

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ  
«ХАРКІВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до лабораторних занять

за курсом

**МАТЕМАТИЧНЕ ТА КОМП'ЮТЕРНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ПРОЦЕСІВ  
ЕНЕРГЕТИКИ**

для студентів денної, заочної та дистанційної форм навчання за спеціальністю

141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Харків  
НТУ «ХПІ»  
2021

Методичні вказівки до лабораторних робіт за курсом «Математичне та комп'ютерне моделювання процесів енергетики» для студентів денної, заочної та дистанційної форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка / склад. Рудевіч Н.В. – Х. : НТУ «ХП», 2021. – 57 с.

Укладачі: Н.В. Рудевіч

Рецензент

Кафедра автоматизації та кібербезпеки енергосистем

---

## ВСТУП

**Мета лабораторних робіт** - поглиблення й закріплення знань щодо математичних моделей основного силового устаткування електроенергетичних систем та освоєння методики створення відповідних віртуальних комп'ютерних моделей.

Сучасні комп'ютерні технології, в основі яких лежать прикладні пакети, дають можливість більш глибокого вивчення питань, пов'язаних з процесами в електротехнічному обладнанні. Вони дозволяють якісно змінити і істотно поліпшити технологію вивчення, перевести її в віртуальну реальність, здійснити в цій віртуальній дійсності необхідні дослідження з отриманням кількісних результатів.

Інструментом реалізації математичних моделей елементів електричних систем може виступати програма Matlab, яка має велике число пакетів розширення. Самим відомим з них стало розширення Simulink, що забезпечує блочне імітаційне моделювання різних систем і пристроїв. Пакет блочного імітаційного моделювання Simulink є нерозривною частиною системи MATLAB + Simulink. Simulink призначений для моделювання динамічних систем, моделі яких складаються з окремих блоків (компонентів). В ньому реалізовані принципи візуально орієнтовного програмування, що дозволяє легко набирати потрібні блоки і з'єднувати їх у вигляді моделі системи або пристрою.

# ЛАБОРОТОРНЕ ЗАНЯТТЯ 1

## Дослідження можливостей та особливостей застосування пакету SIMULINK програми MATLAB для моделювання електротехнічного обладнання

**Мета роботи** – оволодіння навиками створення, підготовки, редагування та роботи з моделями в пакеті Simulink програми Matlab.

**Вказівки з підготовки до роботи** – вивчити основні відомості про роботу в середовищі Simulink [1,2].

### Короткі пояснення до роботи

#### *Створення моделі.*

Для створення моделі в середовищі Simulink необхідно послідовно виконати наступні дії:

- ✓ Створити файл моделі за допомогою команди File / New / Model.
- ✓ Розташувати блоки у вікні моделі. Для цього необхідно відкрити відповідний розділ бібліотеки. Далі, вказавши курсором на необхідний блок і натиснувши на ліву кнопку миші, «перетягнути» блок в створене вікно моделі.
- ✓ Змінити параметри блоку, що встановлюються за замовчуванням. Для цього необхідно двічі клацнути лівою клавішею миші, вказавши курсором на зображення блоку. Після внесення зміни потрібно закрити вікно зміни параметрів кнопкою «ОК».
- ✓ З'єднати блоки між собою. Для з'єднання виходу одного блоку з входом іншого курсор миші встановлюється на виході блоку, від якого повинно виходити з'єднання. При цьому курсор перетворюється в великий хрест з тонких ліній. Тримавши ліву кнопку миші, необхідно перемістити курсор до входу наступного блоку, де курсор миші набуде вигляду хреста з тонких здвоєних ліній.

Протягнувши лінію до входу наступного блоку, треба відпустити ліву кнопку миші. З'єднання буде завершено, і в кінці його з'явиться жирна стрілка.

✓ Зберегти модель у вигляді файлу на диску, вибравши пункт меню File / Save As у вікні схеми і вказавши папку та ім'я файлу.

*Основні прийоми підготовки і редагування моделі.*

#### Додавання текстових написів.

Для підвищення наочності моделі зручно використовувати текстові написи. Для створення напису досить вказати мишею місце написи і двічі клацнути лівою клавішею миші. Після цього з'явиться блок написи з курсором введення. Так само можна змінити і підписи до блокам моделей. Для цього потрібно встановити миша в область написи і клацнути лівою клавішею миші, в підписі з'явиться курсор вводу, і її можна буде редагувати. Слід мати на увазі, що розглянута версія програми не адаптована до використання кирилических шрифтів і застосування їх може мати найрізноманітніші наслідки: відображення написів в нечитабельним вигляді, обрізання написів, повідомлення про помилки, а також неможливість відкрити модель після її збереження. Тому застосування написів російською мовою вкрай небажано.

#### Виділення об'єктів.

Для виконання будь-якої дії з елементом моделі (блоком, з'єднаною лінією, написом) цей елемент необхідно спочатку виділити. Виділення об'єктів найзручніше здійснюється за допомогою миші. Для цього необхідно встановити курсор миші на потрібному об'єкті і клацнути лівою клавішею миші. Об'єкт буде виділено. Про це будуть свідчити маркери по кутах об'єкта. Можна також виділити кілька об'єктів. Для цього потрібно встановити курсор миші поблизу них, натиснути ліву кнопку миші і, утримуючи її, почати переміщати мишу. З'явиться пунктирна рамка, розміри якої будуть змінюватися при переміщенні миші. Всі охоплені рамкою об'єкти стають виділеними. Після виділення об'єкта може бути скопійований або переміщений в буфер проміжного зберігання, витягувати з буфера, а також видаляти, використовуючи стандартні прийоми роботи в Windows-програмах.

### Копіювання і переміщення об'єктів в буфер зберігання.

Для копіювання об'єкта в буфер його необхідно попередньо виділити, а потім виконати команду Edit / Copy або скористатися кнопкою «Копіювати» на панелі інструментів.

Для вирізання об'єкта в буфер його необхідно попередньо виділити, а потім виконати команду Edit / Cut або скористатися кнопкою «Вирізати» на панелі інструментів. При виконанні даних операцій слід мати на увазі, що об'єкти поміщаються в власний буфер MATLAB і недоступні з інших додатків. Використання команди Edit / Copy model to Clipboard дозволяє помістити графічне зображення моделі в буфер Windows і відповідно робить його доступним для інших додатків.

Копіювання можна виконати і таким чином: натиснути праву кнопку миші і, не відпускаючи її, перемістити об'єкт. При цьому буде створена копія об'єкта, яку можна перемістити в потрібне місце.

### Додавання візуального ефекту з буфера зберігання.

Для вставки об'єкта з буфера необхідно попередньо вказати місце вставки, клацнувши лівою клав'ішею миші в передбачуваному місці вставки, а потім виконати команду Edit / Paste або скористатися кнопкою «вставити» на панелі інструментів.

### Видалення об'єктів.

Для видалення об'єкта його необхідно попередньо виділити, а потім виконати команду Edit / Clear або клавішу Delete на клавіатурі. Потрібно пам'ятати, що команда Clear видаляє блок без приміщення його в буфер обміну. Однак цю операцію можна скасувати опцією File / Undo.

### Зміна розмірів блоків.

Для зміни розміру блоку він виділяється, після чого курсор миші необхідно встановити на один з маркерів по кутах блоку. Як тільки курсор миші перетвориться в двосторонню діагональну стрілку, можна буде при натиснутій лівій клав'іші миші розтягувати блок по діагоналі, збільшуючи або зменшуючи

його розміри, при цьому змінюється тільки графічне зображення блоку, а розміри його назви у вигляді текстового напису залишаються колишніми.

### Переміщення блоків і вставка блоків у з'єднання.

Блок, який бере участь в з'єднанні, можна переміщати у вікні моделі виділивши його і перетягуючи, як зазвичай, мишею. При цьому з'єднань не розривається, а просто скорочується або збільшується в довжині. В довге з'єднання можна вставити новий блок, помістивши його в потрібному місці лінії. Така вставка можлива лише для блоків, що мають один вхід і один вихід, які включаються в з'єднання.

### Установка параметрів моделювання та його виконання.

Перед виконанням моделювання необхідно попередньо задати параметри. Завдання параметрів виконується в панелі управління меню Simulation / Parameters. Вікно настройки параметрів моделювання має 5 вкладок:

✓ Solver (Обчислювач) - установка параметрів моделювання.

✓ Workspace I / O (Введення / виведення) - установка параметрів обміну даними з робочою областю MATLAB.

✓ Diagnostics (Діагностика) - вибір параметрів режиму діагностики.

✓ Advanced (Додатково) - установка додаткових параметрів.

✓ RealTime Workshop - параметри інструменту "Майстерня реального часу".

установка па

Установка параметрів моделювання моделі виконується за допомогою елементів управління, розміщених на вкладці Solver. Ці елементи розділені на 3 групи Simulation time (Інтервал моделювання) Solver options (Параметри обчислювача), Output options (Параметри виведення).

Simulation time (Інтервал моделювання):

Величина інтервалу моделювання задається за допомогою вказівки початкового (Start time) і кінцевого (Stop time) значень часу. Початковий час, як правило, задається рівним нулю. Величина кінцевого часу задається користувачем, виходячи з умов розв'язуваної задачі.

Solver options (Параметри обчислювача):

При виборі параметрів обчислювача необхідно вказати метод інтегрування (Type), або з фіксованим (Fixed-step), або зі змінним (Variable-step) кроком.

Нижче списків Type знаходиться область, вміст якої змінюється в залежності від обраного методу інтегрування. При виборі Fixed-step в даній області з'являється текстове поле Fixed-step size (Величина фіксованого кроку), що дозволяє вказувати величину кроку інтегрування. Величина кроку інтегрування за замовчуванням встановлюється системою автоматично (auto). Необхідна величина кроку може бути введена замість значення auto або у формі числа, або у вигляді виразу (те ж саме відноситься і до всіх параметрів, що встановлюються системою автоматично).

При виборі Fixed-step необхідно також задати режим розрахунку (Mode).

При виборі Variable-step в області з'являються поля для установки трьох параметрів:

✓ **Max step size** максимальний крок інтегрування. За замовчуванням він встановлюється автоматично (auto), і його значення в цьому випадку дорівнює  $(\text{StopTime} - \text{StartTime}) / 50$ . Часто це значення виявляється занадто великим і спостерігаються графіки представляють собою ламані, а не плавні лінії. В цьому випадку величину максимального кроку інтегрування необхідно ставити явно.

✓ **Min step size** мінімальний крок інтегрування.

✓ **Initial step size** початкове значення кроку інтегрування.

При моделюванні безперервних систем з використанням змінного кроку необхідно вказати точність обчислень:

- відносну (Relative tolerance);

- абсолютну (Absolute tolerance).

За замовчуванням вони рівні відповідно 0,1% і auto.

Output options (Параметри виведення):



У нижній частині вкладки Solver задаються настройки параметрів виведення вихідних сигналів модельованої системи (Output options). Для даного параметра можливий вибір одного з трьох варіантів:

✓ **Refine output (Скоригований висновок)** - дозволяє змінювати крок реєстрації модельного часу і тих сигналів, які зберігаються в робочій області MATLAB за допомогою блоку To Workspace. Установка такту дискретності виконується в рядку редагування Refine factor: розташованої праворуч. За замовчуванням значення Refine factor дорівнює 1, це означає, що реєстрація проводиться за кроком (т. Е. Для кожного значення модельного часу). Якщо задати Refine factor рівним 2, це означає, що буде реєструватися кожне друге значення сигналів, 3 - кожне третє т. Д. Параметр Refine factor може приймати тільки цілі позитивні значення.

✓ **Produce additional output (Додатковий висновок)** - забезпечує додаткову реєстрацію параметрів моделі в задані моменти часу. Їх значення вводяться в рядку редагування (в цьому випадку вона називається Output times) у вигляді списку, укладеного в квадратні дужки. При використанні цього варіанта базовий крок реєстрації () дорівнює 1. Значення часу в списку Output times можуть бути дробовими числами і мати будь-яку точність.

✓ **Produce specified output only (Формувати тільки заданий висновок)** встановлює висновок параметрів моделі тільки в задані моменти часу, які вказуються в полі Output times (Моменти часу виводу) у вигляді вектора.

#### Установка параметрів обміну з робочою областю.

Елементи, що дозволяють управляти введенням в робочу область MATLAB і виводом з неї проміжних даних і результатів моделювання, розташовані на вкладці Workspace I/O.

#### Установка параметрів діагностування моделі.

Вкладка Diagnostics дозволяє змінювати перелік діагностичних повідомлень, що виводяться Simulink і SimPowerSystems в командному вікні MATLAB, а також встановлювати додаткові параметри діагностики моделі.

Повідомлення про помилки або проблемних ситуаціях, виявлених Simulink і SimPowerSystems в ході моделювання і вимагають втручання розробника, виводяться в командному вікні MATLAB. Початковий перелік таких ситуацій наведено в списку Configuration options (Опції конфігурації). Розробник може вказати вид реакції на кожен ситуацію, використовуючи групу перемикачів в полі Action (Дія). За допомогою перемикачів можна вибрати один з варіантів реакції:

- ✓ None- ігнорувати,
- ✓ Warning- видати попередження і продовжити моделювання,
- ✓ Error- видати повідомлення про помилку і зупинити процес моделювання.

Обраний вид реакції відображається в списку поряд з найменуванням події.

виконання моделювання

Запуск моделювання виконується за допомогою вибору пункту меню Simulation / Start або кнопки ► на панелі інструментів. Процес моделювання можна завершити достроково, вибравши пункт меню Simulation / Stop або кнопку ■. Моделювання також можна зупинити (Simulation / Pause) і потім продовжити (Simulation / Continue).

Для спостереження і реєстрація процесів в досліджуваній моделі використовуються віртуальні прилади. До складу віртуальних приладів входять:

- ✓ Scope - осцилограф для спостереження часових залежностей;
- ✓ XY Graph - графічний пристрій в системі полярних координат;
- ✓ Display - пристрій для виведення на екран дисплея значень сигналу.

Бібліотека Simulink є набором візуальних об'єктів, розбитих на кілька розділів:

- Commonly Used Blocks - часто використовувані блоки;
- Continuous - блоки аналогових елементів;

- Discontinuous - блоки нелінійних елементів;
- Discrete - блоки дискретних елементів;
- Logic and Bit Operations - блоки логічних операцій;
- Look-Up Tables - блоки таблиць;
- Math Operations - блоки математичних операцій;
- Model Verification - блоки перевірки властивостей сигналів;
- Model-Wide Utilities - блоки додаткових утиліт;
- Ports & Subsystems - блоки портів і підсистем;
- Signal Attributes - блоки завдання властивостей сигналів;
- Signal Routing - блоки маршрутизації сигналів;
- Sinks - блоки прийому і відображення сигналів;
- Sources --блоки джерел сигналу;
- User-Defined Function - блоки функцій, визначених користувачем;
- Additional Math & Discrete - додаткові блоки математичних операцій і дискретних елементів.

При виборі відповідного розділу бібліотеки його вміст відображається в правій частині вікна.

### **Порядок виконання роботи**

1. В пакеті Simulink програми Matlab створити модель, що представлена на рис.1., та зберегти її під своїм прізвищем.
2. Задати настройки моделювання відповідно до рис.2, інші параметри залишити за замовчуванням.
3. Змоделювати трифазне коротке замикання через 0,02 с роботи джерела напруги в режимі холостого ходу і зняти осцилограми напруги, повного струму короткого замикання його складових для фаз: А, В і С.

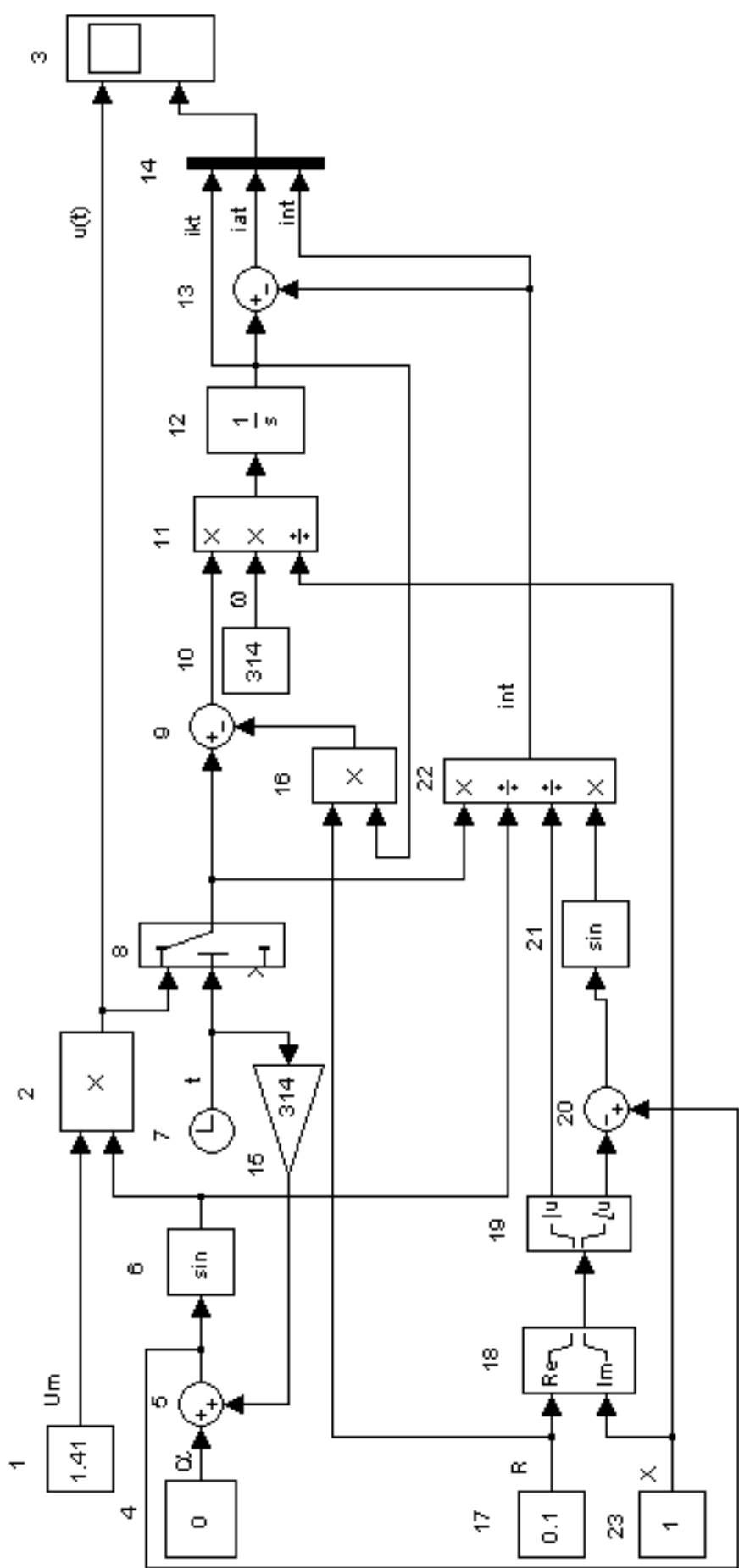


Рис. 1 – Структурна схема комп'ютерної моделі активно-індуктивного ланцюга, що живиться від джерела незмінної напруги

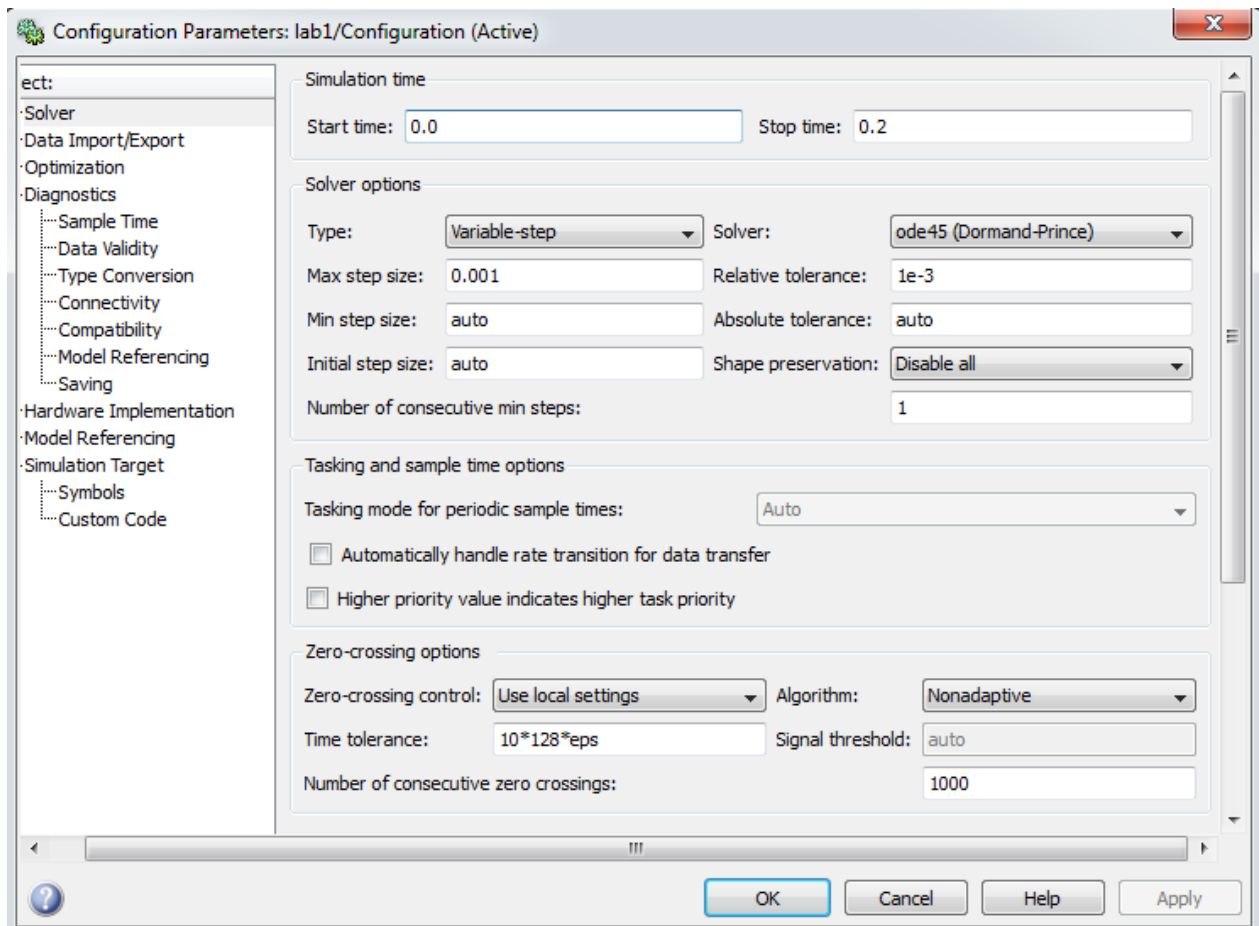


Рис.2 – Налаштування моделювання

### Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Скріншот комп'ютерної моделі та відтворення математичної моделі, що в ній реалізована.
3. Осцилограми дослідів.
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

### Контрольні запитання

1. Які можливості пакету Simulink програми Matlab щодо реалізації математичних моделей основного електротехнічного устаткування?
2. З яких основних розділів складається бібліотека Simulink?

3. Особливості створення комп'ютерної моделі в пакеті Simulink програми Matlab.

4. Особливості підготовки та редагування комп'ютерної моделі в пакеті Simulink програми Matlab.

5. З яких основних вкладок складається вікно настройки параметрів моделювання?

6. Які параметри потребує для введення вкладка Solver?

7. Які параметри потребує для введення вкладка Workspace I/O?

8. Які параметри потребує для введення вкладка Diagnostics?

9. Які параметри потребує для введення вкладка Advanced?

10. Які параметри потребує для введення вкладка Real-Time Workshop?

11. Особливості роботи з комп'ютерною моделлю в пакеті Simulink програми Matlab.

12. Що може бути використано для спостереження і реєстрація процесів в досліджуваній моделі?

## ЛАБОРОТОРНЕ ЗАНЯТТЯ 2

### Створення комп'ютерної моделі синхронного генератора в пакеті Simulink програми Matlab

**Мета роботи** – створення комп'ютерної моделі явнополюсного синхронного генератора без демпферних обмоток для дослідження електромагнітних перехідних процесів при трифазному короткому замиканні в колі навантаження.

**Вказівки з підготовки до роботи** – вивчити математичну модель явнополюсного синхронного генератора з демпферними обмотками.

#### Короткі пояснення до роботи

Для створення комп'ютерної моделі явнополюсного синхронного генератора без демпферних обмоток для дослідження електромагнітних перехідних процесів при раптовому замиканні фаз в будь-якій точці кола навантаження або на шинах генератора зручно використовувати наступний вигляд математичної моделі синхронного генератора.

Рівняння балансу напруг на шинах генератора реалізується у вигляді системи

$$\left. \begin{aligned} u_A &= -\frac{d\psi_A}{\omega_0 dt} - r i_A \\ u_B &= -\frac{d\psi_B}{\omega_0 dt} - r i_B \\ u_C &= -\frac{d\psi_C}{\omega_0 dt} - r i_C \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

Похідна потокозчеплення кожної обмотки має вигляд

$$\left. \begin{aligned} -\frac{d\Psi_A}{dt} &= e_A - \frac{d(L i_{AA})}{dt} - \frac{d(M i_{ABB})}{dt} + \frac{d(M i_{ACC})}{dt} \\ -\frac{d\Psi_B}{dt} &= e_B - \frac{d(L i_{BB})}{dt} - \frac{d(M i_{BAA})}{dt} + \frac{d(M i_{BCC})}{dt} \\ -\frac{d\Psi_C}{dt} &= e_C - \frac{d(L i_{CC})}{dt} - \frac{d(M i_{CAA})}{dt} + \frac{d(M i_{CBB})}{dt} \end{aligned} \right\} . \quad (2)$$

Електрорушійна сила кожної фази моделюється як

$$\left. \begin{aligned} e_A &= -\frac{d(M i_{Af f})}{dt} \\ e_B &= -\frac{d(M i_{Bf f})}{dt} \\ e_C &= -\frac{d(M i_{Cf f})}{dt} \end{aligned} \right\} . \quad (3)$$

Струм статора кожної фази генератора реалізується у вигляді системи

$$\left\{ \begin{aligned} i_A &= \int \frac{e_A - \left( \frac{dL_A}{\omega_o dt} + R_{nagr} + R_{st} \right) i_A - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{ABB})}{dt} - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{ACC})}{dt}}{L_A + L_{nagr}} \omega_o \\ i_B &= \int \frac{e_B - \left( \frac{dL_B}{\omega_o dt} + R_{nagr} + R_{st} \right) i_B - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{BAA})}{dt} - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{BCC})}{dt}}{L_B + L_{nagr}} \omega_o \\ i_C &= \int \frac{e_C - \left( \frac{dL_C}{\omega_o dt} + R_{nagr} + R_{st} \right) i_C - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{CAA})}{dt} - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{CBB})}{dt}}{L_C + L_{nagr}} \omega_o \end{aligned} \right\} . \quad (4)$$

Струм в обмотці збудження моделюється згідно з рівнянням

$$\frac{1}{\omega_o} \frac{di_f}{dt} L_f + r_f i_f = u_f - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{fAA} + M i_{fBB} + M i_{fCC})}{dt} . \quad (5)$$

Всі індуктивності та взаємоіндуктивності моделюються відповідно до систем рівнянь (6-9).



$$\left. \begin{aligned} L_A &= l_0 + l_2 \cos 2\gamma \\ L_B &= l_0 + l_2 \cos 2\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_C &= l_0 + l_2 \cos 2\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

та

$$\left. \begin{aligned} M_{AB} &= M_{BA} = m_0 + m_2 \cos 2\left(\gamma - \frac{\pi}{3}\right) \\ M_{AC} &= M_{CA} = m_0 + m_2 \cos 2\left(\gamma + \frac{\pi}{3}\right) \\ M_{BC} &= M_{CB} = m_0 + m_2 \cos 2\gamma \end{aligned} \right\} \quad (7)$$

та

$$\left. \begin{aligned} M_{Af} &= M_{fA} = M_d \cos \gamma \\ M_{Bf} &= M_{fB} = M_d \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{Cf} &= M_{fC} = M_d \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (8)$$

та

$$\left. \begin{aligned} M_{1dA} &= M_{Ad} = M_{1dm} \cos \gamma \\ M_{1dB} &= M_{Bd} = M_{1dm} \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{1dC} &= M_{Cd} = M_{1dm} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{1qA} &= M_{Aq} = M_{1qm} \sin \gamma \\ M_{1qB} &= M_{Bq} = M_{1qm} \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{1qC} &= M_{Cq} = M_{1dm} \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

де  $l_0, m_0$  — постійні складові відповідних індуктивностей;

$l_2, m_2$  — амплітуди других гармонік тих же індуктивностей;

$\gamma$  — кут між магнітною оссю фази  $A$  та продольною оссю  $d$ ,

$$\gamma = \omega_0 t + \gamma_0,$$

$l_0$  та  $m_0$ ,  $l_2$  та  $m_2$  виражаються через індуктивності, якими звичайно характеризується синхронна машина.

$$\left. \begin{aligned} l_0 &= \frac{1}{3}(L_d + L_q + L_0) \\ l_2 = m_2 &= \frac{1}{3}(L_d - L_q) \\ m_0 &= \frac{1}{3}\left(L_0 - \frac{L_d + L_q}{2}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

де в відносних одиницях  $L_d = X_d$ ;  $L_q = X_q$ ;  $L_0 = X_0$ .

Комп'ютерна модель явнополюсного синхронного генератора без демпферних обмоток для дослідження електромагнітних перехідних процесів при раптовому замиканні фаз в будь-якій точці кола навантаження або на шинах генератора повинна мати кінцевий вигляд, що наведений на рис. 1 Підсистема 10 (Subsystems 10) повинна складатися з підсистем, що реалізують системи рівнянь (1-9) (рис.2). Наприклад другі рівняння систем рівнянь (2) та (4) моделюються в підсистемі 7 наступним чином (рис.3). Аналогічним чином повинні бути реалізовані всі рівняння математичного моделі.

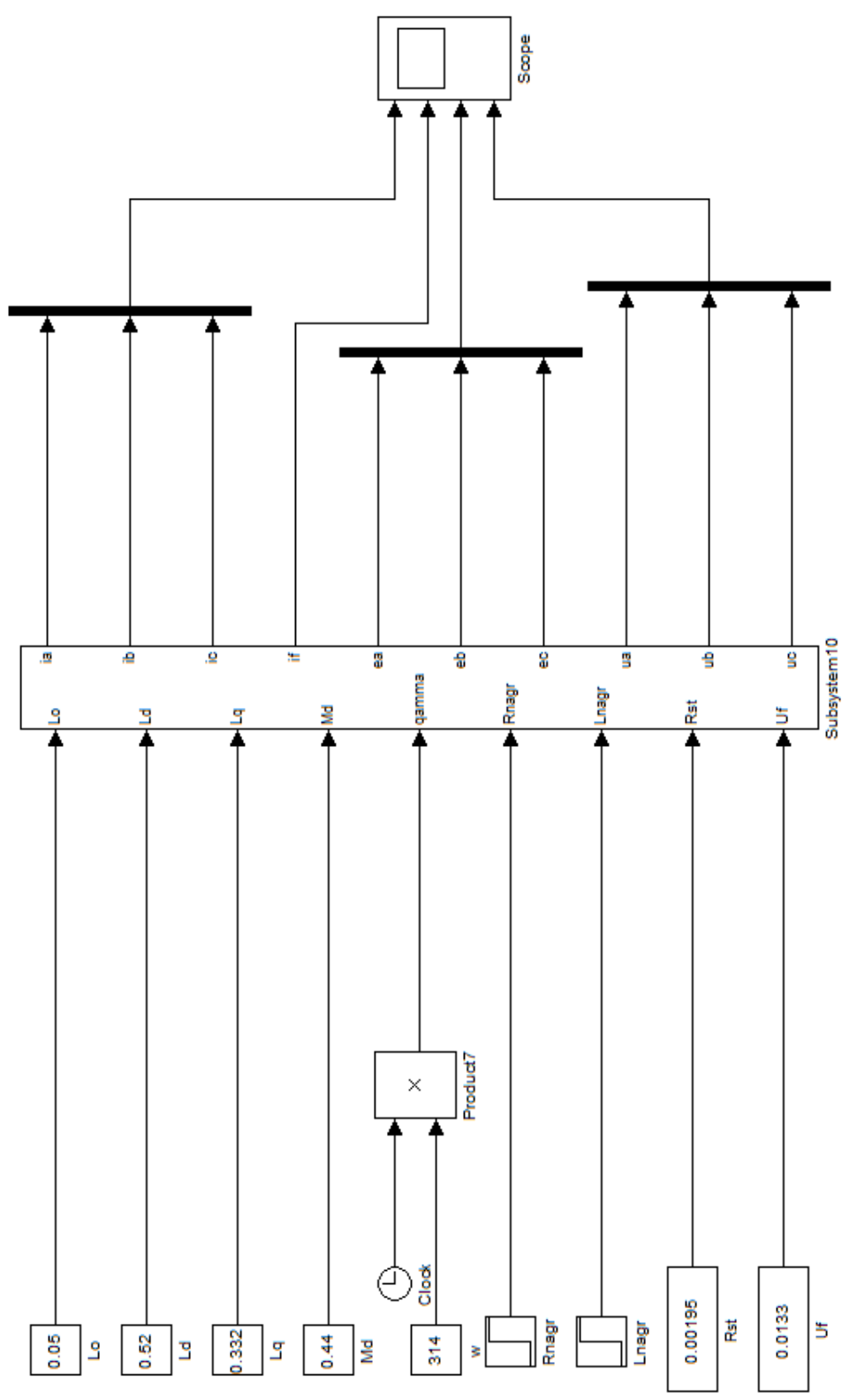


Рис.1 – Зовнішній вигляд комп'ютерної моделі синхронного генератора

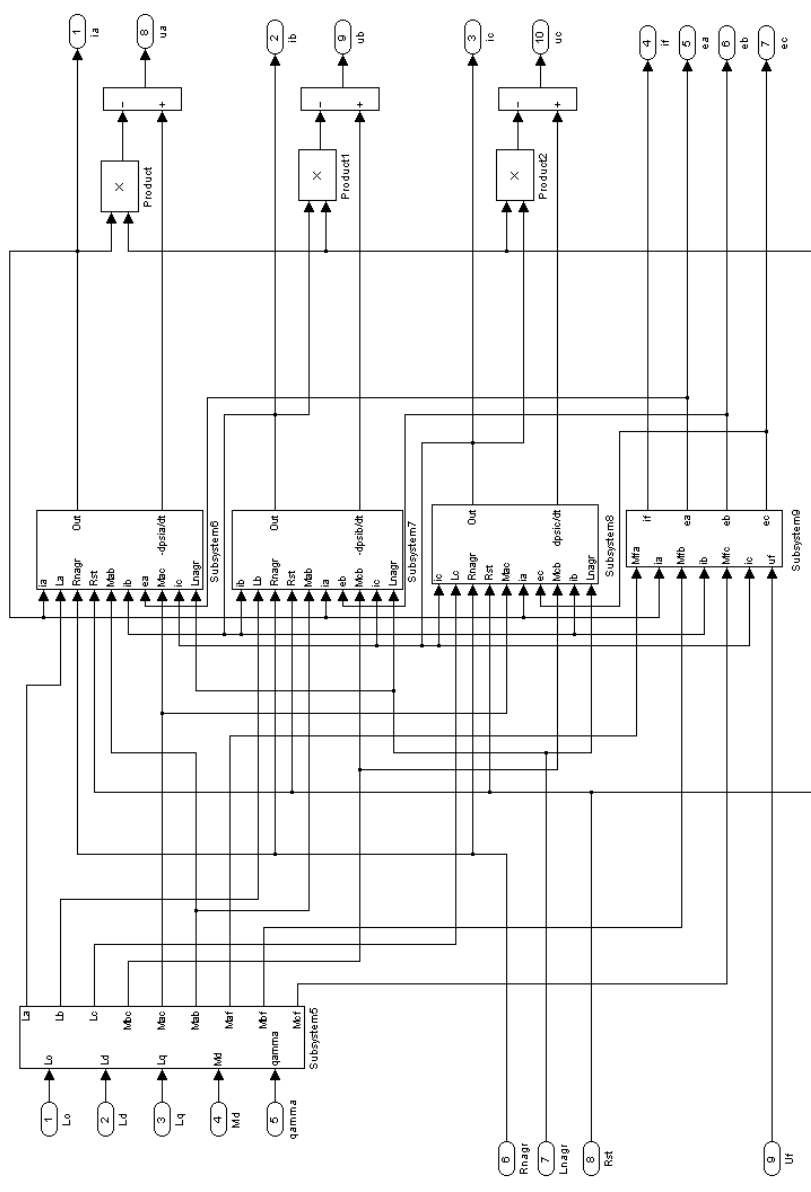


Рис.2 — Комп'ютерна реалізація Subsystems10

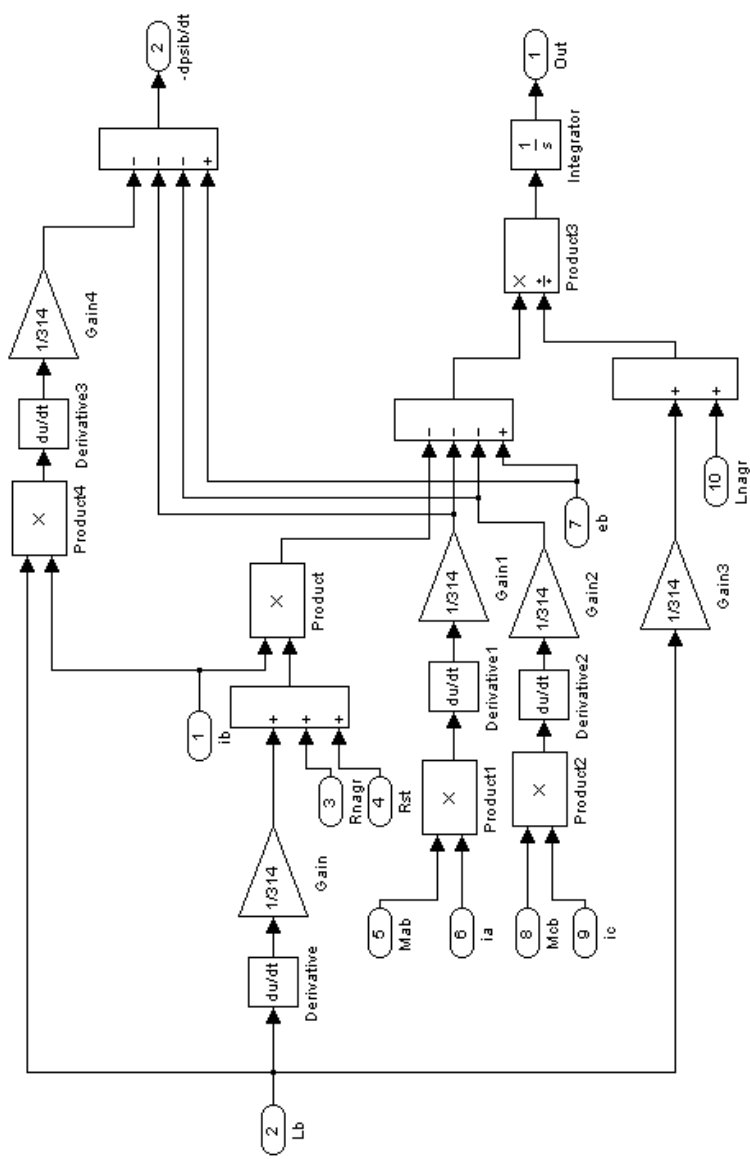


Рис. 3 –Комп’ютерна реалізація других рівнянь систем рівнянь (4) та (2)

При реалізації математичної моделі синхронного генератора в довідниках наведені не всі параметри явного вигляді, що потрібні моделювання. Важливою задачею є перерахунок паспортних параметрів до параметрів моделі у відносних одиницях при номінальних умовах (в.о.н.у.), наведених до обмотки статора.

Параметрами, що потребує модель є:  $L_{f*н}, L_{d*н}, L_{q*н}, L_{o*н}, M_{d*н}, R_{st*н}, R_{f*н}, U_{f*н}$ . Зазвичай в довідниках наведені наступні параметри (табл.1)

Таблиця 1 – Паспортні параметри синхронного генератора

Паспортні параметри	Позначення
Номінальна повна потужність, МВА	$S_{ном}$
Номінальна активна потужність, МВт	$P_{ном}$
Номінальна напруга, кВ	$U_{ном}$
Номінальний струм, кА	$I_{ном}$
Номінальний коефіцієнт потужності	$\cos \phi$
Номінальна напруга збудження, В	$U_{fном}$
Номінальний струм збудження, А	$I_{fном}$
Струм холостого ходу, А	$I_{fx}$
Активний опір обмотки статора, Ом	$R_{st}$
Активний опір обмотки збудження, Ом	$R_f$
Синхронні індуктивні опори по продольній та поперечній осі, в.о.н.у.	$X_d, X_q$
Перехідні індуктивні опори по продольній та поперечній осі, в.о.н.у.	$X'_d, X'_q$
Сверхперехідні індуктивні опори по продольній та поперечній осі, в.о.н.у.	$X''_d, X''_q$
Індуктивний опір зворотної послідовності, в.о.н.у.	$X_2$
Індуктивний опір нульової послідовності, в.о.н.у.	$X_0$
Постійна часу обмотки збудження при інших розімкнутих контурах, с	$T_{do}$
Постійна часу затухання аперіодичної складової при трьохфазному короткому замиканні,с	$T_a^{(3)}$

Продовження таблиці 1

Паспортні параметри	Позначення
Сверхперехідні постійні часу по прокольній та поперечній осі, с	$T'_{d'}, T'_{q'}$
Відношення короткого замикання	ОКЗ
Момент інерції, кг*м <sup>2</sup>	$J$
Число пар полюсів	$p$

Індуктивності  $L_{d^{*H}}, L_{q^{*H}}, L_{o^{*H}}$  дорівнюють

$$L_{d^{*H}} = X_{d^{*H}}, L_{q^{*H}} = X_{q^{*H}}, L_{o^{*H}} = X_{o^{*H}}.$$

Взаємоіндуктивності  $M_{d^{*H}}$  та  $M_{q^{*H}}$  розраховують з наступного рівняння [3]

$$M_{d^{*H}} = X_{ad^{*H}} = \frac{(X_{d^{*H}} - X'_{d^{*H}})(X_{d^{*H}} - X''_{d^{*H}})}{2(X_{d^{*H}} - X'_{d^{*H}}) - (X_{d^{*H}} - X''_{d^{*H}})},$$

$$M_{q^{*H}} = X_{aq^{*H}} = \frac{(X_{q^{*H}} - X'_{q^{*H}})(X_{q^{*H}} - X''_{q^{*H}})}{2(X_{q^{*H}} - X'_{q^{*H}}) - (X_{q^{*H}} - X''_{q^{*H}})}.$$

Індуктивність  $L_{f^{*H}}$  розраховують за формулою [3]

$$L_{f^{*H}} = X_{f^{*H}} = \frac{X_{ad^{*H}}^2}{X_{d^{*H}} - X'_{d^{*H}}}.$$

Активний опір статора  $R_{st^{*H}}$  в перерахунку з іменованих одиниць до відносних одиниць при робочій температурі ( $T_p=75^\circ\text{C}$ ) дорівнює

$$R_{st^{*H}} = \frac{R_{st}}{Z_{\text{НОМ}}},$$

де  $Z_{\text{НОМ}}$  – номінальний повний опір генератора,  $Z_{\text{НОМ}} = \frac{U_{\text{НОМ}}^2}{S_{\text{НОМ}}}$ .

У разі, якщо данні про активний опір статора відсутні, його розраховують при робочій температурі за формулою:

$$R_{st*H} = \frac{X_{2*H}}{\omega T_a^{(3)}}.$$

Активний опір ротора  $R_{f*H}$  в перерахунку з іменованих одиниць до відносних одиниць при робочій температурі ( $T_p=75^\circ\text{C}$ ), наведений до обмотки статора, дорівнює [10]

$$R_{f*H} = R_f \left( \frac{X_{ad}}{OK3 * X_d} \right)^2 \frac{I_{fK}^2}{S_{НОМ}}.$$

У разі, якщо данні про активний опір ротора відсутні, його розраховують при робочій температурі за формулою:

$$R_{f*H} = \frac{U_{fНОМ}}{I_{fНОМ}} \left( \frac{X_{ad}}{OK3 * X_d} \right)^2 \frac{I_{fK}^2}{S_{НОМ}}$$

або

$$R_{f*H} = \frac{r_f}{\omega T_{do}}$$

У випадку, якщо активний опір у довіднику наведений при температурі, відмінній від робочої, необхідно його перерахувати за формулою [3]

$$R_{T_p} = R_{T_0} \frac{235 + T_p}{235 + T_0},$$

де  $T_0$  – температура, при якій наведено опір обмотки.

Напруга обмотки ротора, яка приведена до обмотки статора в відносних одиницях, визначається як

$$U_{f*H} = U_{fНОМ} \frac{I_{fK} X_{ad}}{S_{НОМ} * OK3 * X_d}.$$

При наявності демпферних обмоток у генератора, їх індуктивні опори по відповідним осям визначаються



$$X_{d1^*H} = X_{ad^*H} + X_{\sigma d1^*H}, \quad X_{q1^*H} = X_{aq^*H} + X_{\sigma q1^*H},$$

де  $X_{\sigma d1^*H}$ ,  $X_{\sigma q1^*H}$  – індуктивний опір розсіювання демпферних обмоток по осі  $d$  та  $q$  відповідно, що розраховуються за формулами [3]

$$X_{\sigma d1^*H} = \frac{1}{\frac{1}{X_{d^*H}'' - X_{\sigma st^*H}} - \frac{1}{X_{ad^*H}} - \frac{1}{X_{\sigma f^*H}}}, \quad X_{\sigma q1^*H} = \frac{1}{\frac{1}{X_{q^*H}'' - X_{\sigma st^*H}} - \frac{1}{X_{aq^*H}}},$$

де  $X_{\sigma st^*H}$  – індуктивний опір розсіювання обмотки статора.

Активні опори демпферних обмоток визначаються як [3]

$$r_{\sigma d1^*H} = \frac{(X_{d1^*H} X_{d^*H} - X_{ad^*H}^2) X_{d^*H}''}{\omega X_{d^*H} X_{d^*H}' T_{d^*H}''},$$

$$r_{\sigma q1^*H} = \frac{X_{q1^*H} X_{q^*H} - X_{aq^*H}^2}{\omega X_{q^*H} T_{q^*H}''}.$$

Постійна часу генератора дорівнює

$$T_j = \frac{J\omega^2}{S_H},$$

де  $\omega$  – синхронна кутова швидкість,  $\omega = \frac{100\pi}{p}$

### Порядок виконання роботи

1. В пакеті Simulink програми Matlab на базі відповідної математичної моделі створити комп'ютерну модель синхронного генератора без демпферних обмоток для дослідження електромагнітних перехідних процесів при раптовому замиканні фаз в будь-якій точці кола навантаження або на шинах генератора.

2. На базі довідникових даних розрахувати та ввести параметри моделі за варіантами (табл.2).

3. Змодельовати навантажувальний режим синхронного генератора при  $X_{nagr}=1$ ,  $R_{nagr}=0.1$ , трифазне коротке замикання на шинах генератора та в навантаженні при  $X_{nagr}=0,5$ ,  $R_{nagr}=0.05$ , зняти осцилограми напруги, струму та електрорушійної сили для фаз: А, В і С.

4. Змоделювати трифазне коротке замикання в навантаженні при  $X_{nagr}=0,5$ ,  $R_{nagr}=0.05$  з урахуванням електромеханічних перехідних процесів.

5. Змоделювати трифазне коротке замикання в навантаженні при  $X_{nagr}=0,5$ ,  $R_{nagr}=0.05$  з урахуванням дії автоматичного регулятора збудження пропорційної дії.

6. Змоделювати трифазне коротке замикання в навантаженні при  $X_{nagr}=0,5$ ,  $R_{nagr}=0.05$  з урахуванням електромеханічних перехідних процесів та дії автоматичного регулятора швидкості.

Таблиця 2. – Вихідні данні для моделювання

№ варіанту	Тип генератора
1	Т-20-2У3 ( $U_H=6,3$ кВ)
2	ТВС-32У3 ( $U_H=6,3$ кВ)
3	ТВС-32У3( $U_H=10,5$ кВ)
4	ТВФ-63-2У3( $U_H=6,3$ кВ)
5	ТВФ-63-2ЕУ3( $U_H=10,5$ кВ)
6	ТВФ-100-2У3( $U_H=10,5$ кВ)
7	ТВВ-160-2ЕУ3( $U_H=18$ кВ)
8	ТГВ-200-2У3( $U_H=15,75$ кВ)
9	ТГВ-200-2МУ3( $U_H=15,75$ кВ)
10	ТВВ-220-2ЕУ3( $U_H=15,75$ кВ)
11	ТГВ-300-2У3( $U_H=20$ кВ)
12	ТВВ-320-2ЕУ3( $U_H=20$ кВ)
13	ТГВ-500-2У3( $U_H=20$ кВ)
14	ТВВ-800-2У3( $U_H=24$ кВ)
15	ТВВ-800-2ЕУ3( $U_H=24$ кВ)
16	ТВВ-1000-2У3( $U_H=24$ кВ)

### Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.

2. Скріншот кінцевої комп'ютерної моделі синхронного генератора та всіх її складових підсистем.
3. Осцилограми дослідів.
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

### Контрольні запитання

1. Який вигляд мають рівняння балансу напруг, що реалізовані в моделі синхронного генератора?
2. Як реалізується в моделі похідна потокозчеплення кожної обмотки синхронного генератора?
3. Яким чином моделюється електрорушійна сила кожної фази синхронного генератора?
4. Яким виразом реалізується струм статора кожної фази синхронного генератора?.
5. За допомогою якого блока або групи блоків моделюється струм в обмотці збудження?
6. Як визначаються власні індуктивності синхронного генератора?
7. За допомогою яких виразів обчислюються взаємні індуктивності?
8. Які параметри моделі є невідомими?
9. Основні паспортні параметри синхронного генератора?
10. Запишіть формули для перерахунку від паспортних даних до параметрів моделі для індуктивностей та активного опору статора синхронного генератора?
11. Який вигляд мають формули для перерахунку від паспортних даних до параметрів моделі для обмотки збудження синхронного генератора?
12. Як визначаються індуктивні опори демпферних обмоток для комп'ютерної моделі синхронного генератора?

## ЛАБОРОТОРНЕ ЗАНЯТТЯ 3

### Створення комп'ютерної моделі асинхронізованого генератора в пакеті Simulink програми Matlab

**Мета роботи** – створення комп'ютерної моделі асинхронізованого генератора для аналізу різних режимів роботи.

**Вказівки з підготовки до роботи** – вивчити математичну модель асинхронізованого генератора.

#### Короткі пояснення до роботи

Для створення комп'ютерної моделі асинхронізованого генератора слід використовувати наступний вигляд математичної моделі.

Електрорушійна сила кожної фази моделюється як

$$\left. \begin{aligned} e_A &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{fd})}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{fq})}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{dAd})}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{qAq})}{dt} \\ e_B &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{fBd})}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{fBq})}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{dBd})}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{qBq})}{dt} \\ e_C &= \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{fCd})}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{fCq})}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{dCd})}{dt} + \frac{1}{\omega_0} \frac{d(M i_{qCq})}{dt} \end{aligned} \right\} \cdot \quad (1)$$

Рівняння балансу напруг моделюється згідно з системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} u_A &= \frac{d(e_A - L_{AA} i_A + M_{AB} i_B + M_{AC} i_C)}{\omega_0 dt} - r_{stA} i_A \\ u_B &= \frac{d(e_B - L_{BB} i_B + M_{BA} i_A + M_{BC} i_C)}{\omega_0 dt} - r_{stB} i_B \\ u_C &= \frac{d(e_C - L_{CC} i_C + M_{CB} i_B + M_{CA} i_A)}{\omega_0 dt} - r_{stC} i_C \end{aligned} \right\} \cdot \quad (2)$$

Напруга, що підведена до обмоток ротора визначається як

$$\left. \begin{aligned} u_{fd} &= U_{fdm} \cos(\omega_o - \omega)t \\ u_{fq} &= U_{fqm} \sin(\omega_o - \omega)t \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

Струм статора кожної фази генератора реалізується у вигляді системи

$$\left. \begin{aligned} u_A &= r_{нає} i_A + \frac{di_A}{\omega_0 dt} L_{нає} \\ u_B &= r_{нає} i_B + \frac{di_B}{\omega_0 dt} L_{нає} \\ u_C &= r_{нає} i_C + \frac{di_C}{\omega_0 dt} L_{нає} \end{aligned} \right\}. \quad (4)$$

Струми в обмотках ротора моделюються згідно з рівняннями

$$\left. \begin{aligned} i_{fd} &= \frac{1}{\omega_0} \frac{\int (u_{fd} - r_{fd} i_{fd}) - (M_{fdA} i_A + M_{fdB} i_B + M_{fdC} i_C + M_{1dfd} i_{1d})}{L_{fd}} \\ i_{fq} &= \frac{1}{\omega_0} \frac{\int (u_{fq} - r_{fq} i_{fq}) - (M_{fqA} i_A + M_{fqB} i_B + M_{fqC} i_C + M_{1qfq} i_{1q})}{L_{fq}} \\ i_{1dfd} &= \frac{1}{\omega_0} \frac{\int (0 - r_{1d} i_{1d}) - (M_{1dA} i_A + M_{1dB} i_B + M_{1dC} i_C + M_{1dfd} i_{fd})}{L_{1d}} \\ i_{1qfq} &= \frac{1}{\omega_0} \frac{\int (0 - r_{1q} i_{1q}) - (M_{1qA} i_A + M_{1qB} i_B + M_{1qC} i_C + M_{1qfq} i_{fq})}{L_{1q}} \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

Всі індуктивності та взаємоіндуктивності моделюються відповідно до систем рівнянь (6-12).

$$L_A = L_B = L_C = l_0, \quad (6)$$

$$M_{AB} = M_{AC} = M_{CB} = M_{BA} = M_{CA} = M_{BC} = m_0, \quad (7)$$

де

$$\left. \begin{aligned} l_0 &= \frac{1}{3} (L_d + L_q + L_0) \\ m_0 &= \frac{1}{3} \left( L_0 - \frac{L_d + L_q}{2} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

де в відносних одиницях  $L_d = X_d$ ;  $L_q = X_q$ ;  $L_0 = X_0$ ,

та

$$\left. \begin{aligned} M_{fdA} = M_{1dA} = M_{dm} \cos \gamma \\ M_{fdB} = M_{1dB} = M_{dm} \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{fdC} = M_{1dC} = M_{dm} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (9)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{fqA} = M_{1qA} = M_{qm} \sin \gamma \\ M_{fqB} = M_{1qB} = M_{qm} \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{fqC} = M_{1qC} = M_{qm} \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (10)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{1dA} = M_{Akd} = M_{1dm} \cos \gamma \\ M_{1dB} = M_{Bkd} = M_{1dm} \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{1dC} = M_{Ckd} = M_{1dm} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{1qA} = M_{Aqk} = M_{1qm} \sin \gamma \\ M_{1qB} = M_{Bqk} = M_{1qm} \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{1qC} = M_{Cqk} = M_{1qm} \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (11)$$

$$\left. \begin{aligned} M_{1dfd} = M_{dm} \\ M_{1qfq} = M_{qm} \end{aligned} \right\}. \quad (12)$$

Комп'ютерна модель асинхронізованого генератора для аналізу різних режимів роботи повинна мати кінцевий вигляд, що наведений на рис. 1 Підсистеми 1-7 повинні реалізовувати системи рівнянь (1-12). Наприклад, реалізація підсистеми 4 (Subsystems 4) має вигляд, що представлений на рис.2. Розрахунок вихідних параметрів моделі відбувається за тими ж формулами, що і для синхронного генератора.

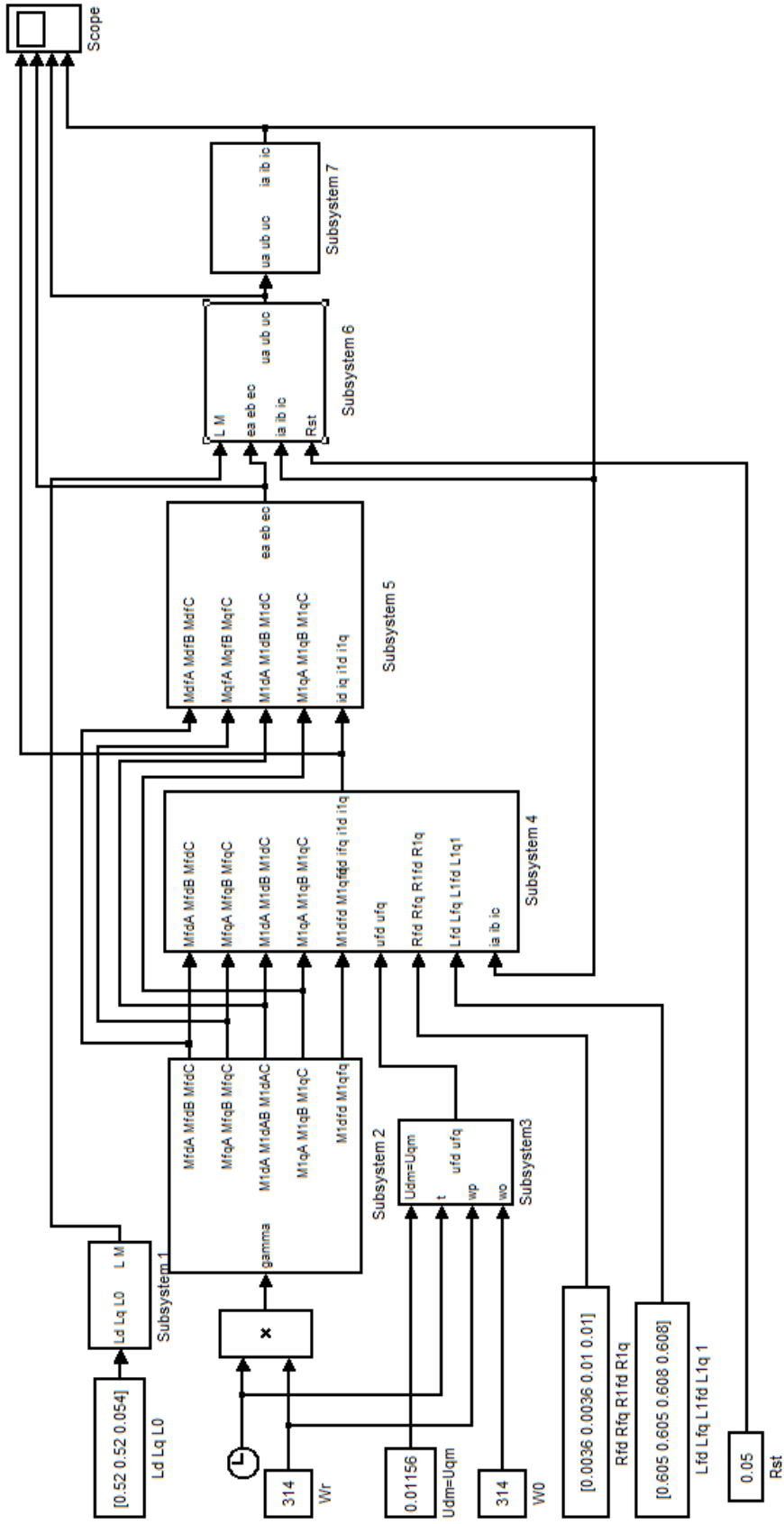


Рис.1 – Зовнішній вигляд комп'ютерної моделі асинхронізованого генератора

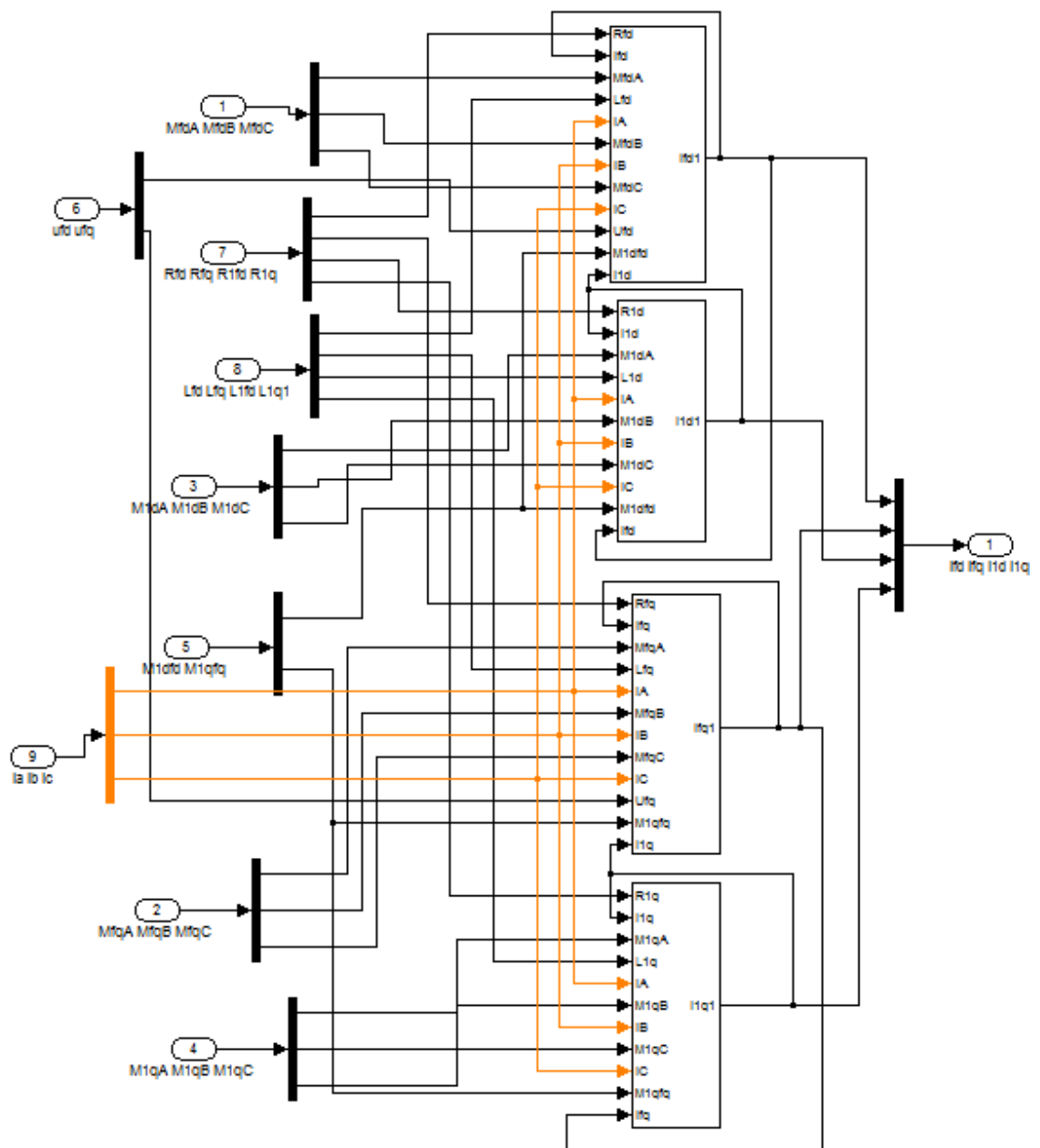


Рис. 2 – Комп’ютерна реалізація Subsistemas4

### Порядок виконання роботи

1. В пакеті Simulink програми Matlab на базі відповідної математичної моделі створити комп’ютерну модель асинхронізованого генератора для аналізу різних режимів роботи.

2. На базі довідникових даних розрахувати та ввести параметри моделі за варіантами (табл.1). Параметри обмоток збудження та демпферних обмоток по різних осях прийняти однаковими. Параметри навантаження прийняти  $I_{\text{наб}}=1$  та  $R_{\text{наб}}=1$ .



3. Змоделювати роботу асинхронізованого генератора при робочій швидкості обертання 50, 100, 150, 200, 250, 300 та 314 рад/сек, зняти осцилограми напруги, струму й електрорушійної сили для фаз: А, В і С та струмів в обмотках ротора.

Таблиця 1 – Вихідні данні для моделювання

№ варіанту	Тип генератора
1	Т-20-2У3 ( $U_H=6,3$ кВ)
2	ТВС-32У3 ( $U_H=6,3$ кВ)
3	ТВС-32У3( $U_H=10,5$ кВ)
4	ТВФ-63-2У3( $U_H=6,3$ кВ)
5	ТВФ-63-2ЕУ3( $U_H=10,5$ кВ)
6	ТВФ-100-2У3( $U_H=10,5$ кВ)
7	ТВВ-160-2ЕУ3( $U_H=18$ кВ)
8	ТГВ-200-2У3( $U_H=15,75$ кВ)
9	ТГВ-200-2МУ3( $U_H=15,75$ кВ)
10	ТВВ-220-2ЕУ3( $U_H=15,75$ кВ)
11	ТГВ-300-2У3( $U_H=20$ кВ)
12	ТВВ-320-2ЕУ3( $U_H=20$ кВ)
13	ТГВ-500-2У3( $U_H=20$ кВ)
14	ТВВ-800-2У3( $U_H=24$ кВ)
15	ТВВ-800-2ЕУ3( $U_H=24$ кВ)
16	ТВВ-1000-2У3( $U_H=24$ кВ)

### **Зміст звіту по лабораторній роботі**

1. Короткий опис роботи.
2. Скріншот кінцевої комп'ютерної моделі асинхронізованого генератора та всіх її складових підсистем.
3. Осцилограми дослідів.
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

## Контрольні запитання

1. Який вигляд мають рівняння балансу електрорушійних сил, що реалізовані в моделі асинхронізованого генератора?
2. Як реалізуються рівняння балансу напруг асинхронізованого генератора?
3. Яким виразом реалізується струм статора кожної фази асинхронізованого генератора?
4. За допомогою якого блока або групи блоків моделюється струми в обмотці збудження асинхронізованого генератора?
5. Яким чином моделюються струми в демпферних обмотках асинхронізованого генератора?
6. Як визначаються власні індуктивності асинхронізованого генератора?
7. За допомогою яких виразів обчислюються взаємні індуктивності асинхронізованого генератора?
8. Які параметри моделі є невідомими?
9. Основні паспортні параметри асинхронізованого генератора?
10. Запишіть формули для перерахунку від паспортних даних до параметрів моделі для індуктивностей та активного опору статора асинхронізованого генератора?
11. Який вигляд мають формули для перерахунку від паспортних даних до параметрів моделі для обмоток ротора асинхронізованого генератора?
12. Чим принципово відрізняються математичні моделі синхронного та асинхронізованого генераторів?

## ЛАБОРОТОРНЕ ЗАНЯТТЯ 4

### Створення комп'ютерної моделі синхронного двигуна в пакеті Simulink програми Matlab

**Мета роботи** – створення комп'ютерної моделі синхронного двигуна для аналізу процесу пуску.

**Вказівки з підготовки до роботи** – вивчити математичну модель синхронного двигуна.

#### Короткі пояснення до роботи

Для створення комп'ютерної моделі синхронного двигуна слід використовувати наступний вигляд математичної моделі.

Електрорушійна сила кожної фази моделюється як

$$\left. \begin{aligned} e_A &= -\frac{d(M i_{Af f})}{dt} \\ e_B &= -\frac{d(M i_{Bf f})}{dt} \\ e_C &= -\frac{d(M i_{Cf f})}{dt} \end{aligned} \right\} . \quad (1)$$

Струм статора кожної фази двигуна реалізується у вигляді системи

$$\left\{ \begin{aligned} i_A &= \int \frac{u_A + e_A - \left(\frac{dL_A}{\omega_o dt} + R_{st}\right) i_A - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{AB B})}{dt} - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{AC C})}{dt}}{\frac{L_A}{\omega_o}} \\ i_B &= \int \frac{u_B + e_B - \left(\frac{dL_B}{\omega_o dt} + R_{st}\right) i_B - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{BA A})}{dt} - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{BC C})}{dt}}{\frac{L_B}{\omega_o}} \\ i_C &= \int \frac{u_C + e_C - \left(\frac{dL_C}{\omega_o dt} + R_{st}\right) i_C - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{CA A})}{dt} - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{CB B})}{dt}}{\frac{L_C}{\omega_o}} \end{aligned} \right. . \quad (2)$$

Струм в обмотці збудження моделюється згідно з рівнянням

$$\frac{1}{\omega_o} \frac{di_f}{dt} L_f + r_f i_f = u_f - \frac{1}{\omega_o} \frac{d(M i_{fA} + M j_{fB} + M j_{fC})}{dt}. \quad (3)$$

Всі індуктивності та взаємоіндуктивності моделюються відповідно до систем рівнянь (6-9).

$$\left. \begin{aligned} L_A &= l_0 + l_2 \cos 2\gamma \\ L_B &= l_0 + l_2 \cos 2\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ L_C &= l_0 + l_2 \cos 2\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (4)$$

та

$$\left. \begin{aligned} M_{AB} &= M_{BA} = m_0 + m_2 \cos 2\left(\gamma - \frac{\pi}{3}\right) \\ M_{AC} &= M_{CA} = m_0 + m_2 \cos 2\left(\gamma + \frac{\pi}{3}\right) \\ M_{BC} &= M_{CB} = m_0 + m_2 \cos 2\gamma \end{aligned} \right\} \quad (5)$$

та

$$\left. \begin{aligned} M_{Af} &= M_{fA} = M_d \cos \gamma \\ M_{Bf} &= M_{fB} = M_d \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{Cf} &= M_{fC} = M_d \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\} \quad (6)$$

та

$$\left. \begin{aligned} M_{1dA} &= M_{Ad} = M_{1dm} \cos \gamma \\ M_{1dB} &= M_{Bd} = M_{1dm} \cos\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{1dC} &= M_{Cd} = M_{1dm} \cos\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{1qA} &= M_{Aq} = M_{1qm} \sin \gamma \\ M_{1qB} &= M_{Bq} = M_{1qm} \sin\left(\gamma - \frac{2\pi}{3}\right) \\ M_{1qC} &= M_{Cq} = M_{1dm} \sin\left(\gamma + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

де  $l_0, m_0$  — постійні складові відповідних індуктивностей;

$l_2, m_2$  — амплітуди других гармонік тих же індуктивностей;

$\gamma$  — кут між магнітною віссю фази  $A$  та поздовжньою віссю  $d$ ,

$$\gamma = \omega t + \gamma_0,$$

$l_0$  та  $m_0$ ,  $l_2$  та  $m_2$  виражаються через індуктивності, якими звичайно характеризується синхронна машина.

$$\left. \begin{aligned} l_0 &= \frac{1}{3}(L_d + L_q + L_0) \\ l_2 = m_2 &= \frac{1}{3}(L_d - L_q) \\ m_0 &= \frac{1}{3}\left(L_0 - \frac{L_d + L_q}{2}\right) \end{aligned} \right\}, \quad (8)$$

де в відносних одиницях  $L_d = X_d$ ;  $L_q = X_q$ ;  $L_0 = X_0$ .

Основне рівняння руху ротора двигуна реалізовано як

$$\omega_{\text{пот}} = \omega_{\text{поч}} + \frac{\omega_0 \int [(u_A j_A + u_B j_B + u_C j_C) - (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)R_{st} - M_{\text{мех}}] dt}{T_j}, \quad (9)$$

де  $\omega_{\text{поч}}, \omega_{\text{пот}}$  — початкова та поточні швидкості синхронного двигуна,  $M_{\text{мех}}$  — механічний момент на валу двигуна.

Комп'ютерна модель синхронного двигуна для аналізу процесу пуску повинна мати кінцевий вигляд, що наведений на рис. 1 Підсистема 10 (Subsystems 10) повинна складатися з підсистем, що реалізують системи рівнянь (1-8) (рис.2). Підсистема 12 (Subsystems 10) реалізує отримання кута  $\delta$  в градусах в наглядному вигляді (рис.3). Розрахунок вихідних параметрів моделі відбувається за тими ж формулами, що і для синхронного генератора.

Напругу на шинах двигуна задати у вигляді системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t \\ u_B &= U_m \sin\left(\omega t - \frac{2\pi}{3}\right) \\ u_C &= U_m \sin\left(\omega t + \frac{2\pi}{3}\right) \end{aligned} \right\}.$$

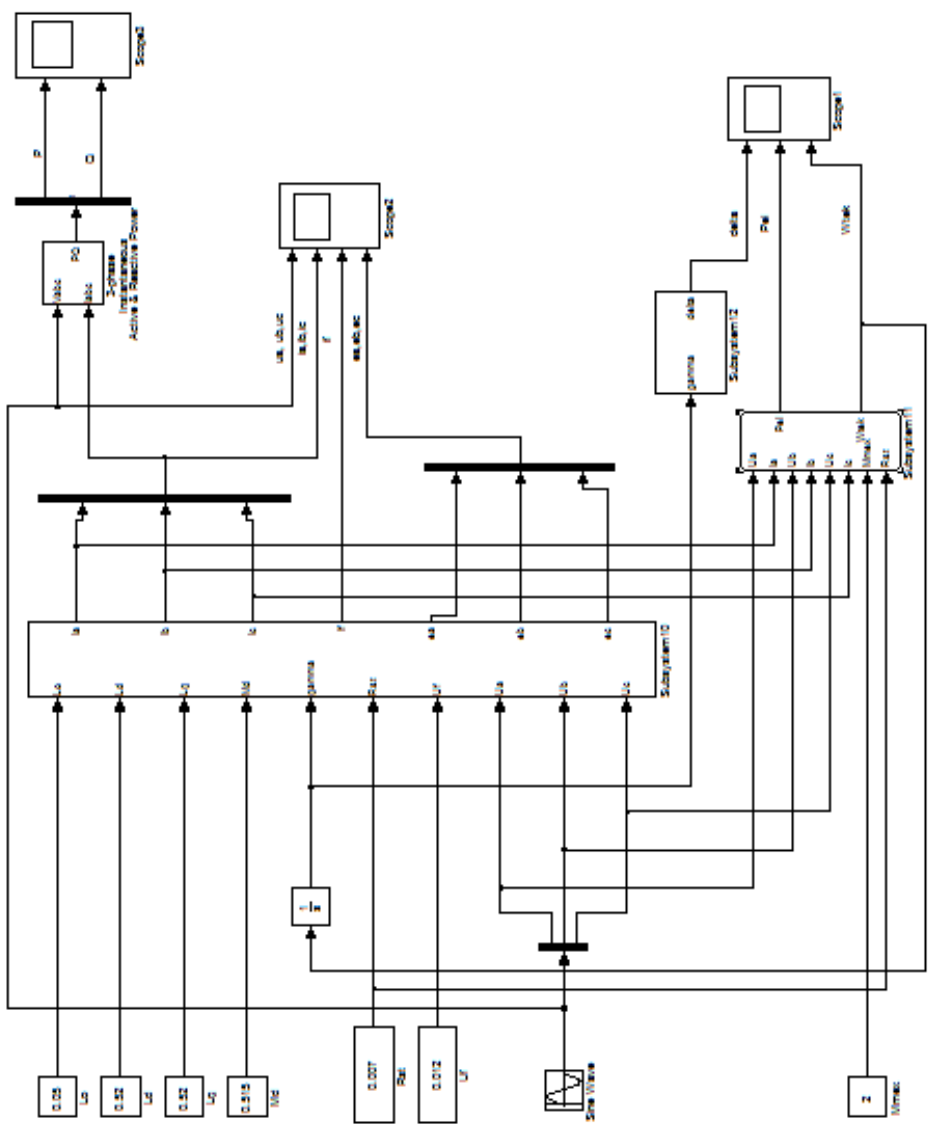


Рис.1. — Зовнішній вигляд комп'ютерної моделі синхронного двигуна



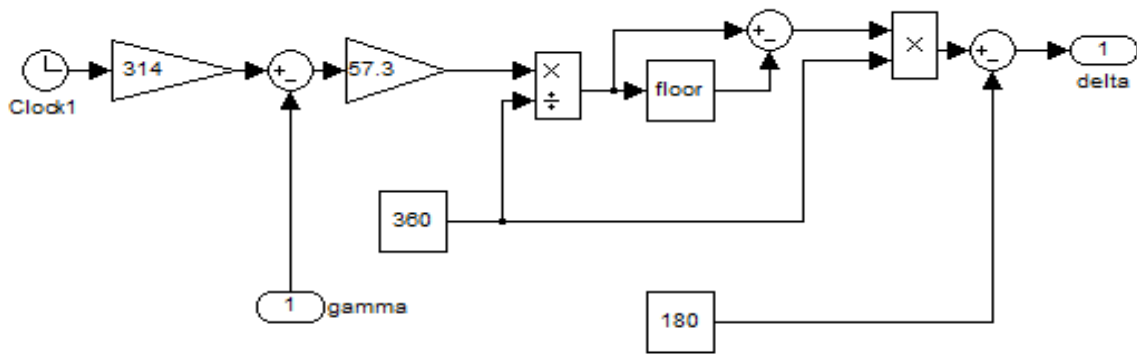


Рис. 3 – Комп’ютерна реалізація Subsistemas12

### Порядок виконання роботи

1. В пакеті Simulink програми Matlab на базі відповідної математичної моделі створити комп’ютерну модель синхронного двигуна для аналізу процесу пуску.
2. На базі довідникових даних розрахувати та ввести параметри моделі за варіантами (табл.1).
3. Змодельовати пуск синхронного двигуна при механічному моменті від 0 до 3, зняти осцилограми напруги, струму та електрорушійної сили для фаз: А, В і С, активної та реактивної потужностей, швидкості обертання, кута  $\delta$  та струму збудження.

Таблиця 1. – Вихідні данні для моделювання

№ варіанту	Тип генератора	№ варіанту	Тип генератора
1	СДН14-49-6У3 ( $U_H=10$ кВ)	9	СДН15-39-8У3 ( $U_H=6$ кВ)
2	СДН14-59-6У3 ( $U_H=10$ кВ)	10	СДН15-64-8У3 ( $U_H=6$ кВ)
3	СДН15-39-6У3 ( $U_H=10$ кВ)	11	СДН14-59-8У3 ( $U_H=10$ кВ)
4	СДН15-49-6У3 ( $U_H=10$ кВ)	12	СДН15-59-8У3 ( $U_H=10$ кВ)
5	СДН16-76-6У3 ( $U_H=10$ кВ))	13	СДН15-64-8У3 ( $U_H=10$ кВ)
6	СДН14-41-8У3 ( $U_H=6$ кВ)	14	СДН15-64-8У3 ( $U_H=10$ кВ)
7	СДН14-46-8У3 ( $U_H=6$ кВ)	15	СДН14-44-10У3 ( $U_H=10$ кВ)
8	СДН14-59-8У3 ( $U_H=6$ кВ)	16	СДН14-56-10У3 ( $U_H=10$ кВ)



## Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Скріншот кінцевої комп'ютерної моделі синхронного двигуна та всіх її складових підсистем.
3. Осцилограми дослідів.
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

## Контрольні запитання

1. Який вигляд мають рівняння балансу електрорушійних сил, що реалізовані в моделі синхронного генератора?
2. Як реалізується основне рівняння руху ротора двигуна?
3. Яким виразом реалізується струм статора кожної фази синхронного двигуна?
4. За допомогою якого блока або групи блоків моделюється струм в обмотці збудження?
5. Як визначаються власні індуктивності синхронного двигуна?
6. За допомогою яких виразів обчислюються взаємні індуктивності синхронного двигуна?
7. Які параметри моделі є невідомими?
8. Основні паспортні параметри синхронного двигуна?
9. Запишіть формули для перерахунку від паспортних даних до параметрів моделі для індуктивностей та активного опору статора синхронного двигуна?
10. Який вигляд мають формули для перерахунку від паспортних даних до параметрів моделі для обмотки збудження синхронного двигуна?

## ЛАБОРОТОРНЕ ЗАНЯТТЯ 5

### Створення комп'ютерної моделі асинхронного двигуна в пакеті Simulink програми Matlab

**Мета роботи** – створення комп'ютерної моделі асинхронного двигуна для аналізу процесу пуску.

**Вказівки з підготовки до роботи** – вивчити математичну модель асинхронного двигуна.

#### Короткі пояснення до роботи

Для створення комп'ютерної моделі асинхронного двигуна слід використовувати наступний вигляд математичної моделі.

Струм статора кожної фази двигуна реалізується у вигляді системи

$$\begin{cases} i_A = \frac{\omega_o \int (u_A - R_s i_A) - M i_B - M i_C - M_{1qA} i_{1q} - M_{1dA} i_{1d}}{L} \\ i_B = \frac{\omega_o \int (u_B - R_s i_B) - M i_A - M i_C - M_{1qB} i_{1q} - M_{1dB} i_{1d}}{L} \\ i_C = \frac{\omega_o \int (u_C - R_s i_C) - M i_A - M i_B - M_{1qC} i_{1q} - M_{1dC} i_{1d}}{L} \end{cases} \quad (1)$$

Струми в демпферних обмотках моделюється згідно з рівняннями

$$\begin{cases} i_{1d} = \frac{\omega_o \int R_{1d} i_{1d} - M_{1dA} i_A - M_{1dB} i_B - M_{1dC} i_C}{L_{1d}} \\ i_{1q} = \frac{\omega_o \int R_{1q} i_{1q} - M_{1qA} i_A - M_{1qB} i_B - M_{1qC} i_C}{L_{1q}} \end{cases} \quad (2)$$

Власні та взаємні індуктивності визначаються як

$$\left. \begin{aligned} L = l_0 &= \frac{1}{3} (L_d + L_q + L_0) \\ M = m_0 &= \frac{1}{3} \left( L_0 - \frac{L_d + L_q}{2} \right) \end{aligned} \right\} \quad (3)$$

та

$$\left. \begin{aligned} M_{1dA} &= M_{1dm} \cos \int \omega_{\text{пот}} \\ M_{1dB} &= M_{1dm} \cos \left( \int \omega_{\text{пот}} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ M_{1dC} &= M_{1dm} \cos \left( \int \omega_{\text{пот}} + \frac{2\pi}{3} \right) \\ M_{1qA} &= M_{1qm} \sin \int \omega_{\text{пот}} \\ M_{1qB} &= M_{Bq} = M_{1qm} \sin \left( \int \omega_{\text{пот}} - \frac{2\pi}{3} \right) \\ M_{1qC} &= M_{Cq} = M_{1qm} \sin \left( \int \omega_{\text{пот}} + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

Основне рівняння руху ротора двигуна реалізовано як

$$\omega_{\text{пот}} = \omega_{\text{поч}} + \frac{\omega_0 \int [(u_{jA} + u_{jB} + u_{jC}) - (i_A^2 + i_B^2 + i_C^2)R_{st} - M_{\text{мех}}] dt}{T_j}, \quad (5)$$

де  $\omega_{\text{поч}}, \omega_{\text{пот}}$  – початкова та поточні швидкості синхронного двигуна,  $M_{\text{мех}}$  – механічний момент на валу двигуна.

Комп'ютерна модель синхронного двигуна для аналізу процесу пуску повинна мати кінцевий вигляд, що наведений на рис. 1 Підсистема 6 (Subsystems 6) повинна складатися з підсистем, що реалізують систему рівнянь 1 (рис.2). Підсистема 3 (Subsystems 3) реалізує отримання струмів в обмотках по осі d та q (рис.3). В підсистемі 11 (Subsystems 11) реалізується рівняння 5 (рис.4). Розрахунок вихідних параметрів моделі відбувається за тими ж формулами, що і для синхронного двигуна.

Напругу на шинах двигуна задати у вигляді системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} u_A &= U_m \sin \omega t \\ u_B &= U_m \sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) \\ u_C &= U_m \sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{aligned} \right\}.$$

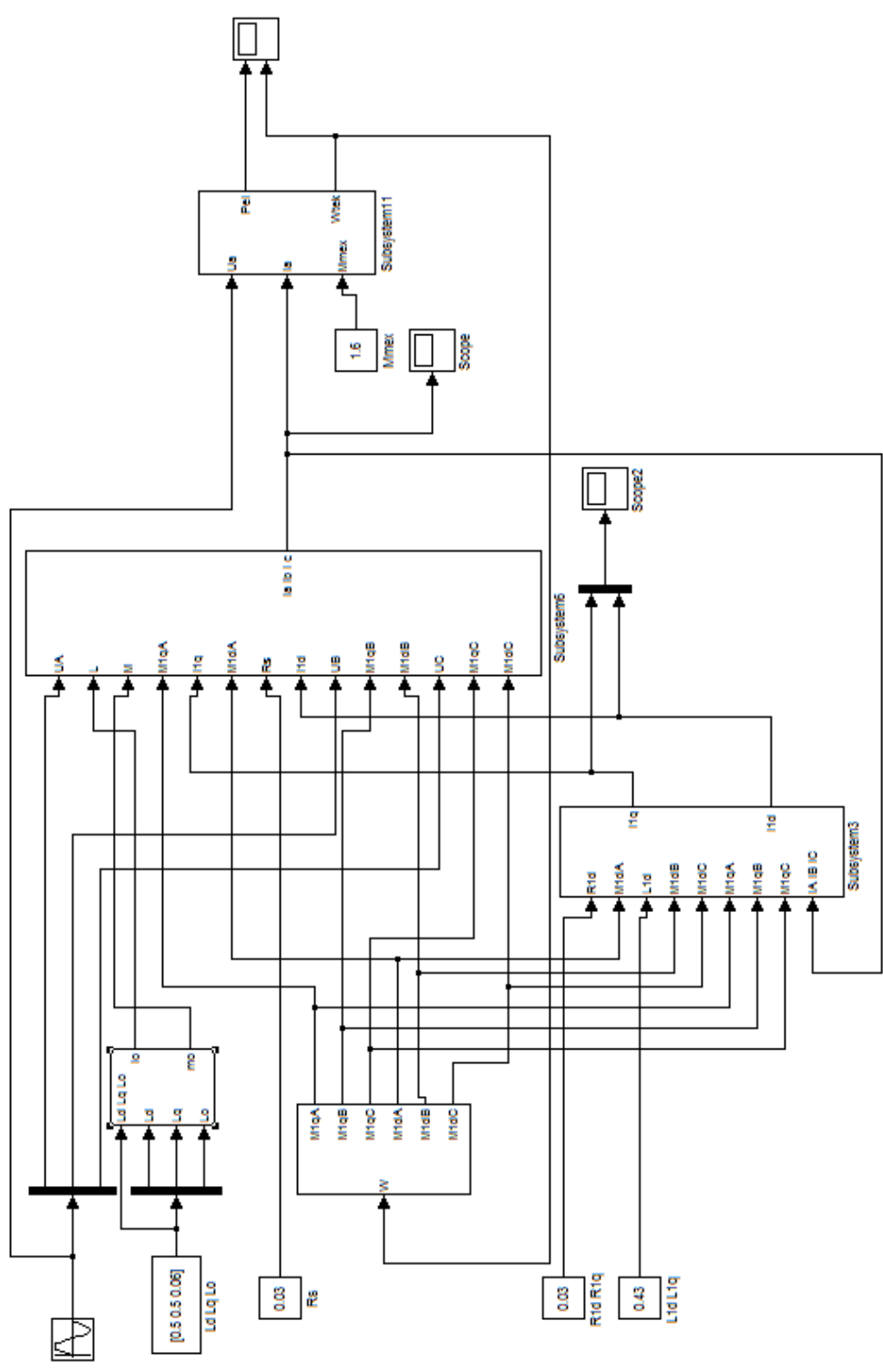


Рис.1 – Зовнішній вигляд комп'ютерної моделі асинхронного двигуна

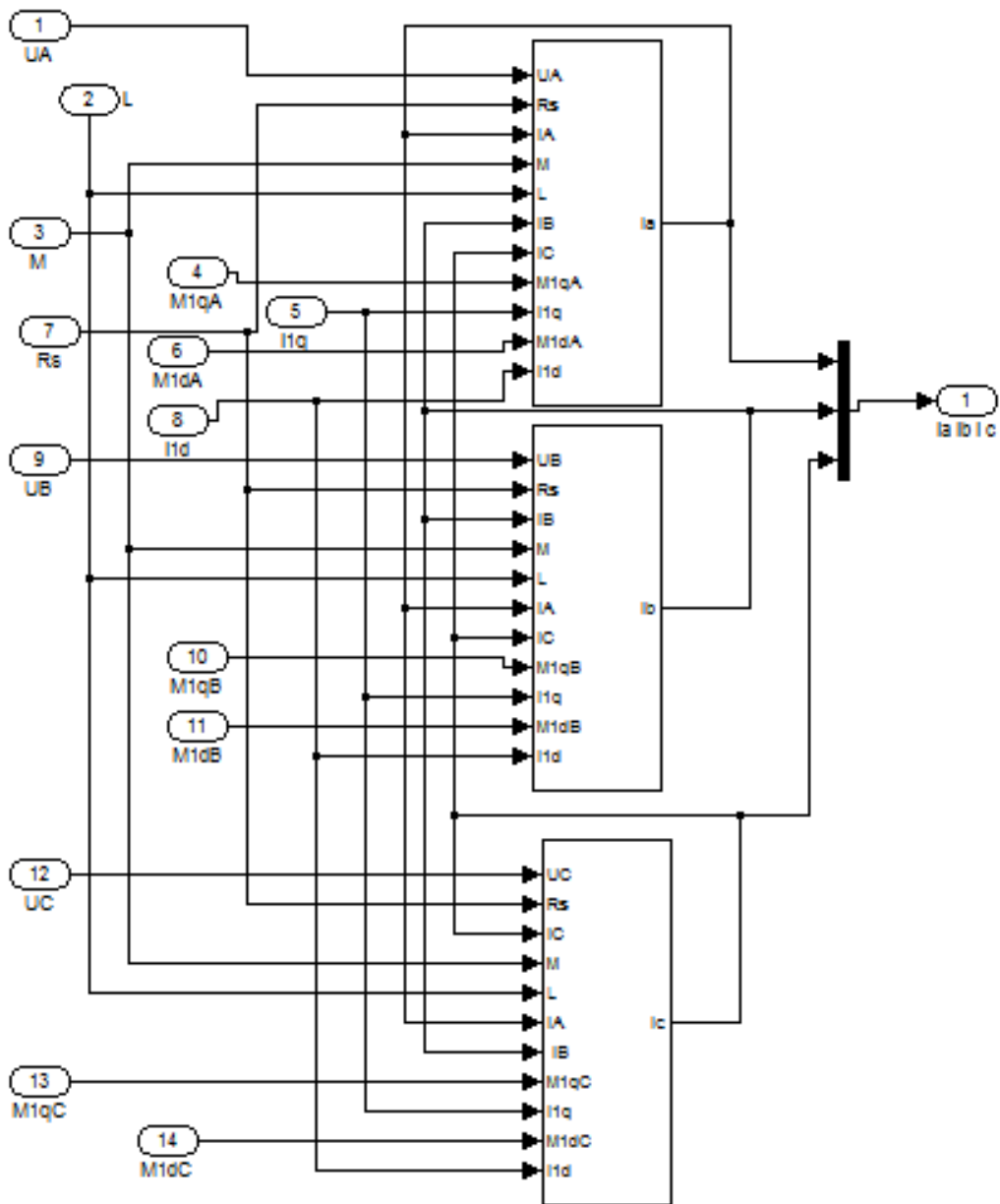


Рис. 2 – Комп'ютерна реалізація Subsistemas6

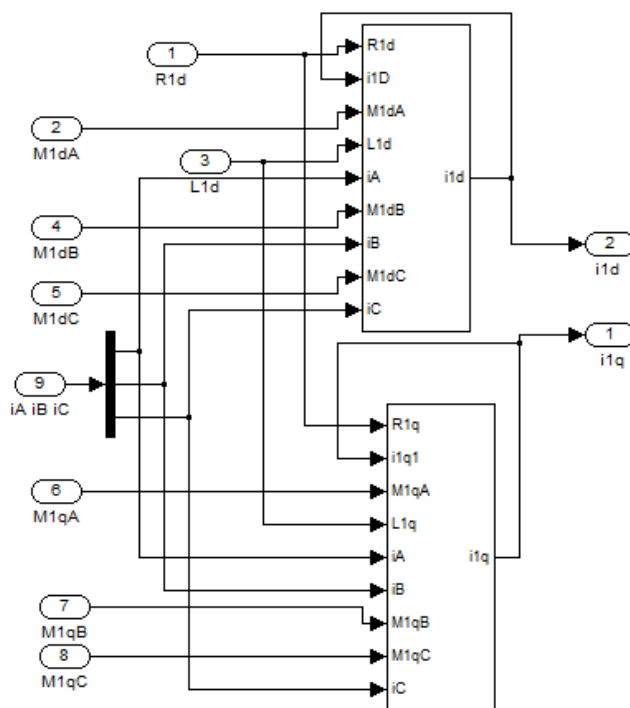


Рис. 3 – Комп'ютерна реалізація Subsystems3

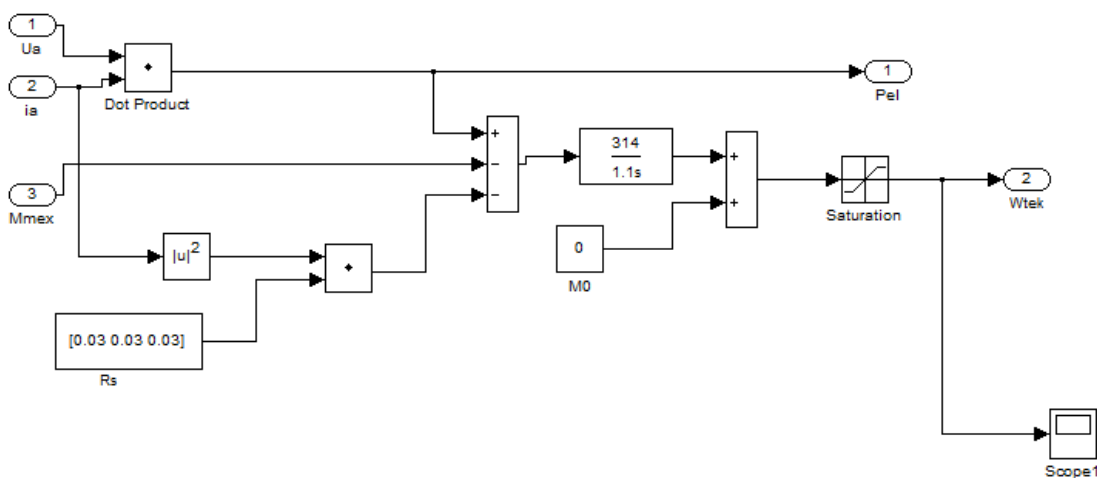


Рис. 4 – Комп'ютерна реалізація Subsystems11

### Порядок виконання роботи

1. В пакеті Simulink програми Matlab на базі відповідної математичної моделі створити комп'ютерну модель асинхронного двигуна для аналізу процесу пуску.
2. На базі довідникових даних розрахувати та ввести параметри моделі за варіантами (табл.1).

3. Змоделювати пуск асинхронного двигуна при механічному моменті 0, 0,5, 1, 1,5, зняти осцилограми струмів ротора та фаз: А, В і С, активної потужності та швидкості обертання.

Таблиця 1. – Вихідні данні для моделювання

№ варіанту	Тип двигуна	№ варіанту	Тип двигуна
1	4A180M2Y3	9	4A315S2Y3
2	4A200M2Y3	10	4A315M2Y3
3	4A200L2Y3	11	4A355S2Y3
4	4A225M2Y3	12	4A355M2Y3
5	4A250S2Y3	13	4A315M4Y3
6	4A250M2Y3	14	4A315S4Y3
7	4A280S2Y3	15	4A355S4Y3
8	4A280M2Y3	16	4A355M4Y3

### **Зміст звіту по лабораторній роботі**

1. Короткий опис роботи.
2. Скріншот кінцевої комп'ютерної моделі асинхронного двигуна та всіх її складових підсистем.
3. Осцилограми дослідів.
4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

### **Контрольні запитання**

1. Як реалізується основне рівняння руху ротора асинхронного двигуна?
2. Яким виразом реалізується струм статора кожної фази асинхронного двигуна?

3. За допомогою якого блока або групи блоків моделюється струм в обмотці ротора?

4. Як визначаються власні індуктивності асинхронного двигуна?

5. За допомогою яких виразів обчислюються взаємні індуктивності асинхронного двигуна?

6. Які параметри моделі є невідомими?

7. Основні паспортні параметри асинхронного двигуна?

8. Чим принципово відрізняється модель асинхронного двигуна від синхронного?

9. Чим визначається величина механічного моменту в моделі асинхронного двигуна?

10. Зазвичай, за якої робочої швидкості працюють асинхронні двигуни?



## ЛАБОРОТОРНЕ ЗАНЯТТЯ 6

### Створення комп'ютерної моделі лінії електропередач в пакеті Simulink програми Matlab

**Мета роботи** – створення комп'ютерної моделі одноланцюгової лінії електропередач з тросом для аналізу несиметричних та несинусоїдальних режимів роботи.

**Вказівки з підготовки до роботи** – вивчити математичну модель одноланцюгової лінії електропередач з тросом.

#### Короткі пояснення до роботи

При дослідженні несиметричних чи несинусоїдальних режимів обов'язково враховувати опір землі та наявність заземлених тросів. На рис.1 представлена схема заміщення ідеально транспонованої одноланцюгової лінії електропередач з урахуванням усіх впливаючих факторів в несиметричних режимах, що складається з однієї ділянки.

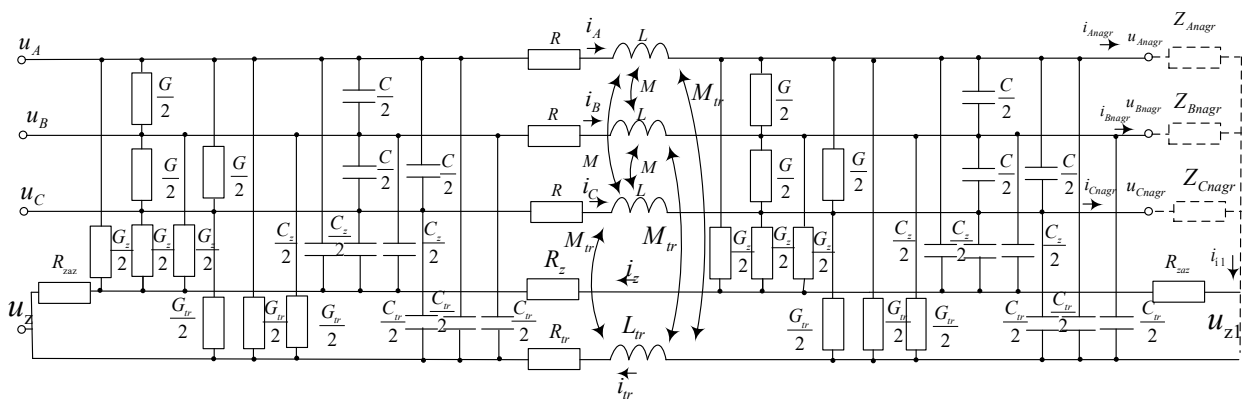


Рис.1 – Схема заміщення одноланцюгової лінії електропередач з заземленим тросом з обох боків лінії

Для створення комп'ютерної моделі одноланцюгової лінії електропередач з тросом слід використовувати наступний вигляд математичної моделі.

Струм в кінці лінії визначається згідно з наступної системи рівнянь

$$\left. \begin{aligned} u_{Anagr} &= R_{Anagr} i_{Anagr} + L_{Anagr} \frac{\partial i_{Anagr}}{\partial t} \\ u_{Bnagr} &= R_{Bnagr} i_{Bnagr} + L_{Bnagr} \frac{\partial i_{Bnagr}}{\partial t} \\ u_{Cnagr} &= R_{Cnagr} i_{Cnagr} + L_{Cnagr} \frac{\partial i_{Cnagr}}{\partial t} \end{aligned} \right\}, \quad (1)$$

де  $R_{nagr}$ ,  $L_{nagr}$  – активний опір та індуктивність навантаження фаз лінії електропередач;

Напруга в кінці лінії визначається

$$\left. \begin{aligned} u_{Anagr} &= u_A - \Delta u_A \\ u_{Bnagr} &= u_B - \Delta u_B \\ u_{Cnagr} &= u_C - \Delta u_C \end{aligned} \right\}, \quad (2)$$

де  $\Delta u$  – падіння напруги на в лінії дорівнює

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_A &= \frac{\partial u_A}{\partial x} \\ \Delta u_B &= \frac{\partial u_B}{\partial x} \\ \Delta u_C &= \frac{\partial u_C}{\partial x} \end{aligned} \right\}. \quad (3)$$

Падіння напруги на активному та індуктивному опорі лінії дорівнює

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial u_A}{\partial x} &= Ri_A + \frac{\partial i_A}{\partial t} L + \frac{\partial i_B}{\partial t} M + \frac{\partial i_C}{\partial t} M + M_{tr} \frac{\partial i_{tr}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_B}{\partial x} &= Ri_B + \frac{\partial i_A}{\partial t} M + \frac{\partial i_B}{\partial t} L + \frac{\partial i_C}{\partial t} M + M_{tr} \frac{\partial i_{tr}}{\partial t} \\ \frac{\partial u_C}{\partial x} &= Ri_C + \frac{\partial i_A}{\partial t} M + \frac{\partial i_B}{\partial t} M + \frac{\partial i_C}{\partial t} L + M_{tr} \frac{\partial i_{tr}}{\partial t} \end{aligned} \right\}, \quad (4)$$

де  $M_{tr}$  – взаємна індуктивність між тросом та дротами фаз,  $i$  – струм, що протікає в тросі лінії.

Струм на початку лінії визначається

$$\left. \begin{aligned} i_A &= i_A + \Delta i_A \\ i_B &= i_B + \Delta i_B \\ i_C &= i_C + \Delta i_C \end{aligned} \right\}, \quad (5)$$

де  $\Delta i$  – струм, що відгалужується в активні провідності та ємності дорівнює

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_A &= \frac{\partial i_A}{\partial x} \\ \Delta i_B &= \frac{\partial i_B}{\partial x} \\ \Delta i_C &= \frac{\partial i_C}{\partial x} \end{aligned} \right\}. \quad (6)$$

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial i_A}{\partial x} &= (u_A - u_z)(G_z + G_r) + (u_A - u_B)G + (u_A - u_C)G + \\ &+ (C_z + C_r) \frac{\partial(u_A - u_z)}{\partial t} + C \frac{\partial(u_A - u_B)}{\partial t} + C \frac{\partial(u_A - u_C)}{\partial t} \\ \frac{\partial i_B}{\partial x} &= (u_B - u_z)(G_z + G_r) + (u_B - u_A)G + (u_B - u_C)G + \\ &+ (C_z + C_r) \frac{\partial(u_B - u_z)}{\partial t} + C \frac{\partial(u_B - u_A)}{\partial t} + C \frac{\partial(u_B - u_C)}{\partial t} \\ \frac{\partial i_C}{\partial x} &= (u_C - u_z)(G_z + G_r) + (u_C - u_A)G + (u_C - u_B)G + \\ &+ (C_z + C_r) \frac{\partial(u_C - u_z)}{\partial t} + C \frac{\partial(u_C - u_A)}{\partial t} + C \frac{\partial(u_C - u_B)}{\partial t} \end{aligned} \right\}, \quad (7)$$

де  $C_{тр}$ ,  $G_{тр}$  – ємність та активна провідність між тросом та дротами фаз.

Струм, що протікає в тросі лінії визначається згідно з диференційного рівняння

$$i_{тр} R_{тр} + L_{тр} \frac{\partial i_{тр}}{\partial t} + M_{тр} \frac{\partial i_A}{\partial t} + M_{тр} \frac{\partial i_B}{\partial t} + M_{тр} \frac{\partial i_C}{\partial t} = u_z - u_{z1}, \quad (8)$$

де  $u_{z1}$  – потенціал землі в кінці ЛЕП.

Різниця потенціалів землі в кінці та на початку лінії дорівнює

$$u_z - u_{z1} = (i_n - i_{тр} + \frac{\partial i_{тр}}{\partial x}) R_{тр}, \quad (9)$$

де  $R_z$  – активний опір землі,  $i_n$  – струм в уявній нейтралі ЛЕП, що визначається

$$i_n = i_A + i_B + i_C, \quad (10)$$

$\frac{\partial i_{тр}}{\partial x}$  – струм, що відгалужується в активні провідності та ємності між тросом (землею) та дротами фаз, дорівнює

$$\left. \begin{aligned} \frac{\partial i_{тр}}{\partial x} &= [(u_A - u_z)(G_z + G_r) + (C_z + C_r) \frac{\partial(u_A - u_z)}{\partial t} + \\ &(u_B - u_z)(G_z + G_r) + (C_z + C_r) \frac{\partial(u_B - u_z)}{\partial t} + \\ &(u_C - u_z)(G_z + G_r) + (C_z + C_r) \frac{\partial(u_C - u_z)}{\partial t}] \end{aligned} \right\}. \quad (11)$$

Таким чином, для побудови повної комп'ютерної моделі ЛЕП з урахуванням усіх впливаючих факторів, необхідно реалізувати рівняння (1-11) (рис.2).

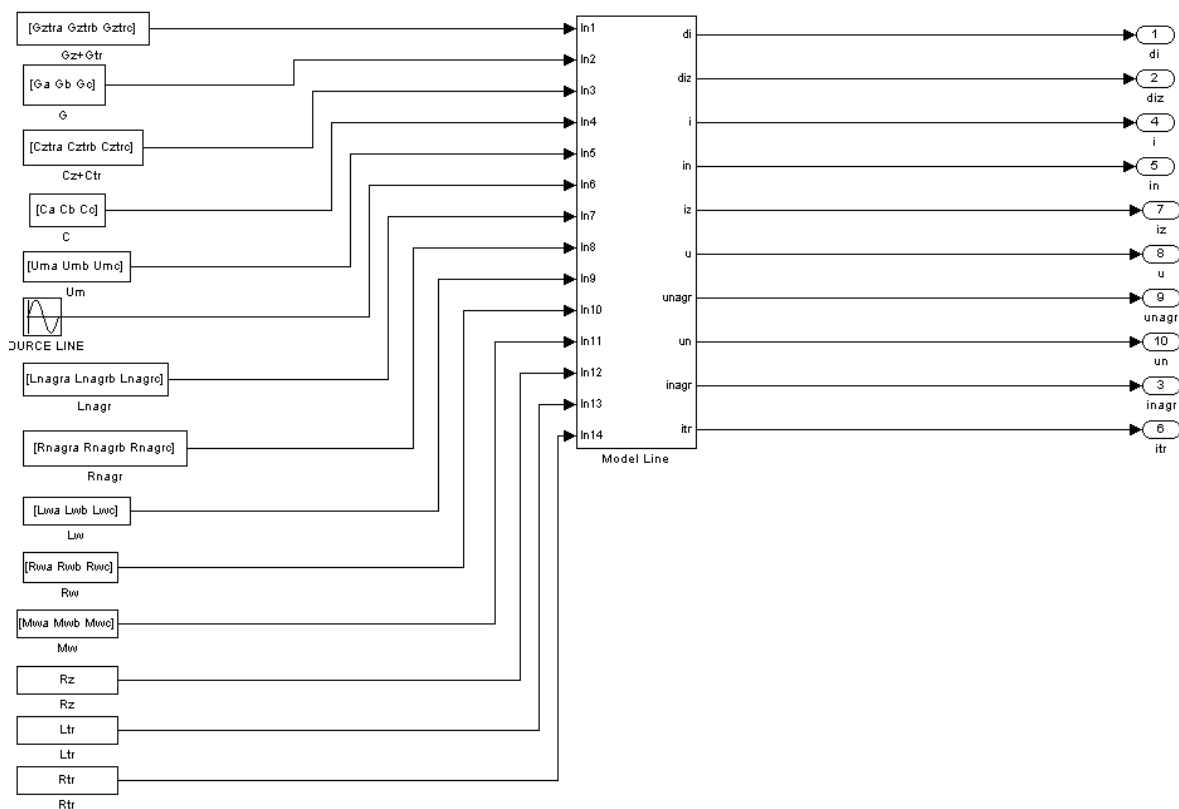


Рис.2 – Комп'ютерна модель одноланцюгової лінії електропередач з заземленим тросом з обох боків лінії

Важливою задачею є перерахунок довідникових даних до параметрів моделі. Параметри, що задаються в моделі є:  $R, R_{з}, R_{тр}, G, G_{з}, G_{тр}, C, C_{з}, C_{тр}, L, L_{тр}, M, M_{тр}$ . Зазвичай в довідниках наводяться наступні дані [4]:  $r$  - радіус дроту, м;  $d_{\phi}$  - середня геометрична відстань між дротами фаз, м;  $\Delta P_{кор}$  - втрати на корону, кВт/км;  $R_{пит}$  - питомий активний опір дроту, Ом/км;  $l$  - довжина лінії, км;  $U_{ном}$  - номінальна напруга лінії, кВ.

Власна та взаємна індуктивність ділянки  $dx$  дроту фази лінії може бути визначена як (Гн) [5]

$$L = 0.000461 \lg \frac{D_3}{r_{екв\phi}} \frac{l}{k}, \quad M = 0.00046 \lg \frac{D_3}{d_{\phi}} \frac{l}{k},$$

де  $D_3$  – глибина проходження еквівалентного струму через землю,  $D_3 \approx 1000$  м,  $r_{екв\phi}$  – еквівалентний радіус дроту фази,  $r_{екв\phi} = 0,95 r_{\phi}$  (для алюмінієвих та сталюалюмінієвих проводів марок А, АС, АСО, АСУ),  $d_{\phi}$  – середня геометрична

відстань між дротами фаз, для одноцепної та двохцепної ЛЕП відповідно дорівнює

$$d_{\phi} = \sqrt[3]{d_{ab} d_{bc} d_{ca}}, \quad d_{\phi} = \sqrt[3]{d_{a1a1} d_{a1b1} d_{a1c1} d_{b1a1} d_{b1b1} d_{b1c1} d_{c1a1} d_{c1b1} d_{c1c1}}.$$

Власна та взаємна індуктивність ділянки  $dx$  дроту тросу обчислюється як (Гн) [5]

$$L_{\text{тр}} = 0.000461 \lg \frac{D_3}{r_{\text{екв тр}}} \frac{l}{k}, \quad M_{\text{тр}} = 0.000461 \lg \frac{D_3}{d_{\text{тр-ф}}} \frac{l}{k},$$

де  $r_{\text{екв тр}}$  – еквівалентний радіус проводу тросу,  $r_{\text{екв тр}} = 0,779 r_{\text{тр}}$ ,  $d_{\text{тр-ф}}$  – середня геометрична відстань від тросу до дротів фаз.

Активні опори дроту фази лінії, тросу та землі визначається як (Ом) [5]

$$R = R_{\text{дпит}} \frac{l}{k}, \quad R = R_{\text{трпит}} \frac{l}{k}, \quad R = R_{\text{зпит}} \frac{l}{k},$$

де  $R_{\text{дпит}}$ ,  $R_{\text{трпит}}$ ,  $R_{\text{зпит}}$  – питомий активний опір дроту фази, тросу та землі відповідно ( $R_{\text{зпит}} = 0.05$  Ом/км [5]).

Ємності між дротом фази та землею, між дротами фаз та між тросом й дротом фази лінії, визначаємо відповідно як (Ф) [6]

$$C_3 = \beta_3 + \beta_2 + \beta_1 \frac{l}{k}; \quad C = -\beta \frac{l}{k}; \quad C_{\text{тр}} = -\beta_{\text{тр}} \frac{l}{k},$$

де  $\beta_3$ ,  $\beta$ ,  $\beta_{\text{тр}}$  – відповідні ємнісні коефіцієнти, що обчислюються за нас-тупними формулами (Ф/км) [6]

$$\beta_3 = \frac{\Delta_3}{\Delta_{\Sigma}}; \quad \beta = \frac{\Delta}{\Delta_{\Sigma}}; \quad \beta_{\text{тр}} = \frac{\Delta_{\text{тр}}}{\Delta_{\Sigma}},$$

де  $\Delta_{\Sigma}$ ,  $\Delta$ ,  $\Delta_3$ ,  $\Delta_{\text{тр}}$  – визначники матриць  $\Delta_{\Sigma} = \begin{pmatrix} \alpha_3 & \alpha & \alpha & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha & \alpha_3 & \alpha & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha & \alpha & \alpha_3 & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha_{\text{тр}} & \alpha_{\text{тр}} & \alpha_{\text{тр}} & \alpha_{\text{тр-3}} \end{pmatrix}$ ,  $\Delta_3 = \begin{pmatrix} \alpha_3 & \alpha & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha & \alpha_3 & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha_{\text{тр}} & \alpha_{\text{тр}} & \alpha_{\text{тр-3}} \end{pmatrix}$ ,

$$\Delta = \begin{pmatrix} \alpha & \alpha & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha_3 & \alpha & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha_{\text{тр}} & \alpha_{\text{тр}} & \alpha_{\text{тр-3}} \end{pmatrix}, \quad \Delta_{\text{тр}} = \begin{pmatrix} \alpha_3 & \alpha & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha & \alpha & \alpha_{\text{тр}} \\ \alpha & \alpha_3 & \alpha_{\text{тр}} \end{pmatrix}.$$

де  $\alpha_3$ ,  $\alpha$ ,  $\alpha_{\text{тр}}$  – відповідні потенційні коефіцієнти ( $\alpha_{\text{тр-3}}$  – потенційний коефіцієнт між тросом та землею), що обчислюються за наступними формулами (км/Ф) [6]

$$\alpha_3 = 41,5 \lg \frac{D_{\text{фзв}}}{r_{\text{еквф}}} 10^6,$$

$$\alpha_{\text{тр}} = 41,5 \lg \frac{D_{\text{тр-звф}}}{d_{\text{тр-ф}}} 10^6,$$

$$\alpha = 41,5 \lg \frac{D_{\text{ф-звф}}}{d_{\text{ф}}} 10^6,$$

$$\alpha_{\text{тр-з}} = 41,5 \lg \frac{D_{\text{тр-зв}}}{r_{\text{сквтр}}} 10^6,$$

де  $D_{\text{ф-зв}}$  – середня відстань дротів фаз до їх дзеркальних відображень відносно поверхні землі;  $D_{\text{тр-звф}}$  – середня відстань від тросу до дзеркальних відображень дротів фаз відносно поверхні землі;  $D_{\text{ф-звф}}$  – середня відстань від дротів фаз до дзеркальних відображень дротів сусідніх фаз відносно поверхні землі;  $D_{\text{тр-зв}}$  – відстань від тросу до його дзеркального відображення відносно поверхні землі.

Вище наведені відстані залежать від конструктивного виконання опор ліній електропередач і можуть бути обчислені згідно з їх геометричних характеристик, що наводяться в довідниках [7, 8].

Сумарна активна провідність дроту фази, що враховує провідність між фазами, фазою і землею та фазою і тросом обчислюється за формулою [8]

$$G_{\Sigma} = \frac{\Delta P_{\text{кор}}}{U_{\text{фном}}^2} l [\text{СМ}].$$

Зазвичай, сумарне значення втрат на корону визначають експериментально, тому точне визначення значення кожного виду активної провідності не можливе. При врахуванні втрат на корону під час моделювання можна сумарну активну провідність рівномірно розділити між всіма видами провідності.

### **Порядок виконання роботи**

1. В пакеті Simulink програми Matlab на базі відповідної математичної моделі створити комп'ютерну модель одноцепної лінії електропередач з заземленим тросом з обох боків лінії для аналізу несиметричних та несинусоїдальних режимів.
2. На базі довідникових даних розрахувати та ввести параметри моделі за варіантами (табл.1).
3. Змоделювати розповсюдження 2-ої, 3-ої, 4-ої, 5-ої, 7-ої, 9-ої, 11-ої, 13-ої гармонік в усталеному режимі, амплітуди відповідних гармонік джерела

симетричної напруги ЛЕП прийняти однаковими, а саме 0,015 від амплітуди основної гармоніки. Навантаження ЛЕП прийняти симетричним, лінійним, активно-індуктивного характеру з  $I_{\text{наб}}=300$  Ом,  $R_{\text{наб}}=200$  Ом, зняти осцилограми напруги на навантаженні, струму навантаження, струму в лінії, струму джерела напруги та струмів витоку.

Таблиця 1 – Вихідні данні для моделювання

№ варіанту	Напруга ЛЕП	Марка проводу	Довжина ЛЕП
1	U <sub>H</sub> =110 кВ	АС-70/11	55
2	U <sub>H</sub> =110 кВ	АС-95/16	80
3	U <sub>H</sub> =110 кВ	АС-95/15	60
4	U <sub>H</sub> =110 кВ	АС-120/19	100
5	U <sub>H</sub> =110 кВ	АС-150/24	50
6	U <sub>H</sub> =110 кВ	АС-185/29	115
7	U <sub>H</sub> =220 кВ	АС-240/39	95
8	U <sub>H</sub> =220 кВ	АС-300/48	65
9	U <sub>H</sub> =220 кВ	АС-400/64	110
10	U <sub>H</sub> =220 кВ	АС-450/56	90
11	U <sub>H</sub> =220 кВ	АС-500/64	105
12	U <sub>H</sub> =220 кВ	АС-550/71	70
13	U <sub>H</sub> =330 кВ	АС-600/72	120
14	U <sub>H</sub> =330 кВ	АС-650/79	85
15	U <sub>H</sub> =330 кВ	АС-700/86	75
16	U <sub>H</sub> =330 кВ	АС-750/93	125

### Зміст звіту по лабораторній роботі

1. Короткий опис роботи.
2. Скріншот кінцевої комп'ютерної моделі одноланцюгової лінії електропередач з тросом та всіх її складових підсистем.
3. Осцилограми дослідів.

4. Аналіз отриманих результатів.
5. Висновки.

### Контрольні запитання

1. Який вираз пов'язує струму навантаження та напругу на навантаженні ЛЕП?
2. Яким виразом реалізується падіння напруги в ЛЕП?
3. За допомогою якого виразу моделюється струм, що протікає в тросі лінії?
4. Як визначаються струми фаз на початку ЛЕП?
5. За допомогою яких виразів обчислюються струми фаз, що відгалужується в активні провідності та ємності?
6. Які параметри моделі є невідомими?
7. Основні паспортні параметри ЛЕП?
8. Чим принципово відрізняється модель одноланцюгової лінії електропередач з тросом від аналогічної без тросу?
9. Яким чином може бути обчислена сумарна активна провідність дроту фази?
10. Запишіть вирази для обчислення таких параметрів моделі як: ємності між дротом фази та землею, між дротами фаз, між тросом та дротом.
11. На підставі паспортних даних як можна розрахувати активні опори дроту фази лінії, тросу та землі?