

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

АВТОМАТИЗОВАНІ СИСТЕМИ КЕРУВАННЯ ТА ОПТИМІЗАЦІЯ РЕЖИМІВ ЕНЕРГОСИСТЕМ

Методичні вказівки

до виконання курсової роботи



Київ – 2012

Міністерство освіти і науки, молоді та спорту України
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут»

**Автоматизовані системи керування
та оптимізація режимів енергосистем**

Методичні вказівки

до виконання курсової роботи
для студентів і студентів-іноземців усіх форм навчання
освітньо-кваліфікаційних рівнів
«спеціаліст» (7.05070102) і «магістр» (8.050701)
спеціальності 7.05070102 «Електричні системи і мережі»

*Рекомендовано Вченою радою
факультету електроенерготехніки та автоматики НТУУ «КПІ»*

Київ
НТУУ «КПІ»
2012

Автоматизовані системи керування та оптимізації режимів енергосистем: метод. вказівки до виконання курсової роботи для студ. і студ.-іноземців освітньо-кваліфікаційних рівнів «спеціаліст» (7.05070102) і «магістр» (8.050701) спец. «Електричні системи і мережі» / Уклад.: С. В. Казанський, В. В. Кирик, О. М. Паненко. – К.: НТУУ «КПІ», 2012. – 52 с.

*Рекомендовано Вченою радою факультету
електроенерготехніки та автоматики НТУУ КПІ
(Протокол № 3 від 31.10.2011 р.)*

Навчальне видання

**Автоматизовані системи керування
та оптимізація режимів енергосистем**

Методичні вказівки

до виконання курсової роботи
для студентів і студентів-іноземців усіх форм навчання
освітньо-кваліфікаційних рівнів
«спеціаліст» (7.05070102) і «магістр» (8.050701)
спеціальності 7.05070102 «Електричні системи і мережі»

Укладачі: *Казанський Сергій Володимирович*
Кирик Валерій Валентинович
Паненко Олена Миколаївна

Відповідальний редактор *В.М. Сулейманов, канд. техн. наук, проф.*

Рецензент *О.В. Хоменко, канд. техн. наук, доц.*

*За редакцією укладачів
Надруковано з оригінал-макета замовника*

ЗМІСТ

ВСТУП	4
1 Бібліотека SimPowerSistem	5
1.1 Бібліотека Electrical Sources.....	7
1.2 Бібліотека Measurement	9
1.3 Бібліотека Elements	12
1.4 Приклад побудови моделі електричного ланцюга з powerlib-бібліотекою в SimPowerSystems.....	23
2 Моделювання режиму роботи трифазної замкненої електричної мережі з використанням пакету прикладних програм SimPowerSistem	31
2.1 Складання моделі та введення вхідних даних	32
2.2 Моделювання режиму роботи замкненої електричної мережі	42
ЛІТЕРАТУРА	51
Додаток 1	52

ВСТУП

Методичні вказівки містять теоретичний матеріал, необхідний для виконання курсової роботи з дисципліни «Автоматизовані системи керування та оптимізація режимів енергосистем» студентами та студентами-іноземцями спеціальності 7.05070102 «Електричні системи і мережі».

Тема курсової роботи: «Моделювання режимів роботи трифазної замкненої електричної мережі з використанням пакету прикладних програм SimPowerSystems».

Виконання курсової роботи сприяє закріпленню у студентів лекційного матеріалу та набуття ними практичних навичок з моделювання режимів роботи замкнених електричних мереж і виконання інженерних розрахунків параметрів усталених режимів електричних систем.

У процесі виконання курсової роботи студент набуває навичок використання імітаційного моделювання для дослідження режиму роботи електричної мережі. Для моделювання студент використовує пакет прикладних програм SimPowerSystems, який дозволяє швидко будувати моделі складних електроенергетичних систем. Крім створення топології з певного набору ланцюгів, SimPowerSystems дозволяє виконати аналіз процесів взаємодії системи з механічними елементами та пристроями контролю.

Під час виконання курсової роботи студент набуває вміння побудови моделі електричної мережі засобами бібліотеки SimPowerSystems. За допомогою наборів блоків електричних елементів з відповідними параметрами, які відповідають схемам заміщення електричних апаратів та елементів реальної електричної мережі, студенти моделюють роботу електричної мережі та виконують розрахунок усталеного режиму цієї електричної мережі в певний період часу. Студент набуває вміння оцінювати отримані результати і в разі необхідності змінювати модель електричної мережі залежно від зміни умов її роботи.

1 Бібліотека SimPowerSystems

Бібліотека SimPowerSystems призначена для моделювання електричних і механічних систем, а також систем керування. Як і інші складові toolbox продукту MATLAB, вона тісно пов'язана з середовищем Simulink.

Системи передавання та перетворення електроенергії – це комбінації електричних ланцюгів та електромеханічних пристроїв (двигунів, генераторів, електричних мереж, перетворювачів тощо). Зростаючі вимоги до підвищення енергоефективності електроенергетичних систем змушують проєктувальників використовувати складні електронні пристрої та інтелектуальні системи керування, які, в свою чергу, висувають додаткові вимоги до інструментів та математичних методів аналізу. При ускладненні аналітичного опису нелінійних систем єдиним способом дослідження є імітаційне моделювання.

SimPowerSystems – сучасний інструмент дослідження, який дозволяє вченим та інженерам моделювати складні електроенергетичні системи. SimPowerSystems використовує середовище Simulink і дозволяє досить швидко виконувати аналіз процесів при взаємодії системи з механічними і тепловими елементами, а також пристроями контролю. При цьому всі електричні блоки моделювання взаємодіють із середовищем Simulink, яке використовується як його обчислювальний елемент.

Бібліотека SimPowerSystems містить елементи типового силового устаткування – трансформаторів, електричних ліній, машин та силової електроніки. SimPowerSystems має потужну систему моделей демонстрації. Головна бібліотека SimPowerSystems, організована в бібліотеки відповідно до їх властивостей, і при подвійному натисканні на

зображення бібліотеки відкривається доступ до відповідних блоків. Головне вікно бібліотеки SimPowerSystems містить блок Powergui, який має графічний інтерфейс користувача для аналізу ustalених процесів електричних ланцюгів.

Нелінійні блоки збережені в спеціальній бібліотеці і використовуються в SimPowerSystems для побудови еквівалентних нелінійних моделей електричних ланцюгів.

Бібліотека SimPowerSystems (SPS) має сім основних розділів:

1. Electrical Sources – джерела електричної енергії.
2. Connectors – з'єднувачі.
3. Measurements – вимірювальні та контрольні пристрої.
4. Elements – електротехнічні елементи.
5. Power Electronics – пристрої силової електроніки.
6. Machines – електричні машини.
7. Extra Library – додаткові електротехнічні пристрої.

Використовуючи блоки із цих розділів, можна створити повноцінну модель досить складної електротехнічної системи.

Методика створення SPS-моделі полягає у тому, що потрібно виконати розміщення блоків на схемі, задати їх параметри, з'єднати блоки та установити параметри розрахунку моделі в цілому.

SPS-моделі мають деякі особливості:

1. Входи і виходи SPS-блоків не показують напрямок передавання сигналу, оскільки фактично є еквівалентами електричних контактів. Таким чином, електричний струм може через вхід або вихід блоку протікати у двох напрямках: як усередину блоку, так і назовні.

2. Сполучні лінії між блоками є, по суті, електричними проводами, по яких струм може протікати також у двох напрямках.

3. Блоки SimPowerSystems не можуть бути безпосередньо з'єднані один із одним. Сигнал від S-блоку можна передати до SPS-блоку через керовані джерела струму або напруги, а навпаки – за допомогою вимірювачів струму або напруги.

4. Кілька ліній зв'язку (проводів) можуть бути з'єднані між собою.

5. Схеми, в яких є нелінійні блоки, розраховують із використанням таких методів:

- ode15s – багатокроковий метод змінного порядку (від 1 до 5), що використовує формули чисельного диференціювання;
- ode23tb – неявний метод Рунге-Кутта на початку рішення і метод, що використовує формули зворотного диференціювання 2-го порядку, які надалі дають найкращі результати за швидкодією.

В курсовій роботі розрахунок моделі буде проводитися з використанням апарату розрахунку **ode23tb**.

1.1 Бібліотека Electrical Sources (джерела електричної енергії)

Розпочинаємо роботу з запуску додатку Simulink, який знаходиться на головній панелі програми MATLAB. Цей додаток є основним засобом створення електричної моделі. Елементи, які будуть використовуватися знаходяться, в основному, в бібліотеці SimPowerSystems, і один допоміжний елемент з бібліотеки Simulink – Display.

Відкриємо браузер Simulink Library і знаходимо бібліотеку SimPowerSystems (рис. 1.1):

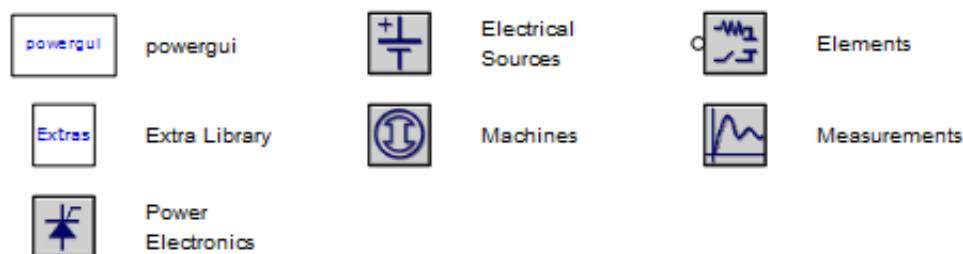


Рис. 1.1. Бібліотека SimPowerSystems

До складу бібліотеки входять джерела постійної і змінної напруги і струму, керовані джерела напруги і струму, а також трифазні джерела змінної напруги.

Як приклад, нижче наведено блок *AC Voltage Source*.

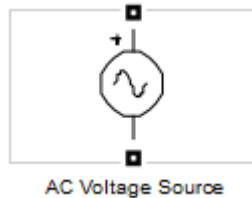


Рис. 1.2. Піктограма блоку *AC Voltage Source*

Призначення: джерело синусоїдальної напруги з постійною амплітудою. Напруга джерела *AC Voltage Source* описується наступним виразом:

$$u = A \cdot \sin(2\pi f t + \phi),$$

де A – амплітуда напруги; f – частота; ϕ – початкова фаза напруги.

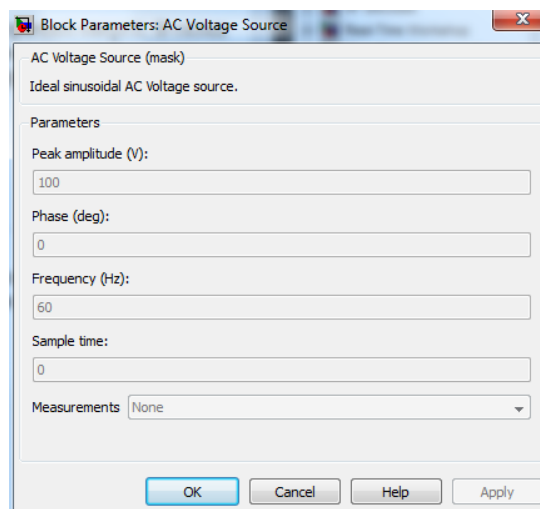


Рис. 1.3. Вікно задавання параметрів блоку *AC Voltage Source*

Параметри блоку:

Peak Amplitude (V) [Амплітуда (В)] – амплітуда вихідної напруги;

Phase (deg) [Фаза (град)] – початкова фаза;

Frequency (Hz) [Частота (Гц)] – частота джерела;

Sample time [Крок дискретизації] – крок дискретизації за часом вихідної напруги джерела при створенні дискретних моделей.

Measurements [Вимірювані змінні] – дозволяє вибрати змінні, які передаються в блок Multimeter і які потім можна побачити за допомогою блоку Scope. Значення параметра вибираються зі списку: None (немає змінних для відображення) або Voltage (вихідна напруга джерела).

Блок є ідеальним джерелом напруги, його власний опір дорівнює нулю.

1.2 Бібліотека Measurements (вимірювальні і контрольні пристрої)

Блок *Three-Phase V-I Measurement* – трифазний вимірювач (рис. 1.4). Призначення – вимірювання струму і напруги в 3-фазних ланцюгах.

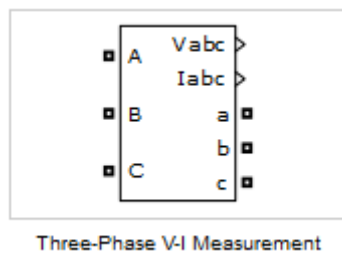


Рис. 1.4. Піктограма блоку *Three-Phase V-I Measurement*

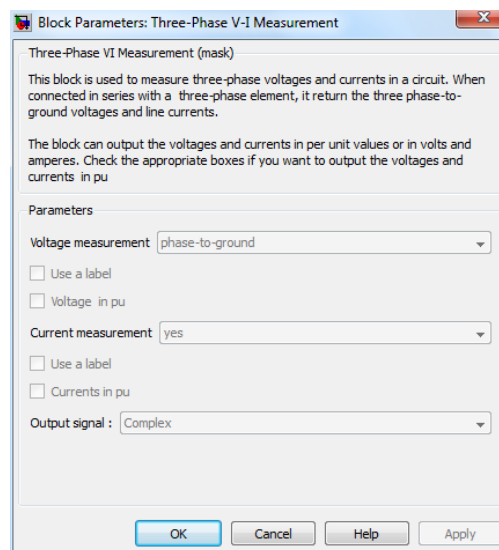


Рис. 1.5. Вікно задавання параметрів блоку *Three-Phase V-I Measurement*

Параметри блоку:

Voltage Measurement [Вимірювання напруг] – у цій графі проводиться вибір вимірюваної напруги із значень: No (напруга не вимірюються); Phase-to-ground (вимірювання фазної напруги); Phase-to-phase (вимірювання лінійної напруги).

Use a label [Використовувати мітку]. При установці прапорця сигнал буде передаватися до блоку From. Параметр Goto tag блоку From має відповідати імені мітки, заданої в графі Signallabel.

Signallabel [Мітка сигналу].

Voltages in p.u [Вимірювання напруг у відносних одиницях]. При установці прапорця виміряні напруги будуть перетворені за наступним виразом:

$$U_* = \frac{U}{U_6 * \sqrt{2}/\sqrt{3}},$$

де U_6 – базисна напруга, що задається в графі Base voltage.

Base voltage (Vrms phase-phase) [Базисна напруга (діюче значення лінійної напруги)].

Current measurement [Вимірювання струмів]. У цій графі проводиться вибір вимірювання струмів:

~ no – струми не вимірюються;

~ Yes – струми вимірюються.

Use alabel [Використовувати мітку]. При установці прапорця сигнал буде передаватися до блоку From. Параметр Goto tag блоку From має відповідати імені мітки, заданої в графі Signallabel.

Signallabel [Мітка сигналу].

Currents in p.u. [Вимірювання струмів у відносних одиницях]. При установці прапорця вимірювання струми будуть перетворені за наступним виразом:

$$I_* = \frac{I}{S_b * \sqrt{2} / (U_b * \sqrt{3})},$$

де S_b – базисна потужність, що задається в графі Base power.

Base power (VA 3phase) [Базисна потужність]. Повна потужність трьох фаз.

Output signal [Вихідний сигнал]. Вид вихідного сигналу блоку. Вибір значення параметра можливий, тільки якщо з допомогою блоку Powergui встановлений режим розрахунку схеми комплексним методом (Phasor simulation). У цьому випадку значення параметра вибирається зі списку:

- ~ Magnitude – амплітуда (скалярний сигнал);
- ~ Complex – комплексний сигнал;
- ~ Real-Imag – вектор, який складається з двох елементів (дійсна і уявна складова сигналу);
- ~ Magnitude-Angle – вектор, який складається з двох елементів – амплітуда і аргумент сигналу.

Вихідними сигналами блоку є вектори сигналів вимірювальних змінних.

Блок *3-Phase Instantaneous Active and reactive power* – трифазний вимірювач миттєвих активної і реактивної енергії (рис. 1.6).

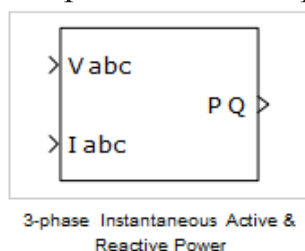


Рис. 1.6. Піктограма блоку *3-Phase Instantaneous Active and reactive*

Блок призначений для вимірювання миттєвих активної і реактивної енергії.

Вхідні параметри: 3-фазний миттєвий струм і 3 фазна миттєва напруга.

Вихідні дані: розраховані значення активної і реактивної енергії, яка протікає по ділянці з даною напругою і струмом.

1.3 Бібліотека Elements (електротехнічні елементи)

Блок *Three-Phase Series RLC Branch* – трифазна RLC-ланка (рис. 1.7).

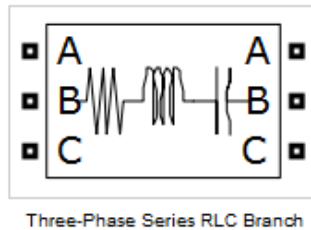


Рис. 1.7. Піктограма блоку *Three-Phase Series RLC Branch*

Блок *Three-Phase Series RLC Branch* моделює трифазну ланку, що складається з трьох RLC-ланок.

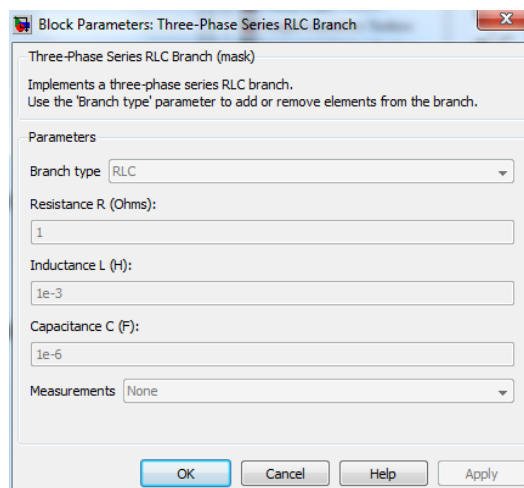


Рис. 1.8. Вікно задавання параметрів блоку *Three-Phase Series RLC Branch*

Параметри блоку:

Branch type [Тип ланцюга] – задає конфігурацію ланцюга – RLC, R, L, C, RL, RC, LC.

Resistance R (Ohms) [Опір (Ом)] – значення активного опору в одній фазі, Для виключення резистора з ланцюга значення опору можна задати рівним нулю (на піктограмі блоку резистор відобразиться не буде).

Inductance L (H) [Індуктивність (Гн)] – значення індуктивності в одній фазі. Для виключення індуктивності з ланцюга її величину можна задати рівною нулю (на піктограмі блоку індуктивність відобразиться не буде).

Capacitance C (F) [Ємність (Ф)] – значення ємності в одній фазі. Для виключення конденсатора з ланцюга значення ємності можна задати рівним ∞ (нескінченність). У цьому разі конденсатор на піктограмі блоку показаний не буде.

Measurements [Вимірювані змінні] – параметр дозволяє вибрати змінні, які потім можна побачити за допомогою блоку Score. Значення параметра вибираються зі списку:

None – немає змінних для відображення;

Branch Voltage – напруга на затискачах ланцюга;

Branch current – струм ланцюга;

Branch voltage and current – напруга і струм ланцюга.

Відображуваним сигналам в блоці Multimeter присвоюються мітки:

I_b – дл струм ланцюга;

» U_b – напруга ланцюга.

Блок *Three-Phase Series RLC Load* – трифазне RLC-навантаження (рис. 1.9).

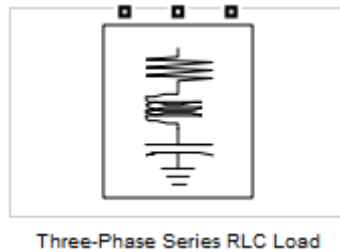


Рис. 1.9. Піктограма блоку *Three-Phase Series RLC Load*

Блок *Three-Phase Series RLC Load* моделює трифазну ланку, що складається з трьох послідовних RLC-навантажень. Параметри ланцюга задаються через потужності фаз ланцюга при номінальних напрузі і частоті.

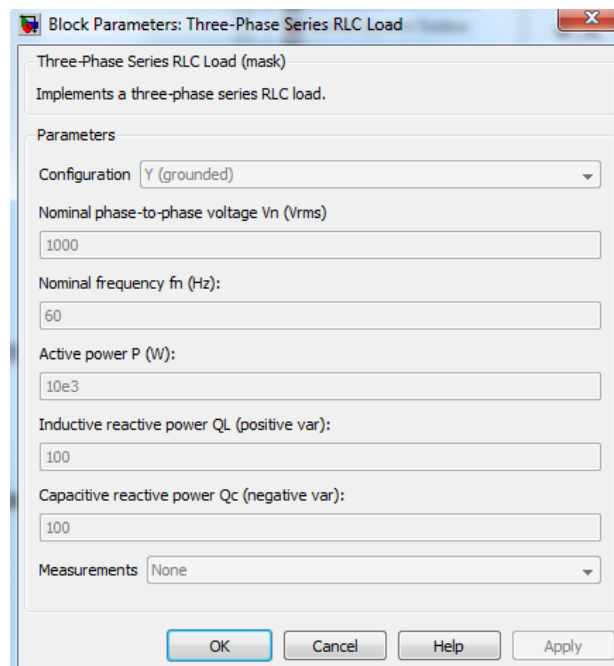


Рис. 1.10. Вікно задавання параметрів блоку *Three-Phase Series RLC Load*

Параметри блоку:

Configuration [З'єднання] – параметр задає схему з'єднання трифазного ланцюга. Значення вибирається зі списку:

~ Y (grounded) – зірка з заземленою нейтраллю;

~ Y (floating) – зірка без нульового проводу;

~ Y (neutral) – зірка з нульовим проводом;

~ Delta – трикутник.

Nominal phase-phase voltage V_n (V_{rms}) [Номинальна лінійна напруга (В)] – значення чинної лінійної напруги ланцюга, для якого визначені потужності елементів.

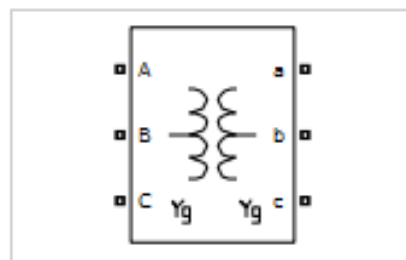
Nominal frequency f_n (Hz) [Номинальна частота (Гц)] – значення частоти, для якої визначені потужності елементів.

Active power P (W) [Активна потужність на три фази (Вт)].

Inductive reactive power Q_L (positive var) [Реактивна потужність індуктивності на три фази (ВАр)] – споживана індуктивністю реактивна потужність.

Capacitive reactive power Q_C (negative var) [Реактивна потужність ємності на три фази (ВАр)] – реактивна потужність, що віддається конденсатором. У графі вводиться абсолютне значення потужності (без урахування знака).

Блок *Three-phase Transformer (Two Windings)* – трифазний двообмотковий трансформатор (рис. 1.11).



Three-Phase Transformer (Two Windings)

Рис. 1.11. Піктограма блоку *Three-phase Transformer (Two Windings)*

Блок *Three-phase Transformer (Two Windings)* моделює трифазний двообмотковий трансформатор. Модель побудована на основі трьох однофазних трансформаторів. У моделі може враховуватися нелінійність характеристики намагнічування матеріалу осердя.

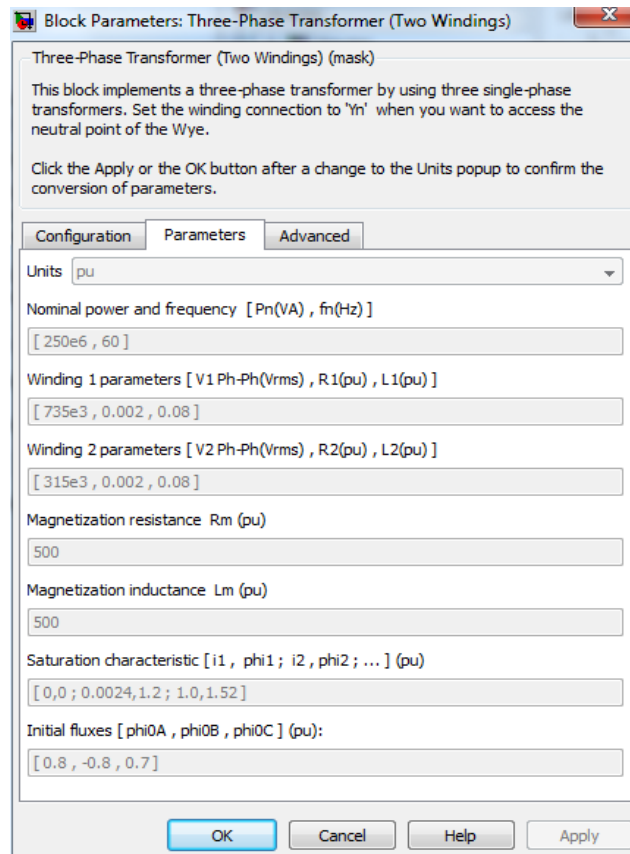


Рис. 1.12. Вікно задавання параметрів блоку *Three-phase Transformer (Two Windings)*

Параметри блоку:

Nominal power and frequency [P_n (VA) f_n (Hz)]:

[Номінальна повна потужність (ВА) і частота (Гц) трансформатора].

Winding 1 (ABC) connection [Y, Yn, Yg, Delta (D1), Delta (D11)]:

[Схема з'єднання первинної обмотки]. Значення параметра вибирається з списку:

- Y – зірка;

- Y_n – зірка з нейтраллю;
- Y_g – зірка з заземленою нейтраллю;
- Delta (D1) – трикутник першої групи (зсув напруг на 30° ел. в бік відставання в порівнянні із з'єднанням у зірку);
 - Delta (D 11) - трикутник одинадцятий групи (зсув напруг на 30° ел. в бік випередження порівняно із з'єднанням у зірку).

Winding parameters [V1 Ph-Ph (V), R1 (pu), L1 (pu)]:

[Параметри первинної обмотки [V1 Ph-Ph (B), R1 (в.о.), L1 (в.о.)]].
Лінійна напруга (В), активний опір обмотки (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.).

Winding 2 (abc) connection [Y, Y_n , Y_g , Delta (D1), Delta (D11)]:

[Схема з'єднання вторинної обмотки]. Значення параметра вибирається з списку:

- Y – зірка;
- Y_n – дл зірка з нейтраллю;
- Y_g – зірка з заземленою нейтраллю;
- Delta (D1) – трикутник першої групи;
- Delta (D11) – трикутник одинадцятий групи.

Winding parameters [V2 Ph-Ph (V), R2 (pu), L2 (pu)]:

[Параметри вторинної обмотки [V2 Ph-Ph (B), R2 (в.о.), L2 (в.о.)]].
Лінійна напруга (В), активний опір обмотки (в.о.), індуктивність обмотки (в.о.).

Saturable core [Осердя, що насичується]. При встановленому прапорці використовується модель трансформатора з урахуванням насичення осердя.

Magnetization resistance R_m (pu) [Опір кола намагнічування (в.о.)].

Magnetization inductance L_m (pu) [Індуктивність ланцюга намагнічування (в.о.)]. Параметр доступний при моделюванні трансформатора без обліку насичення сердечника (прапорець Saturable core – не встановлений).

Saturation characteristic (pu) [$i_1, \phi_{i1}; i_2, \phi_{i2}; \dots$]

[Характеристика насичення осердя]. Значення намагнічуючого струму і магнітного потоку задаються у відносних одиницях. Параметр доступний при моделюванні трансформатора з урахуванням насичення сердечника (прапорець Saturable core – встановлений).

Simulate hysteresis [Моделювати гістерезис]. При встановленому прапорці в характеристиці намагнічування враховується гістерезис.

Hysteresis Data Mat file [Файл даних, що містить гістерезисну характеристику]. Файл даних може бути створений за допомогою блоку Powergui.

Specify initial fluxes [$\phi_{i0A}, \phi_{i0B}, \phi_{i0C}$]:

[Початкові потоки для фаз АВС]. Параметр доступний при моделюванні трансформатора з урахуванням насичення сердечника (прапорець Saturable core встановлений).

Measurements [Вимірювані змінні]. Значення параметра вибираються зі списку:

- None – немає змінних для виміру;
- Winding voltages – напруги обмоток;
- Winding currents – струми обмоток;
- Flux and excitation current ($I_{mag_IR_m}$) – потік і струм холостого ходу;
- Flux and magnetization current (I_{mag}) – потік і струм намагнічування;

- All Measurements (V, I, F_{lux}) – всі напруги, струми і потік.

Show additional parameters [Показати додаткові параметри]. При установці прапорця у вікні діалогу будуть відображені додаткові параметри моделі.

Break Algebraic loop in discrete model:

[Розривати алгебраїчний контур у дискретній моделі]. Активні опори і індуктивності обмоток, а також параметри ланцюга намагнічування задаються у відносних одиницях аналогічно моделі трансформатора без обліку насичення осердя.

Характеристика намагнічування задається аналогічно моделі трансформатора з врахуванням насичення сердечника.

Блок *Series RLC Load* (Послідовне RLC- навантаження) – моделює послідовне включення резистора, індуктивності і конденсатора. Параметри ланцюга задаються через потужність ланцюга при номінальній напрузі і частоті. Піктограму блоку наведено на рис. 1.13. а вікно завдання параметрів – на рис. 1.14.

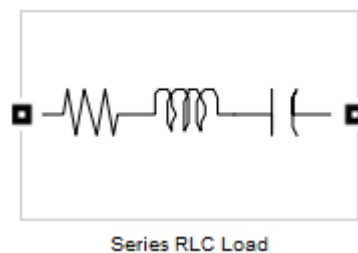


Рис. 1.13. Піктограма блоку *Series RLC Load*

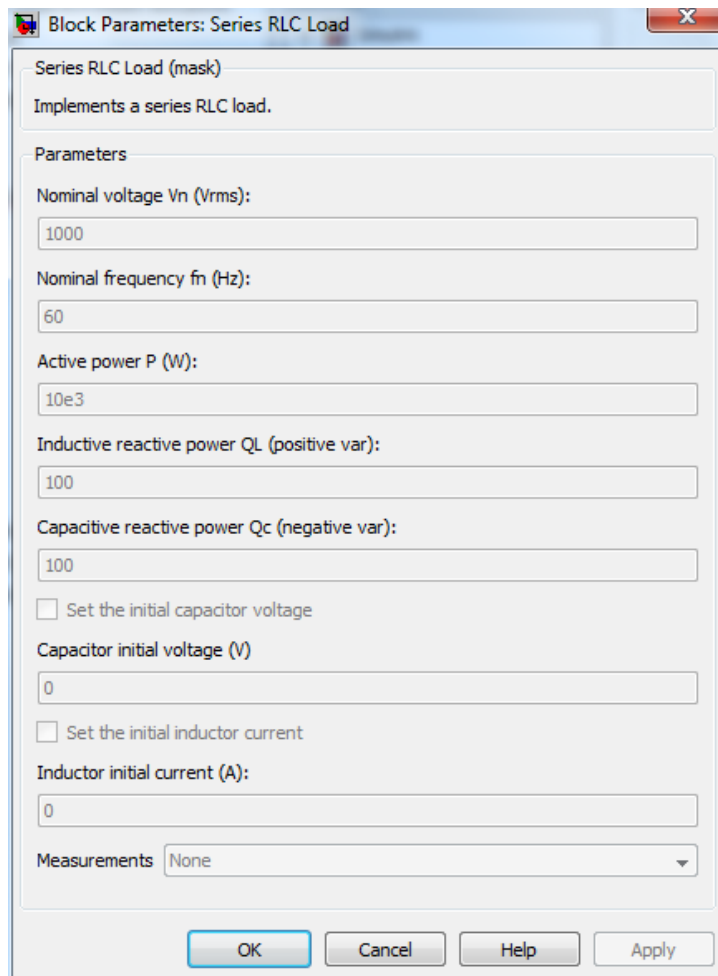


Рис. 1.14. Вікно завдання параметрів блоку Series RLC Load

Параметри блоку:

Nominal voltage V_n (V_{rms}) [Номинальна напруга (В)]. Значення напруги ланцюга, для якого визначені потужності елементів.

Nominal frequency f_n (Hz) [Номинальна частота (Гц)]. Значення частоти, для якої визначені потужності елементів.

Active power P (W) [Активна потужність (Вт)].

Inductive reactive power Q_L (positive var) [Реактивна потужність індуктивності (ВАр)]. Споживана індуктивністю реактивна потужність.

Capacitive reactive power QC (negative var) [Реактивна потужність ємності (ВАР)]. Реактивна потужність, що віддається конденсатором. У графі вводиться абсолютне значення потужності (без урахування знака).

Measurements [Вимірювані змінні]. Параметр дозволяє вибрати передаючі в блок Multimeter змінні. Значення параметра вибираються зі списку:

- None – немає змінних для відображення;
- Branch Voltage – напруга на затискачах ланцюга;
- Branch current – струм ланцюга;
- Branch voltage and current – напруга і струм ланцюга.

Відображуваним сигналам в блоці Multimeter присвоюються мітки:

- I_b – струм ланцюга;
- U_b – напруга ланцюга.

Величини потужностей можуть бути визначені за такими виразами:

$$P = R * \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2};$$
$$Q_L = \omega L * \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2};$$
$$Q_C = \frac{1}{\omega C} * \frac{U^2}{R^2 + \left(\frac{1}{\omega C} - \omega L\right)^2}.$$

де P – активна потужність; Q_L – реактивна потужність індуктивності; Q_C – реактивна потужність ємності; ω – кругова частота напруги; U – діюче значення напруги.

Блок *Signsl RMS* (*Root Mean Square signal*) – середньоквадратичне значення сигналу. Перетворює вхідне діюче значення величини на вихідне середньоквадратичне значення цієї ж величини.

Піктограму блоку наведено на рис. 1.15.

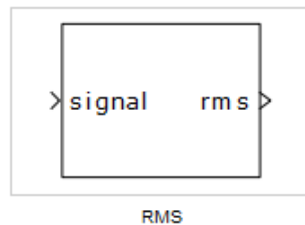


Рис. 1.15. Піктограма блоку *Signsl RMS*

Параметр блоку: **Fundamental frequency fn** (Hz) [Частота вхідного сигналу (Гц)]. Значення частоти сигналу, що подається на блок.

Блок *Display* (Дисплей) – виведення вимірюваної величини на екран.

Піктограму блоку наведено на рис. 1.16.

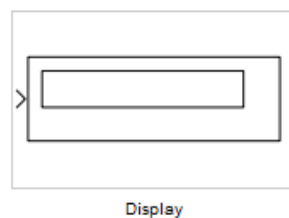


Рис. 1.15. Піктограма блоку *Display*

Блок *Scope* (осциллограф) – знімання осцилограм вхідних величин. Піктограму блоку наведено на рис. 1.16.

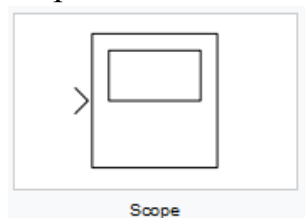


Рис. 1.16. Піктограма блоку *Scope*

1.4 Приклад побудови моделі електричного ланцюга з powerlib-бібліотекою в SimPowerSystems

Розглянемо послідовність побудови моделі в SimPowerSystems.

1. З File-меню вікна *powerlib* відкрийте нове вікно, щоб розмістити перший ланцюг, і збережіть його, як *circuit1*.

2. Відкрийте бібліотеку електричних джерел і копіюйте блок джерела напруги змінного струму в вікно *circuit1*.

3. Відкрийте діалогове вікно джерела напруги змінного струму, двічі натисніть на зображення і введіть амплітуду, фазу, і частотні параметри згідно з заданими значеннями, наведеними на рис. 1.17. Зазначимо, що для синусоїдального джерела необхідно задавати амплітудне її значення ($U_d \cdot \sqrt{2}$ вольт).

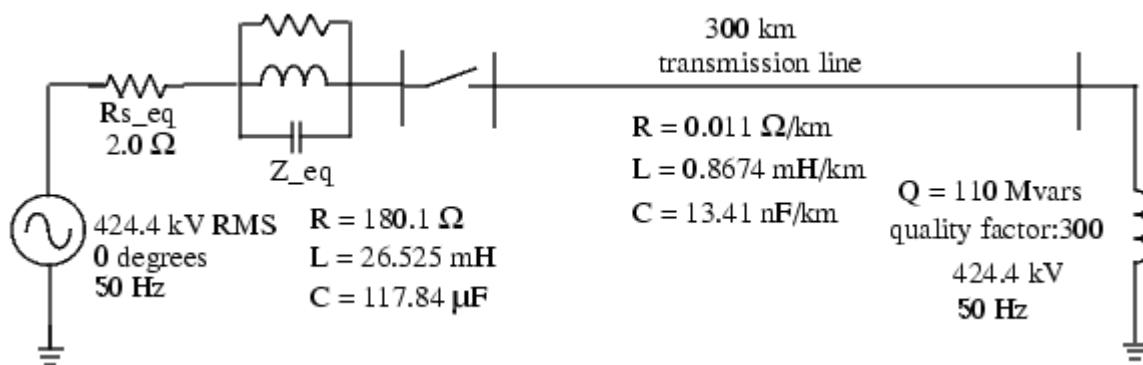


Рис. 1.17. Приклад схеми для моделювання електричного ланцюга

4. Замініть ім'я цього блоку з джерела напруги на V_s .

5. Копіюйте блок паралельної вітки RLC, який знаходиться в бібліотеці елементів *powerlib*, і задайте його параметри, як показано на рис. 1.18. Назвіть його Z_{eq} .

6. Опір R_{s_eq} ланцюга може бути одержаний від блоку паралельної вітки RLC. Дублюйте блок паралельної вітки RLC, який є вже у вашому *circuit1* вікні, встановіть параметр R згідно з рис. 1.17, встановіть

параметри L та C , відповідно, як нескінченність (inf) і нуль (0). Як тільки діалогове вікно закрито, компоненти L і C зникають, і на зображенні тепер фігурує тільки резистор. Такий же само результат отримаємо і з блоком послідовної вітки RLC, відкоригувавши L і C відповідно до нуля і нескінченності (inf).

7. Назвіть цей блок R_{s_eq} .

8. Перевизначте розмір різних компонентів і підключених блоків та введіть зв'язки переміщаючи лінії від виходів до входів відповідних блоків.

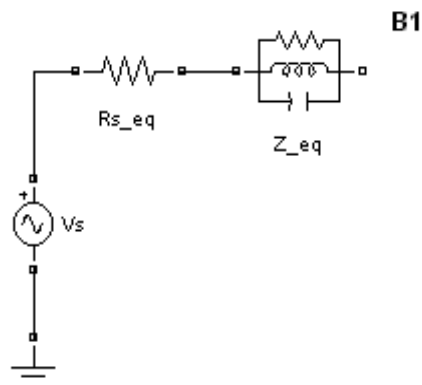


Рис. 1.18. Побудова моделі в SimPowerSystems

Згідно рис. 1.17 додамо лінію електропередачі і шунтуючий реактор. Автоматичний вимикач додається пізніше при моделюванні перехідних процесів.

Модель лінії з однорідно розподіленими параметрами R , L , і C звичайно складається з затримки, рівної часу розповсюдження хвилі вздовж лінії. Ця модель не може моделюватися як лінійна система, тому що затримка відповідає нескінченному цілому ряду значень. Проте максимальна відповідність реальній електричній лінії з обмеженим цілим рядом значень може бути одержана при каскадуванні декількох PI ланцюгів, кожен з яких представляється як невелика секція лінії.

Секції PI включають послідовні ланцюги R-L та два шунтуючі ланцюги C. Точність представлення лінії залежить від кількості секцій PI, використуваних для моделі лінії. Скопіюємо блок секції PI лінії з бібліотеки елементів в вікно *circuit*, встановимо його параметри і конкретизуємо одну секцію лінії.

Шунтуючий реактор моделюється резистором послідовно з індуктором. Для моделювання шунтуючого реактора можна використовувати і блок послідовної вітки RLC. В такому разі доведеться вручну обчислити і встановити значення R і L залежно від поточного моменту і реактивної потужності.

Копіюємо блок послідовного навантаження RLC, який може бути знайдений в бібліотеці елементів powerlib. Назвемо цей блок 110 Mvar. Встановимо його параметри як вказано нижче:

- Vn** 424.4e3 V
- Fn** 60 Гц
- P** 110e6/300 W
- QL** 110e6 vars
- Qc** 0.

Оскільки ніякої реактивної потужності не вказано, то конденсатор зникає на блоковому зображенні, коли діалогове вікно закрито. З'єднаємо нові блоки, як показано на рис. 1.19.

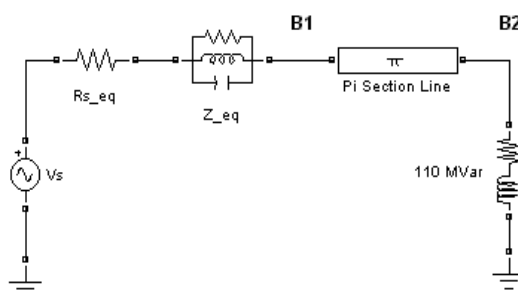


Рис. 1.19. Блок-схема моделі

В подальшому потрібно підключити блок вимірювання напруги, щоб виконати заміри напруги у вузлі В1. Цей блок знаходиться в бібліотеці вимірювань *powerlib*. Копіюємо і назваємо його U1. З'єднаємо його позитивний вхід до вузла В1, а негативний вхід до нового заземлюючого блоку.

Для того, щоб спостерігати напругу, вимірювану блоком вимірювання напруги U1, потрібна система індикації. Вона може бути будь-яким пристроєм, знайденим в бібліотеці *Sinks Simulink*.

Відкриємо бібліотеку *Sinks* і копіюємо блок *Scope* у вікно *circuit1*. Якщо *Scope* був сполучений безпосередньо з виходом вимірювання напруги, він показав би напругу у вольтах. Проте електротехніки в енергетичних системах звикли до роботи з нормалізованими величинами (відносні одиниці). Напруга нормалізується шляхом ділення значення у вольтах на базову напругу, що відповідає піковому значенню системної номінальної напруги. В даному разі коефіцієнт масштабування К дорівнює

$$K = \frac{1}{424.4 \times 10^3 \times \sqrt{2}}$$

Для виконання масштабування копіюємо блок *Gain* з бібліотеки *Simulink* і встановимо його, як показано на рис. 1.20.

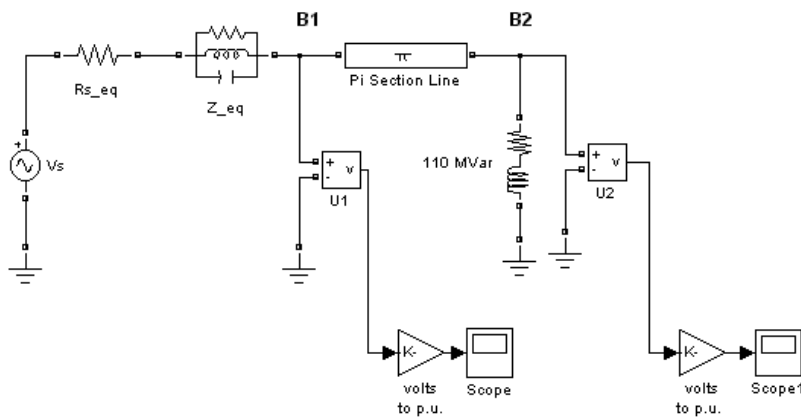


Рис. 1.20. Блок-схема моделі після підключення осцилографів Scope, Scope1

Аналогічно виконаємо вимірювання напруги у вузлі В2 блоком *Scope1*.

В подальшому виконаємо аналіз електричного ланцюга та обчислимо усталені напругу і струм, використовуючи графічний інтерфейс користувача блоку *Powergui*. Використаємо команду *power_analyze* і отримаємо просторове уявлення створеної моделі та проаналізуємо роботу електричного ланцюга в частотній області.

Статичний аналіз

Для полегшення статичного аналізу бібліотека *powerlib* містить блок *Powergui* (графічний інтерфейс користувача). Копіюємо блок *Powergui* у вікно *circuit1* і клацаємо двічі блок ікону, щоб відкрити її.

З меню інструментів аналізу блоку *Powergui* вибираємо усталені напругу і струм. Відкриваємо вікно інструменту *Steady-state*, де вимірюється векторна напруга двома блоками вимірювання, що зображені в полярній формі.

Кожен вихід вимірювання з'єднаний з відповідним іменем блоку вимірювання. Векторні величини U_1 і U_2 відповідають піковому значенню синусоїдальної напруги. У вікні інструменту *Steady-state* можна також відобразити значення початкової напруги або значення струмів індуктора і напруги на конденсаторі. Зазначимо, що *електричні* змінні стану відображаються залежно від порядку, в якому додавалися блоки у відповідну *circuit1* модель.

Динамічний аналіз

Simulink має змогу відображати діаграми, а саме змінні стану конденсатора і індуктора блоків *SimPowerSystems*.

Електричні змінні стану складаються з струму індуктора і напруги конденсатора. Електричні імена змінних стану відображаються в діалозі *Powergui* та містять ім'я блоку, де знаходиться індуктор або конденсатор. Змінні мають приставку I_1 для струму індуктора та приставку U_c для напруги конденсатора.

При виконанні аналізу необхідно звернутися до розділу *Measuring Voltages and Currents* для більш конкретної інформації про умовні позначення, що використовуються для джерел напруги і струмів та електричних змінних стану, що представлені у вікні *Steady-State Tool*.

За командою *power_analyze* можна виконати також і просторове уявлення змінних стану для моделі *circuit1*. Для цього введемо наступну команду в MATLAB prompt (основному вікні сесії):

```
[A,B,C,D,x0,electrical_states,inputs,outputs]=power_analyze('circuit1').
```

Команда *Power_analyze* перетворює просторову модель ланцюга в чотири матриці A, B, C, і D. X0 – вектор початкових умов електричних змінних.

Виконаємо тепер моделювання перехідних процесів. Введемо в блок-схему моделі вмикач електричного ланцюга, зображеного на рис. 1.20. Спочатку відкриємо вікно *circuit1* системи і розриваємо ланцюг струму для вузла B2. Збережемо цю систему як *circuit2*. Після введення вмикача в розрив необхідно видозмінити схематичну діаграму *circuit2*.

Виконаємо перетворення наступним чином.

1. Виділимо кнопкою миші на моделі два блока R_s eq і Z_{eq} і використаємо команду створення підсистеми *Edit>Create subsystem* у його меню (рис. 1.21).

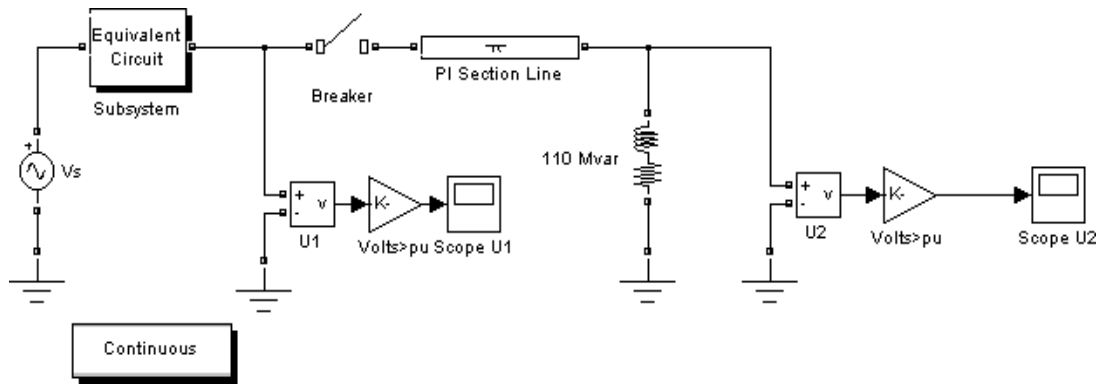


Рис. 1.21. Блок-схема моделі

2. Використаємо **Edit > Mask subsystem** меню і змінимо зображення цієї підсистеми.

3. Використаємо **Format > Show drop shadow** меню, додавши тіні на підсистемний блок. Подивитись на зміст підсистеми можна, подвійно клацнувши по підсистемному блоці.

4. Вставимо вимикач та змоделюємо лінію енергопостачання. Для цього відкриємо елементи бібліотеки *powerlib* та скопіюємо перемикач у вікно *circuit2*.

Вимикач є нелінійним елементом змодельованим для ідеального вимкнення послідовних опорів. Установимо параметри вимикача:

Ron	0.001 Ом
Initial state	0 (open)
Rs	Inf
Cs	0
Switching times	[(1/50)/4]

Активуємо Scope U2 і відкриємо **Parameters** зображення та виберемо **Data history**. Клацнемо на кнопку **Save data to workspace** і установимо змінне ім.'я U2, зберігши результати моделювання. Далі змінимо **Format**, діючи на U₂ **Array**. Також знімемо маркер **Limit rows to last** для показу процесу на більш тривалий час.

Далі змінимо часові кроки інтегруючих алгоритмів. Відкриємо діалог **PI section Line** і змінимо номер відрізка кроку на 1. Для зміни

інтегруючого алгоритму відкриємо вікно діалогу *Simulation > Simulation parameters*. В *Solver* вибираємо інтегруючий алгоритм *ode23t* зі змінним кроком.

Установимо відносну похибку на $1e-3$, а кінцевий час моделювання на 0,02 секунди. Відкриємо осцилограф і почнемо моделювання. Коли моделювання закінчиться, змінимо змінну U2 на U2_1.

Далі відкриємо діалогове вікно *PI section Line* і змінимо кількість відрізків з 1 на 10. Почнемо моделювання. Коли моделювання закінчиться, змінимо змінну U2 на U2_10. Збережемо систему як *circuit2_10pi*.

Проведемо моделювання з моделлю лінії з розділеними параметрами. Знищимо PI відрізок лінійної моделі і замінемо однофазним блоком *Distributed Parameter Line*. Установимо кількість фаз 1 та використаємо ті самі R, L, C, і довжину лінії, як і для PI відрізка лінії. Збережемо цю модель як *circuit2_dist*.

Повторимо моделювання і збережемо U2 напругу в змінну U2_d.

Порівняємо три процеси, отримані у трьох лінійних моделях. Ці процеси показані на рис. 1.22.

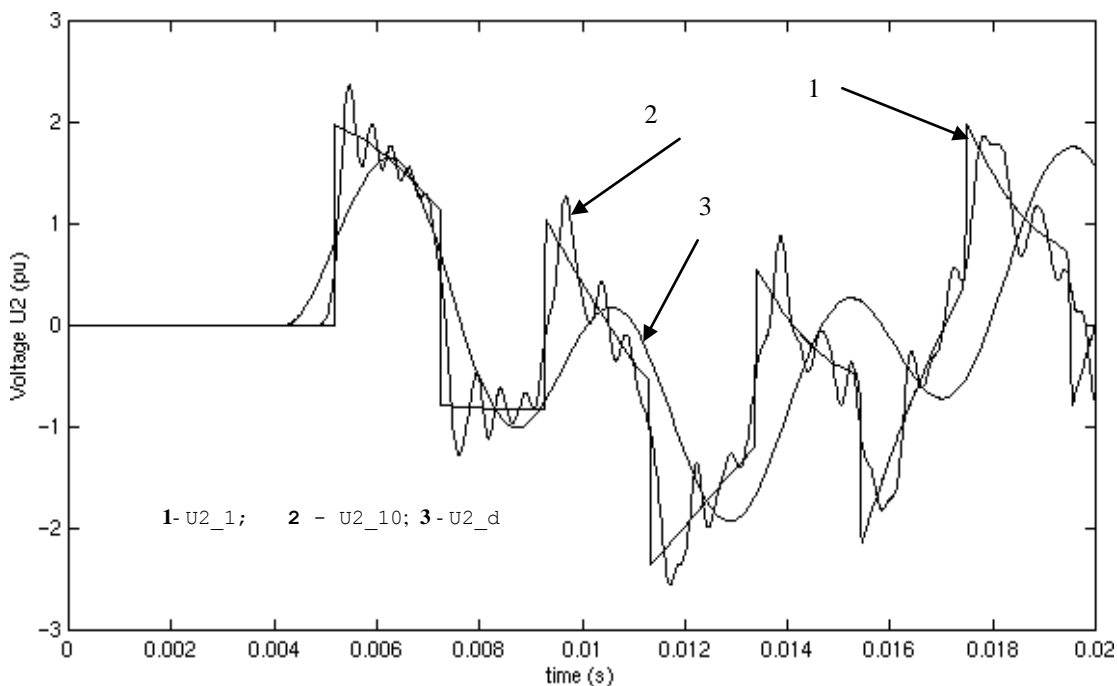


Рис. 1.22. Зміна напруги на кінці лінії при різних представленнях

2 Моделювання режиму роботи трифазної замкненої електричної мережі з використанням пакету прикладних програм SimPowerSystems.

Розрахункову схему електричної мережі наведено на рис. 2.1.

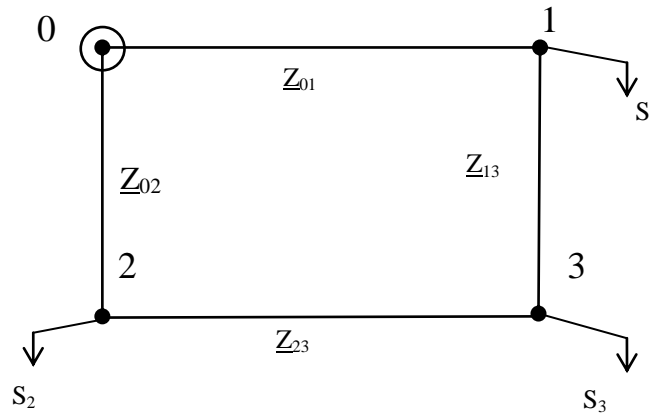


Рис. 2.1. Розрахункова схема замкненої електричної мережі

Параметри ділянок схеми

Ділянка	0–1	0–2	1–3	2–3
$\underline{Z} = R + jX$ [Ом]	4,4+j7,1	2,6+j4,3	3,2+j6,1	5,3+j7,9

Параметри електричних навантажень

№ вузла	1	2	3
\dot{S} , МВА	5,1	8,3	4,2
cos φ	0,81	0,91	0,85
Несиметрія (%)			10

Номінальна напруга мережі 110 кВ.

Напруга джерела живлення 115 кВ.

Необхідно:

1. Скласти модель заданої електричної мережі.
2. Ввести параметри для кожного елемента моделі.
3. Провести моделювання режиму роботи мережі.

2.1. Складання моделі та введення вхідних даних

Для того, щоб модель була аналогічною реальній системі, потрібно всім елементам, які моделюють реальні об'єкти електричної мережі, задати параметри схем заміщення, значення частоти і напруги, за яких ці параметри були виміряні.

Вхідні дані представляються у вигляді скріншотів програми MATLAB.

Джерело живлення моделюється трьома однофазними джерелами наруги

Відповідні вікна задання параметрів наведено на рис. 2.2 – 2.4.

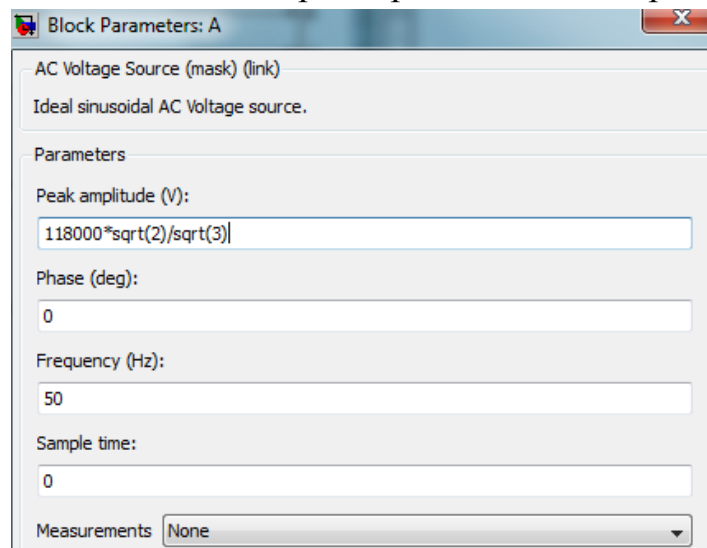


Рис. 2.2. Вікно задання параметрів фази А

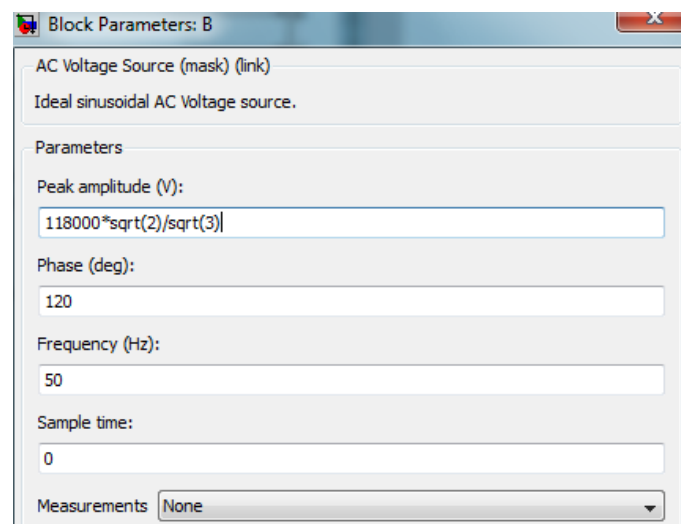


Рис. 2.3. Вікно задання параметрів фази В

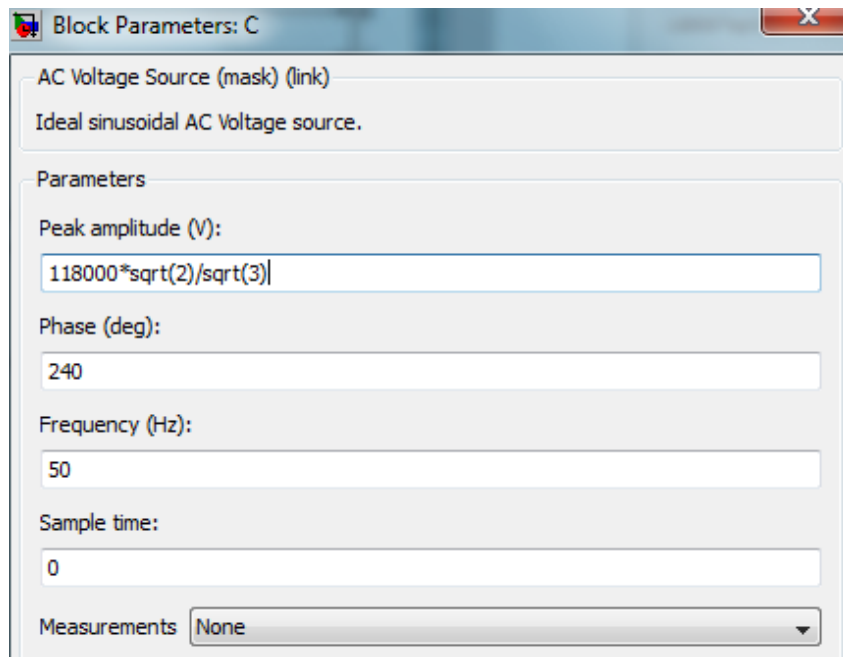


Рис. 2.4. Вікно задання параметрів фази С

Лінії електропередачі моделюються трифазними послідовними RL-елементами з реактивно-індуктивним опором. Їхні відповідні вікна задання параметрів наведено на рис. 2.5 – 2.8.

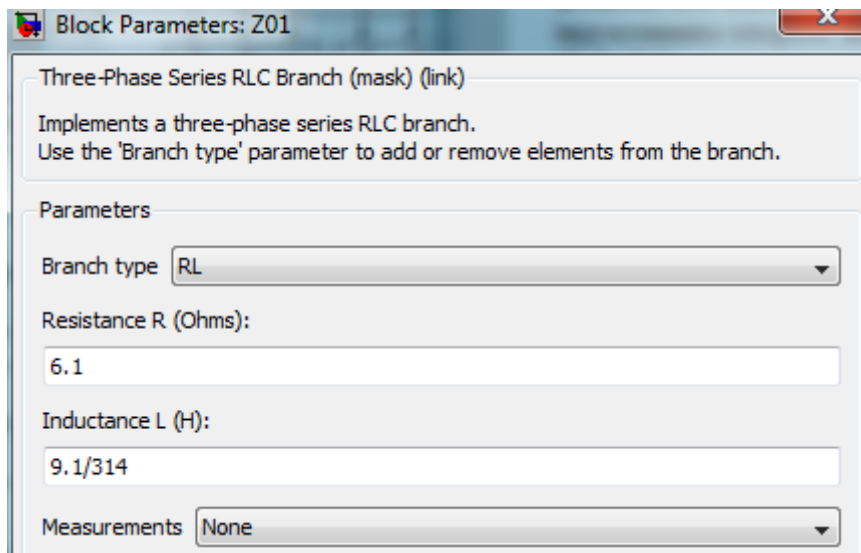


Рис. 2.5. Вікно задання параметрів лінії 0-1

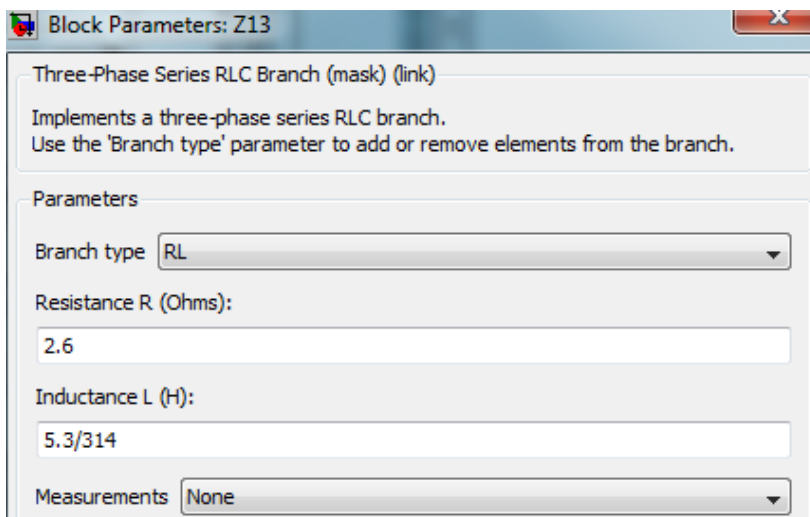


Рис. 2.6. Вікно задання параметрів лінії 1-3

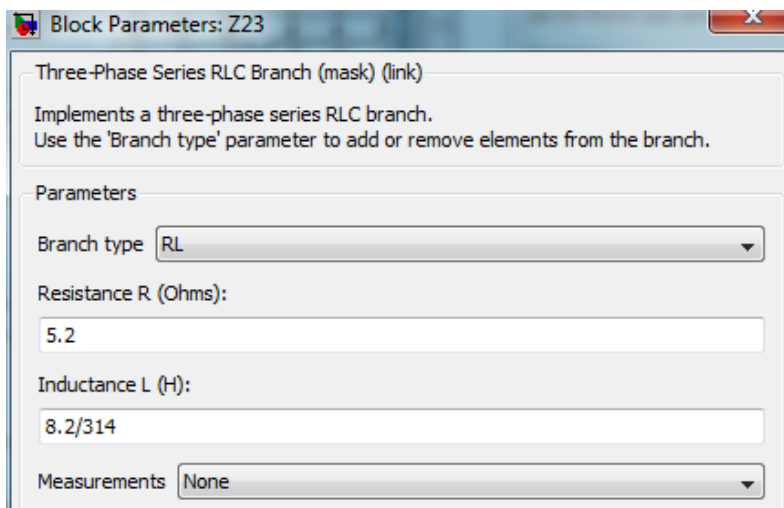


Рис. 2.7. Вікно задання параметрів лінії 2-3
Лінія 0-2:

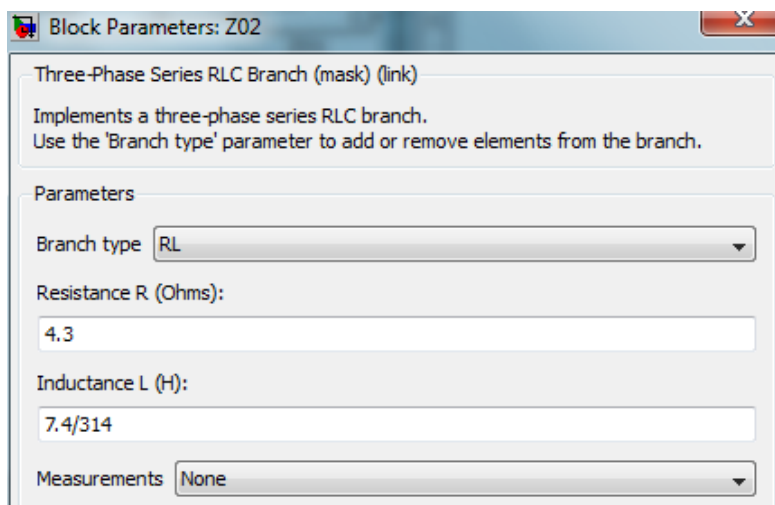


Рис. 2.8. Вікно задання параметрів лінії 0-2

Навантаження в вузлах 1, 2 моделюється трифазним послідовним RLC-навантаженням. З'єднання трифазного ланцюга – «зірка з заземленою нейтраллю». Відповідні вікна задання параметрів наведено на рис. 2.9 – 2.10.

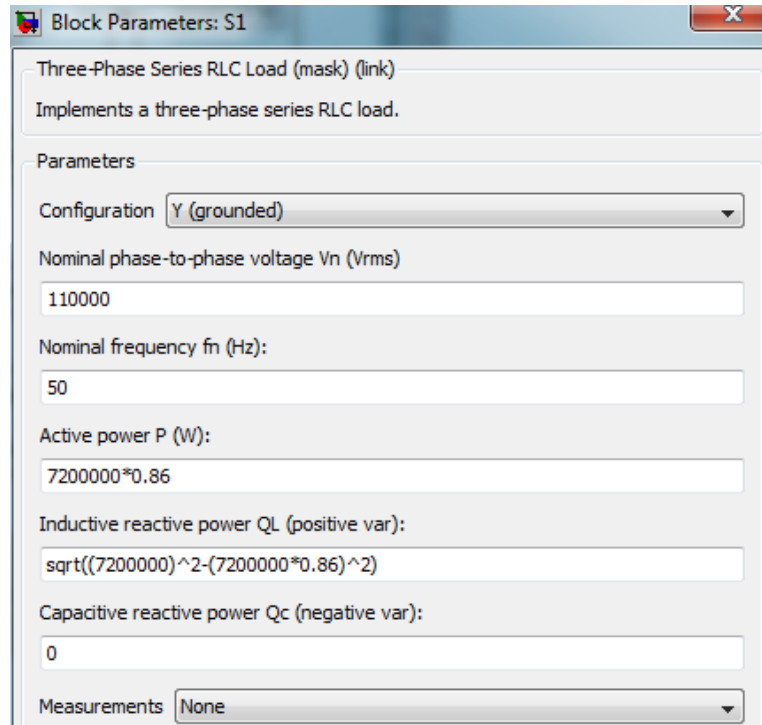


Рис. 2.9. Вікно задання параметрів пункту № 1

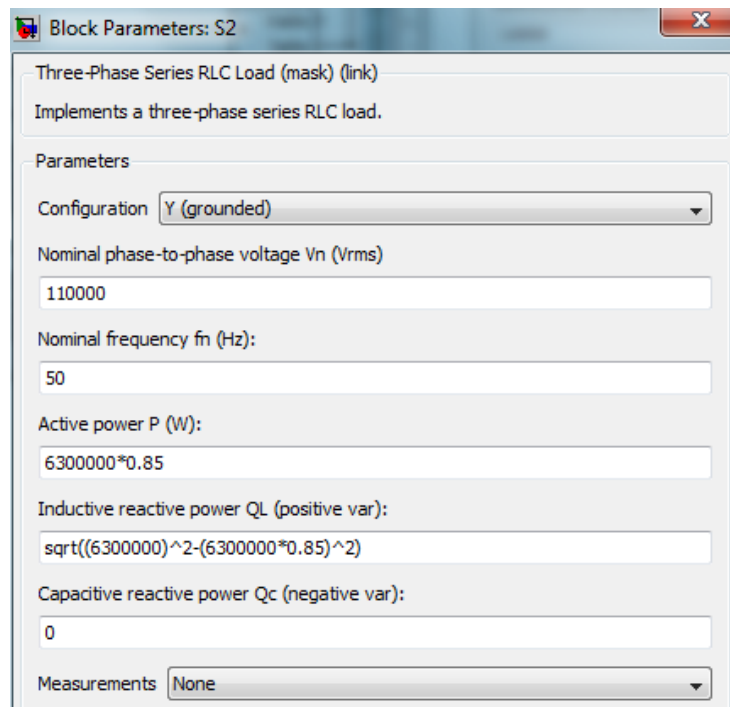


Рис. 2.10. Вікно задання параметрів пункту № 2

Навантаження в вузла моделюється за допомогою двох паралельно працюючих трифазних двообмоткових трансформатора (з'днання – трикутник), а також трьох послідовних однофазних RLC навантажень, під'єднаних до обмотки НН (для можливості подальшого моделювання несиметричного навантаження). Несиметрію моделюємо шляхом збільшення навантаження фази А на 13 % і зменшення навантаження фази С на 13 %.

Потужність трансформаторів розраховується з урахуванням надійності постачання споживачів першої категорії, тобто встановлюються два трансформатори, кожен з яких може працювати з перенавантаженням до 40 %. Визначаємо потужність трансформаторів:

$$S = S_3/1,4 = 5,3/1,4 = 3,786 \text{ МВА.}$$

Тобто вибираємо 2 трансформатори ТМН 6300/110.

Вікна задання параметрів трансформаторів наведено на рис. 2.11 – 2.12.

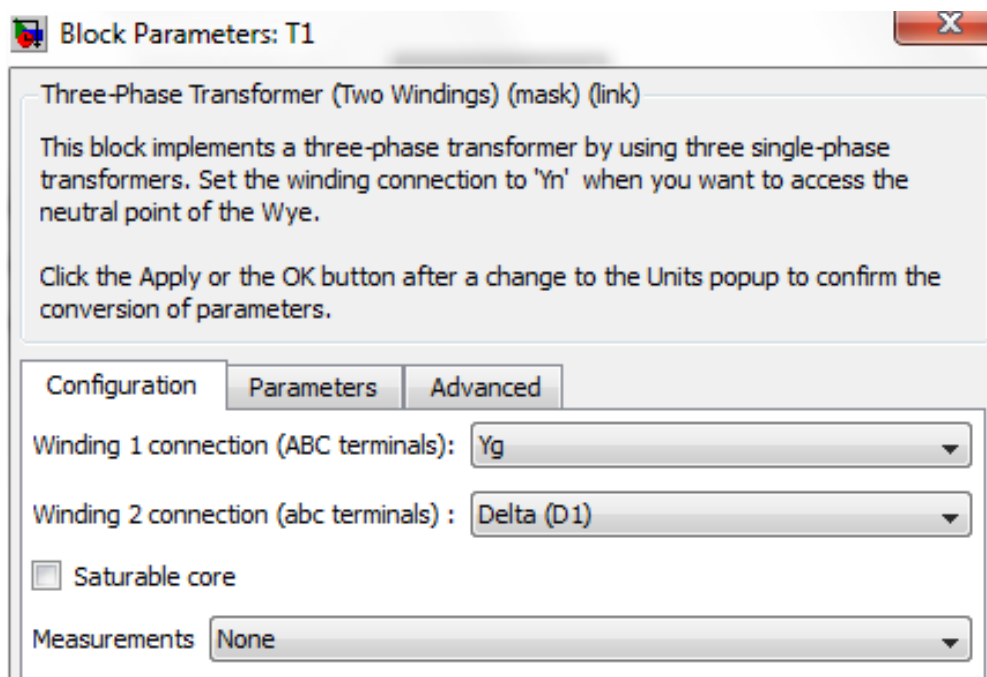


Рис. 2.11. Вікно задання параметрів Т1

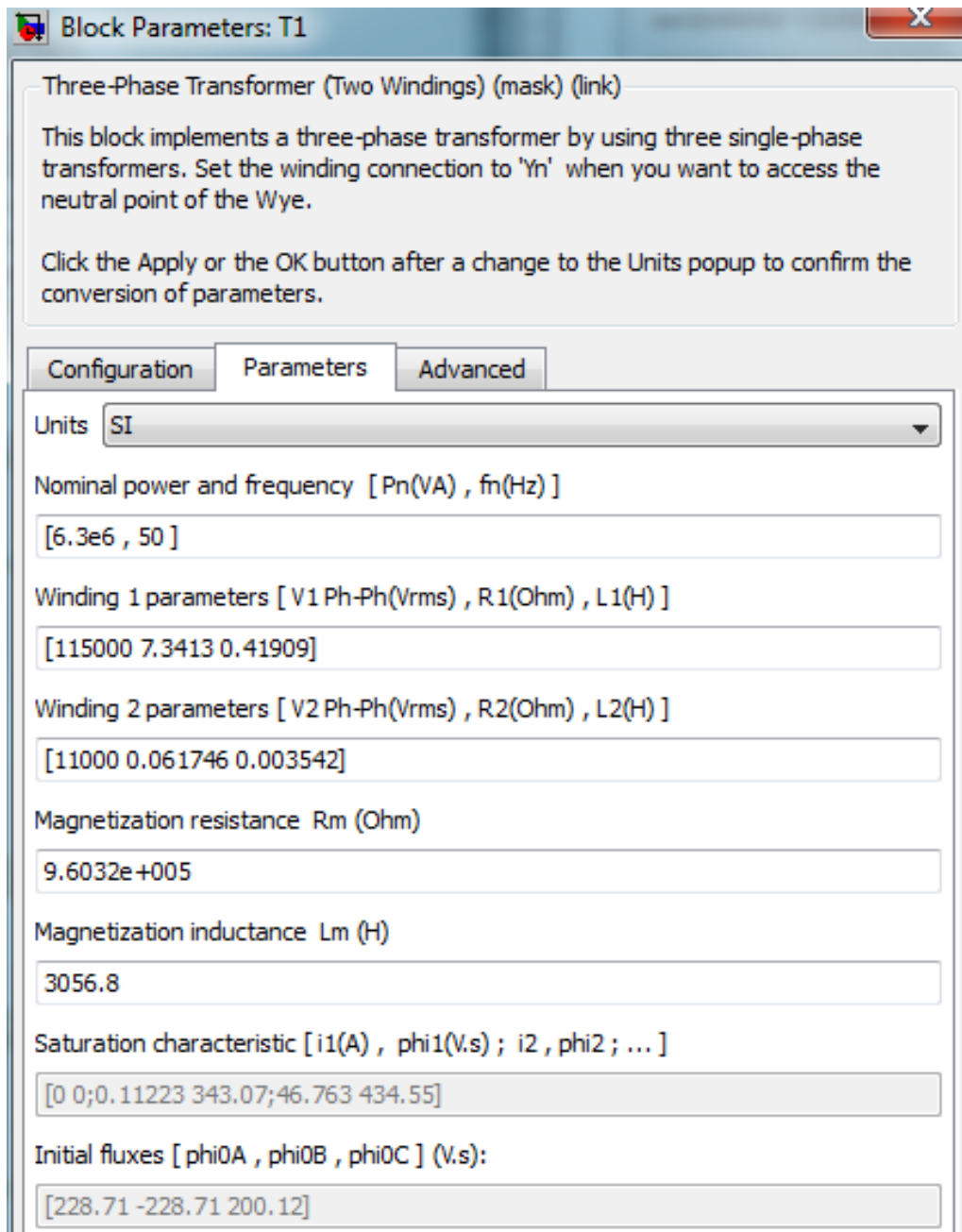


Рис. 2.13. Вікно задання параметрів T1

Вікна задання параметрів навантаження кожної з фаз пункту № 3 наведено на рис. 2.14 – 2.16.

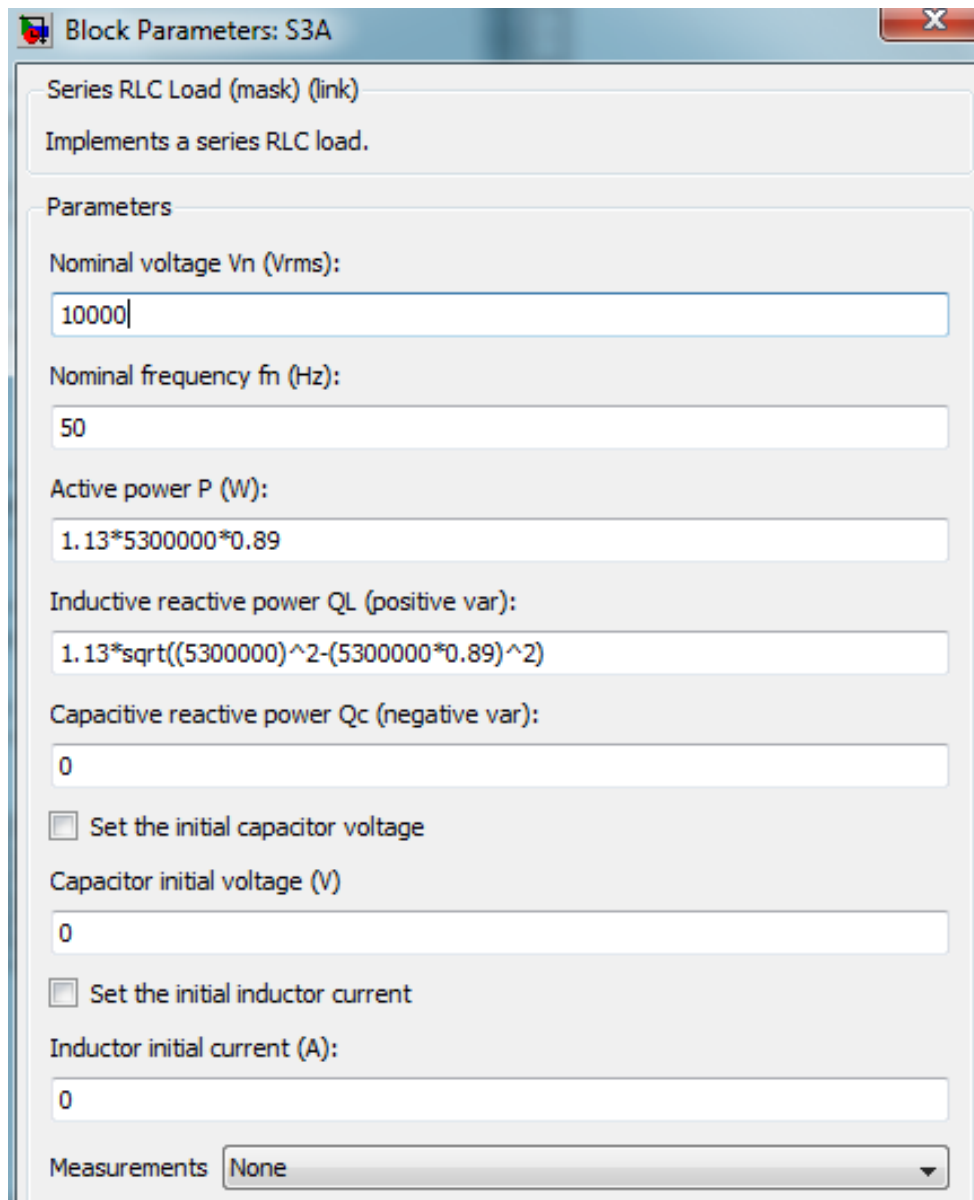


Рис. 2.14. Вікно задання параметрів пункту 3 (фаза А)

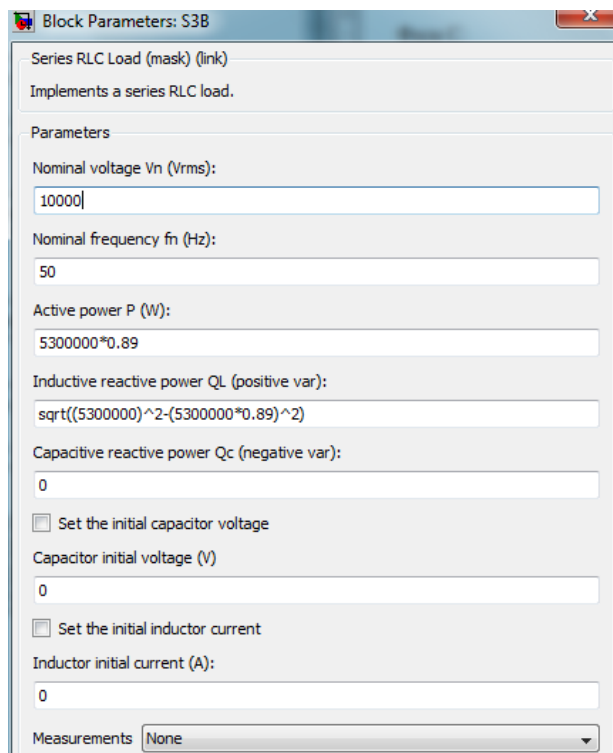


Рис. 2.15. Вікно задання параметрів пункту 3 (фаза В)

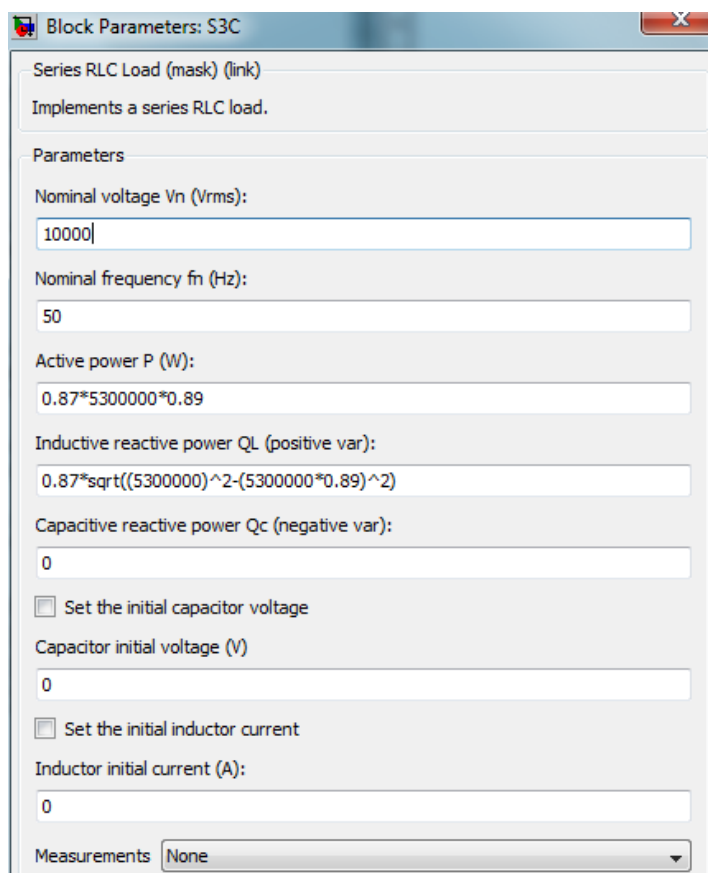


Рис. 2.16. Вікно задання параметрів пункту 3 (фаза С)

Для вимірювання струмів і напруг використовують трифазні вимірювачі напруги і струму, сигнали від яких проходять через елементи *Signal RMS*, після чого середньоквадратичні значення величин виводяться на елемент *Display*.

Відповідно вікна завдання параметрів наведено на рис. 2.17 – 2.19.

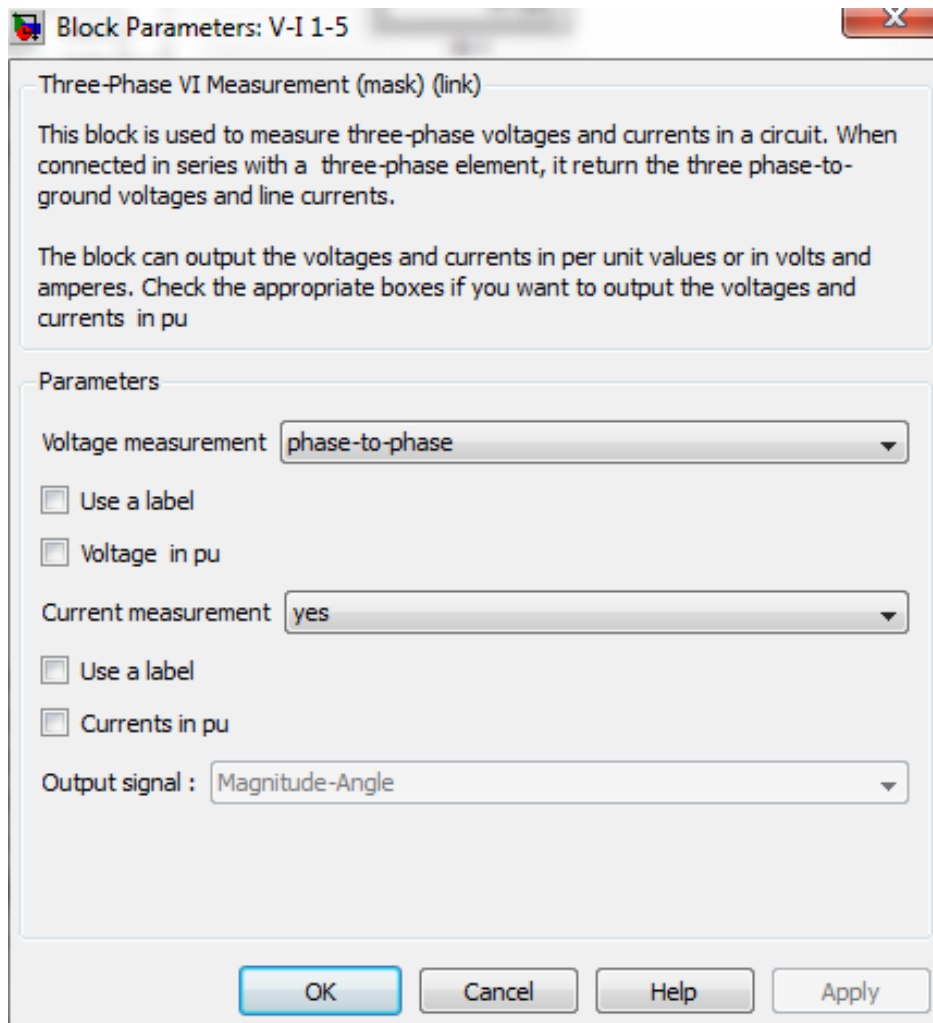


Рис. 2.17. Вікно задання параметрів елемента *Three-Phase V-I Measurement*

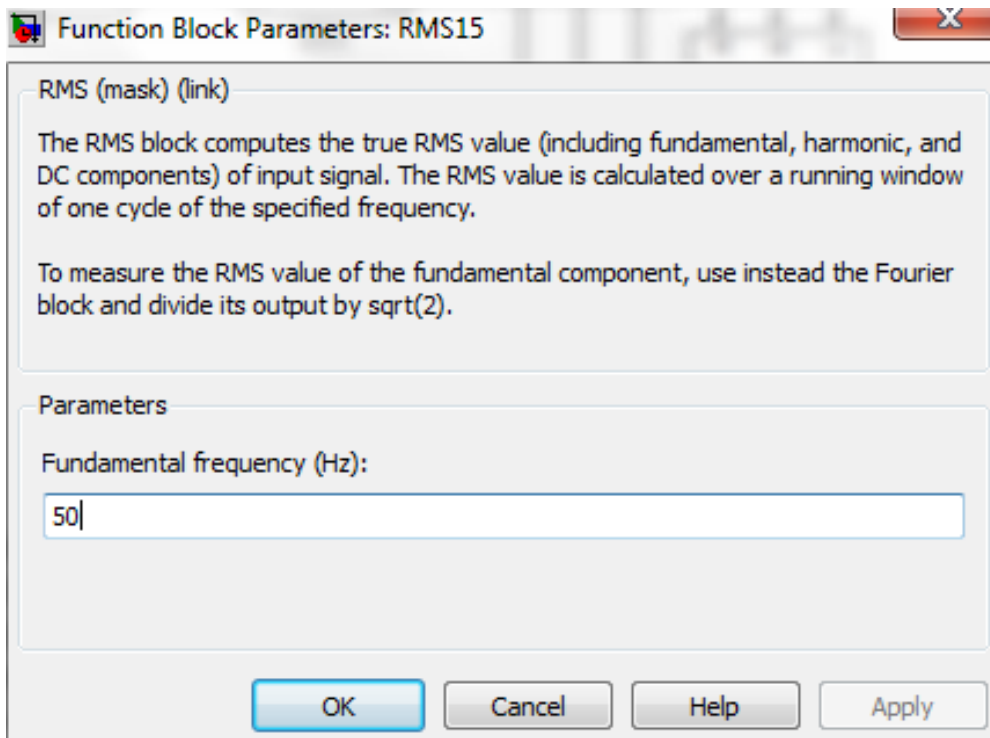


Рис. 2.18. Вікно задання параметрів елементу *Signal RMS*

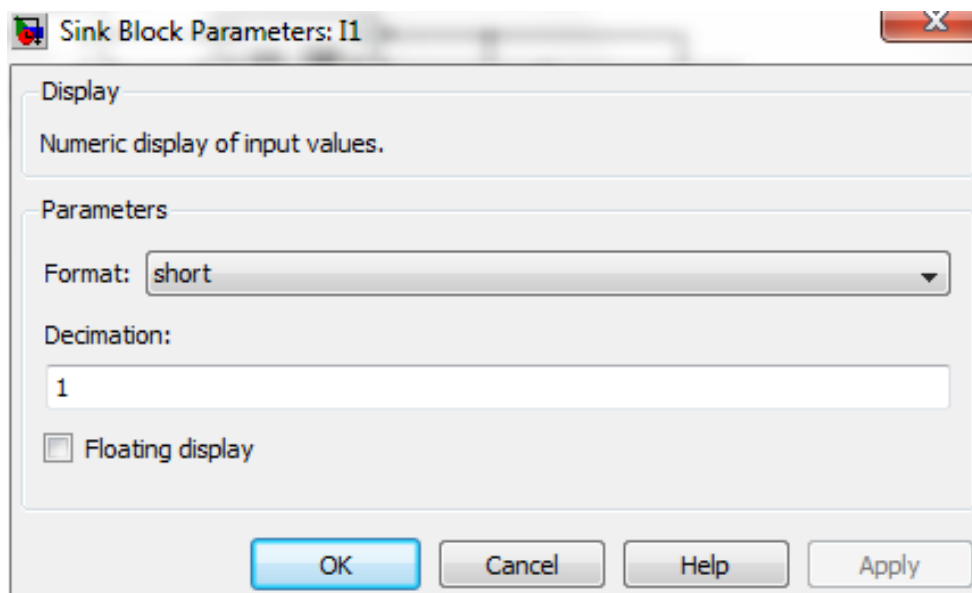


Рис. 2.18. Вікно задання параметрів елементу *Display*

Модель замкненої електричної мережі наведено на рис. 2.19.

2.2. Моделювання режиму роботи замкненої електричної мережі

Виконаємо моделювання замкненої електричної мережі впродовж п'яти секунд. Скріншот розрахованої схеми з фазними напругами наведено на рис. 2.20, а з лінійними напругами – на рис. 2.21.

Струм, який протікає від балансуєчого пункту до споживачів становить:

$$I_A=109,73 \text{ A};$$

$$I_B=105,67 \text{ A};$$

$$I_C=107,36 \text{ A}.$$

Струми на ділянках зведемо в таблицю 2.1.

Таблиця 2.1. Значення струмів на ділянках замкненої мережі

Ділянка	0-1			1-3			2-0			3-2		
Струм, А	фаза			фаза			фаза			фаза		
	А	В	С	А	В	С	А	В	С	А	В	С
	54,13	52,02	52,86	13,93	11,85	12,63	55,62	53,66	54,51	20,35	18,4	19,26

Струми, які протікають до навантажень в пунктах, зведемо в табл. 2.2.

Таблиця 2.2. Струми навантажень пінктів

Пункт		1	2	3
Струм I, А	А	40,25	35,28	34,25
	В	40,25	35,27	30,21
	С	40,23	35,26	31,89

Значення міжфазних напруг в пунктах зведемо в табл. 2.3.

Таблиця 2.3. Значення міжфазних напруг в пунктах

Пункт	0	1	2	3
фаза-фаза	Напруга U, В			
А-В	118038,99	117152,42	117337,07	117057,74
В-С	118003,00	117122,80	117303,68	117028,66
А-С	117958,00	117041,04	117233,06	116927,88

Перевівши вольтметри в режим вимірювання фазних напруг, виконуємо повторне моделювання. Значення фазних напруг зведемо в табл. 2.4.

Таблиця 2.4. Значення фазних напруг у вузлах мережі

Пункт	0	1	2	3
фаза	Напруга, В			
А	68126,62	67602,99	67712,89	67541,71
В	68148,55	67646,19	67749,65	67595,89
С	68106,82	67586,88	67694,61	67525,90

Повна потужність балансуєчого пункту становить:

$$S = 18373857,84 - j11326406,28 \text{ ВА.}$$

Повні потужності в вузлах зведемо в табл. 2.5.

Таблиця 2.5. Значення повних потужностей у вузлах мережі

Пункт	1	2	3
Повна потужність вузла S, ВА	7012696,58-j4167183,26	6083000,95-j3775909,68	5189882,41-j3228739,36

Повні потужності ділянок на початку (П) і в кінці (К) зведені в табл. 2.6.

Таблиця 2.6. Повні потужності ділянок мережі

Ділянка	0-1		1-3	
Потужність S,ВА	П	К	П	К
	9130567.15-j5425515.03	9083219.55-j5348838.98	2070522.96-j1181655.74	2069714.57-j1179082.39
Ділянка	2-0		3-2	
Потужність S,ВА	П	К	П	К
	-9207813.21+j5834723.99	-9243290.69+j5900891.25	-3120167.85+j2049656.95	-3124812.24+j2058814.32

Втрати потужності в лініях розраховуємо як різницю потужності в кінці і на початку лінії. Розрахунки зведемо в табл. 2.7.

Таблиця 2.7. Втрати потужності на ділянках мережі

Ділянка	0-1	1-3	2-0	3-2
Втрата потужності, ΔS , ВА	47347,6 -j76676,05	808,39 -j2573,35	35477,48 -j66095,26	4644,39 -j9157,37

Сумарні втрати потужності в системі становлять:

$$\Delta S_{\Sigma} = 88277,86 - j154502,03 \text{ ВА.}$$

Для того, щоб побачити осцилограму струму і напруги при «ввімкненні системи» (початку моделювання), нижче наведено скріншоти осцилографів, які виводять фазні струми, що протікають від балансуєчого пункту (рис. 2.22) і фазні напруги на БП (рис. 2.23). Також наведено осцилограми лінійних напруг (рис. 2.24) і фазних струмів (рис. 2.25) усталеного режиму (на третій секунді моделювання режиму роботи електричної системи).

Схему замкненої електричної мережі з розрахованими режимними параметрами наведено на рис. 2.26.

У Додатку 1 наведено типовий бланк Завдання на виконання курсової роботи, а у Додатку 2 – зразок оформлення титульного аркушу пояснювальної записки.

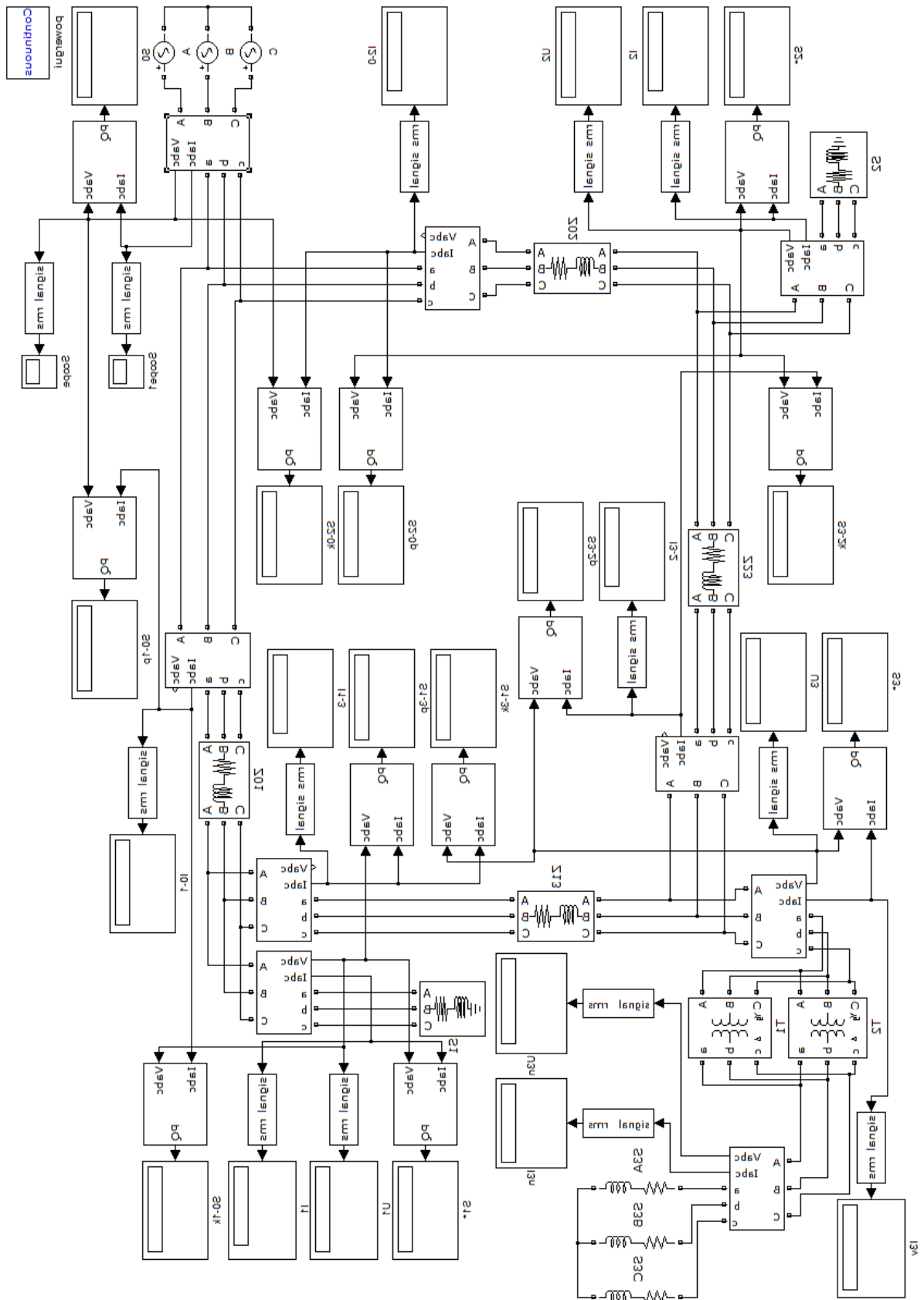


Рис. 2.19. Модель замкненої електричної мережі

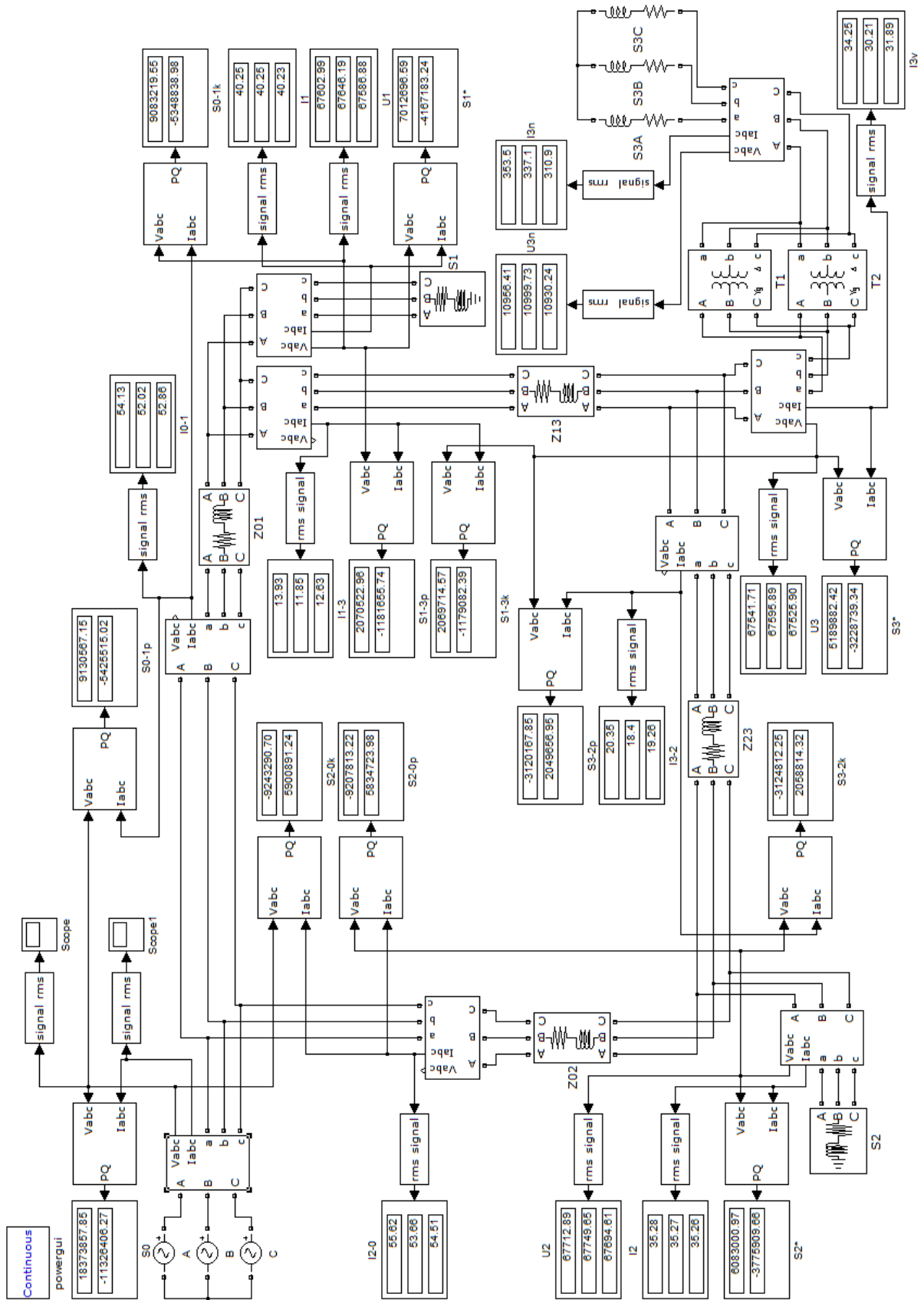


Рис. 2.20. Електрична мрежа з розрахованими фазними напругами

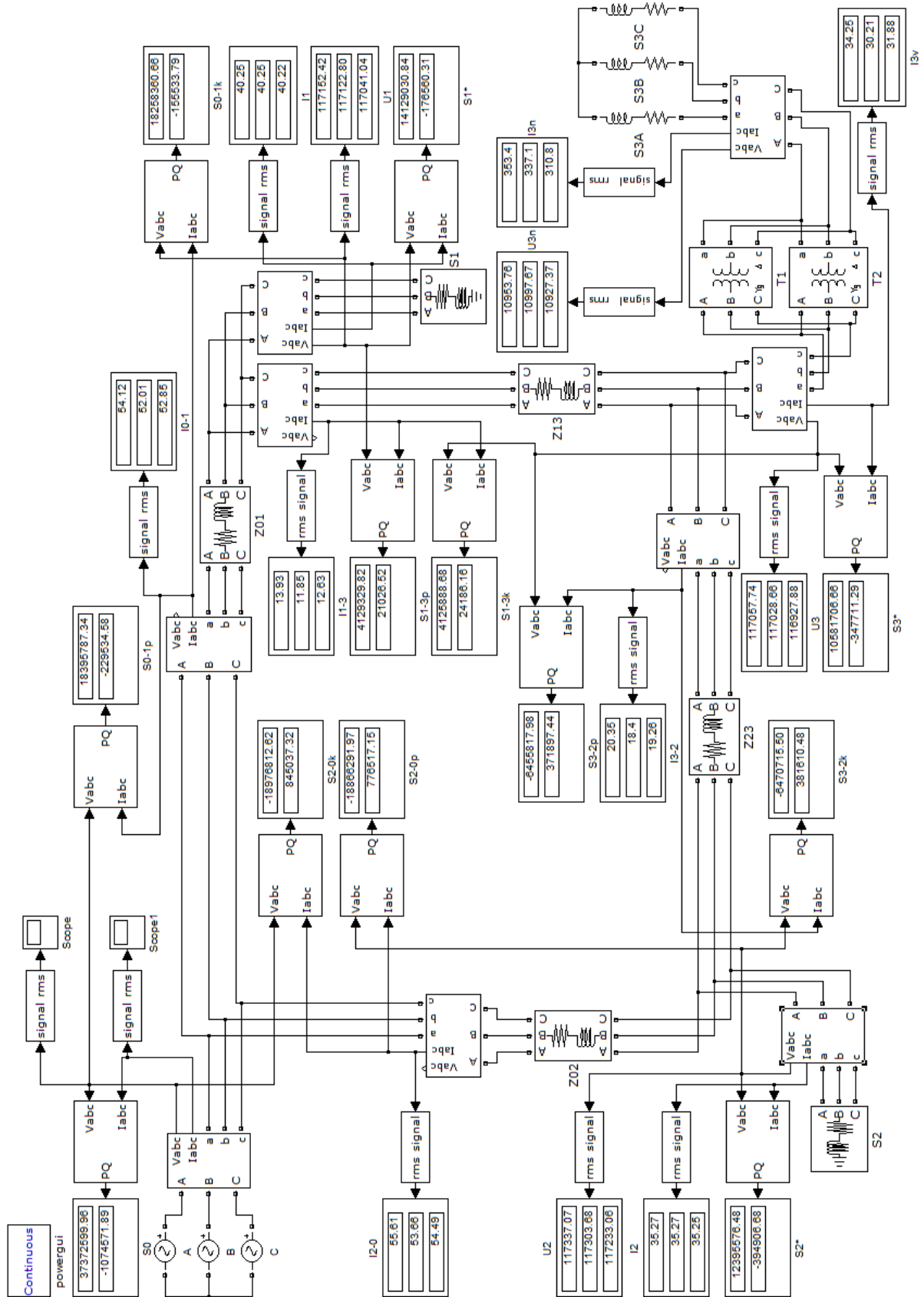


Рис. 2.21. Електрична мережа з розрахованими лінійними напругами

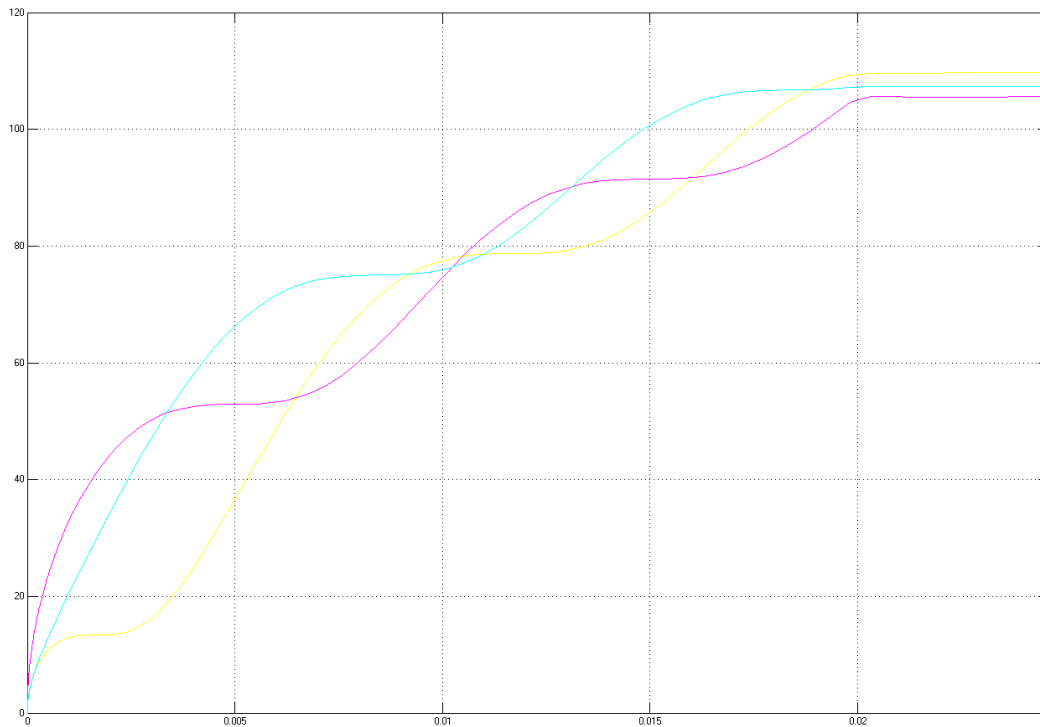


Рис. 2.22. Осцилограми фазних струмів, що протікають від балансуєчого пункту

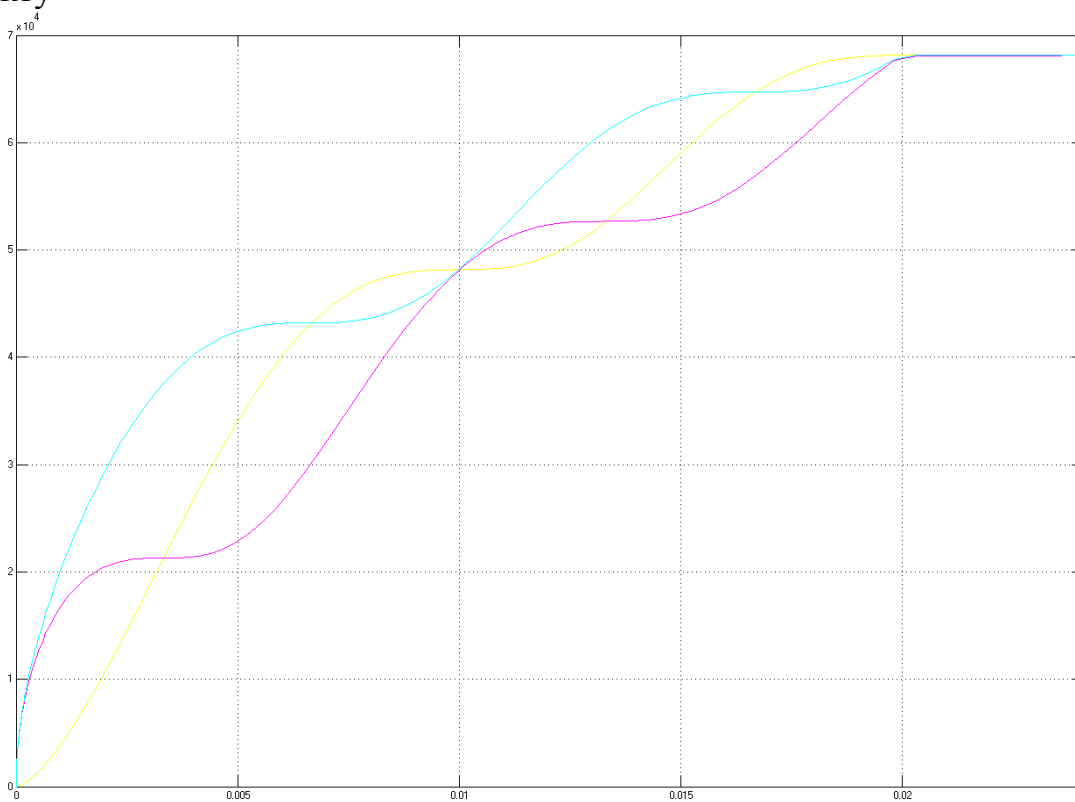


Рис. 2.23. Осцилограми фазних напруг у балансуєчому пункті

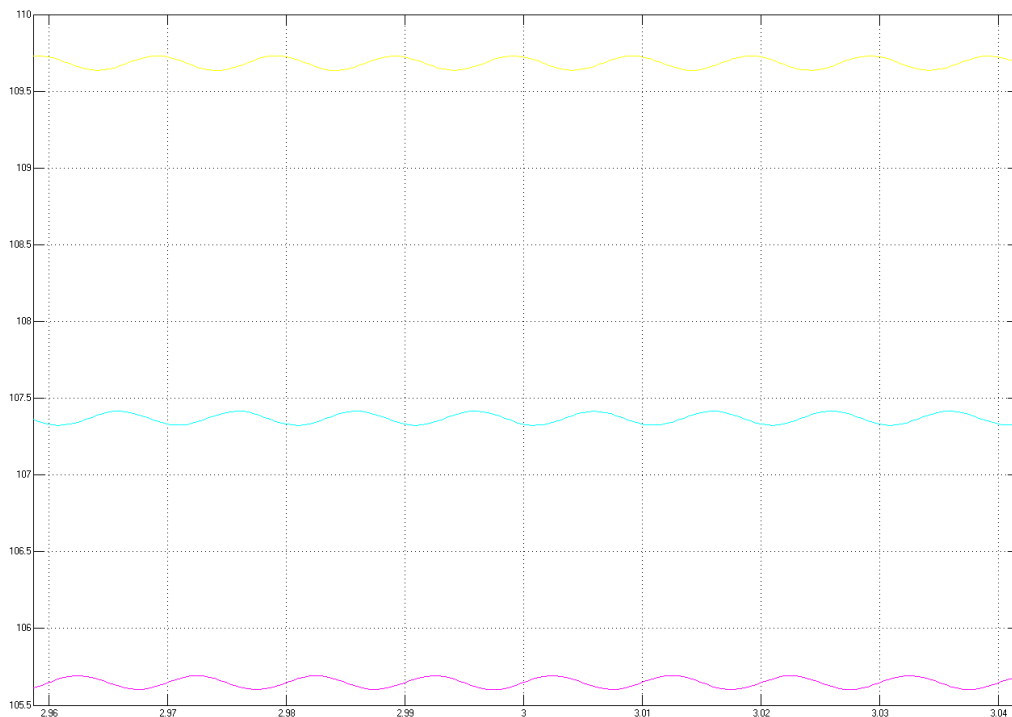


Рис. 2.24. Осцилограми лінійних напруг на третій секунді моделювання режиму роботи електросистеми.

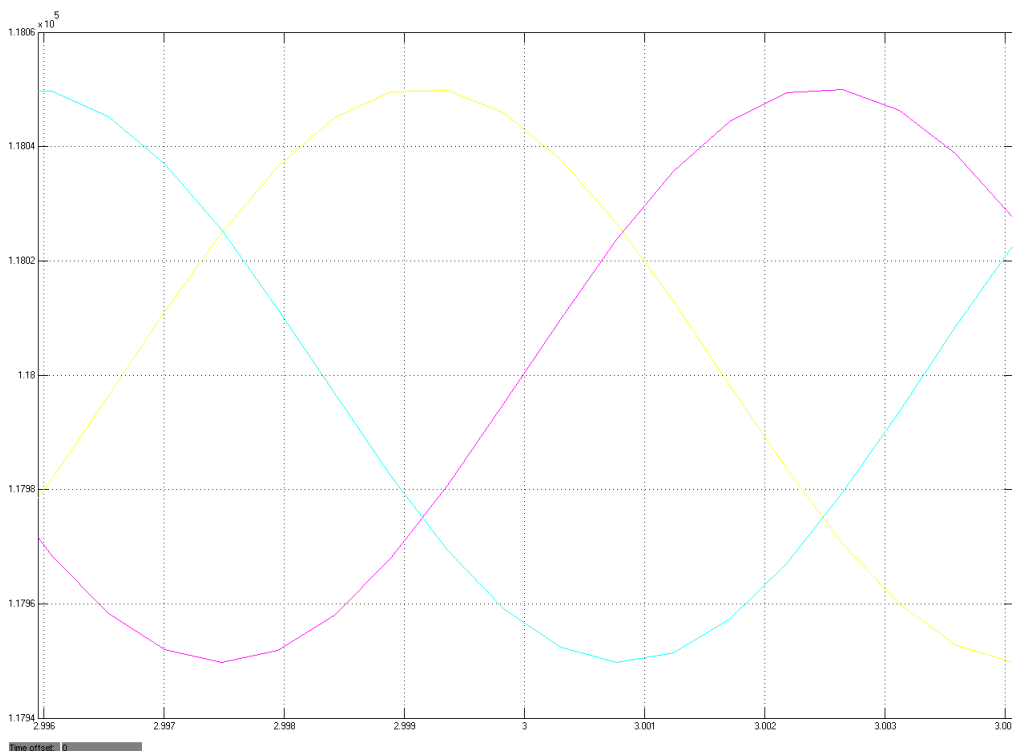


Рис. 2.25. Осцилограми фазних струмів на третій секунді моделювання режиму роботи електросистеми.

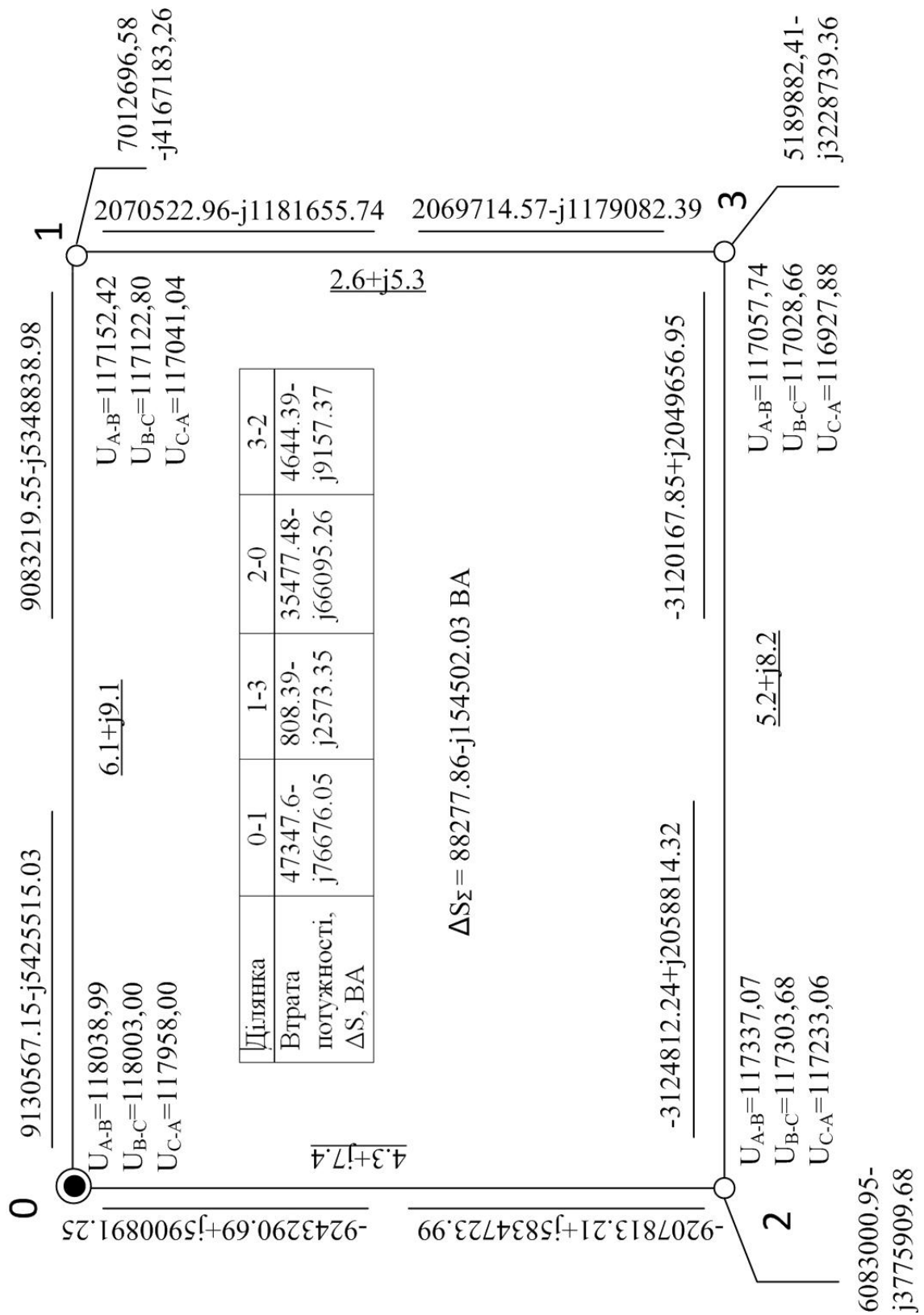


Рис. 2.26. Схема замкненої електричної мережі з розрахованими режимними параметрами

ЛІТЕРАТУРА

1. Гультяев А. Визуальное моделирование в среде MATLAB: Учебный курс – СПб: Питер, 2000. - 432 с.
2. Дьяконов В. Simulink 4. Специальный справочник. – СПб: Питер, 2002. - 528 с.
3. Казанський С.В. Надійність електроенергетичних систем: навчальний посібник [Текст] / С.В. Казанський, Ю.П. Матеєнко, Б.М. Сердюк. – К.: НТУУ «КПІ», 2011.–216 с. – ISBN 978-966-622-453-1.
4. Специальный справочник. Математические пакеты расширения MATLAB. / Под. ред. Дьяконова В., Круглова В. – СПб.: Питер, 2001.-480 с.
5. Герман-Галкин С.Г. Компьютерное моделирование полупроводниковых схем в MATLAB 6.0: Уч. пособие. – СПб.: КОРОНА, 2001. - 320 с.
6. Леоненков А.В. Нечеткое моделирование в среде MATLAB и fuzzyTECH. – СПб.: БХВ-Петербург, 2003. - 736 с.
7. Потемкин В.Г. Система инженерных и научных расчетов MATLAB:- В 2-х т. – М.: Диалог-МИФИ, 1999. - 366 с.

НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ
„КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ”

Кафедра електричних мереж та систем

ЗАВДАННЯ

на курсову роботу з дисципліни

«Автоматизовані системи керування та оптимізації режимів енергосистем»

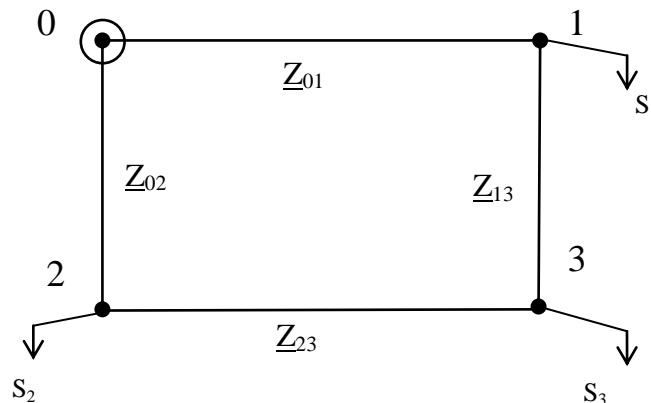
Тема курсової роботи: «Моделювання режимів роботи трифазної замкненої електричної мережі з використанням пакету прикладних програм SimPowerSystems»

Студент _____

Група _____

1. Скласти модель електричної мережі за заданою розрахунковою схемою.
2. Ввести параметри для кожного елемента моделі.
3. Виконати налагодження моделі електричної системи.
4. Провести моделювання режиму роботи мережі. Отримати розподіл струмів на ділянках, значення напруг у вузлах, а також поточкорозподіл потужностей на ділянках.
5. Скласти звіт по курсовій роботі.

Розрахункова схема:



Параметри ділянок схеми

Ділянка	0–1	0–2	1–3	2–3
$\underline{Z} = R + jX$ [Ом]	4,4+j7,1	2,6+j4,3	3,2+j6,1	5,3+j7,9

Параметри електричних навантажень

№ вузла	1	2	3
\dot{S} , МВА	5,1	8,3	4,2
cos φ	0,81	0,91	0,85
Несиметрія (%)			10

Номинальна напруга мережі – 110 кВ

Напруга джерела живлення – 115 кВ

Дата видачі завдання _____

Керівник _____