	0
П 1	110	107,99	-0,8	28	22	0	0
П 2	110	107,22	-0,9	18	14	0	0
П 3	110	106,35	-1,0	15	11	0	0

Ділянки								
Ділянка	Pнач, МВт	Qнач, мвар	dP,МВт	dQ,мВт	dU,кВ	Iнач,кА	Pкон, МВт	Qкон, мвар
"0-2"	26,59	19,65	0,617	1,074	4,12	0,1720	25,98	19,47
"2-3"	7,98	5,47	0,048	0,069	0,92	0,0521	7,93	5,97
"0-1"	35,76	26,74	0,599	1,227	3,38	0,2323	35,16	26,10
"1-3"	7,16	4,10	0,092	0,097	1,69	0,0441	7,07	5,03

Варто зазначити, що SVC пропонує забагато знаків після коми. Результати в таблиці 6.3 були підправлені за кількістю розрядів таким чином, що рівні напруги та потоки потужності мають два знаки після коми, втрати потужності – три знаки, струм ділянки через те, що вимірюється в кА – чотири знаки і фазовий кут рівня напруги пункту – один знак після коми.

Інколи вручну доводиться переписувати диспетчерське найменування ділянок, оскільки може спрацювати заміна формату комірок в середовищі MS Excel.

На рис. 6.22 представлено результати, які не експортуються, а саме втрати потужності. Програма розрізняє навантажувальні втрати активної потужності в трансформаторах, втрати холостого ходу в трансформаторах, навантажувальні

втрати активної та реактивної потужності в лініях, втрати потужності у шунтах, якщо такі було задано в пунктах навантаження і сумарні втрати потужності всієї мережі.

The screenshot shows a window titled "Результаты расчета" (Calculation Results) with a tabbed interface. The "Потери" (Losses) tab is selected. The window displays the following data:

Parameter	Value	Parameter	Value
Суммарные потери активной мощности в трансформаторах, МВт	0	Суммарные потери активной мощности, МВт	1,355733952255
Суммарные потери активной мощности холостого хода, МВА	0	Суммарные потери реактивной мощности, мвар	-0,608555109257
Суммарные потери активной мощности в линиях, МВт	1,355733952255	Суммарная мощность активной генерации, МВт	62,355733873379
Суммарные потери реактивной мощности в линиях, мвар	2,467029680904	Суммарная мощность реактивной генерации, мвар	46,39144487262
Суммарные потери активной мощности в шунтах, МВА	0		
Суммарные потери реактивной мощности в шунтах, мвар	0		
Потребляемая активная мощность, МВт	61		
Потребляемая реактивная мощность, мвар	47		

At the bottom of the window, there are three buttons: "OK" (with a green checkmark), "Cancel" (with a red X), and "Экспорт результата в Excel" (Export result to Excel).

Рисунок 6.22. Сумарні втрати потужності

За результатами моделювання сумарні втрати активної потужності відповідають навантажувальним втратам в лініях. Навантажувальні втрати реактивної потужності в лініях носять індуктивний характер і повністю перекриваються зарядною потужністю ліній, якої є надлишок.

Індивідуальне завдання

Частина 1. Керуючись інформацією з табл. 6.1, створити в довіднику класи напруг 6 кВ, 10 кВ, 35 кВ, 110 кВ та 330 кВ.

Частина 2. На рис. 6.23 представлено схему для індивідуального завдання. В таблиці 6.4 представлено вихідні дані для елементів схем. Номер рядка вихідних даних задається викладачем. Виконати розрахунок необхідних параметрів для вводу в середовище SVC (опори 110 кВ зображено на рис. 6.14), виконати моделювання, отримати результати, експортувати результати в Excel, обчислити втрати потужності та порівняти їх із наведеними програмою. Схема

належить до класу напруги 110 кВ, напругу БП обрати самостійно з діапазону 111...121 кВ.

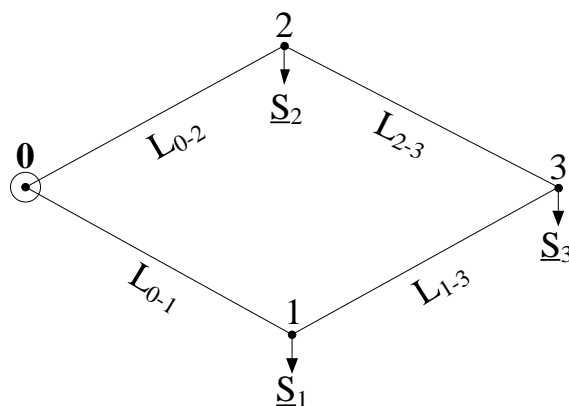


Рисунок 6.23. Схема для дослідження

Таблиця 6.4. Вихідні дані

№ варіанту	Навантаження пунктів. P, МВт. Q, МВАр (інд)			Параметри ділянок. Марка проводу/довжина (км)			
	1	2	3	"0-1"	"0-2"	"1-3"	"2-3"
1	2	3	4	5	6	7	8
1	36	22	36	АС-240	АС-185	АС-70	АС-50
	-15	-31	-31	38	48	31	52
2	28	26	22	АС-185	АС-150	АС-95	АС-70
	-25	-18	-30	44	43	25	48
3	32	36	32	АС-120	АС-185	АС-50	АС-70
	-14	-31	-19	48	53	30	51
4	28	22	29	АС-150	АС-240	АС-70	АС-95
	-23	-13	-12	35	27	33	29
5	21	30	34	АС-185	АС-120	АС-95	АС-50
	-28	-20	-13	46	43	53	48
6	26	32	18	АС-240	АС-120	АС-50	АС-70
	-22	-21	-11	20	53	29	47
7	24	27	30	АС-150	АС-240	АС-70	АС-50
	-12	-27	-25	24	42	36	22
8	36	18	34	АС-120	АС-150	АС-95	АС-70
	-11	-18	-30	21	49	45	26
9	31	31	24	АС-240	АС-185	АС-50	АС-95
	-15	-17	-21	27	48	24	40
10	27	31	27	АС-150	АС-120	АС-70	АС-50
	-25	-11	-20	43	52	29	23

Таблица 6.4. Продовження

1	2	3	4	5	6	7	8
12	17	24	22	АС-185	АС-240	АС-70	АС-95
	-19	-20	-30	26	40	27	36
13	32	23	27	АС-120	АС-240	АС-95	АС-50
	-12	-26	-28	20	42	40	30
14	34	29	29	АС-185	АС-150	АС-50	АС-95
	-30	-20	-23	23	52	28	48
15	35	21	30	АС-150	АС-185	АС-95	АС-50
	-28	-18	-27	19	52	32	37
16	19	25	35	АС-240	АС-120	АС-50	АС-70
	-22	-25	-30	35	26	32	36
17	30	24	31	АС-120	АС-185	АС-70	АС-50
	-23	-18	-21	20	21	37	45
18	24	34	17	АС-240	АС-150	АС-95	АС-95
	-28	-12	-27	25	48	18	40
19	24	32	23	АС-150	АС-120	АС-50	АС-95
	-13	-28	-12	35	22	39	23
20	27	34	34	АС-120	АС-240	АС-95	АС-70
	-23	-16	-24	31	41	41	31
21	32	36	22	АС-185	АС-120	АС-70	АС-50
	-12	-25	-17	31	24	37	29
22	34	33	35	АС-150	АС-185	АС-50	АС-95
	-31	-20	-17	45	53	42	37
23	21	25	36	АС-240	АС-185	АС-95	АС-70
	-18	-14	-24	31	45	42	30
24	36	35	19	АС-120	АС-240	АС-50	АС-70
	-20	-26	-24	34	41	20	30
25	28	20	29	АС-240	АС-150	АС-70	АС-95
	-26	-25	-17	29	46	46	37
26	25	24	25	АС-150	АС-120	АС-95	АС-50
	-17	-31	-24	47	43	36	46
27	34	36	22	АС-240	АС-185	АС-70	АС-95
	-28	-31	-23	48	27	50	37
28	18	17	24	АС-120	АС-150	АС-50	АС-70
	-21	-11	-22	18	53	28	25
29	26	33	17	АС-185	АС-240	АС-95	АС-50
	-27	-17	-25	25	39	47	53
30	20	31	36	АС-150	АС-240	АС-70	АС-95
	-17	-27	-22	38	43	32	26

Тема №7

ВИБІР ПЕРЕРІЗІВ ПРОВОДІВ ТА РОЗРАХУНОК ПАРАМЕТРІВ УСТАЛЕНИХ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНОЇ МЕРЕЖІ ОДНОГО КЛАСУ НОМІНАЛЬНОЇ НАПРУГИ

Мета роботи: розрахунок струморозподілу схеми за довжинами ділянок, розрахунок L-схеми мережі, обчислення значень функції сумарних дисконтованих затрат для кожної ділянки для відповідної марки провідника, здійснення моделювання режиму роботи схеми мережі з обраними марками проводів.

Теоретичні положення

Одним з типових робочих завдань електричних мереж є визначення оптимальної конфігурації схеми, яка має зв'язати між собою пункти навантаження, нанесені на деякій карті чи ситуаційному плані, рис. 7.1. Частковим випадком такого завдання є розгляд можливих варіантів приєднання до вже існуючої схеми однієї-двох-трьох тощо нових пунктів (підстанцій) навантаження.

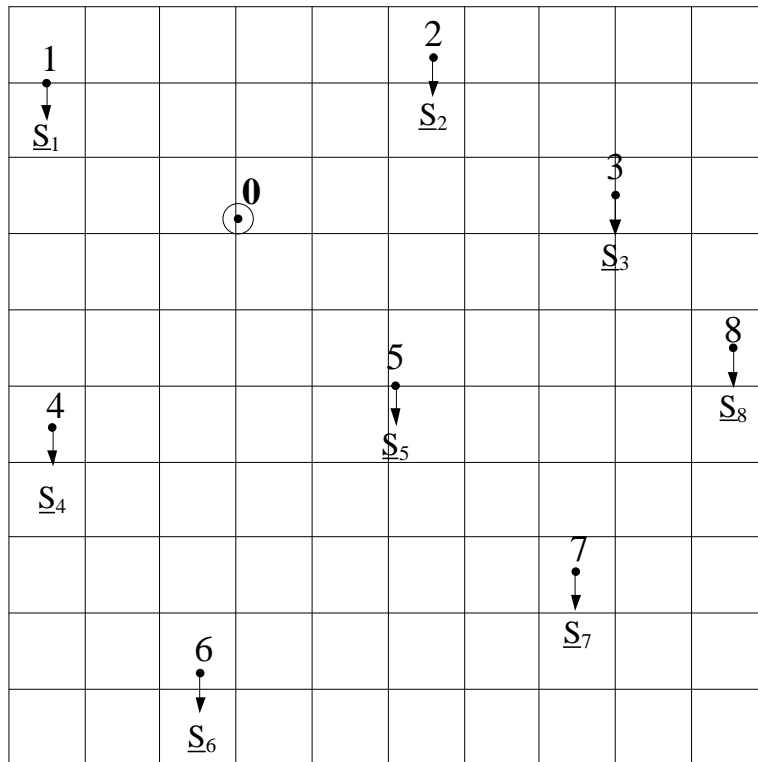


Рисунок 7.1. Ситуаційний план. М 1 см:10 км

Для вибору оптимальної конфігурації можна скористатися методом моментів навантаження, орієнтуючись на найменше значення такого моменту та на мінімум сумарної довжини всіх ліній. Якщо механічний момент – це добуток сили на довжину плеча від точки обертання до лінії дії сили, то в моменті навантаження потужність споживання в кінці ділянки є аналогом сили а довжина ділянки – плечем. Граничні значення таких моментів для двох-, трьох-, чотирьохконтурних схем мереж зазвичай різні.

На наступному кроці, для всіх варіантів виконання схеми мережі виконується розрахунок струморозподілу чи потокорозподілу потужностей ділянками схеми за довжинами. Так званий розрахунок L-схеми. Він виконується з метою визначення перерізу провідника, який використовуватиметься на кожній ділянці схеми, базуючись на величині струму чи потужності ділянки, отриманій за допомогою такого розрахунку.

L-схема є однією з моделей електрично однорідної мережі, тобто мережі в якій всі ділянки виконано провідником одного перерізу, однієї марки. Вся мережа є кабельною або повітряною – має однакове конструктивне виконання.

SVC дає можливість виконати розрахунок L-схеми для отримання струмів ділянок і подальшого визначення перерізів і марки провідників на цих ділянках. Програма вимагає задати якісь параметри щодо повздовжнього опору, тому для районної мережі 110 кВ, в якості початкового ідеального провідника, приймемо двоколове виконання усіх ділянок провідником АС-240. Для спрацювання розрахунку, у полі "Довжина" задаватимуться відповідні довжини ділянок з множителем "е-6". На етапі розрахунку L-схеми напруга БП приймається номінальною.

За результатом розрахунку струморозподілу за довжинами, L-схеми, отримуються струми ділянок, які потрібні для отримання розрахункового значення перерізу. Виходячи зі значення струму та розрахункової величини перерізу, виконується розрахунок функції дисконтованих затрат для перерізів. Для подальшої роботи приймається найменше значення функції. Схема, для якої сума всіх функцій матиме найменше значення, прийматиметься для подальшого розгляду.

Розрахункове значення перерізу провідника на ділянці визначається за виразом:

$$F_{роз} = \frac{1}{k} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot I_{i-j}^2 \cdot \rho_{Al} \cdot \tau \cdot C_{ex}}{k_{nut. зм} \cdot (H_e + E)}} \quad (7.1)$$

де k – кількість паралельних кіл ділянки, $k=1$ або $k=2$;

I_{i-j} – струм ділянки за результатами розрахунку L-схеми, А;

ρ_{Al} – питомий опір алюмінію, Ом·мм²/км;

τ – час максимальних втрат, год;

C_{ex} – тариф на входів мережу, грн./(кВт·год);

$k_{\text{ннт.зм.}}$ – питомі змінні витрати на спорудження 1 км лінії на 1 мм² перерізу грн./((мм²·км). Розрізняють для одно- і двоколових ліній;

H_e – норма видатків на експлуатацію та ремонт ліній, %;

E – норма дисконту, $E=0,1$.

Час максимальних втрат визначається з графіку навантаження лінії, який отримується із графіків навантаження в пунктах схеми. За відсутності такої інформації зазвичай надається кількість годин використання максимуму навантаження, T_{max} , звідки час максимальних втрат визначається:

$$\tau = \left(0,124 + \frac{T_{\text{max}}}{10000} \right)^2 \cdot 8760 \quad (7.2)$$

Від отриманого розрахункового значення перерізу на ділянці потрібно перейти до нормованого, виходячи з номенклатури, для схеми даного класу напруги. Це здійснюється шляхом визначення величини функції сумарних дисконтованих затрат для можливих нормованих перерізів, величини яких споріднені із отриманим розрахунковим значенням перерізу. Функція сумарних дисконтованих затрат складається із капітальних вкладень в спорудження електроенергетичного об'єкту та видатків на експлуатацію і ремонт та покриття втрат активної енергії (7.3).

$$Z = K + \frac{B}{E} = K + \frac{B_{\text{експ}} + B_{\text{втр. е/е}}}{E} \quad (7.3)$$

Капітальні вкладення - одинця довжини лінії має свою вартість. Чим довша лінія, тим більші капітальні вкладення. Видатки на експлуатацію та ремонт визначаються показником-нормою експлуатаційних видатків, які становлять певну частину від капітальних затрат. Чим більші капітальні затрати, тим більші видатки на експлуатацію. Щодо видатків на покриття втрат активної енергії: струм ділянки, протікаючи опором викликає нагрів провідника, тобто втрати потужності. Для втрат активної енергії потрібно врахувати час. Якби був графік навантаження лінії, то можна було б втрати вирахувати з нього. А так доводиться користуватися емпіричним показником під назвою "час максимальних втрат." З урахуванням тарифу на вході в мережу отримуємо величину видатків на покриття втрат активної електричної енергії (7.4).

$$Z = K_0 \cdot L_{i-j} + \frac{H_e \cdot K_0 \cdot L_{i-j}}{100 \cdot E} + \frac{3 \cdot I_{i-j}^2 \cdot r_0 \cdot L_{i-j} \cdot \tau \cdot C_{\text{ex}}}{E} \quad (7.4)$$

Варто звернути увагу, що виключно функцією сумарних дисконтованих затрат, без додаткових умов можна вийти лише на двоколову ділянку АС-240. На двоколові АС-70 та АС-120 без додаткових умов вийти неможливо. Дані перерізи стосуються виключно схеми мережі номінальної напруги 110 кВ.

Для певної зручності чи спрощення запису схеми у деякому математичному середовищі можна застосувати перетворення 7.5 та 7.6, шляхом винесення за дужки спільних множників:

$$Z = L \cdot \left(K_0 + \frac{H_e \cdot K_0}{100 \cdot E} + \frac{3 \cdot I^2 \cdot r_0 \cdot \tau \cdot U_{ex}}{E} \right) \quad (7.5)$$

$$Z = L \cdot \left(K_0 \cdot \left(1 + \frac{H_e}{100 \cdot E} \right) + \frac{3 \cdot I^2 \cdot r_0 \cdot \tau \cdot U_{ex}}{E} \right) \quad (7.6)$$

Визначивши на кожній ділянці величини функцій сумарних дисконтованих затрат для можливих перерізів, переріз провідника на ділянці обирається, виходячи із найменшого значення функції. Наступним пунктом є визначення погонних параметрів провідників. Для програмного комплексу SVC, створюється відповідний довідник перерізів, на кожній ділянці задається відповідна марка провідника і виконується розрахунок режиму роботи схеми мережі. Детальніше розглянемо на прикладі.

Практична частина

Для схеми на ситуаційному плані, рис.7.2, обрати перерізи провідників на ділянках, базуючись на результатах розрахунку L-схеми, та виконати розрахунок режиму максимальних навантажень. Схема належить до районних електричних мереж напругою 110 кВ.

Додатково вказуються коефіцієнти потужності сторін трансформаторів та кількість годин використання максимуму навантаження:

$$T_{\max} = 4376 \text{ год}; \cos(\varphi_{CH}) = 0,84 \quad \cos(\varphi_{HH}) = 0,88 \quad \cos(\varphi_{ГЕН}) = 0,8.$$

Для зручності і наочності, довжини ділянок вже нанесені на плані. Як видно, в пунктах навантаження представлено двох- і трьох обмоткові трансформатори, але для розрахунку L-схеми це не є критичним, буде сформовано еквівалентне навантаження пунктів.

Розрахунок навантажень пунктів виконується в табличній формі, виходячи із активної потужності споживання кожної сторони трансформатора та зазначеного для сторони коефіцієнту потужності, табл. 7.1. Варто нагадати, що маючи активну складову навантаження сторони та коефіцієнт потужності, реактивна складова визначатиметься:

$$Q_{CH(HH)} = \pm P_{CH(HH)} \cdot \operatorname{tg}(\varphi_{CH(HH)}) = \pm P_{CH(HH)} \cdot \operatorname{tg}(\arccos(\varphi_{CH(HH)})) \quad (7.7)$$

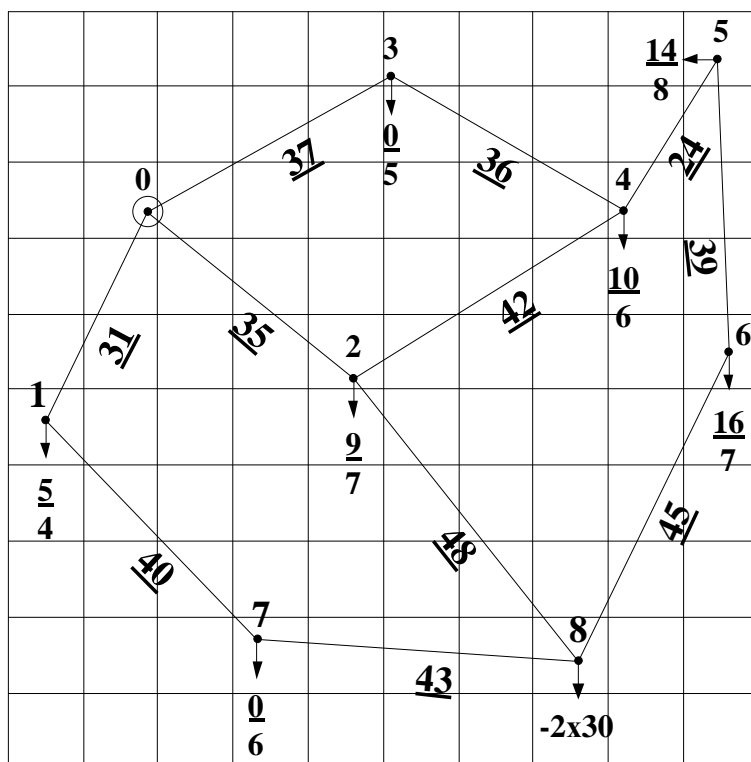


Рисунок 7.2. Схема для дослідження

Таблиця 7.1. Навантаження пунктів схеми мережі

№ пункту	P, МВт		Q, МВАр		S, МВА	
	СН	НН	СН	НН	ВН, МВт	ВН, МВАр
1	5	4	3,23	2,16	9	5,39
2	9	7	5,81	3,78	16	9,59
3	0	5	0	2,70	5	2,70
4	10	6	6,46	3,24	16	9,70
5	14	8	9,04	4,32	22	13,36
6	16	7	10,33	3,78	23	14,11
7	0	7	0	3,78	7	3,78
8	0	60	0	32,38	60	32,38

Зібрану в програмному середовищі SVC представлено на рис.7.3. На рис. 7.4 представлено параметри двох вузлів навантаження, а на рис. 7.5 – ділянки для виконання розрахунку струморозподілу за довжинами. Було створено розрахунковий провідник, що відповідає найбільшому перерізу для мережі 110 кВ. Для L-схеми довжину ділянки було помножено «е-б».

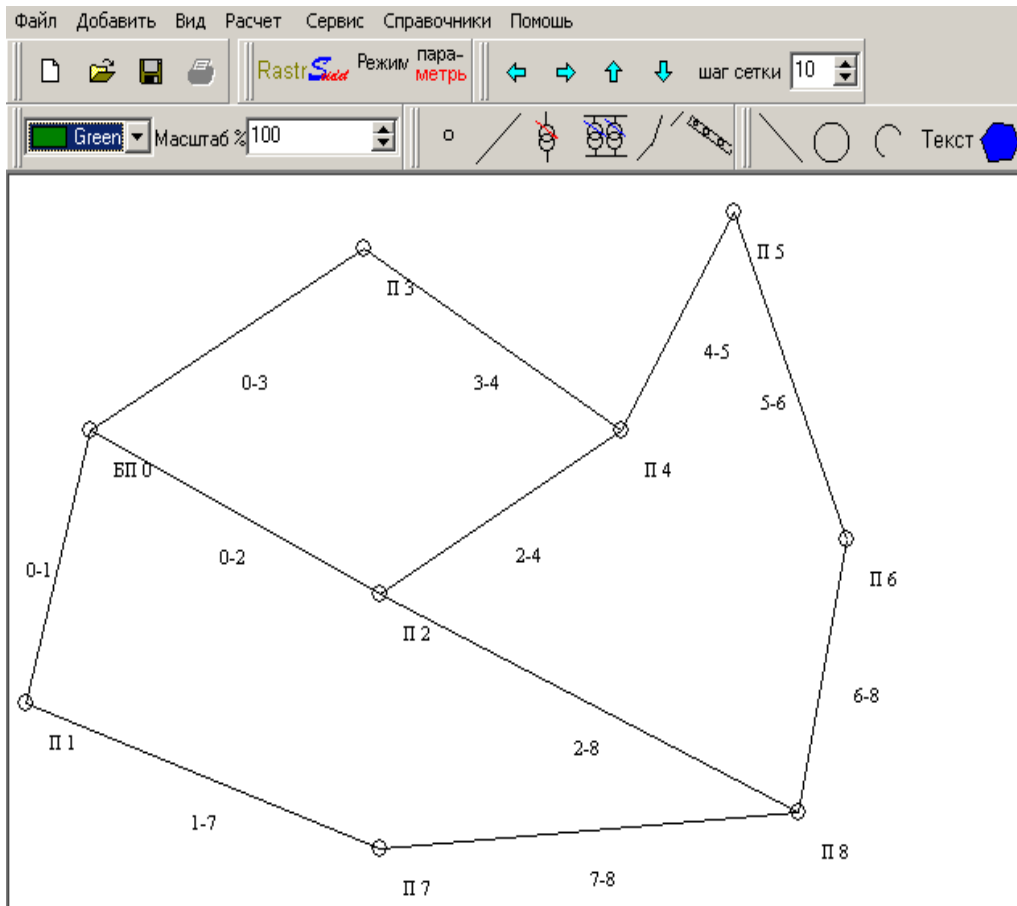


Рисунок 7.3. Схема в SVC

Параметры узла		Параметры узла	
Диспетчерское наименование		Диспетчерское наименование	
<input type="text" value="П 3"/>	<input type="text" value="П 8"/>		
Активная мощность нагрузки, МВт	Активная мощность генерации, МВт	Активная мощность нагрузки, МВт	Активная мощность генерации, МВт
<input type="text" value="5"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="60"/>
Реактивная мощность нагрузки, мвар	Реактивная мощность генерации, мвар	Реактивная мощность нагрузки, мвар	Реактивная мощность генерации, мвар
<input type="text" value="2,7"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="32,38"/>
Активная проводимость шунта, мксм	Реактивная проводимость шунта, мксм	Активная проводимость шунта, мксм	Реактивная проводимость шунта, мксм
<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>	<input type="text" value="0"/>
Напряжение, кВ <input type="text" value="110"/>		Напряжение, кВ <input type="text" value="110"/>	
<input type="button" value="OK"/>	<input type="button" value="Cancel"/>	<input type="button" value="OK"/>	<input type="button" value="Cancel"/>

Рисунок 7.4. Пункты схемы для досліджень

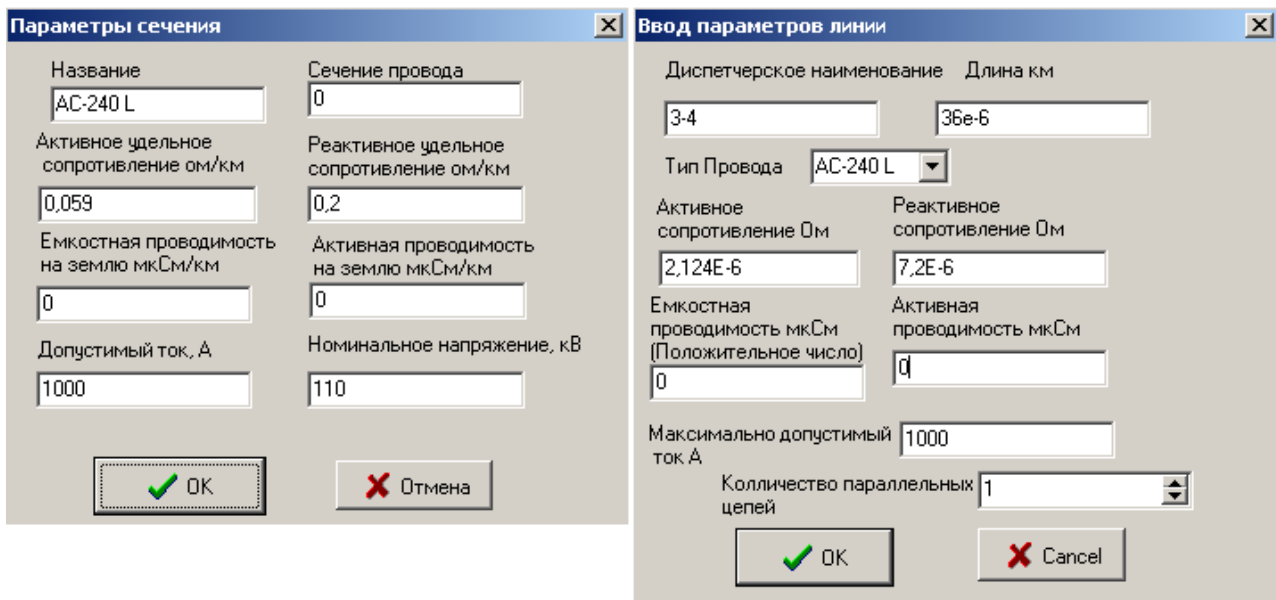


Рисунок 7.5. Перерізи ділянок L-схемі та запис довжини

За результатами моделювання отримано струми ділянок, розрахунки експортовано до Microsoft Excel, табл. 7.2. Струми ділянок надаються в кА, тому їх варто перевести в А, шляхом множення на 1000. За виразом (7.1) визначається переріз. Час максимальних втрат за (7.2)

$$\tau = \left(0,124 + \frac{4376}{10000} \right)^2 \cdot 8760 = 2762,86 (\text{год})$$

Таблиця 7.2. Струми ділянок та перерізи

Ділянка	Інач, кА	І, А	Довжина, км	Гроз, мм ²
"0-3"	0,110921382	110,92	37	281,54
"0-2"	0,087786623	87,79	35	222,82
"3-4"	0,08196795	81,97	36	208,05
"2-4"	0,09494764	94,95	42	241,00
"0-1"	0,038746332	38,75	31	98,35
"1-7"	0,01724713	17,25	40	43,78
"7-8"	0,058480099	58,48	43	148,43
"6-8"	0,195715087	195,72	45	496,76
"5-6"	0,054952947	54,95	39	139,48
"4-5"	0,080372186	80,37	24	204,00
"2-8"	0,105075967	105,08	48	266,70

На рис. 7.6 проілюстровано обчислення перерізів ділянок схеми в середовищі Microsoft Excel, куди було експортовано результати моделювання. На початку розрахунку всі ділянки прийнято одноколовими, тому перед коренем множник 1/1 не враховувався.

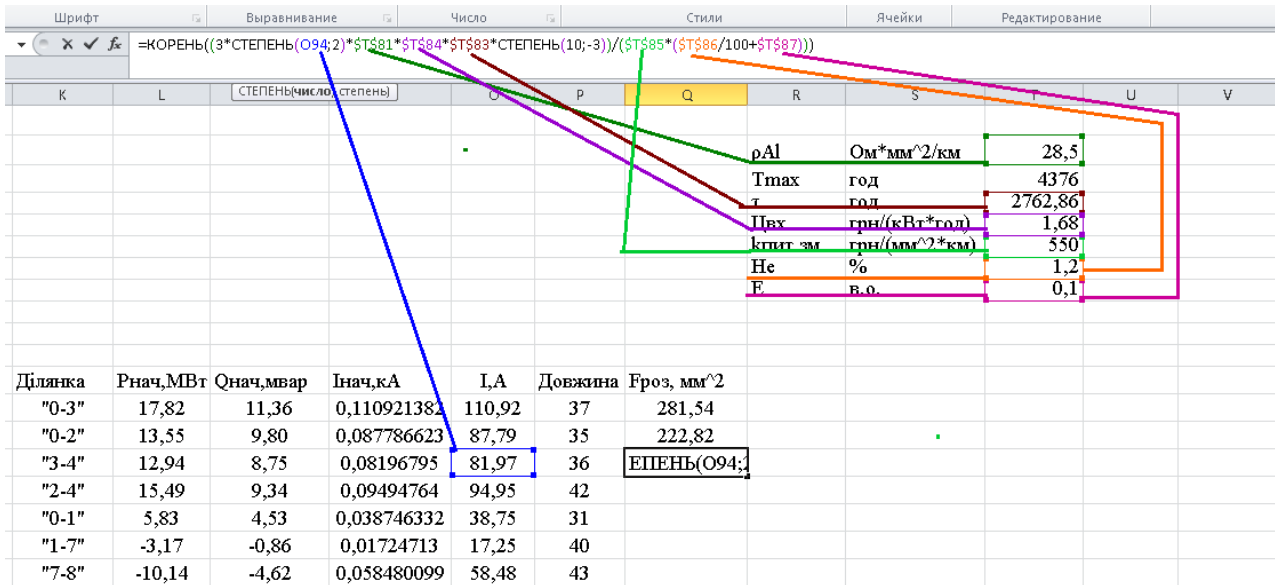


Рисунок 7.6. Розрахунковий переріз ділянок

На кожній ділянці потрібно обчислити значення функції сумарних дисконтованих затрат для перерізів з номенклатури, що відповідають даному класу напруги. Skorистаємося виразами (7.4) – (7.6), попередньо виконавши корективу. Оскільки тариф дається за кВт, а добуток $3 \cdot I^2 \cdot r_0$ дає у результаті Вт, то вводиться множник 10^{-3} . Оскільки тариф $C_{\text{вх}}$ у гривнях а капітальні затрати в тисячах гривень, то вводиться другий множник 10^{-3} , (7.6):

$$Z = K_0 \cdot L + \frac{H_e \cdot K_0 \cdot L}{100 \cdot E} + \frac{3 \cdot I^2 \cdot r_0 \cdot L \cdot 10^{-3} \cdot \tau \cdot C_{\text{вх}} \cdot 10^{-3}}{E} \quad (7.8)$$

Зводяться подібні доданки та виносяться множники за дужки:

$$Z = L \cdot \left(K_0 + \frac{H_e \cdot K_0}{100 \cdot E} + \frac{3 \cdot I^2 \cdot r_0 \cdot \tau \cdot C_{\text{вх}} \cdot 10^{-6}}{E} \right) \quad (7.9)$$

$$Z = L \cdot \left(K_0 \cdot \left(1 + \frac{H_e}{100 \cdot E} \right) + \frac{3 \cdot I^2 \cdot r_0 \cdot \tau \cdot C_{\text{вх}} \cdot 10^{-6}}{E} \right) \quad (7.10)$$

За результатами табл.7.2 та з урахуванням (7.8), здійснюється розрахунок функції сумарних дисконтованих затрат в середовищі Microsoft Excel для всіх можливих перерізів на кожній ділянці. Починається з АС-70 на першій

представленій ділянці 0-3, рис.7.7 і завершується двоколовою АС-240 на останній в переліку 2-8, рис. 7.8.

Результати розрахунку функції сумарних дисконтованих затрат для кожного перерізу на ділянках представлено в табл.7.3, мінімум функції для ділянки та висновок про оптимальний переріз – в табл.7.4.

За результатами порівнянь значень функції сумарних дисконтованих затрат на кожній ділянці отримано дві марки провідників з відповідними перерізами: АС-120 та АС-240, погонні параметри яких представлено в табл. 7.5. Електричну опору було взято з попереднього заняття, рис. 6.16. Відповідні параметри було внесено до довідника програми SVC, рис. 7.9.

Ділянка	Рнач,МВт	Qнач,мвар	Інач,кА	І,А	Довжина	Гроз, мм ²	АС-70	АС-2x70	АС-120	АС-2x120	АС-240
"0-3"	17,82	11,36	0,110921382	110,92	37	281,54					
"0-2"	13,55	9,80	0,087786623	87,79	35	222,82					
"3-4"	12,94	8,75	0,08196795	81,97	36	208,05					
"2-4"	15,49	9,34	0,09494764	94,95	42	241,00					

Рисунок 7.7. Визначення функції сумарних дисконтованих затрат для АС-70 ділянки 0-3

Ділянка	Рнач,МВт	Qнач,мвар	Інач,кА	І,А	Довжина	Гроз, мм ²	АС-70	АС-2x70	АС-2x240
"6-8"	32,19	18,82	0,195715087	195,72	45	496,76			
"5-6"	-9,31	-4,79	0,054952947	54,95	39	139,48			
"4-5"	12,69	8,57	0,080372186	80,37	24	204,00			
"2-8"	-17,85	-9,07	0,105075967	105,08	48	266,70			

Рисунок 7.8. Визначення функції сумарних дисконтованих затрат для двоколової АС-240 ділянки 2-8

Таблиця 7.3. Сумарні дисконтовані затрати для перерізів ділянок

Ділянка	I, А	Довжина	Ф _{роз} , мм ²	АС-70	АС-2х70	АС-120	АС-2х120	АС-240	АС-2х240
"0-3"	110,92	37	281,54	51117,32	47480,42	39999,65	42253,11	32613,39	39332,83
"0-2"	87,79	35	222,82	38899,48	40186,54	32370,79	37235,79	28206,76	35884,86
"3-4"	81,97	36	208,05	37921,36	40289,96	32087,50	37695,59	28428,39	36618,00
"2-4"	94,95	42	241,00	49908,95	49838,64	40712,28	45616,62	34751,17	43513,36
"0-1"	38,75	31	98,35	23150,15	29941,96	22135,49	29712,39	21822,38	30203,36
"1-7"	17,25	40	43,78	27041,59	37219,99	26925,87	37520,54	27366,71	38576,47
"7-8"	58,48	43	148,43	36959,52	43956,40	33507,19	42615,52	31625,37	42572,79
"6-8"	195,72	45	496,76	130924,23	92123,72	88402,02	71265,81	58890,13	57449,82
"5-6"	54,95	39	139,48	32604,51	39408,97	29860,08	38386,20	28427,08	38484,33
"4-5"	80,37	24	204,00	24915,56	26677,30	21180,42	25024,77	18850,10	24360,92
"2-8"	105,08	48	266,70	62753,08	59815,58	49832,31	53785,28	41313,45	50528,47

Таблиця 7.4. Мінімум функції сумарних дисконтованих затрат та оптимальний переріз

Ділянка	I, А	Довжина	Ф _{роз} , мм ²	З _{мін} , тис.грн	Ф _{опт}
"0-3"	110,92	37	281,54	32613,39	АС-240
"0-2"	87,79	35	222,82	28206,76	АС-240
"3-4"	81,97	36	208,05	28428,39	АС-240
"2-4"	94,95	42	241,00	34751,17	АС-240
"0-1"	38,75	31	98,35	21822,38	АС-240
"1-7"	17,25	40	43,78	26925,87	АС-120
"7-8"	58,48	43	148,43	31625,37	АС-240
"6-8"	195,72	45	496,76	57449,82	АС-2х240
"5-6"	54,95	39	139,48	28427,08	АС-240
"4-5"	80,37	24	204,00	18850,10	АС-240
"2-8"	105,08	48	266,70	41313,45	АС-240

Таблиця 7.5. Погонні параметри провідників

		АС-120	АС-240
d_0	мм	15,2	21,6
$\Delta P_{к0}$	кВт/км	0,08	0,08
r_0	Ом/км	0,244	0,118
x_0	Ом/км	0,425	0,403
g_0	См/км	$6,612 \cdot 10^{-9}$	$6,612 \cdot 10^{-9}$
b_0	См/км	$2,668 \cdot 10^{-6}$	$2,820 \cdot 10^{-6}$

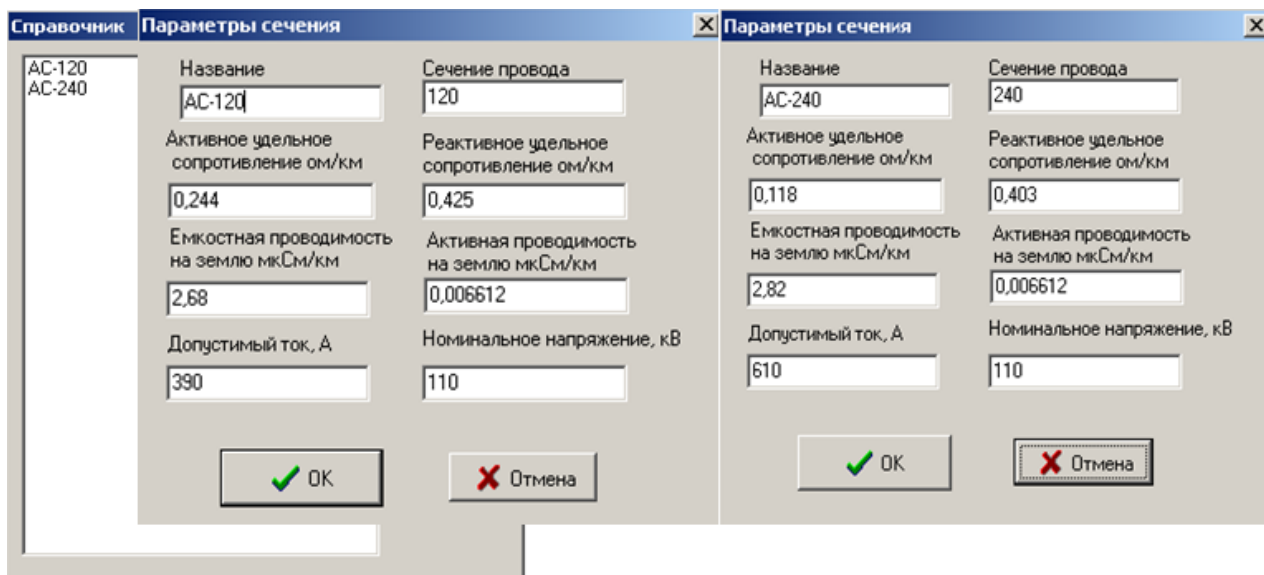


Рисунок 7.9. Довідник та погонні параметри провідників

Пройшовши ділянками схеми мережі, прибираються множники «е-б» з довжини, виставляється марка провідника АС-240 крім двох, на всіх ділянках. Ділянка 1-7 має провідник АС-120 а ділянка 6-8 має бути двоколовою, рис. 7.10.

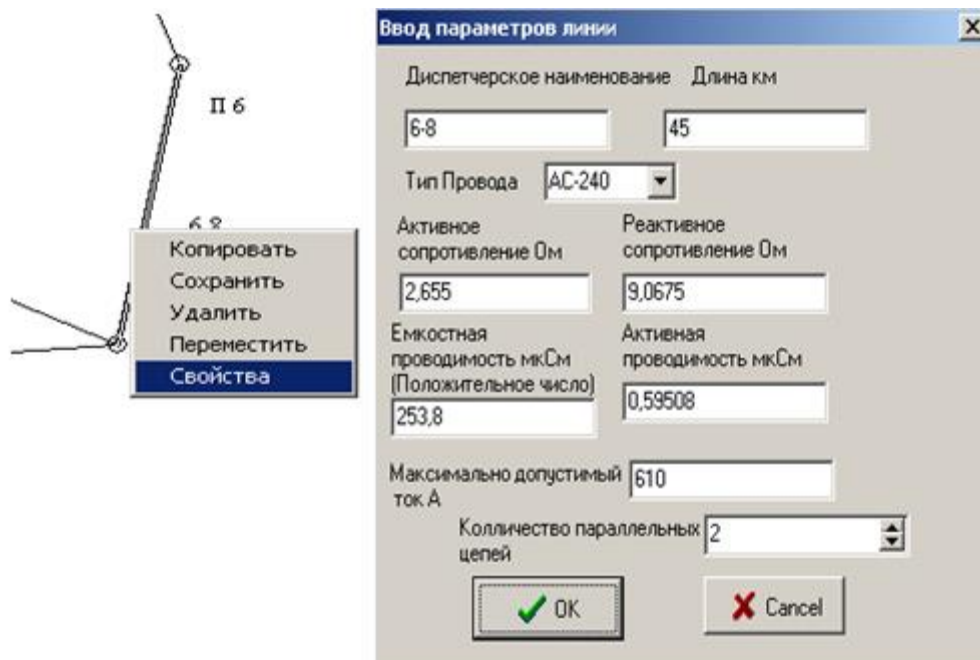


Рисунок 7.10. Довжина ділянки, марка провідника та кількість кіл

Виконується розрахунок режиму тепер Z-схеми. Напругу БП прийнято на рівні 111,5 кВ, результати розрахунку експортовано в Microsoft Excel та по вузлах і ділянках представлено в табл. 7.6, сумарні втрати потужності представлено на рис. 7.11.

Таблиця 7.6. Результати розрахунку Z-схеми

Вузли							
Вузол	U _{ном} ,кВ	U,кВ	Дельта гр	P _н , МВт	Q _н , мвар	P _{ген} , МВт	Q _{ген} , мвар
БП 0	110	111,5	0	0	0	0	0
П 3	110	109,84	-1,0	5	2,7	0	0
П 5	110	108,06	-2,0	22	13,36	0	0
П 4	110	108,64	-1,7	16	9,7	0	0
П 2	110	110,23	-0,9	16	9,59	0	0
П 1	110	111,00	-0,4	9	5,39	0	0
П 7	110	111,43	-0,4	7	3,78	0	0
П 8	110	112,50	0,2	0	0	60	32,38
П 6	110	109,88	-1,1	23	14,11	0	0

Таблиця 7.6. Продовження.

Ділянки								
Ділянка	Рнач,МВт	Qнач,мвар	dP,МВт	dQ,МВт	dU,кВ	Iнач,кА	Ркон, МВт	Qкон, мвар
"0-3"	16,74	6,99	0,119	0,406	2,564	0,0939	16,62	7,86
"0-2"	14,66	5,20	0,083	0,282	2,078	0,0805	14,57	6,13
"3-4"	11,62	5,16	0,059	0,202	1,786	0,0668	11,56	6,17
"2-4"	12,51	6,10	0,083	0,283	2,280	0,0729	12,43	7,24
"0-1"	7,69	1,68	0,019	0,064	0,934	0,0407	7,66	2,69
"1-7"	-1,34	-2,70	0,005	0,008	0,430	0,0157	-1,34	-1,38
"7-8"	-8,34	-5,16	0,036	0,124	1,529	0,0508	-8,38	-3,76
"6-8"	37,55	20,30	0,396	1,354	3,650	0,2190	37,14	22,09
"5-6"	-14,03	-8,92	0,105	0,357	2,470	0,0889	-14,14	-7,98
"4-5"	7,99	3,71	0,019	0,066	0,833	0,0468	7,97	4,44
"2-8"	-13,94	-9,56	0,126	0,431	3,009	0,0885	-14,07	-8,32

Результаты расчета

Узлы | Ветви | Потери | Трансформаторы

Суммарные потери активной мощности в трансформаторах, МВт: 0

Суммарные потери активной мощности холостого хода, МВА: 0

Суммарные потери активной мощности в линиях, МВт: 1,087687524145

Суммарные потери реактивной мощности в линиях, мвар: 3,578443027964

Суммарные потери активной мощности в шунтах, МВА: 0

Суммарные потери реактивной мощности в шунтах, мвар: 0

Потребляемая активная мощность, МВт: 98

Потребляемая реактивная мощность, мвар: 58,63

Суммарные потери активной мощности, МВт: 1,125288257322

Суммарные потери реактивной мощности, мвар: -12,38889955809

Суммарная мощность активной генерации, МВт: 99,087687120370

Суммарная мощность реактивной генерации, мвар: 46,24110012782

OK Cancel Экспорт результата в Excel

Рисунок 7.11. Сумарні втрати потужності

Індивідуальне завдання

Виконати розрахунок струморозподілу за довжинами ділянок, розрахунок L-схеми мережі; визначити розрахунковий та оптимальний перерізи провідників на ділянках за результатами розрахунку L-схеми; виконати розрахунок параметрів Z-схеми заміщення електричної мережі; виконати розрахунок режиму максимальних навантажень на основі параметрів Z-схеми заміщення електричної мережі.

В табл.7.8 представлено коефіцієнти навантаження сторін та кількість годин використання максимуму навантаження для різних варіантів. Варіанти схем представлено нижче. Номер варіанту задається викладачем.

Основні довідкові дані:

- номінальна напруга мережі 110 кВ;
- діапазон напруги БП – 111..121 кВ;
- питомий опір алюмінію – 28,5 Ом·мм²/км;
- питомі втрати на корону – 0,08 кВт/км;
- опори 110 кВ прийняти з рис. 6.14;
- тариф на вході в мережу – 1,86 грн/(кВт·год);
- питомі змінні витрати на спорудження 1 км лінії:
 - одне коло 550 грн/(мм²·км),
 - два кола 890 грн/(мм²·км);
- погонні параметри та економічні показники переріз провідників представлено в табл. 7.7;
- видатки на обслуговування та ремонт ПЛ 110 кВ – 1,2%;
- норма дисконту – 0,1.

Таблиця 7.7. Дані по марках провідників

Марка та переріз провідника					
АС-70/11 питомий опір 0,422 Ом/км діаметр провідника 11,4 мм капітальні вкладення, тис. грн		АС-120/19 питомий опір 0,244 Ом/км діаметр провідника 15,2 мм капітальні вкладення, тис. грн		АС-240/39 питомий опір 0,118 Ом/км діаметр провідника 21,6 мм капітальні вкладення, тис. грн	
одне коло 588	два кола 823	одне коло 592	два кола 833	одне коло 606,5	два кола 858,9

Таблиця 7.8. Коефіцієнти навантаження сторін та кількість годин використання максимуму навантаження.

	Варіанти									
	1	2	3	3	5	6	7	8	9	10
$\cos(\varphi_{\text{сн}})$	0,76	0,87	0,83	0,85	0,85	0,76	0,78	0,95	0,88	0,91
$\cos(\varphi_{\text{нн}})$	0,89	0,78	0,76	0,93	0,96	0,89	0,79	0,77	0,84	0,85
$\cos(\varphi_{\text{ген}})$	0,95	0,99	0,96	0,81	0,96	0,84	0,81	0,99	0,81	0,78
$T_{\text{max, год}}$	6277	6213	6329	6224	5432	5615	4184	4900	5507	6047

Таблиця 7.8. Продовження

	Варіанти									
	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$\cos(\varphi_{\text{сн}})$	0,97	0,84	0,93	0,88	0,8	0,79	0,87	0,79	0,9	0,96
$\cos(\varphi_{\text{нн}})$	0,88	0,92	0,78	0,91	0,79	0,83	0,86	0,95	0,9	0,83
$\cos(\varphi_{\text{ген}})$	0,95	0,94	0,81	0,76	0,82	0,96	0,82	0,91	0,91	0,84
$T_{\text{max, год}}$	6435	3983	3596	6143	6153	4559	6741	3619	4612	4150

Таблиця 7.8. Завершення

	Варіанти									
	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
$\cos(\varphi_{\text{сн}})$	0,97	0,93	0,96	0,93	0,92	0,98	0,97	0,91	0,86	0,88
$\cos(\varphi_{\text{нн}})$	0,87	0,82	0,85	0,77	0,88	0,82	0,86	0,86	0,93	0,93
$\cos(\varphi_{\text{ген}})$	0,81	0,95	0,83	0,82	0,78	0,83	0,95	0,84	0,93	0,95
$T_{\text{max, год}}$	5575	5006	5749	7259	4227	6950	6236	3576	5000	6677

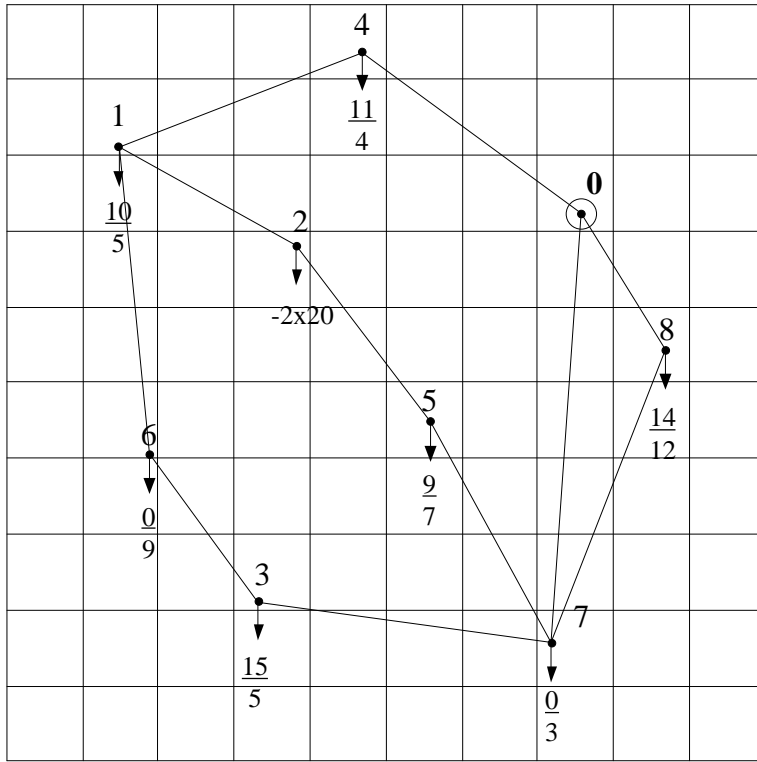


Схема №3

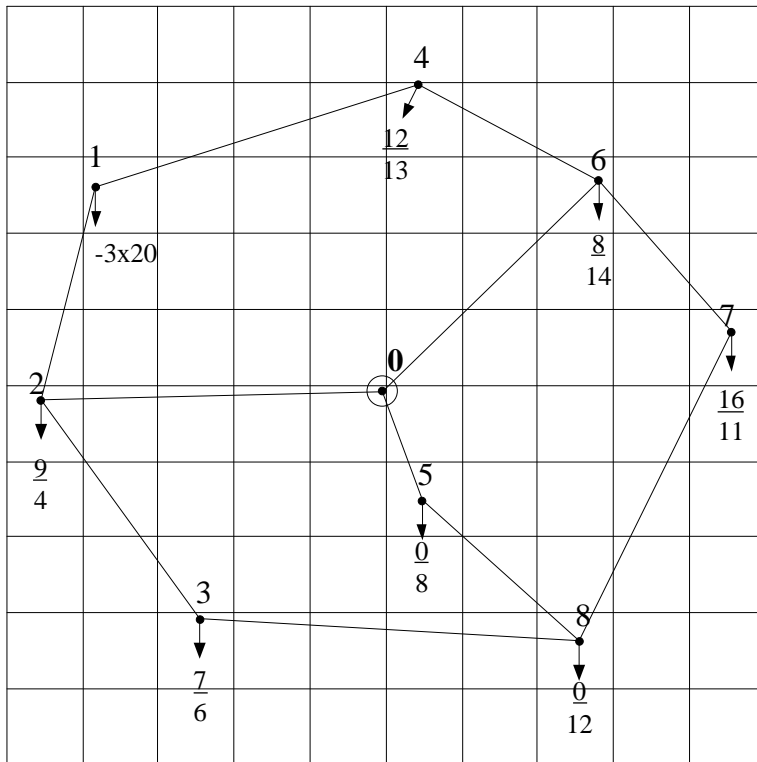


Схема №4

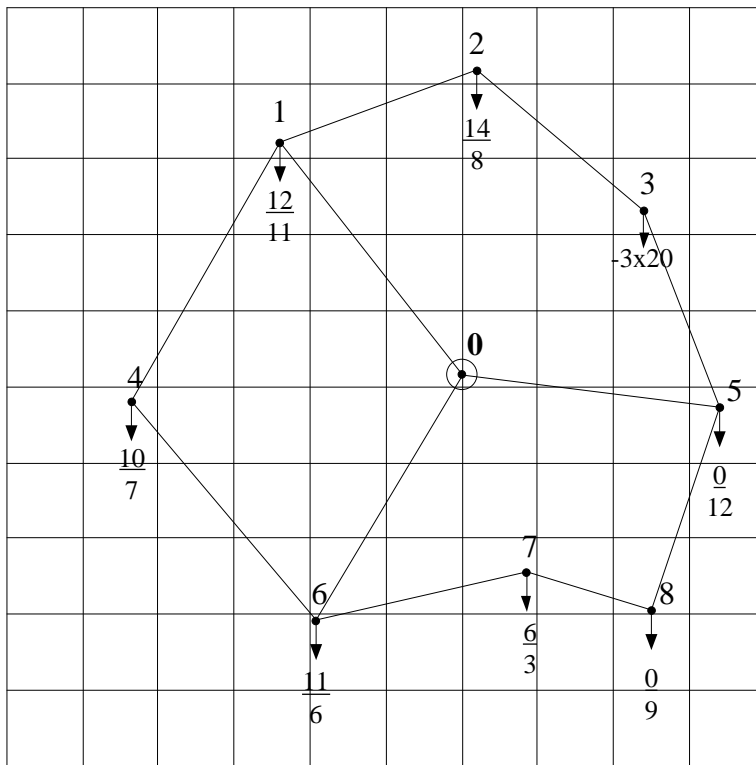


Схема №5

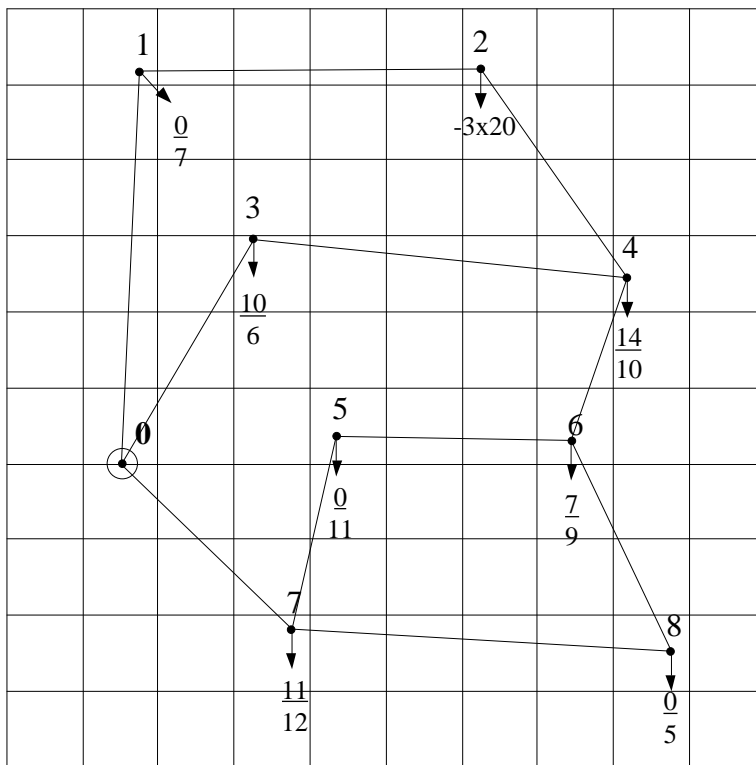


Схема №6

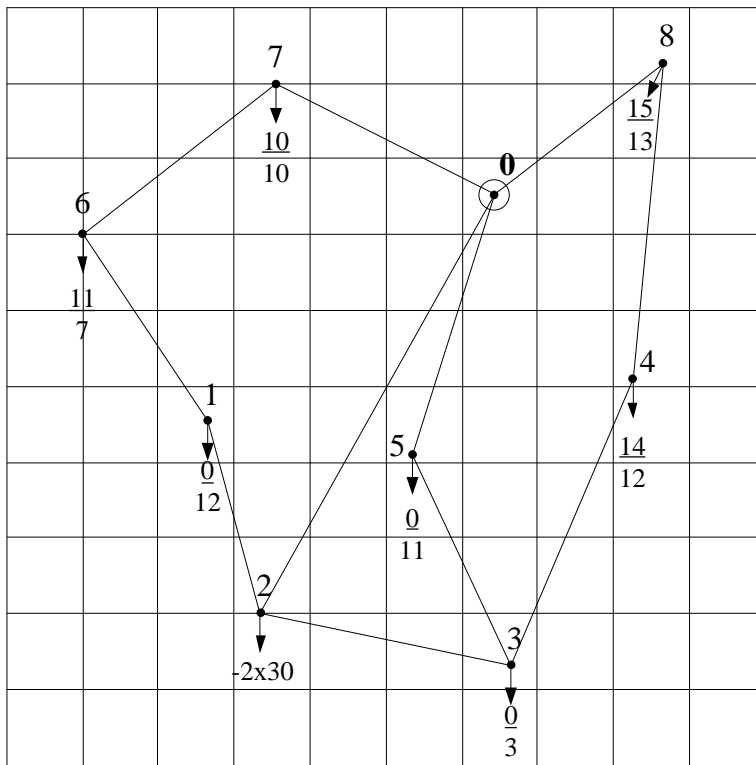


Схема №7

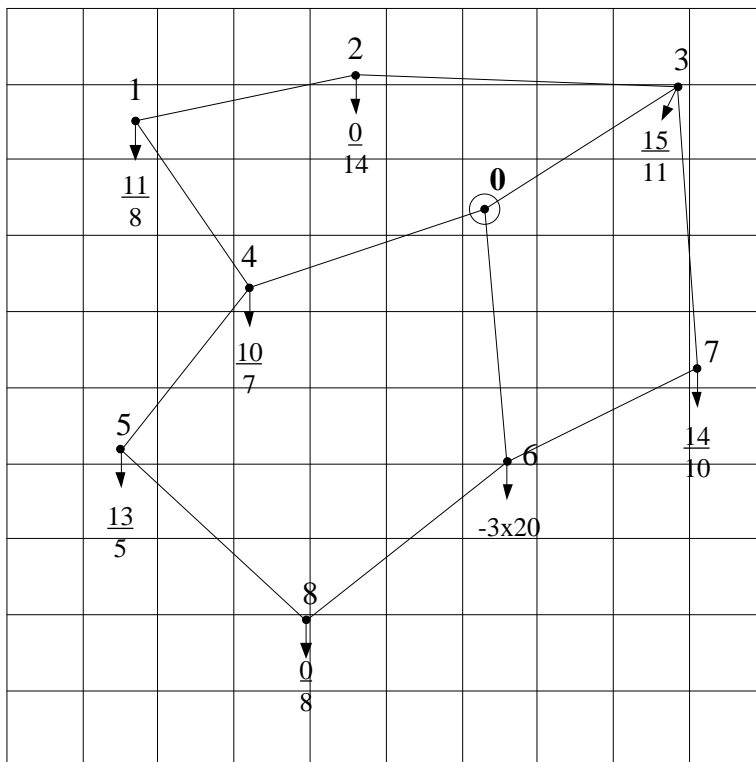


Схема №8

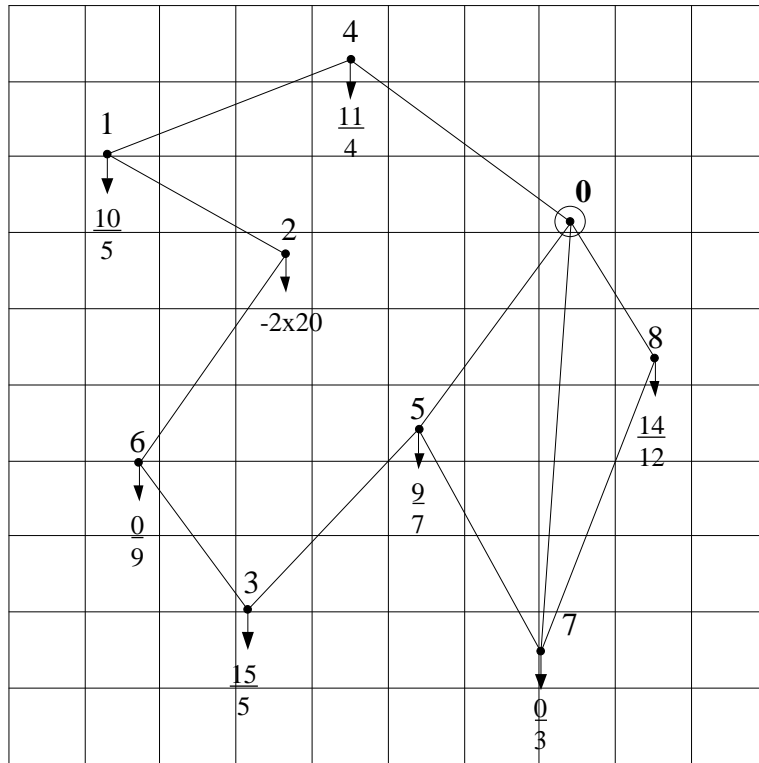


Схема №9

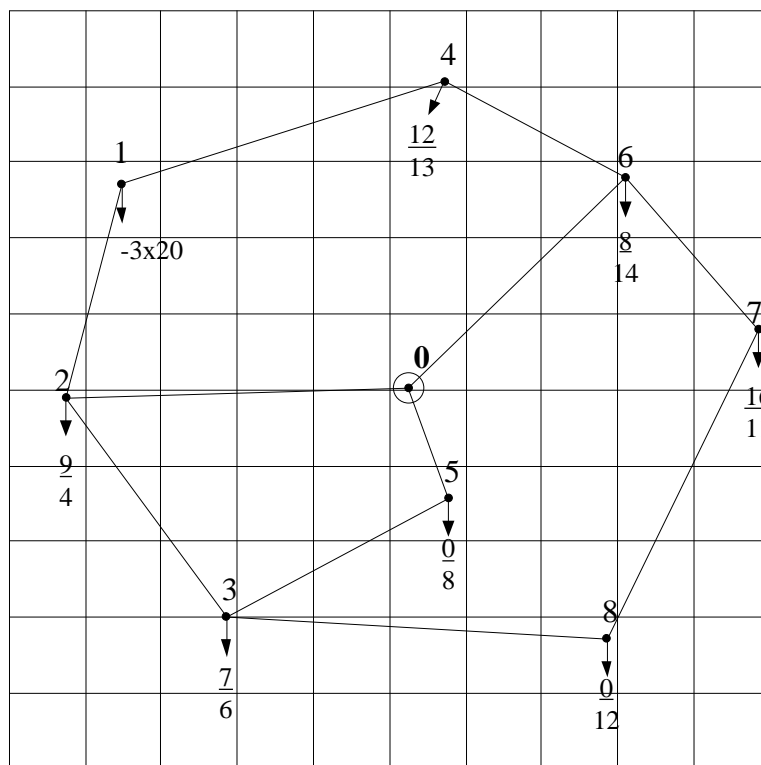


Схема №10

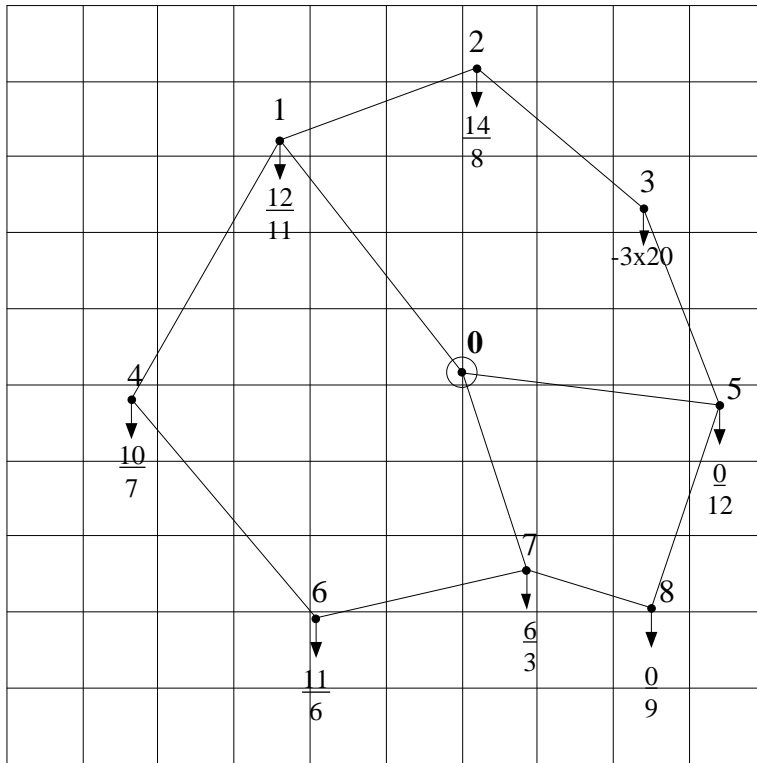


Схема №11

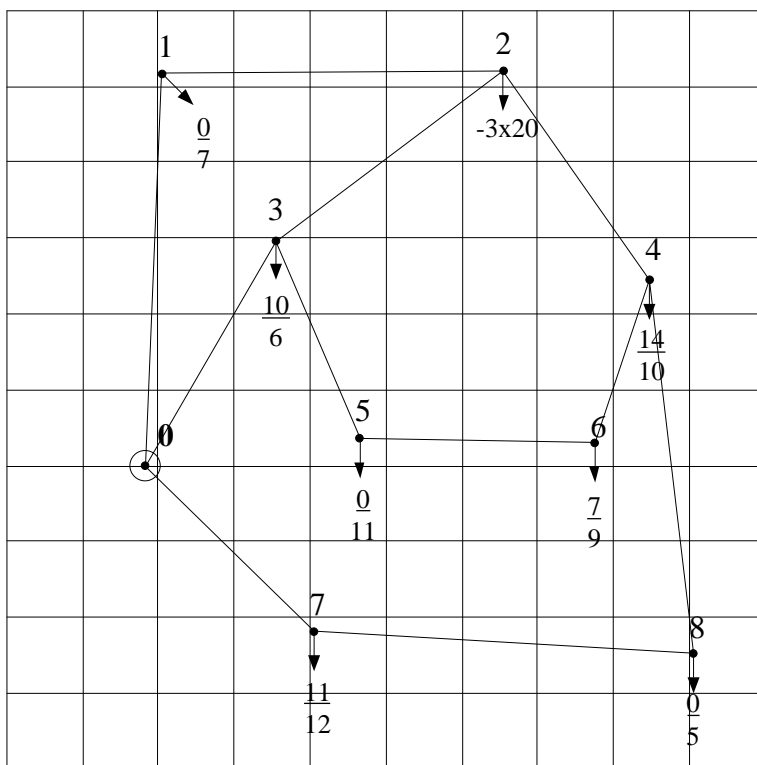


Схема №12

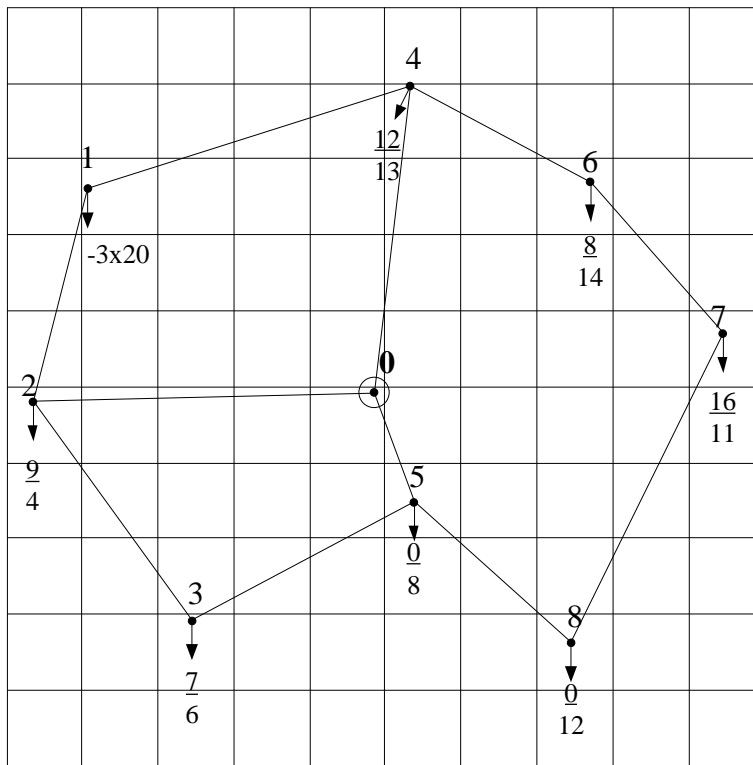


Схема №13

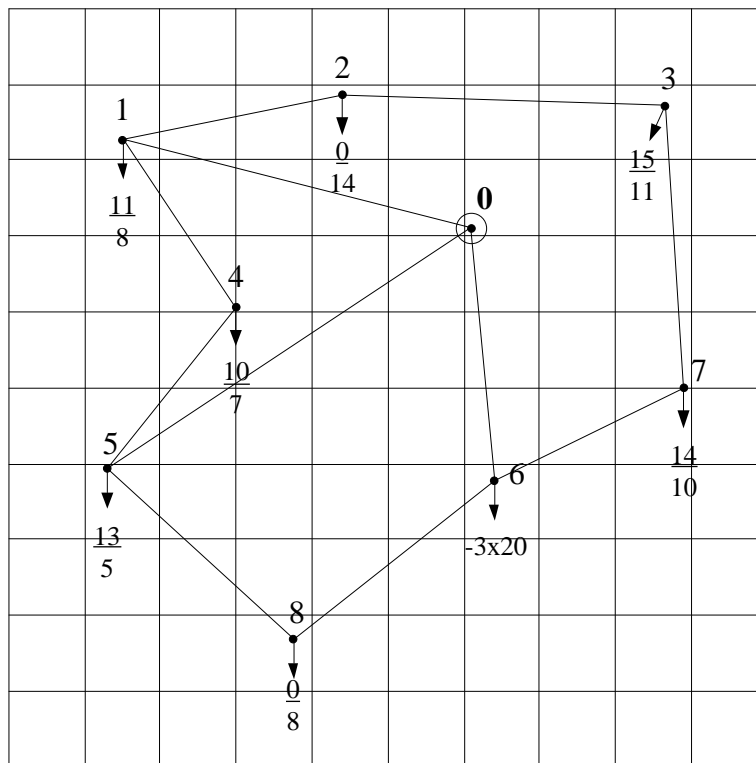


Схема №14

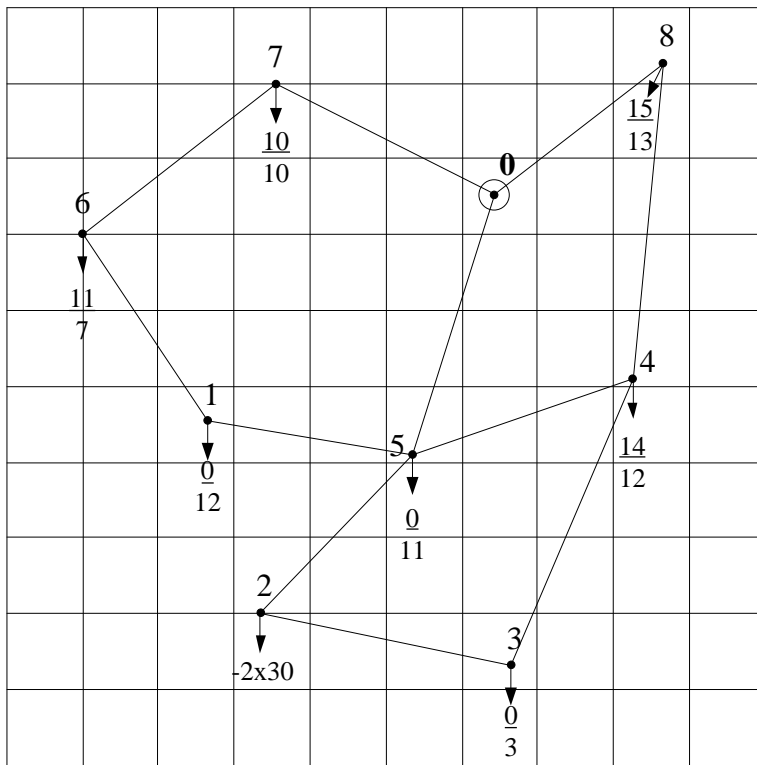


Схема №15

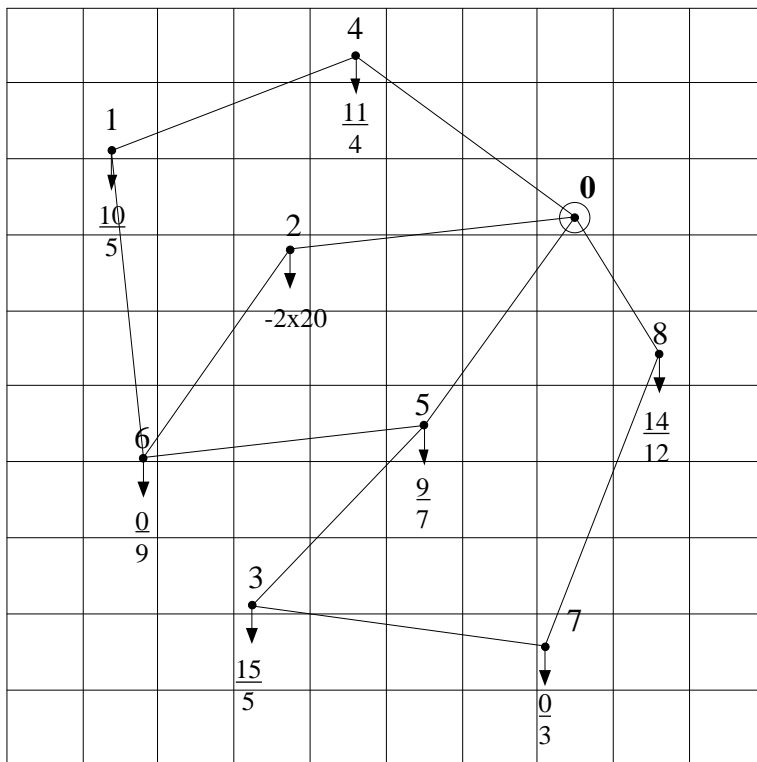


Схема №16

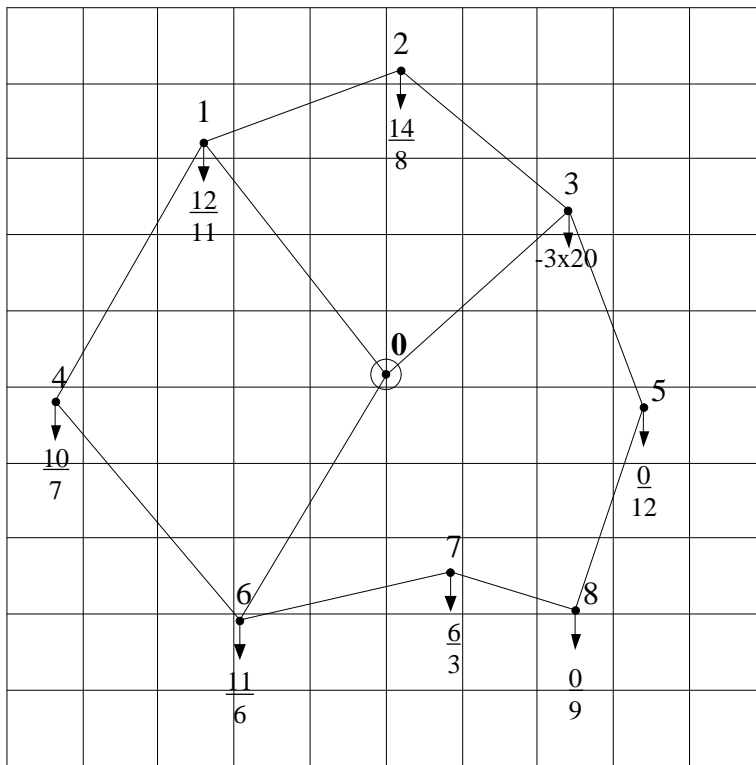


Схема №17

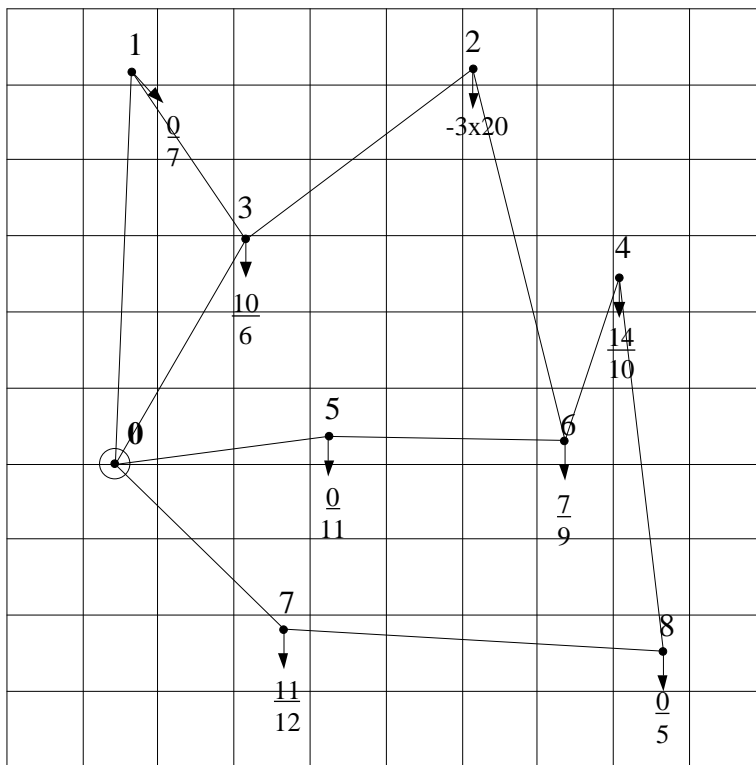


Схема №18

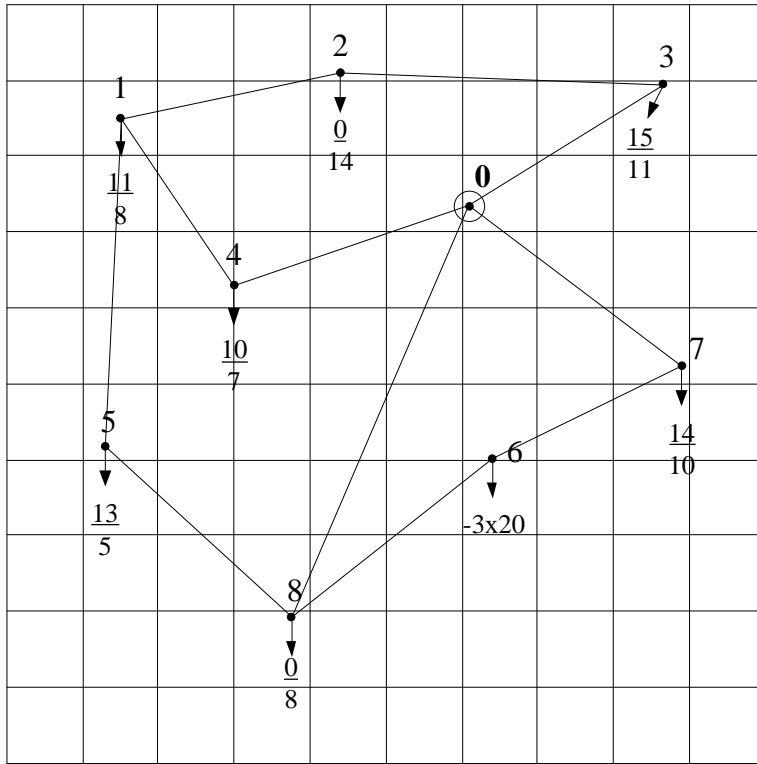


Схема №19

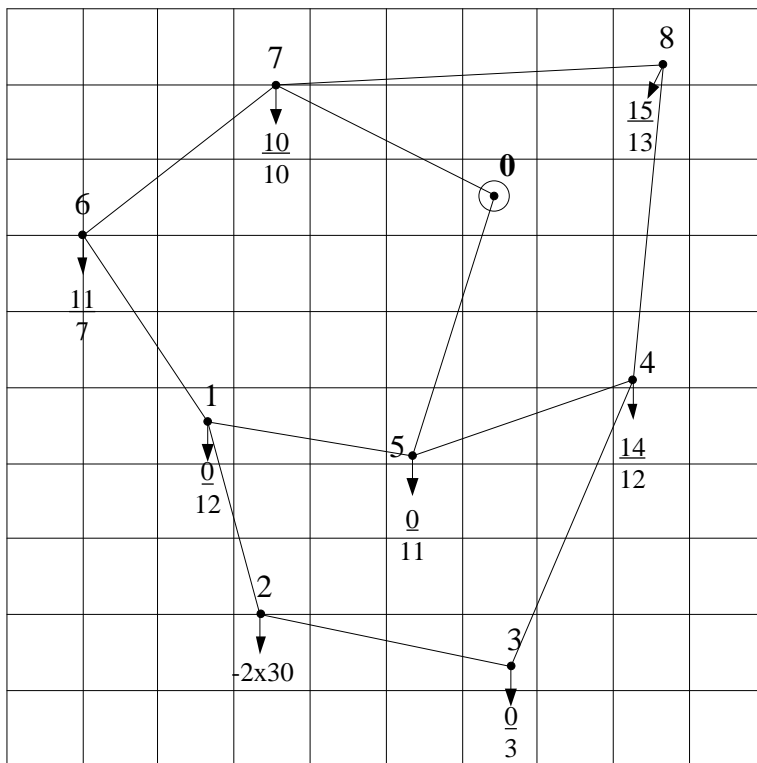


Схема №20

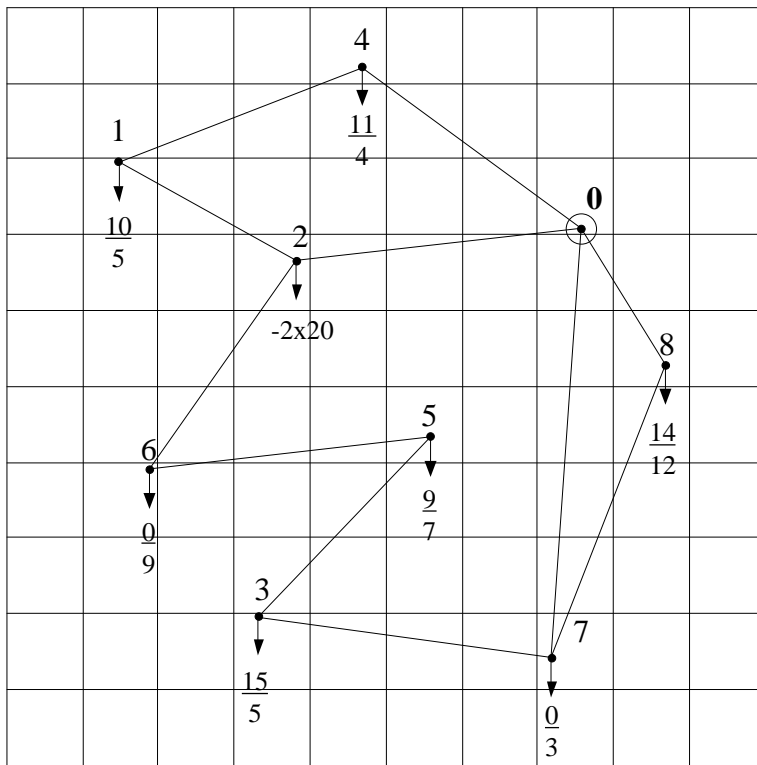


Схема №21

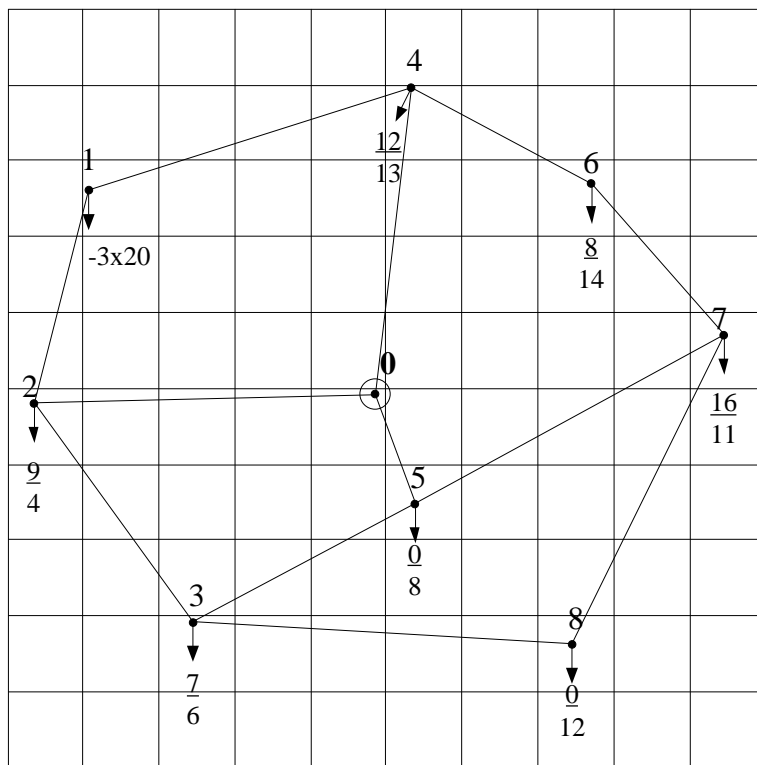


Схема №22

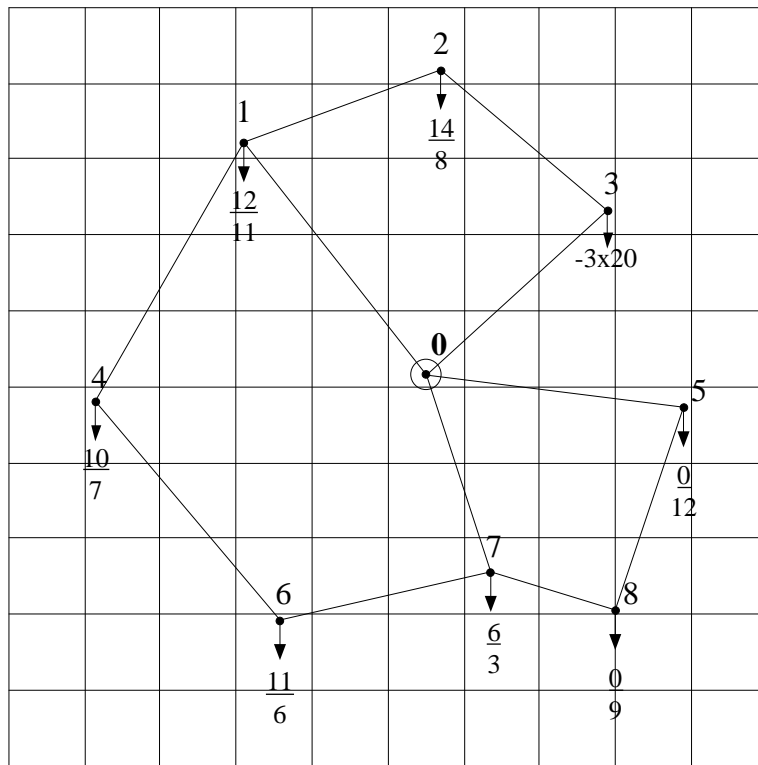


Схема №23

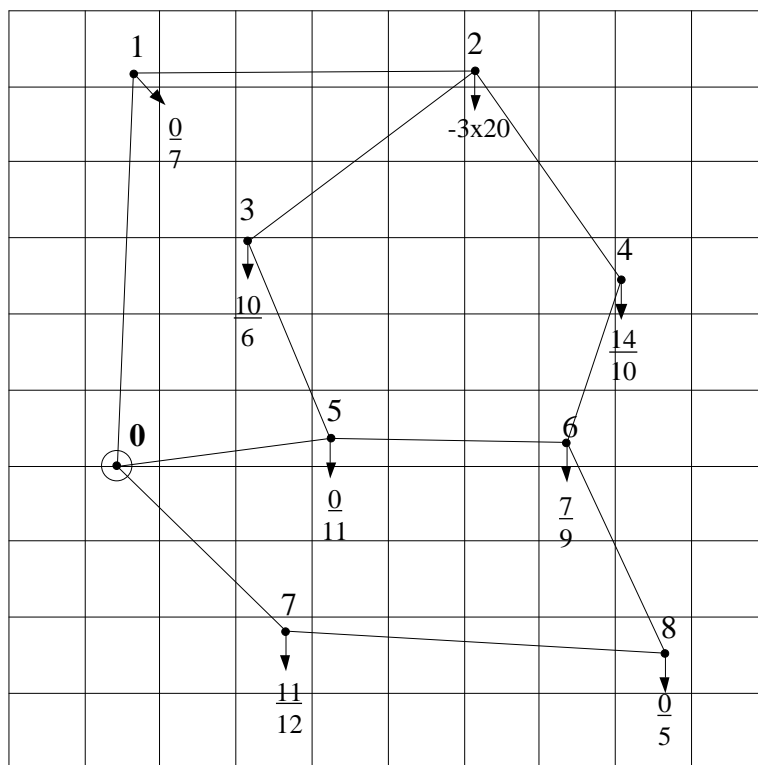


Схема №24

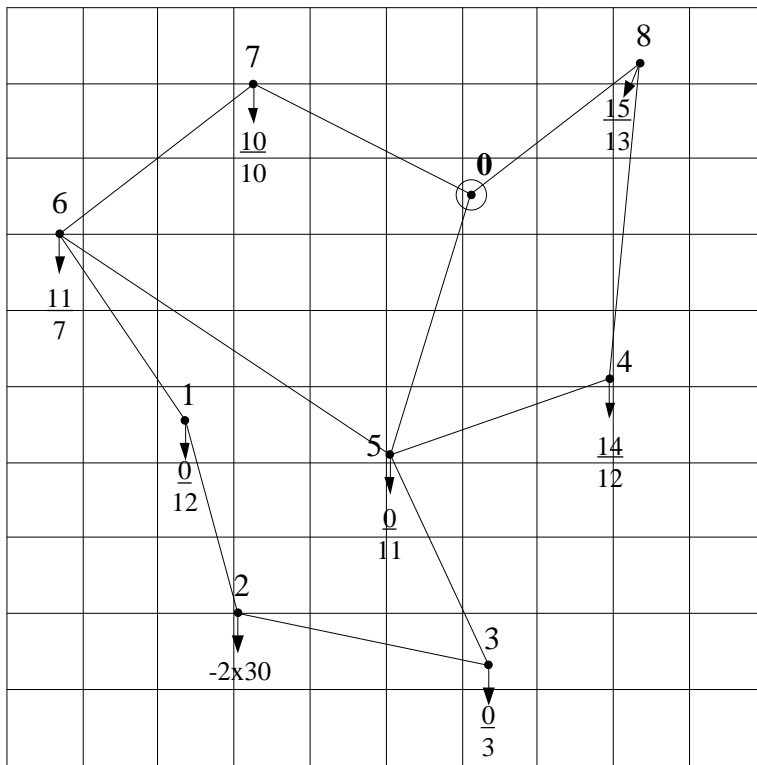


Схема №25

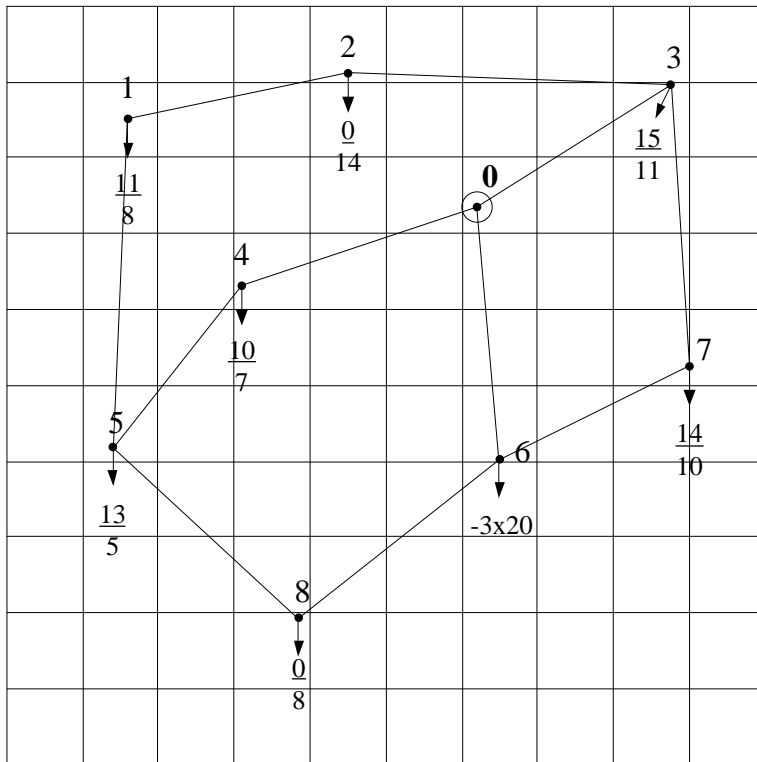


Схема №26



Схема №27

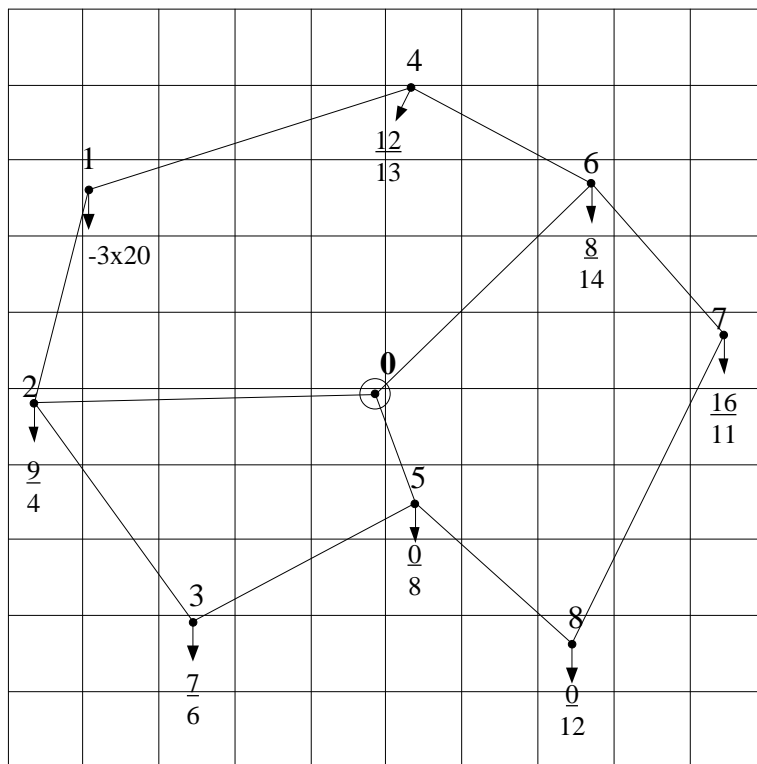


Схема №28

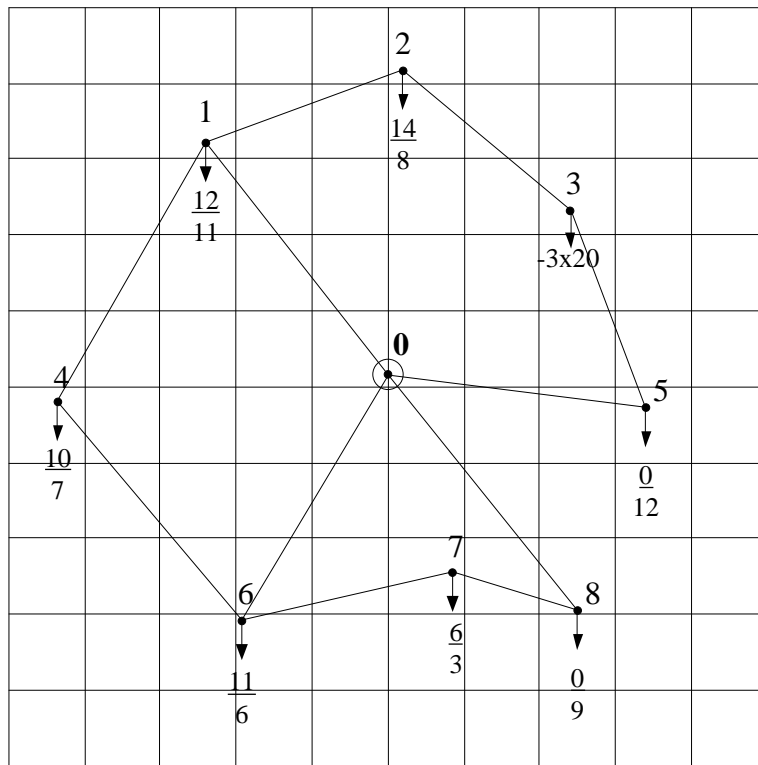


Схема №29

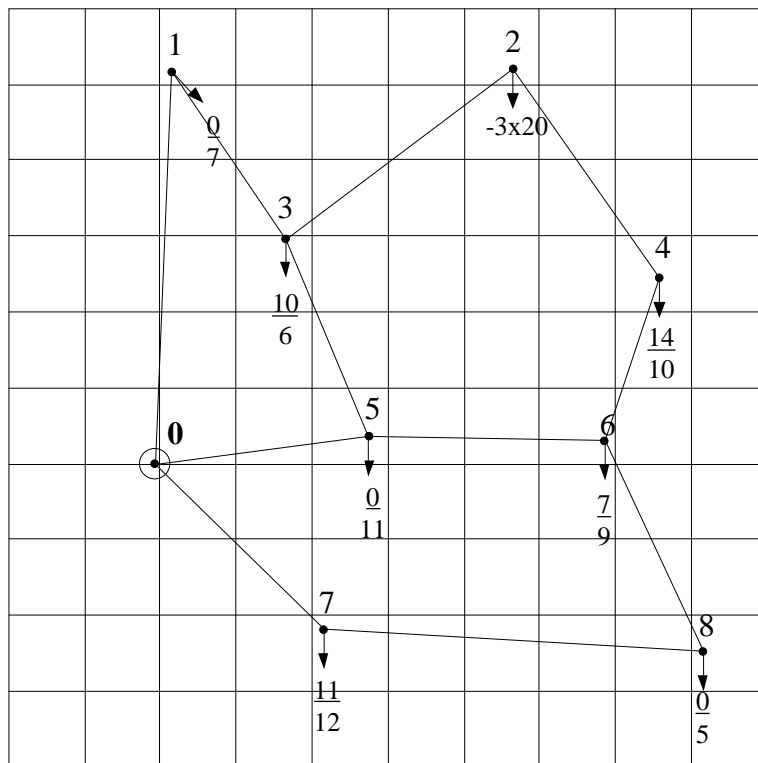


Схема №30

Тема №8

МОДЕЛЮВАННЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ З ТРАНСФОРМАТОРНИМИ ЗВ'ЯЗКАМИ

Мета роботи: створення довідників двохобмоткових трансформаторів та моделювання схеми з двохобмотковими трансформаторами; особливості створення довідників трьохобмоткових трансформаторів та моделювання схеми з трьохобмотковими трансформаторами.

Теоретичні положення

За попередніх тем було розглянуто створення довідників по рівнях напруги та типів провідників із подальшим застосуванням цих елементів для створення схеми. Останнім пунктом є створення довідника трансформаторів та моделювання схеми, що містить трансформаторні зв'язки.

В меню «Додати» або з панелі інструментів обирається двох обмотковий трансформатор, рис.8.1.

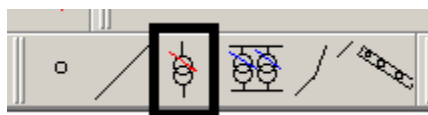


Рисунок 8.1. Панель інструментів: силовий двох обмотковий трансформатор

З метою розташування та подальшого моделювання трансформаторного зв'язку в робочому середовищі SVC потрібно спочатку встановити вузли з відповідними рівнями напруги, між якими буде розташовано трансформатор, а потім на панелі інструментів останній обрати безпосередньо і провести між вказаними вузлами, рис.8.2.

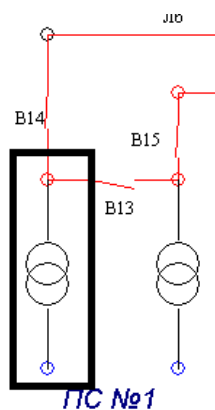


Рисунок 8.2. Трансформатор 110/10 в середовищі SVC

Для появи трансформатора в переліку необхідного обладнання, у відкритому довіднику натискають «Додати». Панель інструментів із введення параметрів містить три вкладення:

- паспортні дані, до яких відноситься тип, потужність у МВА, струм холостого ходу та напруга короткого замикання у відсотках, втрати холостого ходу і короткого замикання у кВт, номінальна напруга ВН та НН у кВ, рис. 8.3;
- регулювання напруги: регулювання без розриву силових струмоведучих кіл (РПН) або перемикач без збудження (ПБЗ). Типова формула РПН: $\pm 9 \times 1,78\%$. Для вводу в програму маємо крок регулювання 1,78%, кількість відпайок становить $2 \times 9 + 1 = 19$ і номінальна відпайка має №10. У випадку ПБЗ з типовою формулою $\pm 2 \times 2,5\%$, маємо крок регулювання 2,5%, 5 відпайок та №3 для відпайки номінальної напруги;
- розрахункові параметри схеми заміщення. Для появи там значень потрібно не забути на вкладці «Паспортні дані» натиснути «Розрахувати параметри», рис.8.4. Лише після проходження всіма трьома вкладеннями натискається ОК.

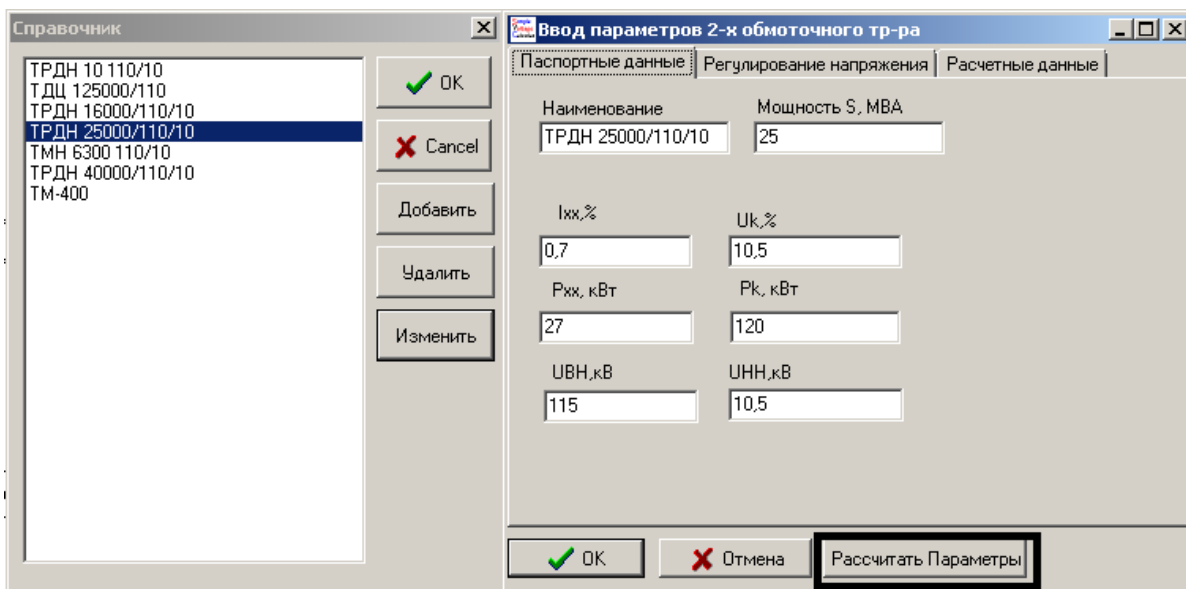


Рисунок 8.3. Довідник та паспортні дані трансформатора

За необхідності створення пункту навантаження в якості понижувальної трансформаторної підстанції програмний комплекс SVC надає таку можливість. На рис.8.5 показано розташування на панелі інструментів трансформаторної підстанції.

Ілюстрація вигляду трансформаторної підстанція показана на рис. 8.6. Це фрагмент схеми-зразка, яка надається в якості базисних схем безпосередньо вже з програмним комплексом SVC.

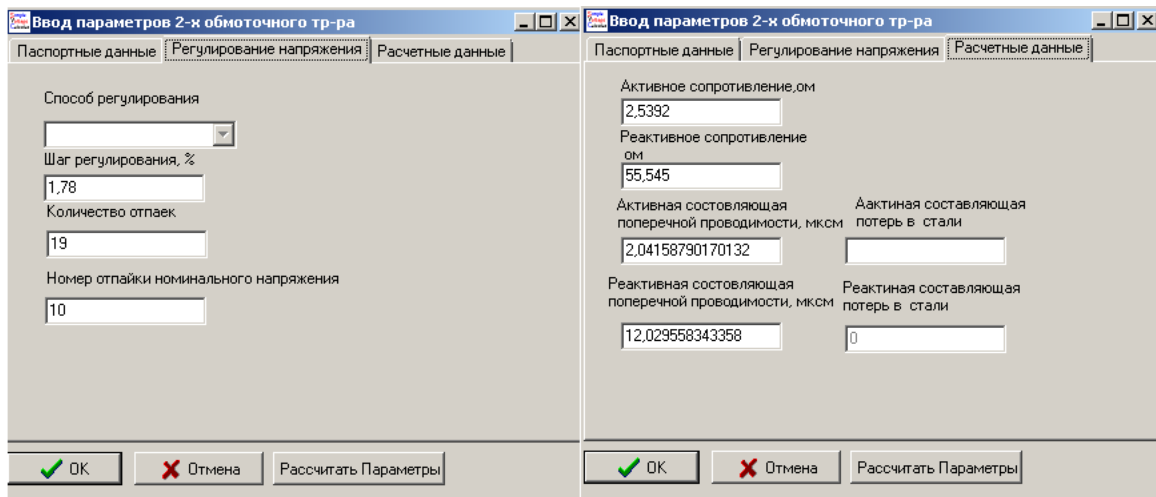


Рисунок 8.4. Регулювання напруги та параметри схеми заміщення



Рисунок 8.5. Трансформаторна підстанція

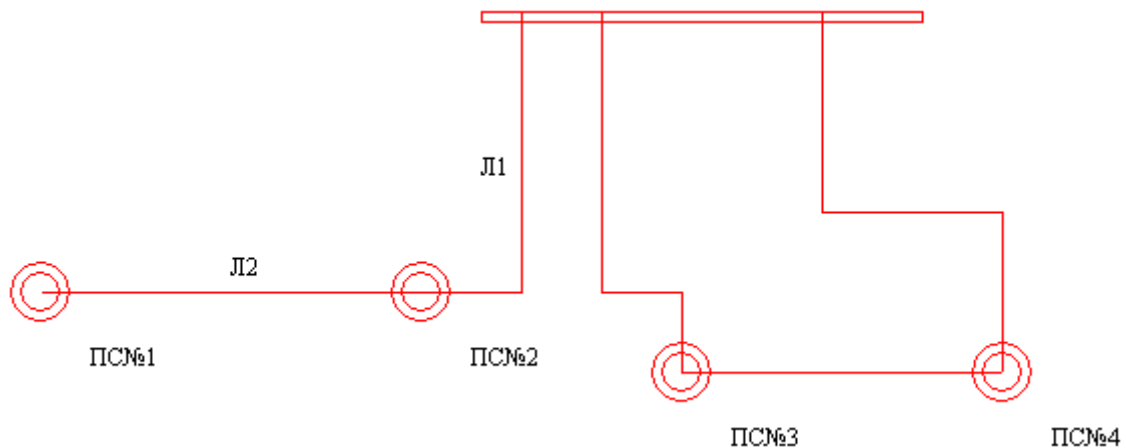


Рисунок 8.6. Трансформаторні підстанції в схемі мережі

Фактично, трансформаторна підстанція є комбінацією пункту навантаження та трансформаторного зв'язку. Головною відмінністю є відсутність потреби створювати пункти високої і низької напруги та поводити між ними трансформатор. В панелі інструментів трансформаторної підстанції окремо задаються параметри пункту навантаження та параметри трансформаторів, рис.8.7. кількість паралельно працюючих трансформаторів може змінюватися. Також потрібно сказати, що для такої підстанції створювати трансформатор в довіднику і не потрібно. Трансформатор можна створити для

кожної підстанції окремо. Процедура внесення паспортних даних та отримання параметрів схеми заміщення була розглянута вище і не має ніяких відмінностей.

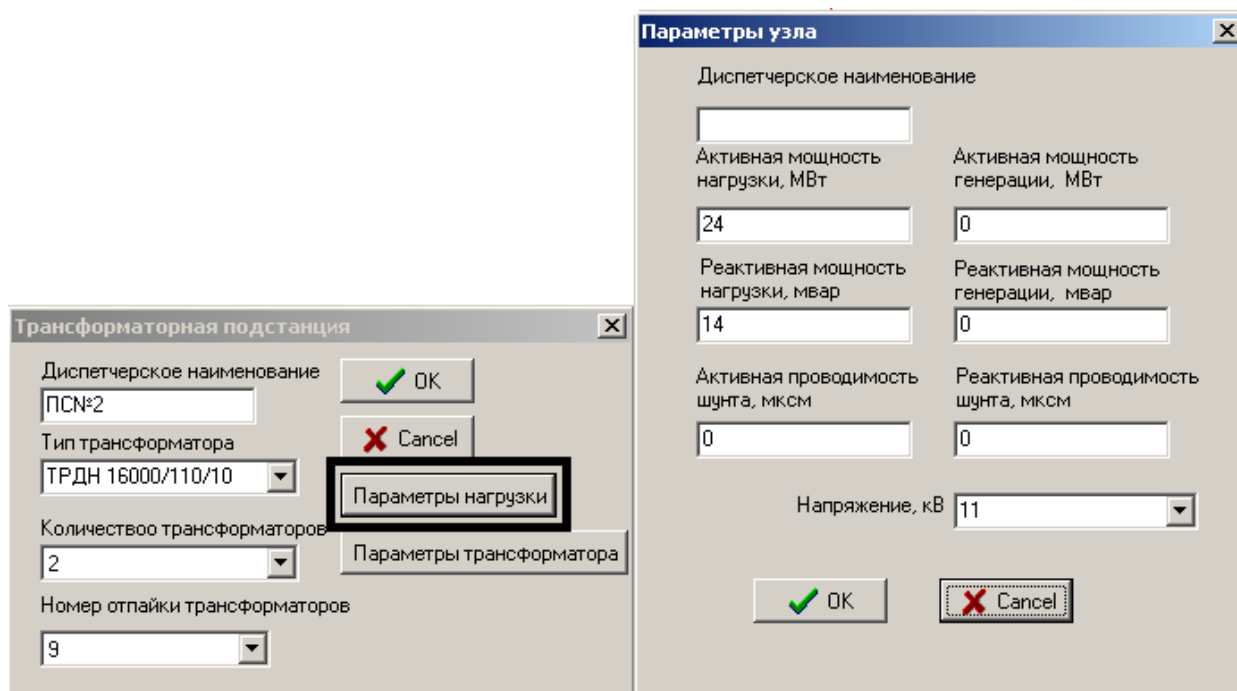


Рисунок 8.7. Трансформаторна підстанція, як пункт навантаження

Безпосередньо в середовищі SVC можна створити лише двохобмоткові трансформатори, але під час розрахунку та моделювання режиму може виникнути необхідність створення та врахування трьохобмоткового трансформатора. Розглянемо прийом створення такого трансформатора, згадавши типову схему заміщення, рис.8.8.

Схема заміщення трьохобмоткового трансформатора являє собою трипроменеву зірку, для отримання параметрів якої потрібно виділити та створити три фіктивні сторони: високу, середню та низьку. Для цього розраховуються фіктивні значення потужності та напруг короткого замикання. Кількість розрахунків дорівнює кількості сторін. Розрахунок параметрів контуру поперечної провідності для двох- та трьохобмоткових трансформаторів є однаковим.

Таким чином в програмному комплексі SVC можна створити трьохобмотковий трансформатор, як поєднання трьох окремих, фіктивних, трансформаторів. Це буде трипроменева зірка, промені якої складатимуться з трьох трансформаторів:

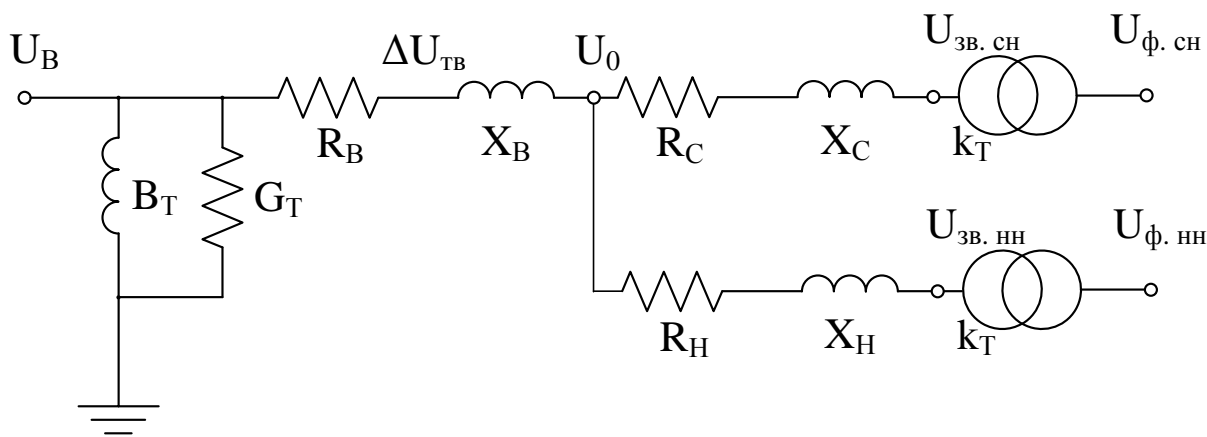


Рисунок 8.8. Схема заміщення трансформаторної ділянки трьохобмоткового трансформатора

- перший трансформатор – це висока сторона, розташовується між стороною ВН та фіктивною нульовою точкою, яка теж відноситиметься до напруги ВН. Тут задаватимуться тип, потужність у МВА, струм холостого ходу та фіктивна напруга короткого замикання ВН у відсотках, втрати холостого ходу і фіктивні втрати короткого замикання ВН у кВт, номінальна напруга ВН та НН, яка дорівнює ВН, у кВ. Також на стороні ВН розташовуються регулювальні відгалуження РПН.
- другий трансформатор – це середня сторона, розташовується між фіктивною нульовою точкою та стороною СН. Тут задаватимуться тип, потужність у МВА, фіктивна напруга короткого замикання СН у відсотках, фіктивні втрати короткого замикання СН у кВт, номінальна напруга ВН та СН, у кВ. Також на стороні СН розташовуються регулювальні відгалуження ПБЗ.
- третій трансформатор – це низька сторона, розташовується між фіктивною нульовою точкою та стороною НН. Тут задаватимуться тип, потужність у МВА, фіктивна напруга короткого замикання НН у відсотках, фіктивні втрати короткого замикання НН у кВт, номінальна напруга ВН та НН, у кВ. Регулювальні відгалуження тут відсутні.

Вся ця виконана процедура показана на рис.8.9. Детальніше буде розглянуто на прикладі. Нумерація «другий» та «третій трансформатор» є умовною і спочатку можна створити сторону 10 кВ а тільки потім 35 кВ. Це Залежатиме від умов зручності у створенні об'єкту в середовищі SVC.

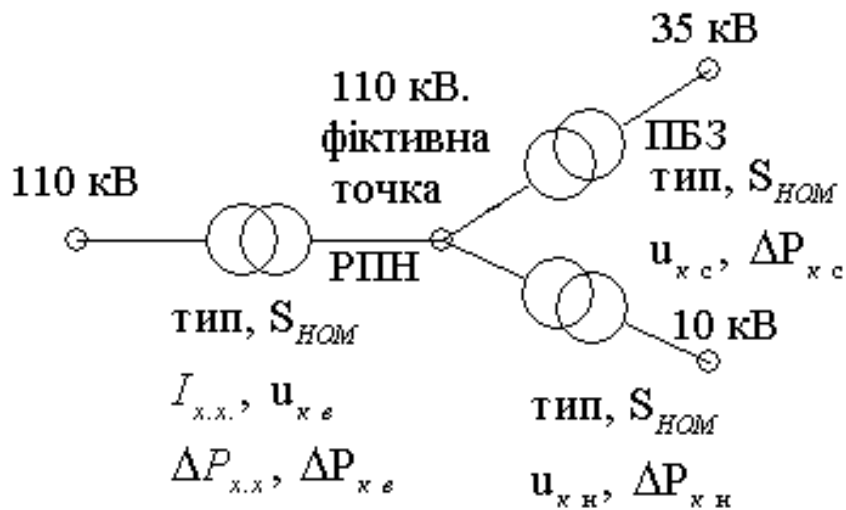


Рисунок 8.9. Трьохобмотковий трансформатор

Практична частина

Для схеми розглянутої за попередньої теми, №7, оберемо двообмоткові та трьохобмоткові трансформатори в п.3 та п.5. В п.5 розташовано трьохобмотковий трансформатор. Згадується таблиця 7.1 із навантаженнями пунктів.

Таблиця 7.1. Навантаження пунктів схеми мережі. Витяг.

№ пункту	P, МВт		Q, МВАр		S, МВА	
	СН	НН	СН	НН	ВН, МВт	ВН, МВАр
3	0	5	0	2,70	5	2,70
5	14	8	9,04	4,32	22	13,36

Блок паралельно працюючих трансформаторів завантажено на 70%, потужність навантаження пункту 22-j13,36 МВА, звідки потужність трансформатора:

$$S_T = 0,7 \cdot \sqrt{22^2 + (-13,36)^2} = 18,02 (МВА)$$

що відповідає ТДТН-25000/110. Паспортні дані візьмемо з таблиці 8.1.

Таблиця 8.1. Силові трьохобмоткові трансформатори 110 кВ

Тип	S _{НОМ} , МВА	U _{ВН} , кВ	U _{СН} , кВ	U _{НН} , кВ	Напруга к.з., %			Втрати х.х., кВт	Втрати к.з., кВт	Струм х.х.,%
					В-С	В-Н	С-Н			
ТДТН- 6300/110	6,3	115	38,5	11	10,5	17,0	6,0	14	58	1,2
ТДТН- 10000/110	10	115	38,5	11	10,5	17,0	6,0	17	76	1,1
ТДТН- 16000/110	16	115	38,5	11	10,5	17,0	6,0	23	100	1,0
ТДТН- 25000/110	25	115	38,5	11	10,5	17,5	6,5	31	140	0,7
ТДТН- 40000/110	40	115	38,5	11	10,5	17,0	6,0	43	200	0,6

Фіктивні значення потужності короткого замикання сторін трансформатора

$$\Delta P_{KB} = \Delta P_{KC} = \Delta P_{KH} = 0,5 \cdot \Delta P_{KB-C} = 0,5 \cdot 140 = 70 \text{ кВт.}$$

Фіктивні значення напруг короткого замикання сторін трансформатора

$$u_{KB} = 0,5 \cdot (u_{KB-C} + u_{KB-H} - u_{KC-H}) = 0,5 \cdot (10,5 + 17,5 - 6,5) = 10,75\%,$$

$$u_{KC} = 0,5 \cdot (u_{KB-C} - u_{KB-H} + u_{KC-H}) = 0,5 \cdot (10,5 - 17,5 + 6,5) = 0,$$

$$u_{KH} = 0,5 \cdot (-u_{KB-C} + u_{KB-H} + u_{KC-H}) = 0,5 \cdot (-10,5 + 17,5 + 6,5) = 6,75\%.$$

На рис. 8.10 показано довідник трансформаторів зі створеними фіктивними трансформаторами для кожної сторони трьохобмоткового трансформатора. Паспортні дані, регулювальні відгалуження та параметри схеми заміщення кожної сторони показано на рис.8.11 – 8.13.

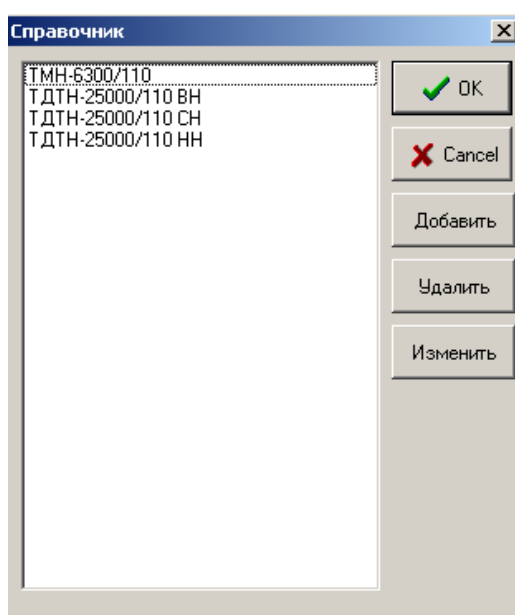


Рисунок 8.10. Трьохобмотковий трансформатор у довіднику

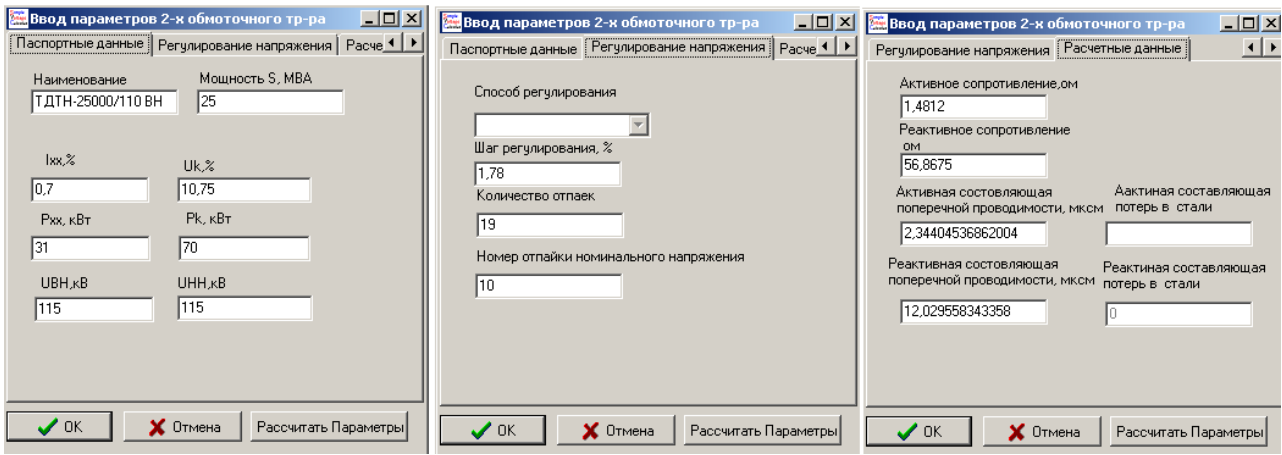


Рисунок 8.11. Фіктивний трансформатор сторони ВН

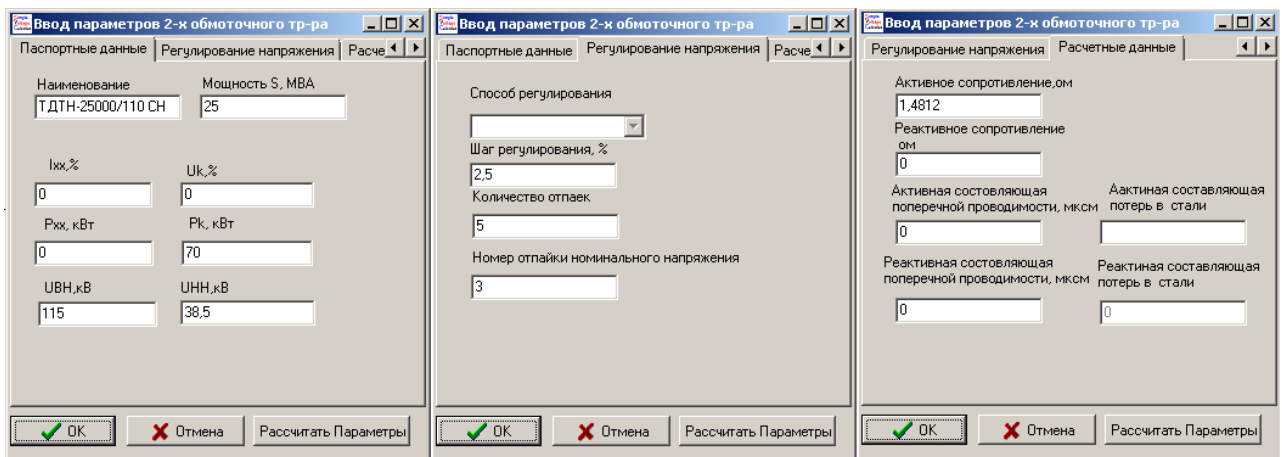


Рисунок 8.12. Фіктивний трансформатор сторони СН

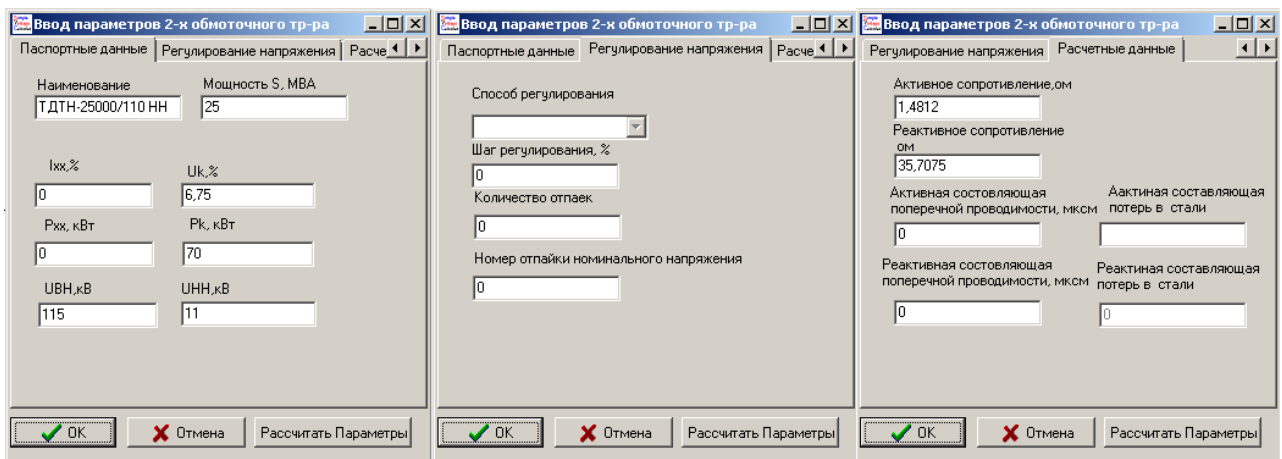


Рисунок 8.13. Фіктивний трансформатор сторони НН

Враховуючи, що два трансформатори працюють паралельно, виникла необхідність замість пунктів використовувати шини. Це відіграє роль виключно для відображення, оскільки параметри, які вводяться і для пункту і для шини

однакові. Навантаження було повернене на свої сторони, на свої шини, у відповідності із заданим на початку розподілом. Трьохобмотковий трансформатор в п.5 показано на рис. 8.14.

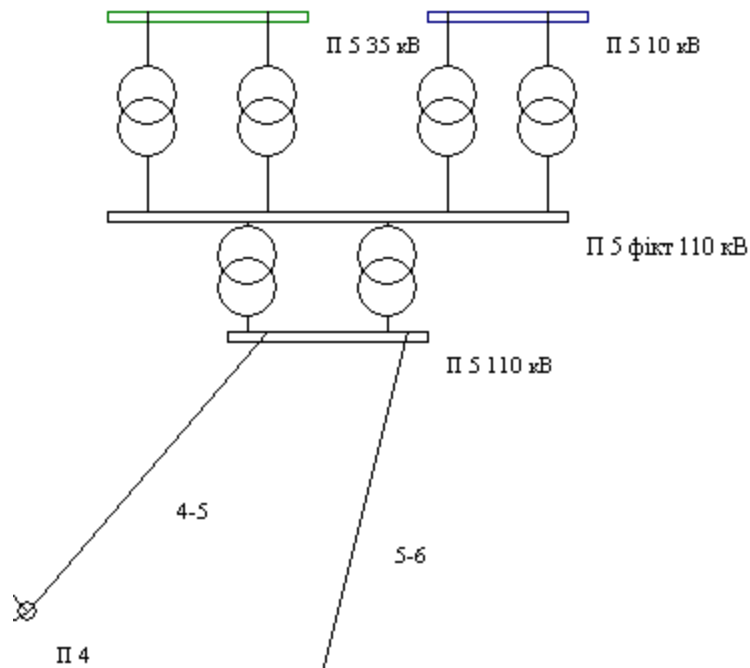


Рисунок 8.14. Фрагмент схеми із трьохобмотковим трансформатором

В п.3 розташовано двообмотковий трансформатор. Блок паралельно працюючих трансформаторів завантажено на 70%, потужність навантаження пункту 5-*j*2,7 МВА, звідки потужність трансформатора:

$$S_T = 0,7 \cdot \sqrt{5^2 + (-2,7)^2} = 3,98(\text{МВА})$$

що відповідає ТМН-6300/110. Паспортні дані візьмемо з таблиці 8.2.

Таблиця 8.2. Силкові двообмоткові трансформатори 110 кВ

Тип	$S_{\text{НОМ}}$, МВА	$U_{\text{ВН}}$, кВ	$U_{\text{НН}}$, кВ	Втрати х.х., кВт	Втрати к.з., кВт	Напруга к.з., %	Струм х.х., %
ТМН-2500/110	2,5	110	11,0	5,5	22	10,5	1,5
ТМН-6300/110	6,3	115	11,0	11,5	44	10,5	0,8
ТДН-10000/110	10	115	11,0	14	60	10,5	0,7
ТДН-16000/110	16	115	11,0	19	85	10,5	0,7
ТРДН-25000/110	25	115	10,5	27	120	10,5	0,7

В даному випадку ніяких перетворень не потрібно, всі параметри вносяться, як вони є, рис. 8.15.

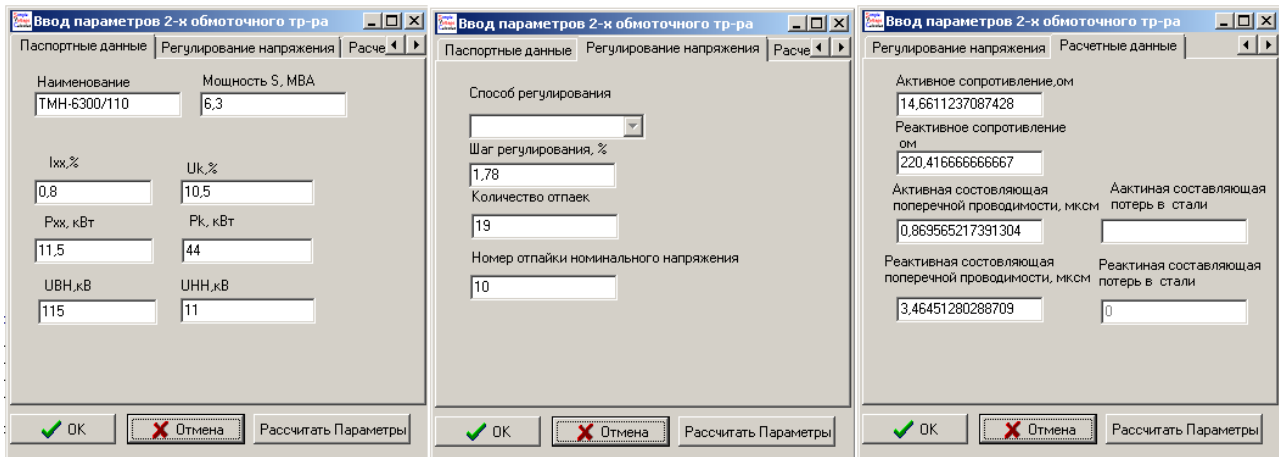


Рисунок 8.15. Двохобмотковий ТМН-6300/110 в п.3

З метою моделювання трансформаторного зв'язку, від кожного такого трансформатора проведемо лінію 10 кВ провідником АС-70, довжиною, наприклад 15 км, і створимо 2 групи по п'ять підстанцій 10/0,4 кВ із силових трансформаторів ТМ-160/10, паспортні дані яких в табл.8.3

Таблиця 8.3. Силові трансформатори 10 кВ

Тип	S _{НОМ} , кВА	U _{ВН} , кВ	U _{НН} , кВ	Втрати х.х., Вт	Втрати к.з., Вт	Напруга к.з., %	Струм х.х.,%
ТМ-100/10/0,4	100	11	0,4	290	1970	4,5	2,6
ТМ-160/10/0,4	160	11	0,4	400	2650	4,5	2,4
ТМ-250/10/0,4	250	11	0,4	550	3700	5,0	2,3
ТМ-400/10/0,4	400	11	0,4	800	5400	5,0	2,1
ТМ-630/10/0,4	630	11	0,4	1010	7600	5,5	2,0

Нехай кожен ТМ-160/10 буде завантажено на 95%. Тоді на стороні 0,4 кВ кожного пункту буде активне навантаження:

$$P_{П30,4} = 0,95 \cdot 160 \cdot 0,88 = 133,77 (\text{кВА}) = 0,134 (\text{МВА})$$

реактивне навантаження:

$$Q_{П30,4} = 0,95 \cdot 160 \cdot \sqrt{1 - 0,88^2} = 72,2 (\text{кВА}) = 0,072 (\text{МВА})$$

де $\cos(\varphi_{НН}) = 0,88$.

Залишкове навантаження, яке залишиться прикладеним окремо, становитиме відповідно

$$P_{П3} = 5 - 10 \cdot 0,134 = 3,66 (\text{МВА})$$

$$Q_{П3} = 2,7 - 10 \cdot 0,072 = 1,98 (\text{МВА})$$

Для ЛЕП 10 кВ використаємо опору рис.8.16

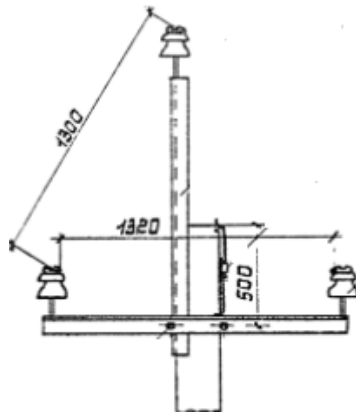


Рисунок 8.16. Опора 10 кВ

Для стороны 10 кВ потрібно мати лише повздовжні параметри. Середньогометрична відстань між фазами (результат без представлення розрахунку) становить 1306,6 мм. Звідси погонний індуктивний опір 0,356 Ом/км. Параметри провідника на ділянці показано на рис. 8.17.

Рисунок 8.17. ЛЕП 10 кВ

Власне схема на стороні 10 кВ та 0,4 кВ показана на рис. 8.18. Навантаження 0,134-j0,072 МВА знаходиться в пунктах П 3.1.1 – П 3.1.5 та П.3.2.1 – П 3.2.5. На шинах 10 кВ, а саме в П 3.1 10 кВ та в П 3.2 10 кВ прикладено половину від залишкового навантаження 3,66-j1,98 МВА. Трансформатори для підстанції 10/0,4 – це раніше обрані ТМН-160. Пункти навантаження 0,4 кВ під'єднані до трансформаторів через роз'єднувач.

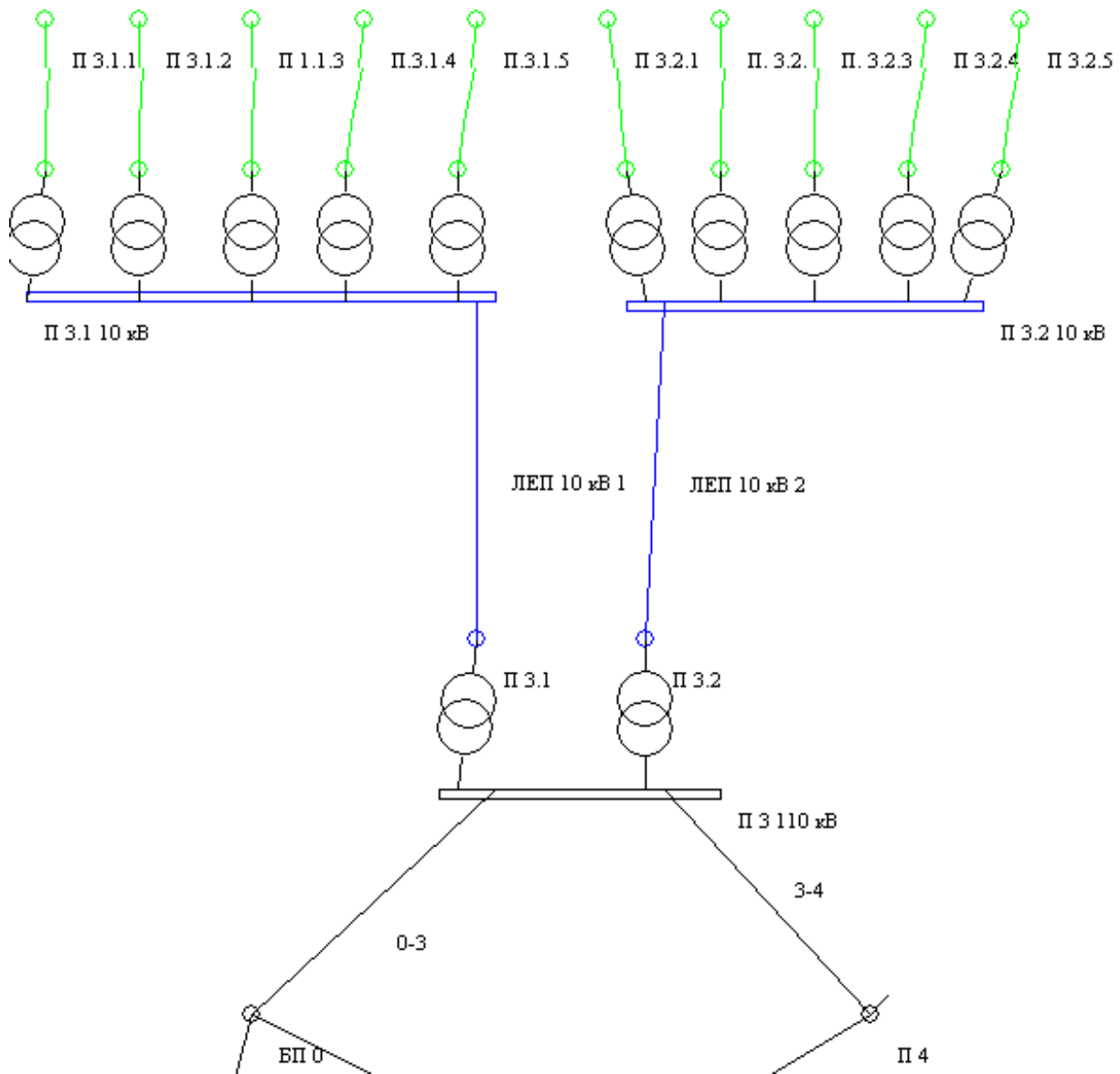


Рисунок 8.18. Схема на стороні 10 кВ та 0,4 кВ

Індивідуальне завдання

Відтворити за своїм індивідуальним завданням випадки, проілюстровані на рис.8.14 та 8.18.

Взяти схему з попередньої теми №7 та обрати пункти для встановлення двохобмоткових трансформаторів 110/10 кВ та трьохобмоткових трансформаторів 110/35/10 кВ.

Після двохобмоткових трансформаторів провести лінію АС-70 довжиною 15 км (рекомендована) до шин 10 кВ. До кожної з цих шин приєднати від 3 до 6 трансформаторів ТМ 10/0,4, тип та потужність яких обрати з табл. 8.3.

Рекомендоване завантаження трансформаторів 10/0,4 – 0,85; 0,9; 0,95; 1,0; 1,05; 1,1. Решту від заданого навантаження перенесіть на шину 10 кВ.

Рекомендована кількість паралельно під'єднаних трансформаторів 10/0,4 до однієї шини в залежності від потужності: ТМ-100 та ТМ-160 – 5 або 6 од; ТМ-250 – 4 або 5; ТМ-400 та ТМ-630 – 3 або 4.

Виконати моделювання режиму роботи схеми, здійснити регулювання напруги на сторонах 35 кВ, 10 кВ, 0,4 кВ.

Тема №9

ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ ІЗ ЗАСТОСУВАННЯМ ВОЛЬТОДОДАТКОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ, ШУНТУВАЛЬНИХ РЕАКТОРІВ ТА УСТАНОВОК ПОВЗДОВЖНЬОЇ КОМПЕНСАЦІЇ

Мета роботи: вміння використовувати апарат прикладних програм для вирішення вузькоспеціалізованих задач, таких як оптимізація режиму та регулювання режиму; моделювання засобів реактивної потужності для отримання бажаного рівня напруги та розрахунок режиму роботи мережі з урахуванням впливу цих засобів.

Теоретичні положення

Вольтододатковий трансформатор (ВДТ) - трансформаторний засіб реактивної потужності, прохідна обмотка якого послідовно вмикається в розсічку лінії електропередавання а обмотка збудження підключається до джерела живлення. Таким чином ВДТ створює надбавку напруги за місцем встановлення. Зазвичай, співвідношення між величиною потоку потужності, що проходить через прохідну обмотку ВДТ та потужністю самого ВДТ становить 10:1. Даний засіб реактивної потужності використовується для оптимізації режиму замкнені неоднорідних електричних мереж, викликаючи перенаправлення зрівнювальних контурних потужностей аби довантажувати більш потужні та розвантажувати менш потужні ділянки в замкнених контурах. В розімкнених мережах ВДТ слугує регулятором рівня напруги в тих пунктах, де цього вимагають технічні умови.

В програмному середовищі SVC моделюється звичайним двох обмотковим трансформатором, приєднаним до вузлів з однаковими рівнями напруги. Подібний прийом спостерігався при моделюванні трьохобмоткового трансформатора, точніше для фіктивного трансформатора високої сторони.

Перший варіант моделювання ВДТ в SVC: окрім того, що вводяться всі необхідні паспортні дані, головним моментом створення надбавки є вказаний рівень номінальної напруги НН. Його можна збільшувати чи зменшувати по відношенню до номінального, і робити це необхідну кількість разів до досягнення бажаної величини надбавки напруги за місцем встановлення ВДТ. Тут в диспетчерському найменуванні для вказівки на ВДТ стоїть літера «Л», що означає «лінійний регулятор», номінальну напруги прийнято 110 кВ, рис.9.1.

Другий варіант моделювання ВДТ в SVC: як і в першому варіанті, вводяться всі паспортні дані. Напруги ВН та НН однакові, тобто трансформатор дійсно вмикається між вузлами, що належать до одного класу номінальної напруги. Надбавка напруги здійснюється за рахунок зміни регульовального відгалуження. Таких відгалужень може бути кілька, і мінімальна формула

регулювання тут $\pm 2 \times 2,5\%$. Змінюючи номер відгалуження досягається бажана величина надбавки напруги за місцем встановлення ВДТ. Тут також в диспетчерському найменуванні для вказівки на ВДТ стоїть літера «Л», номінальну напругу прийнято 110 кВ, рис.9.2.

Головний момент, який потрібно було б врахувати – це зміна паспортних величин, як то струм холостого ходу, потужність холостого ходу та потужність короткого замикання та параметрів схеми заміщення, як то індуктивний опір внаслідок зміни напруги короткого замикання при зміні номеру відпайки. Дану ситуацію показано на рис. 9.3. на прикладі ЛТМН-16000/10. Таким чином, фактично, при зміні номеру відгалуження потрібно вносити нові паспортні дані. Також видно, що зазначений ЛТМН-16000/10 має 23 відгалуження, з яких три належать до рівня номінальної напруги.

Рисунок 9.1. ВДТ. Добавка напруги ВДТ

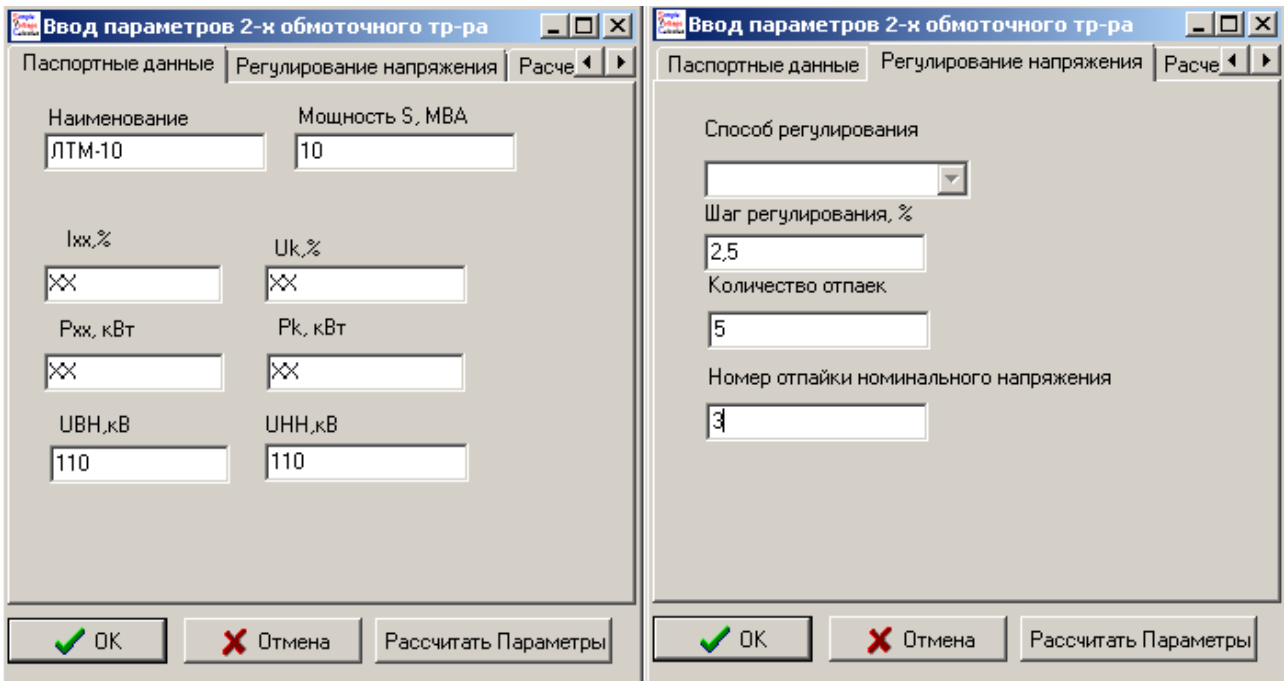


Рисунок 9.2. ВДТ. Регулювальні відгалуження

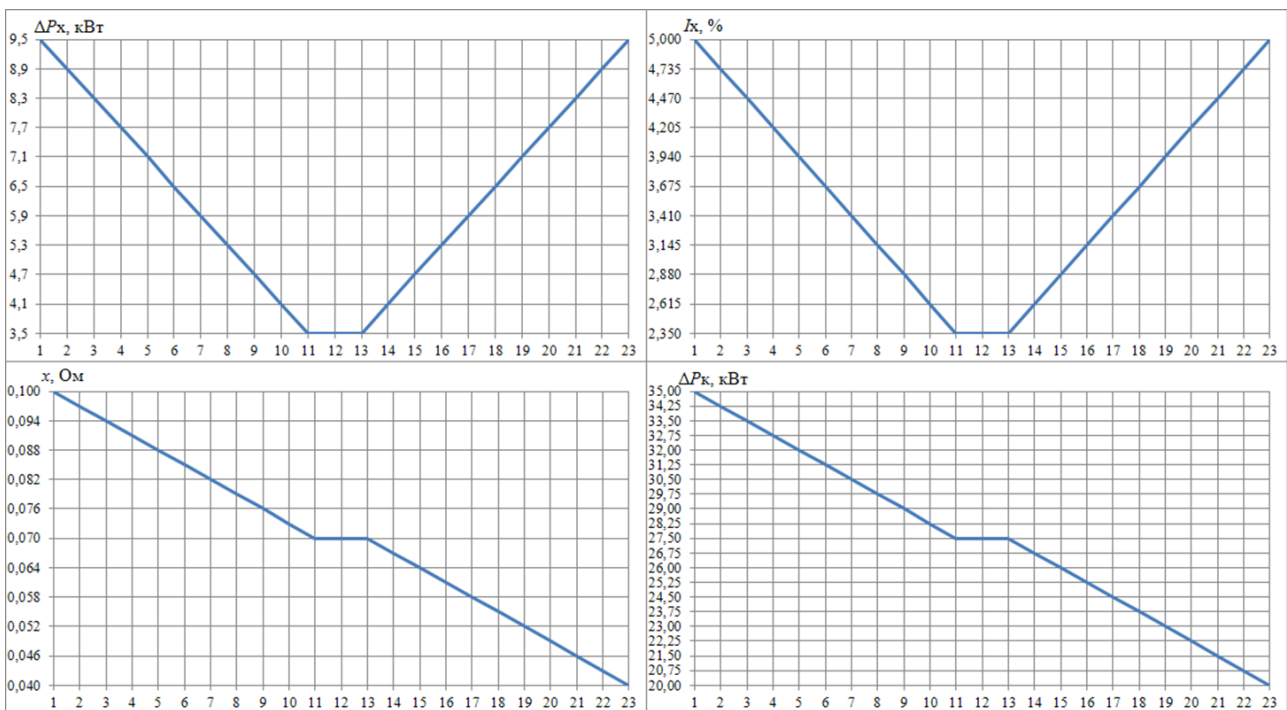


Рисунок 9.3. Зміна паспортних даних ЛТМН-16000/10 при зміні номеру відгалуження

Повернемося до початку, до вузла – найголовнішого елементу збирання будь-якої схеми в програмному комплексі SVC. Серед параметрів, які можна вносити у дані вузли є пункт «Реактивна провідність шунта». Використання даного пункту дозволяє здійснити моделювання та врахувати вплив в мережі

шунтувального реактора. З урахуванням пункту «Активна провідність шунта» можна встановити реальний реактор, рис.9.4

Параметры узла

Диспетчерское наименование
П N

Активная мощность нагрузки, МВт
0

Активная мощность генерации, МВт
0

Реактивная мощность нагрузки, мвар
0

Реактивная мощность генерации, мвар
0

Активная проводимость шунта, мксм
0

Реактивная проводимость шунта, мксм
0

Напряжение, кВ
110
110
35
10
0,4

OK

Рисунок 9.4. Прием для встановлення шунтувального реактора

Шунтувальний реактор є засобом реактивної потужності для регулювання рівня напруги, слугує для уникнення перенапруги шляхом споживання надлишкової зарядної ємнісної потужності. Або ж додаткове споживання індуктивної потужності і так призведе до зниження рівня напруги. Як установка поперечної компенсації реактивної потужності, шунтувальний реактор впливає на режим напруги до місця свого встановлення. Варто зазначити, що обов'язковим є врахування можливості накопичення зарядної потужності повітряними лініями, починаючи з класу напруги 110 кВ а кабельними – з 35 кВ

Реактори також можуть вмикатися послідовно, як варіант установки повздовжньої компенсації. Даний засіб реактивної потужності слугує для підвищення індуктивного опору на ділянці, що використовується в якості заходу оптимізації режиму. За результатами розрахунку R-схеми, дана ділянка, що входить в контур з найбільшої зрівноважувальною економічною ЕРС потребує розвантаження; саме на такій ділянці встановлюється реактор, який зменшує напругу за місцем свого встановлення. В програмному комплексі SVC реактор, як установка повздовжньої компенсації, вводиться в якості додаткової ділянки з опором реактора та довжиною 1 км між пунктом початку ділянки та встановленим додатково, фіктивним пунктом, рис. 9.5. Колишня лінія

починатиметься тепер від фіктивного пункту. У фіктивному пункті окрім рівня номінальної напруги нічого не вказується.

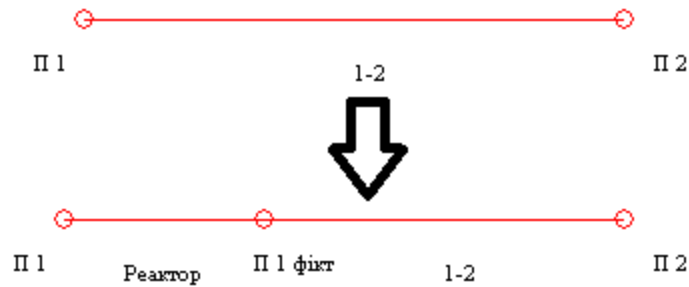


Рисунок 9.5. Реактор, як установка повздожньої компенсації

Ємнісна установка повздожньої компенсації, як засіб реактивної потужності, слугує для зменшення, компенсації, індуктивного опору лінії. Ємнісна установка повздожньої компенсації збільшує рівень напруги за місцем встановлення. Зменшення індуктивного опору призводить до зменшення спаду напруги на ділянці, як наслідок – підвищення рівня напруги в пункті в кінці ділянки. В замкнених схемах компенсацій індуктивного опору призводить до перерозподілу потоків потужності, коли потрібно довантажити ділянку, як того показали результати розрахунку R-схеми мережі.

В програмному комплексі SVC можливості створення ємнісної установки повздожньої компенсації дещо обмежені. Вузлова модель, яка є ядром розрахунку режиму не спрацює з ємнісним опором ділянки, тому найбільший можливий опір ємнісної УПК дорівнює індуктивному опору ділянки, на якій ця УПК встановлюватиметься.

Для моделювання ємнісної УПК потрібно задатися опором, величина якого виходить із попередніх розрахунків, або як степінь компенсації індуктивного опору ділянки. На рис.9.6 показано моделювання ємнісної УПК, як компенсація 50% індуктивного опору.

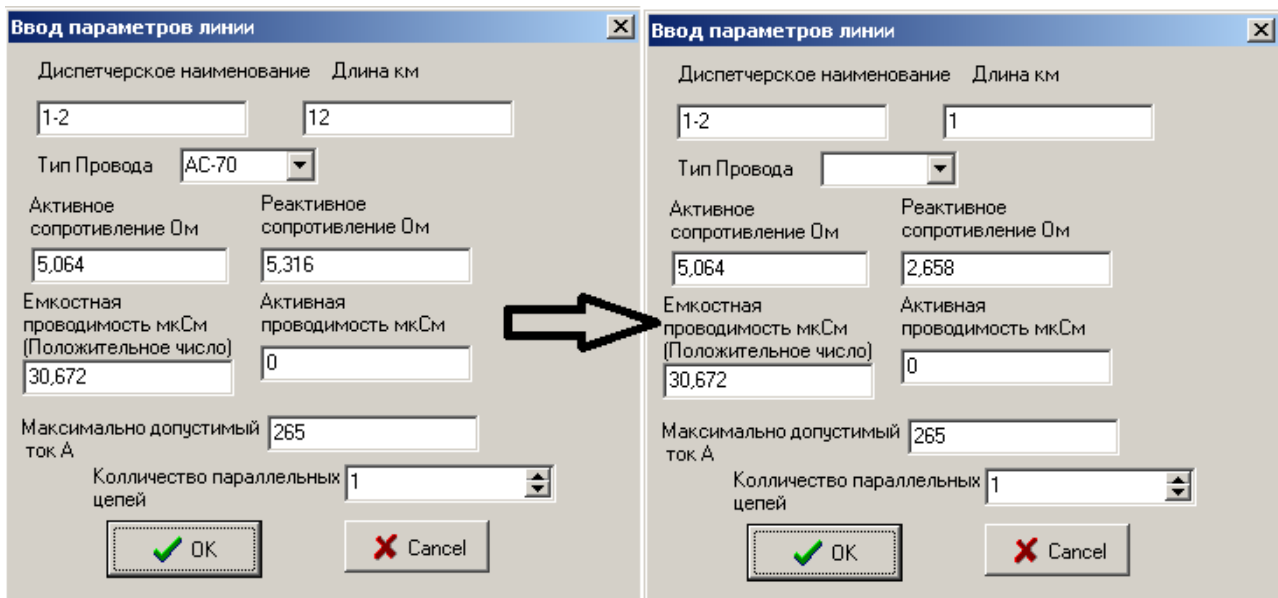


Рисунок 9.6. Ємнісна установка повздовжньої компенсації

Практична частина

Використаємо схему з теми №7. Встановимо ВДТ на найменш завантаженій ділянці що підходить до вузла з найменшим рівнем напруги.

Встановимо шунтувальний реактор у вузлі з найбільшим рівнем напруги (не на БП), потужність реактора дорівнюватиме реактивній потужності навантаження в цьому пункті.

Встановимо реактор, як установку повздовжньої компенсації на найбільш завантаженій ділянці з порівняно меншим індуктивним опором. Індуктивний опір реактора приймемо 2,5 Ом, виключно для прикладу.

Встановимо ємнісну установку повздовжньої компенсації на найменш завантаженій ділянці перед пунктом з найменшим рівнем напруги. Враховуючи обмеження програмного комплексу SVC, опір УПК задамо як 50% індуктивного на даній ділянці.

Схема для роботи представлена на рис.9.7., результати розрахунку режиму представлені в табл.9.1 та на рис.9.8.

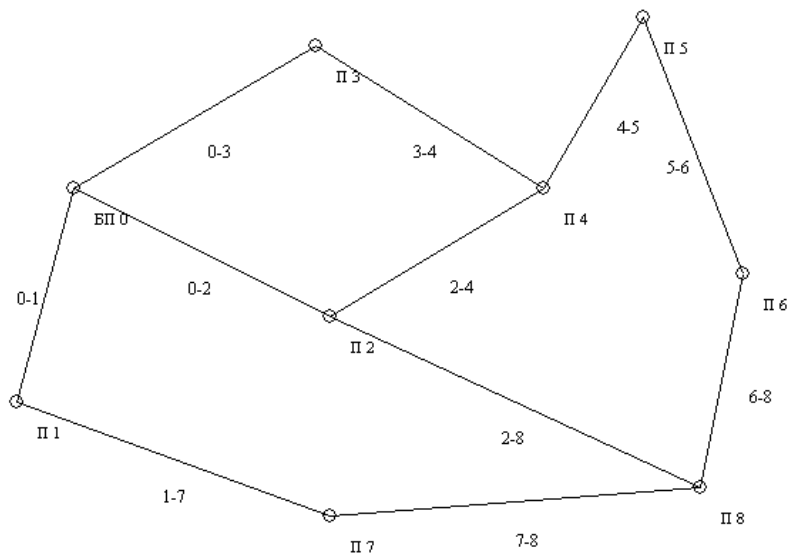


Рисунок 9.7. Схема для дослідження

Таблиця 9.1. Режимні параметри

Вузли

Вузол	U _{ном} ,кВ	U,кВ	Дельта гр	P _н , МВт	Q _н , мвар	P _{ген} , МВт	Q _{ген} , мвар
БП 0	110	112	0	0	0	0	0
П 3	110	110,35	-1,0	5	2,7	0	0
П 5	110	108,59	-2,0	22	13,36	0	0
П 4	110	109,16	-1,7	16	9,7	0	0
П 2	110	110,75	-0,8	16	9,59	0	0
П 1	110	111,51	-0,4	9	5,39	0	0
П 7	110	111,94	-0,4	7	3,78	0	0
П 8	110	113,01	0,2	0	0	60	32,38
П 6	110	110,40	-1,1	23	14,11	0	0

Ділянки

Ділянка	P _{нач} , МВт	Q _{нач} , мвар	dP, МВт	dQ, мВт	dU, кВ	I _{нач} , кА	P _{кон} , МВт	Q _{кон} , мвар
"0-3"	16,74	6,93	0,118	0,401	2,55	0,0934	16,62	7,82
"0-2"	14,66	5,12	0,082	0,279	2,07	0,0800	14,57	6,07
"3-4"	11,62	5,12	0,059	0,200	1,78	0,0664	11,56	6,14
"2-4"	12,51	6,08	0,082	0,280	2,27	0,0725	12,43	7,23
"0-1"	7,68	1,62	0,019	0,063	0,93	0,0405	7,66	2,65
"1-7"	-1,34	-2,74	0,005	0,008	0,43	0,0158	-1,35	-1,41
"7-8"	-8,35	-5,19	0,036	0,124	1,52	0,0507	-8,39	-3,78
"6-8"	37,54	20,27	0,393	1,341	3,63	0,2180	37,14	22,09
"5-6"	-14,04	-8,95	0,104	0,354	2,46	0,0885	-14,14	-7,98
"4-5"	7,98	3,68	0,019	0,065	0,83	0,0465	7,96	4,41
"2-8"	-13,94	-9,60	0,125	0,428	3,00	0,0883	-14,07	-8,34

Результаты расчета

Узлы | Ветви | Потери | Трансформаторы

Суммарные потери активной мощности в трансформаторах, МВт: 0

Суммарные потери активной мощности холостого хода, МВА: 0

Суммарные потери активной мощности в линиях, МВт: 1,077828342780

Суммарные потери реактивной мощности в линиях, мвар: 3,54344811368E

Суммарные потери активной мощности в шунтах, МВА: 0

Суммарные потери реактивной мощности в шунтах, мвар: 0

Потребляемая активная мощность, МВт: 98

Потребляемая реактивная мощность, мвар: 58,63

Суммарные потери активной мощности, МВт: 1,115779562529

Суммарные потери реактивной мощности, мвар: -12,5727402272E

Суммарная мощность активной генерации, МВт: 99,077827807429

Суммарная мощность реактивной генерации, мвар: 46,05725957633

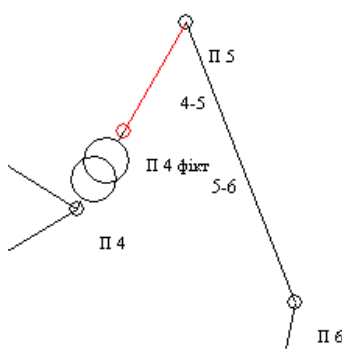
Рисунок 9.8. Результаты по сумарних втратах потужності

Наименший уровень напряуги спостерігається в п.5, який поєднує лінії 4-5 та 5-6. Найменш завантажена з них 4-5, відповідно встановимо ВДТ на початку лінії 4-5.

Потужність трансформатора

$$S_{ВДТ} = \sqrt{P_{пoc}^2 + Q_{пoc}^2} = \sqrt{7,98^2 + (-3,68)^2} = 8,79(MBA).$$

В якості ВДТ використаємо ТДН-10000/110 з відповідними паспортними даними та формулою регулювання напруги $\pm 9 \times 1,78\%$. У паспорті він буде з літерою «Л». Фрагмент схеми з ВДТ та паспортні дані на рис.9.9.



Ввод параметров 2-х обмоточного тр-ра

Паспортные данные | Регулирование напряжения | Расчет

Наименование	Мощность S, МВА
ЛТ ДН-10000/110	10
I _{хх} , %	U _к , %
0,7	10,5
P _{хх} , кВт	P _к , кВт
14	60
U _{ВН} , кВ	U _{НН} , кВ
110	110

OK | Отмена | Рассчитать Параметры

Рисунок 9.9. ВДТ в схемі

Виконаємо моделювання, шукатимемо номер регулювального відгалуження, за якого рівень напруги в п.5 досягне номінального значення.

Так, за результатами моделювання $U_5=110,11$ кВ за номеру відгалуження 2, або -8 за типовою формулою. Сумарні втрати потужності $1,31+j10,8$ МВА. Встановимо шунтувальний реактор в п.8, розрахувавши його провідність, виходячи з реактивної потужності 32,38 МВАр та напруги основного вводу на рівні 115 кВ.

$$b_p = \frac{Q}{U_{0g}^2} = \frac{32,38}{115^2} = 2,44 \cdot 10^{-3} \text{ (См)} = 2440,832 \cdot 10^{-6} \text{ (мкСм)}$$

Підключаємо ректор вказаної провідності до п.8 через роз'єднувач, рис. 9.10, та виконуємо моделювання. Отримано рівень напруги $U_8=109,03$ кВ проти 113,01 кВ та сумарні втрати потужності $1,37+j40,12$ МВА.

Встановимо реактор, як установку повздовжньої компенсації опором 2,5 Ом на ділянці 6-8, рис. 9.11. Підключаємо ректор вказаного опору на ділянці 6-8, між п.6 та п.6 фіктивним, виконуємо моделювання. Отримано рівень напруги $U_6=110,1$ кВ проти 110,4 кВ та сумарні втрати потужності $1,12+j12,19$ МВА.

Встановимо ємнісну установку повздовжньої компенсації на ділянці 4-5 перед п.5, з метою компенсації 50% індуктивного опору цієї ділянки, рис.9.12. Заміняємо ділянку, на таку ж саму, одиничної довжини, зі зменшеним в два рази індуктивним опором, виконуємо моделювання. Отримано рівень напруги $U_5=107,8$ кВ проти 108,59 кВ. Потік потужності $14,11-j7,36$ МВА проти $7,98-j3,68$ МВА, тобто потік збільшився і рівень напруги впав. Сумарні втрати потужності $1,48+j9,78$ МВА.

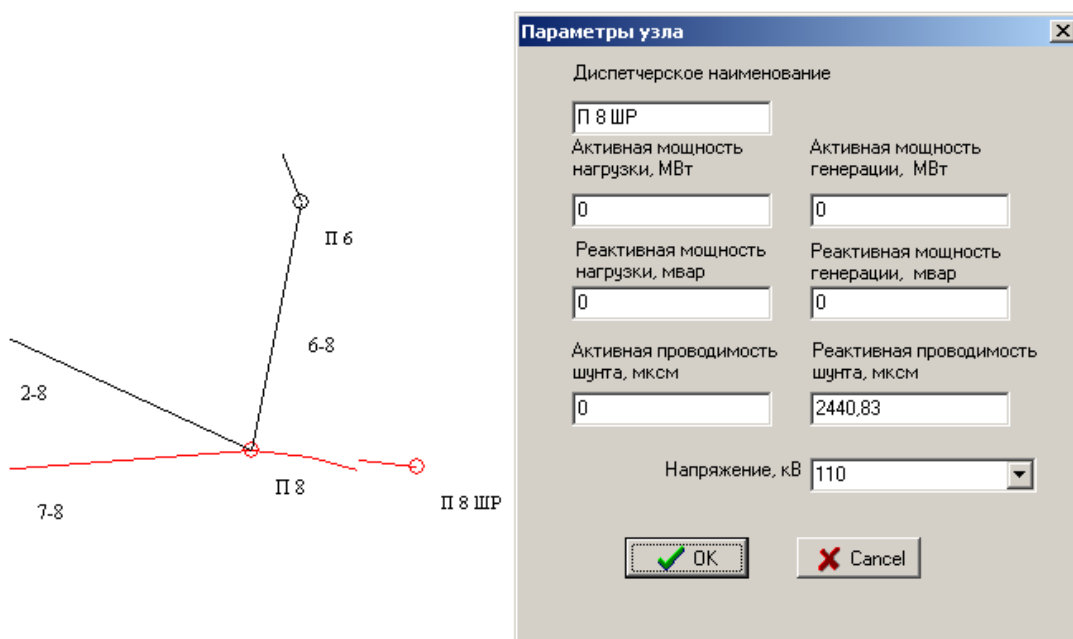
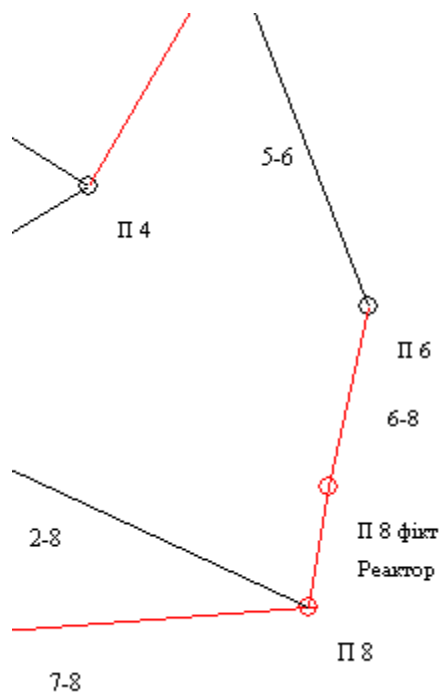


Рисунок 9.10. Шунтувальний реактор



Ввод параметров линии

Диспетчерское наименование: Реактор Длина км: 1

Тип Провода: [dropdown]

Активное сопротивление Ом: 0 Реактивное сопротивление Ом: 2,5

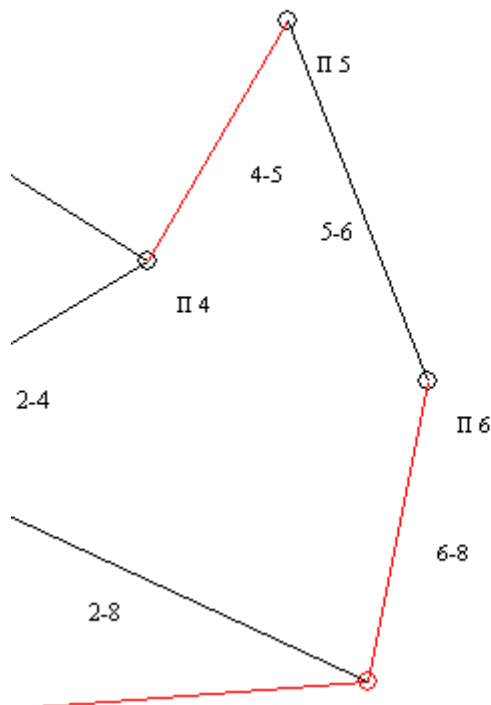
Емкостная проводимость мкСм (Положительное число): 0 Активная проводимость мкСм: 0

Максимально допустимый ток А: 500

Количество параллельных цепей: 1

OK Cancel

Рисунок 9.11. Реактор, як установка повздовжньої компенсації



Ввод параметров линии

Диспетчерское наименование: 4-5 Длина км: 1

Тип Провода: [dropdown]

Активное сопротивление Ом: 2,832 Реактивное сопротивление Ом: 4,836

Емкостная проводимость мкСм (Положительное число): 67,68 Активная проводимость мкСм: 0,158688

Максимально допустимый ток А: 610

Количество параллельных цепей: 1

OK Cancel

Рисунок 9.12. Ємнісна установка повздовжньої компенсації

Індивідуальне завдання

Використавши схему з теми №7, відтворити на ній встановлення та моделювання засобів оптимізації та компенсації.

Встановити ВДТ на найменш завантаженій ділянці що підходить до вузла з найменшим рівнем напруги. Домогтися номінального рівня напруги. Шляхом перемикавання відгалужень. ВДТ розрахувати за потоком потужності ділянки. За ВДТ прийняти силові двохобмоткові трансформатори 110 кВ.

Встановити шунтувальний реактор у вузлі з найбільшим рівнем напруги (не на БП), потужність реактора дорівнюватиме реактивній потужності навантаження в цьому пункті. Напругу основного вводу прийняти 110 кВ.

Встановити реактор, як установку повздожньої компенсації на найбільш завантаженій ділянці з порівняно меншим індуктивним опором. Індуктивні опори обрати з номенклатури 1,1; 2,5; 7,4; 9,5; 10,0 Ом.

Встановити ємнісну установку повздожньої компенсації на найменш завантаженій ділянці перед пунктом з найменшим рівнем напруги. Враховуючи обмеження програмного комплексу SVC, опір УПК задати як степінь компенсації індуктивного на даній ділянці. Степінь компенсації обрати з діапазону 40 %, 45 %, 50 %, 55 %, 60 %, 65 %, 70 %, 75 %.

Навести зміну рівнів напруги у пунктах що розглядалися, порівняти отримані значення з вихідними. Навести зміну сумарних втрат потужності. Зробити висновок про наявність впливу від засобу реактивної потужності.

Тема №10

SIMULINK ТА SIMSCAPE. СИЛОВІ КОЛА ТА ІНФОРМАЦІЙНІ ЗВ'ЯЗКИ ТА ВЗАЄМОДІЯ МІЖ НИМИ В СЕРЕДОВИЩІ MATLAB

Мета роботи: формування практичних навичок у використанні програмного середовища MatLab шляхом створення найпростішої моделі, запуск симуляції, виведення результатів.

Теоретичні положення

Розглянемо процедури побудови електротехнічного об'єкту, моделювання та дослідження режимів їх роботи з використанням програмного комплексу MATLAB. Першочерговим набором інструментів для вирішення поставлених завдань в програмному середовищі MATLAB слугуватимуть можливості бібліотеки «Simulink», та SimPowerSystem, або «SimScape »за новою версією.

Робота починається зі створення нового середовища для робочої моделі. На панелі інструментів: «Новий» - на вкладці, що випадає – «Нова модель Simulink», рис.10.1.

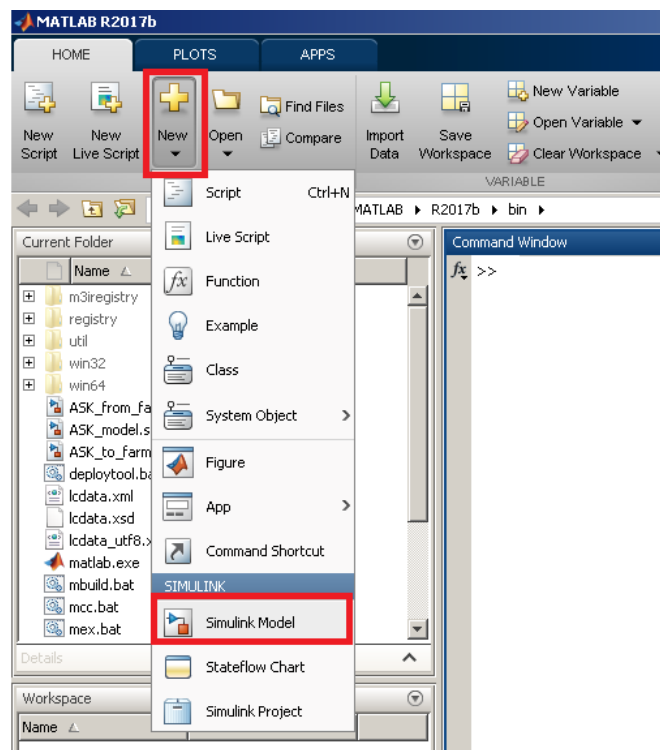


Рисунок 10.1. Створення нової моделі

Видно активну вкладку «Новий». Обираємо «Середовище для моделі», рис. 10.2.

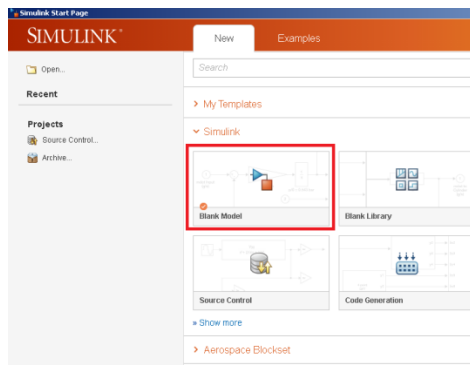


Рисунок 10.2. Нова модель Simulink

В даному робочому середовищі і працюватимемо, рис. 10.3.

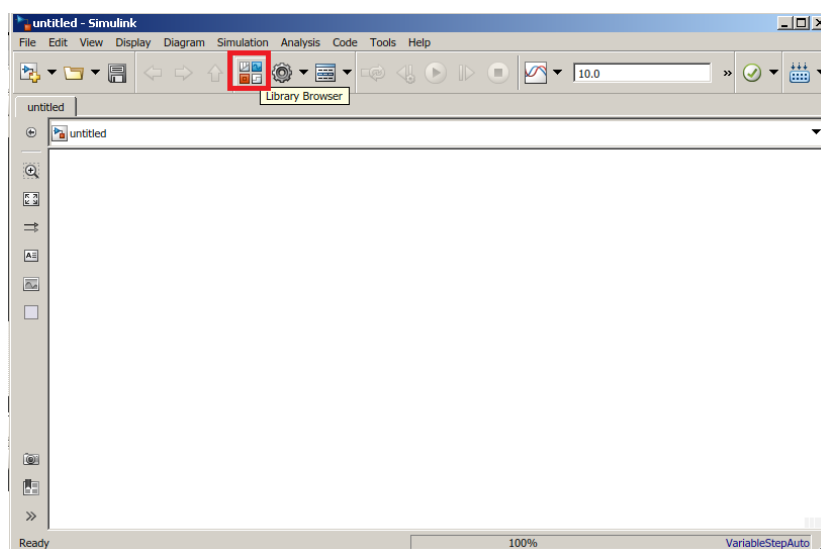


Рисунок 10.3. Робоча область для моделювання

Додатково потрібно відкрити «дерево бібліотек», рис.10.4. До даних бібліотек потрібно буде звертатися задля використання необхідних робочих компонентів.

Розглянемо по черзі кожний пункт з дерева бібліотек на предмет необхідності блоку із зазначених переліків.

Simulink – Math Operation; блоки: «Перетворення комплексного сигналу на амплітуду та фазовий кут», Множник, Суматор, рис.10.5

Simulink – Signal Routing; блоки: Демультимплексор, Блок приймання перенаправленого сигналу, Блок перенаправлення сигналу, рис.10.6

Simulink – Sinks [Відображення]; блоки: Монітор або дисплей, Осцилограф рис.10.6. Якщо передбачається дослідження статичного режиму, то варто віддавати перевагу дисплею, оскільки використання осцилографа вимагає певних об'ємів оперативної пам'яті.

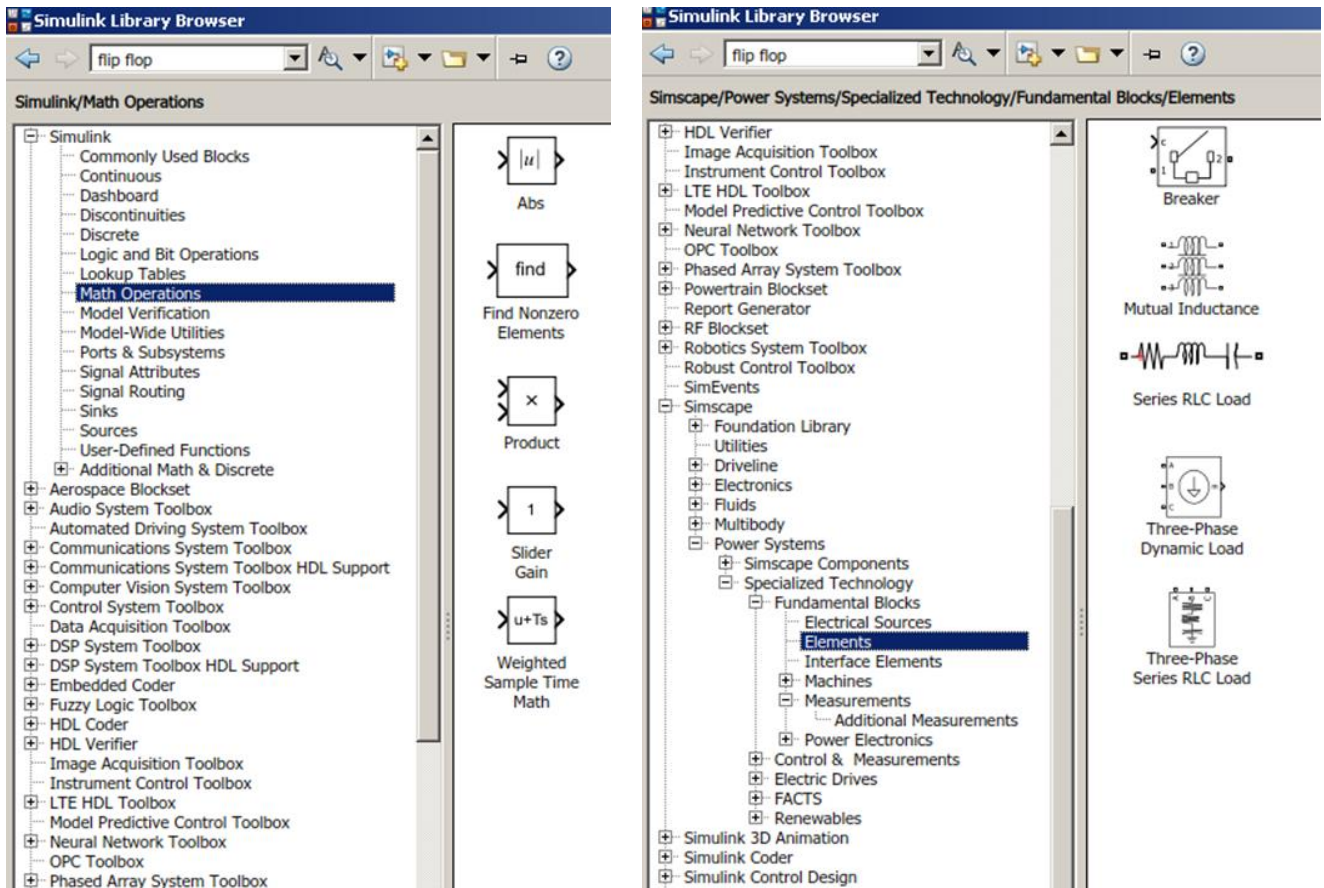


Рисунок 10.4. Робочі бібліотеки



Рисунок 10.5. Блоки математичних операцій

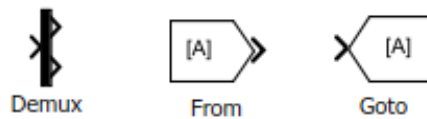


Рисунок 10.6. Блоки атрибутики сигналів

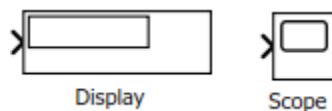


Рисунок 10.6. Відображення сигналу

Simscape – Power Systems – Specialized Technology – Fundamental Bloks; блок Powergui – відповідає за вибір розрахункової моделі та надає інструментарій для моделювання режимів роботи об'єкту, що досліджується, рис. 10.7.

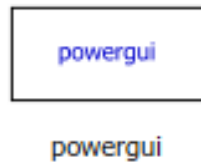


Рисунок 10.7. Головний блок для ТОЕ та електричних мереж

Simscape – Power Systems – Specialized Technology – Fundamental Bloks – Electrical Sources; блоки: AC Current Source – ідеальне джерело змінного струму; AC Voltage Source – ідеальне джерело змінної напруги; DC Voltage Source – ідеальне джерело постійної напруги; Three-Phase Source – майбутній балансуєчий пункт та генерація, рис. 10.8.



Рисунок 10.8. Джерела живлення

Simscape – Power Systems – Specialized Technology – Fundamental Bloks – Elements; блоки «Розмикач», «Заземлення», «Паралельне з'єднання елементів R, L та C», «Послідовне з'єднання елементів R, L та C», «Послідовно з'єднання RLC навантаження». Блоки можуть бути однофазного і трифазного виконання, рис. 10.9.

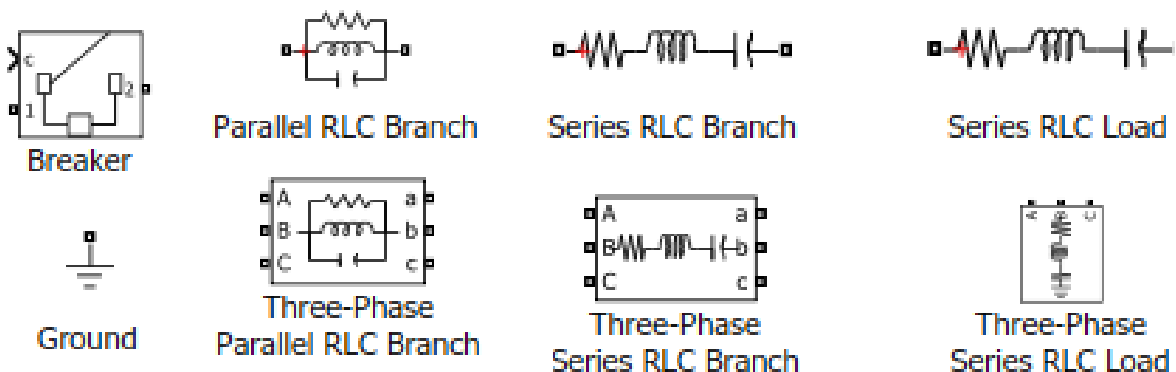


Рисунок 10.9. Робочі ланки

Simscape – Power Systems – Specialized Technology – Fundamental Bloks – Measurements; блоки: Амперметр, Вольтметр, Мультиметр, Трифазний вимірювач напруги та струму, рис. 10.10.

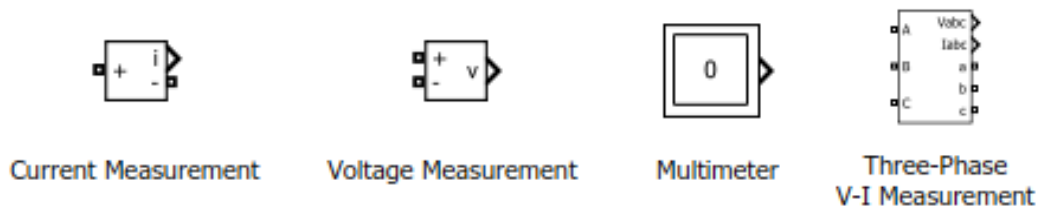


Рисунок 10.10. Вимірювачі

Simscape – Power Systems – Specialized Technology – Fundamental Bloks – Measurements- Additional Measurements; блоки: Ваттметр (однофазний та трифазний, для векторного моделювання), рис. 10.11.

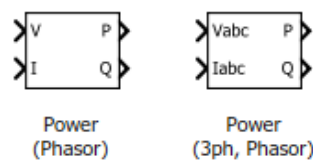


Рисунок 10.11. Ваттварметри

Практична частина

Зібрати електричне коло з відповідними параметрами джерел струму та ЕРС, відповідними опорами ділянок та отримати основні показники, як то струми ділянок та спад напруги на опорах. Схему в якості зразка представлено на рис. 10.12.

Параметри джерел та пасивних елементів: $E_1=85$ В, $E_2=103$ В, $E_3=63$ В, $J_1=5$ А, $R_1=38$ Ом, $R_2=27$ Ом, $R_3=18$ Ом, $R_4=55$ Ом, $R_5=16$ Ом.

Встановлюються ЕРС джерел напруги в середовищі MatLab, рис.10.13.

Джерело струму в середовищі MatLab призначено для змінного струму. З метою перетворення його на постійний, встановивши частоту га нуль, початкова фаза має бути 90° , рис. 10.14.

Типова ділянка для моделювання активного опору в схемі є Series RLC Branch. Задається тип ділянки, і найпростішим є R – виключно активний опір, рис. 10.15.

В старіших версіях MatLab тип ланки обрати неможливо. Тому якщо непотрібен активний опір, то прирівнювали $R=0$, якщо непотрібна індуктивність, то прирівнювали $L=0$, якщо непотрібна ємність, то

прирівнювали $C=\text{inf}$. Відповідні опори для схеми, що розглядається в якості зразка, рис. 10.16.

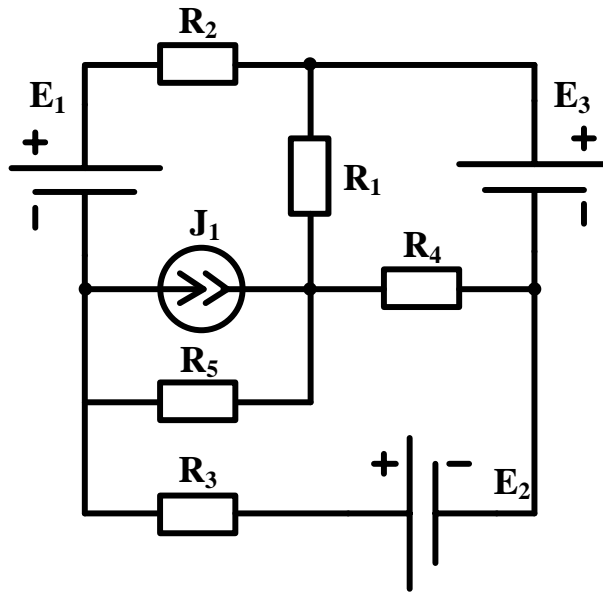


Рисунок 10.12. Робоча схема

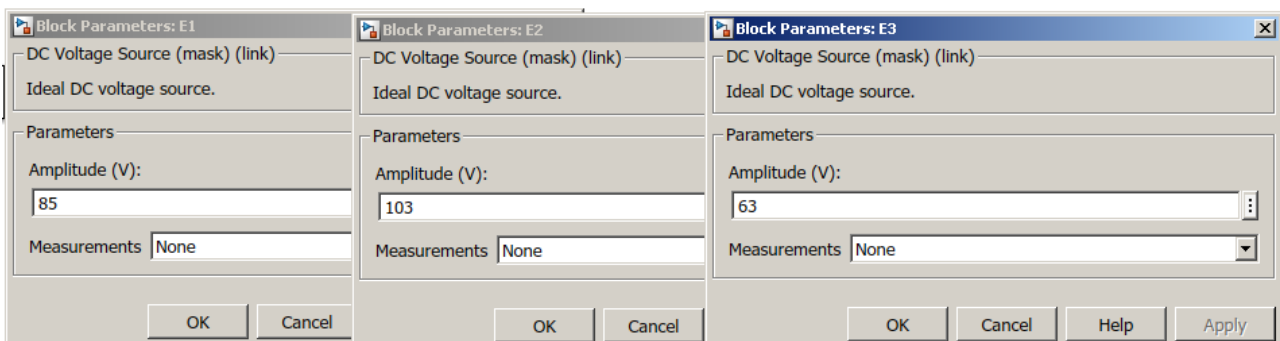


Рисунок 10.13. ЕРС джерел напруги

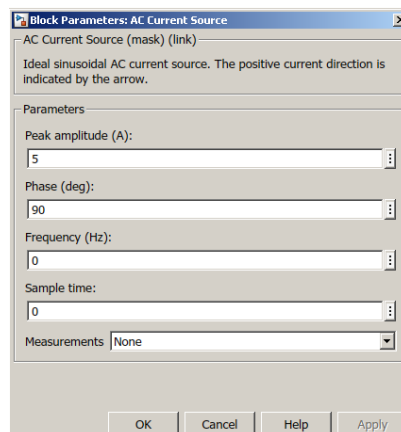


Рисунок 10.14. Джерело струму

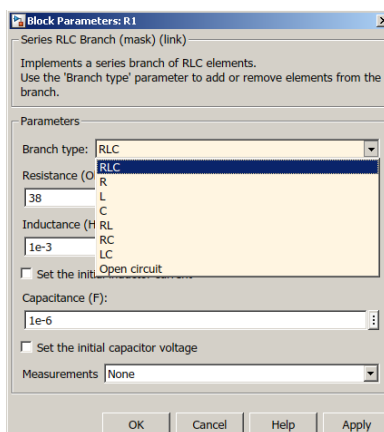


Рисунок 10.15. Тип та параметри ділянок

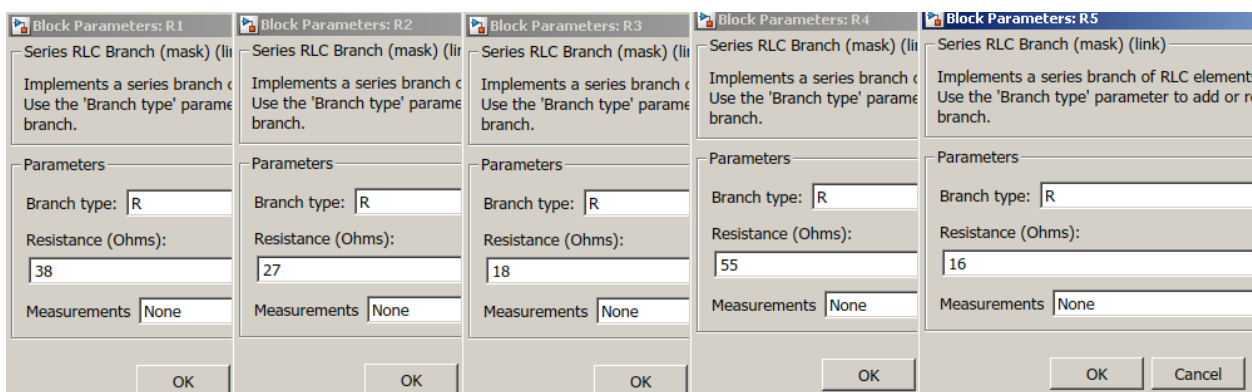


Рисунок 10.16. Опори ділянок

На рис. 10.17 показано запуск процедури моделювання. Тривалість моделювання за замовчуванням становить 10 с і є занадто великим, достатньо 1 с. Також обирається спосіб розв'язку задачі. Зазвичай для схем ТОЕ та електроенергетики це ode23t, ode23tb.

На рис. 10.18 показано часткові результати моделювання. Поміряно та отримано наступні величини:

- струм через опір R_3 , цей же струм є струмом джерела E_2 ,
- струм через опір R_5 ,
- спад напруги на опорі R_4 ,
- різницю потенціалів на затискачах джерела струму, що в даному конкретному випадку дорівнює спаду напруги на опорі R_5 ,
- ЕРС джерела E_3 для наочності.

Елементи передбачають умовно додатній напрямок і на рис. 10.18 він зі струм ділянки не співпав, що проявилось появою знака «-» на дисплеї.

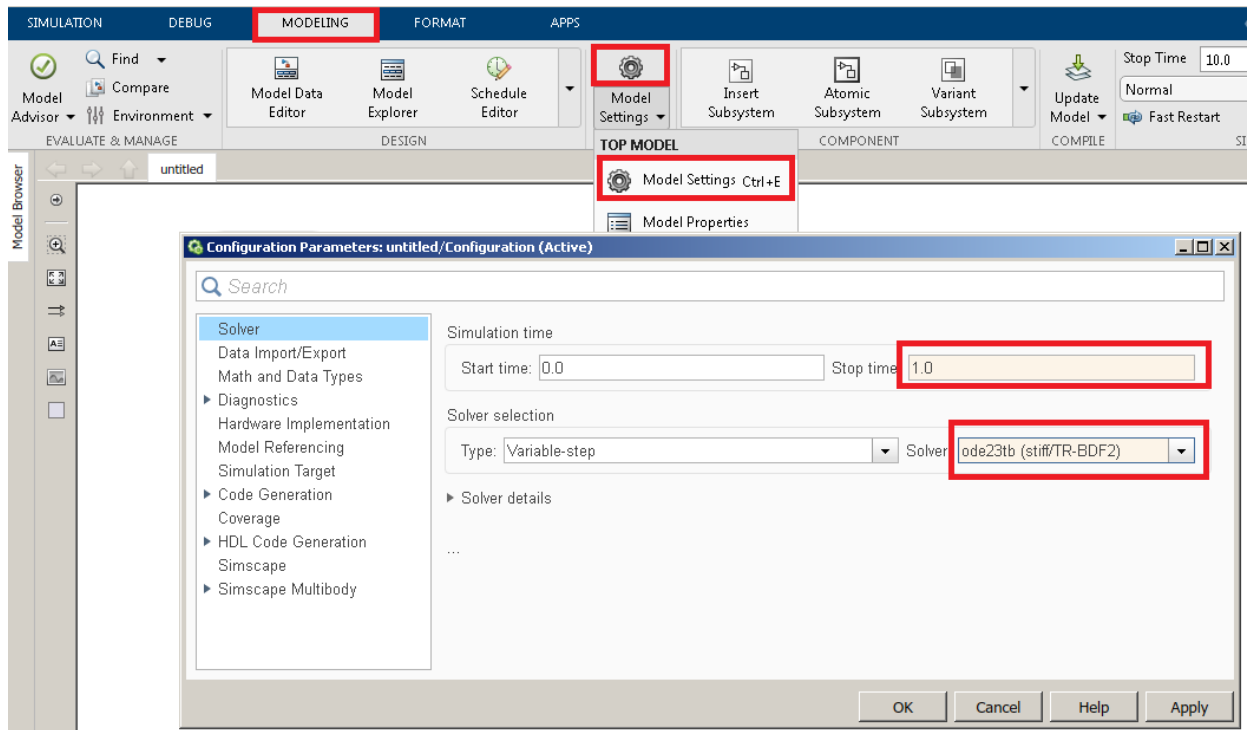


Рисунок 10.17. Запуск моделювання

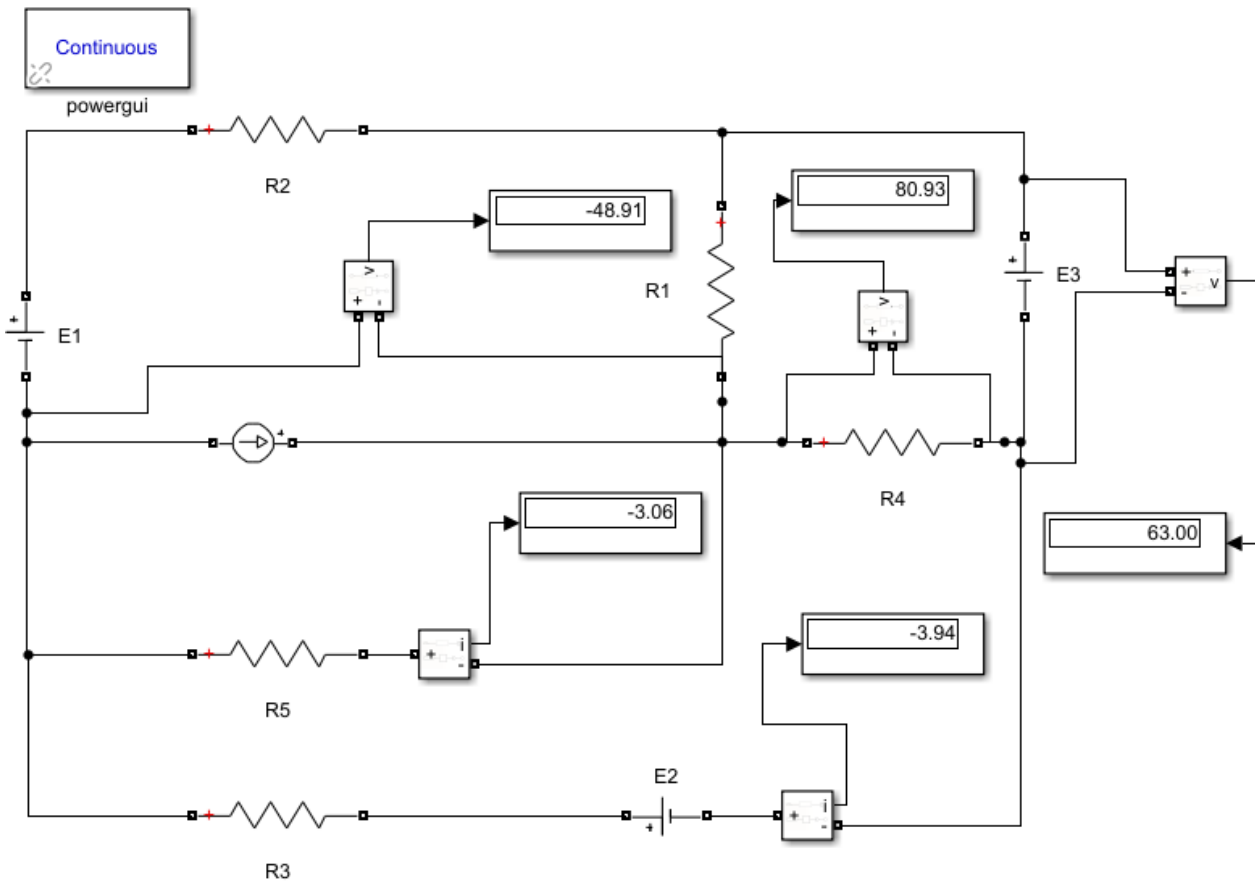


Рисунок 10.18. Проміжні результати моделювання

В схемах для індивідуальних завдань амперметри потрібно встановити на кожній ділянці, а вольтметри під'єднати до кожного опору та кожного джерела струму та напругу.

Безпосередньо отримати будь-які результати по завершенню моделювання неможливо. Саме для цього використовуються наявні вимірювальні блоки. Під'єднати дисплей чи осцилограф до джерела, опору/ділянки, споживача безпосередньо не вийде. Це так звані силові кола – місця, де протікає струм, потужність, прикладено ЕРС та напругу.

Інформація на дисплеях чи графік в осцилографі надходить інформаційними колами – вони починаються на виході амперметрів, вольтметрів, мультиметрів, ватварметрів.

Якщо є струм ділянки та спад напруги на ній, то можна виміряти потужність. На рис. 10.17 показано червоним кольором фрагменти силових кіл, до яких під'єднано вимірювачі. Виміряно потужність на опорі R5. Синім кольором показано інформаційні зв'язки: вихід амперметра та вольтметра. Обидва, і вхід і вихід ватварметра є інформаційними, і безпосередньо до струмоведучих частин та ділянок з прикладеною напругою даний вимірювач приєднати неможливо. Також на рис. 10.17. показано, що в схемі постійного струму та напруги відсутня реактивна потужність.

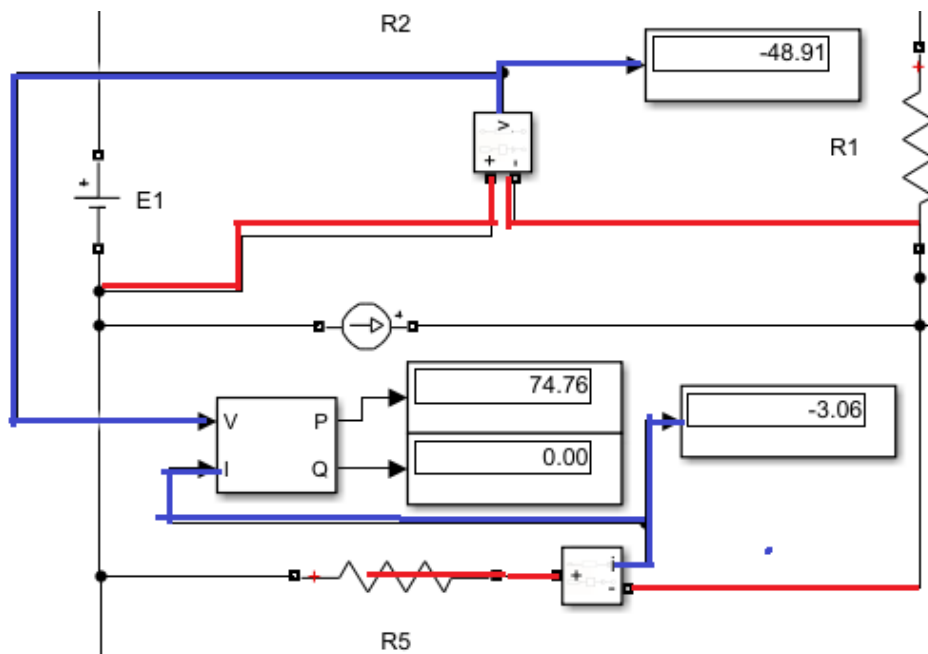


Рисунок 10.17. Силові кола та інформаційні зв'язки. Фрагмент

Індивідуальне завдання

На рис. 10.18 представлено схеми для індивідуального завдання. В таблиці 10.1 представлено вихідні дані для елементів схем. Номер схеми та номер стовпця вихідних даних задається викладачем.

Студенти повинні зібрати свою схему, внести відповідні параметри елементів, запустити моделювання, отримати режимні параметри – струми ділянок, спади напруги на опорах, різниця потенціалів на джерелі струму, ЕРС джерел напруги. В схемах для індивідуальних завдань амперметри потрібно встановити на кожній ділянці, а вольтметри під'єднати до кожного опору та кожного джерела струму та напруг.

Вручну здійснити перевірку виконання першого та другого законів Кірхгофа.

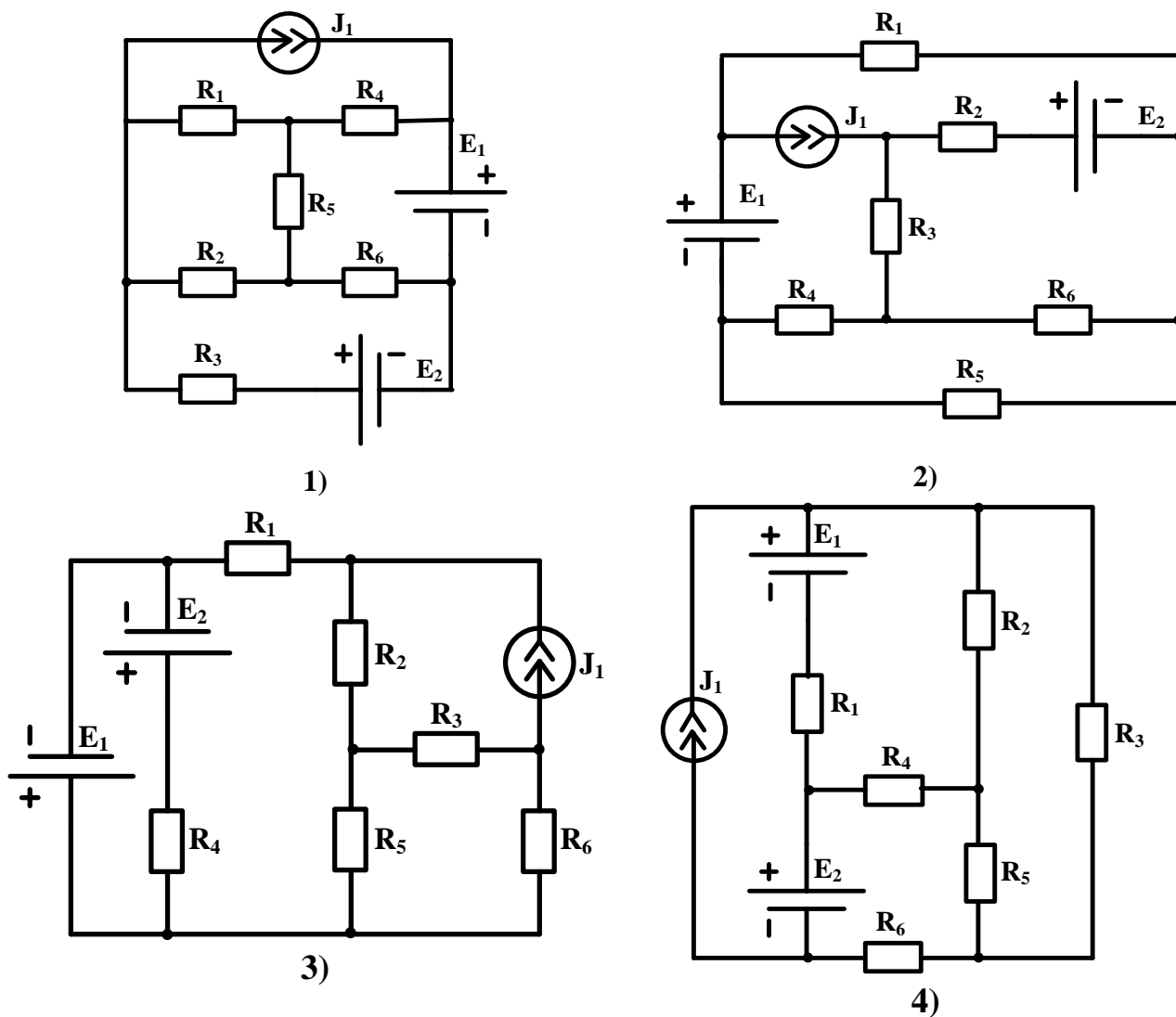
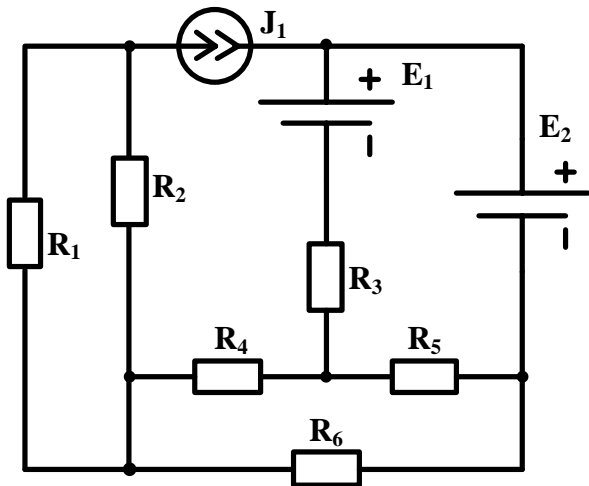
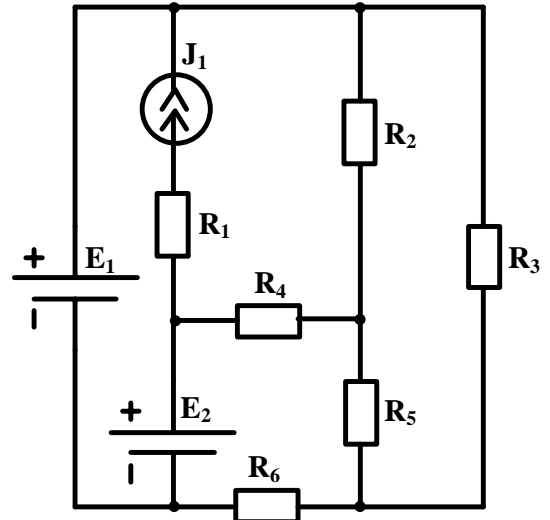


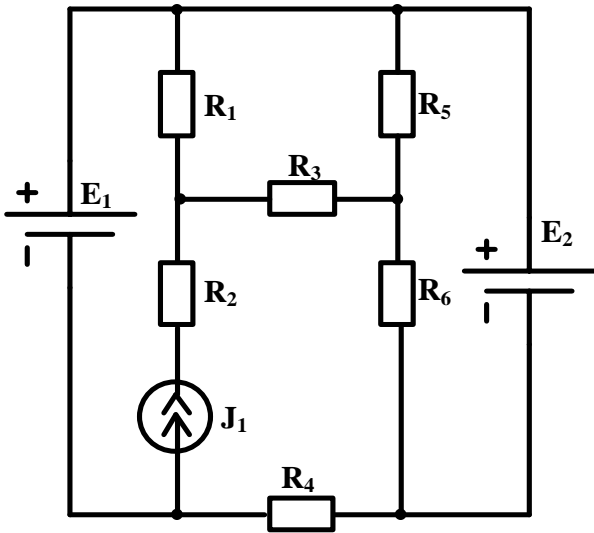
Рисунок 10.18. Схеми для дослідження



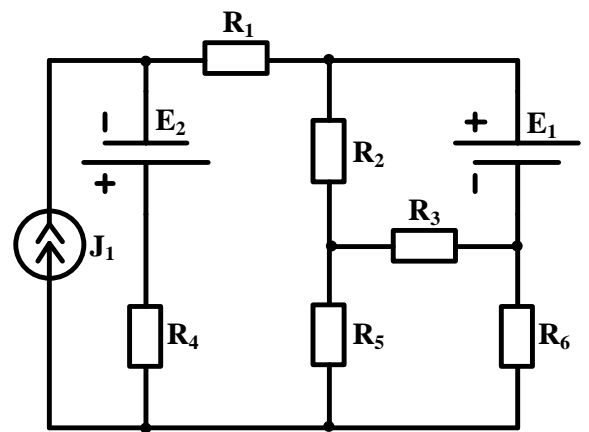
5)



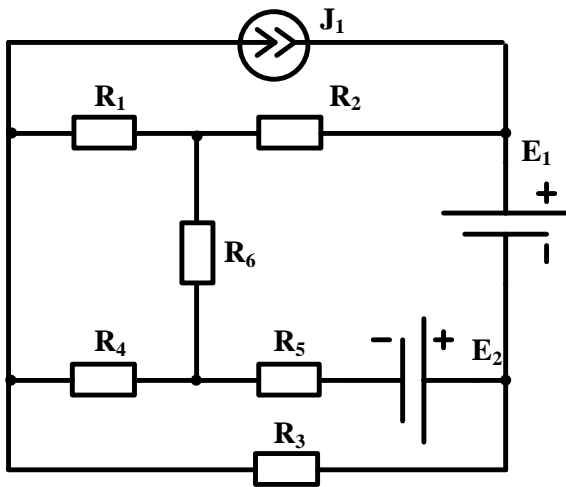
6)



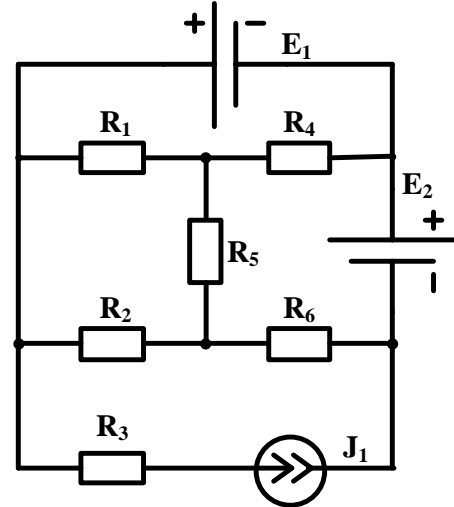
7)



8)

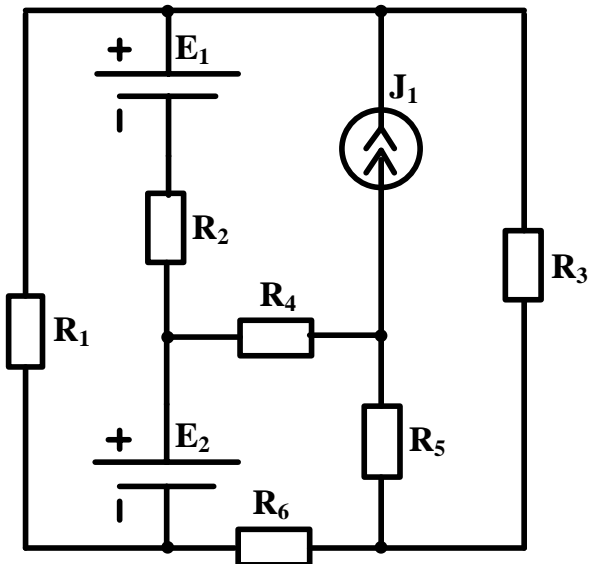


9)

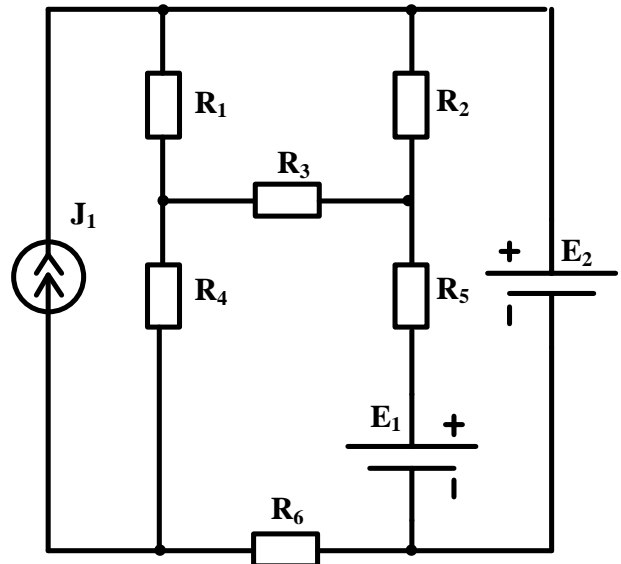


10)

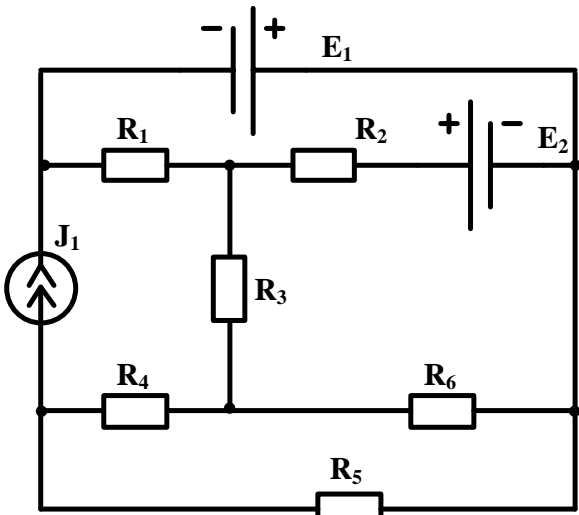
Рисунок 10.18. Продолження



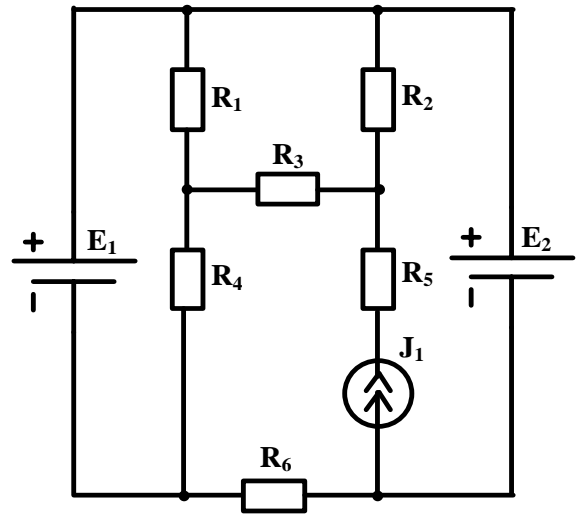
11)



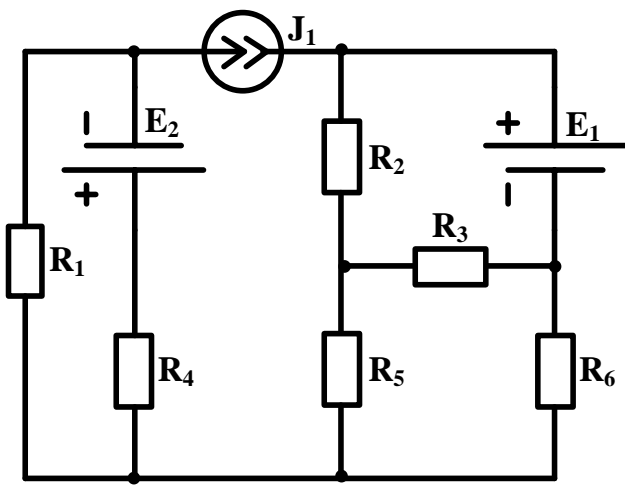
12)



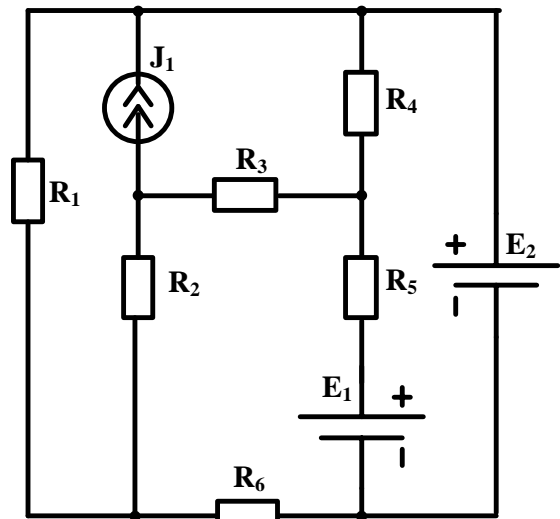
13)



14)

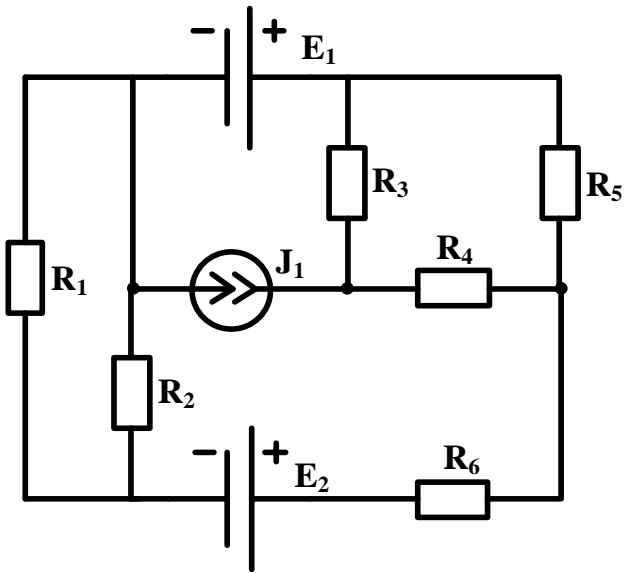


15)

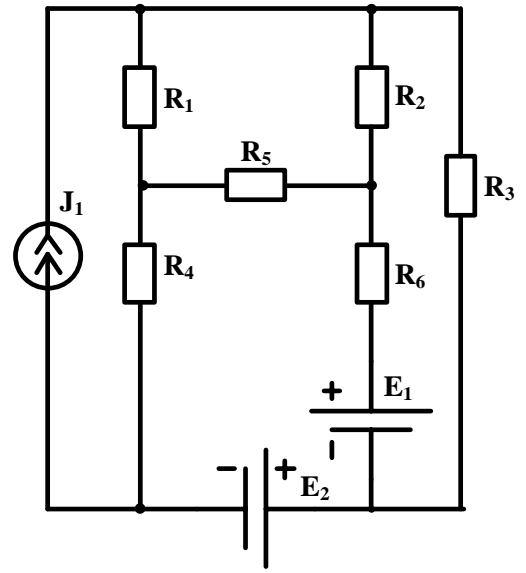


16)

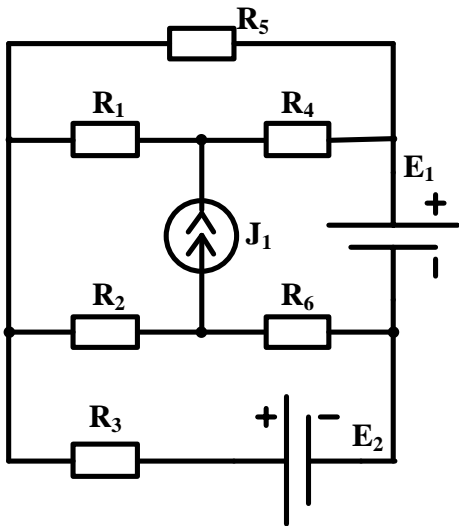
Рисунок 10.18. Продовження



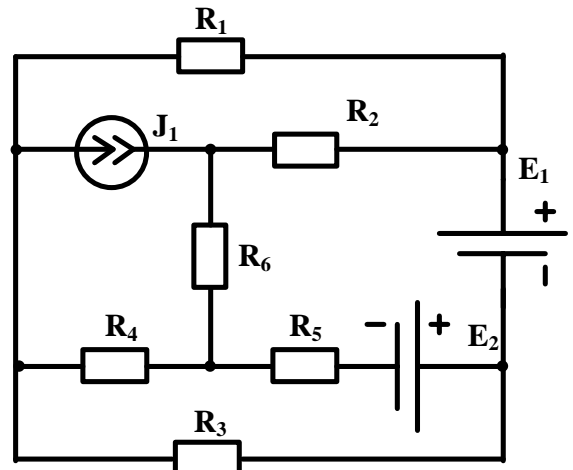
17)



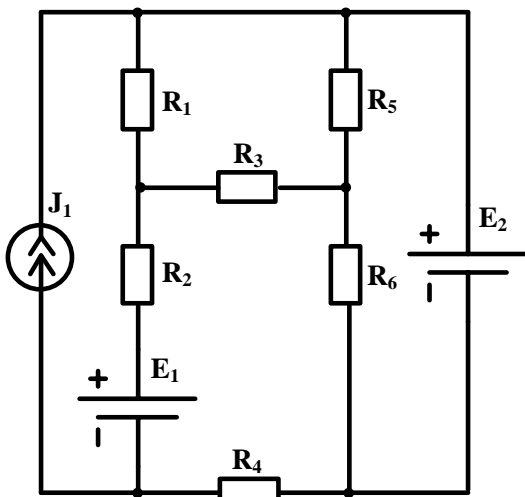
18)



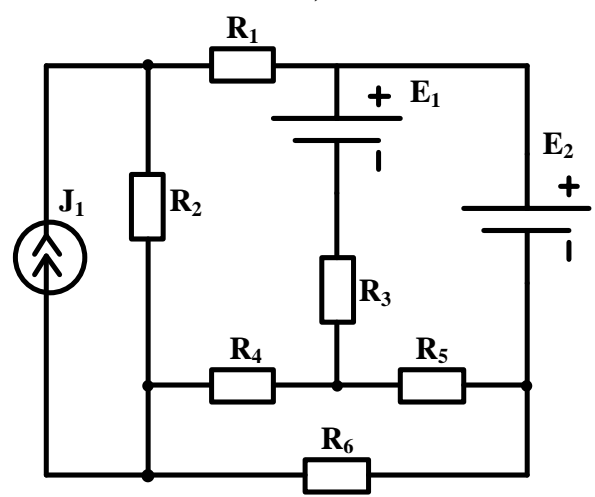
19)



20)

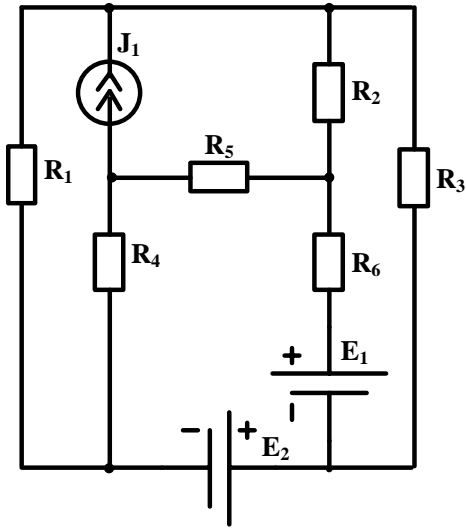


21)

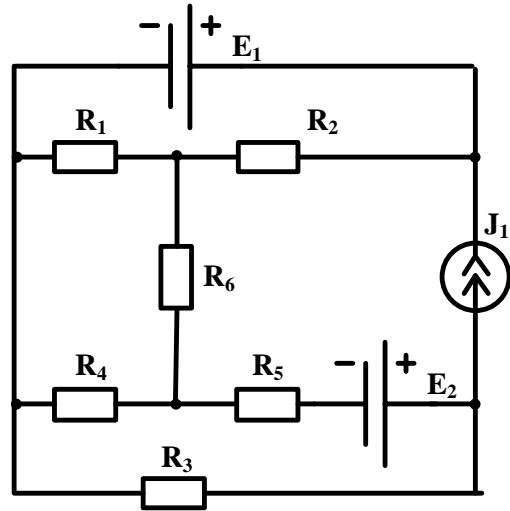


22)

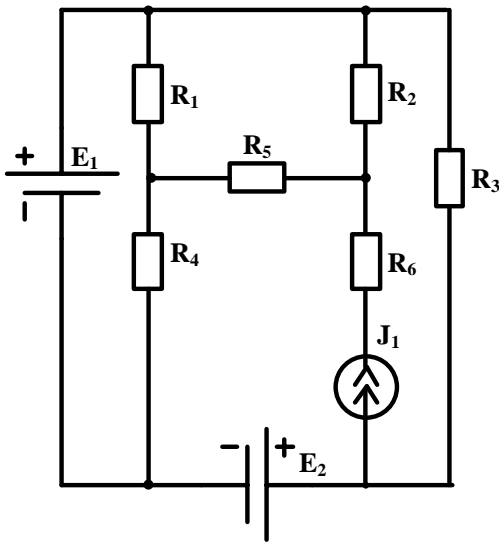
Рисунок 10.18. Продолження



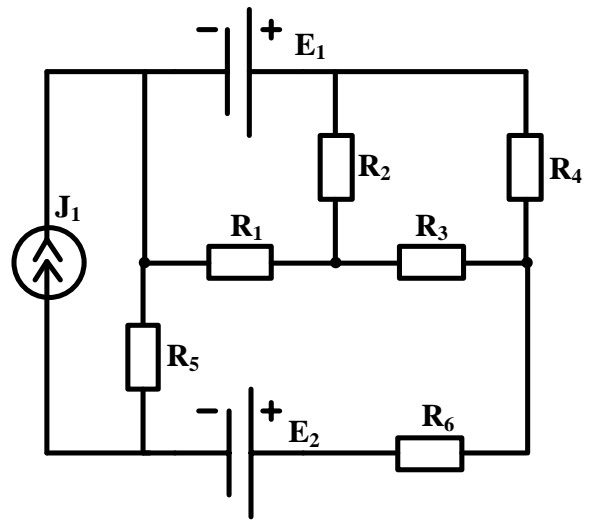
23)



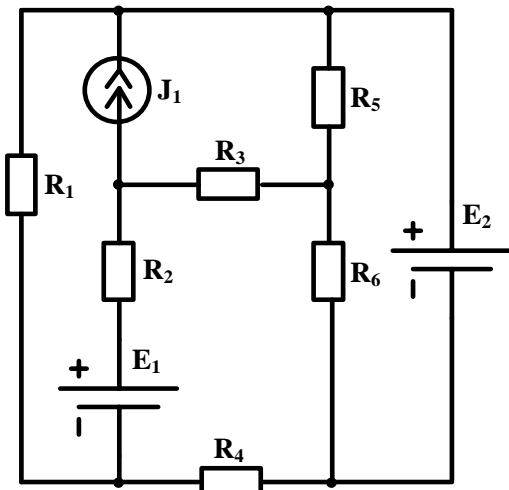
24)



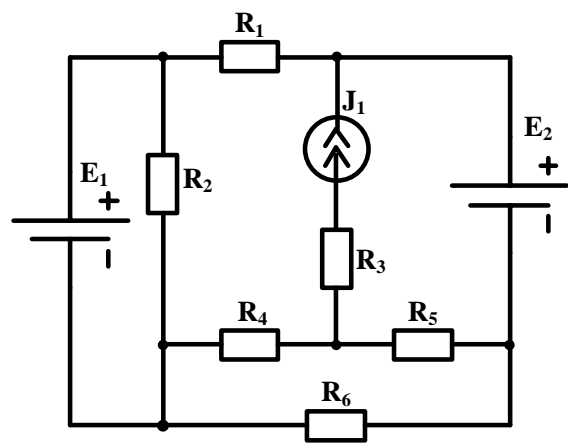
25)



27)

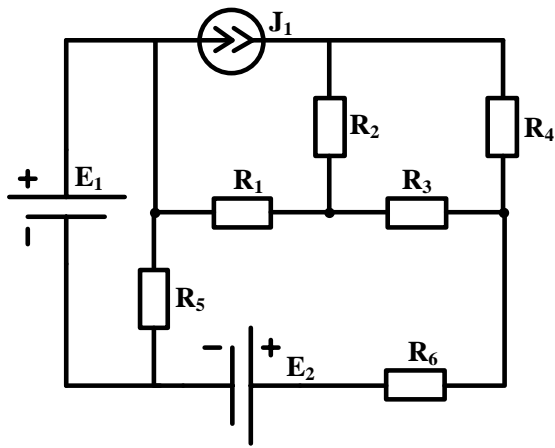


27)

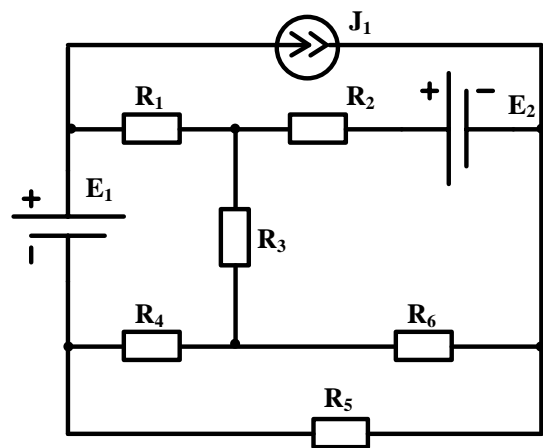


28)

Рисунок 10.18. Продовження



29)



30)

Рисунок 10.18. Завершення

Таблиця 10.1. Початкові дані схем

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
$E_1, \text{В}$	71	85	83	106	108	74	74	112	64	104
$E_2, \text{В}$	78	118	110	56	103	118	85	118	120	90
$J_1, \text{А}$	4	3	5	4	5	8	6	1	2	7
$R_1, \text{Ом}$	32	38	45	53	50	52	26	33	59	30
$R_2, \text{Ом}$	34	24	27	15	23	67	59	57	17	20
$R_3, \text{Ом}$	46	52	35	41	42	25	62	29	32	61
$R_4, \text{Ом}$	58	24	18	39	19	32	35	31	25	21
$R_5, \text{Ом}$	14	33	63	23	15	64	37	47	59	17
$R_6, \text{Ом}$	30	62	40	60	22	46	62	48	26	55

Таблиця 10.1. Продовження

Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
$E_1, \text{В}$	101	101	60	75	100	92	108	118	88	92
$E_2, \text{В}$	58	98	70	54	89	84	51	50	55	119
$J_1, \text{А}$	5	5	7	1	4	8	10	3	3	7
$R_1, \text{Ом}$	52	63	50	30	54	49	69	56	14	45
$R_2, \text{Ом}$	40	22	56	48	63	58	55	14	40	33
$R_3, \text{Ом}$	52	64	61	28	68	14	61	37	31	62
$R_4, \text{Ом}$	60	19	59	63	65	54	59	28	18	60
$R_5, \text{Ом}$	17	49	50	41	14	55	20	45	33	24
$R_6, \text{Ом}$	57	48	55	49	56	37	16	53	20	64

Таблиця 10.1. Завершення

Варіант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
E₁, В	63	96	56	110	74	115	74	56	110	59
E₂, В	119	61	72	113	110	108	66	65	76	112
J₁, А	11	1	6	7	7	4	6	8	10	8
R₁, Ом	14	14	65	60	55	67	24	61	32	41
R₂, Ом	44	33	51	51	56	65	17	61	60	34
R₃, Ом	19	43	14	20	19	31	47	51	40	32
R₄, Ом	14	23	39	67	22	18	64	28	47	20
R₅, Ом	40	33	38	40	20	16	41	25	60	16
R₆, Ом	27	68	32	31	53	41	27	35	15	41

Тема №11

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ. ПЕРЕВІРКА ВИКОНАННЯ ЗАКОНІВ ОМА ТА КІРХГОФА, ВИКОНАННЯ БАЛАНСУ ПОТУЖНОСТЕЙ

Мета роботи: моделювання електричних кіл змінного струму, використання вбудованого інструментарію MatLab для поточної та комплексної перевірки виконання першого закону Кірхгофа, другого закону Кірхгофа та балансу потужностей.

Теоретичні положення

Найпростіше для збирання є електричне коло постійного струму з елементами що мають виключно активний опір. Необхідний об'єм вимірювань досягається шляхом застосування амперметрів та вольтметрів на кожній ділянці, що ускладнює читання схеми. Що стосується опору та навантаження, то в електричних мережах типовий опір має активно-індуктивний характер, типова поперечна провідність – активно-ємнісна, навантаження зазвичай активно-індуктивне. В MatLab фігурують терміни активний опір або резистанс, індуктивність та ємність.

В програмному середовищі MatLab активний опір вноситься без проблем а розуміння що саме є індуктивним та ємнісним опором відсутнє. Індуктивний опір має бути перерахований на індуктивність а ємнісний опір на ємність, що робиться завідомими співвідношеннями:

$$X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \quad (11.1)$$

$$X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad (11.2)$$

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (11.3)$$

$$C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C} \quad (11.4)$$

де X_L – індуктивний опір, Ом;

X_C – ємнісний опір, Ом;

f – частота струму в мережі, в електричному колі. Типова величина становить 50 Гц;

L – індуктивність елемента, Гн;

C – ємність елемента, Ф.

Перераховані по відношенню до відповідних опорів ємність та індуктивність вносяться у відповідні поля ланок «Послідовне/паралельне з'єднання елементів R, L та C». У діалоговому вікні «Параметри ділянки» також є інструмент вимірювань, в переліку якого є можливість поміряти або

струм, що протікає ділянкою, або спад напруги на ділянці, або одночасно і струм і спад напруги, рис. 11.1. Використаємо останнє.

Усі параметри, які потрібно виміряти, з'являються у блоці «Мультиметр». На рис.11.2 показано даний блок та приклад можливого переліку параметрів для вимірювання. У вікні доступних вимірювань показано спади напруги по фазах на опорі трифазної ділянки, фазні наруги трифазного активно-індуктивно-ємнісного навантаження, фазні струми, що протікають опором трифазної ділянки та фазні струми трифазного навантаження. Те, що вимагає безпосереднього виміру направляється у вікно відповідних обраних вимірювань.

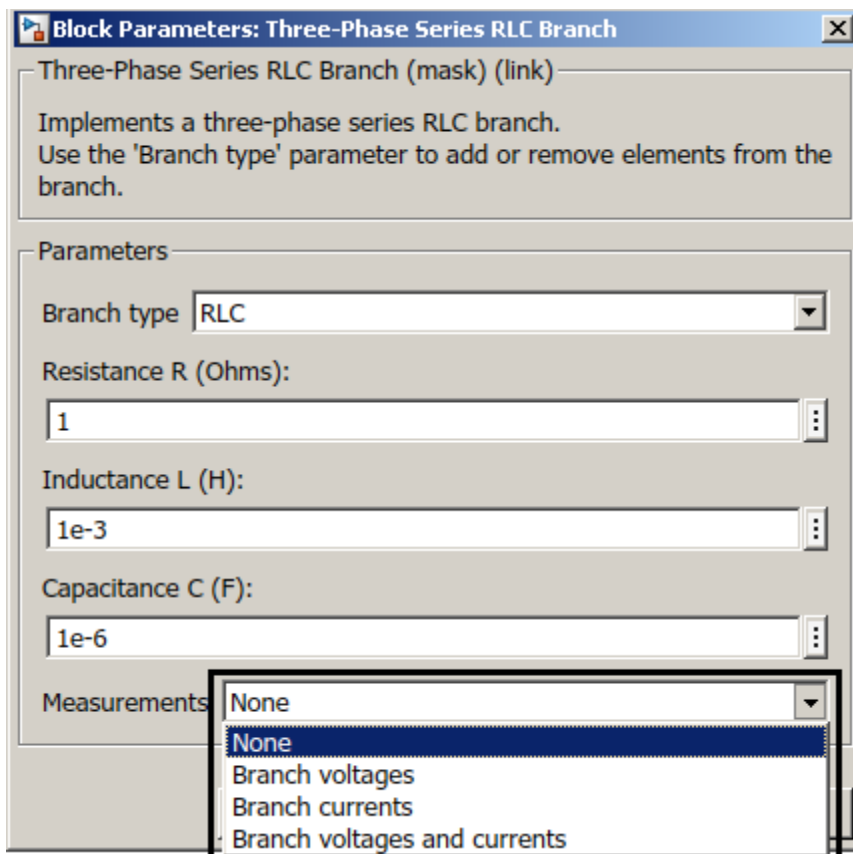


Рисунок 11.1. Параметри ділянки та доступні вимірювання

У джерел струму доступним для вимірювання є власне струм, у джерел напруги – відповідний рівень ЕРС. Таким чином, отримавши значення струмів ділянок, що сходяться у вузлі, виконується перевірка першого закону Кірхгофа. Вимірявши спади напруг на ділянках замкненого контуру і порівнявши отриману величину із ЕРС цього контуру, виконується перевірка другого закону Кірхгофа.

Обравши у мультиметрі спад напруги та струм окремої ділянки, приєднавши через демультіплексор та мультиплексом, ватварметр а потім

екран, можна визначити потужність споживання ланки і в подальшому перевірити баланс потужностей, рис. 11.3.

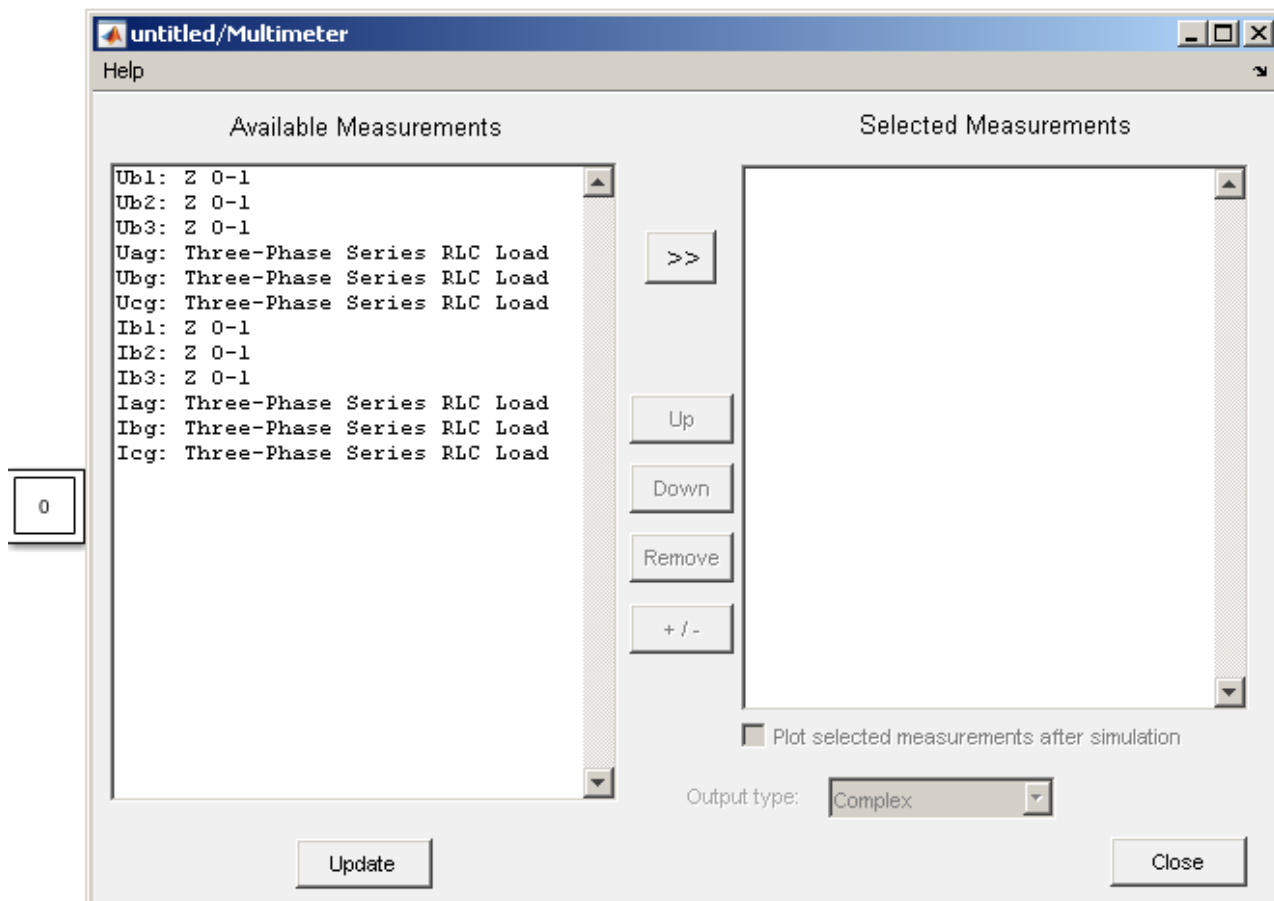


Рисунок 11.2. Мультиметр

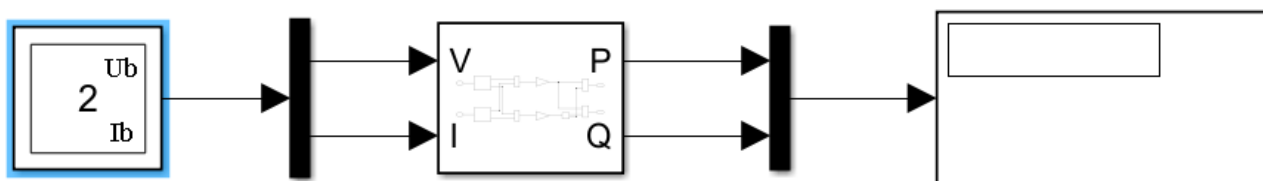


Рисунок 11.3. Потужність споживання окремої ділянки

Практична частина

Зібрати електричне коло з відповідними параметрами джерел струму та ЕРС, відповідними опорами ділянок та отримати основні показники, як то струми ділянок спад напруги на опорах, формування балансу потужності, перевірка виконання першого та другого законів Кірхгофа. Схему в якості зразка представлено на рис. 11.4, взяту за основу з теми №10. Джерела постійної напруги замінюються на відповідні джерела змінної напруги. В джерелі струму тепер можна поставити 50 Гц і прибрати початкову фазу. Опори

ділянок замість активних замінюються на активно-індуктивні та активно-ємнісні.

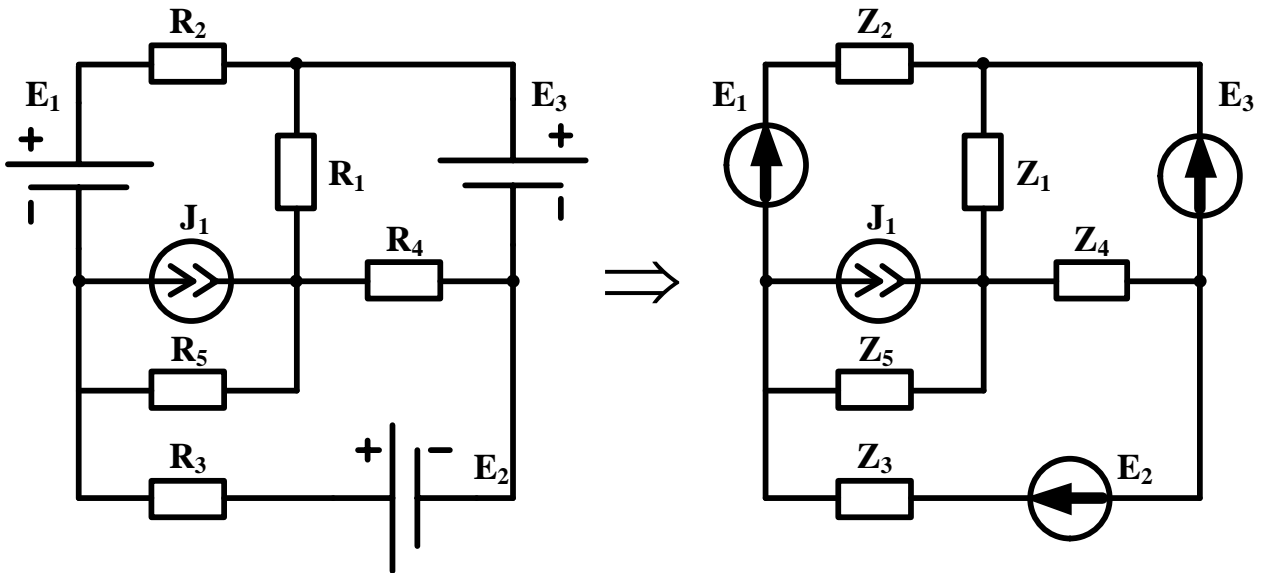


Рисунок 11.4. Робоча схема

Параметри джерел: $E_1=85$ В, $E_2=103$ В, $E_3=63$ В, $J_1=5$ А. Модуль повного опору пасивних елементів: $Z_1=38$ Ом, $Z_2=27$ Ом, $Z_3=18$ Ом, $Z_4=55$ Ом, $Z_5=16$ Ом. Відповідні коефіцієнти потужності даних опорів: $\cos(\varphi_{Z1})=0,76$ інд, $\cos(\varphi_{Z2})=0,88$ інд, $\cos(\varphi_{Z3})=0,71$ ємн, $\cos(\varphi_{Z4})=0,83$ інд, $\cos(\varphi_{Z5})=0,74$ ємн.

На прикладі двох ділянок розрахуємо активну та реактивну складові опору. Ділянка Z_1 , активний опір:

$$R_1 = Z_1 \cdot \cos(\varphi_{Z1}) = 38 \cdot 0,76 = 28,88(\text{Ом})$$

Індуктивний опір:

$$X_{L1} = Z_1 \cdot \sin(\varphi_{Z1}) = 38 \cdot \sqrt{1 - 0,76^2} = 24,70(\text{Ом})$$

Індуктивність:

$$L_1 = \frac{X_{L1}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{24,70}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,0786(\text{Гн})$$

Ділянка Z_3 , активний опір:

$$R_3 = Z_3 \cdot \cos(\varphi_{Z3}) = 18 \cdot 0,71 = 12,78(\text{Ом})$$

Ємнісний опір:

$$X_{C3} = Z_3 \cdot \sin(\varphi_{Z3}) = 18 \cdot \sqrt{1 - 0,71^2} = 12,68(\text{Ом})$$

Ємність:

$$C_3 = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_{C3}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 12,68} = 2,511 \cdot 10^{-4} (\Phi)$$

Відповідні параметри ділянок представлено на рис. 11.5. Для усіх ділянок вимірюються струми та напруги.

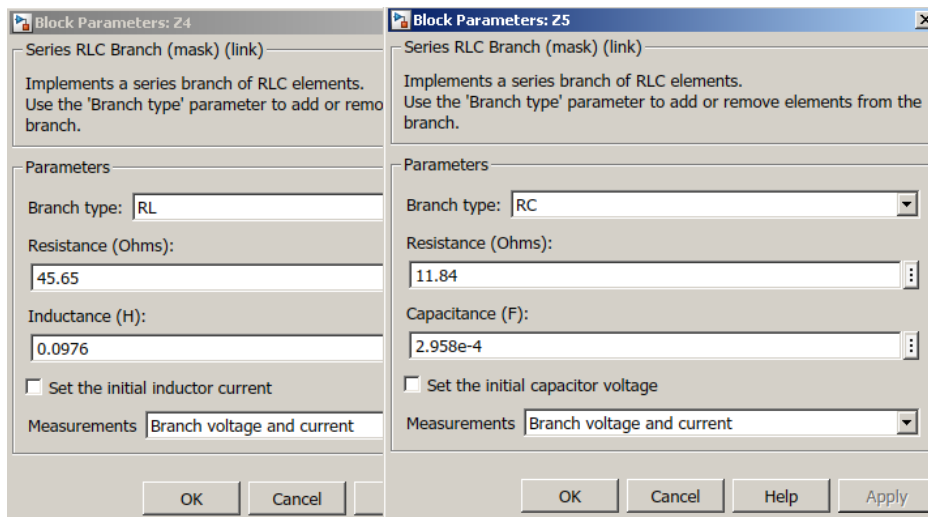
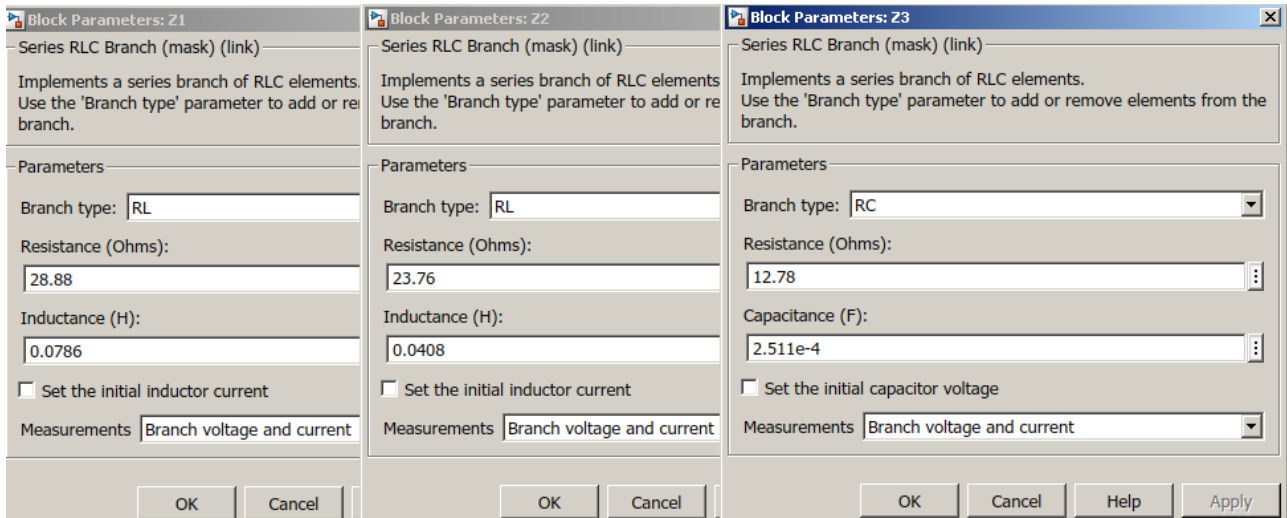


Рисунок 11.5. Параметри опорів Z_1 , Z_2 , Z_3 , Z_4 та Z_5

В параметрах джерел енергії проставляється амплітудне значення ЕРС та струму, тобто задане в таблиці діюче значення, помножене на $\sqrt{2}$, та частота 50 Гц. В джерелі струму для даного випадку прибирається початкова фаза 90° , рис.11.6. На відповідних джерелах вимірюється відповідний параметр.

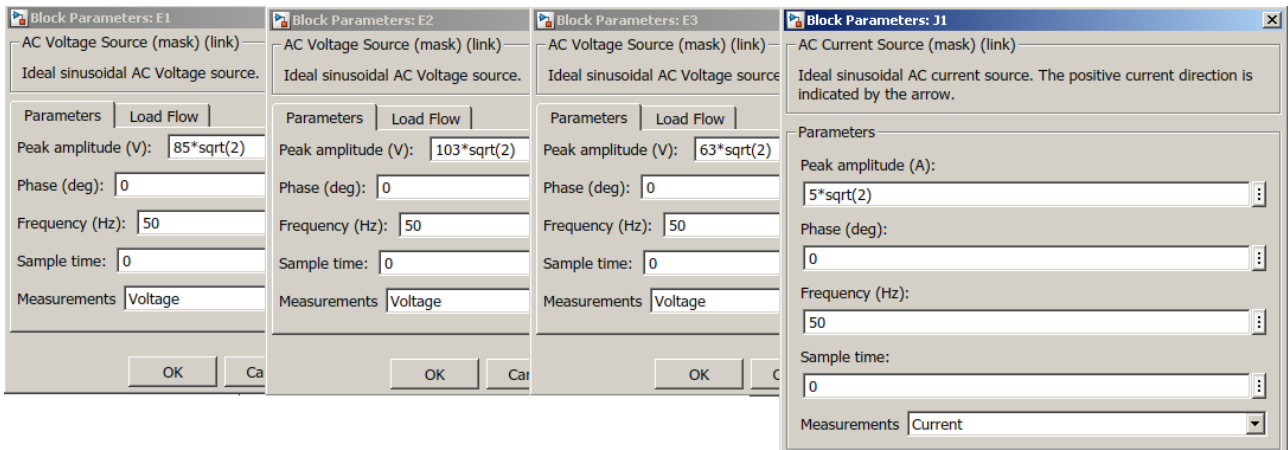


Рисунок 11.6. Джерела ЕРС E_1 , E_2 , E_3 та джерело струму J_1

Зібрану схему представлено на рис.11.7. Також, на даному рисунку показано необхідність розташування амперметра у ділянці з джерелом напруги E_3 та блок пере направлення сигналу «Goto» зі значенням виміряного струму на ім'я I_{E3} .

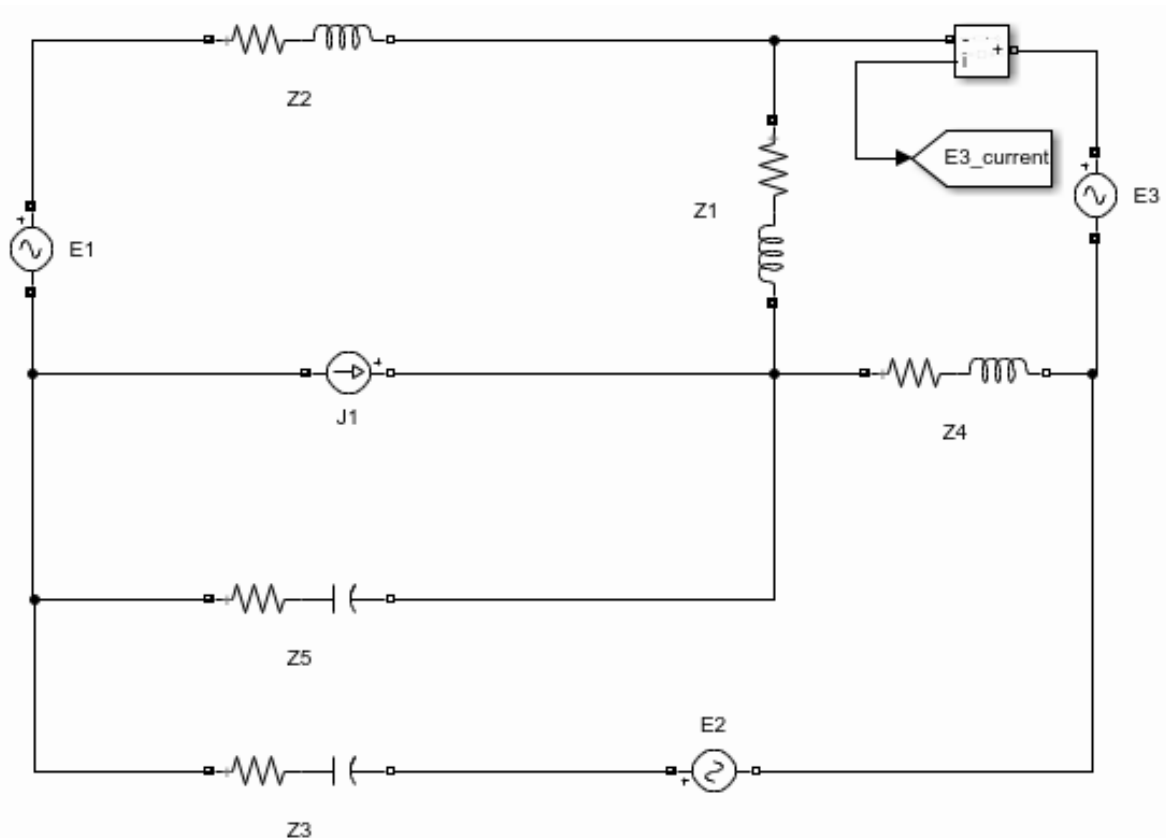


Рисунок 11.7. Зібрана схема

Дана схема містить три вузли, тому перший закон Кірхгофа перевірятиметься для двох вузлів, і три контури, для яких перевірятиметься

другий закон Кірхгофа. За правилом формування системи рівнянь для розрахунку електричного кола, кількість рівнянь за першим законом Кірхгофа на одне менше за кількості вузлів. Перший вузол: I_1, I_4, I_5 та J_1 , рис.11.8. Другий вузол: I_2, I_3, I_5 та J_1 , рис.11.9.

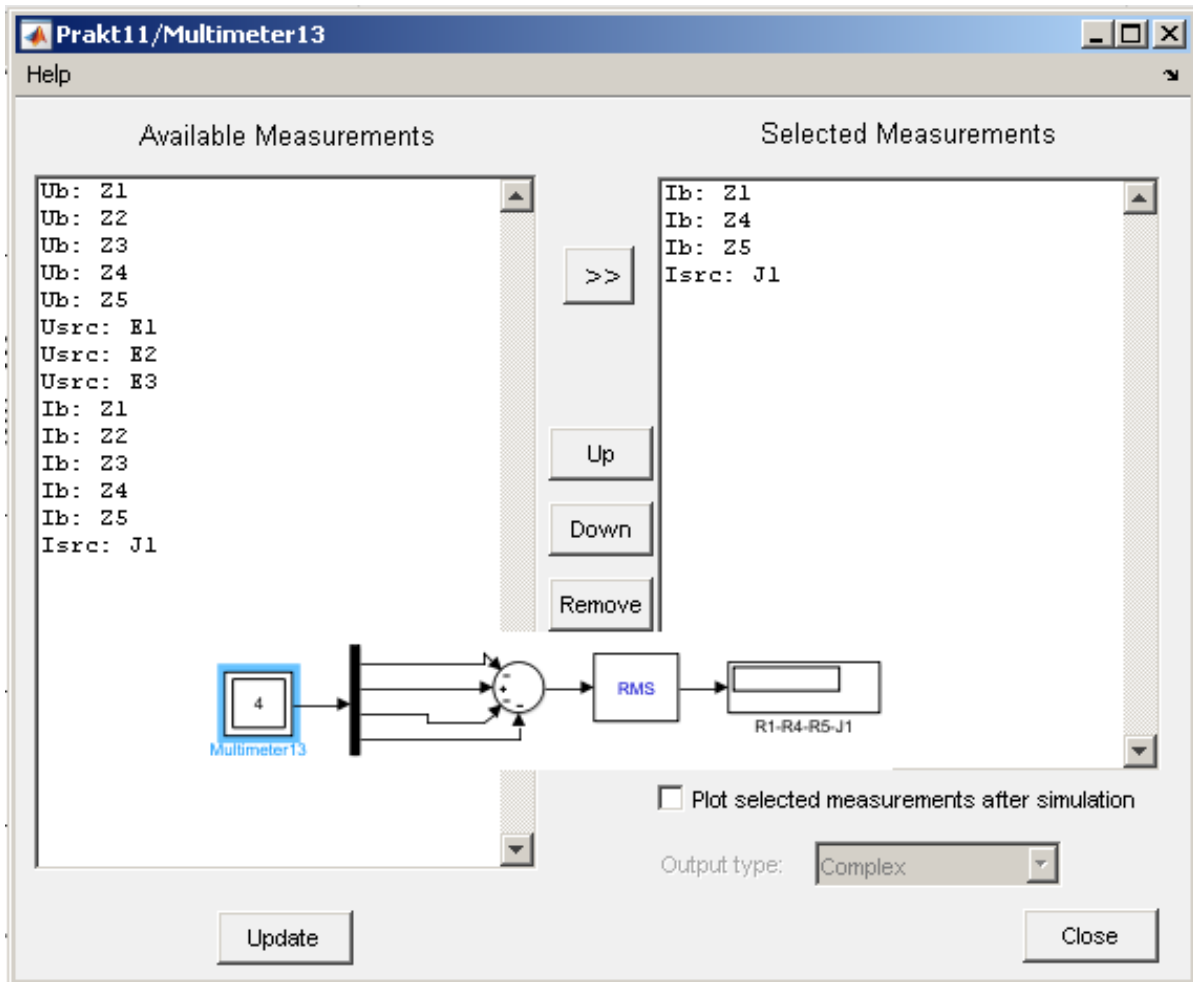


Рисунок 11.8. Перший закон Кірхгофа для першого обраного вузла

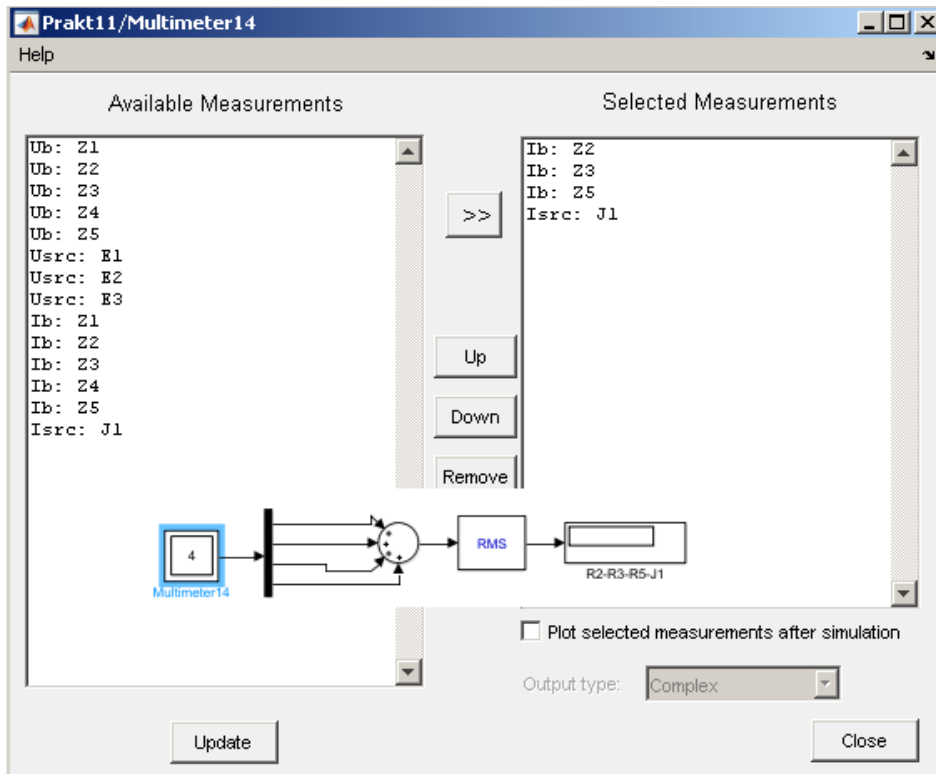


Рисунок 11.9. Перший закон Кірхгофа для другого обраного вузла

По контурах. Перший контур: спад напруги на опорах Z_1 , Z_2 та Z_5 ; ЕРС E_1 ,
рис.11.10

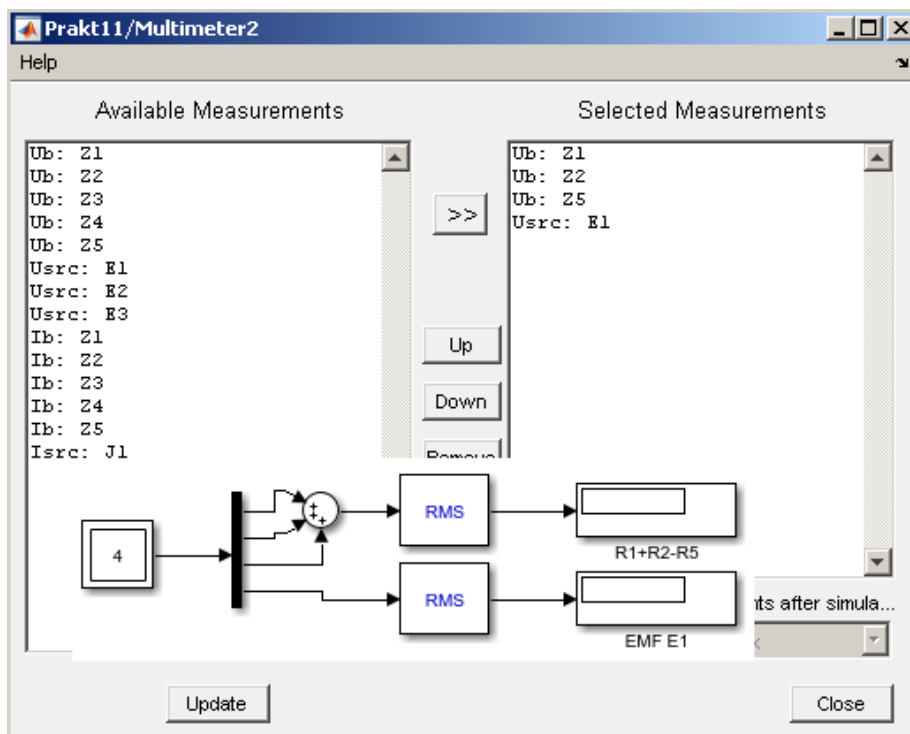


Рисунок 11.10. Другий закон Кірхгофа для першого обраного контуру

Другий контур: спад напруги на опорах Z_3, Z_4 та Z_5 ; ЕРС E_2 , рис.11.11

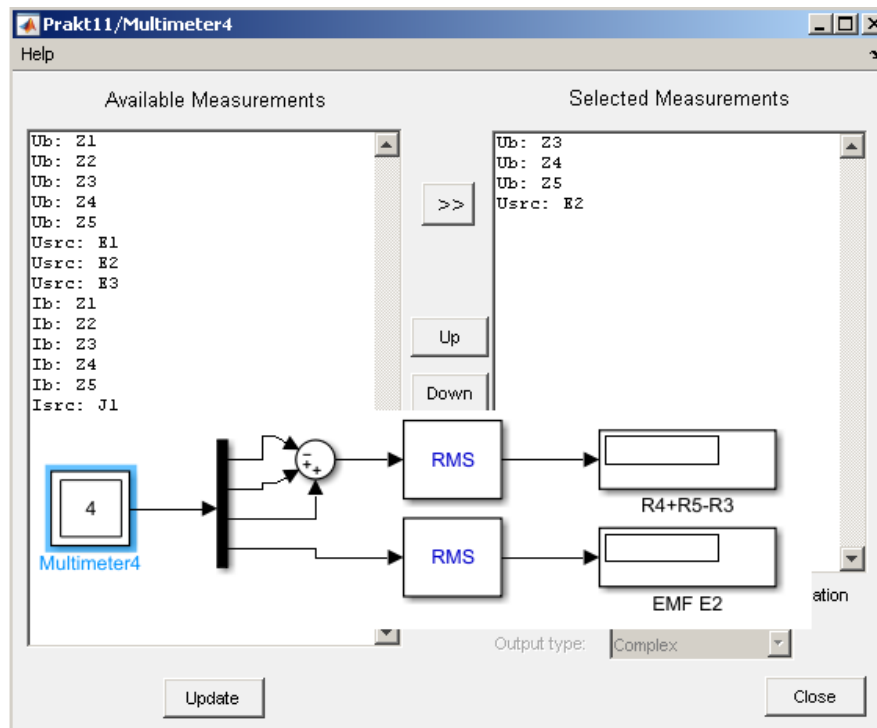


Рисунок 11.11. Другий закон Кірхгофа для другого обраного контуру

Третій контур: спад напруги на опорах Z_3 та Z_4 ; ЕРС E_3 , рис.11.12

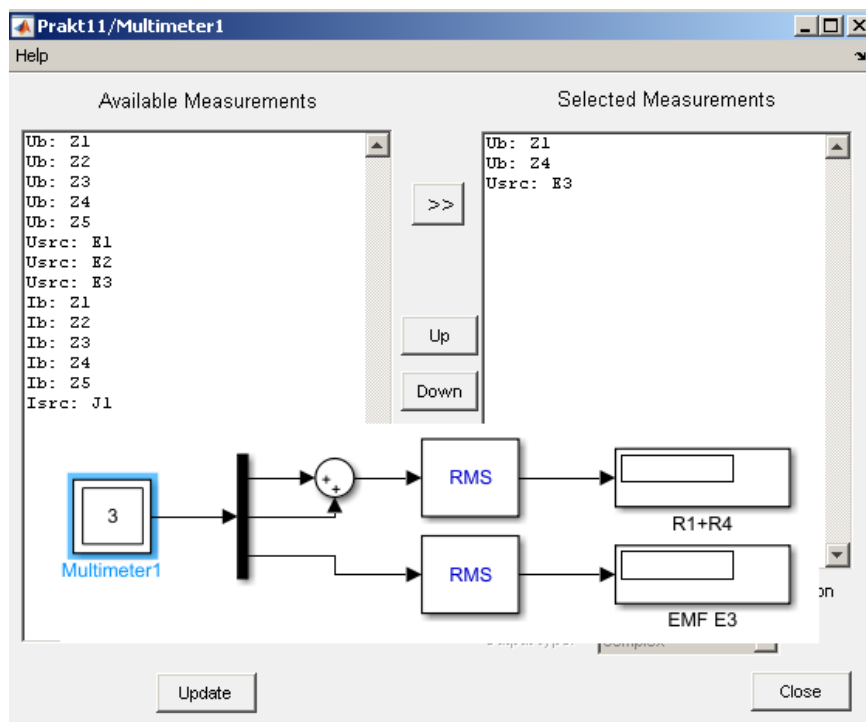


Рисунок 11.12. Другий закон Кірхгофа для третього обраного контуру

Знаки на входах в «Суматор» доведеться виставляти безпосередньо за місцем по факту. Струм може не співпасти з умовно додатнім напрямком ділянки і з'явиться знак «-». Звідси і спад напруги матиме відвідний знак. Тому ще раз: знаки суматора доведеться підбирати за місцем безпосередньо.

Блок «RMS» вимірює середньоквадратичне значення величини. Базисна частота за замовчуванням у даному блоці 60 Гц. Потрібно виправити на 50 Гц, рис.11.13.

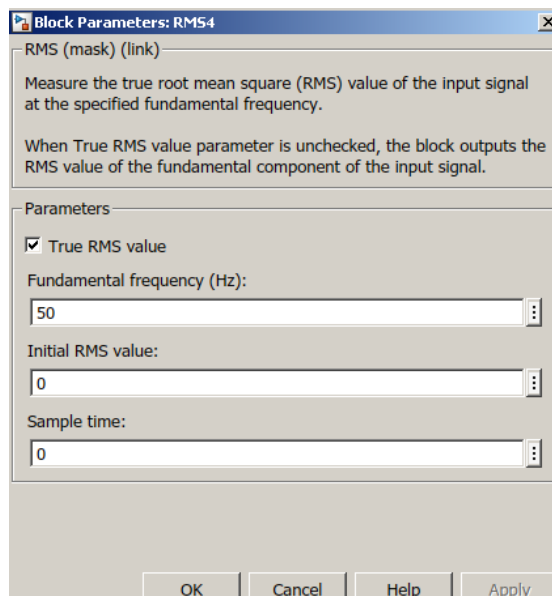


Рисунок 11.13. Блок RMS

З урахуванням вище описаної методики отримання значень та враховуючи інформацію по вимірюванню потужності рис. 11.3, нижче представлено споживання потужності опорами ділянок, рис.11.14., та потужність генерації джерел, рис.11.15.

На рис.11.16 представлено перевірку виконання першого закону Кірхгофа для обраних вузлів. Як видно, алгебраїчна сума струмів у вузлі дорівнює нулю.

На рис. 11.17 представлено перевірку виконання другого закону Кірхгофа для обраних контурів. Як видно, діюче значення суми спадів напруги на опорах, що входять до замкненого контуру дорівнює діючому значенню ЕРС в цьому контурі.

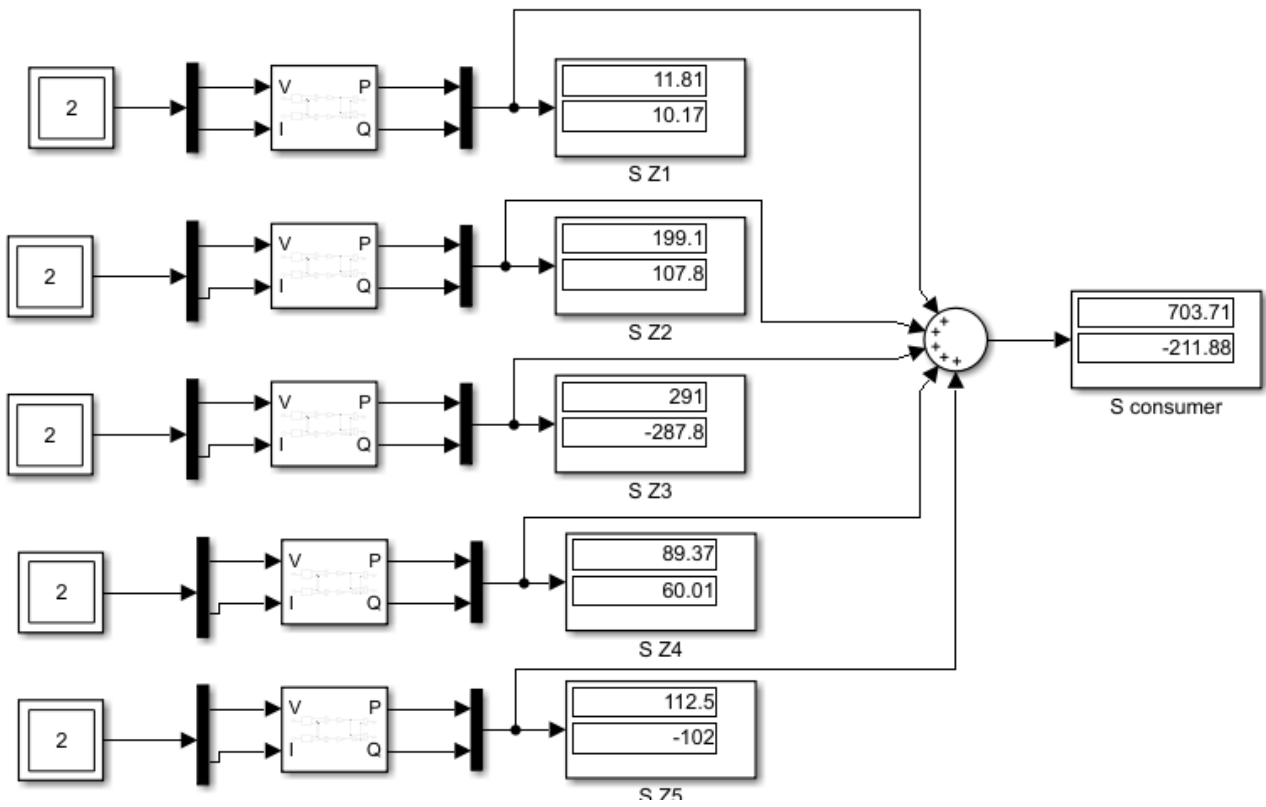


Рисунок 11.14. Потужність споживання опорам

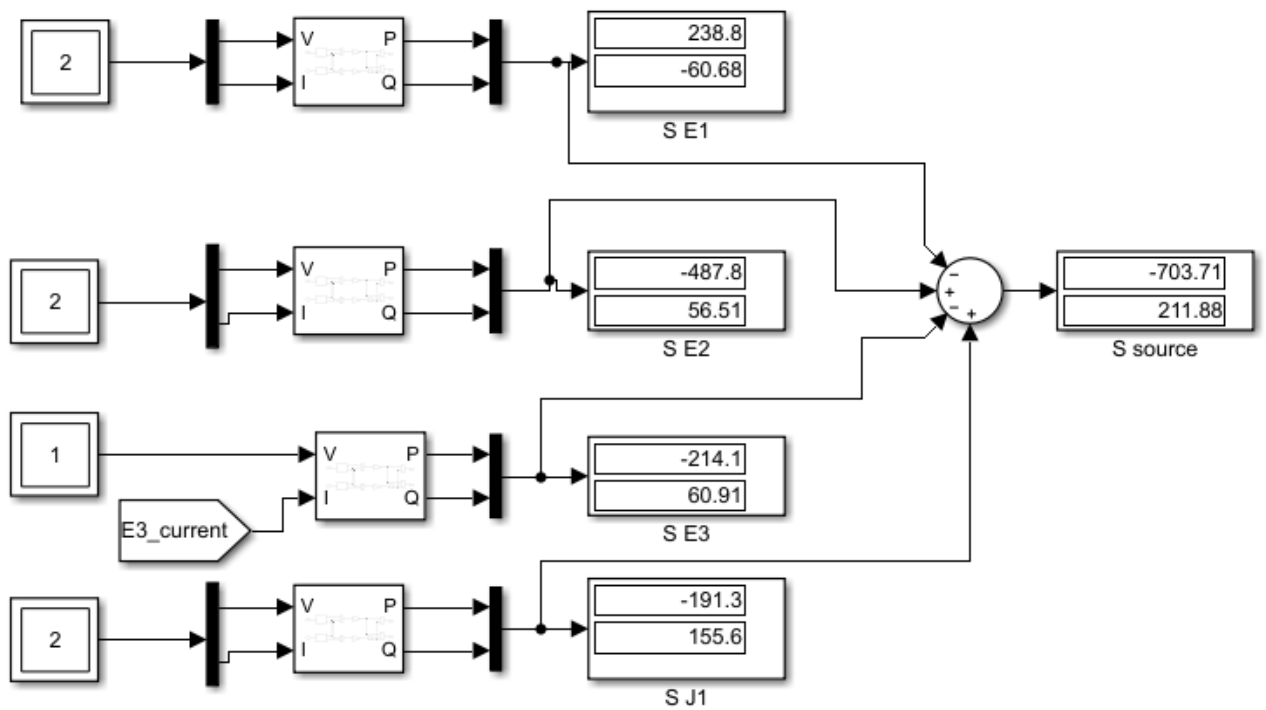


Рисунок 11.15. Потужність генерації джерел

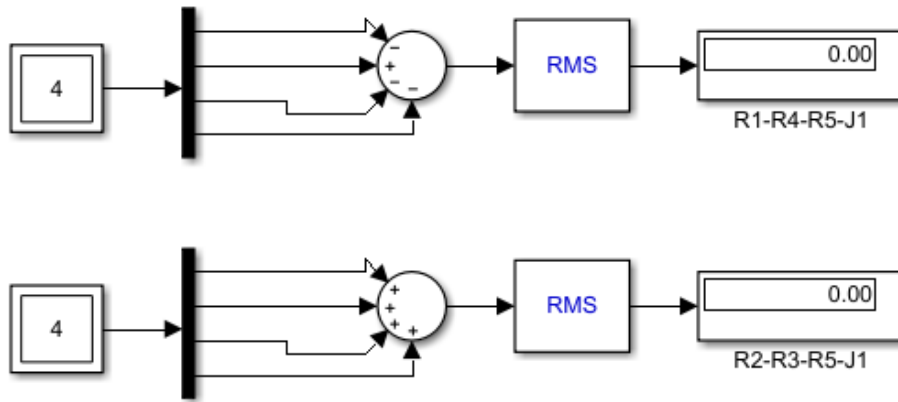


Рисунок 11.16. Перший закон Кірхгофа для вузлів

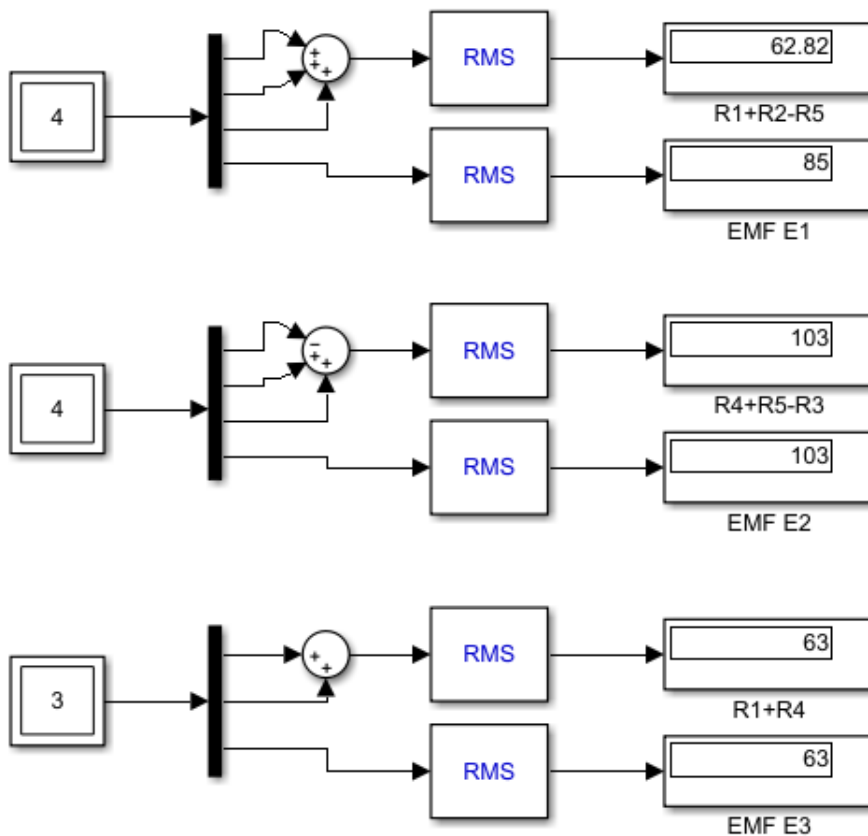


Рисунок 11.17. Другий закон Кірхгофа для контурів

Безпосередньо, головною задачею є визначення струмів ділянок. На рис.1.17 показано блок вимірювання струмів ділянок. У мультиметрі обираються необхідні струми та додається струм джерела напруги E_3 . Вихідний сигнал подається на мультиметр, за яким слідує перетворювач із комплексного сигналу на амплітудну величину та фазовий кут. Останній виражатиметься в рад, а для отримання величини у градусах потрібно прописати у множнику $180/\pi$.

Для запуску моделювання, у параметрах моделі потрібно обрати для розв'язку ode23t чи ode23tb, час моделювання достатньо встановити на 1 с.

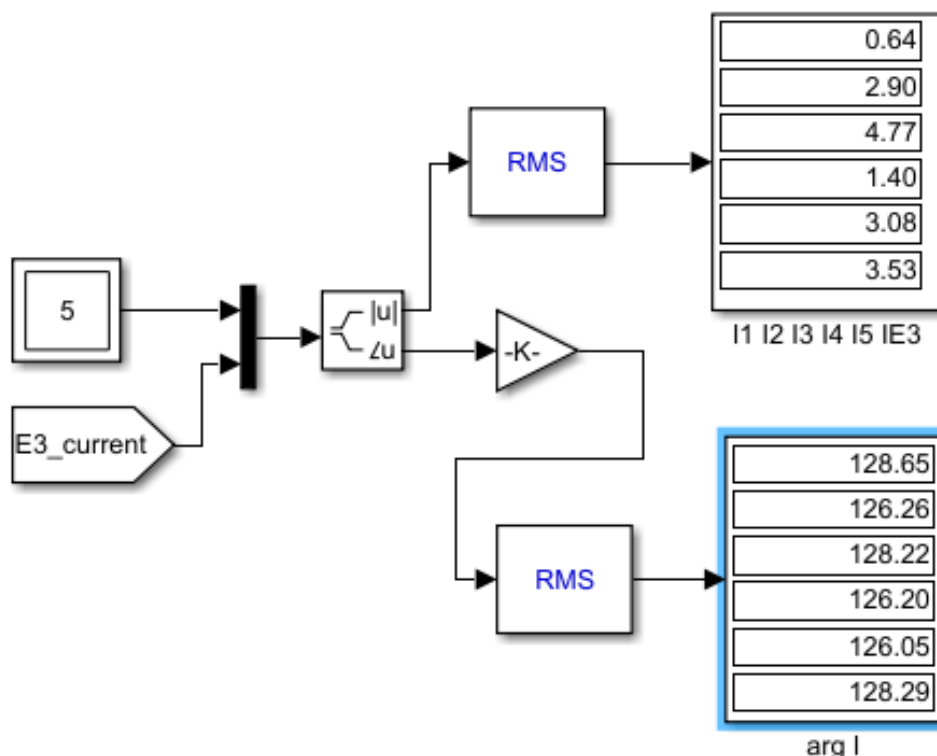


Рисунок 11.18. Діючі значення струмів ділянок

Індивідуальне завдання

Використовуючи варіанти та схеми з теми №10, використовуючи дані із табл. 11.1, студенти повинні зібрати свою схему, внести відповідні параметри елементів, запустити моделювання, отримати режимні параметри.

Знайти струми ділянок, здійснити перевірку виконання законів Кірхгофа та балансу потужностей. Базисну частоту прийняти 50 Гц, час моделювання 1с.

Таблиця 11.1. Вихідні дані по джерелам та пасивним елементам

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
E₁, В	71	85	83	106	108	74	74	112	64	104
E₂, В	78	118	110	56	103	118	85	118	120	90
J₁, А	4	3	5	4	5	8	6	1	2	7
Z₁, Ом	32	38	45	53	50	52	26	33	59	30
	0,75 ємн	0,73 інд	0,76 ємн	0,76 ємн	0,85 інд	0,83 інд	0,86 інд	0,88 ємн	0,83 інд	0,85 інд
Z₂, Ом	34	24	27	15	23	67	59	57	17	20
	0,87 ємн	0,79 ємн	0,78 інд	0,79 ємн	0,74 інд	0,79 ємн	0,77 ємн	0,77 інд	0,89 інд	0,83 ємн
Z₃, Ом	46	52	35	41	42	25	62	29	32	61
	0,7 інд	0,83 ємн	0,9 ємн	0,72 інд	0,7 ємн	0,74 ємн	0,75 інд	0,72 ємн	0,85 інд	0,8 ємн
Z₄, Ом	58	24	18	39	19	32	35	31	25	21
	0,83 ємн	0,83 інд	0,72 інд	0,71 ємн	0,88 ємн	0,74 інд	0,9 ємн	0,78 інд	0,76 інд	0,9 ємн
Z₅, Ом	14	33	63	23	15	64	37	47	59	17
	0,8 інд	0,89 інд	0,81 ємн	0,75 інд	0,86 інд	0,78 інд	0,75 ємн	0,73 інд	0,8 інд	0,89 інд
Z₆, Ом	30	62	40	60	22	46	62	48	26	55
	0,71 інд	0,89 ємн	0,85 інд	0,76 інд	0,74 інд	0,81 ємн	0,82 інд	0,78 ємн	0,73 інд	0,89 інд

Таблиця 11.1. Продовження

Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
E ₁ , В	101	101	60	75	100	92	108	118	88	92
E ₂ , В	58	98	70	54	89	84	51	50	55	119
J ₁ , А	5	5	7	1	4	8	10	3	3	7
Z ₁ , Ом	52	63	50	30	54	49	69	56	14	45
	0,71 інд	0,84 ємн	0,79 інд	0,88 інд	0,8 інд	0,88 ємн	0,9 ємн	0,74 інд	0,75 інд	0,89 ємн
Z ₂ , Ом	40	22	56	48	63	58	55	14	40	33
	0,86 інд	0,9 інд	0,76 ємн	0,72 ємн	0,8 інд	0,77 ємн	0,74 інд	0,78 ємн	0,8 інд	0,81 ємн
Z ₃ , Ом	52	64	61	28	68	14	61	37	31	62
	0,77 ємн	0,73 інд	0,75 інд	0,84 ємн	0,71 ємн	0,82 інд	0,83 ємн	0,77 інд	0,77 ємн	0,89 інд
Z ₄ , Ом	60	19	59	63	65	54	59	28	18	60
	0,7 ємн	0,79 ємн	0,71 ємн	0,86 інд	0,71 інд	0,74 ємн	0,73 інд	0,81 ємн	0,77 інд	0,9 ємн
Z ₅ , Ом	17	49	50	41	14	55	20	45	33	24
	0,74 інд	0,81 ємн	0,89 інд	0,73 ємн	0,7 ємн	0,76 інд	0,73 ємн	0,78 інд	0,79 ємн	0,72 інд
Z ₆ , Ом	57	48	55	49	56	37	16	53	20	64
	0,85 ємн	0,75 інд	0,89 ємн	0,82 інд	0,83 ємн	0,78 інд	0,83 інд	0,9 ємн	0,73 ємн	0,9 інд

Таблиця 11.1. Завершення

Варіант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
E₁, В	63	96	56	110	74	115	74	56	110	59
E₂, В	119	61	72	113	110	108	66	65	76	112
J₁, А	11	1	6	7	7	4	6	8	10	8
Z₁, Ом	14	14	65	60	55	67	24	61	32	41
	0,84 ЄМН	0,82 інд	0,82 ЄМН	0,71 інд	0,76 інд	0,72 ЄМН	0,8 інд	0,71 ЄМН	0,7 інд	0,9 інд
Z₂, Ом	44	33	51	51	56	65	17	61	60	34
	0,8 інд	0,81 ЄМН	0,85 ЄМН	0,7 інд	0,77 ЄМН	0,83 інд	0,74 ЄМН	0,73 інд	0,85 ЄМН	0,82 ЄМН
Z₃, Ом	19	43	14	20	19	31	47	51	40	32
	0,88 ЄМН	0,86 ЄМН	0,84 інд	0,72 ЄМН	0,86 інд	0,75 ЄМН	0,81 інд	0,88 інд	0,88 ЄМН	0,73 ЄМН
Z₄, Ом	14	23	39	67	22	18	64	28	47	20
	0,85 інд	0,74 ЄМН	0,84 інд	0,81 ЄМН	0,86 інд	0,88 ЄМН	0,84 інд	0,8 ЄМН	0,75 ЄМН	0,78 інд
Z₅, Ом	40	33	38	40	20	16	41	25	60	16
	0,88 ЄМН	0,9 інд	0,79 ЄМН	0,71 інд	0,88 ЄМН	0,77 інд	0,79 ЄМН	0,87 ЄМН	0,9 інд	0,81 інд
Z₆, Ом	27	68	32	31	53	41	27	35	15	41
	0,8 інд	0,83 інд	0,85 інд	0,74 ЄМН	0,89 ЄМН	0,8 інд	0,82 ЄМН	0,73 інд	0,7 інд	0,89 ЄМН

Тема №12

РОЗРАХУНОК ЕЛЕКТРИЧНИХ КІЛ З ПЕРІОДИЧНИМИ НЕСИНУСОЇДАЛЬНИМИ ДЖЕРЕЛАМИ ЕРС

Мета роботи: моделювання джерел напруги та струму з періодичним несинусоїдальним сигналом, розкладання в ряд Фур'є, вимірювання в колах, що містять періодичні несинусоїдальні джерела ЕРС та струму.

Теоретичні положення

Періодичними несинусоїдальними струмами й напругами є такі струми та напруги, що змінюються в часі за періодичними несинусоїдальними законами. Так, у різних пристроях радіотехніки, автоматики, обчислювальної техніки застосовують генератори періодичних імпульсів, де форма останніх може бути різною: прямокутною, трапецієподібною, ступінчастою тощо. В реальних електротехнічних пристроях ЕРС джерел напруги та струми джерел струму так чи інакше відрізняються від синусоїдних. Зокрема, в потужних генераторах електростанцій форми кривих ЕРС в обмотках генератора є далекими від ідеальних синусоїд.

Існує теорема, за якою будь-яку періодичну функцію $f(x)$ із періодом 2π , яка задовольняє умові Діріхле можна здійснити процедуру розкладання у нескінченний тригонометричний ряд виду:

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{k=1}^n A_k \cdot \sin(k \cdot \omega t) + \sum_{k=1}^n B_k \cdot \cos(k \cdot \omega t) \quad (12.1)$$

де можна виділити постійну складову сигналу, що визначається за виразом

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(t) dt, \quad (12.2)$$

амплітуду гармонійної складової, що відповідає за непарну гармонічну складову, що визначається, як

$$A_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \sin(k \cdot \omega t) dt, \quad (12.3)$$

амплітуду гармонійної складової, що відповідає за парну гармонічну складову, що визначається, як:

$$B_k = \frac{1}{\pi} \cdot \int_0^{2\pi} f(t) \cdot \cos(k \cdot \omega t) dt. \quad (12.4)$$

Таким чином ЕРС кожного джерела є сумою окремих ЕРС, що мають своє діюче значення та свою частоту. Періодичні складові сигналу називають

гармоніками, частота гармоніки – це добуток номеру відповідної гармоніки на базисну частоту. Так, якщо мова йде про третю гармоніку, то за базисних 50 Гц частота третьої гармоніки становитиме 150 Гц.

В якості джерел ЕРС та струму використовуватимуться відповідні джерела струму та напруги, які можна наперед запрограмувати на видачу то формування визначеної ЕРС чи сили струму, рис.12.1. На контрольний вхід таких джерел посылатиметься вхідний сигнал, який є сумою окремих гармонійних сигналів, рис.12.2.



Рисунок 12.1. Джерела енергії, які можна програмувати

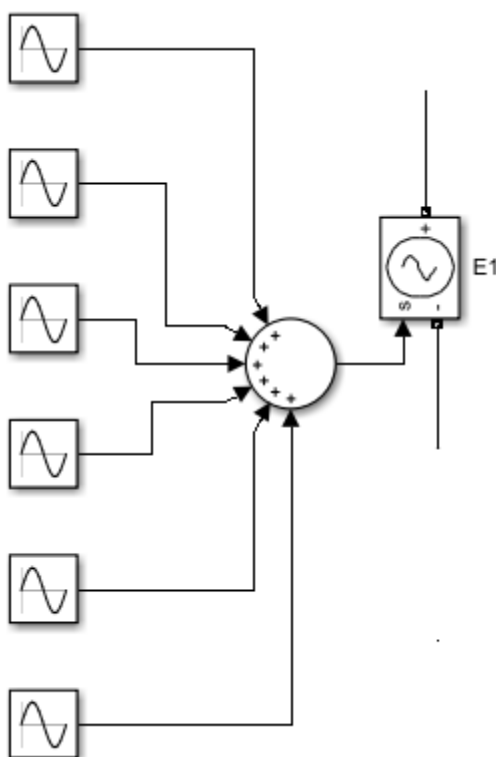


Рисунок 12.2. Вхідний сигнал джерела ЕРС

Практична частина

Зібрати електричне коло з відповідними параметрами джерел струму та ЕРС, відповідними опорами ділянок та отримати основні показники, як то

струми ділянок спад напруги на опорах, формування балансу потужності, перевірка виконання першого та другого законів Кірхгофа. Схему в якості зразка представлено на рис. 12.3, взяту за основу з теми №11 з тими ж самими параметрами ділянок.

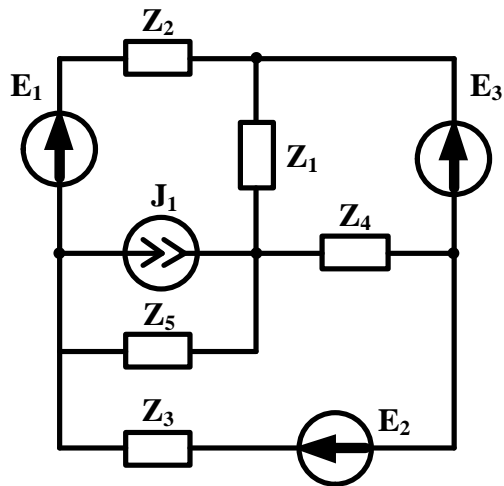


Рисунок 12.3. Робоча схема

Форми ЕРС джерел напруги для E1 E2 та E3 представлено на рис.12.4, форма струму відповідного джерела – на рис.12.5.

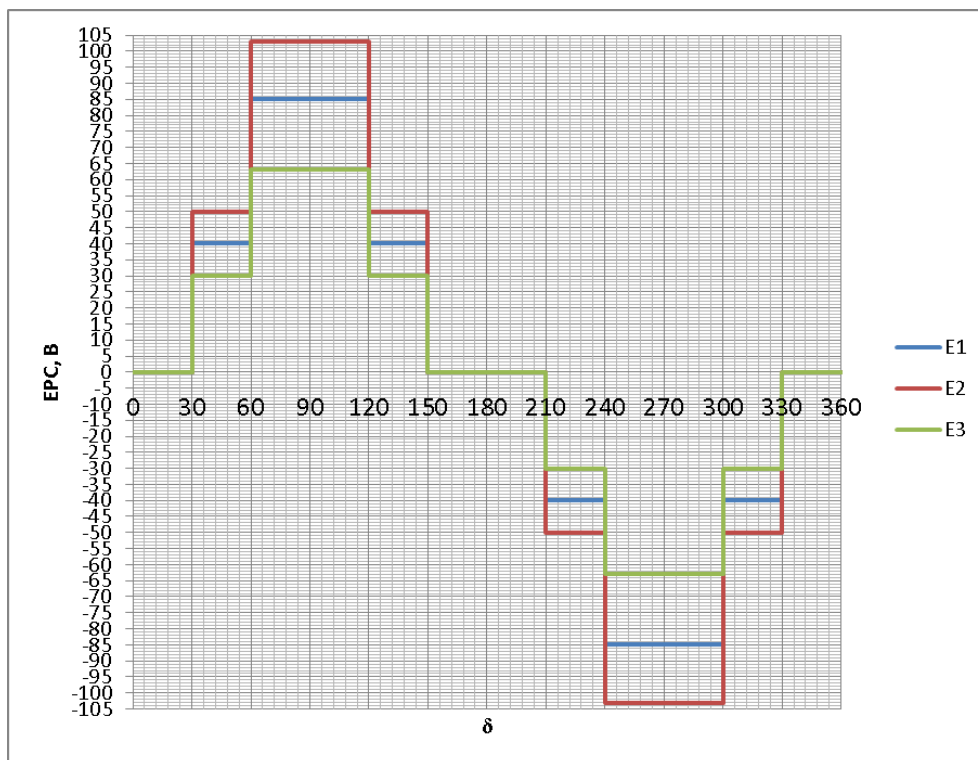


Рисунок 12.4. ЕРС джерел напруги

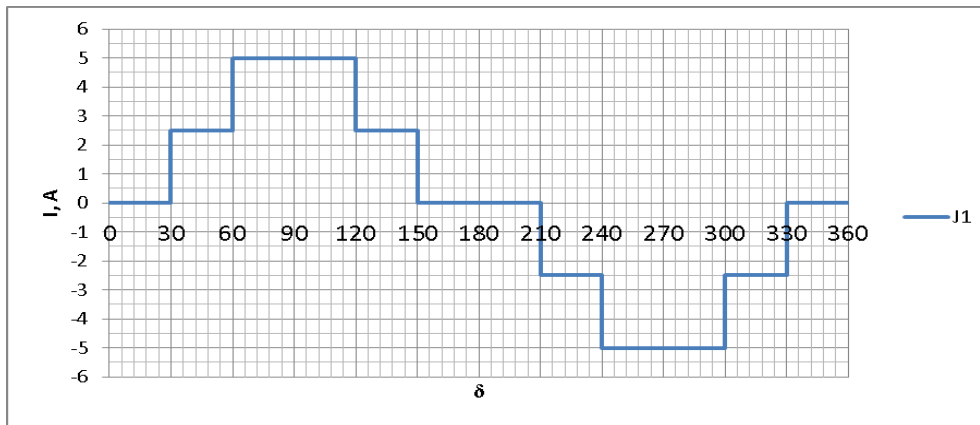


Рисунок 12.5. Струм джерела струму

Використовуючи програмний комплекс MathCAD, запишемо закон зміни ЕРС та струму для відповідних джерел. MathCAD працює з радіанами, тому градуси переводяться в радіани. Так $30^\circ = \pi/6$, $60^\circ = \pi/3$, $120^\circ = 2\pi/3$ та $150^\circ = 5\pi/3$. В такий самий спосіб перераховуються решта кутів. На рис.12.6 а) – джерело напруги E_1 , рис.12.6 б) – джерело напруги E_2 , рис.12.6 в) – джерело напруги E_3 , рис.12.6 г) – джерело струму J_1 .

$$E_1(\delta) = \begin{cases} 40 & \text{if } \left(\frac{\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{\pi}{3}\right) \vee \left(\frac{2\pi}{3} \leq \delta \leq \frac{5\pi}{3}\right) \\ 85 & \text{if } \frac{\pi}{3} < \delta < \frac{2\pi}{3} \\ -40 & \text{if } \left(\frac{7\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{4\pi}{3}\right) \vee \left(\frac{5\pi}{3} \leq \delta \leq \frac{11\pi}{6}\right) \\ -85 & \text{if } \frac{4\pi}{3} < \delta < \frac{5\pi}{3} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

а)

$$E_2(\delta) = \begin{cases} 50 & \text{if } \left(\frac{\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{\pi}{3}\right) \vee \left(\frac{2\pi}{3} \leq \delta \leq \frac{5\pi}{3}\right) \\ 103 & \text{if } \frac{\pi}{3} < \delta < \frac{2\pi}{3} \\ -50 & \text{if } \left(\frac{7\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{4\pi}{3}\right) \vee \left(\frac{5\pi}{3} \leq \delta \leq \frac{11\pi}{6}\right) \\ -103 & \text{if } \frac{4\pi}{3} < \delta < \frac{5\pi}{3} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

б)

$$E_3(\delta) = \begin{cases} 30 & \text{if } \left(\frac{\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{\pi}{3}\right) \vee \left(\frac{2\pi}{3} \leq \delta \leq \frac{5\pi}{3}\right) \\ 63 & \text{if } \frac{\pi}{3} < \delta < \frac{2\pi}{3} \\ -30 & \text{if } \left(\frac{7\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{4\pi}{3}\right) \vee \left(\frac{5\pi}{3} \leq \delta \leq \frac{11\pi}{6}\right) \\ -63 & \text{if } \frac{4\pi}{3} < \delta < \frac{5\pi}{3} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

в)

$$J_1(\delta) = \begin{cases} 2,5 & \text{if } \left(\frac{\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{\pi}{3}\right) \vee \left(\frac{2\pi}{3} \leq \delta \leq \frac{5\pi}{3}\right) \\ 5 & \text{if } \frac{\pi}{3} < \delta < \frac{2\pi}{3} \\ -2,5 & \text{if } \left(\frac{7\pi}{6} \leq \delta \leq \frac{4\pi}{3}\right) \vee \left(\frac{5\pi}{3} \leq \delta \leq \frac{11\pi}{6}\right) \\ -5 & \text{if } \frac{4\pi}{3} < \delta < \frac{5\pi}{3} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases}$$

г)

Рисунок 12.6. Закони зміни ЕРС джерел напруги та струму джерела струму

На прикладі джерела напруги E_1 , з урахуванням виразів (12.1) – (12.4) було визначено, що функція не має постійної складової, має лише непарну гармонійну складову та працює на непарних гармоніках. Було виділено 6 складових на 1-ій, 3-ій, 5-ій, 7-ій, 9-ій та 11-ій гармоніці:

$$E_{1\phi}(t) = \sum_{1,3,\dots,11} b_{E_{1n}} \cdot \sin(n \cdot \omega \cdot t) = 72,754 \cdot \sin(1 \cdot 314,16 \cdot t) - 19,099 \cdot \sin(3 \cdot 314,16 \cdot t) - 3,091 \cdot \sin(5 \cdot 314,16 \cdot t) - 2,208 \cdot \sin(7 \cdot 314,16 \cdot t) - 6,366 \cdot \sin(9 \cdot 314,16 \cdot t) + 6,614 \cdot \sin(11 \cdot 314,16 \cdot t)$$

На рис.12.7 показано порівняння вихідного сигналу та результату представлення ЕРС E_1 сумою гармонійних складових. Для роботи було прийнято 6 складових. Звісно, чим більше гармонік враховано, тим точніше сума тригонометричних функцій наблизитиметься до вихідного сигналу.

Щодо ЕРС E_2 та E_3 та струму J_1 , характер гармонійних складових той же самий, що і у випадку E_1 , а числові результати представлено нижче.

На рис.12.8. на прикладі E_1 представлено 6 окремих джерел синусоїдального сигналу з відповідними амплітудами та частотами. На рис.12.9 представлено ЕРС джерел напруги E_1 , E_2 та E_3 сформованих за принципом, показаним на рис.12.2 з величинами на рис.12.8.

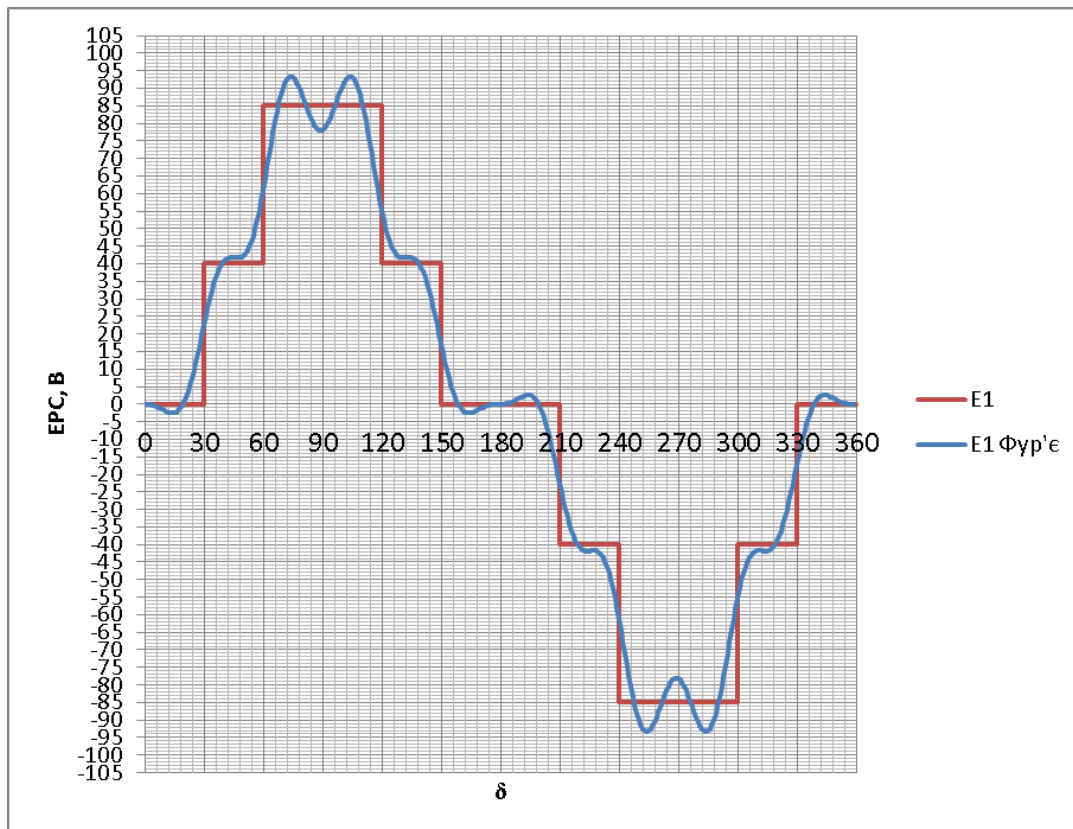


Рисунок 12.7. Вихідна ЕРС E_1 та сума гармонік, що її моделює

Числові параметри та гармонійні складові ЕРС E_2 та E_3 і джерела струму J_1 .

$$E_{2\phi}(t) = 88,847 \cdot \sin(314,16 \cdot t) - 22,494 \cdot \sin(942,48 \cdot t) - 4,278 \cdot \sin(1570,8 \cdot t) - 3,056 \cdot \sin(2199,11 \cdot t) - 7,498 \cdot \sin(2827,43 \cdot t) + 8,079 \cdot \sin(3455,75 \cdot t)$$

$$E_{3\phi}(t) = 54,088 \cdot \sin(314,16 \cdot t) - 14,006 \cdot \sin(942,48 \cdot t) - 2,414 \cdot \sin(1570,8 \cdot t) - 1,724 \cdot \sin(2199,11 \cdot t) - 4,669 \cdot \sin(2827,43 \cdot t) + 4,917 \cdot \sin(3455,75 \cdot t)$$

$$J_{1\phi}(t) = 4,348 \cdot \sin(314,16 \cdot t) - 1,061 \cdot \sin(942,48 \cdot t) - 0,233 \cdot \sin(1570,8 \cdot t) - 0,166 \cdot \sin(2199,11 \cdot t) - 0,354 \cdot \sin(2827,43 \cdot t) + 0,395 \cdot \sin(3455,75 \cdot t)$$

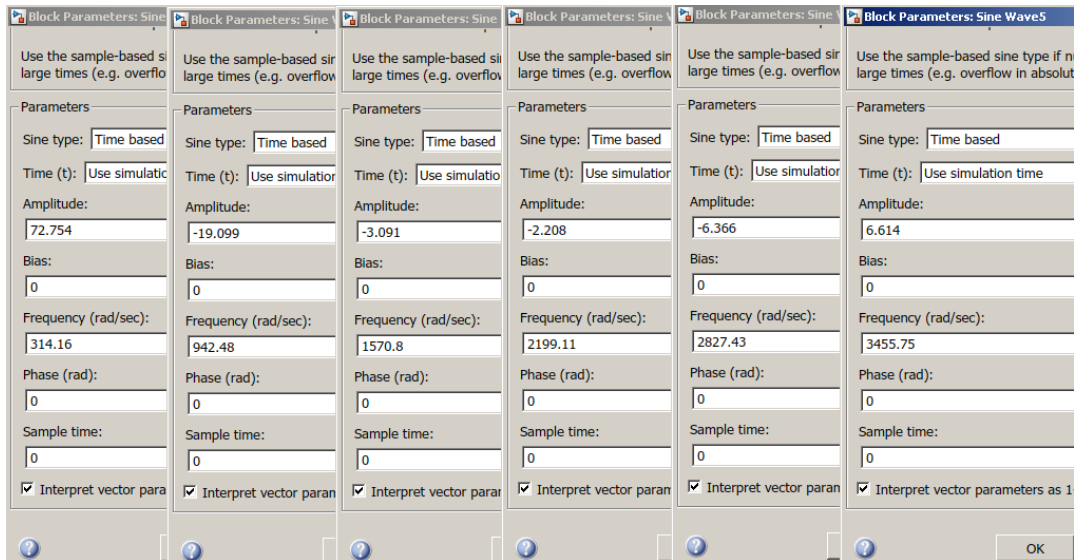


Рисунок 12.8. Гармонійні складові джерела напруги E_1

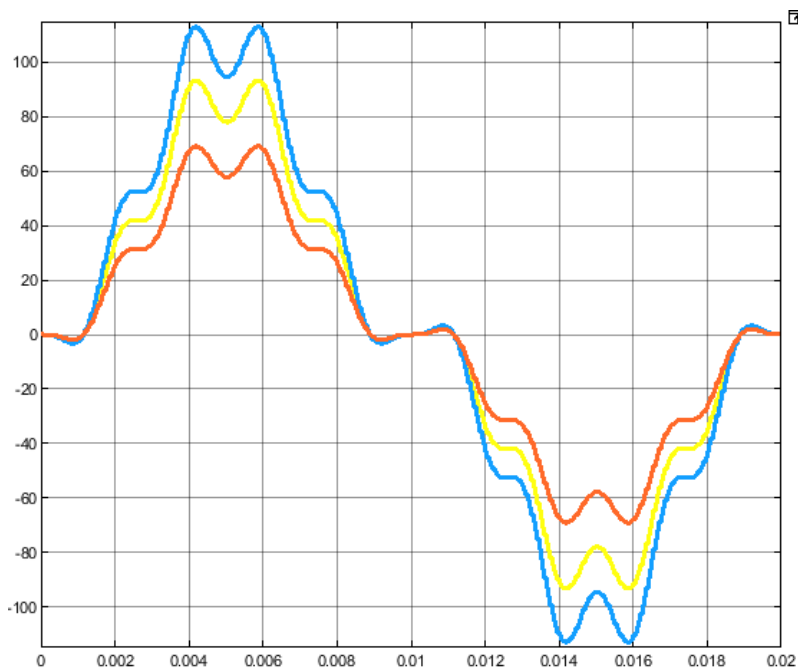


Рисунок 12.9. Осцилограми ЕРС джерел напруги E_1 , E_2 та E_3

На рис.12.10 представлено зібрану схему. Джерела гармонійних сигналів згорнуто у підсистему та підключено до відповідних джерел.

За результатами моделювання показано виконання другого закону Кірхгофа, баланс потужності в електричному колі, діючі значення струмів ділянок та виконання першого закону Кірхгофа, рис.12.11 – рис.12.14. Додатково, на рис.12.15 представлено осцилограму струмів.

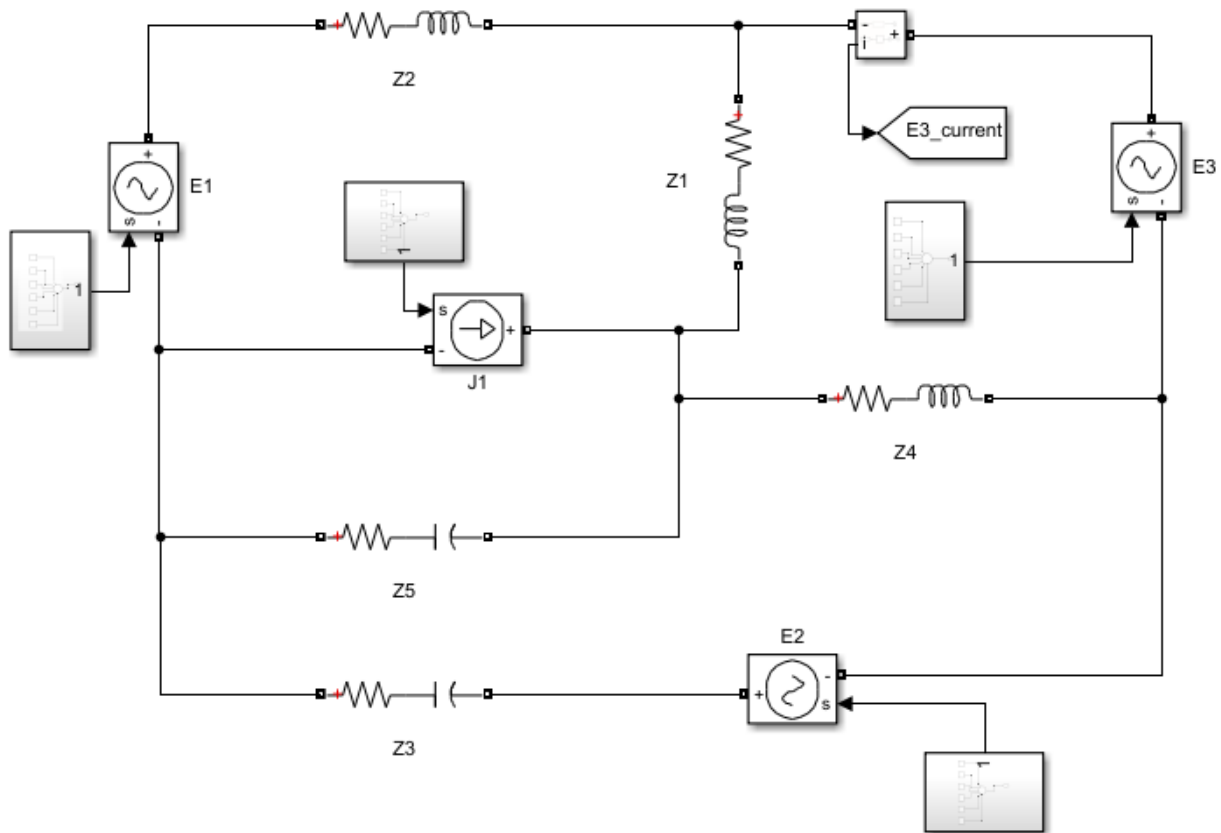


Рисунок 12.10. Робоча схема в середовищі MatLab

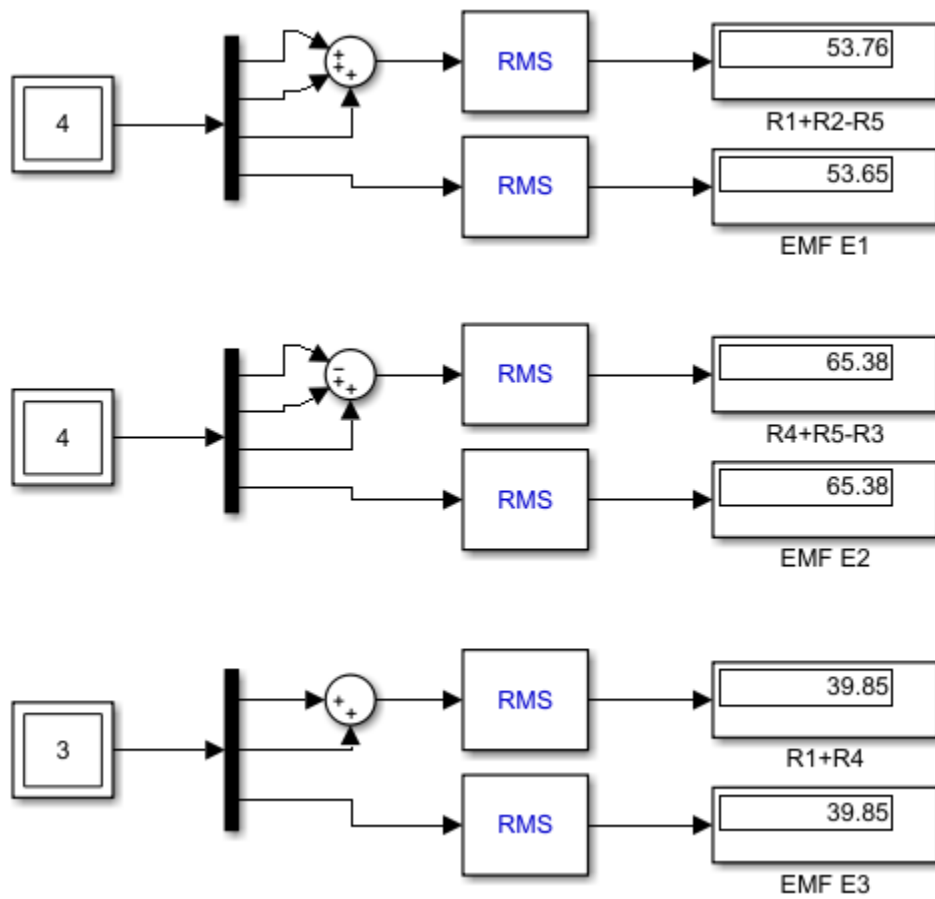


Рисунок 12.11. Перевірка виконання другого закону Кірхгофа

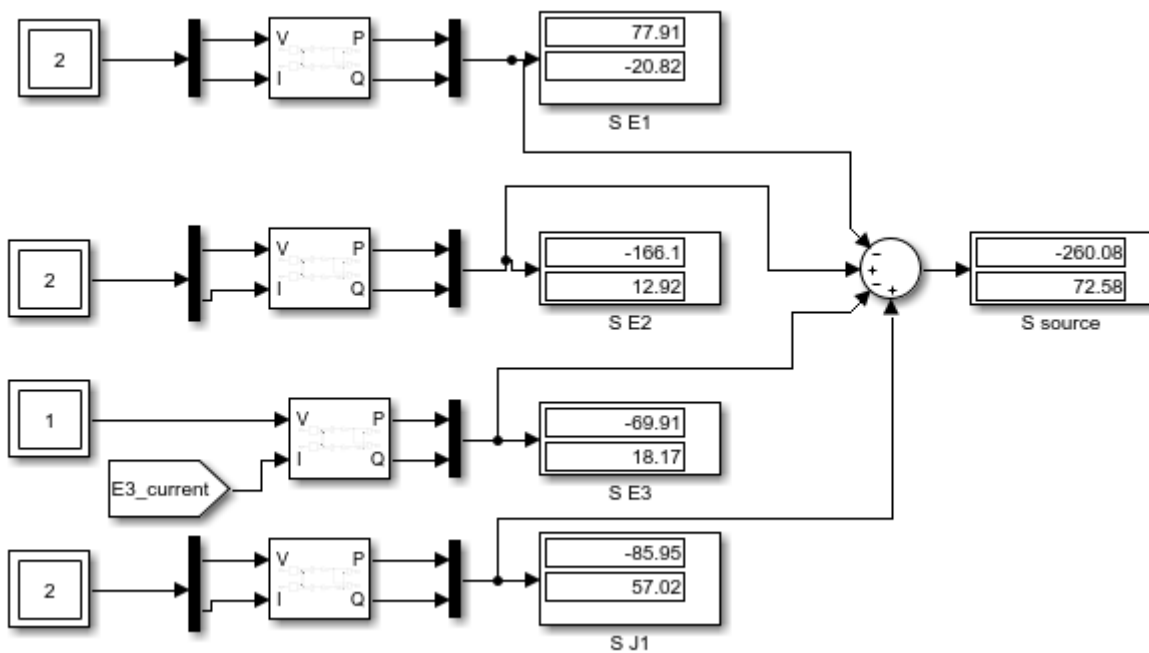


Рисунок 12.12. Потужність генерації джерел енергії

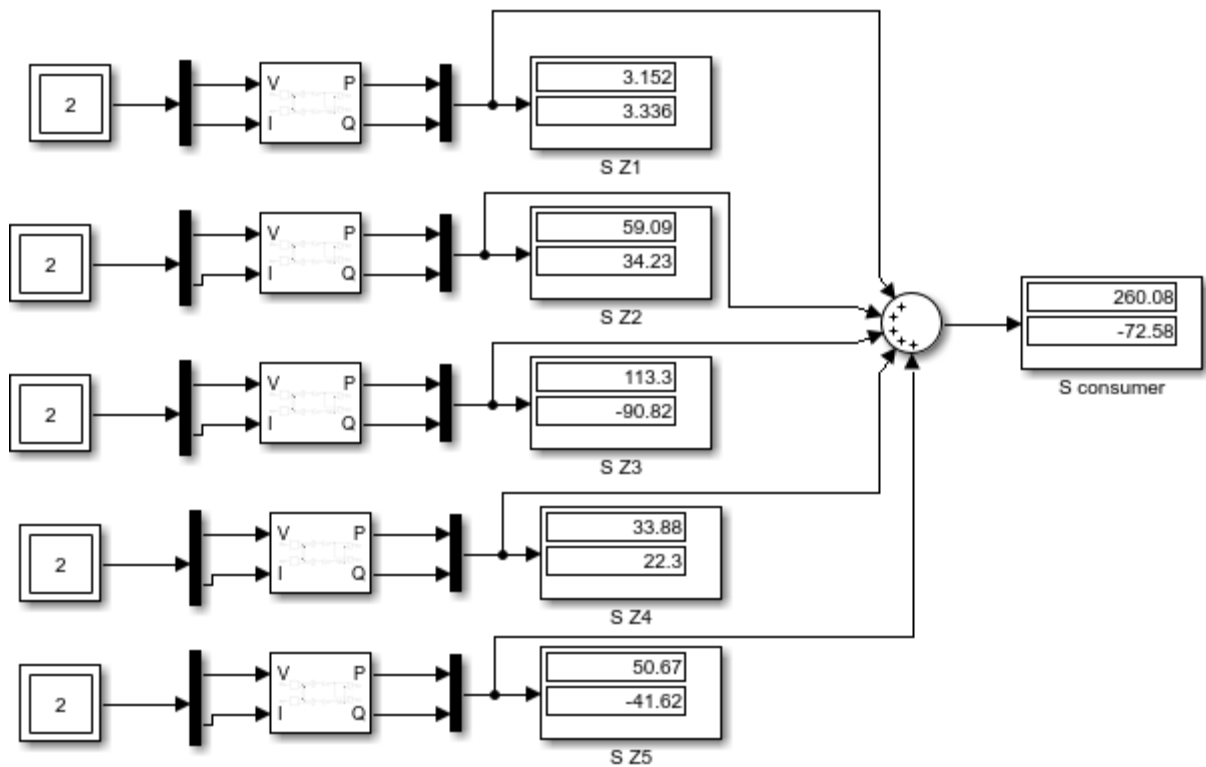


Рисунок 12.12. Потужність споживання пасивних елементів

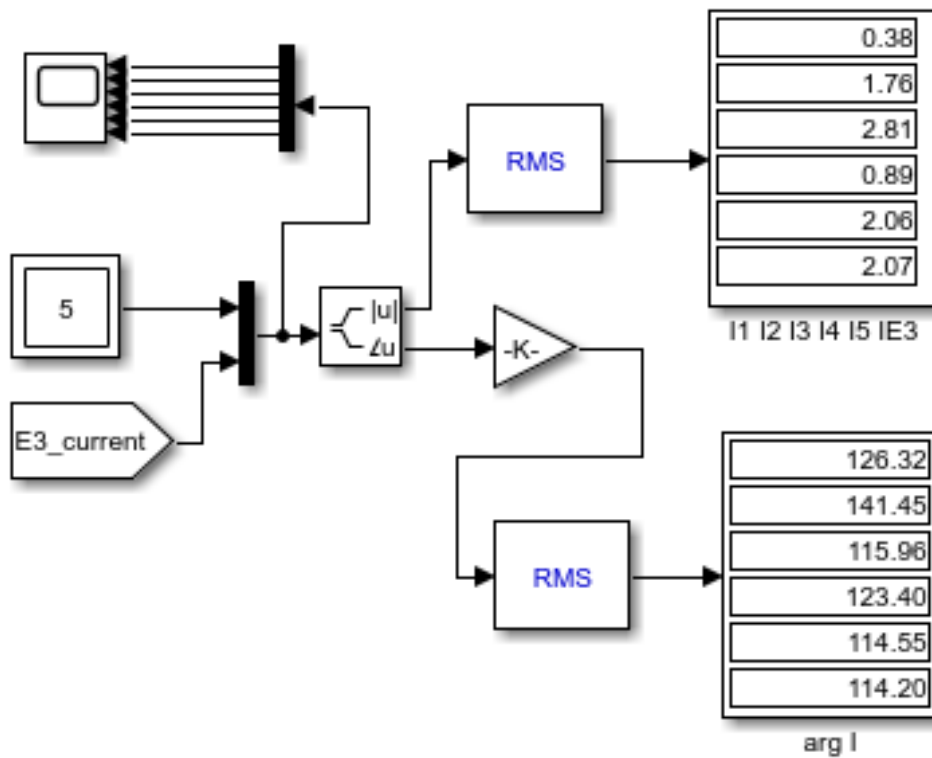


Рисунок 12.13. Діючі значення струмів ділянок

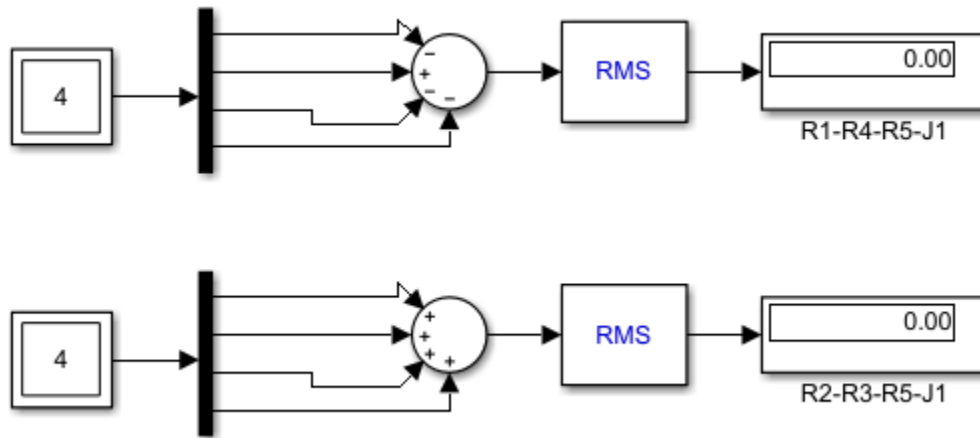


Рисунок 12.14. Перевірка виконання першого закону Кірхгофа

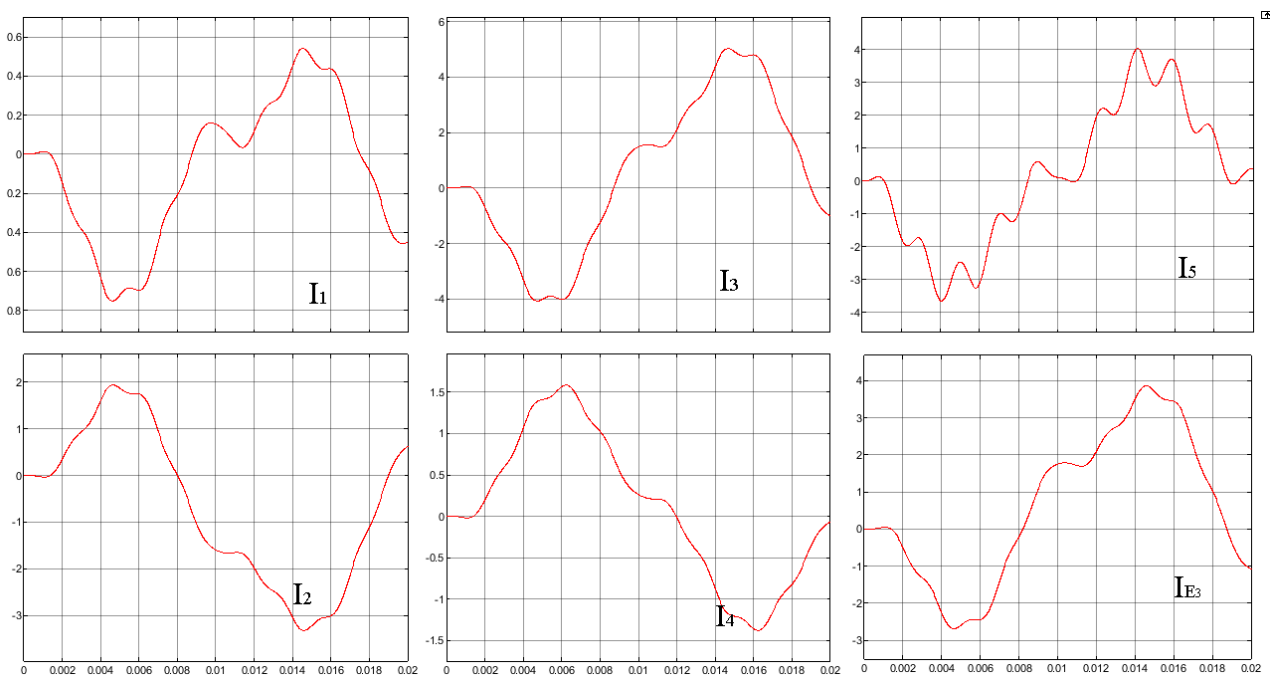


Рисунок 12.15. Осцилограма струмів ділянок

Варто зазначити, що MatLab має вбудований аналізатор для оцінки гармонійних складових, але працює він через раз, тобто банально може не спрацювати. Саме тому, в якості відповіді щодо струмів ділянок показано діючі значення струмів за базисної частоти 50 Гц та відповідна осцилограма.

Індивідуальне завдання

Використовуючи варіанти та схеми з теми №11, використовуючи дані із табл. 11.1, студенти повинні зібрати свою схему, внести відповідні параметри елементів, запустити моделювання, отримати режимні параметри.

Навести розрахунок та визначити амплітуди парних та непарних гармонійних складових сигналу для як мінімум шести робочих гармонік. Порівняти вихідний сигнал та отриманий шляхом додавання гармонійних складових. Визначити струми ділянок, здійснити перевірку виконання законів Кірхгофа та балансу потужностей.

Зовнішній вигляд періодичних несинусоїдальних функцій представлено на рис.12.16. Кути запалювання, вимикання та коефіцієнт зниження амплітуди представлено в таблиці 12.1. Варіант форми сигналу та окремих характеристик сигналу задається викладачем.

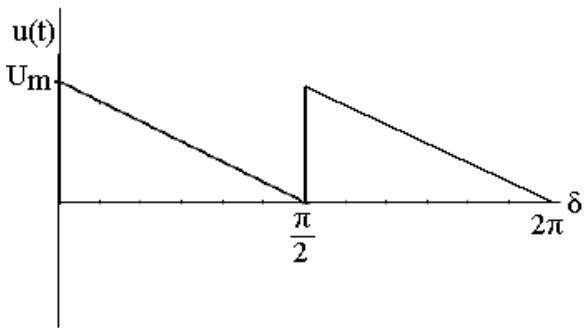
Зовнішній вигляд сигналу для джерел ЕРС та струму прийняти однаковим. Базисна частота становить 50 Гц. Час моделювання прийняти 0,02 с. У випадку, якщо зовнішній вигляд другого півперіоду змодельованої функції буде дзеркальним відображенням першого періоду, час моделювання скоротити вдвічі.

Таблиця 12.1. Дані для характеристики сигналу

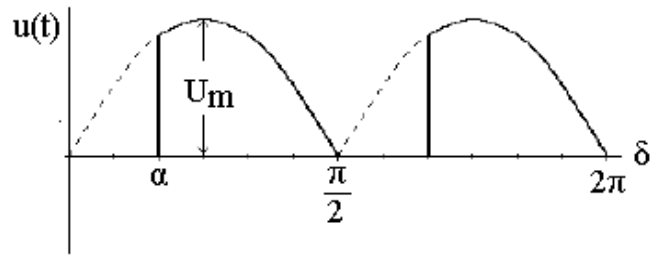
Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
α	88	71	36	88	44	66	79	53	58	56
β	133	132	166	154	110	167	164	117	117	151
k	0,71	0,64	0,76	0,78	0,77	0,73	0,72	0,75	0,78	0,61

Таблиця 12.1. Продовження

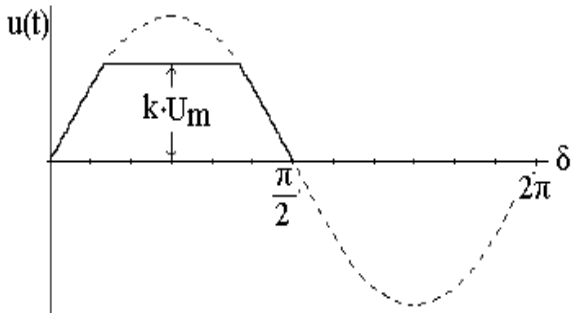
Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
α	25	58	74	50	28	86	82	33	29	63
β	148	114	117	117	149	137	117	133	154	160
k	0,76	0,67	0,7	0,69	0,74	0,71	0,75	0,64	0,78	0,68



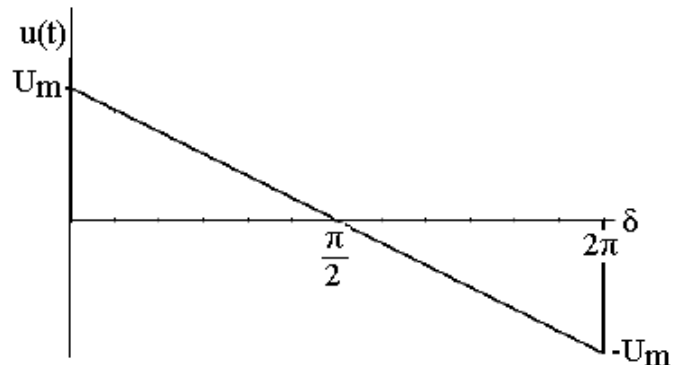
1)



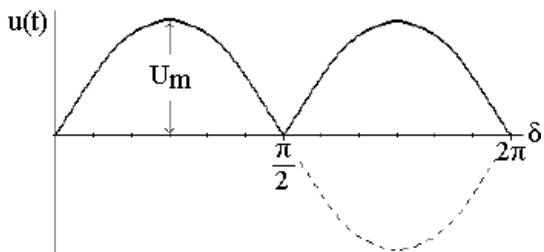
2)



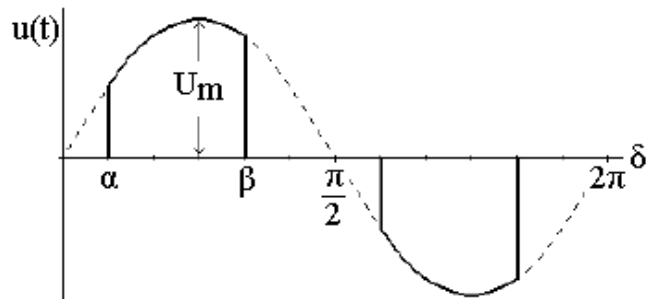
3)



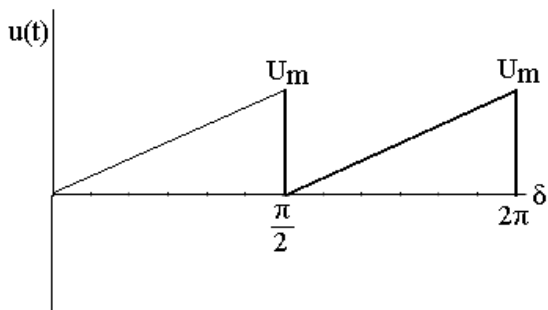
4)



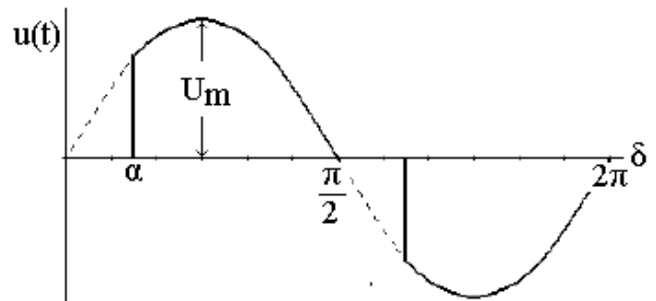
5)



6)



7)



8)

Рисунок 12.16. Періодичні несунусоїдальні сигнали джерел енергії

Тема №13

МОДЕЛЮВАННЯ ЛІНІЙ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАВАННЯ ТА СИЛОВИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи: вивчення різноманітних типових підходів до моделювання ділянок ліній електропередавання та силових трансформаторів; визначення та розрахунок параметрів, що вимагають вводу у модель лінії та трансформатора.

Теоретичні положення

Бібліотека математичних моделей та об'єм фізичних процесів, які програмний комплекс MatLab дозволяє змоделювати та дослідити на отриманій моделі, є вкрай великим. Мінімальний об'єм пам'яті на жорсткому диску, необхідний для установки MatLab з легкістю досягає 20 Гбайт, та й то не межа. В свою чергу, за наявності обмежень у використанні об'єму жорсткого диску кількість бібліотек та інструментарії під час установки програмного комплексу скорочують до мінімуму. У разі відсутності зазначених обмежень можна встановити все, що в свою чергу дозволить використовувати також представлені в довідниковій системі дослідні зразки.

З тематики моделювання ліній електропередавання, в довіднику програмного комплексу MatLab за нижче наведеною адресою показано математичну модель для демонстрації і порівняння перехідних процесів, що відбуваються в лініях, які моделюються ділянкою з рівномірно розподіленими параметрами по довжині та π -секцією.

«web(fullfile(docroot,'physmod/sps/examples.html?category=electrical-sources-and-elements&s_tid=CRUX_topnav'))».

Трифазна лінія протяжністю 100 км належить до системи 735 кВ встановленої потужності 30 000 МВА. Лінія спочатку включається на фазу А при $t=1/4$ періоду, коли рівень напруги джерела живлення є максимальним, а потім вимикається при $t=4$ періоди. Фази В і С залишаються не під'єднаними. Перемикання виконуються одночасно на двох різних моделях лінії:

- лінії з рівномірно розподіленими по довжині параметрами,
- трифазної ділянка π -секції, що складається з двох ділянок по 50 км.

В даному зразку з двома моделями ділянок ЛЕП порівнюються напруги, отримані на фазах А і В на приймальній стороні обох ліній.

Метою моделювання є порівняння рівнів напруги, отриманих у фазах А і В (індукована напруга) з двома моделями. Збільшивши рівень напруги одразу після подачі живлення можна помітити на осцилограмі гострі краї, отримані від лінії з розподіленими параметрами (жовтий графік). Ці прирости напруги, які виникають через відбиття біжучої хвилі на обох кінцях лінії, фільтруються моделлю π -секції. Фази А і В залишаються зарядженими за досягнення

напругою пікового значення навіть коли вимикачі розмикаються. Схему представлено на рис.13.1.

Блок [Distributed Parameters Line] «Лінія з рівномірно розподіленими параметрами» реалізує модель лінії електропередавання з розподіленими параметрами N-фазної системи із зосередженими втратами. Модель базується на методі біжучої хвилі Бержерона, який використовується в програмі електромагнітних перехідних процесів. У цій моделі розподілена лінія LC без втрат характеризується двома значеннями (для однофазної лінії): імпеданс перенапруги і швидкість поширення хвилі.

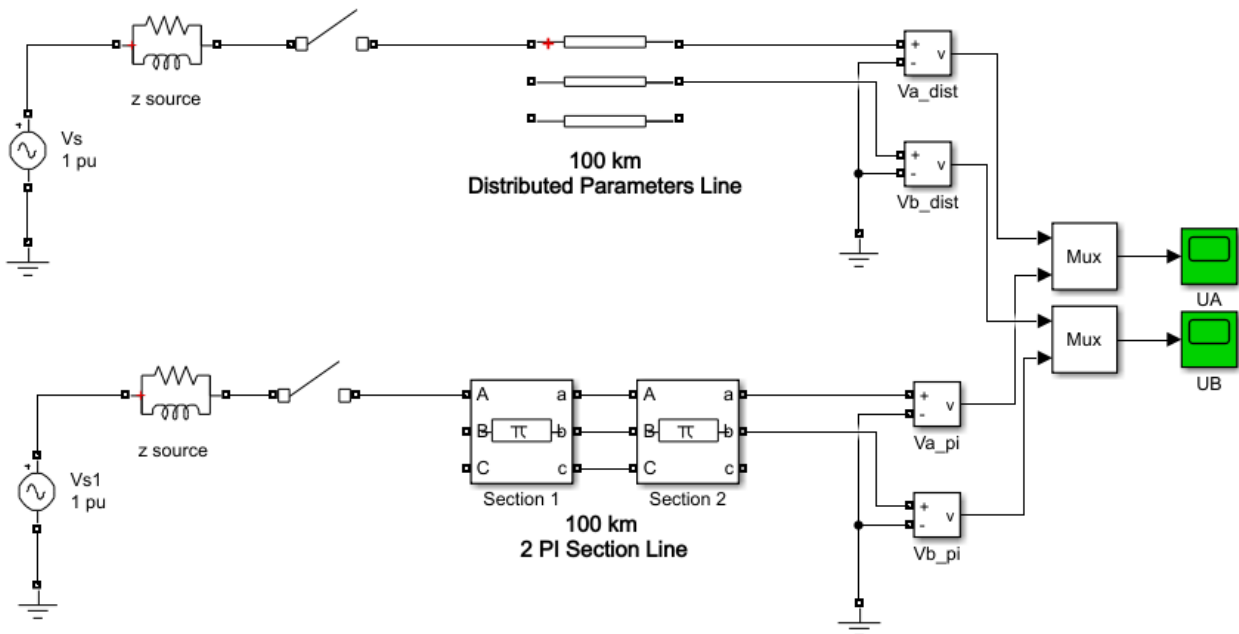


Рисунок 13.1. Схема ілюстрації порівняння двох моделей ЛЕП

Якщо лінія працює без втрат, то відправлена хвиля струму та напруги має дійти до протилежного кінця без затримки. Для багатофазних моделей ліній модальне перетворення використовується для перетворення величин ліній із значень фази (лінійних струмів і напруг) у модальні значення, незалежні одне від одного. Попередні обчислення виконуються в модальному домені перед зворотнім перетворенням у значення фази. Лінія з рівномірно розподіленими параметрами представляє явища поширення хвилі та відбиття хвилі з кінця лінії з набагато кращою точністю. Можна стверджувати, що даний апарат доцільно використовувати в курсі підготовки електричних мереж для моделювання дальніх електропередач надвисокої напруги. На рис. 13.2 представлено зовнішній вигляд блоку лінії з рівномірно розподіленими параметрами з переліком того, що потрібно внести.

По черзі:

- кількість фаз;
- довжина лінії в км;

- робоча частота;
- погонний активний опір прямої та нульової послідовності;
- погонна індуктивність прямої та нульової послідовності;
- погонна ємність прямої та нульової послідовності;
- вказівка на необхідність здійснення вимірювань в блоці.

У ЛЕП опори прямої та зворотної послідовності співпадають, оскільки відсутні рухомі елементи конструкції. Основною проблемою при використанні такого блоку є необхідність вводу параметрів нульової послідовності. З одного боку, якщо не потрібно моделювати вплив однофазних коротких замикань, то представлені в блоці вже існуючі значення можна лишити без змін. З іншої сторони, використовуючи ті ж таки вже представлені значення можна вирахувати співвідношення між величинами прямої та нульової послідовності і перерахувати останні по відношенню до нових введених даних прямої послідовності.

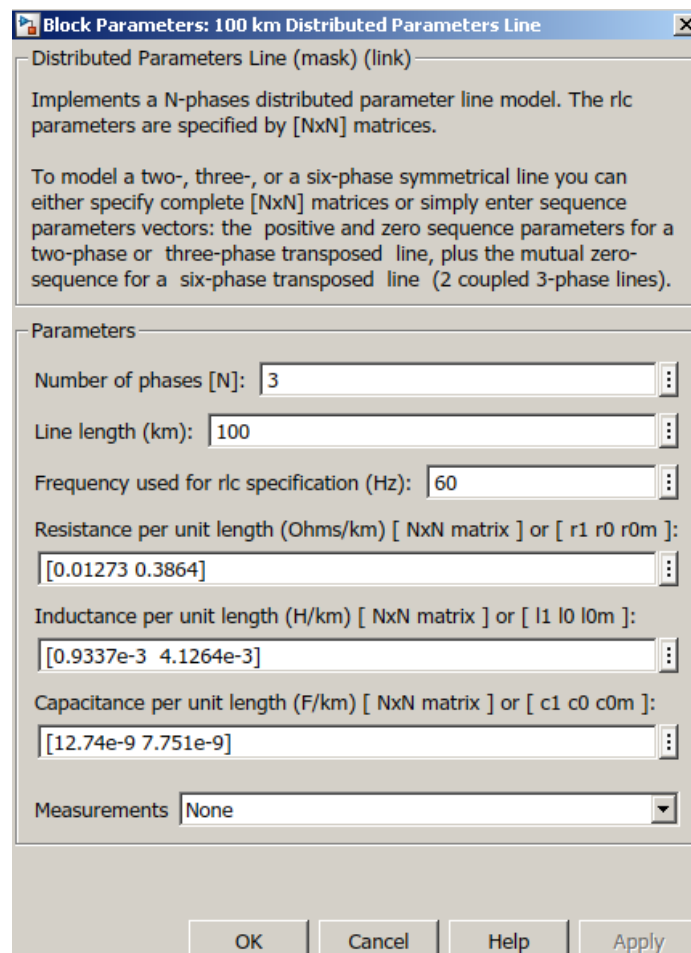


Рисунок 13.2. Блок лінії з рівномірно розподіленими параметрами

Якщо потрібно точне врахування параметрів нульової послідовності, то відповідно, потрібно спочатку опрацювати методику розрахунку цих

параметрів. Наостанок варто зазначити, що дана модель не враховує активний струм витоку.

Блок [Three-Phase PI Section Line] «Трифазна π -секція» реалізує симетричну трифазну модель лінії передавання із зосередженими в π -секції параметрами. На відміну від моделі лінії з розподіленими параметрами, де опір, індуктивність та ємність рівномірно розподілені по довжині, даний блок об'єднує параметри лінії в одну секцію. Параметри лінії опір R , індуктивність L та ємність C задаються як параметри прямої та нульової послідовності, і враховують індуктивні та ємнісні взаємні зв'язки між трьома фазними провідниками, а також між фазою та землею, рис.13.3. В блок потрібно ввести:

- довжину лінії в км;
- робочу частоту;
- погонний активний опір прямої та нульової послідовності;
- погонну індуктивність прямої та нульової послідовності;
- погонну ємність прямої та нульової послідовності.

Спостерігаються ті ж самі проблеми з параметрами нульової послідовності та з неможливістю враховувати активний струм витоку. Можна стверджувати, що даний апарат доцільно використовувати в курсі підготовки електричних мереж для моделювання кабельних ліній напругою 35 кВ та повітряних ліній 110 – 220 кВ.

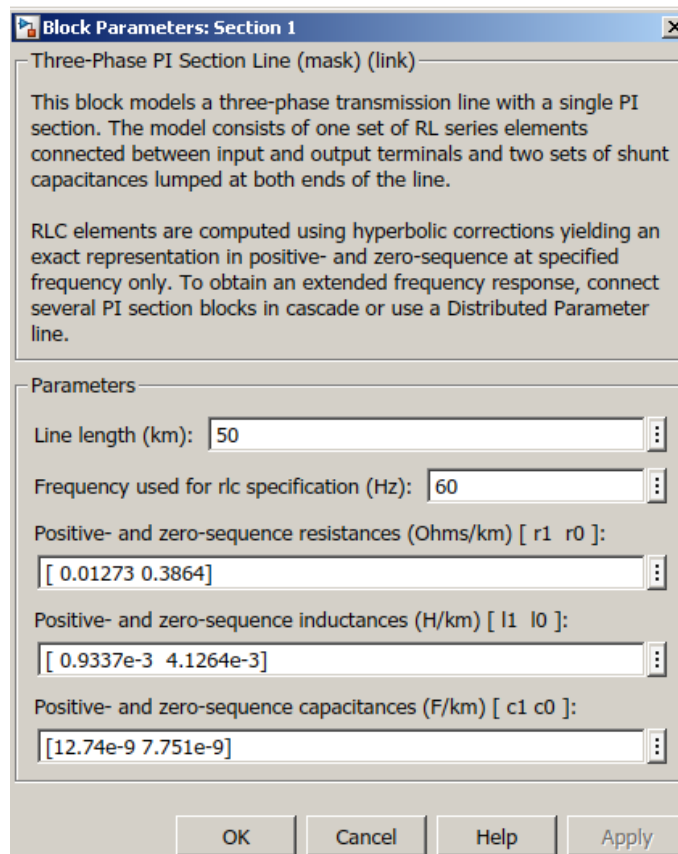


Рисунок 13.3. π -секція

Ще один приклад, що заслуговує уваги, має адресу в довідниковій системі MatLab [web\(fullfile\(docroot, 'physmod/sps/examples.html?category=electrical-sources-and-elements&s_tid=CRUX_topnav'\)\)](http://web(fullfile(docroot, 'physmod/sps/examples.html?category=electrical-sources-and-elements&s_tid=CRUX_topnav')), рис.13.4.

Ця схема є спрощеною моделлю трифазної системи електропостачання 230 кВ, оскільки представлено лише одну фазу. Еквівалентне джерело моделюється джерелом напруги ($230/\sqrt{3}$ кВ, 60 Гц) з внутрішнім опором $R_s=2,645$ Ом та $L_s=0,0702$ Гн, що відповідає потужності 3-фазного КЗ 2000 МВА, виділено зеленим. Джерело живить навантаження активно-індуктивне навантаження потужністю 75 МВт - 20 МВАр на фазу, виділено синім, через 150 км ЛЕП з параметрами лінії $R = 0,035$ Ом/км, $L = 0,92$ мГн/км, $C = 12,9$ нФ/км, виділено червоним. У цьому прикладі показано моделювання однолінійної однофазної схеми за усталеного режиму та перехідного процесу.

В даному зразку ділянка ЛЕП моделюється звичним для курсу мереж чином і має такий же вигляд – симетрична П-подібна схема.

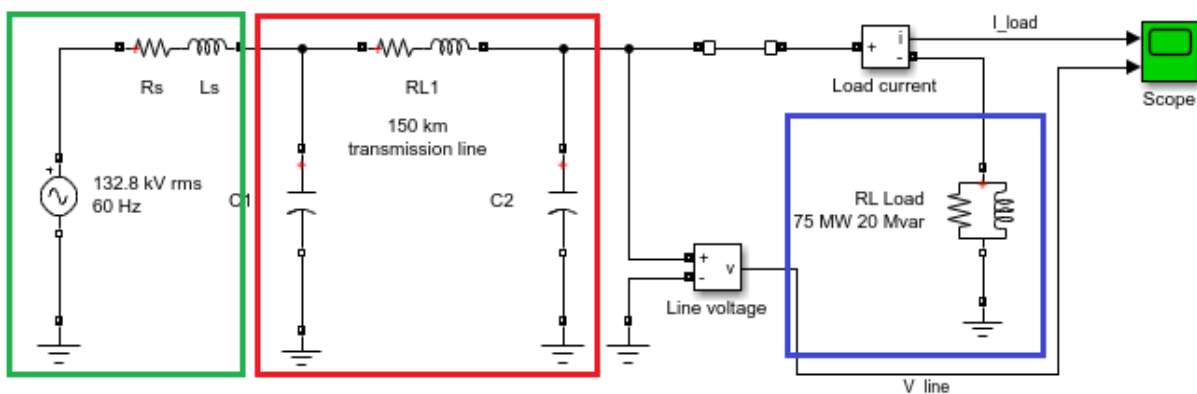


Рисунок 13.4. Однофазна однолінійна найпростіша схема

В подальшому для моделювання ділянок ЛЕП використовуватиметься саме така схема, яка матиме в своєму складі трифазні ділянки із послідовним з'єднанням активного опору, індуктивності та ємності для повздовжнього опору, трифазні ділянки із паралельним з'єднанням активного опору, індуктивності та ємності і заземлювач, рис.13.5. З'єднання та вказівка типу кожної ділянки показано на рис. 13.6.

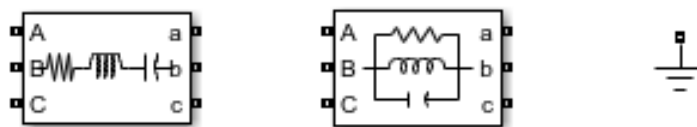


Рисунок 13.5. Блоки для моделювання ділянки ЛЕП

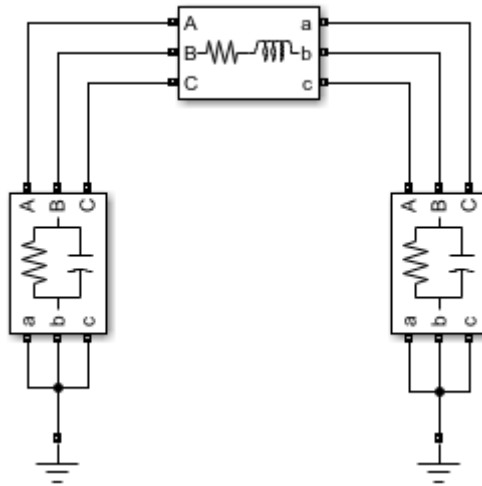


Рисунок 13.6. П-подібна схема заміщення ЛЕП

Ділянка, що відповідає за моделювання поперечної провідності має активно-ємнісний характер. Таким чином активну поперечну провідність потрібно перерахувати на опір для того, щоб внести цю величину у відповідний параметр в блоці. Ємнісну поперечну провідність потрібно перерахувати на ємність.

Ділянка, що відповідає за моделювання повздовжнього опору має активно-індуктивний характер. Тут тільки індуктивний опір потрібно перерахувати на індуктивність, рис.13.7.

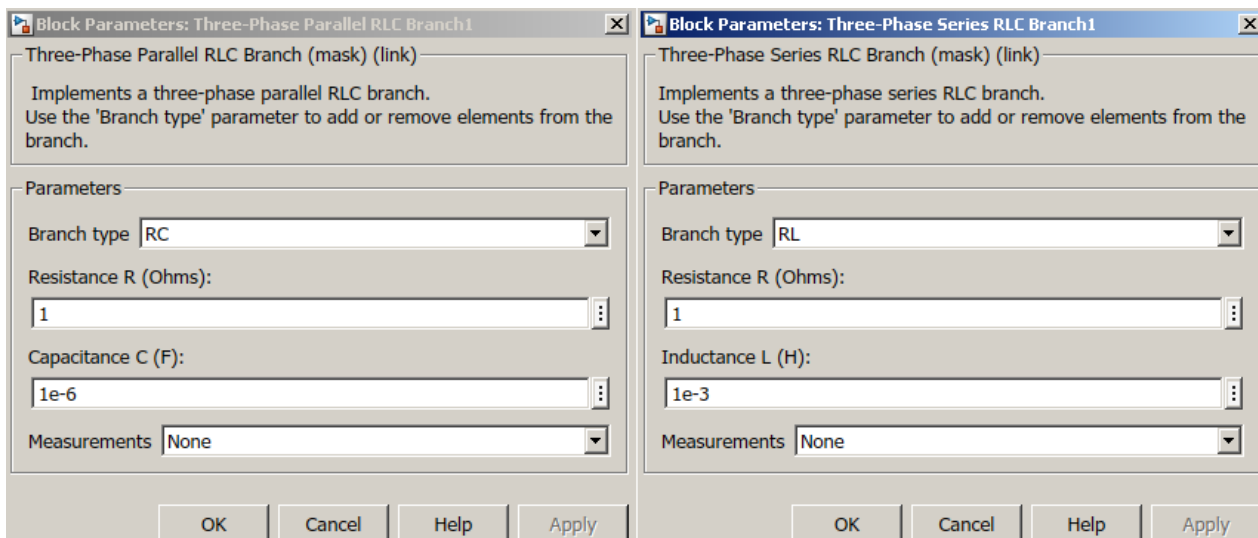


Рисунок 13.7. Параметри блоків для П-подібної схеми заміщення

Параметри силового трифазного трансформатора можна розглянути на прикладі схеми, що знаходиться за адресою [web\(fullfile\(docroot, 'physmod/sps/examples.html?category=renewable-energy-relib&s_tid=CRUX_topnav'\)\)](http://web(fullfile(docroot, 'physmod/sps/examples.html?category=renewable-energy-relib&s_tid=CRUX_topnav')). Зразок містить кілька трансформаторів і мова піде

про трансформатор потужністю 47МВА для зв'язку класів напруги 120 кВ та 25 кВ. На рис.13.8 показано першу вкладку діалогового вікна для введення параметрів трансформатора, що з'являється після обрання цього трансформатора в робочому середовищі програмного комплексу MatLab.

Обирається з'єднання фаз на високій та низькій стороні. Можливі варіанти: зірка, зірка заземлена, зірка з виведеною нейтраллю, трикутник з першою групою з'єднання та трикутник з 11-ою групою з'єднання обмоток.

Обирається тип магнітної системи: трансформатор стержньового типу [core type], броньового типу [shell type] або група з трьох однофазних трансформаторів.

За необхідності моделюється явище насичення осердя [simulate saturation]. З подальшим використанням інструментарію мультиметра, безпосередньо в трансформаторі можна обрати вимірювання фазних напруг сторін ВН та НН, фазних струмів сторін ВН та НН, магнітний потік кожної фази та активну і реактивну складову струму холостого ходу, магнітний потік та реактивну складову струму холостого ходу або обрати вимірювання всього вище зазначеного одночасно.

Числові характеристики знаходяться в другій вкладці, рис.13.9, параметри трансформатора. Перше, що вказується – це робочі одиниці: або іменовані, SI, або відносні, pu. Далі вводиться номінальна потужність у ВА та номінальна робоча частота. За замовчуванням стоїть 60 Гц, цей зразок також не є виключенням.

Для кожної сторони вказується номінальна фазна напруга у В, активний опір в Ом та індуктивність обмотки в Гн.

Для контуру намагнічування замість звичної для курсу мереж активної провідності вказується активний опір в Ом, це буде величина, обернена до провідності в См. Замість індуктивної поперечної провідності вказується безпосередньо індуктивність в Гн.

Якщо на першій вкладці було вказано на необхідність моделювання та врахування насичення, то рядок для індуктивності контуру намагнічування буде закритим, натомість відкриється рядок для Вб-А характеристики намагнічування осердя.

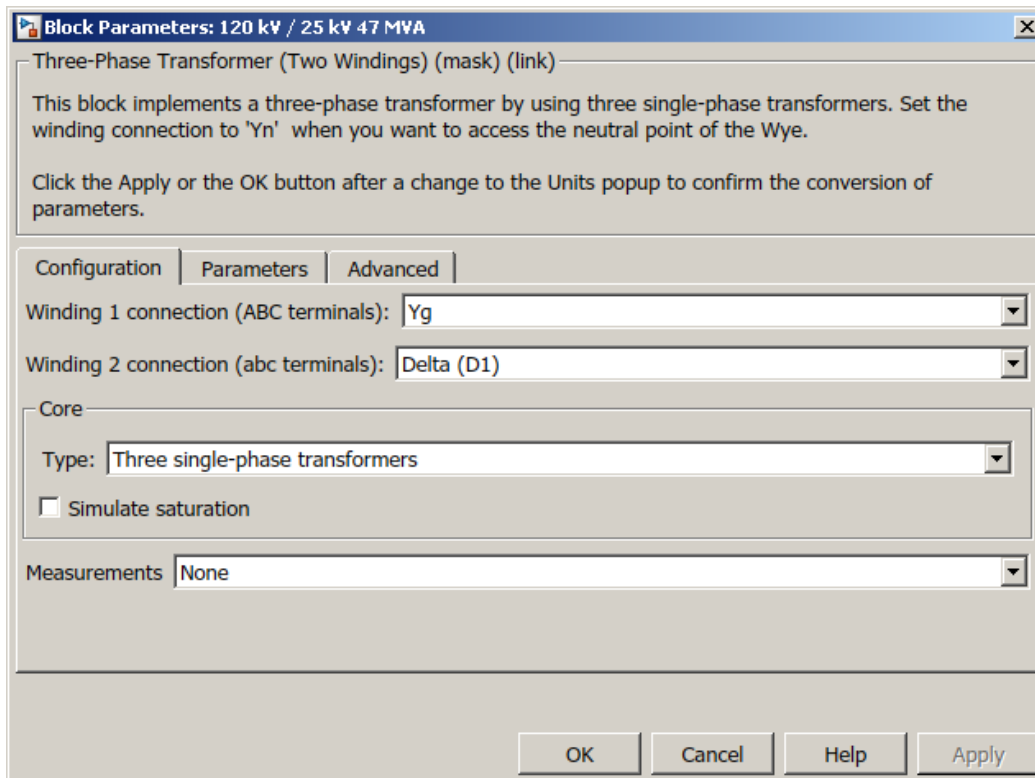


Рисунок 13.8. Параметры трифазного трансформатора. Перша вкладка

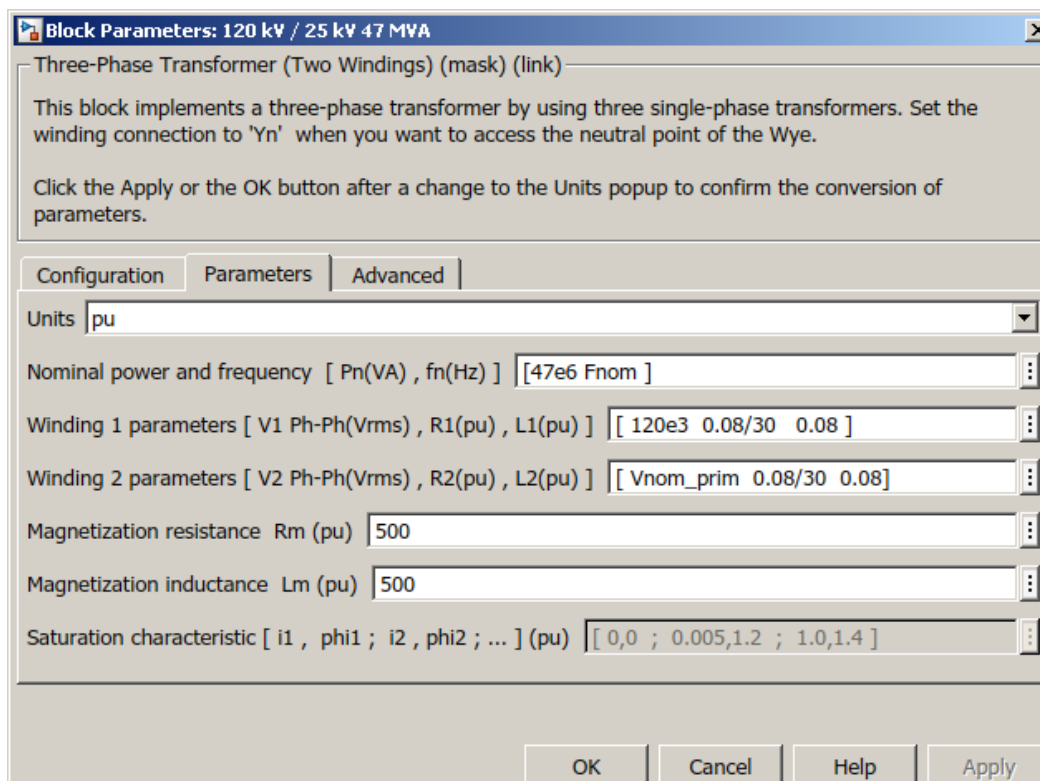


Рисунок 13.9 – Параметры трифазного трансформатора. Перша вкладка

З метою якомога точнішого врахування фізичного моделювання процесів в трансформаторі, потрібно виконати попередню підготовку для визначення всіх необхідних опорів та індуктивностей. З іншої сторони можна застосувати вже вбудовану систему відносних одиниць і вчинити наступним чином:

- після відкриття вкладки з параметрами, одиниці вимірювання залишити відносними, тобто pu;
- ввести номінальну потужність у ВА та частоту в Гц;
- ввести номінальну напругу сторони ВН у В та номінальну напругу сторони НН у В;
- обрати іменовані одиниці вимірювання SI.

Перерахунок відбудеться автоматично, рис.13.10, питання лише в рівні похибки.

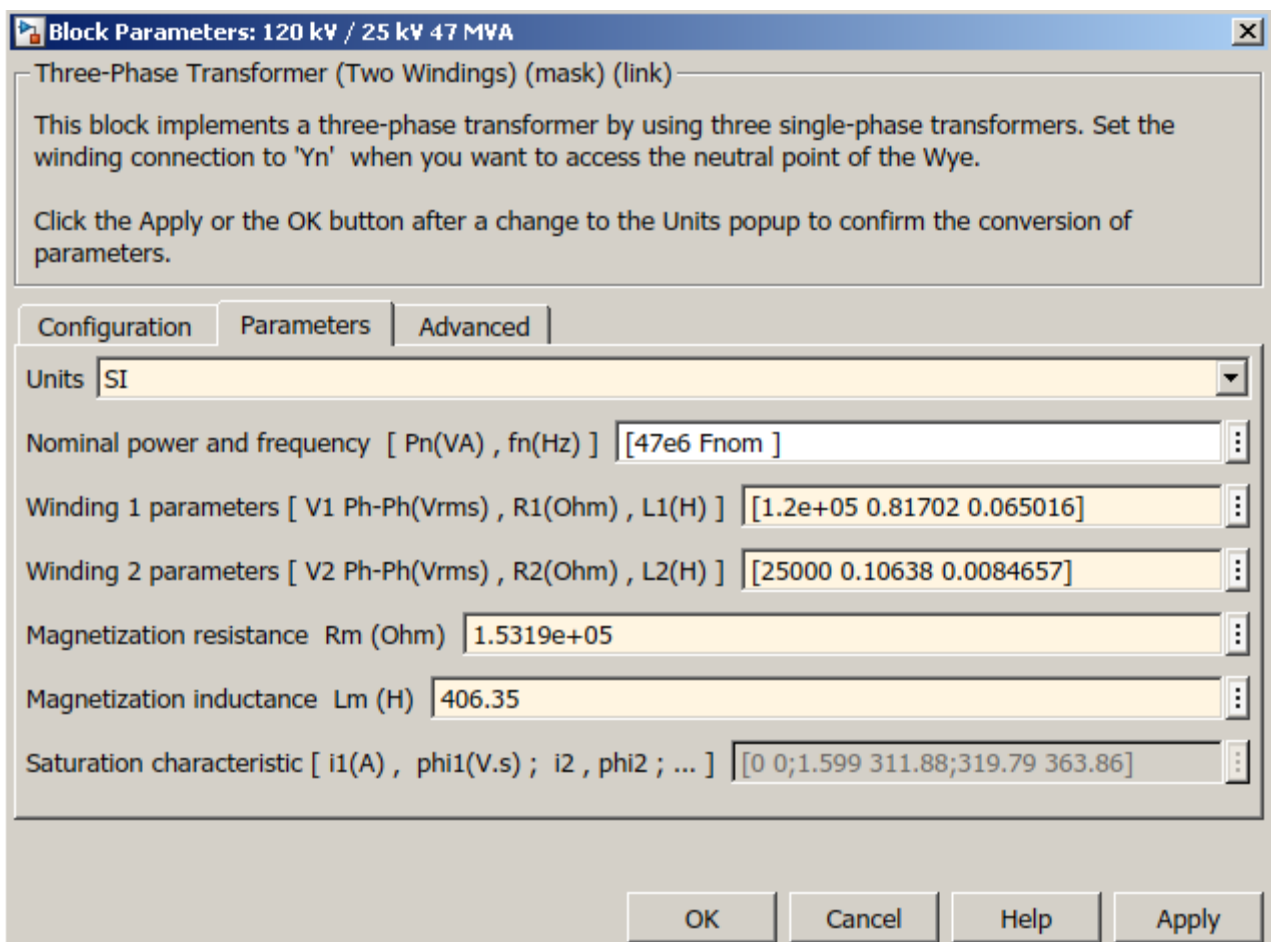


Рисунок 13.10. Автоматичний перерахунок параметрів схеми заміщення силового трифазного трансформатора

Практична частина

Розрахуємо параметри схеми заміщення, які необхідно ввести у відповідні блоки симетричної П-подібної схеми заміщення лінії, яка належить до класу напруги 110 кВ, виконана провідником марки АС-95/16, довжиною 15 км, розташована на опорі рис.13.11.

Провідник даної марки має погонний активний опір 0,301 Ом/км, діаметр 13,5 мм. Також в схемі заміщення врахуємо втрати активної потужності на корону, погонна величина яких для ліній класу напруги 110 кВ становить 0,08 кВт/км.

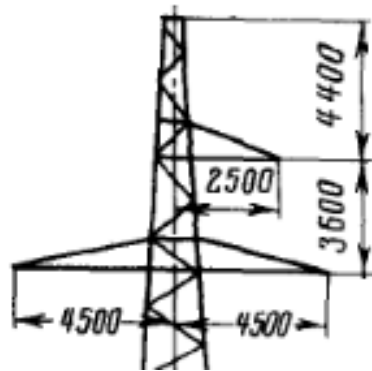


Рисунок 13.11. Опора ЛЕП для зразка

Визначення середньгеометричної відстані між фазами:

$$D_{A-B} = \sqrt{(D_{A-01} + D_{0-B})^2 + D_{0-01}^2} = \sqrt{(4500 + 2500)^2 + 3600^2} = 7871,47(\text{мм})$$

$$D_{B-C} = \sqrt{(D_{01-C} - D_{0-B})^2 + D_{0-01}^2} = \sqrt{(4500 - 2500)^2 + 3600^2} = 4118,25(\text{мм})$$

$$D_{A-C} = D_{A-01} + D_{01-C} = 4500 + 4500 = 9000(\text{мм})$$

$$D_{\text{сеп}} = \sqrt[3]{D_{A-B} \cdot D_{B-C} \cdot D_{A-C}} = \sqrt[3]{7871,47 \cdot 4118,25 \cdot 9000} = 6632,4(\text{мм})$$

Погонні параметри, що залежать від середньгеометричної відстані між фазами:

$$x_0 = 0,144 \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot D_{\text{сеп}}}{d_0}\right) + 0,016 = 0,144 \cdot \lg\left(\frac{2 \cdot 6632,4}{13,5}\right) + 0,016 = 0,447(\text{Ом} / \text{км})$$

$$b_0 = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{2 \cdot D_{\text{сеп}}}{d_0}\right)} = \frac{7,58 \cdot 10^{-6}}{\lg\left(\frac{2 \cdot 6632,4}{13,5}\right)} = 2,533 \cdot 10^{-6}(\text{См} / \text{км})$$

Активний опір ділянки:

$$R_{ЛЕП} = r_0 \cdot L = 0,301 \cdot 15 = 4,515 (Ом)$$

Індуктивність ділянки:

$$L_{ЛЕП} = \frac{x_0 \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{0,447 \cdot 15}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 0,021 (Гн)$$

Поперечний опір, обернений до поперечної активної провідності, з відміткою «G»:

$$R_{G_{ЛЕП}} = \frac{U_{ном}^2}{\Delta P_{к0} \cdot L} = \frac{110^2}{0,08 \cdot 15 \cdot 10^{-3}} = 1,008 \cdot 10^7 (Ом)$$

В параметри ділянок буде внесено подвоєне значення.

Поперечна ємність, функція від поперечної ємнісної провідності, з відміткою «B»:

$$L_{B_{ЛЕП}} = \frac{b_0 \cdot L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{2,533 \cdot 10^{-6} \cdot 15}{2 \cdot \pi \cdot 50} = 1,209 \cdot 10^{-7} (Гн)$$

В параметри ділянок буде внесено половину значення. Усі внесені результати представлено на рис.13.12.

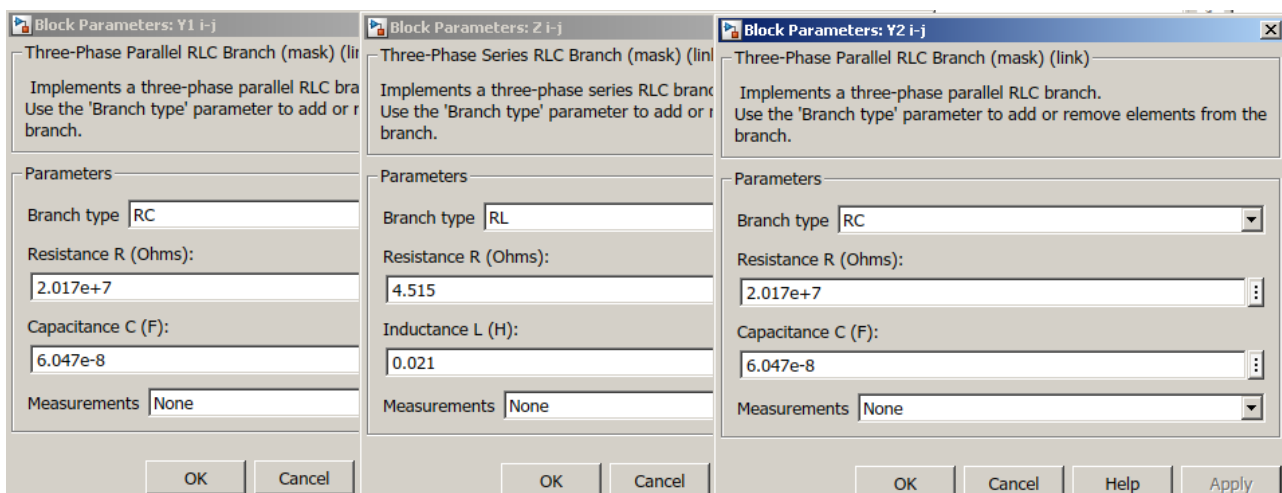


Рисунок 13.12. Внесені у відповідні блоки параметри схеми заміщення

Визначимо паспортні дані трансформатора 47 МВА 120/25 кВ, параметри схеми заміщення якого представлено на рис.13.10.

Коефіцієнт трансформації:

$$K_T = \frac{U_{\phi_{ВН}}}{U_{\phi_{НН}}} = \frac{120}{\sqrt{3} \cdot 25} = 2,771$$

Номінальний струм сторони ВН трансформатора:

$$I_{НОМ} = \frac{S_T}{3 \cdot U_{\phi ВН}} = \frac{47000}{\sqrt{3} \cdot 120} = 226,13(A)$$

Перевірка співвідношення між опорами сторін трансформатора:

$$R_{HH} \cdot K_T^2 = 0,10638 \cdot 2,771^2 = 0,817(Ом) = R_{ВН}$$

Перевірка виконується. Теж саме для індуктивності сторін трансформатора:

$$L_{HH} \cdot K_T^2 = 0,0084657 \cdot 2,771^2 = 0,00651(Гн) = L_{ВН}$$

Перевірка виконується. Таким чином, активний опір фази трансформатора:

$$R_T = R_{ВН} + R_{HH} \cdot K_T^2 = 0,81702 + 0,10638 \cdot 2,771^2 = 1,634(Ом)$$

Індуктивний опір фази трансформатора:

$$X_T = (L_{ВН} + L_{HH} \cdot K_T^2) \cdot 2 \cdot \pi \cdot f = (0,006507 + 0,0084657 \cdot 2,771^2) \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 = 40,851(Ом)$$

Втрати потужності короткого замикання:

$$\Delta P_{к.з.} = 3 \cdot I_{НОМ}^2 \cdot R_T = 3 \cdot 226,13^2 \cdot 1,634 = 250662,96(Вт) = 250,6(кВт)$$

Напруга короткого замикання:

$$u_{к.з.} = \frac{I_{НОМ} \cdot X_T}{U_{\phi ВН}} \cdot 100 = \frac{\sqrt{3} \cdot 226,13 \cdot 40,851}{120000} \cdot 100 = 13,3\%$$

Втрати потужності холостого ходу:

$$\Delta P_{х.х.} = \frac{3 \cdot U_{\phi ВН}^3}{R_{G T}} = \frac{120000^2}{153190} = 94000,9(Вт) = 94(кВт)$$

Струм холостого ходу:

$$I_{х.х.} = \frac{U_{\phi ВН}}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_{ВТ}} \cdot 100 = \frac{12000}{\sqrt{3} \cdot 2 \cdot \pi \cdot 50 \cdot 406,35} \cdot 100 = 0,24\%$$

В даному випадку немає із чим порівняти, але при виконанні індивідуального завдання такої проблеми не виникне.

Індивідуальне завдання

Частина 1. Сформувати П-подібну схему заміщення кожної з чотирьох ділянок, визначити та внести у відповідні місця параметри схеми заміщення ліній. Схему та варіанти для завдання взяти із індивідуального заняття теми №6.

Частина 2. Визначити паспортні дані силових трансформаторів 110 кВ, параметри схеми заміщення яких було отримано за процедурою, описаною для

рис.13.10. Трансформатори узяти з табл.8.2. Варіанти розподілу потужностей трансформаторів представлено в табл.13.1. Варіант задається викладачем

Таблиця 13.1. Варіанти типу трансформаторів для досліду

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип тр-ра	ТМН-6300	ТДН-16000	ТМН-2500	ТДН-16000	ТМН-6300	ТДН-10000	ТРДН-25000	ТМН-2500	ТРДН-25000	ТРДН-25000
Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип тр-ра	ТДН-10000	ТМН-2500	ТМН-6300	ТДН-16000	ТДН-10000	ТМН-2500	ТРДН-25000	ТМН-6300	ТДН-16000	ТРДН-25000
Варіант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Тип тр-ра	ТМН-2500	ТДН-16000	ТДН-10000	ТМН-6300	ТДН-16000	ТМН-6300	ТМН-2500	ТДН-10000	ТРДН-25000	ТДН-10000

Тема №14

МОДЕЛЮВАННЯ ЗАМКНЕНИХ СХЕМ ЕЛЕКТРИЧНИХ МЕРЕЖ. ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ

Мета роботи: моделювання та дослідження режимів роботи замкнених схем електричних мереж; набуття практичних навичок формування та збирання замкнених, на прикладі двохконтурних, схем електричних мереж, визначення та нанесення режимних параметрів на схему мережі в програмному середовищі MatLab.

Теоретичні положення та практична частина

Дане практичне заняття характеризується постійним перетином теоретичних положень та практичної реалізації щодо досягнення мети, а тому розподіл на теоретичні та практичні засади неможливий. Дане заняття передбачає збирання та моделювання замкненої двохконтурної схеми електричної мережі номінальною напругою 110 кВ з напругою балансуєчого пункту на рівні 115 кВ, де рівень напруги БП обирається з діапазону 111...121 кВ. Схему представлено на рис. 14.1. Кожен пункт характеризується потужністю споживання, табл.14.1. Схема мережі містить 6 пунктів, причому в п. 2 встановлено два генератори по 30 МВт кожен. Кожна ділянка характеризується довжиною, погонними параметрами, повздожнім опором та поперечною провідністю, табл.14.2. Особливість конфігурації: ділянка 5-6 містить дві паралельні лінії.

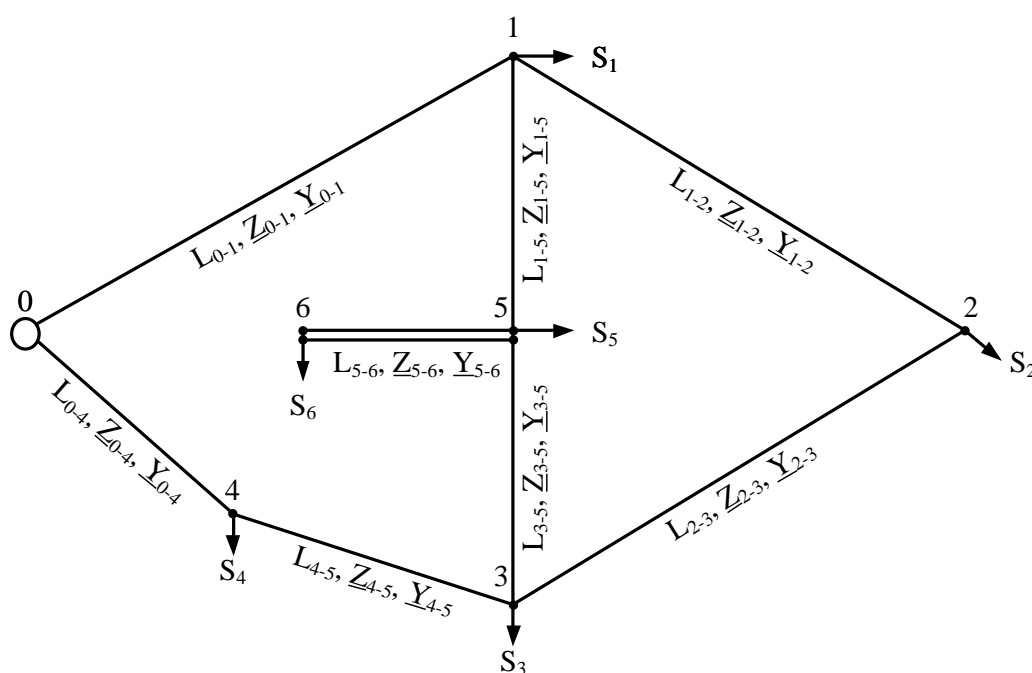


Рисунок 14.1. Робоча схема

Табл. 14.2 також містить результат перерахунку індуктивного повздовжнього опору на індуктивність ділянки, ємнісну поперечну провідність перераховано на ємність ділянки, активну поперечну складову перераховано з провідності на опір.

Таблиця 14.1. Навантаження пунктів робочої схеми

№ пункту	Активна потужність сторони, МВт		Реактивна потужність сторони, МВАр		Еквівалентне навантаження сторони 110 кВ	
	СН	НН	СН	НН	P, МВт	Q, МВАр
1	12	16	-8,68	-10,75	28	-19,43
2	0	-30	0	22,5	-30	22,5
3	10	8	-7,24	-5,38	18	-12,62
4	8	5	-5,79	-3,36	13	-9,15
5	9	6	-6,52	-4,03	15	-10,55
6	0	12	0	-8,06	12	-8,06

Повздовжній активний опір ділянки обчислюється, виходячи із погонного активного опору марки провідника даної ділянки та довжини цієї ж самої ділянки:

$$R_{ЛЕП} = r \cdot L_{ЛЕП} \quad (14.1)$$

Повздовжній індуктивний опір обчислюється в такий самий спосіб, тільки погонні параметри індуктивні. Але для програмного середовища MatLab потрібна власне індуктивність:

$$X_{ЛЕП} = x_0 \cdot L_{ЛЕП} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_0 \cdot L_{ЛЕП} \quad (14.2)$$

від індуктивного опору ділянки до індуктивності

$$L = \frac{X_{ЛЕП}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (14.3)$$

Активна поперечна провідність ділянки ЛЕП визначається

$$G_{ЛЕП} = \frac{\Delta P_{к0} \cdot L_{ЛЕП}}{U_{ном}^2} \quad (14.4)$$

тоді поперечний активний опір буде величиною оберненою до активної поперечної провідності

$$R_{G_{ЛЕП}} = \frac{U_{ном}^2}{\Delta P_{к0} \cdot L_{ЛЕП}} \quad (14.5)$$

Поперечна ємнісна провідність ділянки обчислюється, виходячи з погонної провідності для даного провідника на ділянці та довжини цієї ділянки. Сама ж провідність знаходиться у функціональній залежності від ємності ділянки:

$$V_{ЛЕП} = b_0 \cdot L_{ЛЕП} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_0 \cdot L_{ЛЕП} \quad (14.6)$$

Саме цю ємність потрібно визначити та підставити в параметри поперечної провідності схеми заміщення

$$C_{ЛЕП} = \frac{V_{ЛЕП}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (14.7)$$

Вирази (14.1) – (14.7) використовувалися для заповнення таблиці 14.2

Таблиця 14.2. Параметри ділянок робочої схеми

Ділянка	Переріз, мм ²	Довжина, км	Погонні параметри схеми заміщення				Параметри для моделі			
			опір, Ом/км		провідність, См/км		Повздожня ділянка		Ліва/права поперечна ділянка	
			r0	x0	g0	b0	R, Ом	L, Гн	R ₂ , Ом	C, Ф
"0-1"	1x120	32	0,242	0,425	7,03E-09	2,69E-06	7,744	0,0433	23234,2	1,370E-07
"0-4"	1x120	19	0,242	0,425	7,03E-09	2,69E-06	4,598	0,0257	39131,3	8,134E-08
"1-2"	1x240	26	0,118	0,403	7,03E-09	2,84E-06	3,068	0,0334	27047,5	1,177E-07
"1-5"	1x120	16	0,242	0,425	7,03E-09	2,69E-06	3,872	0,0216	46468,4	6,850E-08
"2-3"	1x240	28	0,118	0,403	7,03E-09	2,84E-06	3,304	0,0359	25115,5	1,267E-07
"3-4"	1x70	17	0,419	0,443	7,03E-09	2,58E-06	7,123	0,0240	45670,4	6,970E-08
"3-5"	1x120	19	0,242	0,425	7,03E-09	2,69E-06	4,598	0,0257	39131,3	8,134E-08
"5-6"	2x70	9	0,419	0,443	7,03E-09	2,58E-06	3,771	0,0127	86266,4	3,690E-08

На рис.14.2 показано формування ділянки 0-1, що характеризується П-подібною схемою заміщення. Параметри схеми представлено на рис.14.3. Тип ділянки для повздожнього опору – прийнято активно-індуктивну. Тип ділянки для поперечного опору – прийнято активно-ємісну.

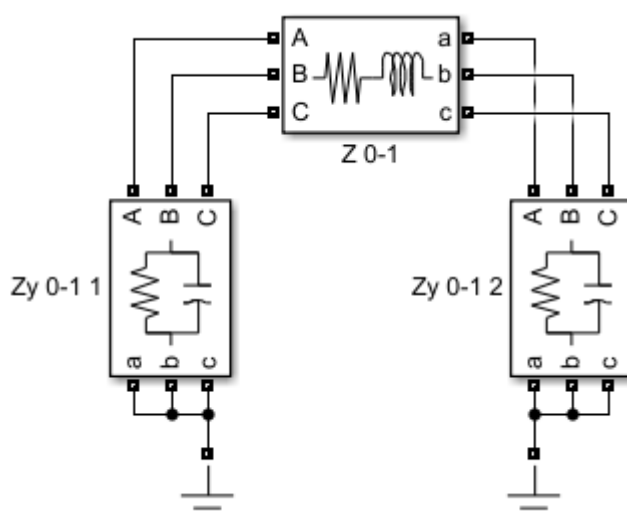


Рисунок 14.2. П-подібна ділянка 0-1

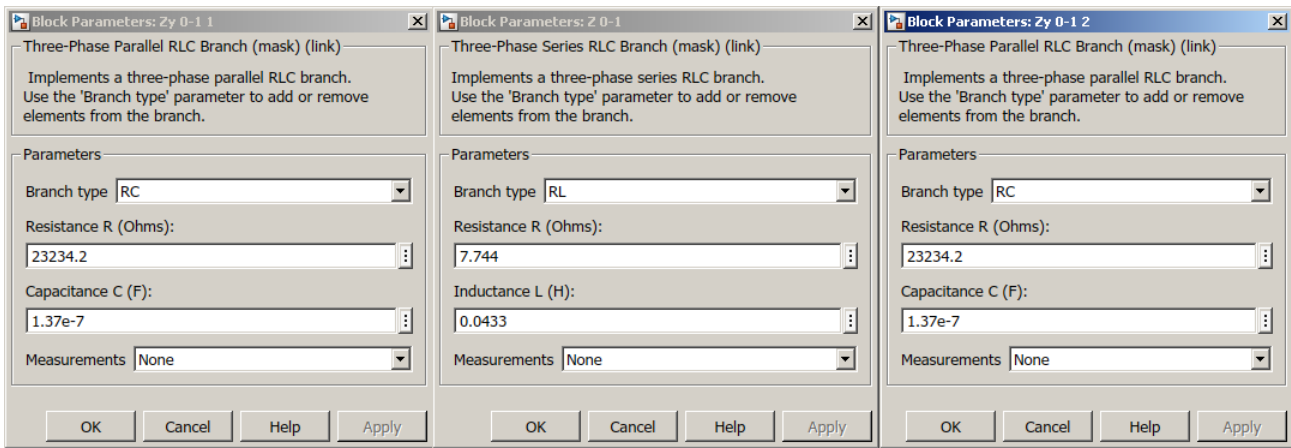


Рисунок 14.3. Параметри схеми заміщення ділянки 0-1

Решта ділянок моделюються в такий самий спосіб, поступово набираючи схему мережі. Ділянка 5-6 містить дві паралельні лінії. Тож або П-подібну схему потрібно сформувати двічі, тобто для кожної з двох паралельних ліній, або до П-подібної схеми потрібно внести половину значень опорів та подвоєну ємність. В даному випадку П-подібна схема формуватиметься двічі, рис.14.3, з відповідними параметрами, рис.14.4 та 14.5.

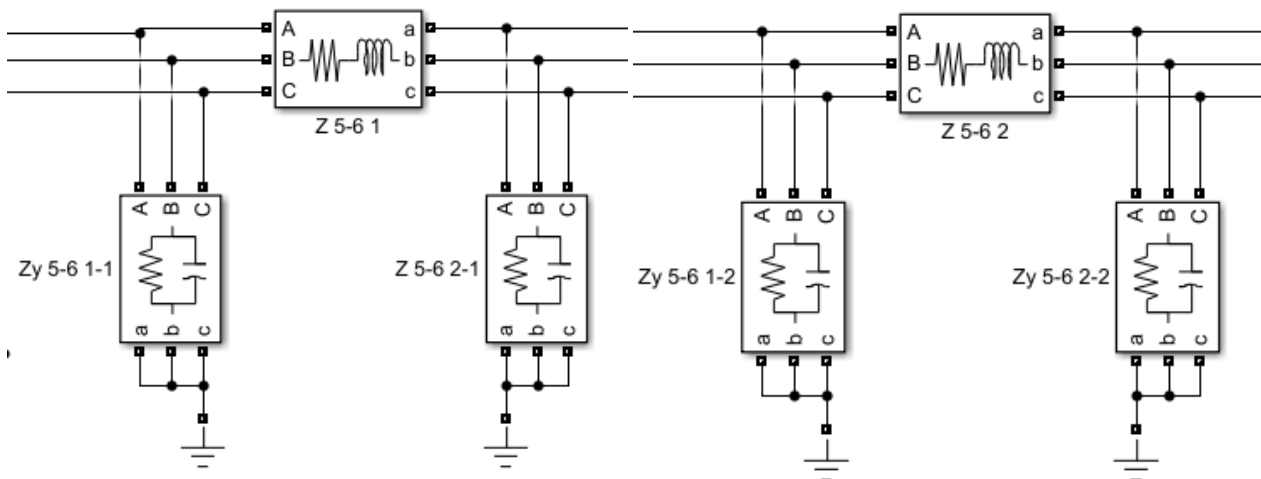


Рисунок 14.3. Дві паралельні лінії ділянки 5-6

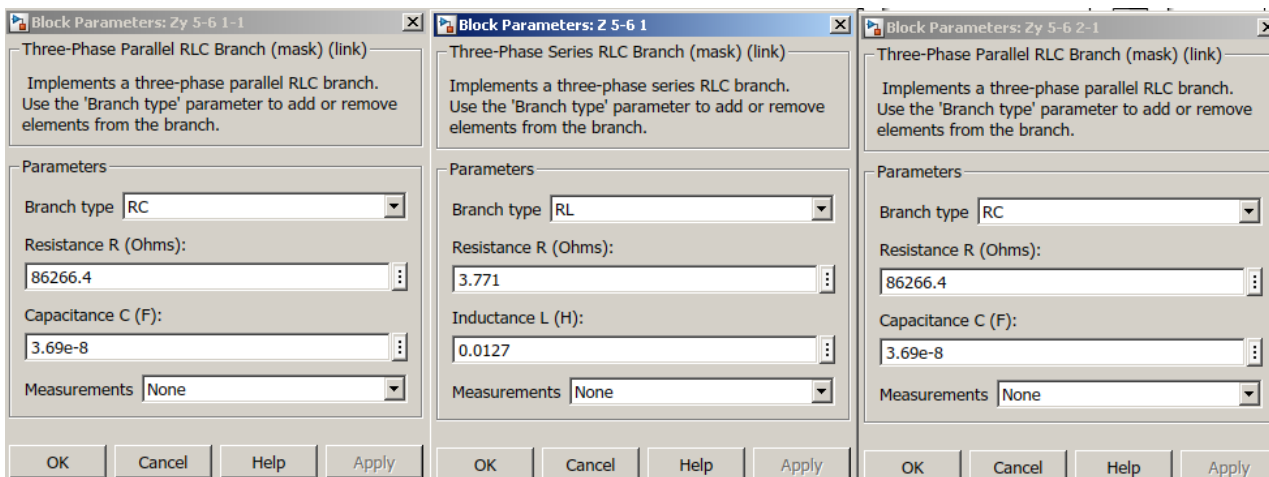


Рисунок 14.4. Параметри першої з двох ліній ділянки 5-6

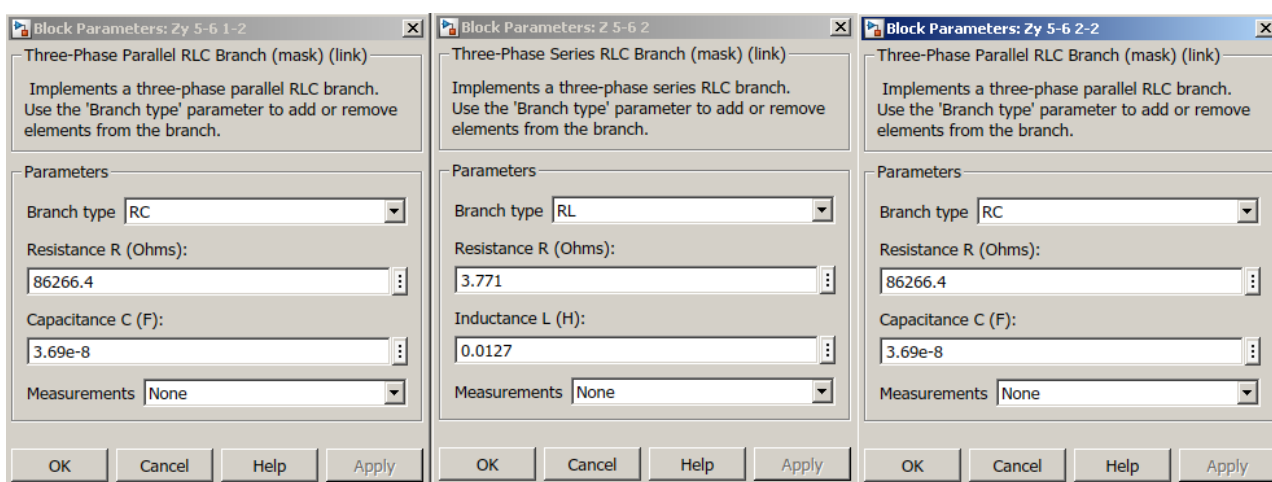


Рисунок 14.5. Параметри другої з двох ліній ділянки 5-6

Виконавши яесь підключення по кінцях ділянок (або інша ділянка, неважливо навіть яка, або просто якийсь об'єкт, неважливо навіть який), аби не було відкритих кінців приєднання, із даних П-подібних схем можна створити підсистеми, що проілюстровано на рис.14.6 на прикладі ділянок 0-1 та 0-1.

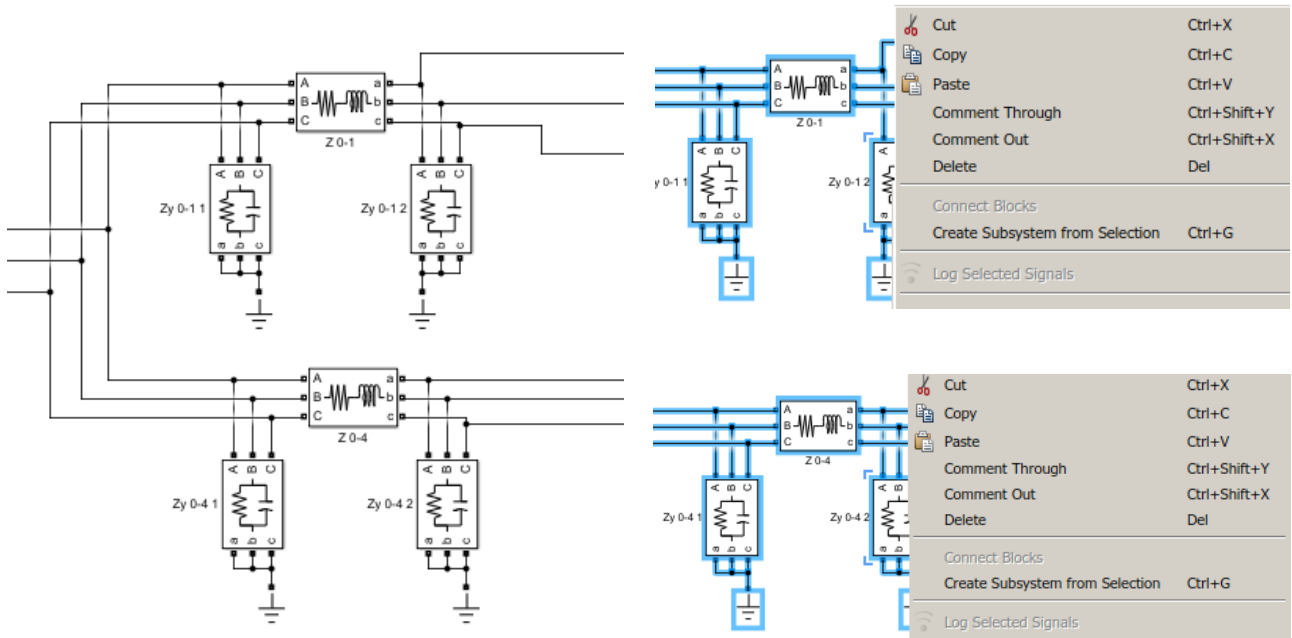


Рисунок 14.6. Створення підсистем

Із підсистемами, які буде підписано як «Branch», схема стає компактнішою, вивільняється певна площа, рис.14.7.

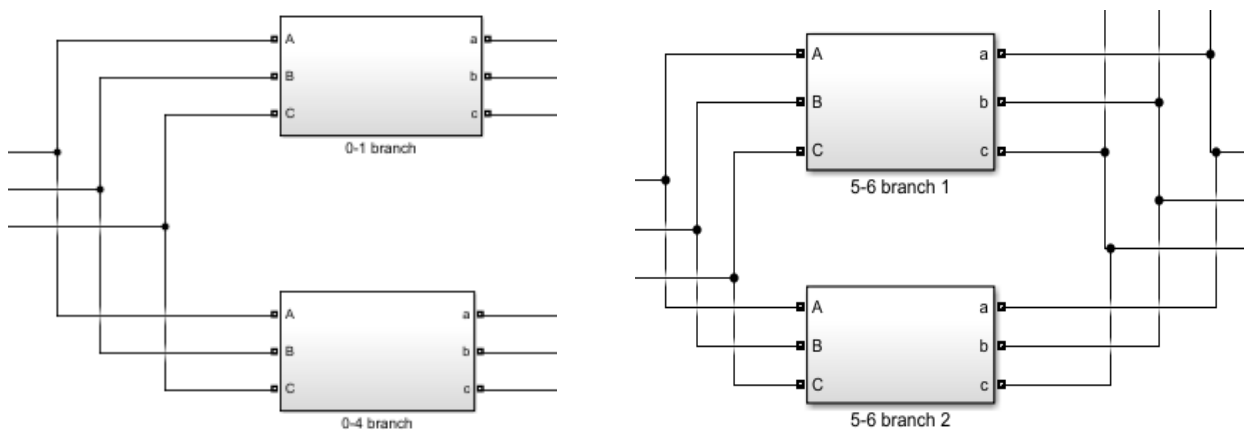


Рисунок 14.7. Ділянка, як підсистема, для зменшення площі, що охоплюється

Варто зайти до підсистеми та навести там лад, як то вирівнювання виводів та ідентифікаційний підпис літерами А-а, В-в, С-с, що відповідають своїм фазам, рис.14.8.

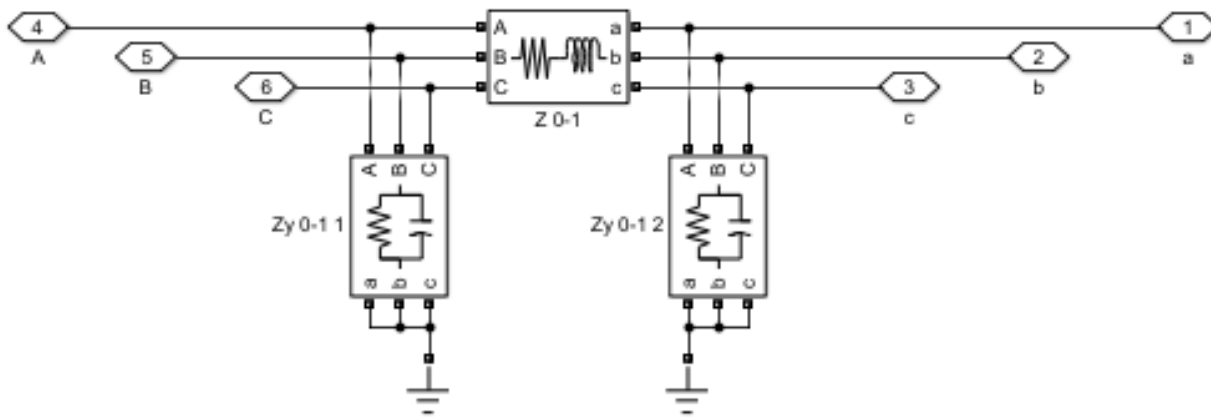


Рисунок 14.8. П-подібна схема ділянки 0-1 у підсистемі

Вихід з підсистеми здійснюється натисканням клавіш навігації «Назад», «Вгору, до вихідного файлу», або натиснувши лівою клавішею миші на ім'я файлу в адресному рядку, рис.14.9.

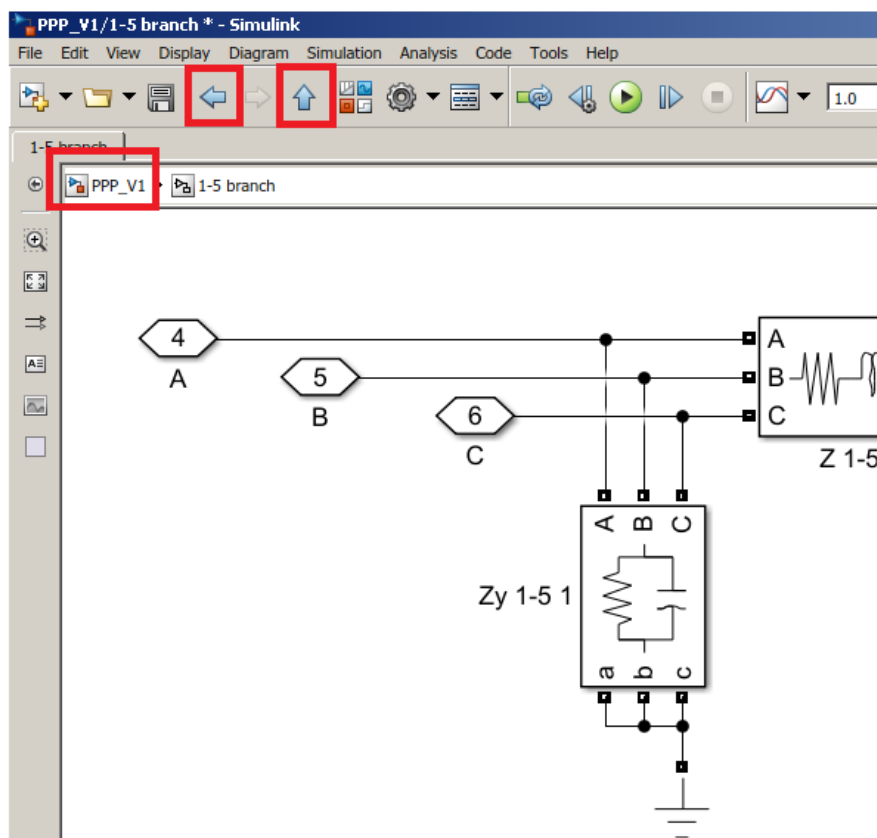
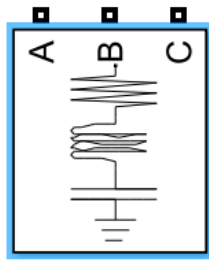


Рисунок 14.9. Навігація в межах підсистеми ділянки. На прикладі 1-5

Після роботи з конфігурацією схеми мережі переходимо до пунктів навантаження. На рис.14.10 показано блок, що відповідає за навантаження пунктів схеми для дослідження, за виключенням п.2. В блоці вказуються

з'єднання обмоток, номінальна напруга, частота, активна та реактивна складові навантаження. Не варто забувати, що навантаження задається постійною потужністю.



Three-Phase
Series RLC Load

Рисунок 14.10. Блок моделювання навантаження пункту

На рис.14.11 – рис.14.13 показано введені параметри пунктів навантаження 1, 3 – 6, крім п.2, бо там розташовано пункт генерації потужності.

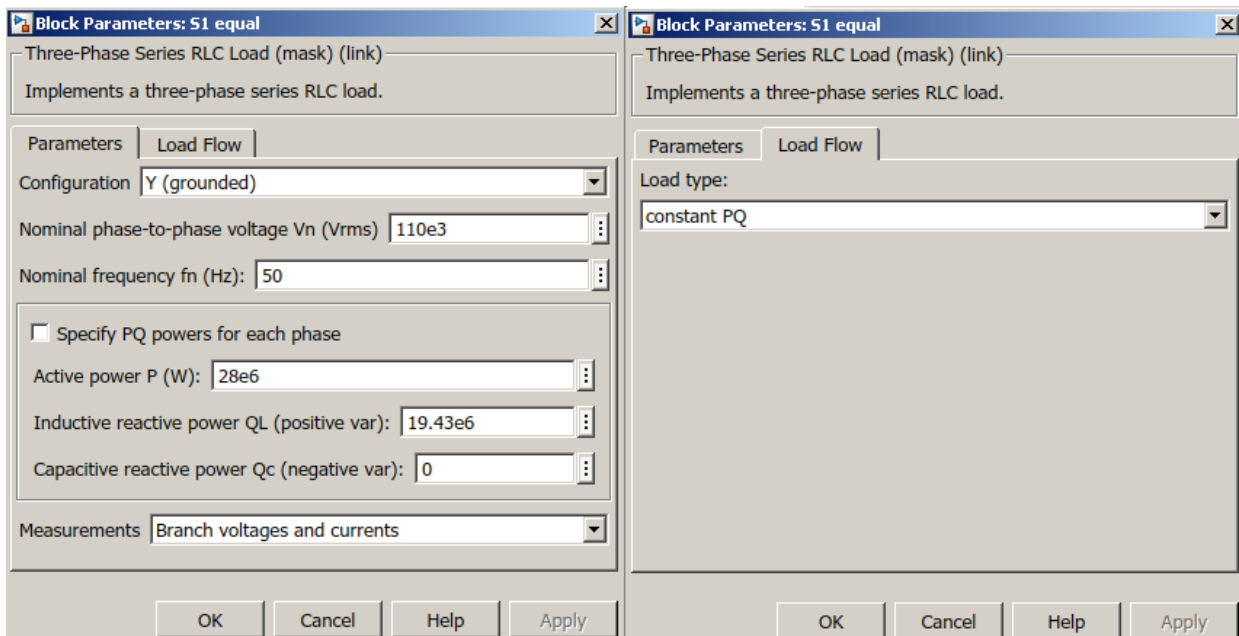


Рисунок 14.11. Параметри п.1

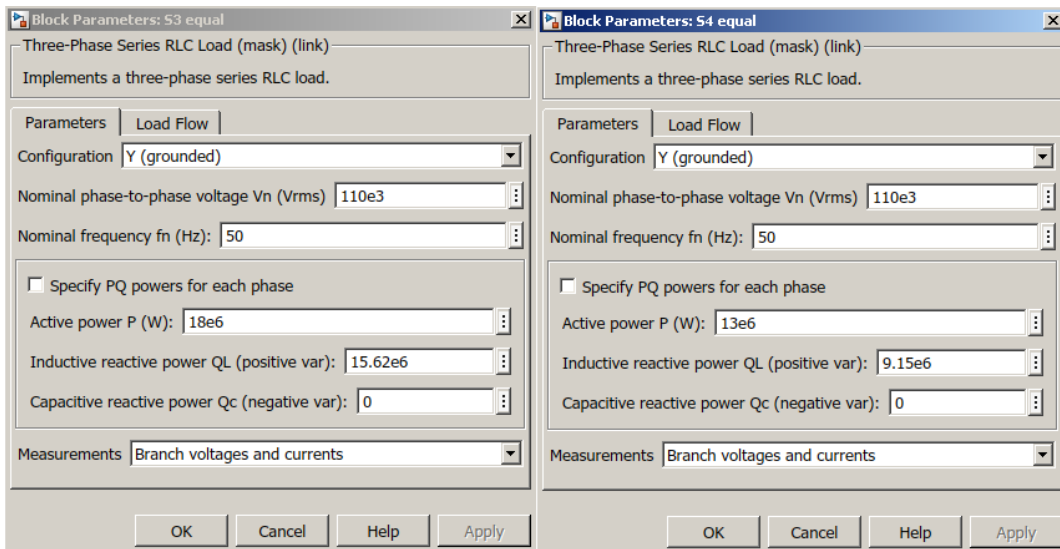


Рисунок 14.12. Параметри п.3 та п.4

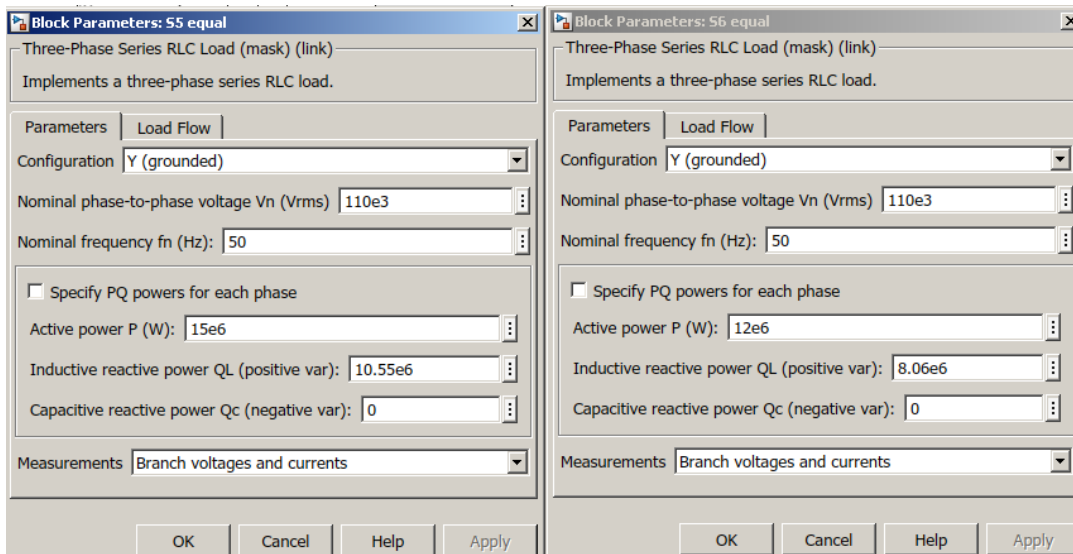


Рисунок 14.13. Параметри п.5 та п.6

Навантаження генераторного пункту №2, виглядатиме наступним чином, рис14.14:

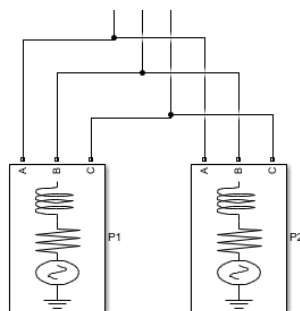


Рисунок 14.14. Пункт генерації, п.2

Для трифазного джерела напруги, яке використовуватиметься в п.2 має бути заданий якийсь малий повздовжній опір. Базова напруга дорівнює напрузі номінальній. Потужність генерації задається на вкладці «Load Flow», що відображено на рис.14.15.

В п.2 встановлено два генератори і другий генератор є точною копією першого. Отже можна просто скопіювати існуючий генератор та перейменувати його копію.

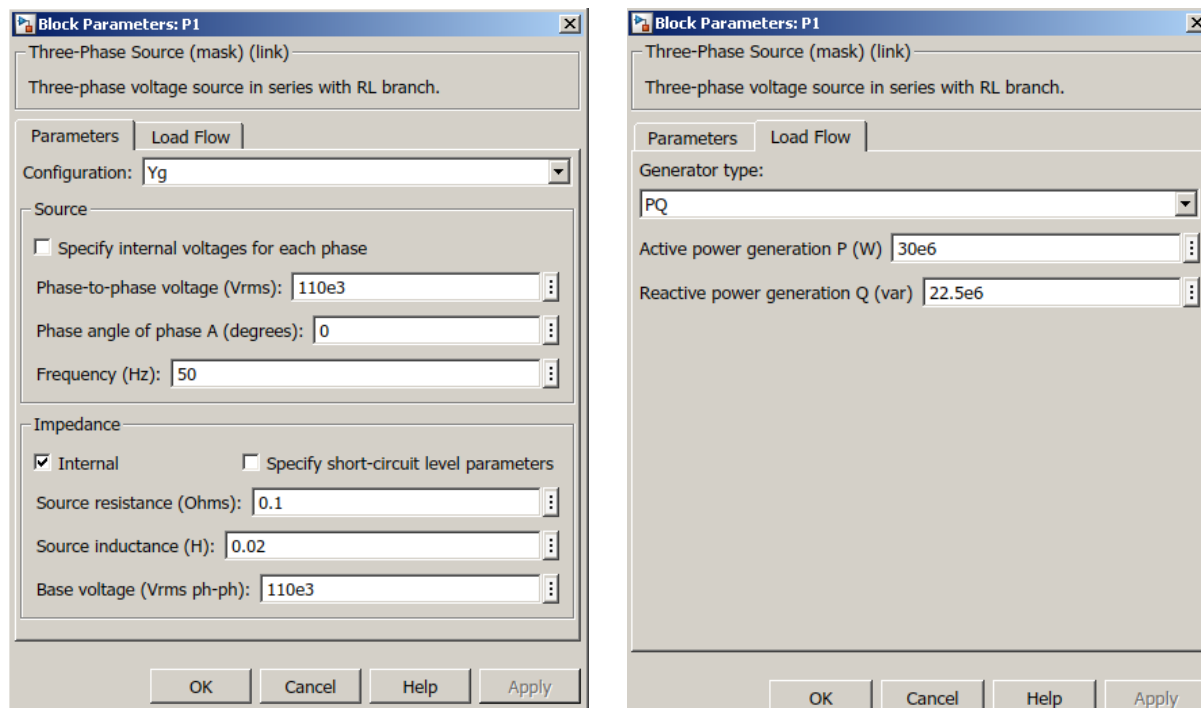


Рисунок 14.15 – Параметри генератора в п.2

Трифазне джерело напруги використовуватиметься для підключення балансуєчого пункту, рис.14.16. Не варто забувати що це балансуєчий пункт, який моделюється шинами нескінченної потужності, що обертаються – Swing. Серед параметрів для балансуєчого пункту задається діюче значення лінійної напруги – 115 кВ в даному випадку. Базисне значення напруги дорівнює напрузі БП. Хоча б деяке значення активного опору та індуктивності має бути присутнім, рис.14.17.

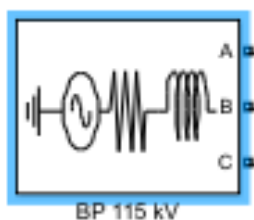


Рисунок 14.16. Зовнішній вигляд балансуєчого пункту

На рис.14.17 показано зібрану схему із усім необхідними введеними параметрами пунктів та ділянок. Також у файлі має бути розміщено PowerGui, де вказано, що розрахунок виконується у векторній формі, робоча частота мережі 50 Гц, Phasor 50 Hz.

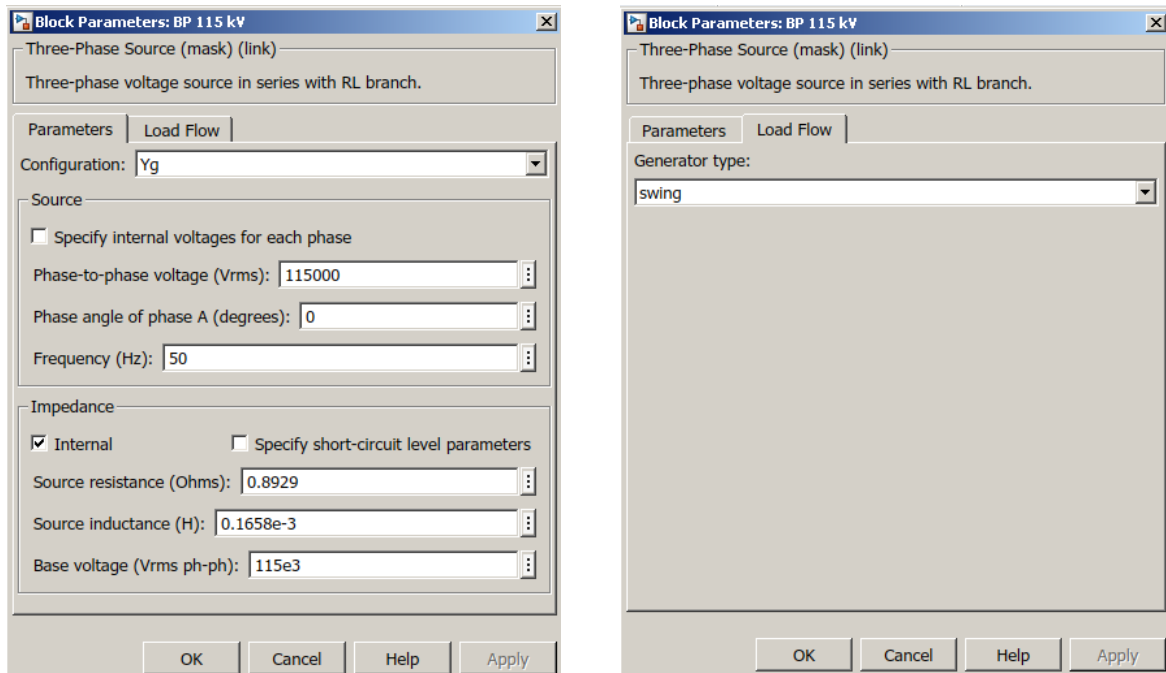


Рисунок 14.17. Параметри БП

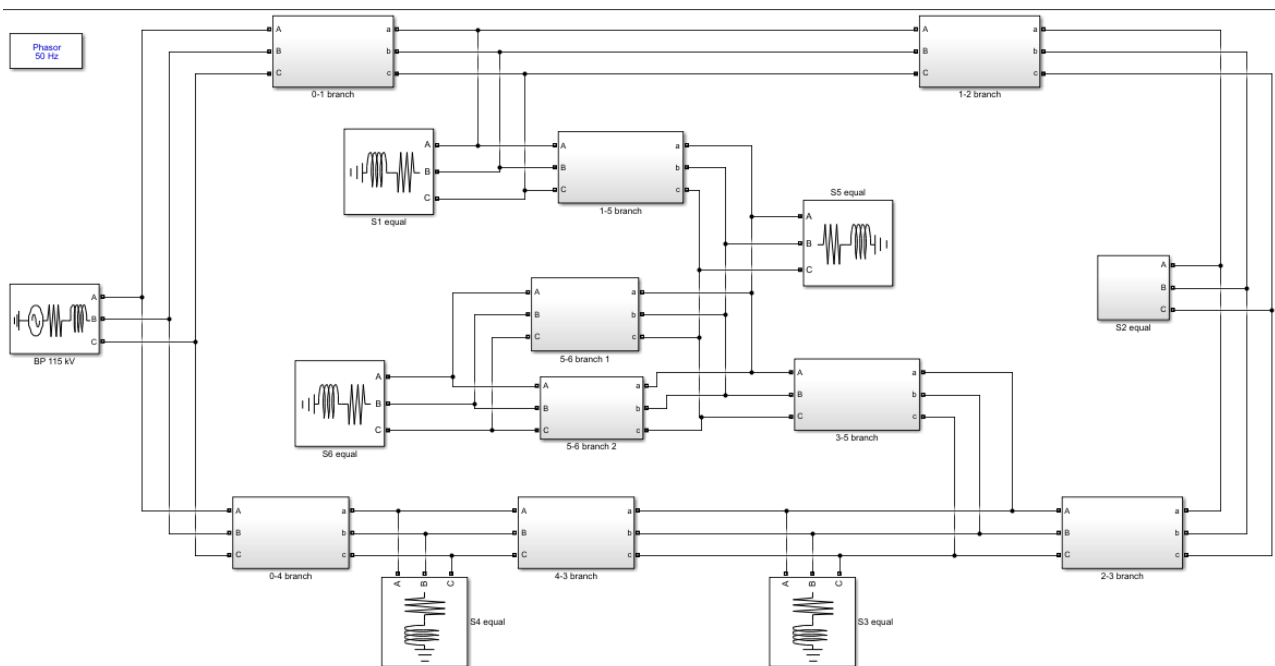


Рисунок 14.18. Робоча схема в середовищі MatLab

Задачею моделювання є отримання необхідних режимних параметрів:

- для пунктів: рівень напруги, потужність споживання,
- для ділянок: потужність початку та потужність кінця ділянки.

Безпосередньо, програмний комплекс результатів не дає і для їх отримання потрібно створювати вимірювальні блоки. На прикладі балансуєчого пункту створимо вимірювальний блок для отримання режимних параметрів в пунктах/вузлах, рис.14.19. Тут використовується трифазний вимірювач струму та напруги, 14.20, трифазний ватварметр, перетворювач комплексного сигналу для напруги на амплітуду та фазовий кут (вихід сигналу від фази скасовано) та множники для отримання потужності в МВт/МВАр та напруги в кВ, рис.14.21. Із вимірювачів створюється підсистема.

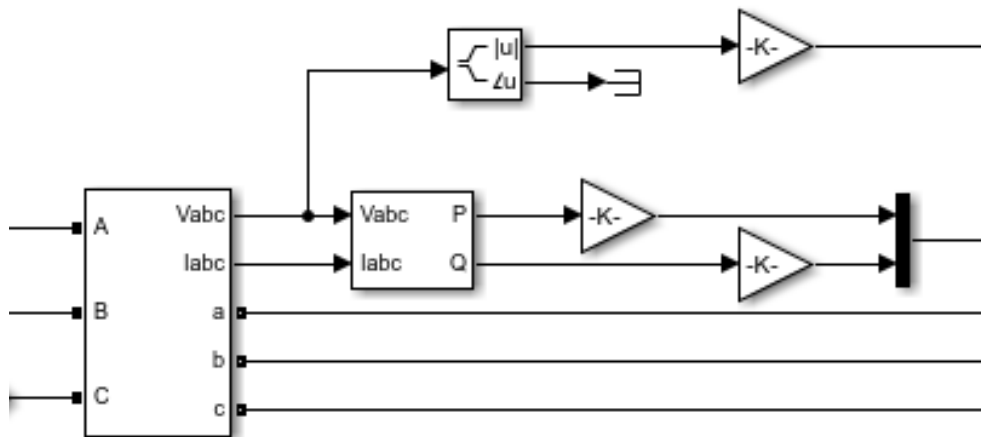


Рисунок 14.19. Блок вимірювання режимних параметрів в пунктах схеми

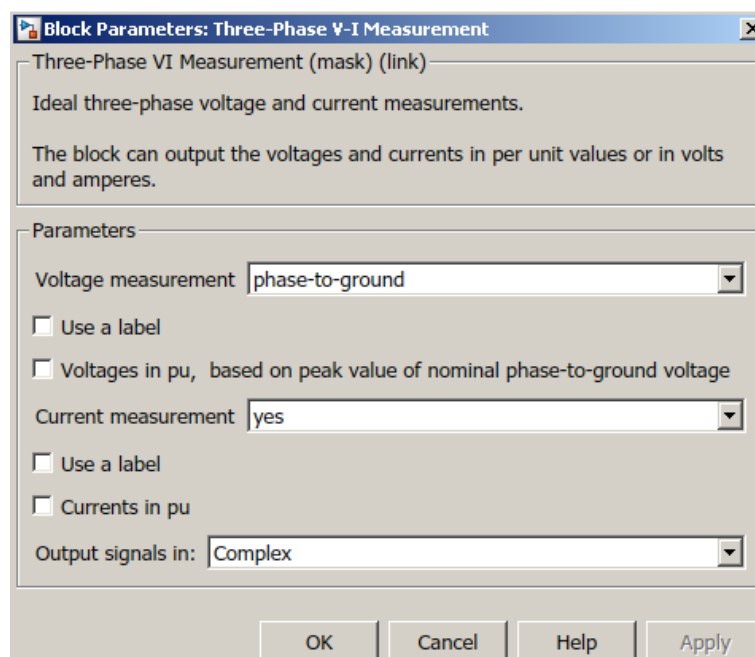


Рисунок 14.20. Трифазний вимірювач струму та напруги

Для ділянок схеми мережі вимірювальний блок виглядатиме так само, як і для вузла, але непотрібно виводити рівень напруги, рис.14.22. Масштаби в множниках для потужності ті ж самі, що й для вузлів. Для ділянки вимірювальних блоків буде два, і розташовуватимуться вони по кінцях.

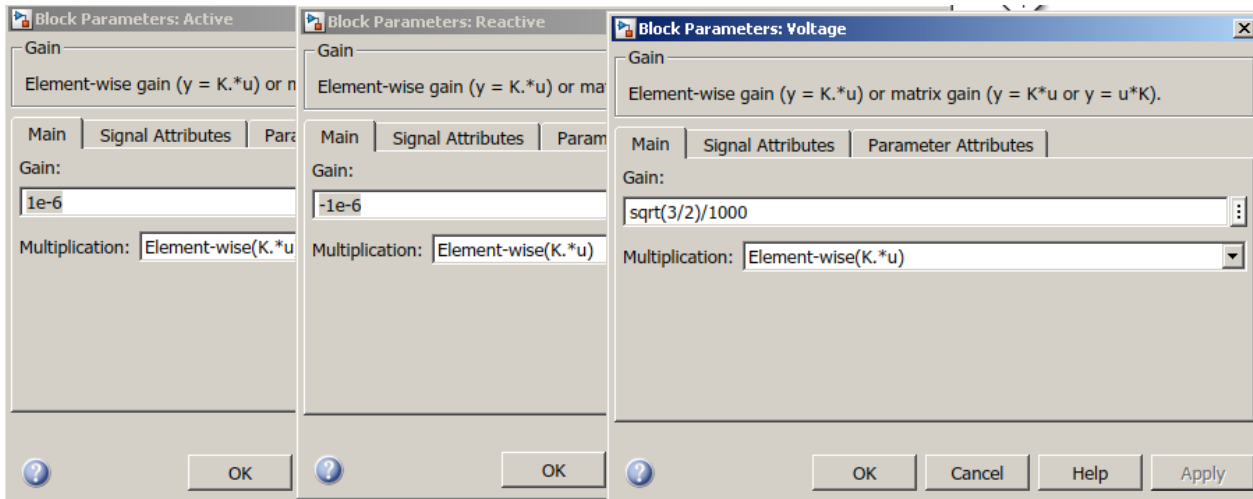


Рисунок 14.21. Множники для активної та реактивної потужності і напруги

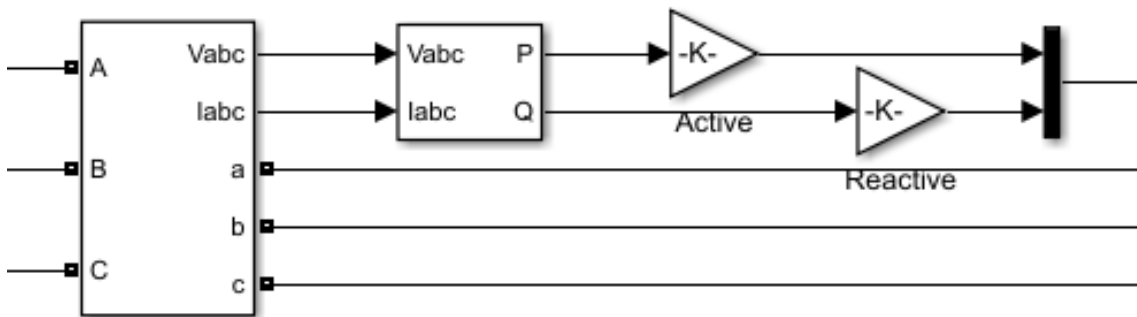


Рисунок 14.22. Блок вимірювання режимних параметрів для ділянок схеми

Приклади розташування вимірювальних блоків з моніторами для вузлів і ділянок на рис.14.23. Для ділянок умовно передбачено початок і кінець.

Для ділянки 5-6 складі двох паралельних ліній можна вчинити наступним чином: параметрами в кінці слугуватимуть параметри вузла, а для початку вивести сумарні показники по потоку потужностей. Оскільки параметри повздовжніх і поперечних опорів однакові, потоки та втрати потужності можна розділити навпіл, рис.14.24.

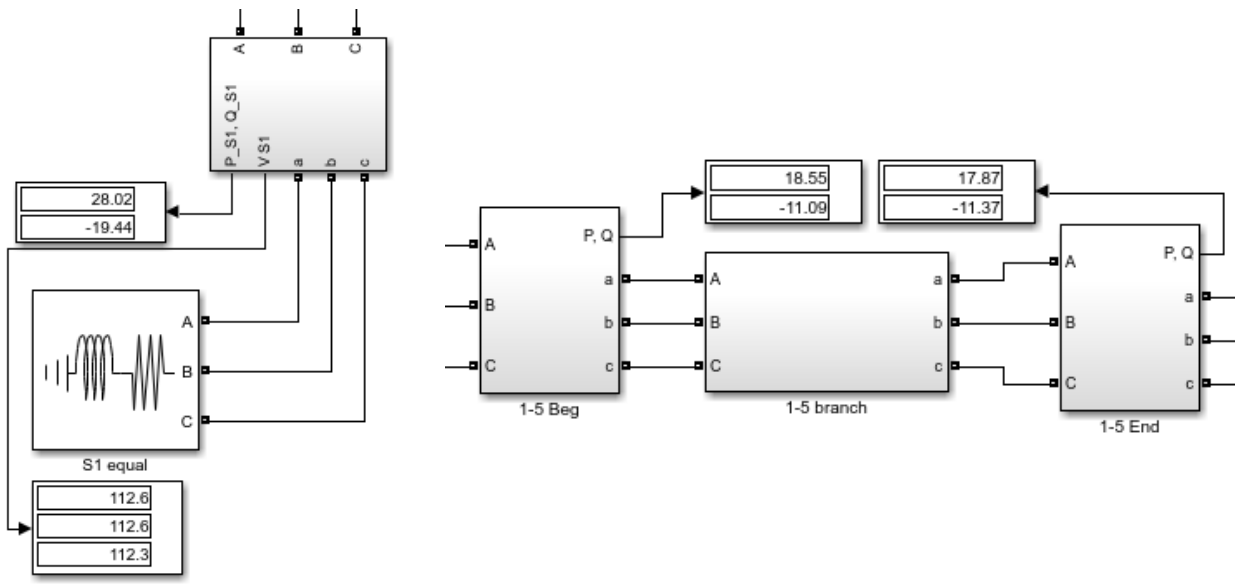


Рисунок 14.23. Розташування вимірювальних блоків на місцях

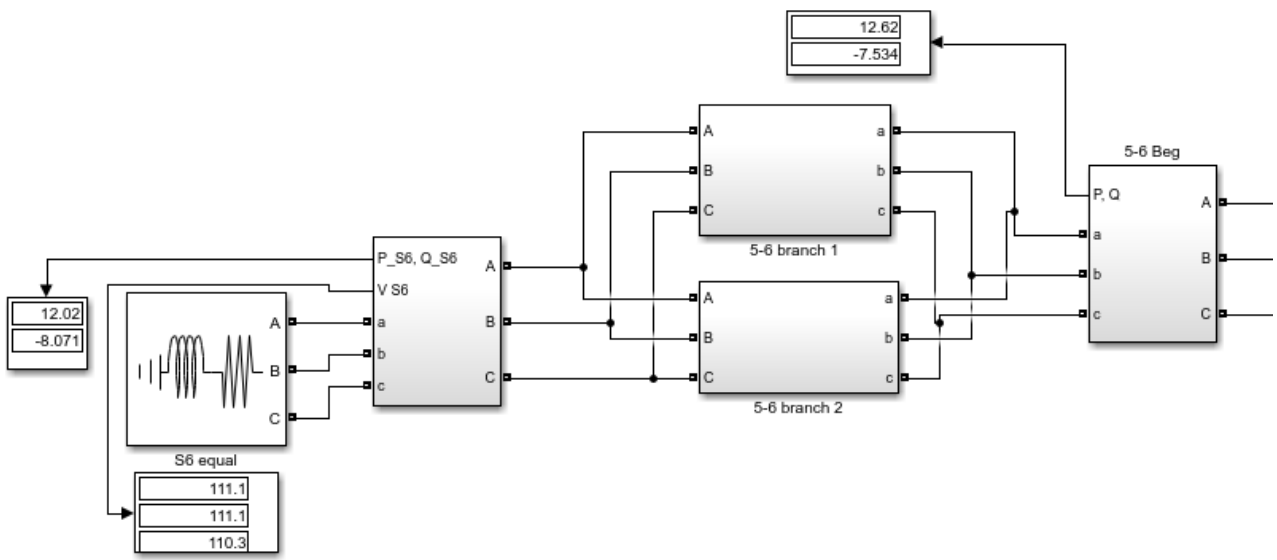


Рисунок 14.24. Організація вимірювань на ділянці 5-6

Схему зібрано, вимірювачі розташовано. Потрібно зняти показники. Подвійним натисканням на «PowerGui», в графі «Тип симуляції» ставиться «Векторний» (Phasor), частота – 50 Гц, рис.14.25.

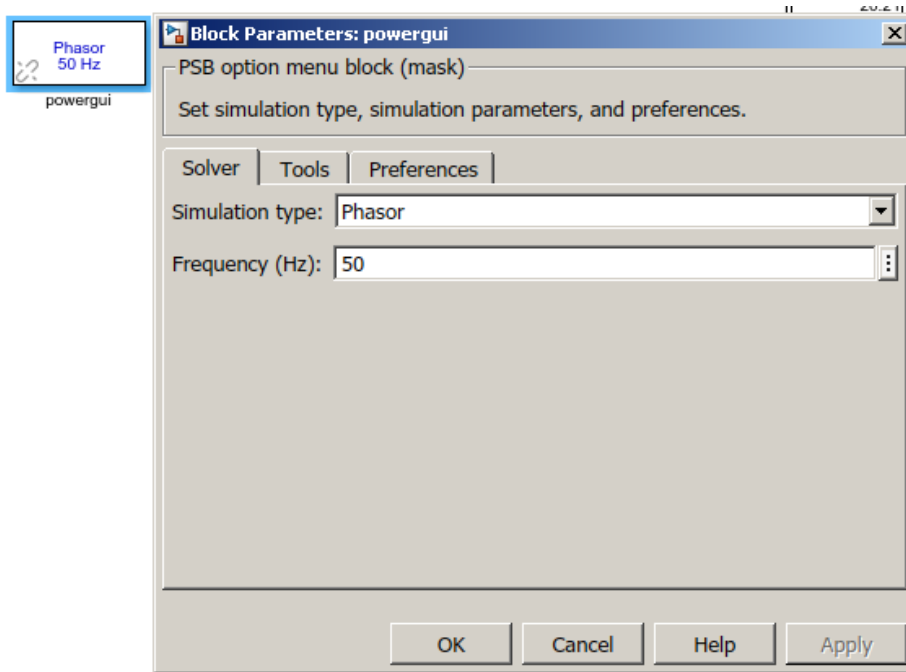


Рисунок 14.25. PowerGui. Блок керування електротехнічними розрахунками

Для здійснення моделювання, у блоці PowerGui натискається вкладка «Інструментарій», після чого натискається клавіша «Потік потужності», рис.14.26.

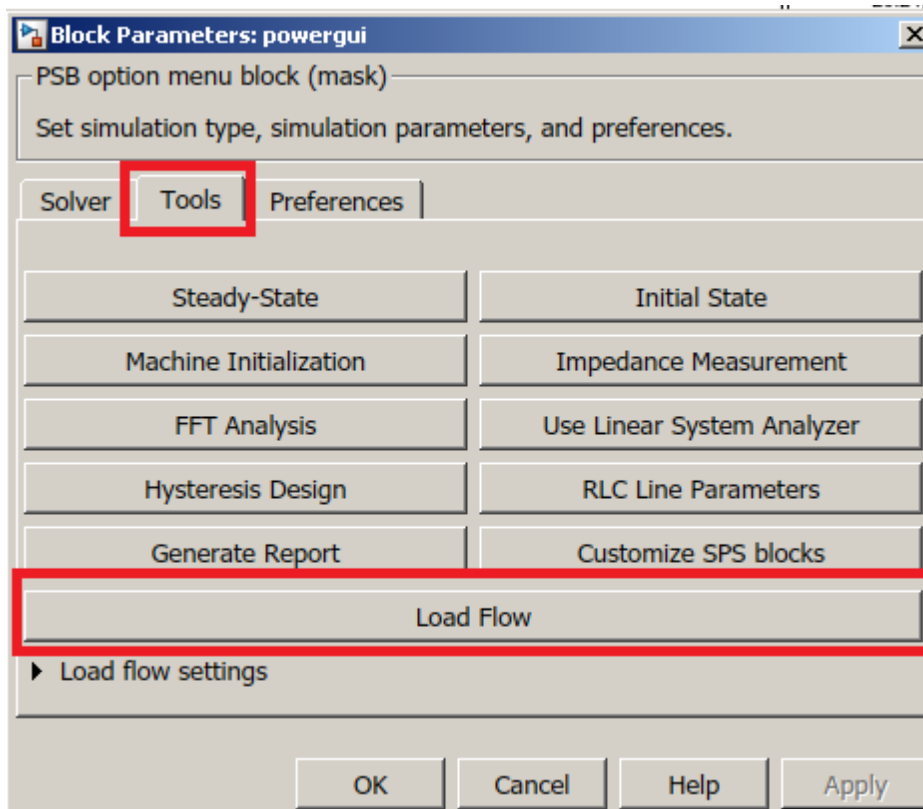


Рисунок 14.26. PowerGui. Запуск моделювання

Після відкриття діалогового вікна інструментарію обчислення потоку потужності, потрібно натиснути «Обчислити», рис.14.27.

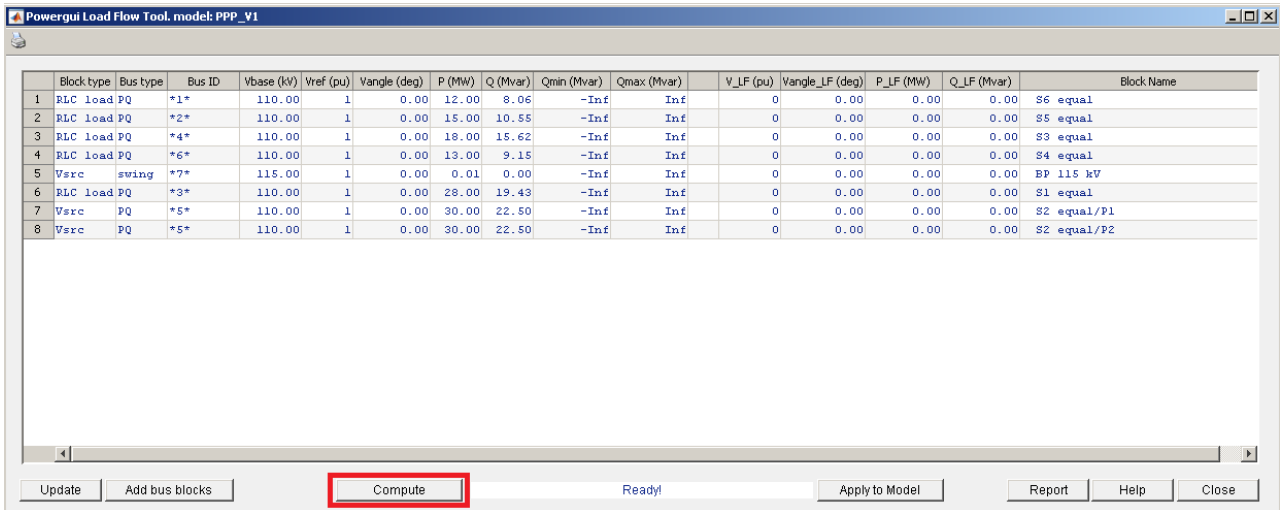


Рисунок 14.27. PowerGui. Потоки потужності

І після отримання розрахунків обрати «Застосувати для моделі», рис.14.28. Буде обчислено та застосовано поправочні коефіцієнти для рівнів напруги пунктів, аби за відхилення рівня напруги пункту від номінального споживалася виключно задана потужність. Саме отримання такої корекції і показано на рис.14.28.

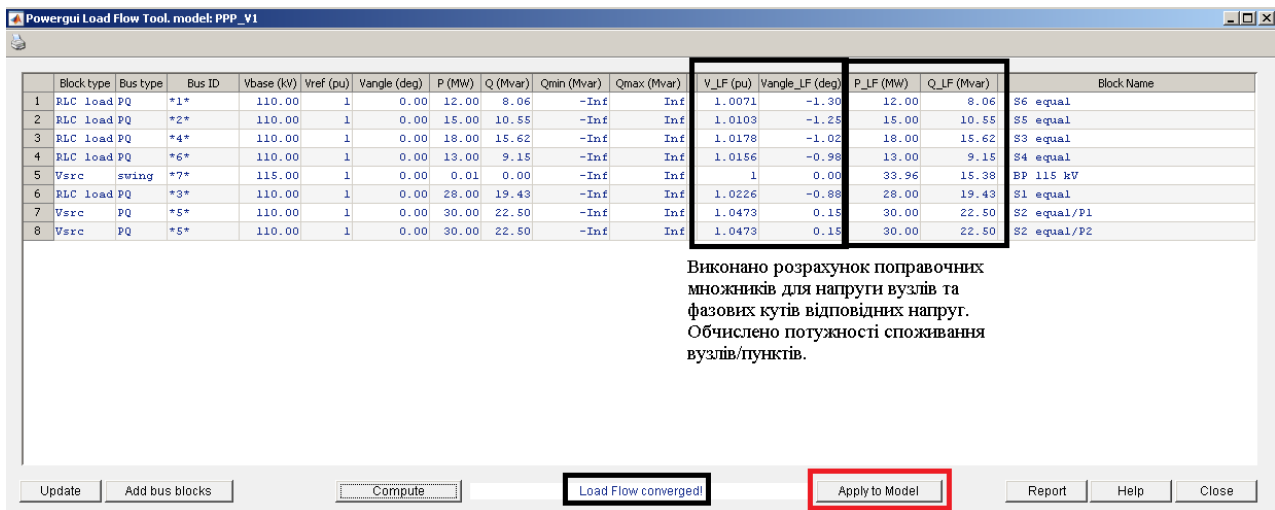


Рисунок 14.28. Корегувальні коефіцієнти для рівнів напруги пунктів

Після отримання корегувальних коефіцієнтів даний інструментарій закривається і вже на панелі інструментів робочого файлу безпосередньо запускається моделювання режиму роботи. Секунди часу більш ніж достатньо, рис.14.29.

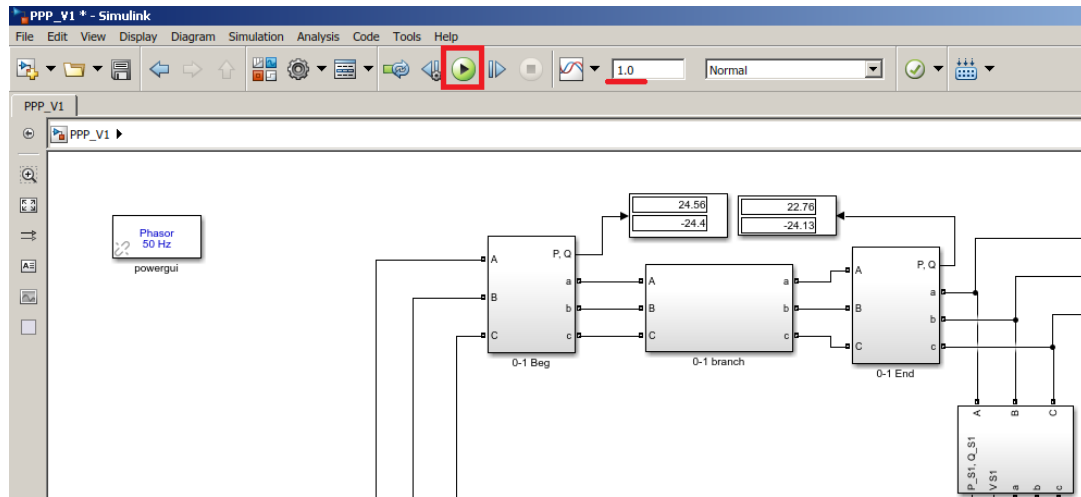


Рисунок 14.29. Запуск моделювання з робочого середовища MatLab

На рис. 14.30, 14.31 та 14.32 показано зразки результатів моделювання, починаючи з параметрів кількох пунктів та завершуючи параметрами ділянок.

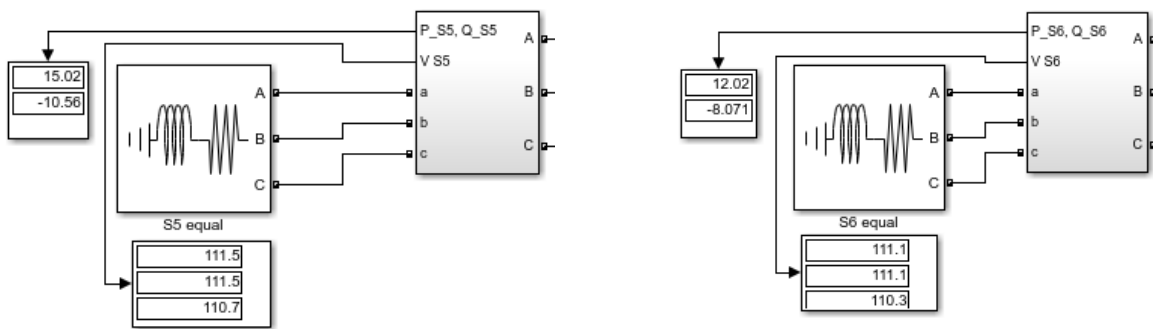


Рисунок 14.30. Параметри пунктів 5 та 6 для зразка

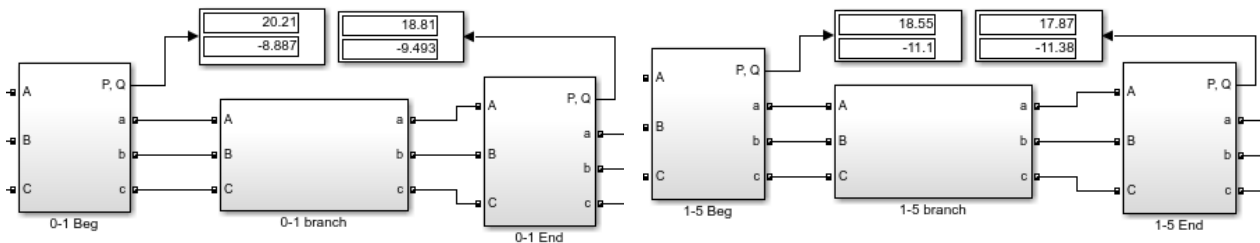


Рисунок 14.31. Параметри ділянок 0-1 та 1-5 для зразка

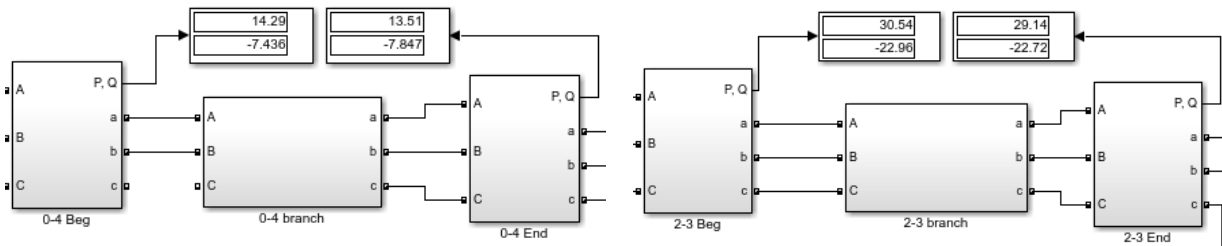


Рисунок 14.31. Параметри ділянок 0-4 та 2-3 для зразка

Індивідуальне завдання

Використовуючи схему мережі з індивідуального завдання теми №7, зібрати її в програмному середовищі MatLab.

Використовуючи вже отримані в параметри схеми заміщення електричної мережі в індивідуальному завданні теми №7, ввести їх де це необхідно для моделювання даної мережі в програмному середовищі MatLab.

Виконати моделювання, отримати навантаження пунктів, рівні напруги пунктів, потоки потужності початків та кінців ділянок. Обчислити сумарні втрати потужності.

Тема №15

ДОСЛІДЖЕННЯ РЕЖИМІВ ПАРАЛЕЛЬНОЇ РОБОТИ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи: побудова та моделювання режиму роботи двохтрансформаторної підстанції, визначення оптимальної величини завантаження групи з двох паралельно працюючих трансформаторів.

Теоретичні положення

Низьковольтні підстанції бувають одно- та двохтрансформаторними. Останні отримують живлення від різних розподільчих пристроїв або різних секцій шин розподільчих пристроїв високої напруги. Секційні вимикачі розподільних пристроїв низької напруги двохтрансформаторних підстанцій зазвичай вимкнені для зниження струмів КЗ. Однак не рідкісним є випадки, коли на підстанціях два або більше встановлених трансформаторів повинні працювати паралельно. З метою правильного розподілу навантаження між паралельно працюючими трансформаторами пропорційно їх номінальним потужностям мають виконуватися умови:

- рівність номінальних первинних та вторинних напруг,
- тотожність груп з'єднання обмоток;
- рівність напруг КЗ в блоці паралельно працюючих трансформаторів.

При недотриманні цих умов в обмотках трансформаторів виникають зрівнювальні струми, які особливо при неспівпадінні груп з'єднання обмоток, можуть досягти і навіть перевищити значення струму КЗ. Недотримання лише третьої умови призводить до непропорційного розподілу загального навантаження між трансформаторами по відношенню до їх номінальних потужностей. Рекомендується співвідношення номінальних потужностей паралельно працюючих трансформаторів не більше 3:1.

На трансформаторних підстанціях може бути встановлено кілька паралельно працюючих трансформаторів, зазвичай два трансформатори:

- за умовами забезпечення надійності електропостачання шляхом резервування;
- за необхідності розширення та розбудови підстанції;
- для зменшення втрат при малих навантаженнях шляхом відключення частини паралельно працюючих трансформаторів.

Типова двохтрансформаторна підстанція представлена на рис.15.1.

Сумарні втрати потужності в силовому трансформаторі складаються з втрат холостого ходу та втрат навантажувальних. Оптимальний режим роботи двохтрансформаторних підстанцій повинен підтримуватись шляхом зміни кількості працюючих трансформаторів виходячи з мінімуму сумарних втрат потужності в трансформаторах. Оптимальний коефіцієнт завантаження, β , визначається шляхом побудови графіку залежності сумарних втрат потужності

в трансформаторах від коефіцієнта завантаження трансформаторів. Це дасть змогу графо-аналітично отримати точку перетину кривих сумарних втрат активної потужності одно- та двохтрансформаторного режиму роботи однієї й тієї ж самої підстанції при зміні навантаження споживання.

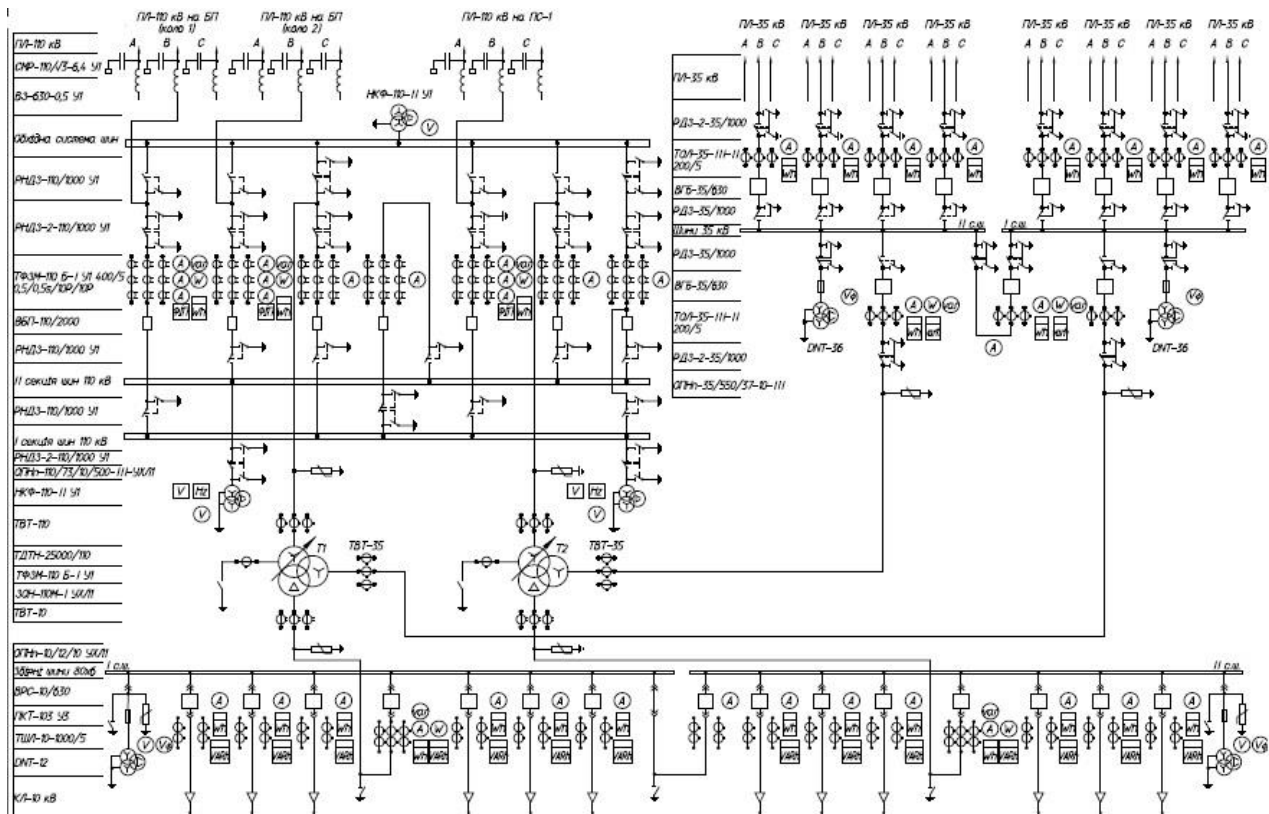


Рисунок 15.1. Двохтрансформаторна підстанція 10/35/10

З точки зору математики, для визначення оптимального коефіцієнту завантаження, розраховується так звана критична потужність навантаження для підстанцій. Якщо дійсний рівень навантаження буде нижчим за цю потужність, то один із трансформаторів вимикається. Критична потужність розраховується:

- для двохобмоткового трансформатора

$$S_{BH} \leq \sqrt{2 \frac{\Delta P_{X.X}}{\Delta P_{K.3}}} \cdot S_T \quad (15.1)$$

- для трьохобмоткового трансформатора

$$(S_{BH})^2 + (S_{CH})^2 + (S_{HH})^2 \leq 4 \frac{\Delta P_{X.X}}{\Delta P_{K.3}} \cdot S_T^2 \quad (15.2)$$

де S_T – номінальна потужність одного з двох паралельно працюючих трансформаторів, МВА,

$S_{ВН}$, $S_{СН}$ та $S_{НН}$ – модуль повної потужності навантаження сторін ВН, СН та НН відповідно, МВА,

$\Delta P_{х.х.}$ та $\Delta P_{к.з.}$ – паспортні дані, втрати потужності холостого ходу та короткого замикання відповідно, кВт.

З (15.1) та (15.2) випливає, що оптимальний коефіцієнт завантаження має місце при рівності втрат холостого ходу та втрат навантажувальних.

Практична частина

Визначимо оптимальний коефіцієнт завантаження блоку з двох паралельно працюючих трансформаторів 120/25 кВ 47 МВА кожен, узятих зі схеми з [web\(fullfile\(docroot, 'physmod/sps/examples.html?category=renewable-energy-relib&s_tid=CRUX_topnav'\)\)](http://web(fullfile(docroot, 'physmod/sps/examples.html?category=renewable-energy-relib&s_tid=CRUX_topnav')), параметри схеми заміщення якого розраховувалися в практичній частині заняття №13.

Розташуємо поруч блок з двох паралельно працюючих трансформаторів 2×47 МВА та одиничний трансформатор 47 МВА. Через кожні 0,5 с до шин сторони НН буде підключатись навантаження 2 МВА, $\cos(\varphi)=0,5$. До блоку з двох паралельно працюючих трансформаторів і до одиничного трансформатора буде підключено однакову кількість споживачів, а саме $1,5 \cdot 47/2=36$ (округлено в більшу сторону). Обирається за потужністю одиничного трансформатора, тут 1,5 вказує на 50% перевантаження.

На стороні ВН вимірюватиметься активна потужність, на стороні НН вимірюватиметься повна потужність, від активної потужності на стороні ВН відніматиметься активна потужність споживання на стороні НН, і дана процедура здійснюватиметься для блоку 2×47 МВА та одиничного 47 МВА трансформатора.

Втрати потужності в блоці та в одиничному трансформаторі а також повна потужність споживання на стороні НН виводитиметься на осцилограф.

Точка перетину графіків втрат потужності в одному та в двох трансформаторах визначить оптимальне завантаження, а паралельно з цим і потужність споживання. Можна було б використати осцилограф [X-Y], але нажаль він може спрацювати через раз і таким чином може не дозволити виконати роботу.

Джерелом живлення слугуватиме генератор з тієї ж самої схеми, що і трансформатор, [web\(fullfile\(docroot, 'physmod/sps/examples.html?category=renewable-energy-relib&s_tid=CRUX_topnav'\)\)](http://web(fullfile(docroot, 'physmod/sps/examples.html?category=renewable-energy-relib&s_tid=CRUX_topnav')), з параметрами рис.15.2.

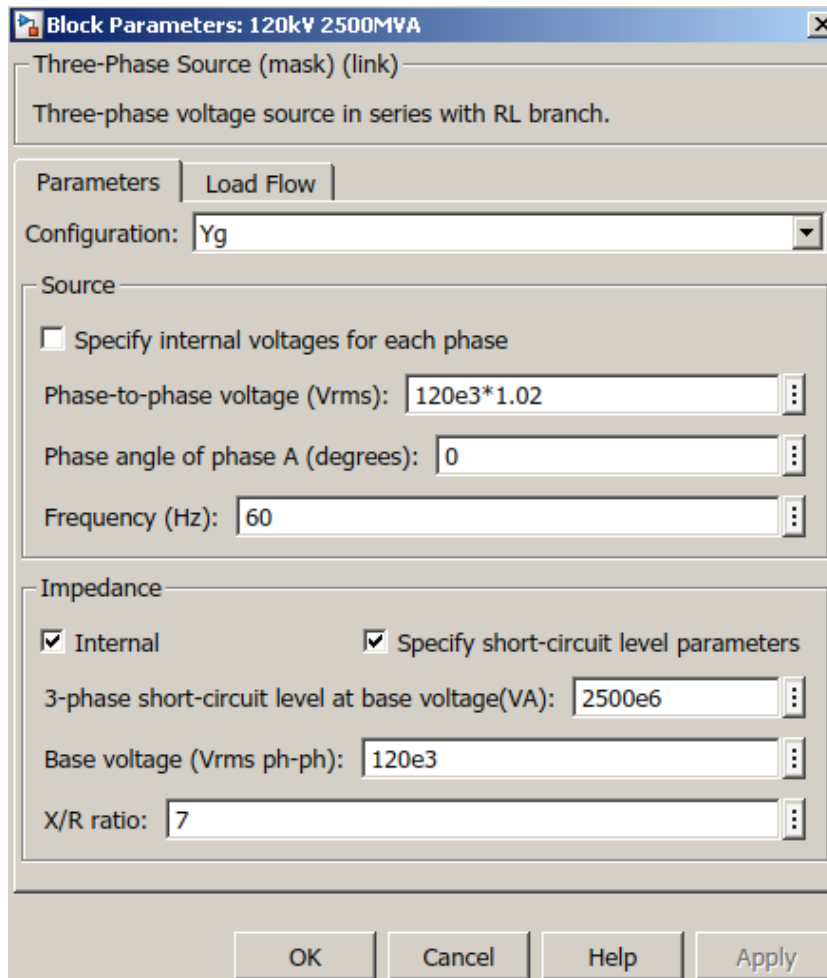


Рисунок 15.2. Джерело 2500 МВА 120 кВ

Стосовно параметрів трансформатора, то до вторинної напруги додамо +5% регулювальних можливостей, а решту залишимо без змін, рис. 15.3.

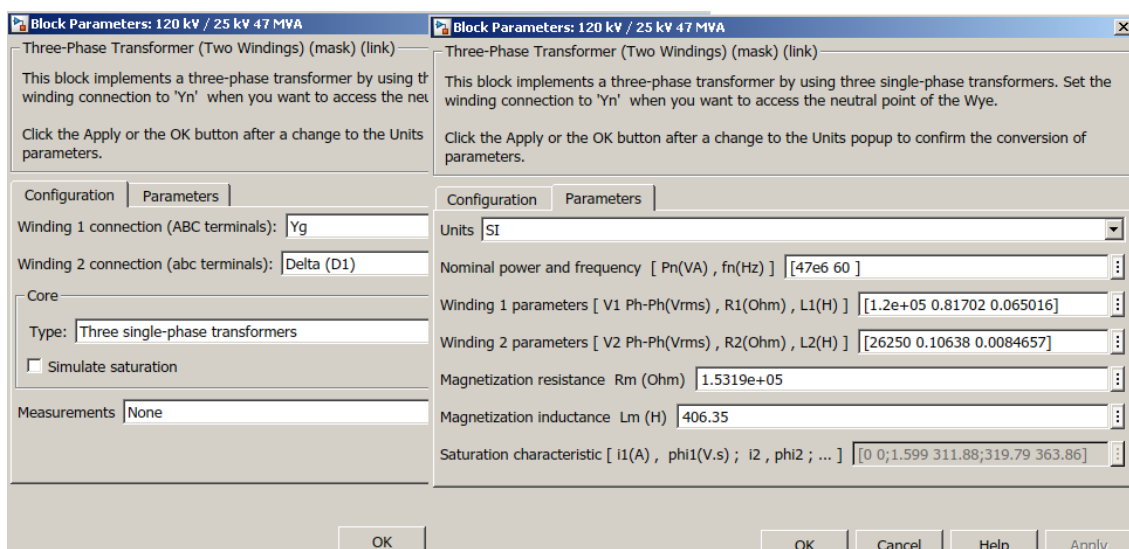


Рисунок 15.3. Трансформатор 47 МВА 120/25 кВ

Параметри пунктів навантаження, рис.15.4

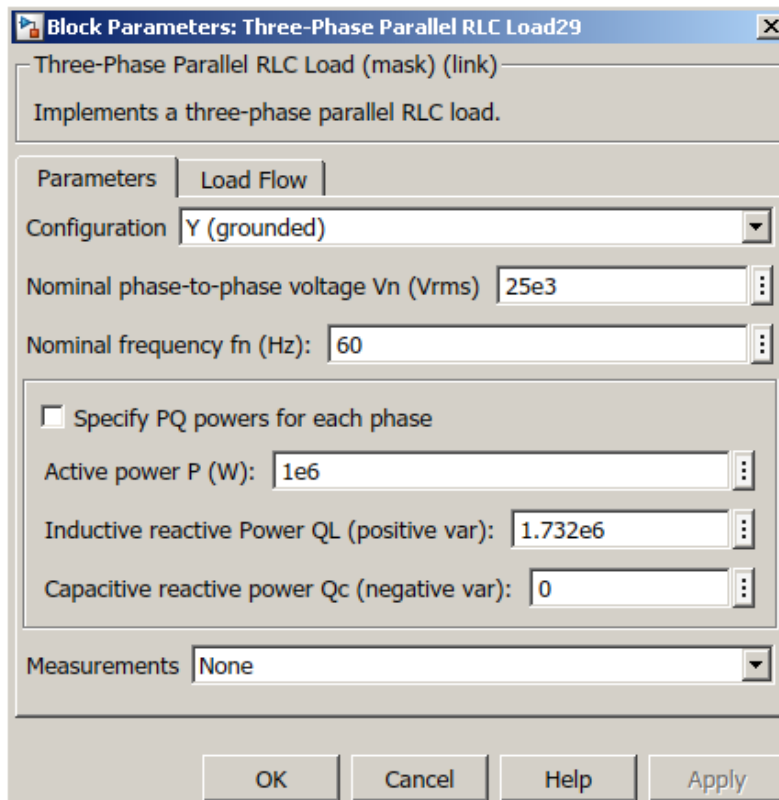


Рисунок 15.4. Навантаження

У трифазних вимикачах обирається опція External, тобто керування ззовні, початковий стан вимикача – 0, тобто відкритий і для його закриття на командний вхід потрібно подати 1. Цим займається блок Константи, який весь час видаватиме сигнал 1.

Трифазні вимикачі на високій стороні трансформатора спрацьовують одразу із запуском моделі, трифазні вимикачі на низькій стороні трансформатора спрацьовують через 1 с після запуску моделі. Кожне наступне навантаження вмикається через 0,5 с. Для реалізації поступового вмикання навантаження використовується блок [Off Delay], з параметрами, представленими на рис.15.5. З параметрами блоку потрібно бути уважними, інакше він спрацює неправильно.

На рис.15.6 показано зібрану схему. Навантаження, рис. 15.7, та вимірювачі, рис.15.8 зібрано у підсистему.

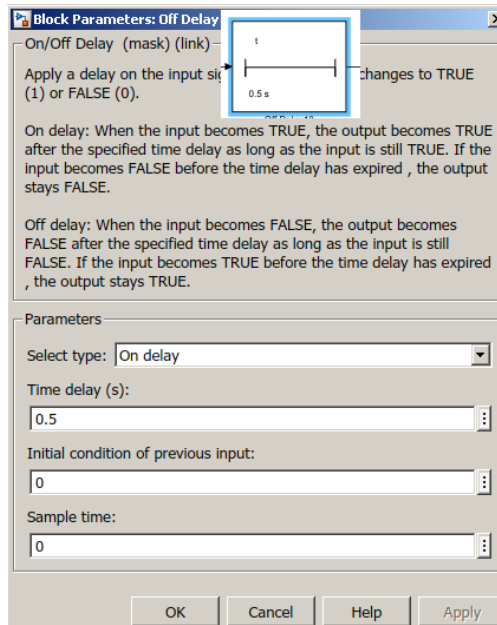


Рисунок 15.5. Блок часової затримки

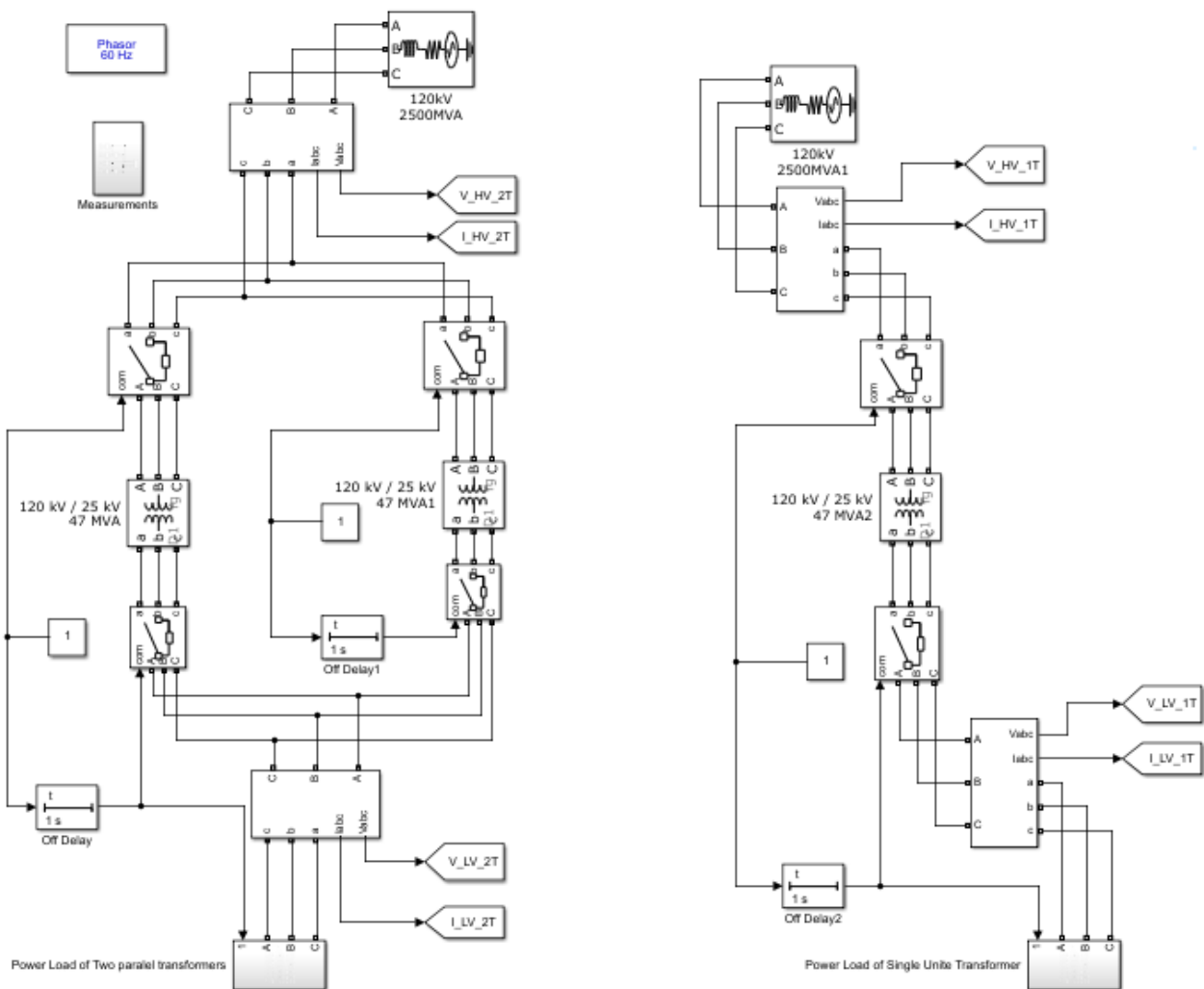


Рисунок 15.6. Схема для дослідів в загальному вигляді

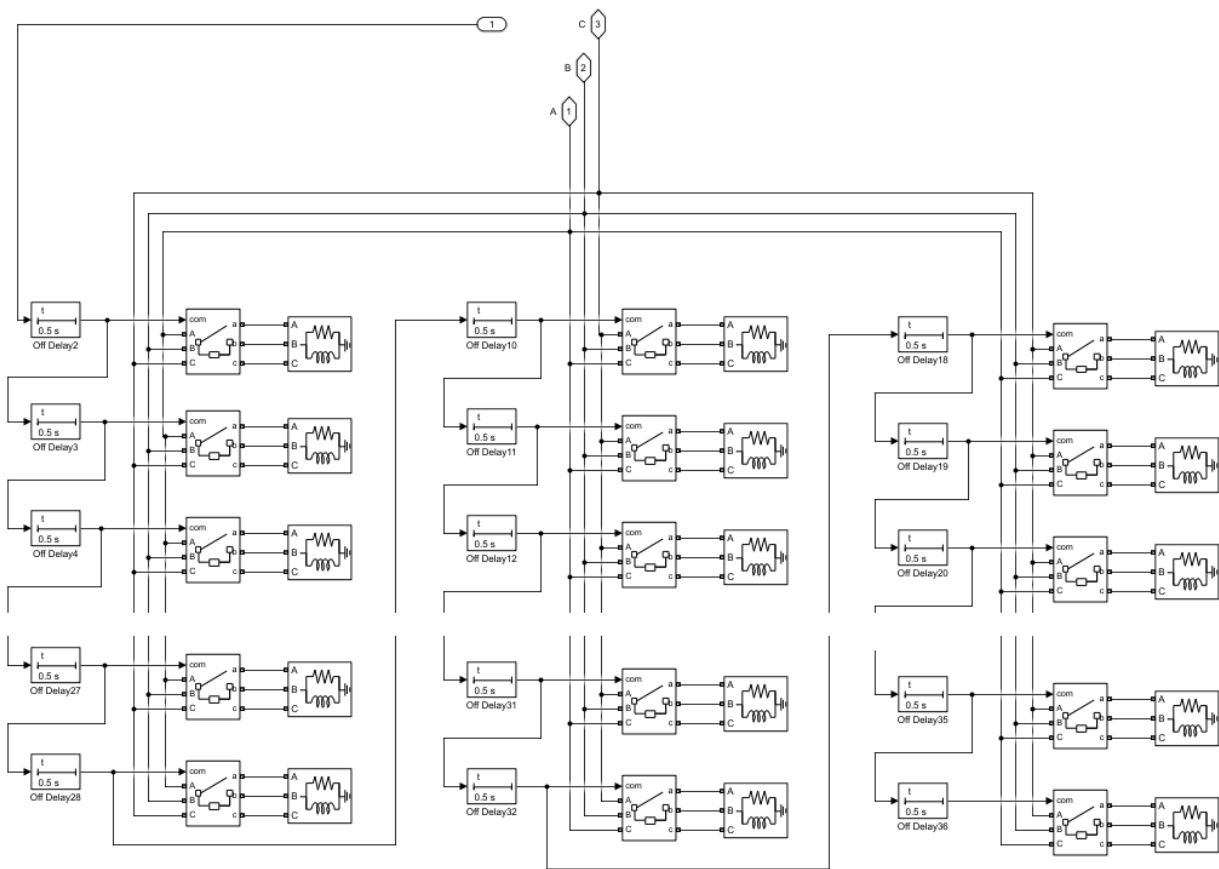


Рисунок 15.7. Навантаження

Для двох паралельно працюючих трансформаторів

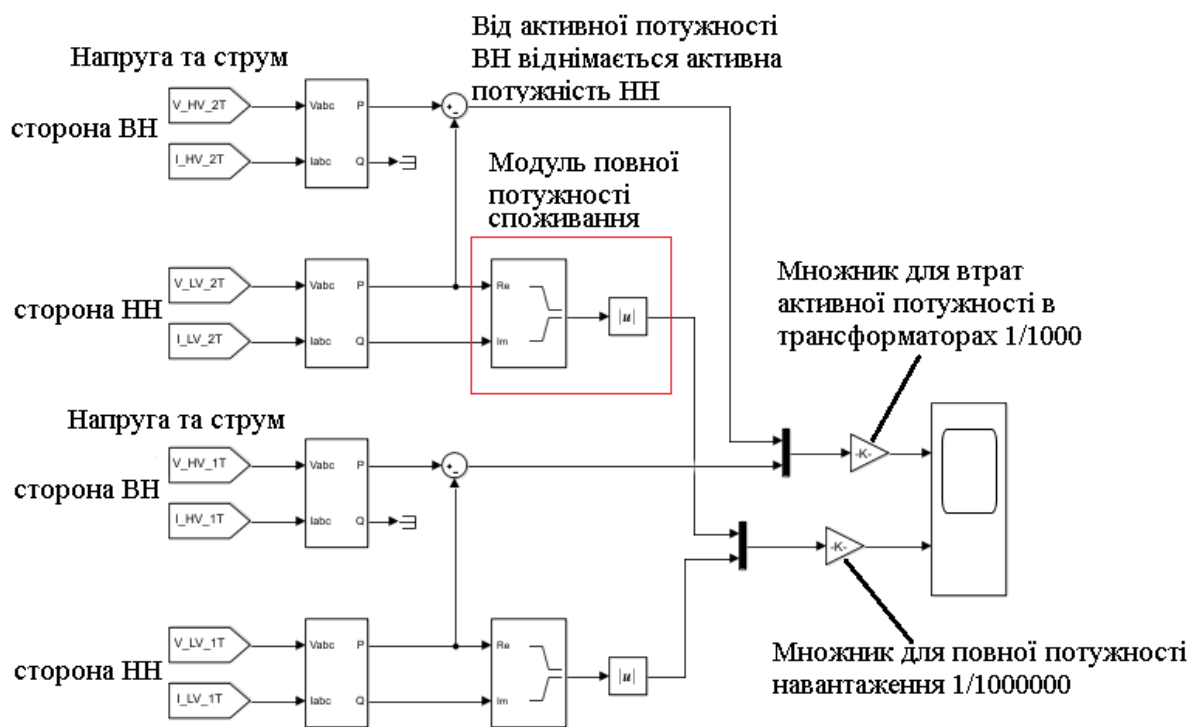


Рисунок 15.8. Вимірювання

В контрольному блоці PowerGui обирається векторне моделювання, Phasor, з частотою 60 Гц, оскільки генератор та трансформатор прийшли зі схеми з частотою 60 Гц і цей же рівень частоти стоїть за замовчуванням в усіх блоках. Запускається моделювання: час 20 с, та модуль розв'язку ode23t (ode23tb).

На рис.15.9 показано осцилограму схеми для дослідів, в загальному вигляді. Одразу видно точку перетину графіку $\Delta P_{x.x.} + \beta^2 \cdot \Delta P_{k.z.}$ для одиничного трансформатора і блоку з двох паралельно працюючих трансформаторів.

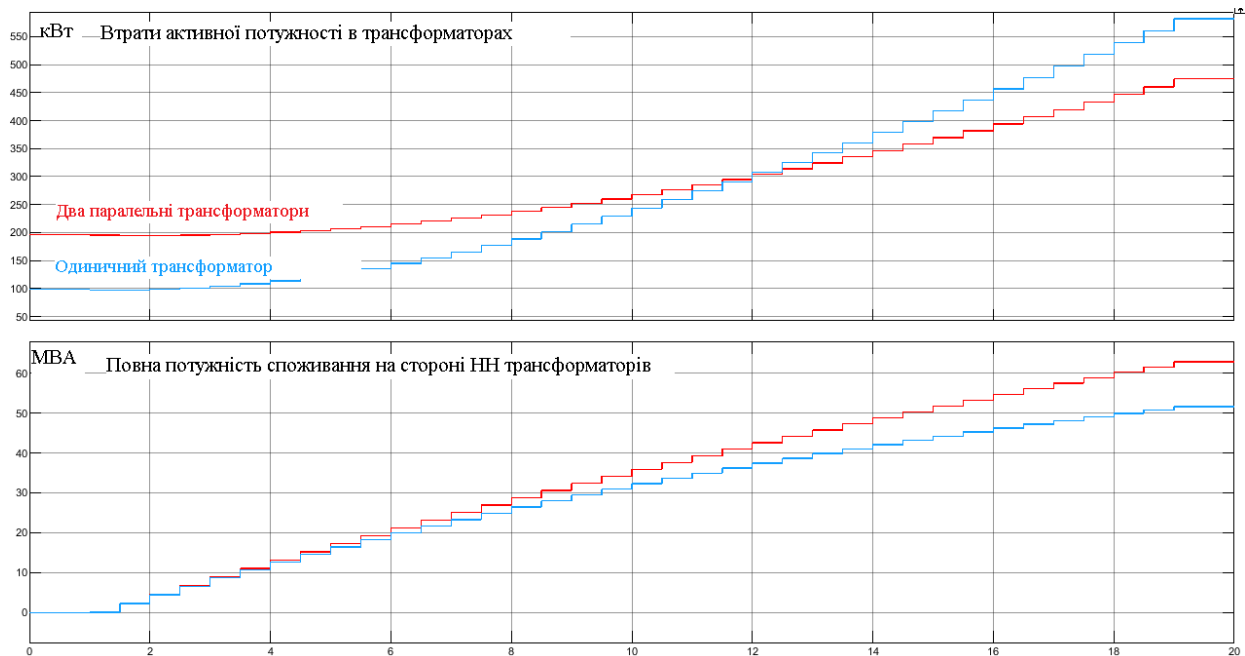


Рисунок 15.9. Осцилограма втрат активної потужності та повної потужності споживання

Спочатку виміряємо втрати холостого ходу та порівняємо з розрахунковою величиною з практичної частини заняття №13. Вимірювання проводитимуться у момент запуску моделювання, $t=0$. Як показали результати, рис.15.10, для одиничного і двох паралельно працюючих в блоці трансформаторів, втрати холостого ходу склали 98,4 кВт і 196,8 кВт відповідно. Розрахункова величина втрат холостого ходу становила 94 кВт.

З осцилограми, вручну по пікових стрибках проведемо відрізки прямих. Для графіків втрат потужності визначимо точку перетину, з якої опустимо перпендикуляр до повної потужності навантаження сторони НН для одиничного трансформатора, рис.15.11. Втрати потужності становлять 300 кВт, оптимальна величина навантаження становить 37 МВА.

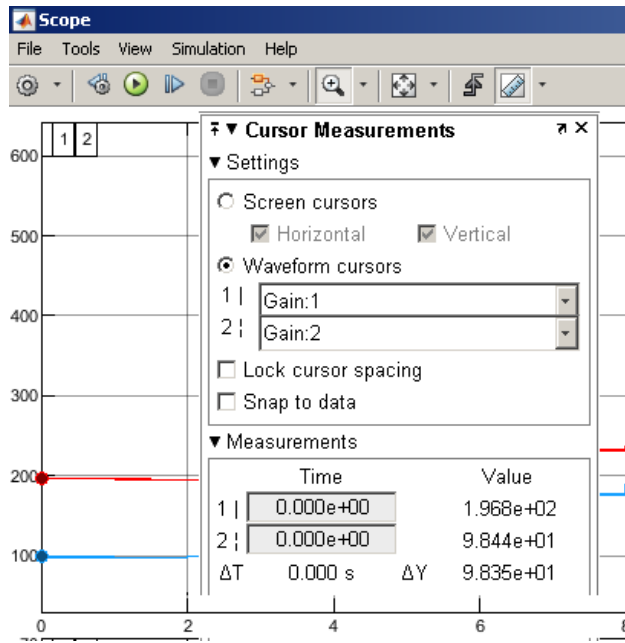


Рисунок 15.10. Втрати холостого ходу

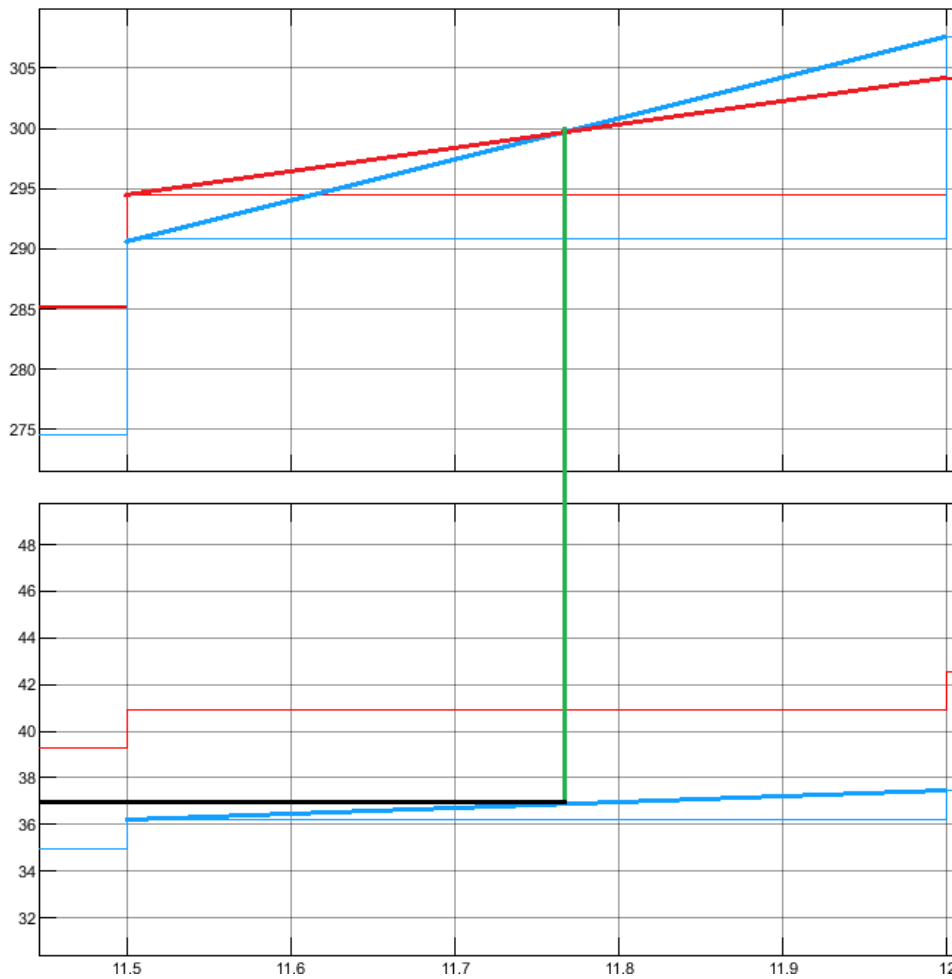


Рисунок 15.11. Рівність втрат потужності та оптимальна потужність навантаження

Таким чином, оптимальний коефіцієнт завантаження, за якого приймається рішення про вмикання/вимикання другого трансформатора в блоці становить:

$$\beta_{\text{ОПТ граф}} = \frac{S_{\text{ОПТ граф}}}{S_T} = \frac{37}{47} = 0,787$$

З використанням отриманих результатів розрахунку паспортних даних із практичної частини заняття №13, $\Delta P_{x.x.} = 94$ кВт, $\Delta P_{к.з.} = 250,6$ кВт, оптимальний коефіцієнт завантаження становить:

$$\beta_{\text{ОПТ}} = \sqrt{\frac{\Delta P_{x.x.}}{\Delta P_{к.з.}}} = \frac{94}{250,6} = 0,612$$

що відповідає оптимальній потужності

$$S_{\text{ОПТ}} = \beta_{\text{ОПТ}} \cdot S_T = 0,612 \cdot 47 = 28,79 \text{ (МВА)}.$$

Залишилося оцінити похибку, але це буде залишено на самостійне опрацювання при виконанні індивідуального завдання.

Індивідуальне завдання

Для силових трансформаторів, представлених в табл.15.1 – 15.3 визначити оптимальний коефіцієнт завантаження $\beta_{\text{ОПТ}}$ та оптимальну потужність навантаження блоку з двох паралельно працюючих трансформаторів. В загальному вигляді схему представлено на рис.15.12.

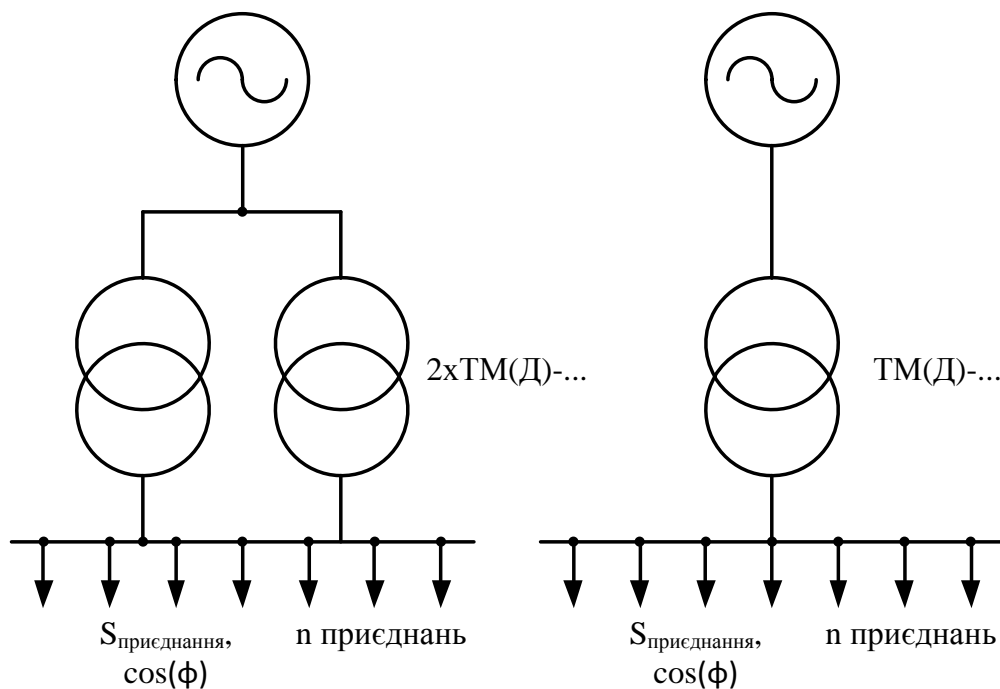


Рисунок 15.12. Загальний вигляд схеми для дослідів

Розрахунок оптимального коефіцієнту завантаження $\beta_{\text{опт}}$ здійснити графічно, через побудову осцилограми втрат активної потужності в трансформаторах, та аналітично, з використанням паспортних даних трансформаторів. Порівняти отримані цими обома способами величини $\beta_{\text{опт}}$, оцінити похибку та зробити висновки.

Перелік варіантів з типом трансформатору для досліду, кількістю приєднань споживачів, модулем повної потужності одиничного приєднання та коефіцієнта потужності приєднання наведено в табл.15.4. Варіант задається викладачем.

Таблиця 15.1. Силві двохобмоткові трансформатори 10 кВ

Тип	$S_{\text{НОМ}}$, кВА	$U_{\text{ВН}}$, кВ	$U_{\text{НН}}$, кВ	Втрати $\Delta P_{\text{х.х.}}$, кВт	Втрати $\Delta P_{\text{к.з.}}$, кВт	Напруга к.з., %	Струм х.х.,%
ТМ-630/10	630	11	0,4	1,05	7,6	5,5	1,6
ТМ-1000/10	1000	11	0,4	1,55	10,8	5,5	1,2
ТМ-1600/10	1600	11	0,4	2,1	16,5	6,0	1,0
ТМ-2500/10	2500	11	0,4	3,35	26,3	6,0	0,8

Таблиця 15.2. Силві двохобмоткові трансформатори 35 кВ

Тип	$S_{\text{НОМ}}$, кВА	$U_{\text{ВН}}$, кВ	$U_{\text{НН}}$, кВ	Втрати $\Delta P_{\text{х.х.}}$, кВт	Втрати $\Delta P_{\text{к.з.}}$, кВт	Напруга к.з., %	Струм х.х.,%
ТМН-1000/35	1000	35	11	2,1	11,6	6,5	1,4
ТМН-1600/35	1600	35	11	2,9	16,5	6,5	1,3
ТМН-2500/35	2500	35	11	3,9	23,5	6,5	1,0
ТМН-4000/35	4000	35	11	5,6	33,5	7,5	0,9
ТМН-6300/35	6300	35	11	8,0	46,5	7,5	0,8

Таблиця 15.3. Силві двохобмоткові трансформатори 110 кВ

Тип	$S_{\text{НОМ}}$, кВА	$U_{\text{ВН}}$, кВ	$U_{\text{НН}}$, кВ	Втрати х.х., кВт	Втрати к.з., кВт	Напруга к.з., %	Струм х.х.,%
ТМН-2500/110	2500	110	11,0	5,5	22	10,5	1,5
ТМН-6300/110	6300	115	11,0	11,5	44	10,5	0,8
ТДН-10000/110	10000	115	11,0	14	60	10,5	0,7
ТДН-16000/110	16000	115	11,0	19	85	10,5	0,7
ТРДН-25000/110	25000	115	10,5	27	120	10,5	0,7

Таблиця 15.4. Вихідні дані по трансформаторам і навантаженню

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип	ТМН-2500/35	ТРДН-25000/110	ТМ-1600/10	ТРДН-25000/110	ТМ-1600/10	ТМН-2500/35	ТМН-2500/110	ТМН-6300/35	ТМН-6300/35	ТМ-1000/10
Кількість приедн.	14	14	16	16	20	14	16	16	16	12
S приеднання, кВА	270	2700	150	2400	120	270	240	590	600	125
cos(φ)	0,88	0,79	0,79	0,93	0,75	0,81	0,82	0,8	0,86	0,95

Таблиця 15.4. Продовження

Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип	ТМ-2500/10	ТДН-16000/110	ТДН-10000/110	ТДН-10000/110	ТМН-1600/35	ТМН-1000/35	ТМН-1000/35	ТМН-6300/110	ТМН-6300/110	ТМ-1000/10
Кількість приедн.	18	16	22	18	20	14	20	18	14	14
S приеднання, кВА	210	1500	680	850	120	110	75	525	675	110
cos(φ)	0,93	0,93	0,78	0,89	0,75	0,91	0,74	0,75	0,96	0,95

Таблиця 15.4. Завершення

Варіант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Тип	ТРДН-25000/110	ТМН-2500/110	ТРДН-25000/110	ТМН-4000/35	ТМ-630/10	ТМ-630/10	ТМН-1000/35	ТМ-2500/10	ТДН-10000/110	ТМН-2500/110
Кількість приедн.	20	14	16	18	22	16	12	18	12	12
S приеднання, кВА	1875	270	2400	340	45	60	125	210	1375	312
cos(φ)	0,91	0,92	0,92	0,87	0,8	0,77	0,78	0,91	0,76	0,93

Тема №16

МОДЕЛЮВАННЯ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ СТРУМУ ТА НАПРУГИ. ВИЗНАЧЕННЯ РЕЖИМНИХ ПАРАМЕТРІВ ЗА ДОПОМОГОЮ ВИМІРЮВАЛЬНИХ ТРАНСФОРМАТОРІВ

Мета роботи: моделювання вимірювальних трансформаторів; визначення параметрів схеми заміщення вимірювальних трансформаторів; визначення режимних параметрів з використанням вимірювальних трансформаторів; оцінка похибки отриманих значень режимних параметрів за використання вимірювальних трансформаторів.

Теоретичні положення

Вимірювальні трансформатори струму та напруги слугують для здійснення гальванічної розв'язки між силовими колами та засобами вимірювання і релейного захисту, шляхом перетворення струмів навантаження та рівня номінальної напруги у еквівалентні, безпечні для роботи обслуговуючого персоналу та прийнятні, за величиною, для роботи вимірювальних засобів, релейного захисту та протиаварійної автоматики значення.

Типове значення струму вторинної сторони вимірювального трансформатора струму становить 5 А, рідше 1 А. Для вимірювального трансформатора напруги відповідна величина становить 100 В.

Трансформатор струму первинною обмоткою вмикається в розсічку лінії чи іншого струмоведучого провідника, а до вторинної обмотки підключаються струмові обмотки амперметрів, ватметрів, лічильників тощо. Якщо вторинна обмотка вимірювального трансформатора струму не використовується, то вона має бути закорочена. Режим холостого ходу для трансформатора струму є аварійним.

Трансформатор напруги первинною обмоткою підключається до шин відповідної сторони напруги, а до вторинної обмотки підключаються обмотки напруги вольтметрів, ватметрів, лічильників тощо. Вторинна обмотка трансформатора напруги має бути розімкнена або підключена до відносно великого опору, оскільки типовий режим роботи вимірювального трансформатора напруги є холостий хід.

На високій стороні вимірювальні трансформатори струму розташовуються в кожній фазі на кожному приєднанні лінії, на приєднанні трансформатора, на секційному вимикачі і на ремонтній перемичці, якщо її передбачено схемою РП. На низькій стороні вимірювальні трансформатори струму розташовуються в кожній фазі на кожному приєднанні лінії, на приєднанні трансформатора і на секційному вимикачі. Вимірювальні трансформатори напруги підключаються до шин кожної зі сторін напруги. Від вимірювальних трансформаторів живляться наступні типи вимірювальних приладів на підстанціях:

- Індикатори

- на приєднанні лінії 110 кВ – три амперметри на три фази, трифазний ватметр та трифазний варметр. Для прохідних підстанцій ватметр та варметр мають враховувати напрямок транзиту потоку потужності;

- на приєднанні трансформатора, сторона ВН 110 кВ – один амперметр в одній фазі;

- на шинах 110 кВ – один вольтметр для лінійної напруги;

- на приєднанні трансформатора, сторона СН 35 кВ – один амперметр в одній фазі, трифазний ватметр, трифазний варметр. Ватметр та варметр без врахування напрямку транзиту потоку потужності;

- на приєднанні лінії 35 кВ – один амперметр в одній фазі;

- на шинах 35 кВ – один вольтметр для вимірювання рівнів фазної напруги

- на приєднанні трансформатора, сторона НН 10 кВ – один амперметр в одній фазі, трифазний ватметр, трифазний варметр. Ватметр та варметр без врахування напрямку транзиту потоку потужності;

- на приєднанні лінії 10 кВ – амперметр в одній фазі;

- на шинах 10 кВ – один вольтметр для вимірювання рівнів фазної напруги, один вольтметр для лінійної напруги.

- Реєстратори

- на приєднанні лінії 110 кВ – фіксуєчий імпульсний прилад, або інший засіб пошуку місця пошкодження при короткому замиканні на лінії;

- на шинах 110 кВ – вольтметр для лінійної напруги та частотомір для вимірювання частоти в мережі;

- Інтегральні

- на приєднанні лінії 110 кВ – трифазний лічильник активної енергії;

- на приєднанні трансформатора, сторона СН 35 кВ – трифазний лічильник активної енергії, трифазний лічильник реактивної енергії;

- на приєднанні лінії 35 кВ – трифазний лічильник активної енергії;

- на приєднанні трансформатора, сторона НН 10 кВ – трифазний лічильник активної енергії, трифазний лічильник реактивної енергії;

- на приєднанні лінії 10 кВ – трифазний лічильник активної енергії, трифазний лічильник реактивної енергії;

Розташування вимірювальних приладів на сторонах підстанції зображено на рис. 16.1. Зразок підключення трансформаторів між собою та до приладів показано на рис.16.2.

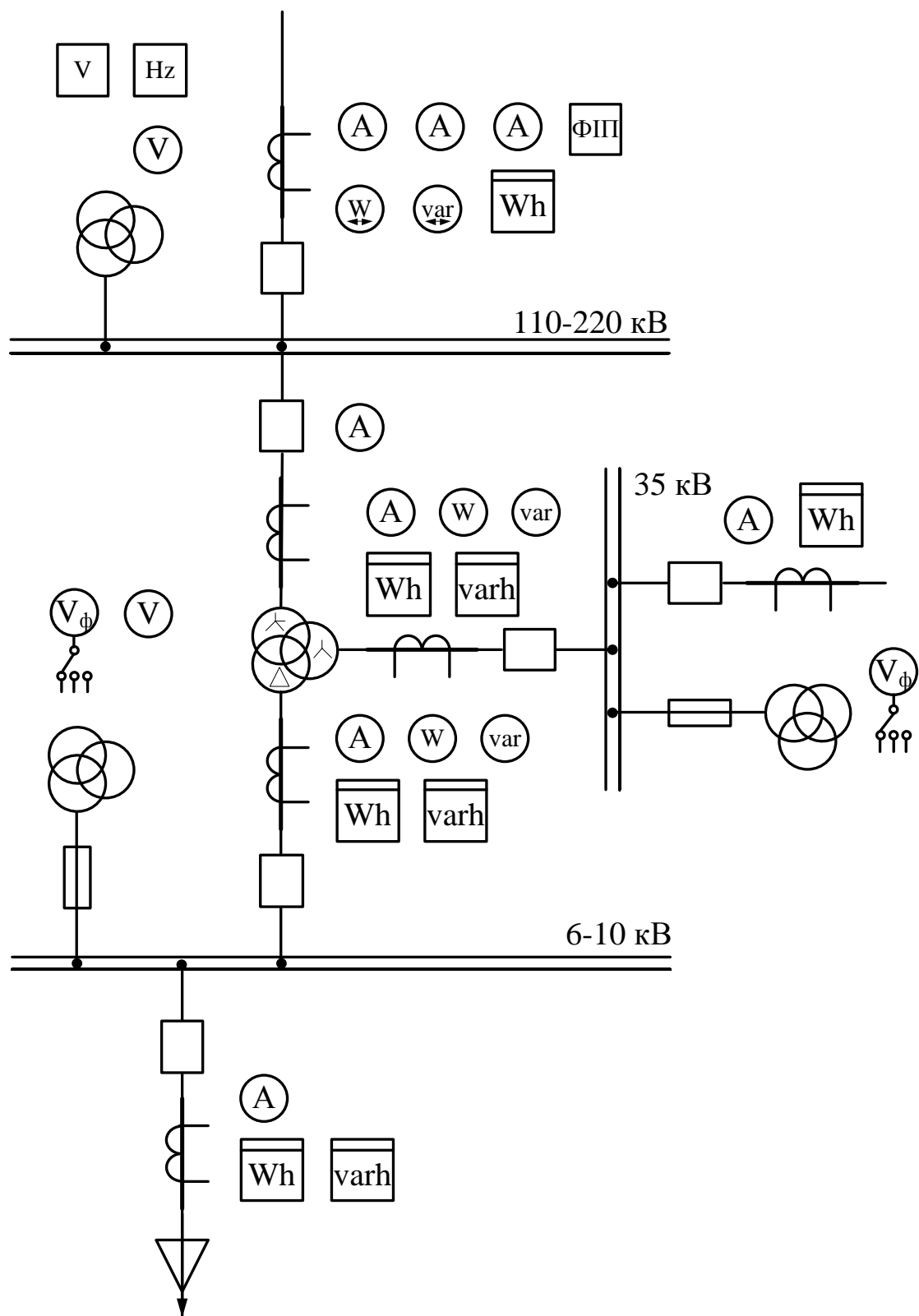


Рисунок 16.1. Вимірювальні прилади на підстанції

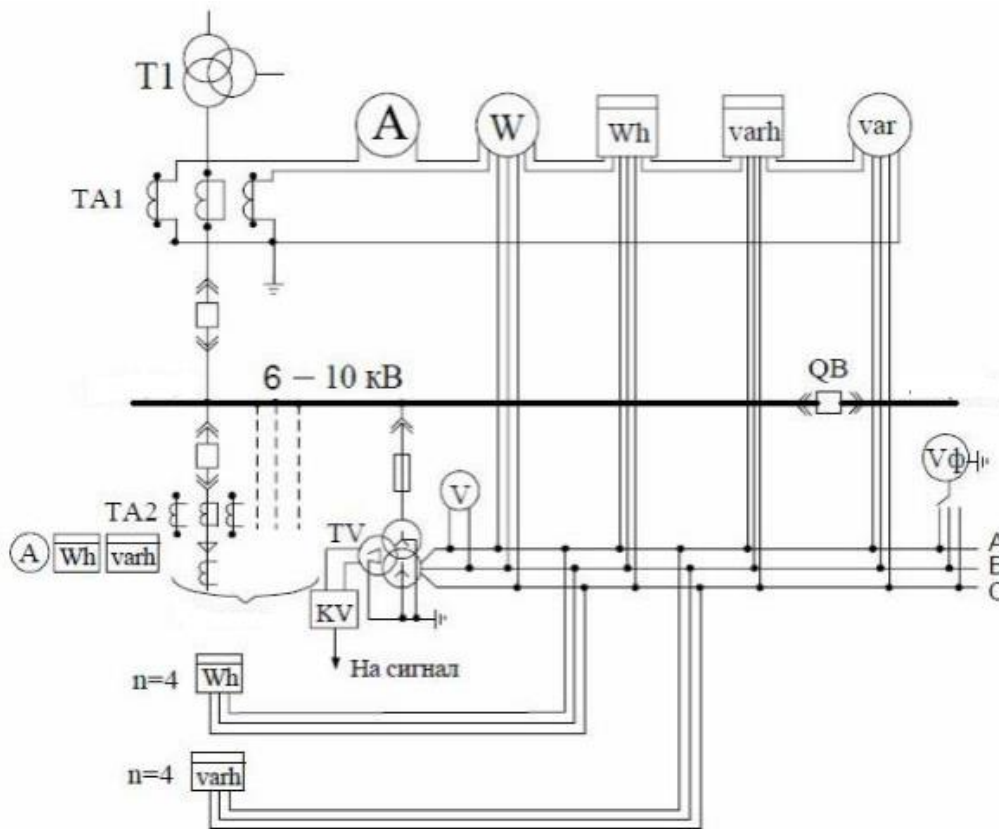


Рисунок 16.1. Підключення вимірювальних трансформаторів на стороні 10 кВ

З тематики моделювання вимірювальних трансформаторів в електричних мережах, варто розглянути в довіднику програмного комплексу MatLab за нижче наведеною адресою показано математичну модель дослідження явища насичення вимірювального трансформатора струму. Схему представлено на рис.16.3.

«web(fullfile(docroot, 'physmod/sps/examples.html?category=electrical-sources-and-elements&s_tid=CRUX_topnav'))». Схema належить до класу напруги 120 кВ, має потужність $3 \times 69,3$ МВА і являє собою однофазне виконання найпростішої системи генератор-споживач.

Вимірювальний трансформатор струму на схемі має позначення СТ 2000/5А 25 VA, що означає:

СТ – current transformer – вимірювальний трансформатор струму;

2000 А – номінальний первинний струм силового кола;

5 А – номінальний вторинний струм в колах вимірювачів та автоматики.

Стандартна величина;

25 VA – номінальна потужність вимірювального трансформатора у ВА.

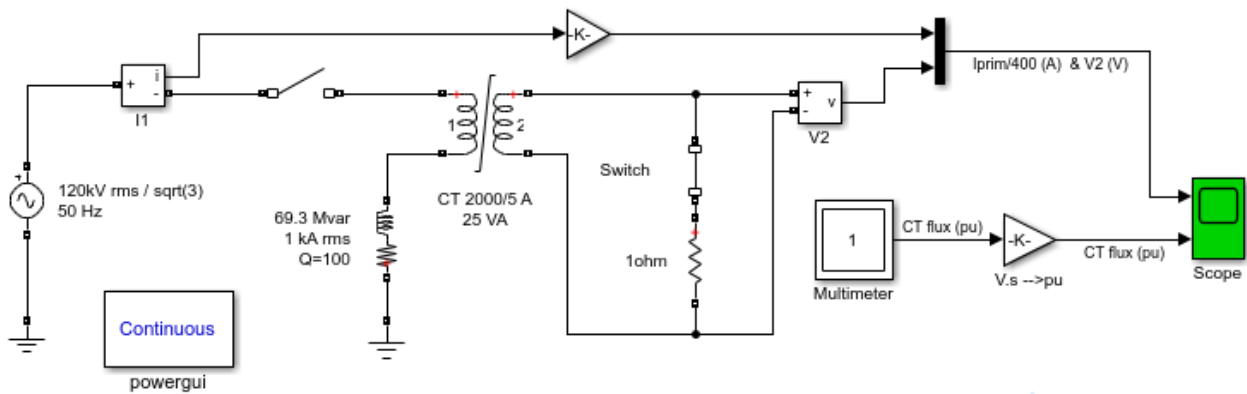


Рисунок 16.3. Схема моделювання явища насичення вимірювального трансформатора струму

Моделювання вимірювального трансформатора струму складніше по відношенню до трансформатора напруги. MatLab для моделювання трансформатора головним чином вимагає номінальну потужність, рівень первинної та вторинної напруги, і у випадку трансформатора напруги всі ці величини відомі. Первинна напруга – напруга мережі, де працюватиме трансформатор, вторинна напруга стандартна – 100 В, номінальна потужність отримується від сумарної потужності навантаження всіх вимірювальних обмоток напруги, в даній роботі обирається як найменше з можливих значень в технічних характеристиках. Так вимірювальний трансформатор напруги 110 кВ НКФ-110-II У1 має вже вказане значення рівня первинної напруги, 100 В рівень вторинної напруги і номінальну потужність 100 ВА для найвищого класу точності вимірювання 0,2, для цього трансформатора.

Постає задача розрахунку рівнів первинної та вторинної напруги – ВН та НН для моделювання вимірювального трансформатора струму. Розглянемо паспортні дані, вказані для трансформатора струму у схемі рис.16.3, показані на рис.16.4

Вимірювальний трансформатор струму має потужність 25 ВА та вторинний струм 5 А. Враховуючи, що $S = U_2 \cdot I_2 = 25 = U_2 \cdot 5$, то рівень напруги

НН становитиме $U_2 = \frac{S}{I_2} = \frac{25}{5} = 5(A)$. За коефіцієнту трансформації за струмом

$K_T = \frac{2000}{5}$, первинна напруга буде меншою за вторинну у K_T разів, тобто

$U_1 = \frac{U_2}{K_T} = 5 \cdot \frac{5}{2000} = 0,0125(B)$. Причому, на рис.16.4 рівень первинної напруги

показано саме у вигляді виразу, і скоріш за все, це зроблено навмисно.

Варто звернути увагу на величину опору, який приєднано до вторинної обмотки трансформатора струму, він становить 1 Ом. Вже було сказано, що вторинний струм у вимірювальних трансформаторів струму становить 5 А і вже

було розраховано рівень вторинної напруги, 5 В. Це означає, за законом Ома, що струм 5 А має спричинити спад напруги 5 В на деякому опорі:

$$R = \frac{U}{I} = \frac{5}{5} = 1(\text{Ом}).$$

Для трансформатора напруги, розрахункова величина опору, під'єданого до обмоток вторинної напруги обчислюватиметься:

$$S = 3 \cdot \frac{U_2^2}{R} = 3 \cdot \frac{100^2}{R} \quad (16.1)$$

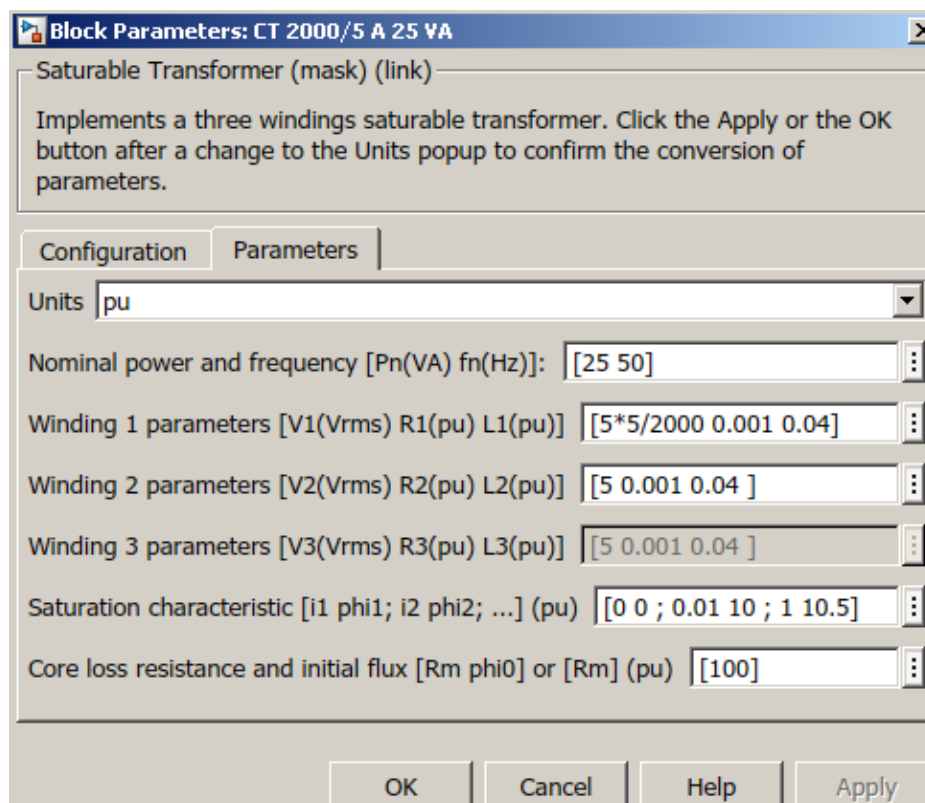


Рисунок 16.4. Паспортні дані трансформатора струму. Зразок

Практична частина

Порівняти режимні параметри, отримані при моделювання роботи найпростішої підстанції з використанням засобів вимірювання MatLab, вбудованих в саму схему та з використанням вимірювальних трансформаторів струму та напруги. Схема для досліду буде подібною до схеми з теми №15, але всі навантаження буде під'єднано одночасно.

Параметри джерела живлення представлено на рис.16.5, трансформатор 47 МВА 120/25 кВ має параметри, вказані на рис.16.6. На рис. 16.7 показані параметри одного з восьми приєднань. Повна потужність приєднання становить

5 МВА, таким чином повна потужність навантаження трансформатора становить 40 МВА.

Режимні параметри вимірюватимуться у трьох точках, будова блоку вимірювання режимних параметрів для цих точок буде однаковою. До складу блоку входить Трифазний вимірювач струму та напруги, математичний оператор обчислення модулю, множники для напруги, активної та реактивної потужності. Режимні параметри виводитимуться на дисплеї, підписані відповідним чином, до свого змісту. HV – High Voltage, висока напруга, рис.16.8.

Множники для отримання лінійної напруги в кВ, активної потужності в МВт і індуктивної за характером реактивної потужності в МВАр виведено на рис.16.9

Запуск моделювання здійснюється спочатку через PowerGui, обравши векторне моделювання Phasor, частота 60 Гц. Обравши вкладку Tools «Інструментарій», натискається «Потік потужності» Load Flow, рис.16.10. На рис.16.11 показано послідовність деяких дій, програмний засіб визначає поправки до номінальної напруги споживачів, аби потужність споживання відповідала заданій.

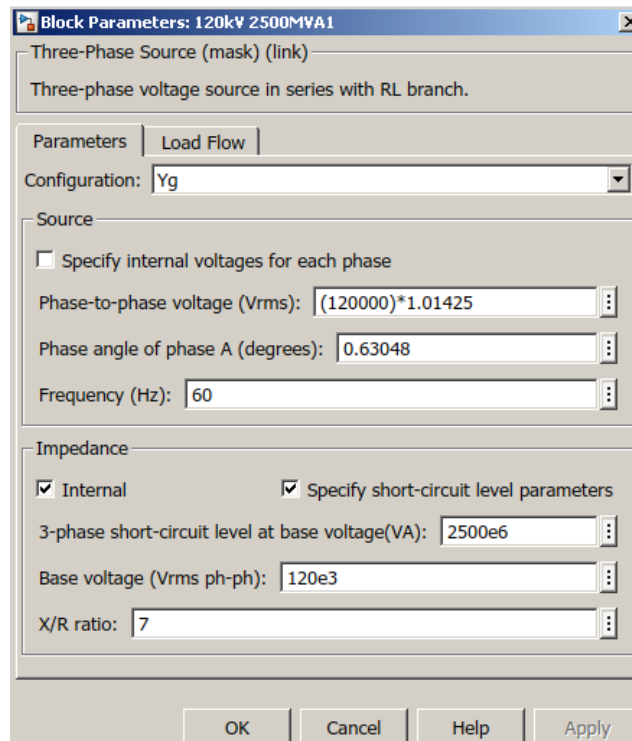


Рисунок 16.5. Джерело живлення схеми

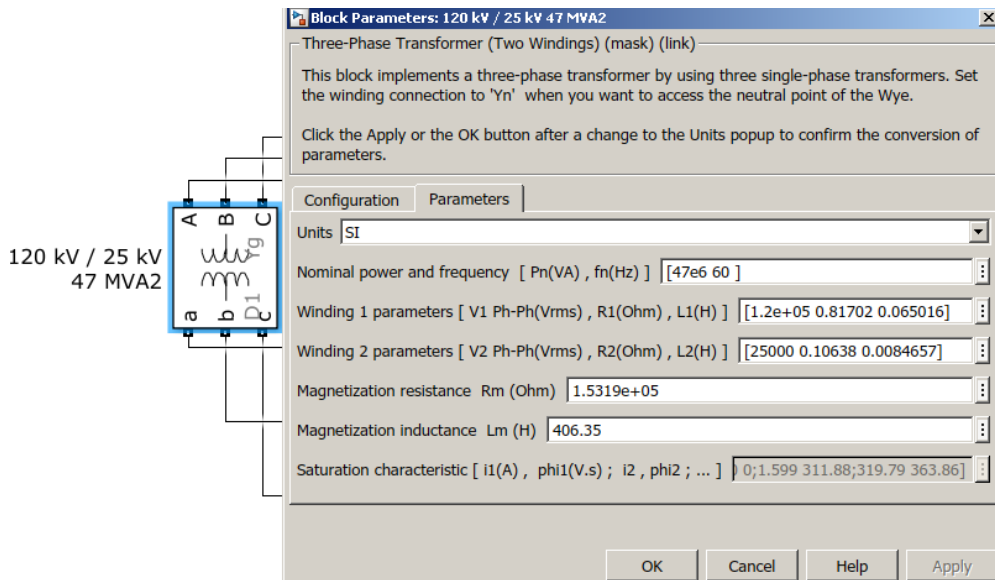


Рисунок 16.6. Силовий понижувальний двообмотковий трансформатор

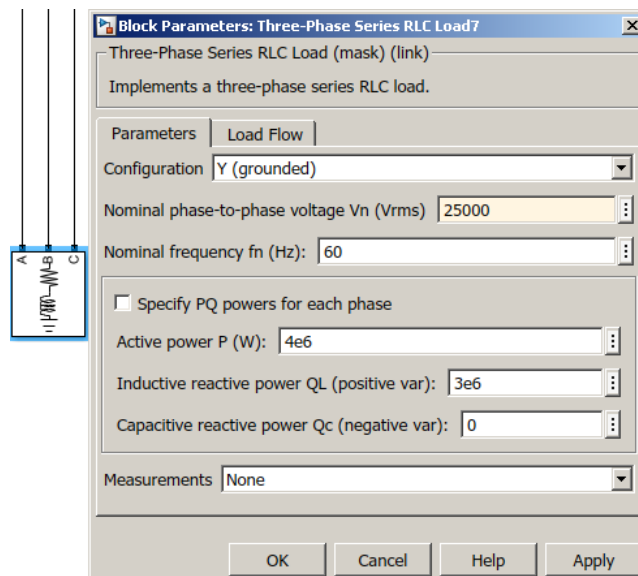


Рисунок 16.7. Параметри навантаження

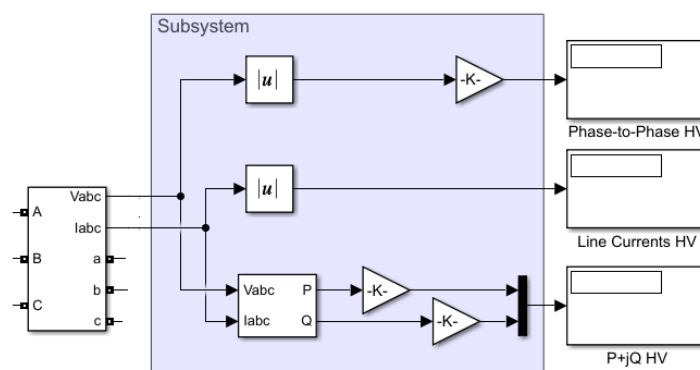


Рисунок 16.8. Вимірювальний блок

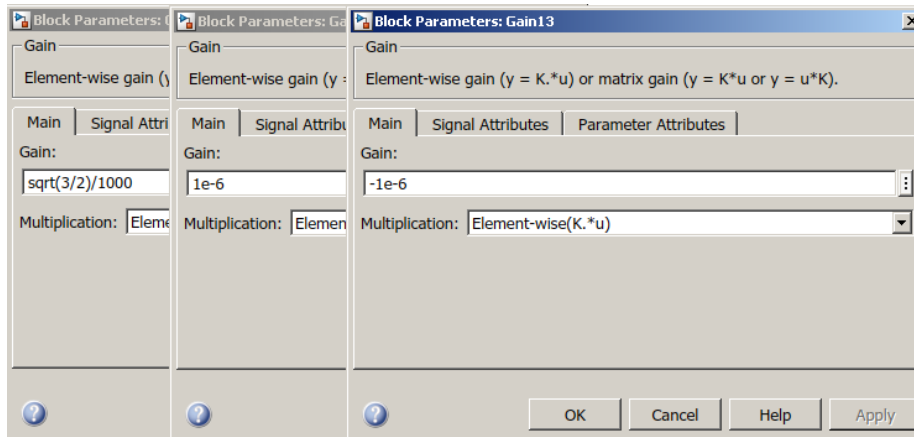


Рисунок 16.9. Множники виводу режимних параметрів

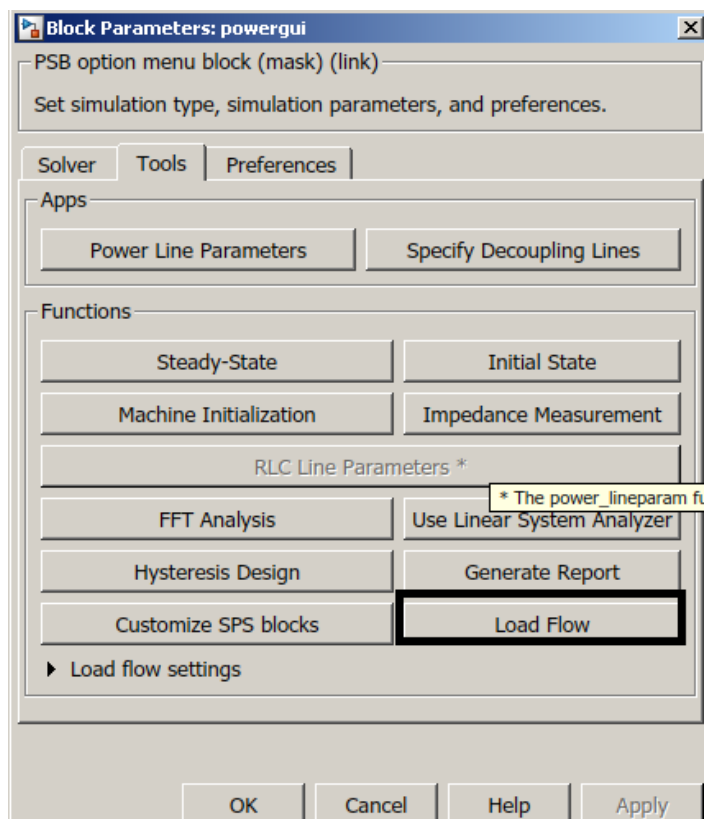


Рисунок 16.10. PowerGui, розрахунок потоків потужності

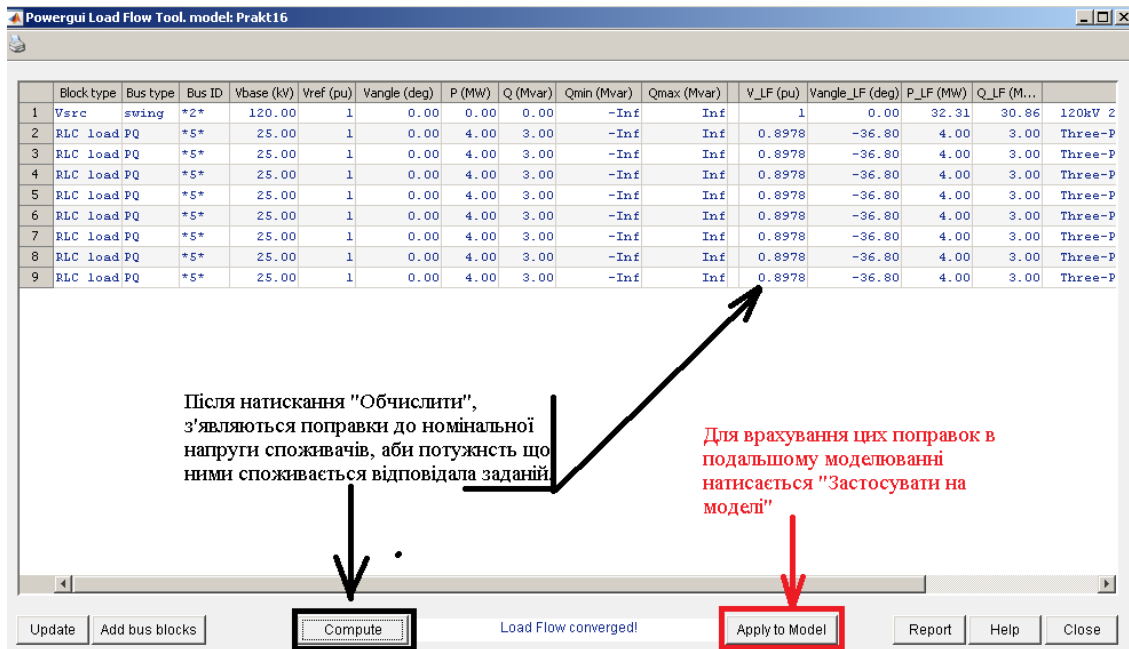


Рисунок 16.11 – PowerGui, поправки до рівня напруги споживачів

Блок PowerGui закривається, обирається модель розв'язку ode23t (ode23tb), часу моделювання 1 с достатньо. На рис.16.12 показано результати моделювання.

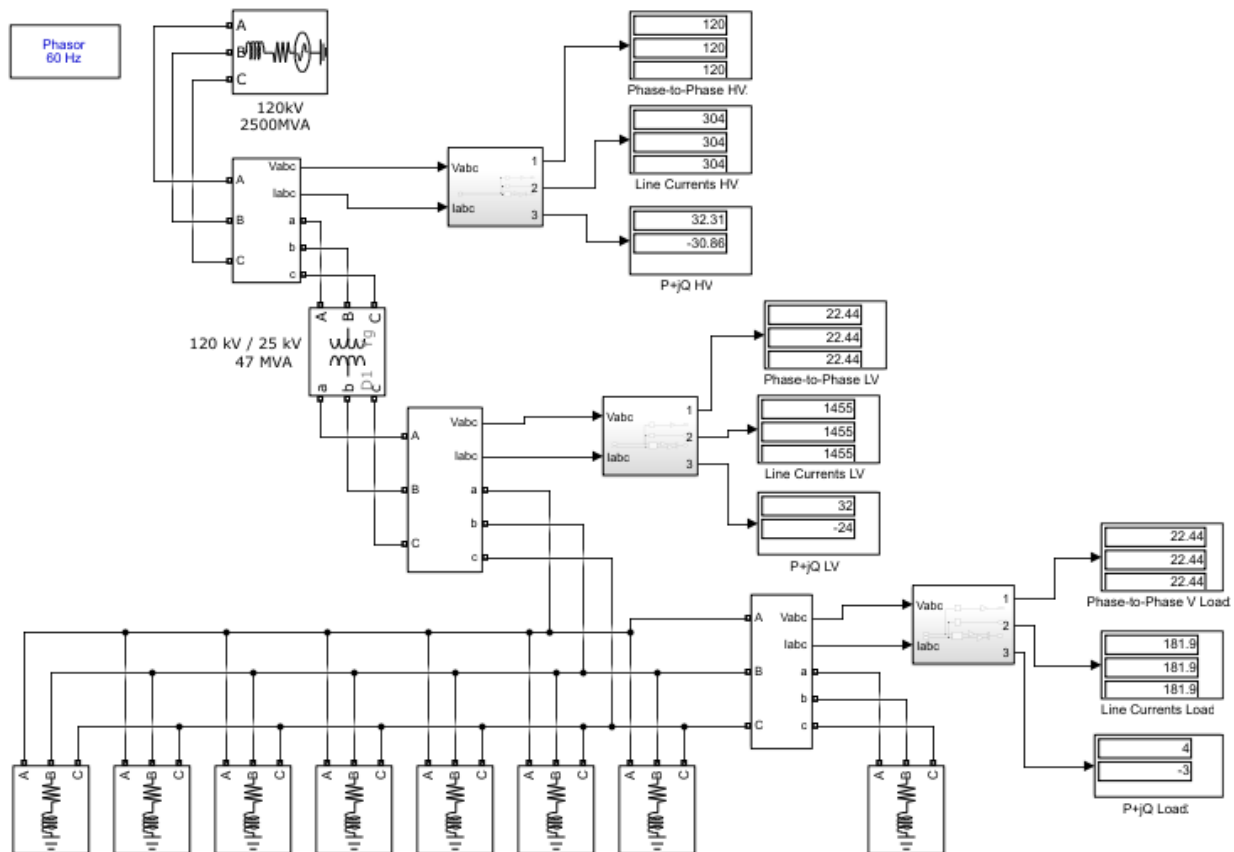


Рисунок 16.12. Режимні параметри. Рівні напруги, струми та потужність

Побудуємо поруч таку саму схему де за отримання результатів відповідатимуть вимірювальні трансформатори. Потрібно обрати вимірювальні трансформатори.

На стороні 120 кВ буде розташовано три однофазних трансформатори струму по одній в кожній фазі та трифазний (для спрощення) вимірювальний трансформатор напруги. Враховуючи несистемний клас напруги, вимірювальні трансформатори обиратимуться серед найближчих аналогів.

Струм в лінії становить 304 А. Приймаємо трансформатор 400/5 А, 30 ВА.

Вторинна напруга становитиме $U_2 = \frac{S}{I_2} = \frac{30}{5} = 6(A)$. Величина первинної

напруги для моделі трансформатора: $U_1 = \frac{U_2}{K_T} = 6 \cdot \frac{5}{400} = 0,075(B)$, рис.16.13.

Для спрощення приймемо активний характер опору у вторинному колі трансформатора; 5 А протікаючи цим опором мають створити спад напруги 6 В. Таким чином величина опору 1,2 Ом. Даний опір підключається до вторинної обмотки трансформатора струму, в опорі обирається «Вимірювання струму ланки», рис.16.14.

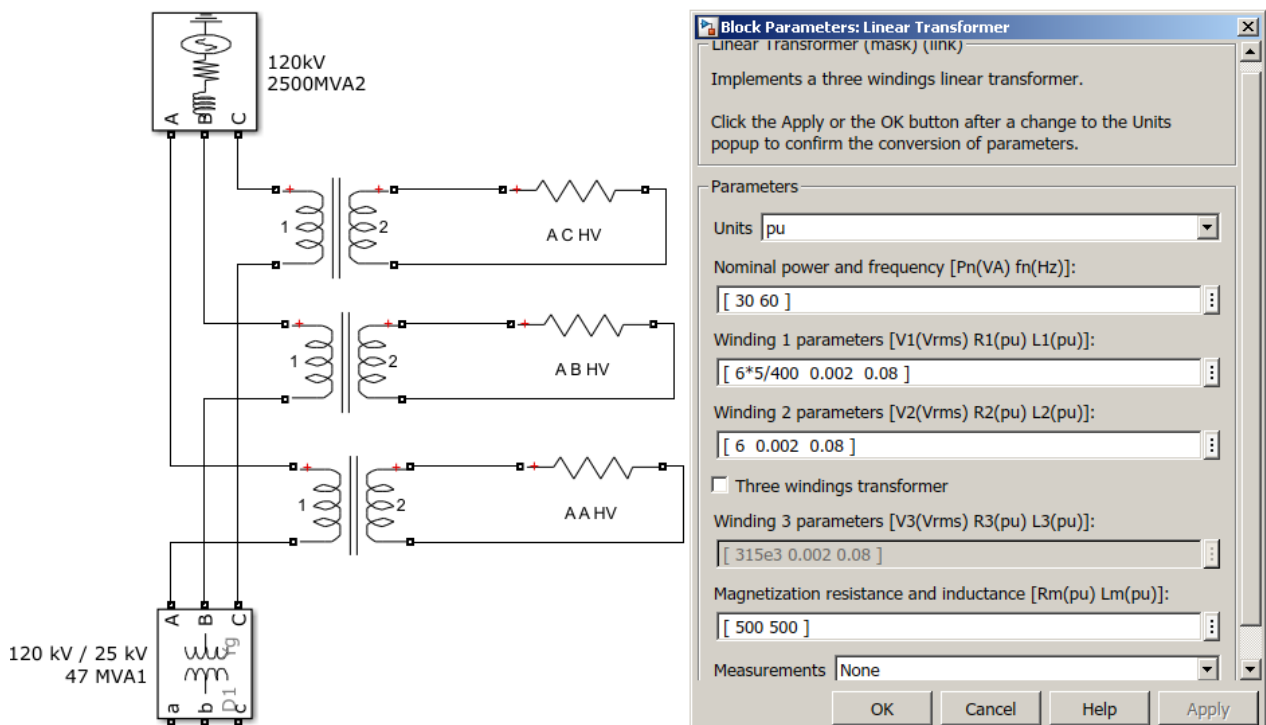


Рисунок 16.13. Вимірювальні трансформатори струму на стороні 120 кВ

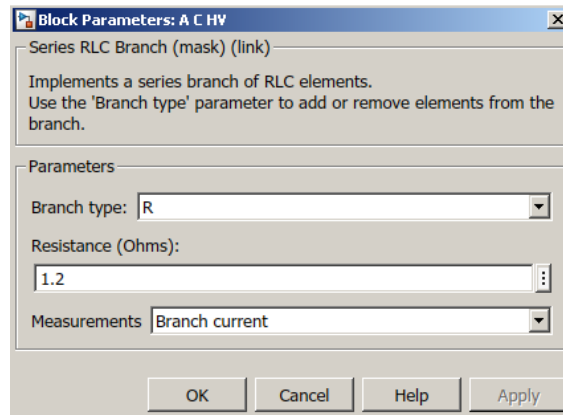


Рисунок 16.14. Навантаження вторинного кола трансформатора струму сторони 120 кВ

Вимірювальні трансформатори напруги для тих рівнів напруги завжди однофазного виконання. Прийемо для спрощення трифазний. Так, в однофазному виконанні трансформатор матиме рівні напруги $120/\sqrt{3}$ кВ і $100/\sqrt{3}$ В та потужність 100 ВА, рис.16.15.

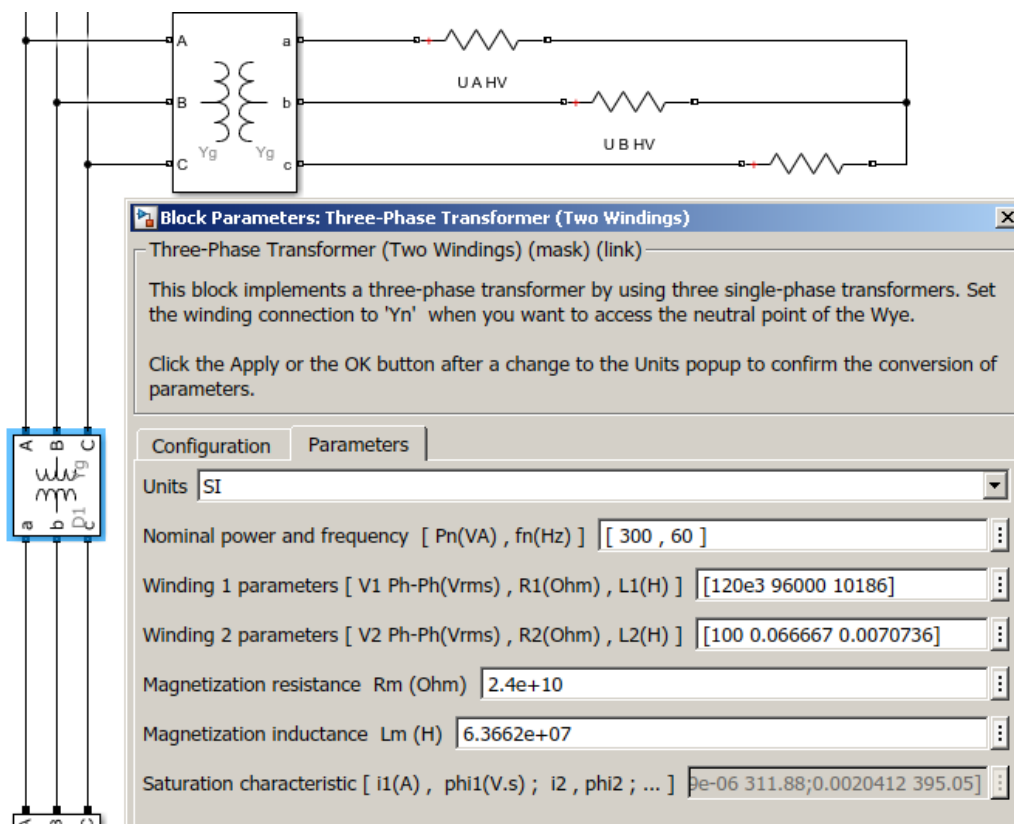


Рисунок 16.15. Вимірювальний трансформатор напруги 120 кВ

Опір вторинного навантаження, виходячи з виразу (16.1) становить 100 Ом. На цій ланці вимірюватиметься спад напруги, рис.16.16.

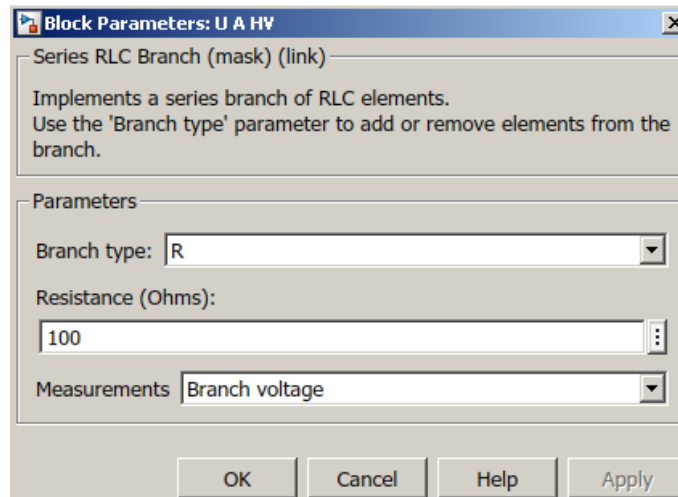


Рисунок 16.16. Опір вторинного навантаження фази трансформатора напруги 120 кВ

На стороні 25 кВ буде розташовано один однофазний трансформатор струму та трифазний (для спрощення) вимірювальний трансформатор напруги. Враховуючи несистемний клас напруги, вимірювальні трансформатори обиратимуться серед найближчих аналогів.

На сторонах 35 кВ, 24 кВ, 20 кВ, 10 кВ, 6 кВ, 3 кВ вимірювальні трансформатори струму знаходяться в двох фазах із трьох, причому на прилади-індикатори працює лише один із них. Через це на стороні 25 кВ напруги НН трансформатора розмістимо лише один вимірювальний трансформатор струму. Струм в лінії становить 1455 А. Приймаємо трансформатор 2000/5 А, 20 ВА. Вторинна напруга становитиме

$U_2 = \frac{S}{I_2} = \frac{20}{5} = 4(A)$. Величина первинної напруги для моделі трансформатора:

$U_1 = \frac{U_2}{K_T} = 4 \cdot \frac{5}{2000} = 0,01(B)$, рис.16.17. Струм 5 А протікаючи опором

вторинного навантаження має створити спад напруги 4 В. Величина опору 0,8 Ом. Даний опір підключається до вторинної обмотки трансформатора струму, в опорі обирається «Вимірювання струму ланки», рис.16.18.

Як і для сторони 120 кВ, на стороні 25 кВ приймемо трифазний трансформатор, причому це буде VTOP II-33, параметри якого передбачають вимірювання напруги 25 кВ. Номінальна вторинна напруга залишається 100 В, потужність 3×30 ВА. Під'єднуватиметься він до шини 25 кВ, рис.16.19 і все, що зв'язано з вимірюванням напруги на цій стороні відповідатиме лише він один. Більше трансформаторів напруги на передбачається.

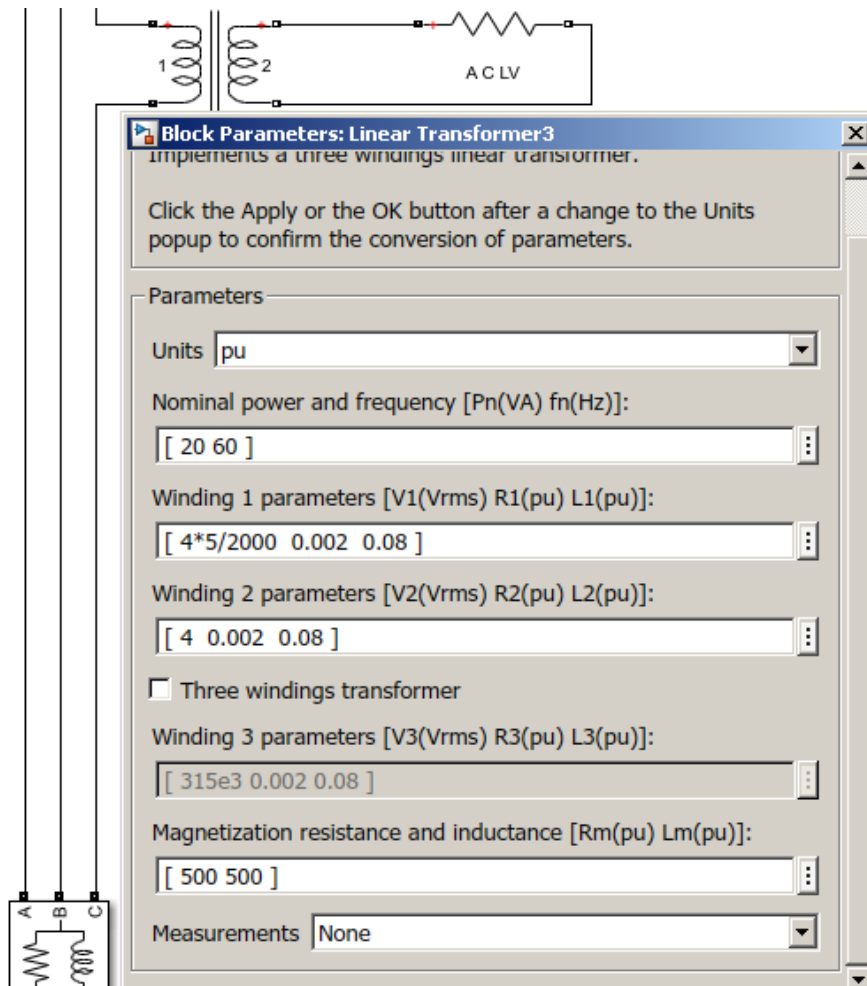


Рисунок 16.17. Вимірювальний трансформатор струму 25 кВ приєднання трансформатора

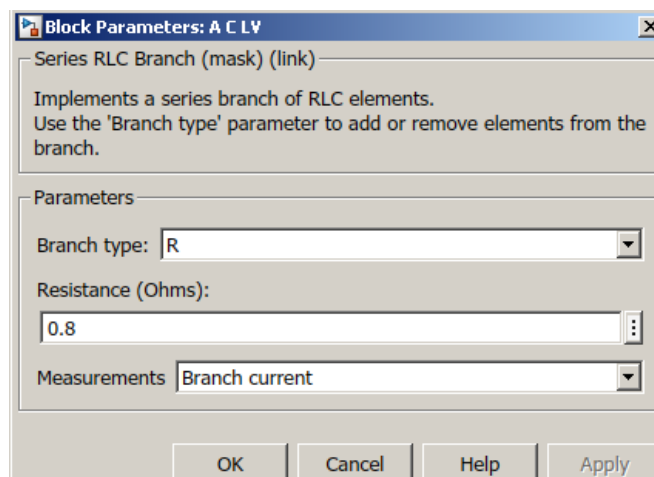


Рисунок 16.18. Вторинне навантаження трансформатора струму 25 кВ приєднання трансформатора

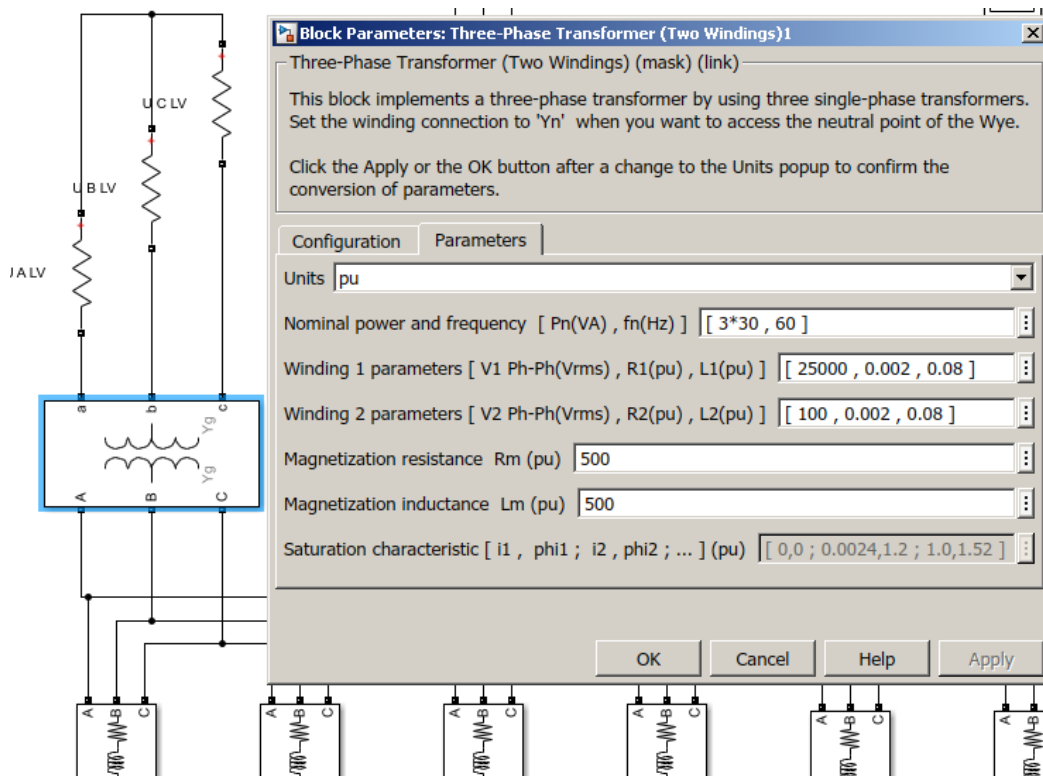


Рисунок 16.19. Вимірювальний трансформатор напруги 25 кВ

Опір вторинного навантаження, виходячи з виразу (16.1) становить 333,333 Ом, на цій ланці вимірюватиметься спад напруги, рис.16.20.

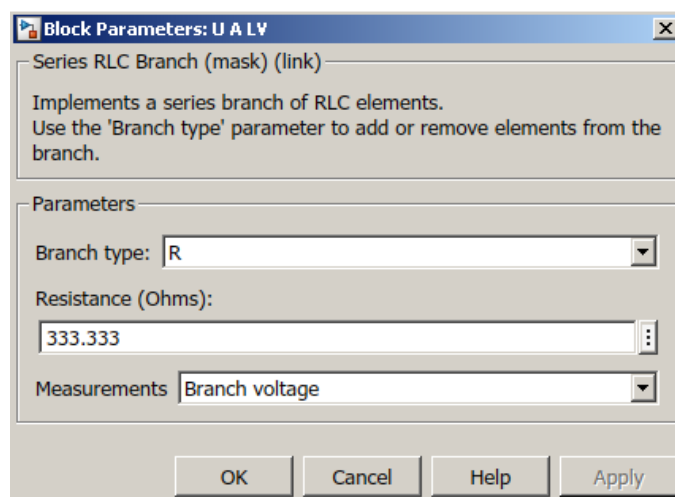


Рисунок 16.20. Вторинне навантаження трансформатора напруги 25 кВ

На стороні 25 кВ приєднання споживача струм навантаження становить 181,9 А. Приймаємо трансформатор 200/5 А, 3 ВА. Вторинна напруга становитиме 0,6 А, первинна 0,015 А, рис.16.21. Струм 5 А протікаючи опором вторинного навантаження має створити спад напруги 0,6 В, звідки величина опору 0,12 Ом, рис.16.22.

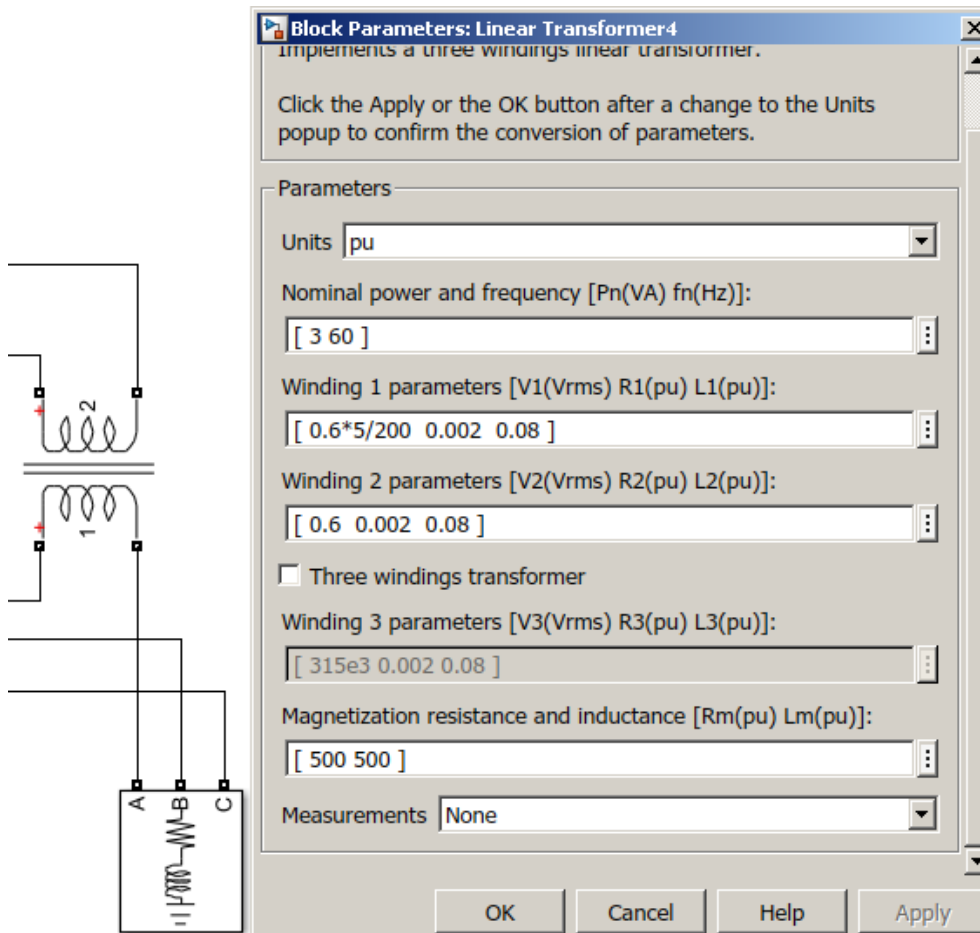


Рисунок 16.21. Вимірювальний трансформатор струму 25 кВ приєднання навантаження

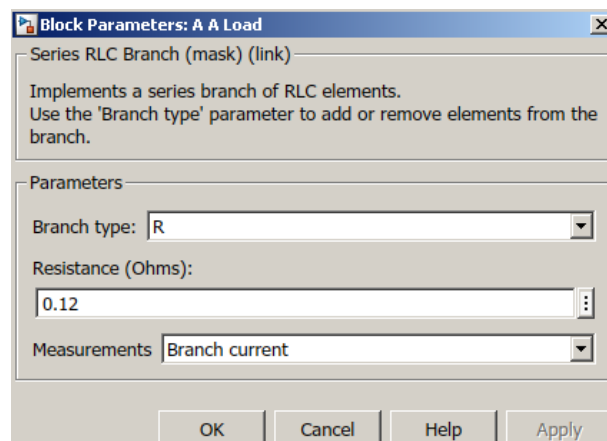


Рисунок 16.22. Вторинне навантаження трансформатора струму 25 кВ приєднання навантаження

Схема з вимірювальними трансформаторами представлена на рис.16.23. Усі вимірювальні блоки, з результатами моделювання, сховано у підсистемі «Measurements».

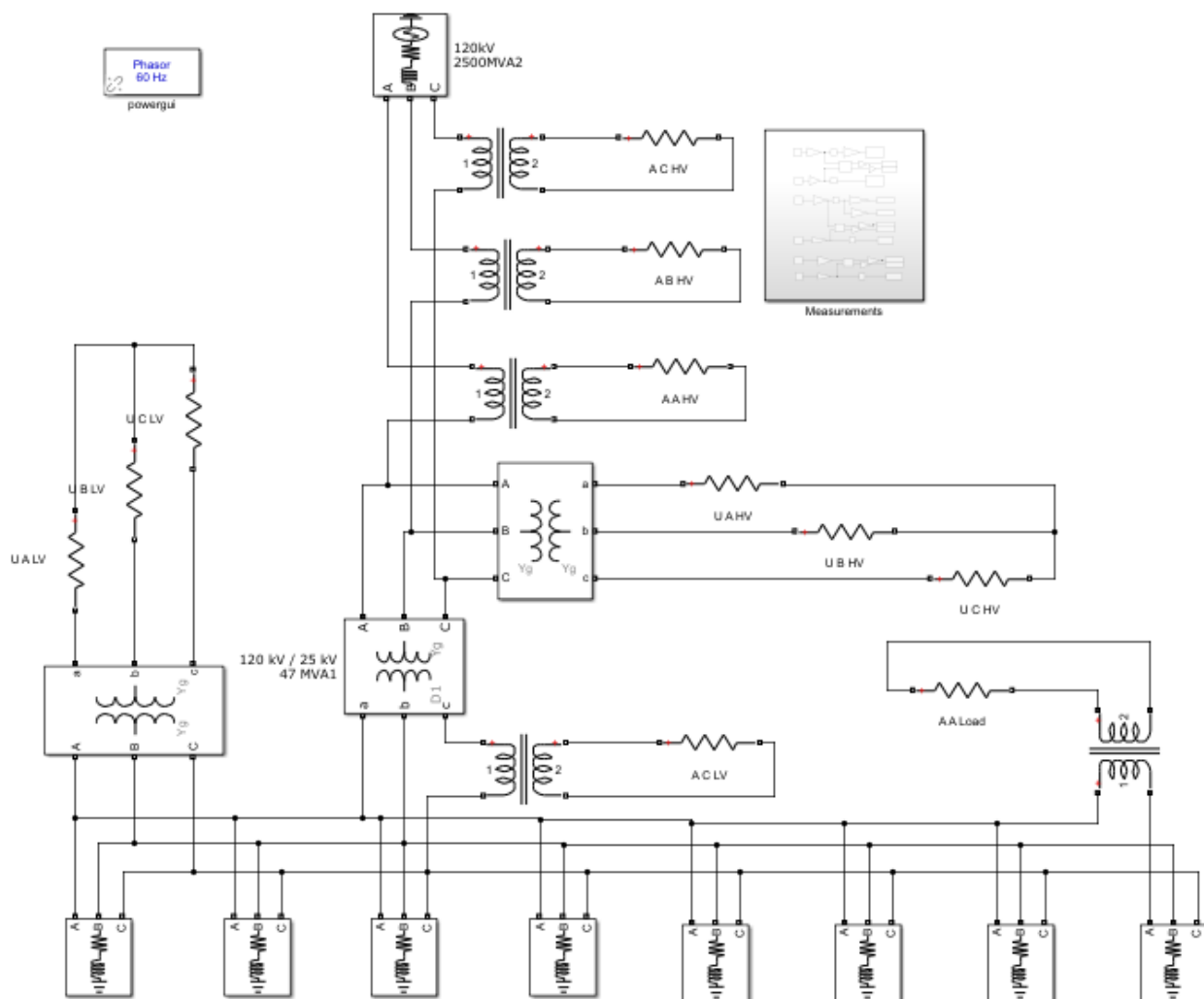


Рисунок 16.23. Схема для дослідів з вимірювальними трансформаторами

На рис.16.24 представлено вимірювальні блоки та режимні параметри на стороні 120 кВ, отримані за допомогою вимірювальних трансформаторів. Вимірювання струмів і напруг на ланках, опорах у вторинних колах вимірювальних трансформаторів, в подальшому вказуються в мультиметрах. Сигнали від мультиметрів проходять через множники з відповідними коефіцієнтами трансформації. Напряга виводиться в кВ, потужність у МВт, МВАр.

На рис.16.25 представлено вимірювальні блоки та режимні параметри на стороні 25 кВ, приєднання трансформатора. Варто звернути увагу на те, що вторинні навантаження мають бути на одній і тій самій фазі для отримання прийнятного результату. Вимірювальний трансформатор струму, для прикладу, знаходився у фазі С, тому спад напруги на опорі навантаження вторинної обмотки вимірювального трансформатора напруги також має бути з фази С.

На сторонах 35 кВ, 24 кВ, 20 кВ, 10 кВ, 6 кВ передбачається індикація лінійної і фазної напруги, що було здійснено в даному прикладі: виведено фазну і лінійну напруги. Рівень фазної напруги фази С становить 12,92 кВ.

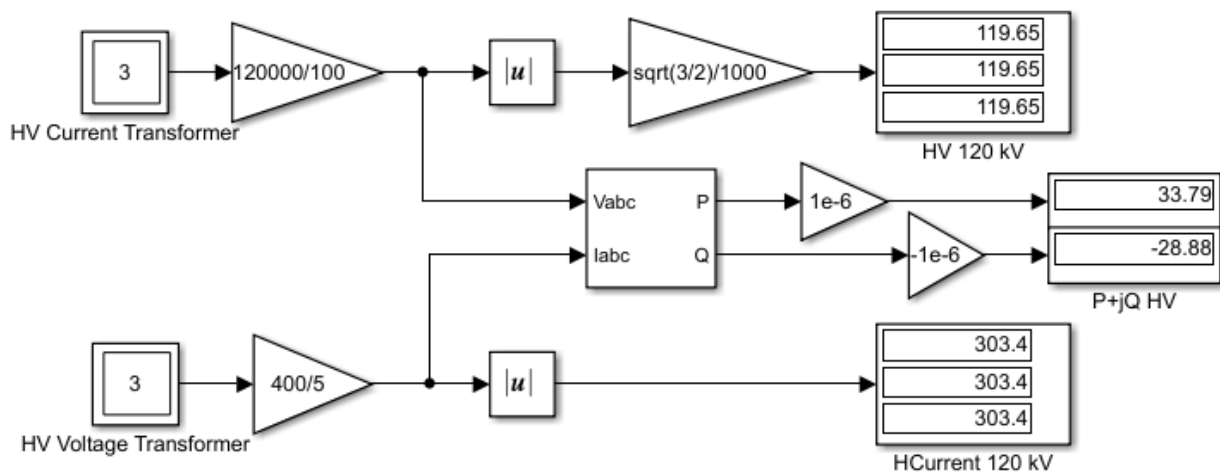


Рисунок 16.24. Рівні напруги, активна та реактивна потужність, лінійні струми сторони 120 кВ

В множниках для отримання потужності фігурує потроєне значення, оскільки вимірювання проводилися виключно для однієї фази. Зміна місця розташування знаку «-» може бути викликана неспівпадінням умовно додатного напрямку ділянки із напрямком протікання в ній струму.

На рис.16.26 представлено вимірювальні блоки та режимні параметри на стороні 25 кВ, приєднання споживача. Вимірювальний трансформатор струму розташовано у фазі А, тому виміряні струми та напруги на опорах вторинного навантаження у мультиметрах вказані саме для цієї фази. Напругу тут не виведено, лише посилання на неї, оскільки вимірювальний трансформатор струму на стороні 25 кВ є єдиним і працює на усі вимірювальні прилади та пристрої релейного захисту і протиаварійної автоматики, які мають обмотку напруги. Таким чином, рівень напруги береться з попереднього рис.16.25.

На прикладі виміряних значень потужності навантаження з використанням вимірювальних трансформаторів на стороні 120 кВ, 25 кВ і особливо у споживача, дуже добре видно похибку вимірювання, оцінку якої буде залишено на самостійне опрацювання.

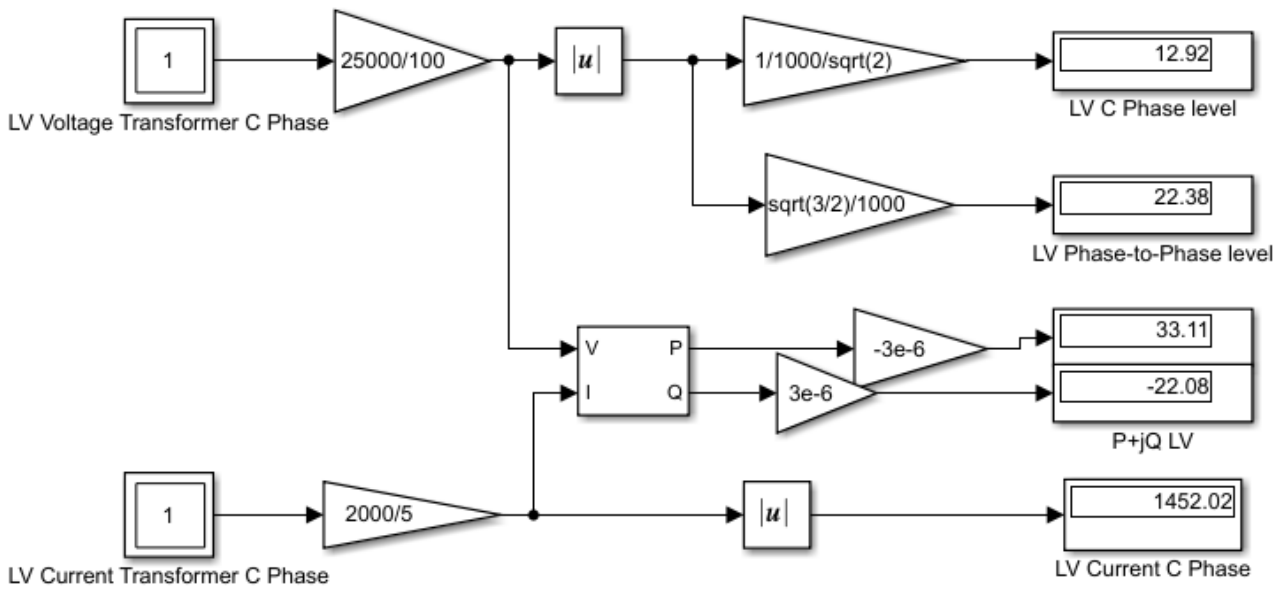


Рисунок 16.25. Рівні фазної та лінійної напруги, активна та реактивна потужність, лінійні струми сторони 25 кВ

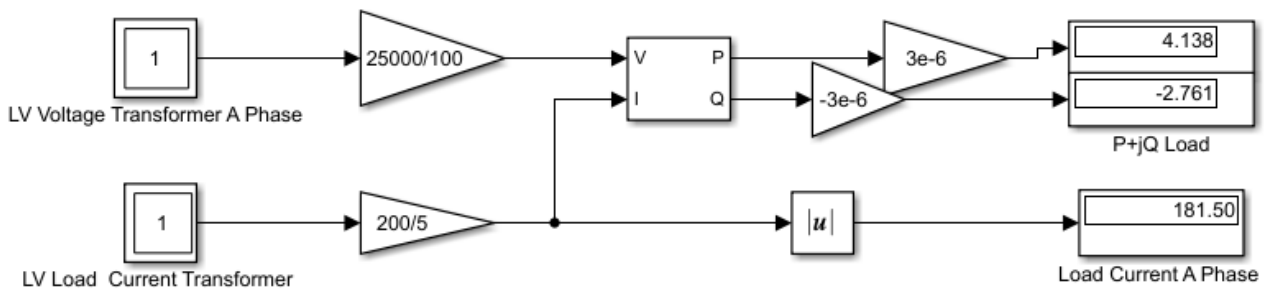


Рисунок 16.26. Активна та реактивна потужність, лінійні струми одиничного навантаження на стороні 25 кВ

Індивідуальне завдання

Зібрати схему, рис.16.26, за своїм варіантом, табл.16.1, отримати режимні параметри на стороні ВН та НН і на приєднанні споживача з використанням вбудованих вимірювальних засобів MatLab. Варіант вихідних даних задається викладачем. Повторно зібрати схему, використовуючи вимірювальні трансформатори, попередньо розрахувавши всі необхідні їх параметри на основі результатів попереднього моделювання.

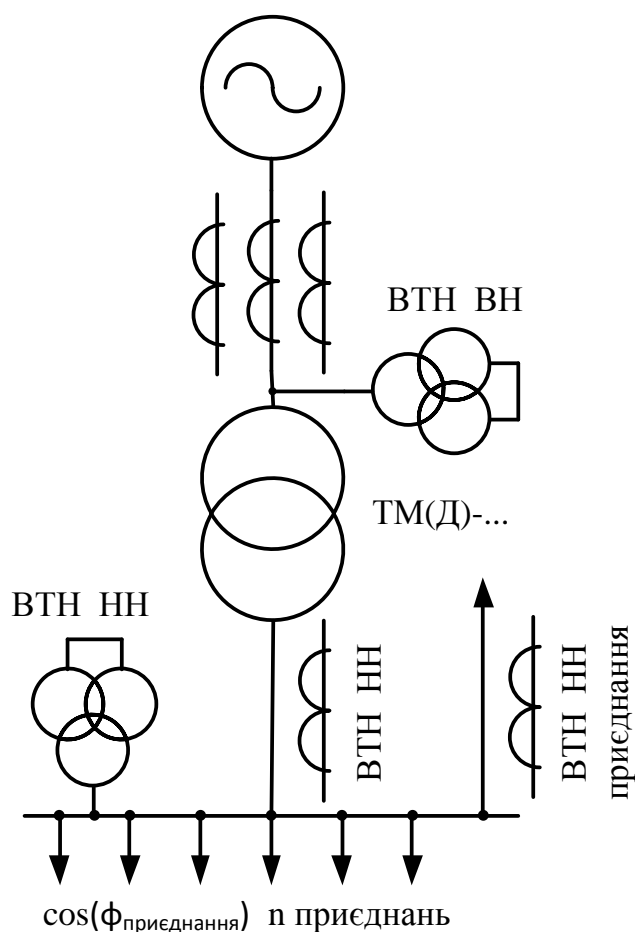


Рисунок 16.26. Структурний вигляд схеми для дослідів

Співставити режимні параметри двох схем – з використанням вбудованого інструментарію для вимірювань і з використанням вимірювальних трансформаторів. Оцінити похибку та зробити висновки.

Паспортні дані силових трансформаторів узяті з попередньої теми, табл.15.2 – 15.3. В табл..16.2 – 16.7 містяться паспортні дані вимірювальних трансформаторів.

Таблиця 16.1. Вихідні дані для дослідження

Варіант	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Тип тр-ра	ТМН-1600/35	ТМН-6300/35	ТМН-1600/35	ТМН-1600/35	ТДН-16000/110	ТМН-1600/35	ТМН-1000/35	ТМН-6300/110	ТМН-6300/110	ТМН-6300/110
Коефіцієнт завантаження тр-ра, β	0,85	1	0,8	1,1	0,75	0,9	0,85	1,05	0,75	0,95
Кількість приєднань споживачів	10	10	8	8	8	6	10	10	8	4
$\cos(\varphi)$ приєднання	0,95	0,91	0,93	0,86	0,87	0,85	0,89	0,91	0,87	0,93

Таблиця 16.1. Продовження

Варіант	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20
Тип тр-ра	ТМН-6300/35	ТМН-1600/35	ТМН-6300/35	ТМН-4000/35	ТДН-16000/110	ТМН-2500/110	ТМН-2500/110	ТМН-6300/110	ТМН-2500/110	ТДН-16000/110
Коефіцієнт завантаження тр-ра, β	0,75	0,85	1,05	0,85	0,8	0,7	1,05	0,9	0,7	0,85
Кількість приєднань споживачів	8	8	8	10	4	8	10	8	8	4
$\cos(\varphi)$ приєднання	0,88	0,93	0,89	0,96	0,93	0,95	0,96	0,91	0,91	0,91

Таблиця 16.1. Завершення

Варіант	21	22	23	24	25	26	27	28	29	30
Тип тр-ра	ТМН-1600/35	ТДН-10000/110	ТМН-2500/110	ТДН-10000/110	ТМН-1600/35	ТМН-1600/35	ТМН-6300/110	ТМН-2500/110	ТМН-1000/35	ТРДН-25000/110
Коефіцієнт завантаження тр-ра, β	0,85	0,8	0,7	1,1	1,05	0,75	0,9	1,05	1,05	0,75
Кількість приєднань споживачів	8	6	10	4	8	8	10	6	8	4
$\cos(\varphi)$ приєднання	0,93	0,93	0,86	0,92	0,88	0,96	0,84	0,92	0,96	0,94

Таблиця 16.2. Шинний трансформатори струму ТШЛ-10

Номинальна напруга, кВ	10						
Найбільша робоча напруга, кВ	12						
Номинальний первинний струм, А	1000	1500	2000	3000	4000	5000	6000
Номинальний вторинний струм, А	1; 5						
Вторинне навантаження з $\cos(\varphi)=0,8$, ВА	20						
Вторинне навантаження з $\cos(\varphi)=1,0$, ВА	25						
Струм термічної стійкості (3 с), кА	31,5				140	75	

Таблиця 16.3. Вимірювальні трансформатори напруги 10 кВ

	DNT-12; DNT SOV-12; DNT SOH-12	DNT-24; DNTm1-24; DNT SOV-24; DNT SOH-24	DNT SM-12	DNT SM-24	VTOP II-11
Найбільша робоча напруга первинної обмотки, кВ	12	24	12	24	12
Номінальна напруга первинної обмотки, кВ	3, 5, 6, 10	10, 15, 20	3, 5, 6, 10	10, 15, 20	10, 11
Номінальна напруга вторинної обмотки, В	100				
Номінальна потужність вторинної обмотки, ВА	25, 50, 75, 150		25, 75, 150, 200		30, 50, 100, 200

Таблиця 16.4. Вимірювальні трансформатори струму 35 кВ

Тип	Первинний струм, А	Вторинний струм, А	Вторинне навантаження з $\cos(\varphi)=0,8$, ВА
ГОЛ-35-III-II	15, 20, 30, 40, 50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800, 1000, 1500, 2000, 4000	5	3; 5; 10; 15; 20 для класів точності 0,2S; 0,2; 0,5S; 0,5; 1
ГОЛ-35-III-IV-5	300, 400, 500, 600, 750, 800, 1000, 1200, 1500, 2000	5	20; 30 для класів точності 0,2S; 0,2; 0,5S; 0,5; 1

Таблиця 16.5. Вимірювальні трансформатори напруги 35 кВ

	DNT-36 DNT SOV-36 DNT SOH-36	DNT SM-36	VTOP II-33
Найбільша робоча напруга первинної обмотки, кВ	36		
Номінальна напруга первинної обмотки, кВ	20; 33; 35	20; 33; 35	20; 22; 33; 35
Номінальна напруга вторинної обмотки, В	100	100; 110; 115; 200; 220; 230	
Номінальна потужність вторинної обмотки, ВА	30; 100; 200	25; 30; 50; 100; 200	30; 50; 100; 200

Таблиця 16.6. Вимірювальні трансформатор струму ТФЗМ-110

Тип	Первинний струм, А	Вторинний струм, А	Вторинне навантаження з $\cos(\varphi)=0,8$, ВА
ТФЗМ 110 Б – I У1	50, 75, 100, 150, 200, 300, 400, 600, 800	5	30
ТФЗМ 110 Б – I ХЛ1			
ТФЗМ 110 Б – III У1	750, 1000, 1500, 2000	1; 5	20
ТФЗМ 110 Б – III ХЛ1			
ТФЗМ 110 Б – IV У1	100, 150, 200, 300, 400, 600, 750, 1000, 1200, 1500, 2000	1; 5	30
ТФЗМ 110 Б – IV ХЛ1			
ТФЗМ 110 Б – IV Т1			

Таблиця 16.7. Вимірювальні трансформатори напруги 110 кВ

Тип	Номинальна напруга первинної обмотки, кВ	Номинальна напруга вторинної обмотки, В	Номинальне вторинне навантаження, в межах класу точності, ВА			Граничне вторинне навантаження, ВА
			0,2	0,5	1,0	
НКФ-110-II У1	110/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$	100	200	400	3000
НКФ-110-II Т1						
НКФ-110-II ХЛ1	110/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$	-	400	600	2000
НКФ-110-III У1						
НКФ-110-III Т1						
НКФ-110-II У1-I						
Елегазовий						
ЕНОГ-110 У1 чи УХЛ1	110/ $\sqrt{3}$	100/ $\sqrt{3}$	150	200	300	1600

Тема №17

МОДЕЛЮВАННЯ ЕЛЕКТРОЕНЕРГЕТИЧНИХ СИСТЕМ ТА ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Мета роботи: моделювання синхронних машин; дослідження впливу параметрів синхронних машин на режим роботи електричних систем; моделювання збурень в енергосистемах; дослідження впливу короткого замикання на роботу електричних систем.

Теоретичні положення

Вже згадувалося про доцільність використання довідникової системи MatLab в учбовій і науковій діяльності, оскільки там містяться робочі зразки, побудова яких здебільшого була викликана необхідністю проведення деякого дослідження. Ці моделі можна використовувати в подальшому для проведення власних досліджень за необхідною тематикою. Так в довідниковій системі MatLab за ім'ям «power_PSS» або за адресою розташування `web(fullfile(docroot, 'physmod/sps/examples.html?category=motors-and-generators&s_tid=CRUX_topnav'))` модель двох паралельно працюючих енергосистем з міжсистемним зв'язком, яка обладнана мультипараметричною системою автоматичного керування активною потужністю.

Схема для дослідів містить дві повністю симетричні та однакові еквівалентні енергосистеми, з'єднаних між собою відповідним міжсистемним зв'язком - двома паралельними лініями 230 кВ довжиною 220 км. Модель була спеціально розроблена для дослідження низькочастотних електромеханічних коливань у великих взаємопов'язаних енергосистемах і незважаючи на її невеликий розмір, може дуже точно імітувати поведінку типових систем у реальних умовах експлуатації. Кожна еквівалентна енергосистема обладнана двома однаковими неявнополюсними генераторами на 20 кВ потужністю 900 МВА. Синхронні машини мають ідентичні параметри, за винятком інерцій, які становлять $H = 6,5$ с в еквівалентній енергосистемі № 1 і $H = 6,175$ с в системі № 2. Крім того, передбачається, що теплові електричні станції оснащені однаковими регуляторами швидкості. Навантаження представлено у вигляді постійних опорів і розподілено між енергосистемами таким чином, що з енергосистеми № 1 експортується 413 МВт в енергосистему № 2. Додаткові 140 МВт перетоку ділянкою лінії в еквівалентній системі призводять до того, що система працює в ускладненому режимі навіть за відсутності збурень.

Еталонний потік потужності генератора M2, хоч це вважається недоліком в моделі, є таким, що всі генератори виробляють близько 700 МВт кожен. Ці результати можна побачити, відкривши Powergui та вибравши Ініціалізація електричної машини. З часом, з проведеними дослідженнями, для покращення режиму напруги до моделі додатково встановили 187 МВАр ємнісної установки

поперечної компенсації в кожній еквівалентній енергосистемі. Крім того, втрати при передачі та генерації можуть змінюватися в залежності від рівнів деталізації лінії та генератора, рис. 17.1.

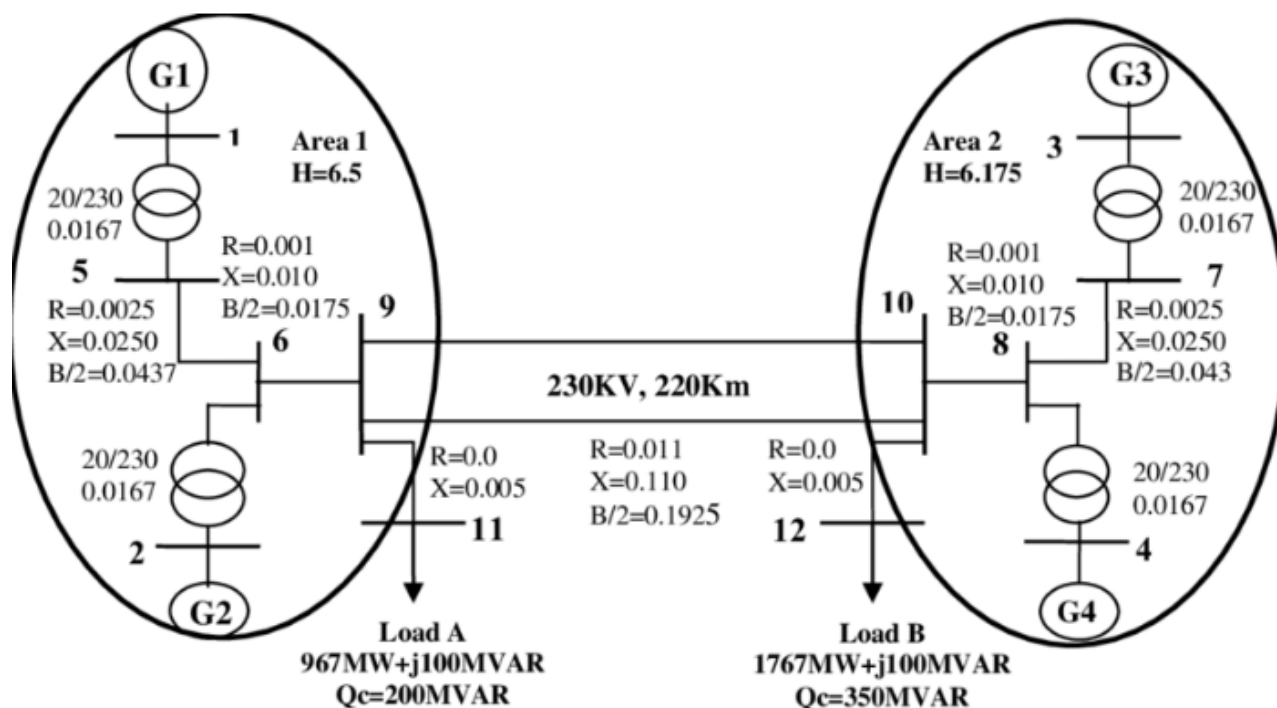


Рисунок 17.1. Дві паралельно працюючі енергосистеми з міжсистемним зв'язком

Як базис розуміння поведінки мережі, можна змодельовати її реакцію за вимкненого регулятора активної потужності на імпульс з амплітудою 5%, що діє протягом 12 періодів при опорній напрузі від машини G1. Цей тест активується шляхом відкриття таймера, що контролює опорну напругу G1, і зміни множника вектора генератора імпульсів часу зі 100 на 1. В такий самий спосіб у блоці «Коротке замикання» та вимикачі «Brk1» і «Brk2» у показнику часу спрацювання замість 1 виставляється 100, рис. 17.2.

З початком моделювання, всі відгуки системи на збурення відображаються в осцилографах «Машини» та «Система» в робочому середовищі моделі, рис.17.2. Усі сигнали демонструють наявність незатухаючих коливань, що призводять до втрати стійкості. Модальний аналіз потужностей чотирьох машин показує три групи режимів:

- взаємодія між еквівалентними енергосистемами ($f_n=0,64$ Гц , $z=-0,026$ (коефіцієнт згасання)), тобто енергосистеми № 1 протиставляється енергосистемі № 2, що виражається транзитом потужності міжсистемним зв'язком, який відображається на осцилографі «Система»;
- місцевий режим роботи енергосистеми № 1 ($f_n=1,12$ Гц, $z=0,08$), порівняння режимів роботи наявних генераторів G1 і G2;

- теж саме для енергосистеми № 2 ($f_n = 1,16$ Гц, $z = 0,08$). Під порівнянням тут мається на увазі вплив інерцію машини на частоту енергосистеми. Чим менше інерція, тим більша частота.

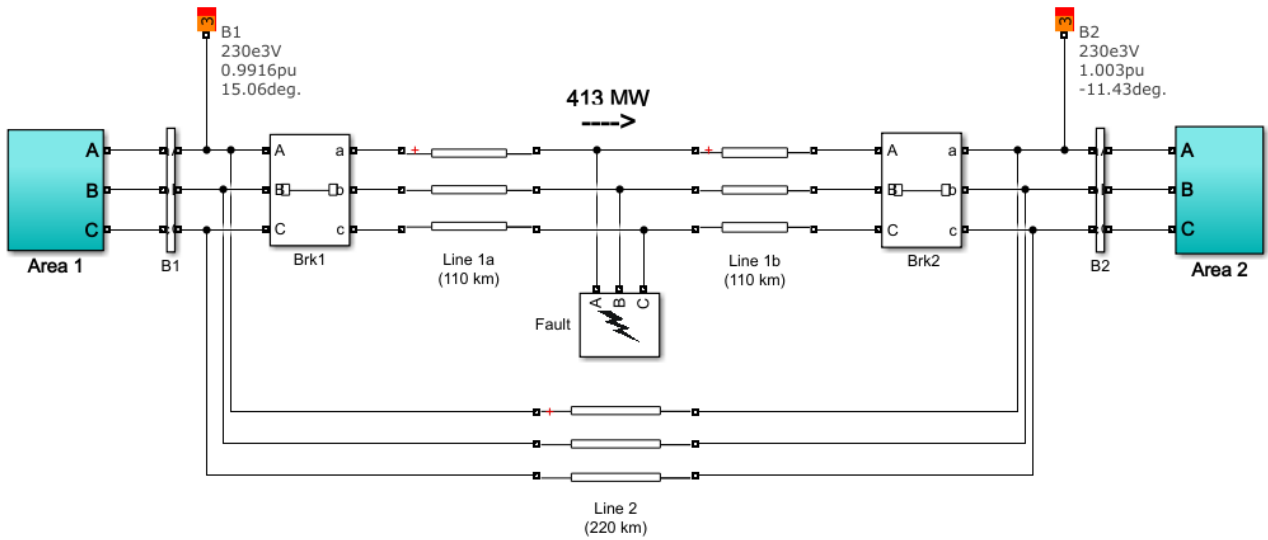


Рисунок 17.2. Модель в програмному середовищі MatLab

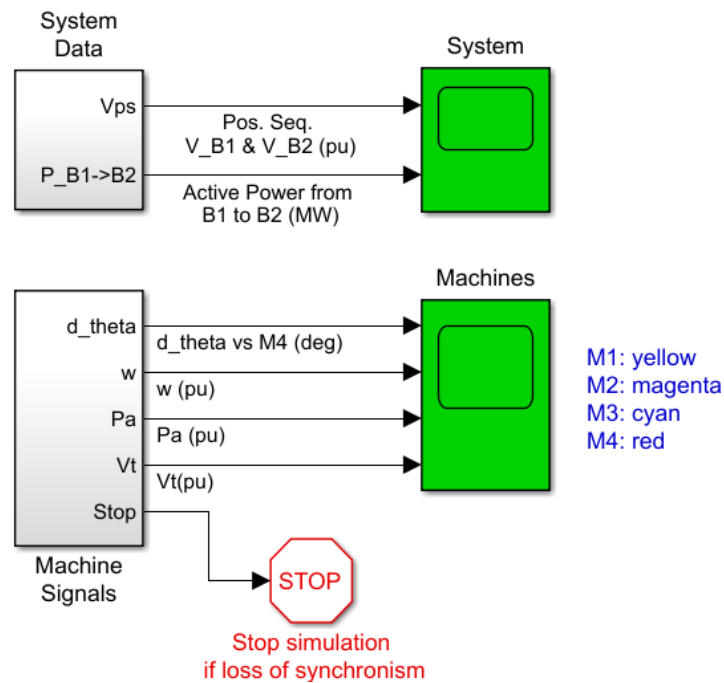


Рисунок 17.3. Осцилографи виведення результатів

Налаштування мультипараметричної системи автоматичного керування активною потужністю були легко вибрані шляхом зміни базисної частоти та посилення кожної побічної смуги пропускання, щоб досягти майже рівної фазової характеристики діапазону від 0,1 Гц до 5 Гц. Параметри відхилення

частоти обертання ротора «Delta w» характеризуються незадовільною формою фази, особливо на частотах, близьких до 1-2 Гц, через що система не може впоратися зі швидкоплинними локальними або міжмашинними збуреннями на багатоблокових електростанціях. На відміну від цього, налаштування за відхиленням видачі активної потужності генератором, «Delta Pa», характеризується вдалою комбінацією підсилення та випередження фази сигналу при низькочастотних коливаннях вище 0,3 Гц.

Усі види регуляторів в цілому задовільно забезпечують стійкість природно нестійкої системи, однак мильтпараметрична система показує себе краще, ніж регуляція за відхиленням частоти обертання ротора чи відхилення видачі активної потужності.

При оцінці характеристик системи автоматичного керування сигналу малої амплітуди недостатньо. Основною характеристикою буде здатність забезпечувати стійкість роботи енергосистеми під час великих збурень, за різких змін умов експлуатації. Схема для дослідів дозволяє відслідкувати усунення наслідків впливу трифазного короткого замикання впродовж 8 періодів. Без однієї лінії зв'язку система може досягти стабільної робочої точки в сталому режимі, хоча не кожна система автоматичного регулювання здатна забезпечити плавний перехід до нового ускладненого режиму.

Практична частина

В загальному вигляді, схему для дослідів в робочому середовищі MatLab було показано на рис. 17.2. На рис. 17.4. представлено одну із двох паралельно працюючих еквівалентних енергосистем.

Система містить дві зв'язки турбіна-синхронний генератор-трансформатор, між двома генераторами міститься лінія зв'язку 25 км, є лінія зв'язку 10 км між генераторами та еквівалентним навантаженням, власне навантаження системи, установка поперечної компенсації і вихід на міжсистемний зв'язок.

Звертаючись до синхронного генератора, рис.17.5, потрібно обрати яку механічну характеристику буде подано на вхід, рис.17.6., та конструкцію ротора за наявністю полюсів, рис.17.7.

В якості механічної характеристики пропонується величина механічної потужності, швидкість обертання ротора або створюється окрема механічна система рис.17.8, вихід якої подається на вхід генератора.

Конструкція ротора за наявністю полюсів – явнополюсна та неявнополюсна машина. Тобто Round – неявополюсна.

В параметрах генератора вказуються, рис.17.9:

- номінальні потужність, Вт, напруга, В, частота, Гц;
- реоктанси за повздовжньою та поперечною віссю, усталена, перехідна та надперехідна величина;

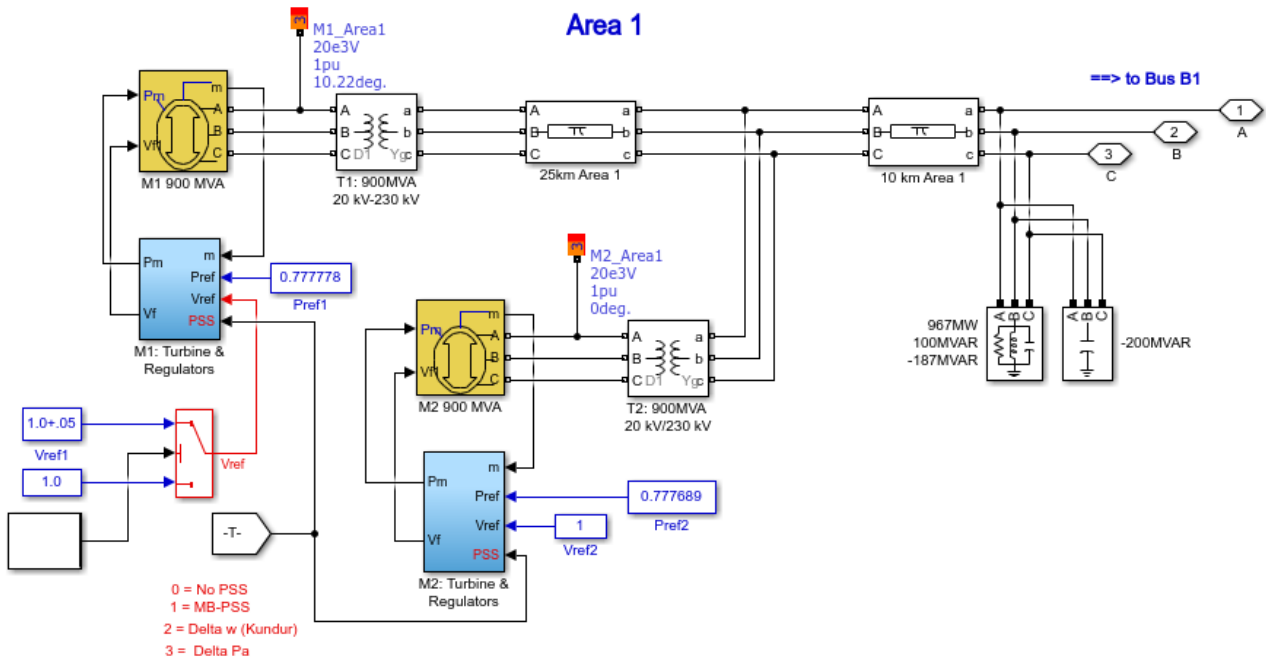


Рисунок 17.4. Розгорнута енергосистема

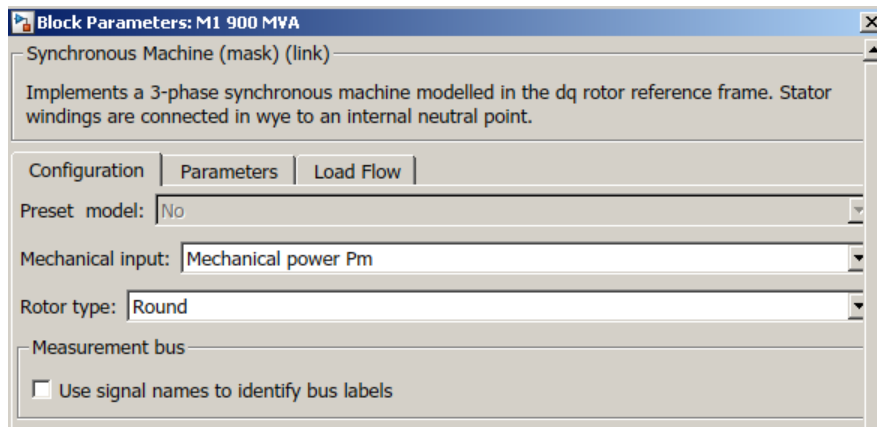


Рисунок 17.5. Конфігурація трифазного синхронного генератора

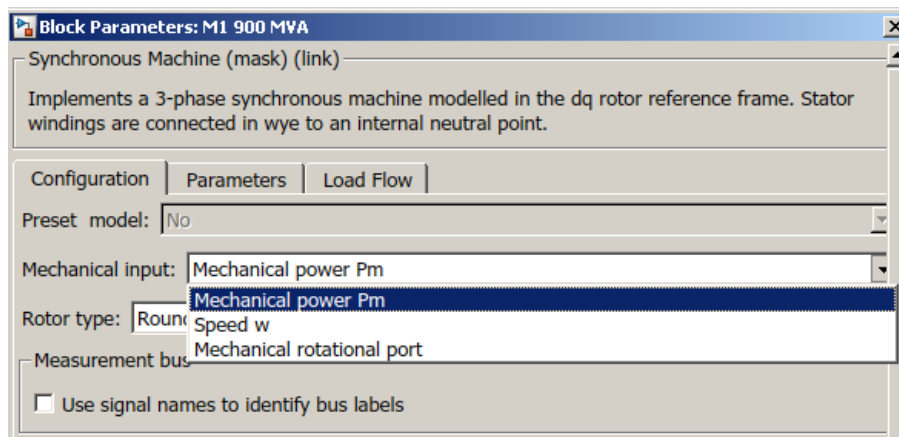


Рисунок 17.6. Характеристика механічної потужності синхронного генератора

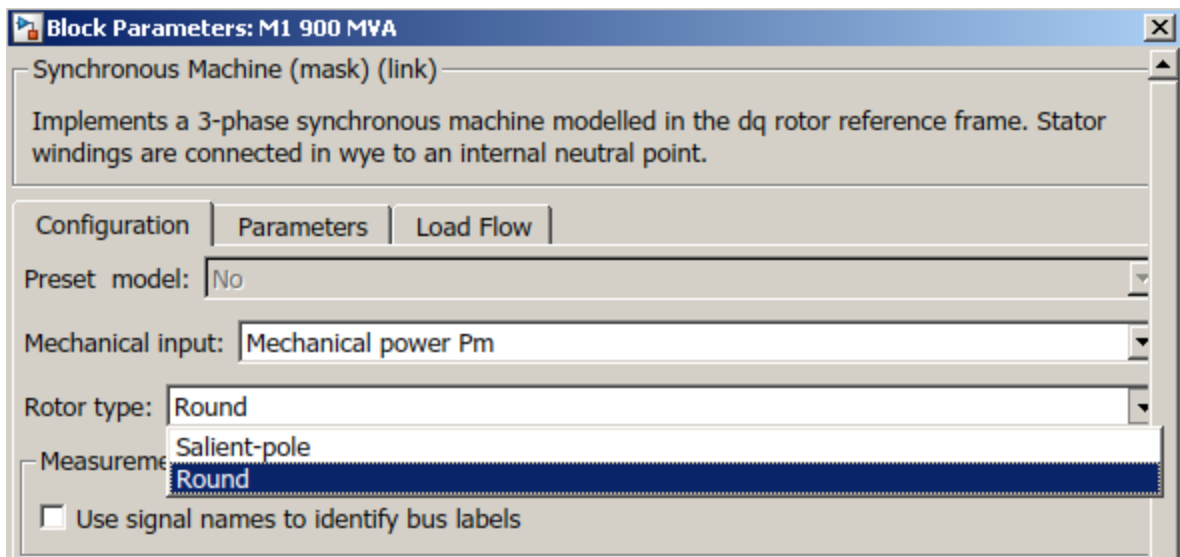


Рисунок 17.7. Конструкція ротора синхронної машини

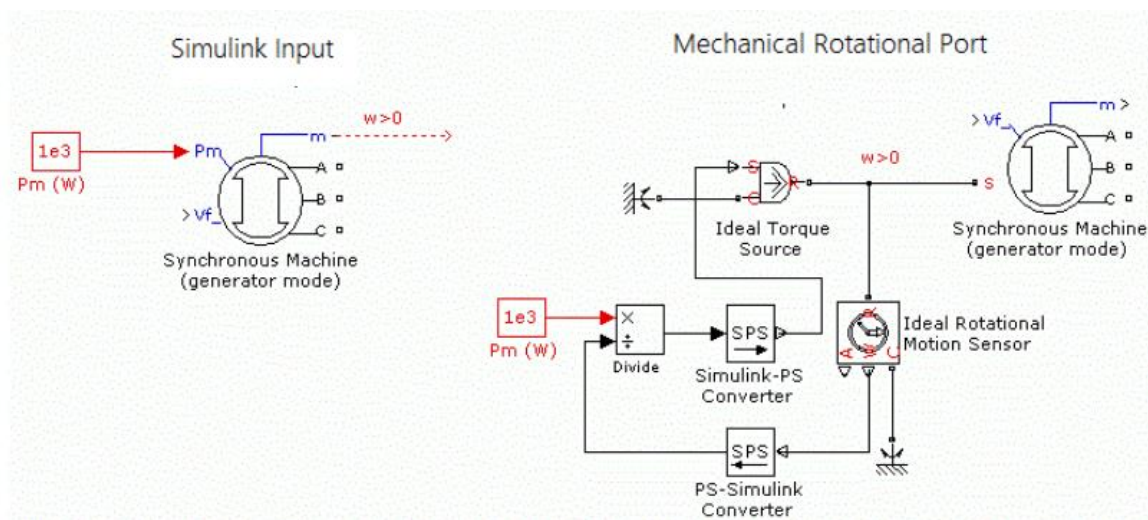


Рисунок 17.8. Варіанти подання механічної потужності на вхід генератора

- стали часу перехідного та надперехідного режиму за повздовжньою і поперечною віссю при замкненій та розімкненій обмотці збудження;
- омичний опір обмотки статора;
- показник інерції, коефіцієнт тертя та кількість пар полюсів;
- відносне відхилення швидкості частоти обертання, початкова величина кута ротора, струми намагнічування відповідних фаз, фазові кути струмів намагнічування.

Детальніший розгляд залишено на самостійне опрацювання у вигляді індивідуального завдання.

В характеристиках потужності, рис.17.10, вказується активна потужність генерації та межі регулювання за реактивною потужністю.

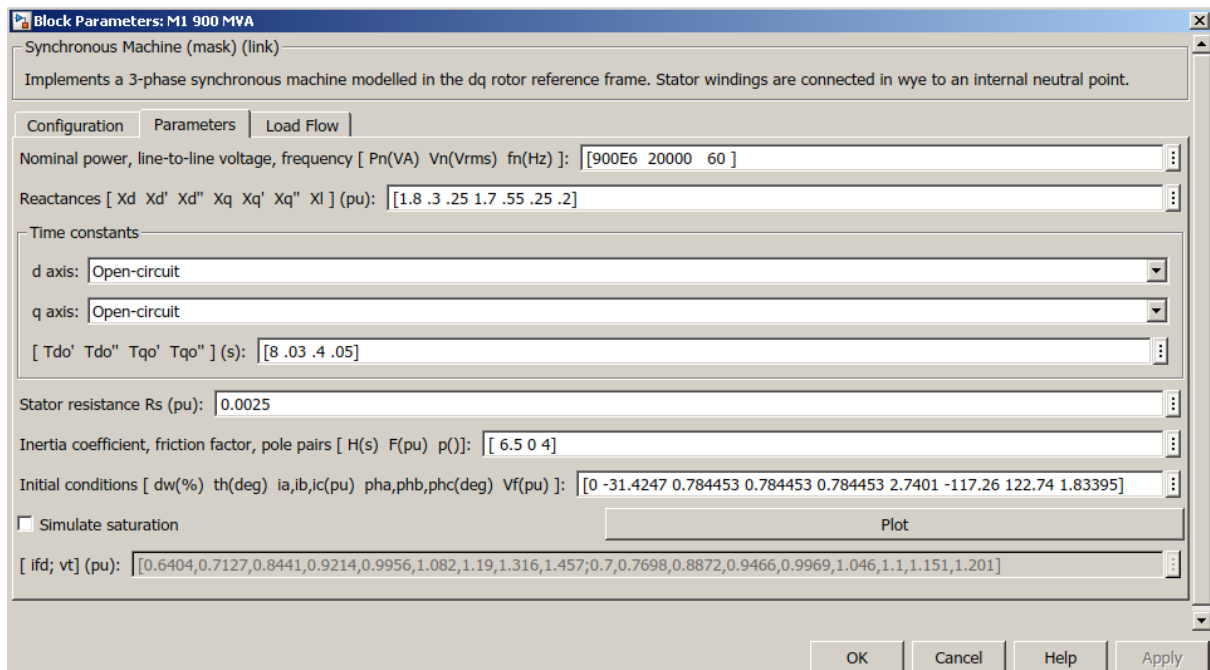


Рисунок 17.9. Параметри синхронної машини

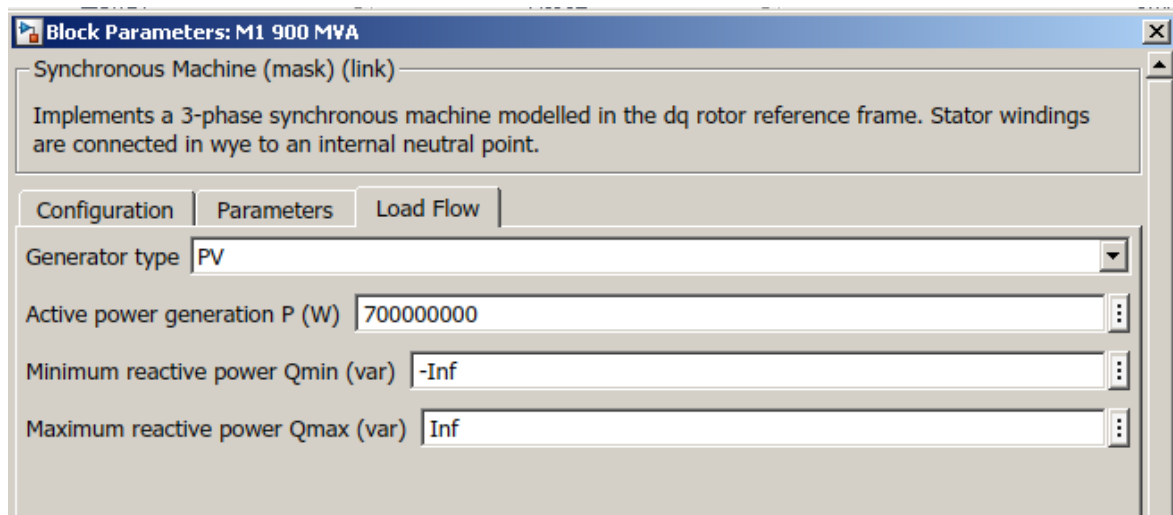


Рисунок 17.10. Характеристики потужності машини

На рис 17.11 показано в загальному випадку розподіл отриманих сигналів механічних характеристик. На рис.17.12 деталізовано перелік сигналів, а саме:

- напруга статора за повздовжньої віссю, у відносних одиницях;
- теж саме за поперечною віссю;
- коливання кута ротора;
- частота обертання ротора;
- потужність генерації;
- коливання швидкості обертання ротора;
- механічний кут ротора.

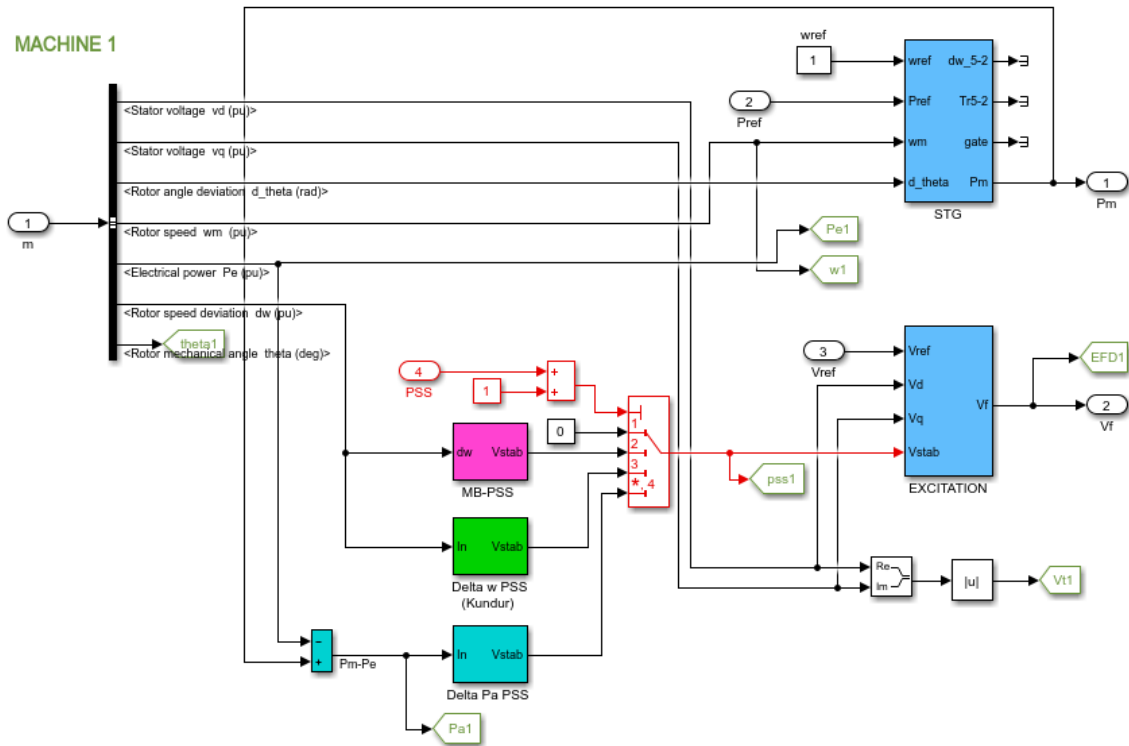


Рисунок 17.11. Канали передачі механічних характеристик генератора

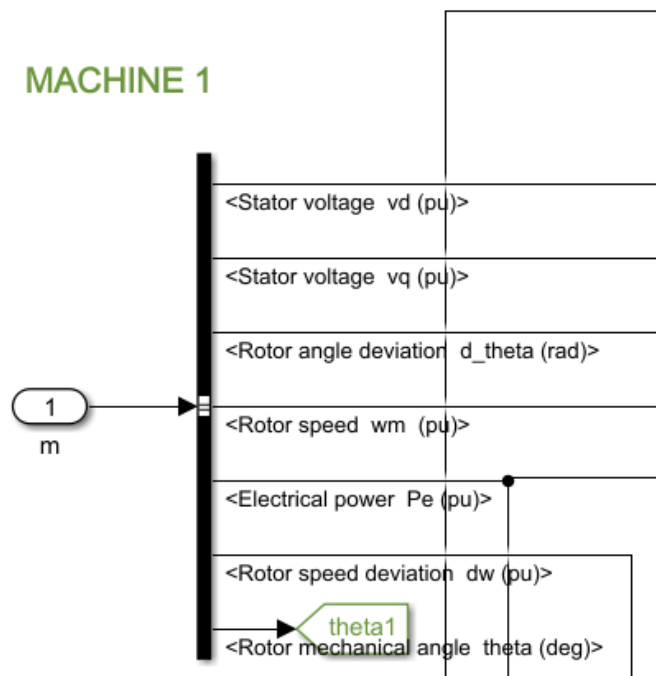


Рисунок 17.12. Вихідні механічні характеристики двигуна

Синхронні генератори працюють у зв'язці із паровими турбінами, параметри якої показано на рис. 17.13. Параметри вбудованого регулятора, як то:

- підсилення сигналу, коефіцієнт відгуку та зона нечутливості;

- стала часу реле регуляції швидкості обертання та сервоприводу;
- час закриття заслонок;
- номінальна швидкість обертання;
- сталі часу;
- обертальні моменти;
- початкова величина вихідної механічної потужності, у відносних одиницях.

Детальніший розгляд залишено на самостійне опрацювання у вигляді індивідуального завдання.

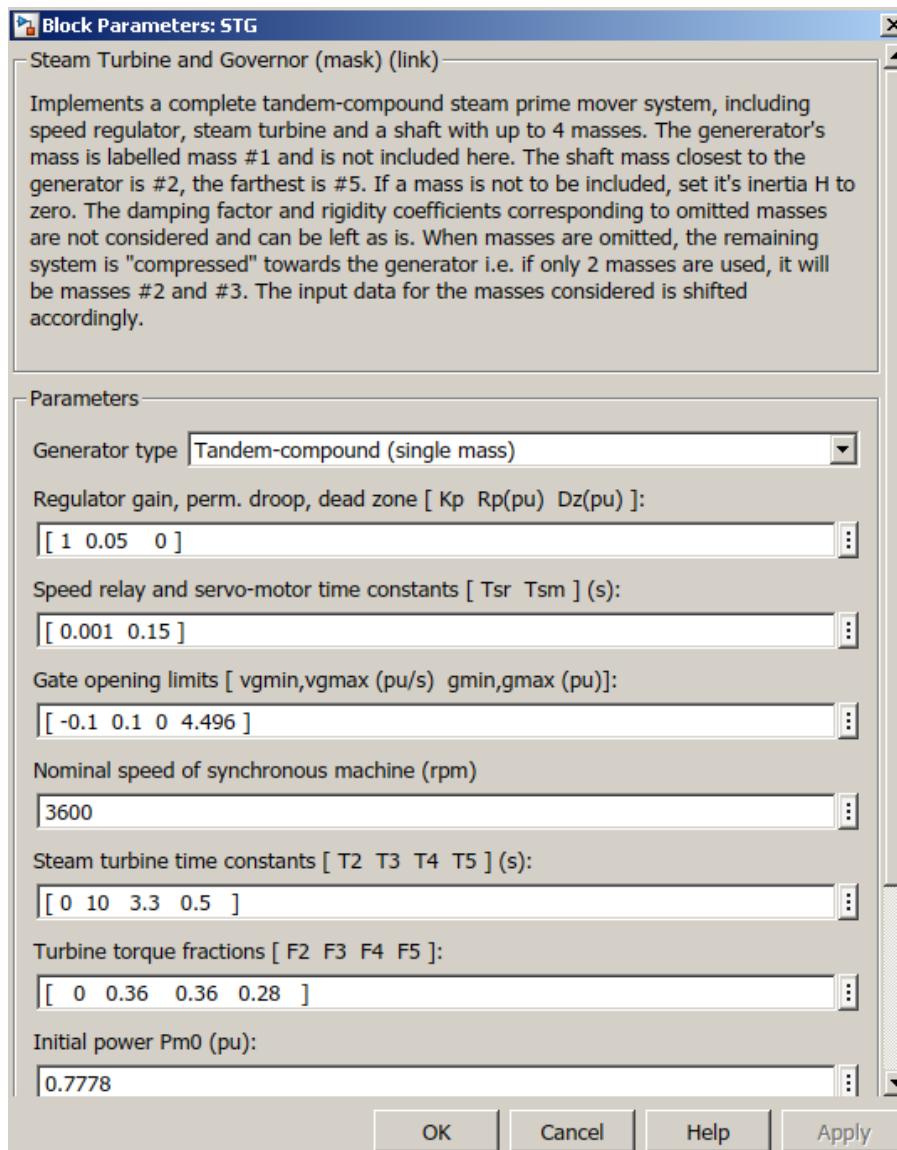


Рисунок 17.13. Турбіна

На рис.17.14. показано модель регулятора напруги, представлено для ознайомлення.

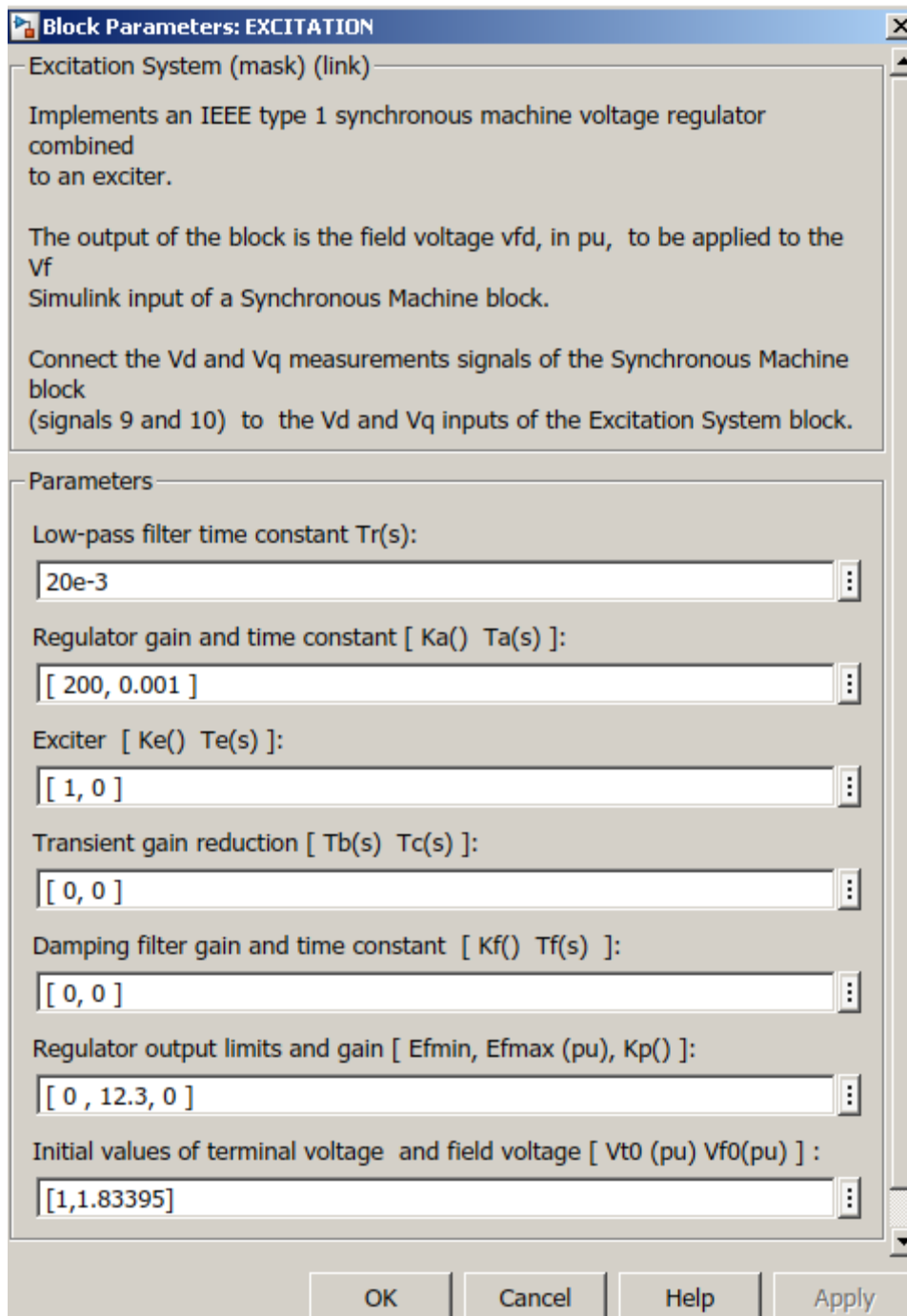


Рисунок 17.14. Регулятор напруги

На рис.17.15 показано параметри підвищувального трансформатора, під'єданого до синхронного генератора. Трансформатор номінальної потужності 900 МВА, з частотою 60 Гц, слугує для підвищення генераторної напруги 20 кВ до напруги системи 230 кВ. Очевидно, що в енергосистемі України такі класи напруг не використовуються, але на проведення досліджень це ніяк не впливає. Усі чотири трансформатори, по два в кожній еквівалентній енергосистемі є ідентичними.

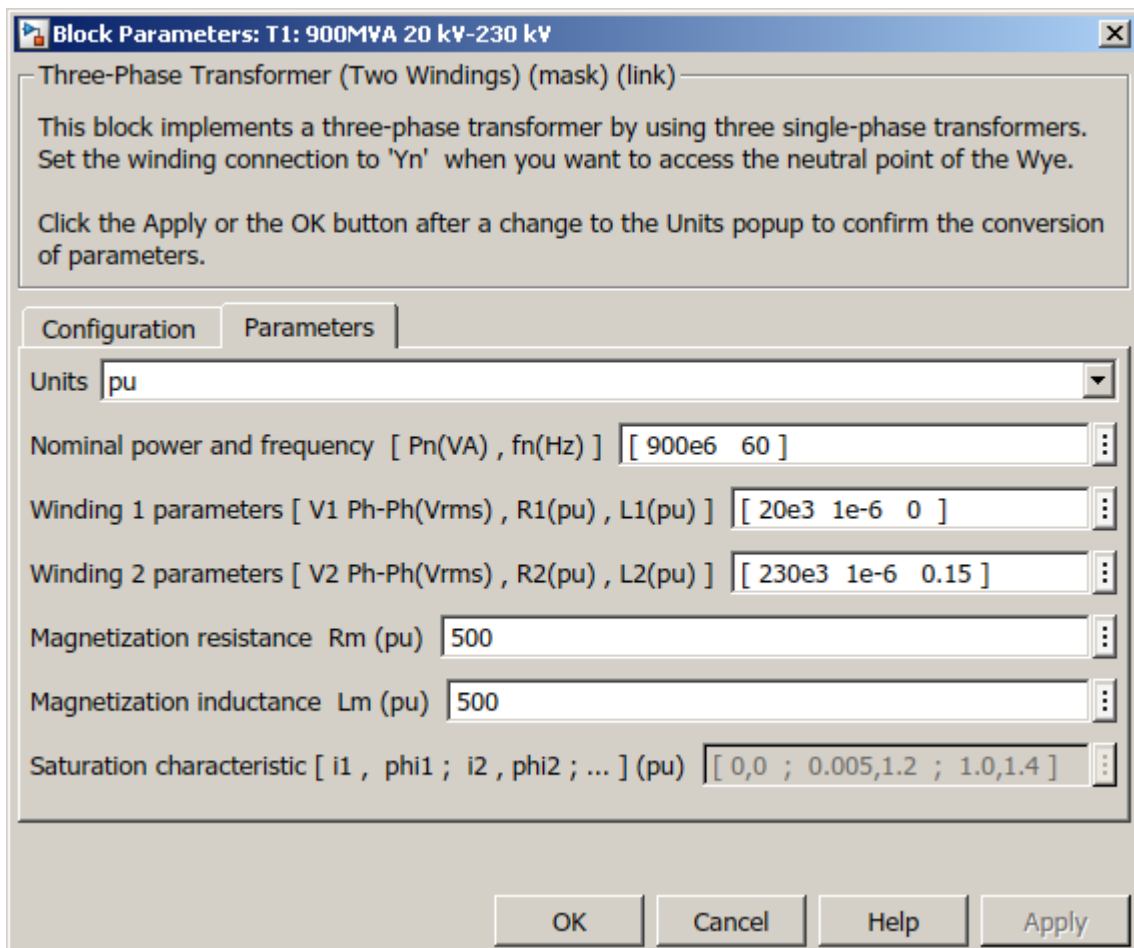


Рисунок 17.15. Трансформатор 20/230 кВ 900 МВА

Від першого до другого генератора прокладено ЛЕП 230 кВ довжиною 25 км, після чого знову прокладено ЛЕП довжиною 10 км до еквівалентного навантаження енергосистеми та установки поперечної компенсації. ЛЕП моделюються π -секціями, параметри зазначених ЛЕП представлено на рис. 17.16.

Кажучи про еквівалентну енергосистему №1 автоматично мова йде щодо енергосистеми №2, рис.17.17. Системи еквівалентні за своєю будовою, відрізняються величиною інерції синхронної машини та величиною еквівалентного навантаження системи.

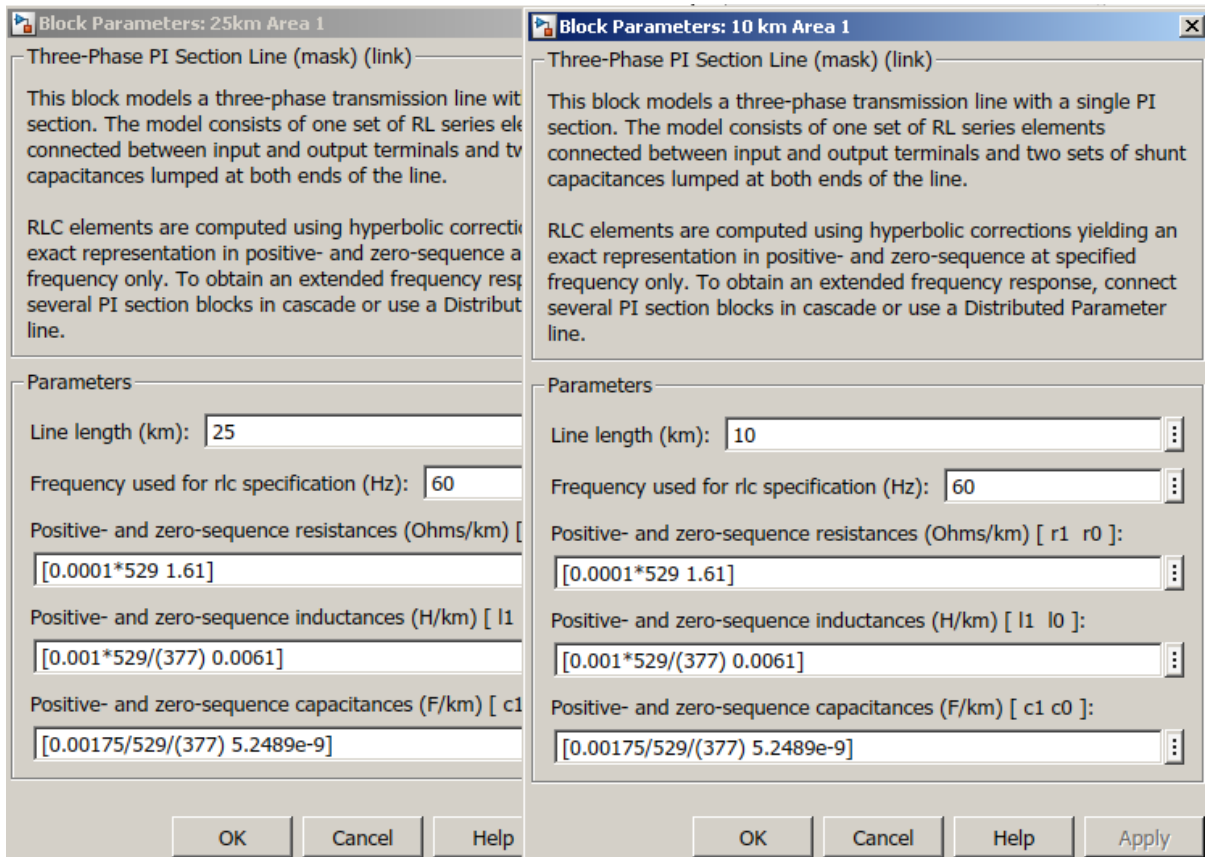


Рисунок 17.16. Параметри ЛЕП

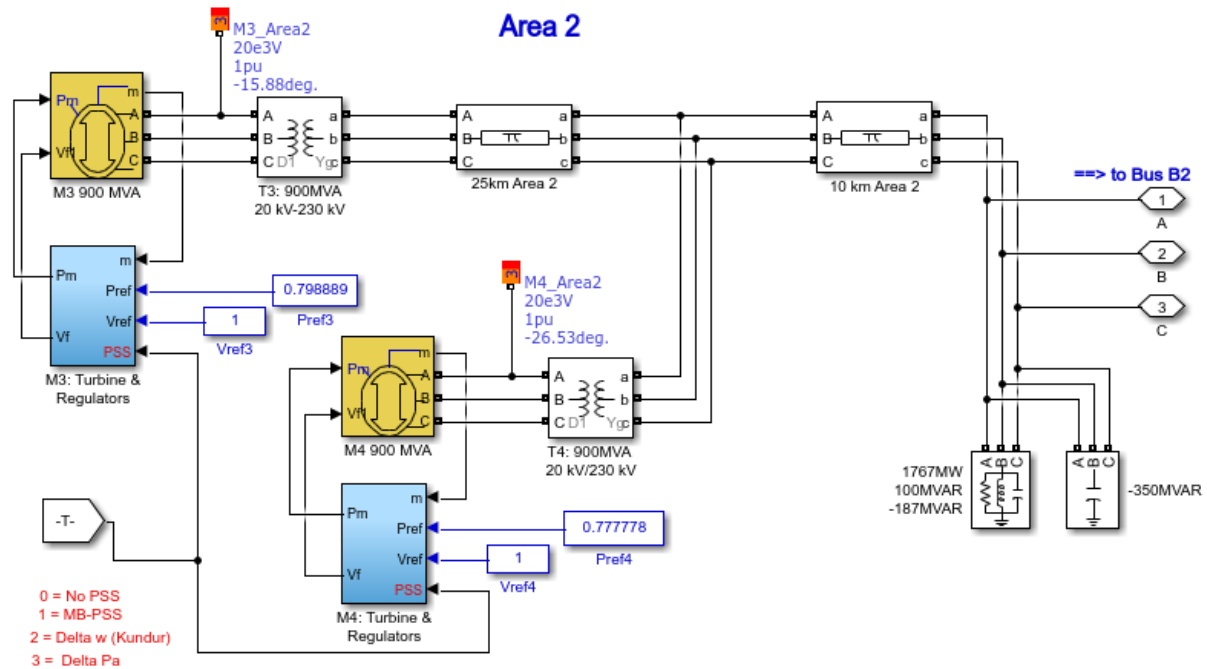


Рисунок 17.17. Еквівалентна енергосистема №2

Індивідуальне завдання

В дереві бібліотек знайти розділ з електричними машинами, обрати дві і детально розписати всі параметри, які потребують введення і за що ці параметри відповідають. Електричні машини знаходяться в бібліотеці елементів за наступною послідовністю: Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Fundamental Blocks/Machines. Теоретично, бібліотека містить 12 електричних машин, проте ця кількість сильно залежить від версії програмного забезпечення. Через це задавати варіанти може бути неможливим.

В дереві бібліотек знайти розділ з турбінами, обрати одну з представлених і детально розписати всі параметри, які потребують введення і за що ці параметри відповідають. Турбіни знаходяться в бібліотеці елементів за наступною послідовністю: Simscape/Electrical/Specialized Power Systems/Fundamental Blocks/Machines/Excitation Systems. Теоретично, бібліотека містить 8 моделей турбін та приводів, проте ця кількість сильно залежить від версії програмного забезпечення. Через це задавати варіанти може бути неможливим.

Прибрати вимикачі та коротке замикання, виставити інерцію всіх машин однаковою. Зняти показники з осцилографів System Machines для усіх представлених типів автоматичного регулятора.

Повернути вихідні показники інерції синхронних машин. Повторити моделювання режиму з наявними регуляторами активної потужності, зняти осцилограми.

Повернути вимикачі. Виконати моделювання, отримати осцилограми.

Повернути коротке замикання, попередньо прибравши вимикачі. Здійснити моделювання режиму, зняти осцилограми.

За результатами аналізу наявних осцилограм, для кожного із зазначених типів збурень та автоматичних регуляторів активної потужності спів ставити час початку перехідного процесу, тривалість перехідного процесу, генератор, що вийшов із синхронізму, вказати нестійкі режими.

СПИСОК РЕКОМЕНДОВАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Електричні мережі та системи /В. М. Сулейманов, Т. Л. Кацадзе. – Київ: НТУУ "КПІ", 2008.
2. Районні електричні мережі: Метод. вказівки до виконання курсового проекту з дисципліни «Електричні системи та мережі» (Економічна частина) / Уклад.: В.М. Сулейманов, В.В. Чижевський, О.М. Янковська — К.: НТУУ «КПІ», 2009. - 95 с.
3. Дубовик В.П., Юрик І.І. Вища математика. Навч. посібн. – К.: А.С.К., 2006. – 646 с.
4. Розрахунок електричних кіл несинусоїдного періодичного струму. Метод. вказівки до виконання розрахунково-графічних робіт з курсу “Теоретична електротехніка” для студентів електротехнічного, системотехнічного та електроенергетичного фаху всіх форм навчання. / Уклад.: І. А. Курило, І. Н. Намацалюк. - К.: ІВЦ «Політехніка», 2012. - 28 с.
5. Програмування в MathCAD: навч.-метод. посібник для бакалаврів інженерних та фізичних спеціальностей / уклад. В. К. Толстих. – Донецьк: ДонНУ, 2010. – 128 с.
6. Інтелектуальні технології управління та імітаційного моделювання в складних системах/Кирик В.В., Гавриленко О.В., Кирик Н.В. Навчальний посібник. – Київ: Академія муніципального управління, 2010. – 136 с.
7. Кирик В.В. Електричні мережі та системи. Навчальний посібник – Київ: Видавництво «Політехніка», 2014.
8. Малогулка Ю.В., Бурикін О.Б., Кацадзе Т.Л., Нетребський В.В. за ред. Лежнюка П.Д. Електричні системи і мережі. Частина 1: Навчальний посібник – Вінниця: ВНТУ, 2020.-206 с.
9. Регулювання режимів електричних систем - 3 : Практикум [Електронний ресурс] : навч. посіб. Уклад.: Т. Л. Кацадзе, О. М. Янковська. – Київ : КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. – 74 с.
10. Продукція та рішення MatLab. [Електронний ресурс]. Режим доступу: https://www.mathworks.com/help/physmod/sps/examples.html?category=specialized-power-systems&exampleproduct=all&s_tid=CRUX_lftnav
11. P. Kundur, Power System Stability and Control, McGraw-Hill, 1994, Example 12.6, p. 813
12. Давиденко В.А. Методичні вказівки до виконання індивідуальних завдань з навчальної дисципліни «Електричні системи та мережі» - Рівне: НУВГП, 2017.
13. Bayliss. Transmission and Distribution Electrical Engineering / Colin Bayliss, Brian Hardy. – Elsevier, 2006.
14. Grigsby L.L. Electric Power Generation, Transmission and Distribution / Leonard L. Grigsby. - CRC Press, 2007.-502 p.
15. Правила улаштування електроустановок – Міненерговугілля України, 2017.-617 с.

ДОДАТОК А

ДОВІДКОВА ІНФОРМАЦІЯ ЗА ТЕМАТИКОЮ ДАЛЬНЬОЇ ЕЛЕКТРОПЕРЕДАЧІ

Номінальний переріз, мм ²	Алюмінієва частина провідника		Сталеве осердя провідника	
	Кількість проволок	Номінальний діаметр проволок	Кількість проволок	Номінальний діаметр проволок
240/32	24	3,60	7	2,40
240/39	26	3,40	7	2,65
300/39	24	4,00	7	2,65
300/48	26	3,80	7	2,95
315/21,8	45	2,99	7	1,99
315/51,3	26	3,93	7	3,05
330/30,0	48	2,98	7	2,30
330/43,0	54	2,80	7	2,80
400/18	42	3,40	7	1,85
400/27,7	45	3,36	7	2,24
400/51	54	3,05	7	3,05
400/51,9	54	3,07	7	3,07
450/31,1	45	3,57	7	2,38
500/26	42	3,90	7	2,20
500/34,6	45	3,76	7	2,51
560/38,7	45	3,98	7	2,65
630/43,6	45	4,22	7	2,81
710/49,1	45	4,48	7	2,99

Рисунок ДА.1. Конструкція провідників ДЕП

Автотрансформатор 400 кВ.

АОДЦТН–210000/400/330. $S_T=210$ МВА; $S_{T\text{ НН}}=67$ МВА; $U_{ВН}=400/\sqrt{3}$ кВ; $U_{СН}=330/\sqrt{3}$ кВ; $U_{НН}=10,5, 11, 13,8, 36,7, 38,5$ кВ; $\Delta P_{x.x.}=80$ кВт; $\Delta P_{к.з.}=350$ кВт; $u_{к\text{ в-с}}=9,9$ %; $u_{к\text{ в-н}}=18$ %; $u_{к\text{ с-н}}=17,7$ %; $I_{x.x.}=0,8$ %.

Таблиця ДА.1. Для визначення довжини гірлянди ізолятора

Ступінь забруднення	Питома довжина витoku для ізоляторів номінальної напруги 110 – 750 кВ, λ_e , см/кВ
1	1,6
2	2,0
3	2,5
4	3,1

Питома довжина витоку множиться на рівень номінальної напруги:

$$L = \lambda_e \cdot U_{ном}$$

Таблиця ДА.2. Підвісні скляні ізолятори

Ізолятор	Нормована довжина витоку одного ізолятора, мм	Монтажна довжина ізолятора, мм
ПС160Д	370	170
ПСВ210А	552	195
ПС300В	390	195
ПСВ120Б	442	146

Приклад розрахунку довжини гірлянди ізоляторів

$U_{ном}=330$ кВ, ізолятор ПС160Д, 4 зона забруднення

$$n_{із} = \frac{\lambda_e \cdot U_{ном}}{l_e} = \frac{3,1 \cdot 330}{370} \cdot 10 = 27,64 \Rightarrow 28(од)$$

для класів напруги 330 – 400 кВ додається +1 ізолятор

для класів напруги 500 – 750 кВ додається +2 ізолятори

довжина гірлянди ізоляторів становить

$$l_{із} = (n_{із} + 1) \cdot H = (28 + 1) \cdot 170 = 4930(мм)$$

Таблиця ДА.3. Габарит, D_{im}

Клас напруги, кВ	Габарит, м
400	6,5..7,8
500	6,7..8,0
750	7,1..11,5

Таблиця ДА.4. Коефіцієнт

середнього геометричного радіусу сталюалюмінієвого проводу, k_g

Кількість алюмінієвих проволочок у складі сталюалюмінієвого проводу	Коефіцієнт середнього геометричного радіусу
6	0,768
12	0,859
26	0,809
30	0,826
54	0,810

Таблиця ДА.5. Коефіцієнти укрутки сталевалюмінієвих проводів, k_t

Кількість проволок (алюміній/ сталь)	Коефіцієнт укрутки	Кількість проволок (алюміній/ сталь)	Коефіцієнт укрутки
6/1	0,16826	48/7	0,02120
18/1	0,05648	54/7	0,01894
18/19	0,05644	54/19	0,01894
24/7	0,04245	54/37	0,01894
24/37	0,04238	64/61	0,01894
26/7	0,03920	72/7	0,01408
30/7	0,03400	76/7	0,01344
30/19	0,03400	84/7	0,01217
42/7	0,02432	90/37	0,01140
45/7	0,02314	96/19	0,01065

Тип	Напруга, кВ	Потужність, <u>кВАр</u>
КМ1-0,38-13-3У3	0,38	13
КМ1-0,50-13-3У3	0,5	13
КМ1-0,66-13-3У3	0,66	13
КМ2-0,38, 26-3У3	0,38	26
КМ2-0,50-26-3У3	0,5	26
КМ2-0,66-26-3У3	0,66	26
КС1-0,23-9-3У3	0,23	9
КС0-0,23-4-3У3	0,23	4
КС0-0,38-12,5-3У3	0,38	12,5
КС0-0,66-12,5	0,66	12,5

Рисунок ДА.2. Технічні характеристики одиначної конденсаторної банки установки повздовжньої компенсації

Витяг із каталогу опор для визначення погонного реактансу (індуктивного опору) та сусцептансу (ємнісної провідності)

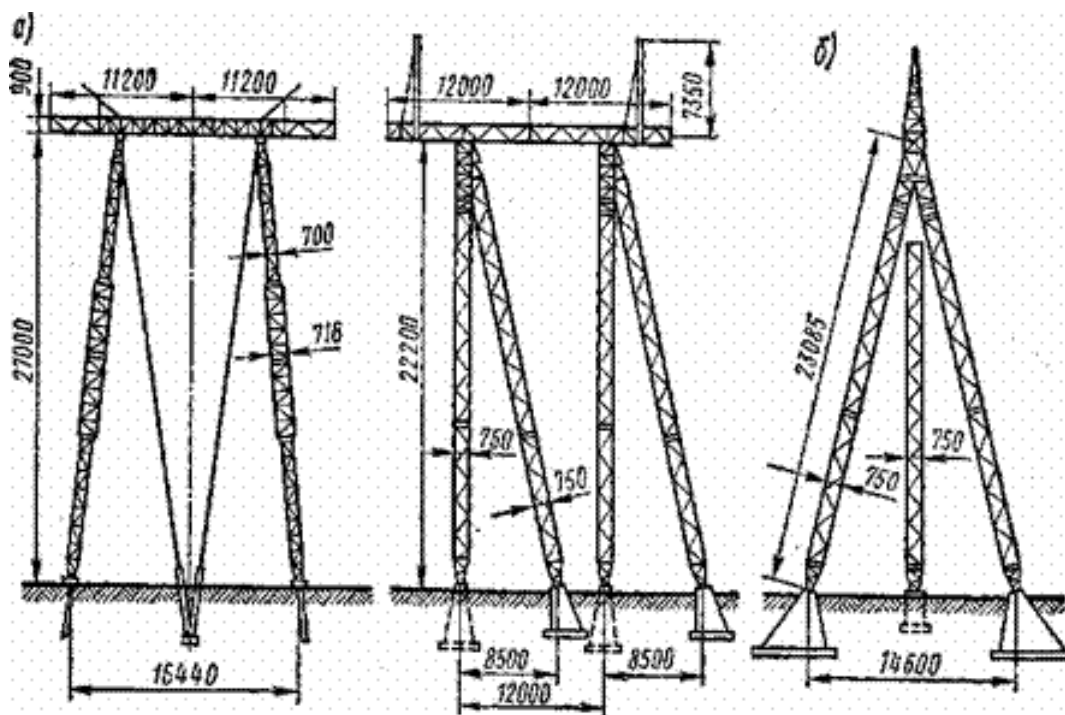
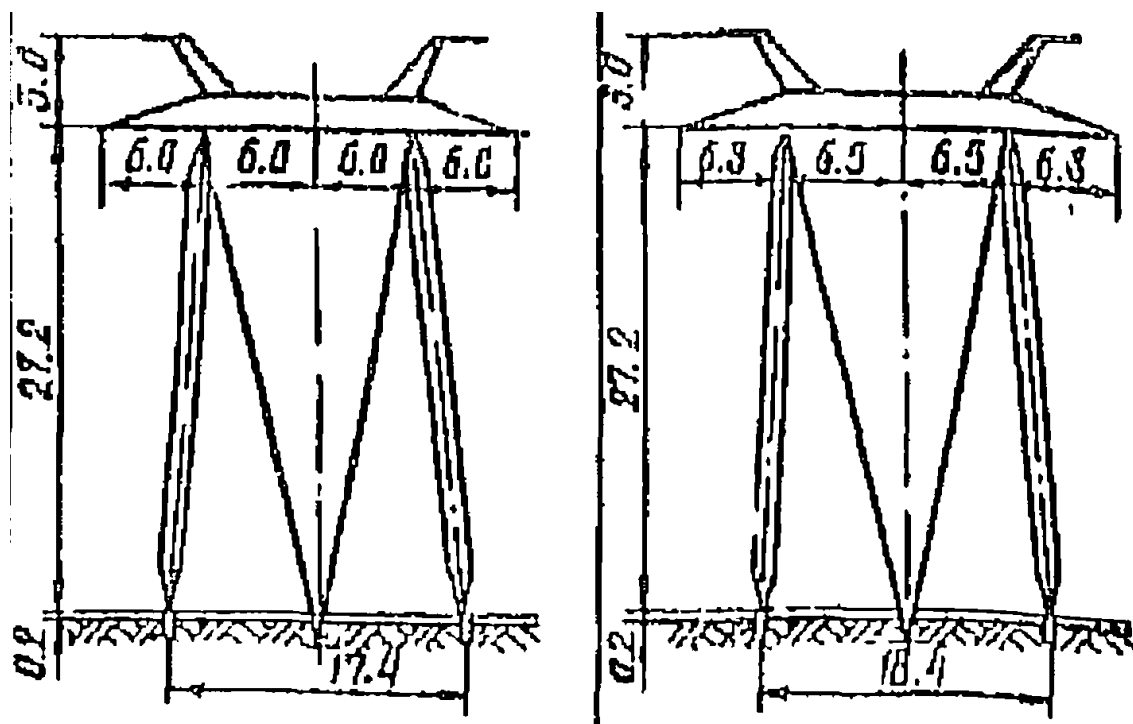


Рисунок ДА.3. Опори 400 кВ



27, 2 м; 6,0+6,0 м; 6,0+6,0 м

27,2 м; 6,3+6,5 м; 6,5+6,3 м

Рисунок ДА.4. Опори 500 кВ

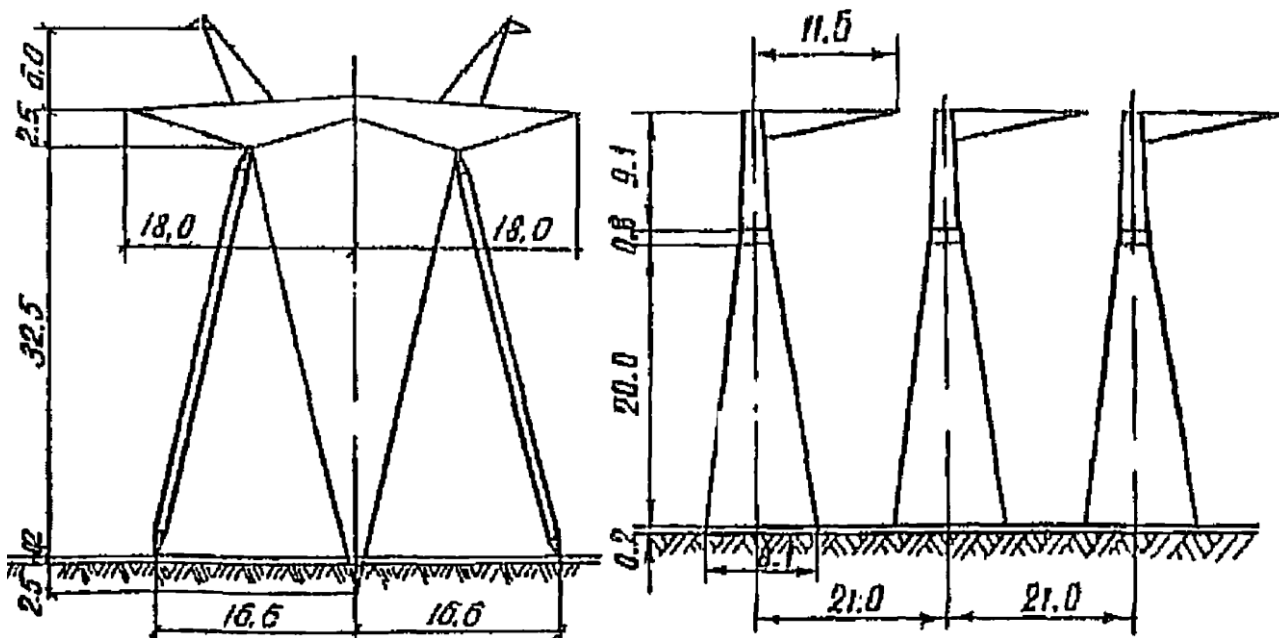


Рисунок ДА.5. Опоры 750 кВ