

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

Л.В. Асмолова, В.М. Шамардіна

**ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ
СИСТЕМ У СЕРЕДОВИЩІ ПАКЕТУ MATLAB**

**Лабораторний практикум
з курсу «Теорія автоматичного керування. Частина 1»
для студентів усіх форм навчання за спеціальністю
141 Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка**

ЗАТВЕРДЖЕНО
редакційно-видавничою
радою університету,
протокол № 1 від 19.02.2020 р.

Харків
НТУ «ХПІ»
2020

УДК 681.5

А 90

Рецензенти:

А.С. Маслій, канд.техн.наук, доц. УкрДУЗТ

М.В. Аніщенко, канд.техн.наук, проф. НТУ «ХП»

Асмолова Л.В.

А 90 Основи дослідження лінійних динамічних систем у середовищі пакету MATLAB: лаборат. практи. / Асмолова Л.В., Шамардіна В.М. – Харків : НТУ «ХП», 2020. – 64 с.

ISBN 978-617-7944-07-1

В лабораторному практикумі наведена методика виконання лабораторних робіт на персональному комп'ютері з використанням програми імітаційного моделювання у пакеті MATLAB Simulink. Розглянуто питання дослідження типових динамічних ланок, що описуються передавальними функціями.

Практикум призначений для студентів усіх форм навчання за спеціальністю 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка

Табл. 3. Іл. 38 Бібліогр. 8

УДК 681.5

ISBN 978-617-7944-07-1 © Л.В. Асмолова, В.М. Шамардіна, 2020 р.

ПЕРЕДМОВА

Лабораторний практикум спрямований на підвищення якості підготовки студентів спеціальностей, що вивчають складні автоматизовані системи керування технологічними процесами та промисловими механізмами. Перша частина лабораторного практикуму з теорії автоматичного керування дозволяє освоїти основні поняття апарату класичної теорії аналізу лінійних динамічних систем: передаточні функції типових лінійних ланок; побудову їх часових та частотних характеристик; складання з типових динамічних ланок структурних схем простих систем та їх дослідження.

Лабораторний практикум надає матеріал для підготовки і виконання чотирьох лабораторних робіт, містить теоретичний матеріал за темами курсу «Теорія автоматичного керування. Ч.1», завдання і порядок виконання, питання для самоперевірки та практичні рекомендації з оформлення звітів і виконання завдань із використанням математичного моделювання у пакеті MATLAB розширення Simulink, відображених у чотирьох додатках.

Лабораторна робота 1 присвячена ознайомленню з операційним і графічно-орієнтованим середовищем Simulink програмного пакету MATLAB для імітації експериментів; освоєнню загальних прийомів програмування, роботи з даними, управління графікою.

Лабораторна робота 2 присвячена аналізу динамічних властивостей типових лінійних ланок за їх реакцією на стандартні вхідні сигнали.

Лабораторна робота 3 присвячена вивченню частотних характеристик і визначенню властивостей типових динамічних ланок за отриманими експериментальними характеристиками.

У лабораторній роботі 4 на прикладі двигуна постійного струму з незалежним збудженням наведено алгоритм побудови структурних алгоритмічних схем систем автоматичного керування за диференціальними рівняннями, які описують їх роботу, та розглянуто можливості аналізу динамічних властивостей двигуна у різних режимах роботи.

Лабораторний практикум розрахований на студентів усіх форм навчання спеціальності 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка.

Лабораторна робота 1
***Ознайомлення з операційним середовищем SIMULINK.
Побудова простіших моделей***

Мета роботи: ознайомлення з операційним середовищем Simulink програмного пакету MATLAB; вивчення основ та набуття навичок роботи у середовищі Simulink; побудова простіших моделей у середовищі пакету MATLAB розширення Simulink.

1.1. Теоретичні положення

Розширення Simulink – це частина пакету MATLAB, призначена для моделювання динамічних систем. Основою для розробки моделей у Simulink є бібліотека блоків, з яких складаються структурні схеми досліджуваних систем. Розрахунок перехідних процесів може бути виконаний за допомогою відповідних операцій Simulink-Меню або в програмному режимі з використанням функцій пакету MATLAB.

Запуск Simulink

Для запуску програми Simulink необхідно попередньо запустити пакет MATLAB (у комп'ютерах навчального обчислювального центру ярлик MATLAB розміщений на робочому столі). Відкривається вікно, як показано на рис. 1.1.

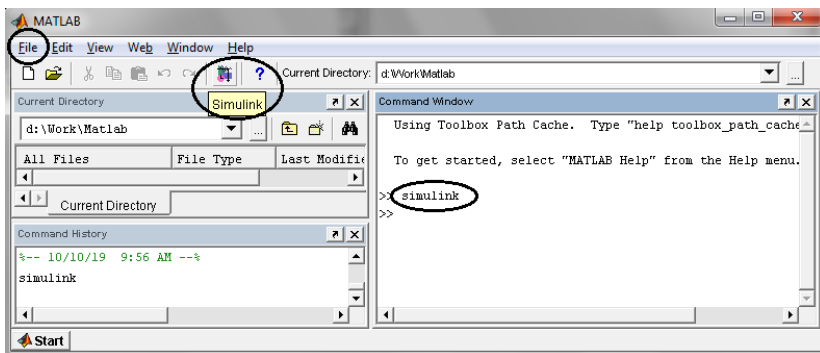



Рисунок 1.1 – Вікно програми MATLAB

Запустити програму Simulink можна трьома способами:

- **натиснути кнопку Simulink**  на панелі інструментів командного вікна MATLAB;
- у командному рядку головного вікна MATLAB на клавіатурі **набрати слово Simulink** і натиснути клавішу **Enter**;
- **виконати команду Open** в меню **File** і відкрити файл моделі (**mdl**-файл).

Останній спосіб зручно використовувати для запуску вже готової та налагодженої моделі, коли потрібно провести розрахунки, або виконати корекцію моделі.

Перший та другий спосіб реалізується шляхом відкриття вікна бібліотеки **Simulink Library Browser**, в якому з'являється список розділів бібліотеки Simulink у вигляді дерева. Правила роботи з ним є спільними для списків такого виду. Каталог бібліотеки **Simulink Library Browser** показано на рис. 1.2, де прийнято наступні позначення:

1 – панель інструментів командного вікна MATLAB із кнопками команд, що найбільш частіше використовуються;

2 – вікно коментарів для виведення пояснювального повідомлення про обраний розділ у бібліотеці або блока;

3 – список розділів бібліотеки:

- **Continuous** – безперервні (лінійні) блоки;
- **Discontinuities** – нелінійні блоки;
- **Discrete** – дискретні блоки;
- **Look-Up-Table** – блоки апроксимації та інтерполяції;
- **Math Operations** – блоки математичних операцій;
- **Model Verification** – перевірка адекватності моделі;
- **Model-Wide Utilities** – утиліти (настроювання) моделі в цілому;
- **Port & Subsystems** – вхід (вихід) підсистем;
- **Signal Attributes** – властивості сигналів;
- **Signal Routing** – розподіл сигналів;
- **Sinks** – реєструвальні пристрої;
- **Sources** – джерела сигналів і впливів;

4 – список розділів бібліотеки або вкладених блоків;

5 – рядок стану, який містить підказку про виконану дію;

6 – рядок пошуку блоків.

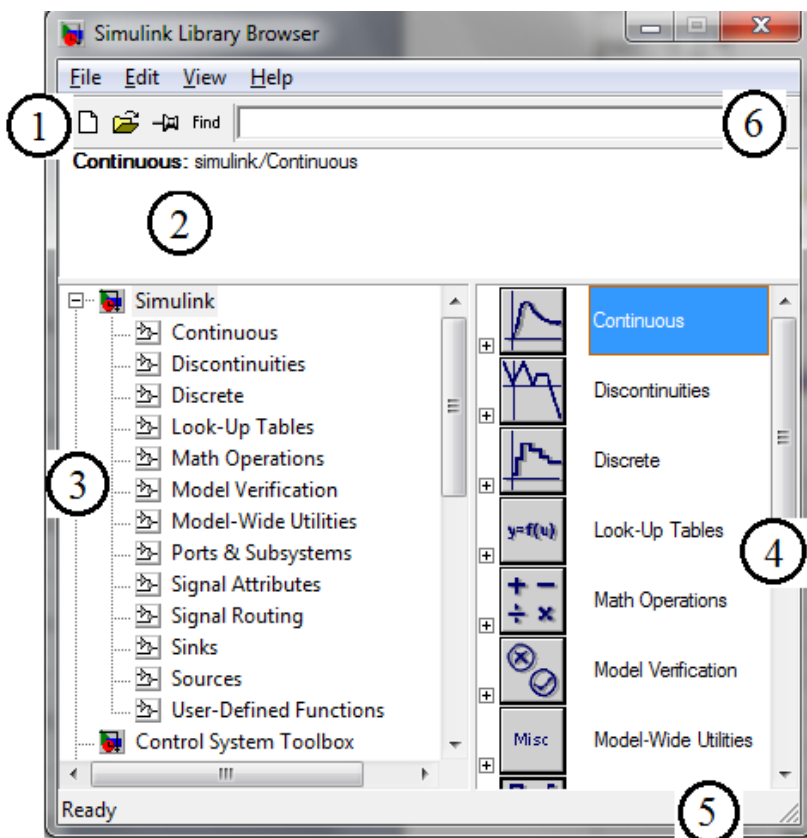



Рисунок 1.2 – Зовнянній вигляд каталогу бібліотеки Simulink Library Browser

Для пошуку необхідного блоку можна скористатися пошуком за назвою: в рядок пошуку блоків 6 записується назва (можна тільки кілька літер з назви) шуканого блоку і натискається клавіша **Enter**. За введеною назвою виконується автоматичний пошук компонента. Якщо необхідний блок знайдено, він відображається в списку вкладених блоків 4 як обраний. Якщо знайдений блок не є шуканим, а є лише збіг у назві, то слід повторно натиснути клавішу **Enter**, після чого повторити пошук блоків за заданою назвою.

Створення нового файлу і моделі

Перед початком побудови структурної алгоритмічної схеми в середовищі Simulink необхідно виконати низку дій: відкрити вікно **Simulink** → **File** → **New** → **Model** або на панелі інструментів **Simulink** натиснути кнопку *Create a new model* . При цьому відкривається вікно **Untitled** (рис. 1.3), де будуть розміщуватися блоки моделі з відповідного розділу бібліотеки, з яких складається структурна схема.

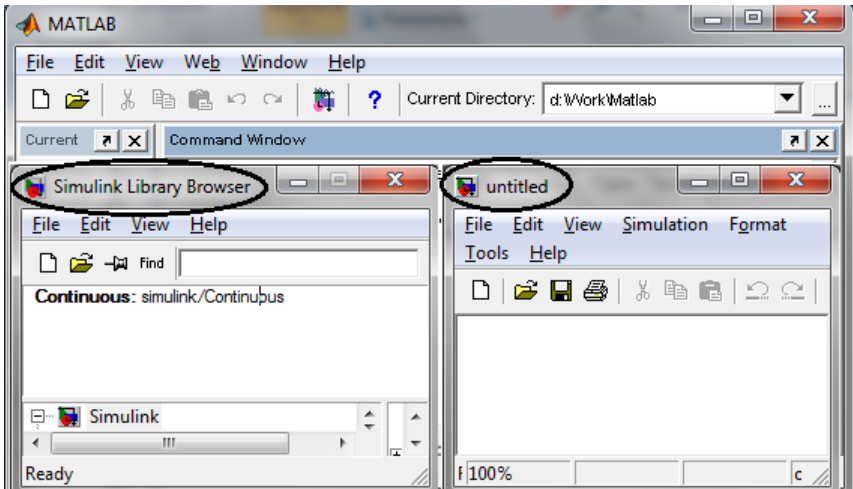



Рисунок 1.3 – Вікно робочого простору Simulink, де складається робоча модель із типових ланок Untitled із бібліотеки блоків Simulink Library Browser

Відкриття створеної раніше моделі відбувається за допомогою команди **File** → **Open** або шляхом натискання на кнопку *Open File*  на панелі інструментів **Simulink**.

Щоб розташувати блоки у вікні робочого простору моделі Untitled, необхідно відкрити відповідний розділ каталогу бібліотеки Simulink Library Browser, обрати потрібний блок і переместити його в робочий простір, або написати назву блоку у пошуковому вікні каталогу бібліотеки Simulink Library Browser (рис. 1.4).

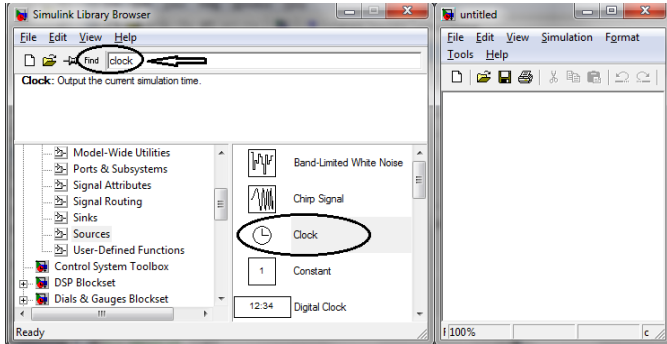


Рисунок 1.4 – Вікно каталогу бібліотеки блоків Simulink Library Browser та відображення блоків в процесі пошуку потрібного блоку, наприклад, блоку Clock

Копіювання потрібних блоків з бібліотеки (або з будь-якої вже існуючої моделі) у робоче вікно створеного файлу Untitled виконують мишею за допомогою операції *drag* (перетягнути при натиснутій лівій клавіші миші). У вікні бібліотеки Simulink Library Browser встановлюємо на потрібному блоці курсор, натискаємо та утримуємо ліву кнопку «миші» й переміщуємо блок в створене робоче вікно Untitled. Коли покажчик у вікні моделі виявиться в тому місці, де потрібно розмістити блок, відпускається кнопка «миші». В результаті копія блоку, наприклад Clock, опиняється у робочому вікні моделі Untitled (рис. 1.5).

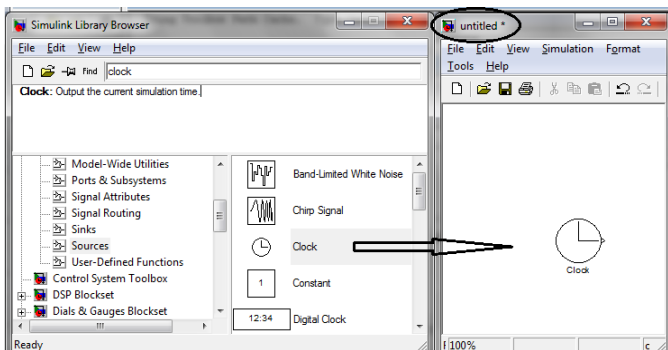


Рисунок 1.5 – Переміщення блоку Clock із бібліотеки блоків Simulink Library Browser у робоче вікно моделі Untitled

Аналогічно здійснюється переміщення інших блоків із бібліотеки Simulink Library Browser та блоків у середовищі вікна. У просторі вікна моделі Untitled блоки копіюють за допомогою операції *drag right* (перетягнути при натиснутій правій клавіші миші). При цьому до імені нового блоку додається цифра, яка відображає порядковий номер зкопіюваного блоку усередині даного вікна, цим забезпечується унікальність імені кожного блоку, що належить одній моделі.

Після переміщення блоків у робоче вікно моделі Untitled необхідно їх розташувати в потрібному порядку (рис. 1.6).

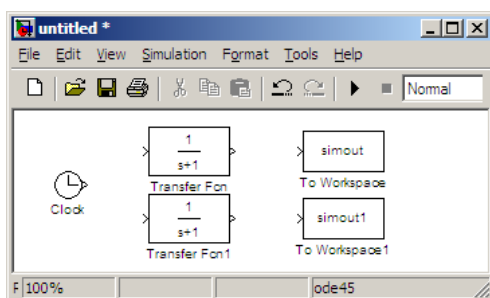


Рисунок 1.6 – Розташування потрібних блоків для складання моделей у робочому вікні Untitled

Імена блоків можна змінювати безпосереднім редагуванням. Для цього достатньо клацнути лівою клавішею миші на поле імені блока і записати нове ім'я. Для закінчення редагування імені слід клацнути мишею поза полем введення тексту.

Подвійне клацання лівою клавішею миші на піктограмі блока розкриває текстове вікно для введення його параметрів. Параметри блока можуть бути подані як у числовому вигляді, так і у вигляді назв змінних або математичних виразів. В останньому випадку до початку моделювання змінним необхідно надати значення. Це можна робити з командного рядка робочого вікна MATLAB або шляхом виконання командного файлу (сценарію). При введенні числових параметрів цілу частину від дробової відділяють *точкою*, а не комою (рис. 1.7).

Вікно введення параметрів закривається натисканням кнопки **OK** або **Apply**.

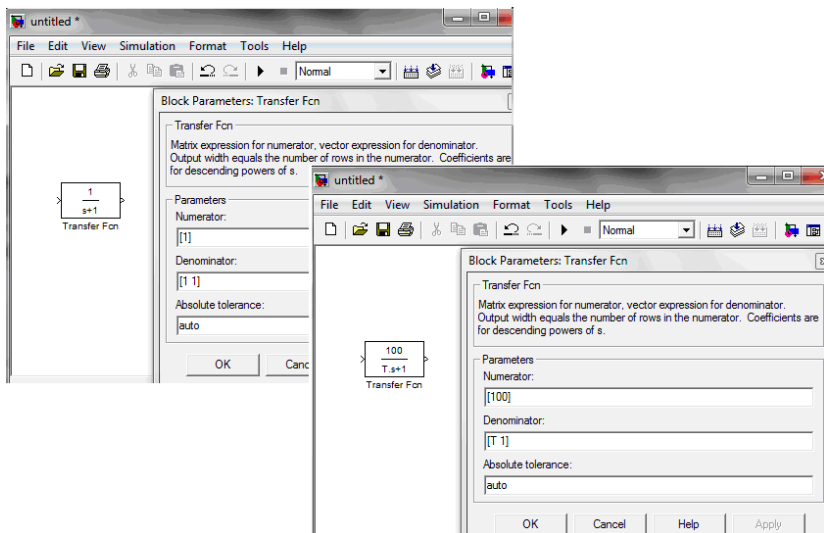
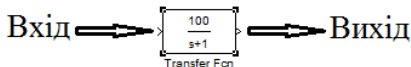


Рисунок 1.7 – Вікна введення і редагування параметрів блоку TransferFcn

З'єднання блоків між собою

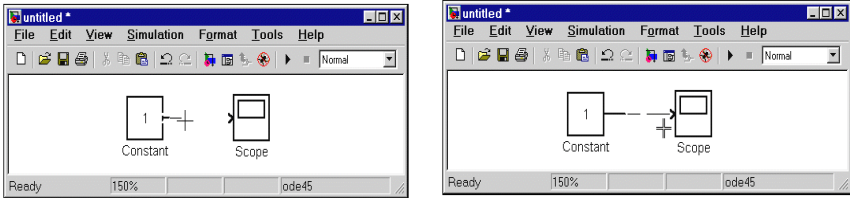
Після розстановки блоків в робочому полі моделі їх необхідно з'єднати. Зв'язок елементів схеми встановлюється між вхідним і вихідним портами блоків. Вхід позначається стрілкою, спрямованою в блок, а вихід – стрілкою, спрямованою із блока.



Стрілка вказує напрям потоку даних. На рис. 1.8 блок *Constant* має один вихід і немає жодного входу, а елемент *Scope* має один вхід і немає жодного виходу. З'єднувати блоки схеми між собою можна:

- **вручну.** Для цього необхідно встановити курсор на «вихід» першого блоку. Курсор при цьому перетвориться у великий хрест із тонких ліній (рис. 1.8, а). А потім, натискаючи ліву клавішу миші і не відпускаючи її, провести лінію до входу іншого блока. Курсор миші набуде вигляду хреста з тонких здвоєних ліній (рис. 1.8, б). Після створення лінії з'єднання ліву клавішу миші слід відпустити. Свідченням того, що з'єднання створене, буде суцільна чорна стрілка біля вхідного порту блоку. Якщо з'єднання блоків не відбулось, лінія зв'язку буде відображатися

червоною штрихованою лінією.

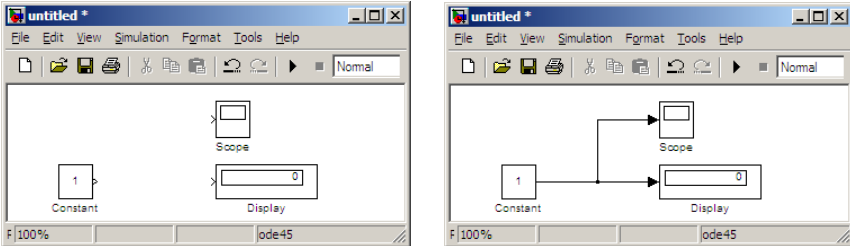


a

б

Рисунок 1.8 – Початок (*a*) і завершення (*б*) створення з'єднання блоків

Якщо потрібно з'єднати три блока або більш (рис. 1.9, *a*), потрібно спочатку провести лінію зв'язку між двома, а вхід третього блоку з'єднати зі створеною лінією зв'язку, що з'єднує два перших блока. Для створення точки розгалуження в сполучній лінії (тобто вузла) потрібно підвести курсор до місця можливого вузла і, натиснувши праву клавішу миші, протягнути лінію (рис. 1.9, *б*);



a

б

Рисунок 1.9 – Початок (*a*) і завершення (*б*) створення з'єднання декілька блоків

- **автоматично.** Для цього необхідно встановити курсор миші на попередній блок і клацнути лівою клавішею миші на ньому. З'являться чорні маркери у кутах об'єкта. Потім, натиснувши клавішу **Ctrl** на клавіатурі і не відпускаючи її, клацнути лівою клавішею миші на наступний блок. З'явиться сполучна лінія.


Якщо блок має число виходів більше одного, то буде проведено стільки ліній зв'язку, скільки є виходів на першому елементі.

Виділення об'єктів


Для виконання якої-небудь дії над елементом моделі (блоком, сполучною лінією, написом) його потрібно виділити. Простіше це зробити за допомогою миші. Для цього встановлюють курсор миші на потрібному об'єкті і лівою клавішею миші виконують одне клацання. З'являться чорні маркери у кутах об'єкта. Щоб виділити кілька об'єктів, треба встановити курсор миші поблизу групи об'єктів, натиснути ліву клавішу миші та, не відпускаючи її, почати переміщати мишу. З'явиться пунктирна рамка, розміри якої будуть змінюватися при переміщенні миші. Всі охоплені рамкою об'єкти стануть виділеними. Виділити всі об'єкти також можна, використовуючи команду **Edit → Select All**.

Після виділення об'єкта його можна копіювати або переміщати в буфер проміжного зберігання, витягати з буфера, а також видаляти, застосовуючи стандартні прийоми роботи у Windows-програмах.

Копіювання та переміщення об'єктів у буфер проміжного зберігання


Для копіювання об'єкта в буфер проміжного зберігання його необхідно виділити, а потім виконати команду **Edit → Copy** або скористатися кнопкою на панелі інструментів робочого вікна моделі *Copy* .

Копіювання також можна виконати натисканням правої клавіші миші на об'єкті та переміщенням його при натиснутій правій клавіші (тобто не відпускаючи її). При цьому буде створена копія об'єкта, яку можна перемістити в потрібне місце.

Для зберігання об'єкта в буфері його слід попередньо виділити, а потім виконати команду **Edit → Cut** або скористатися кнопкою на панелі інструментів робочого вікна моделі *Cut* . При виконанні цих операцій варто мати на увазі, що об'єкти переміщуються у власний буфер MATLAB і будуть 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 програм.

Вставка об'єктів з буфера проміжного зберігання

Для того щоб вставити об'єкт з буфера проміжного зберігання, необхідно попередньо вказати місце вставки, клацнувши лівою клав'яшею миші в потрібному місці, а потім виконати команду **Edit** → **Paste** або скористатися кнопкою на панелі інструментів робочого вікна моделі **Paste** .

Видалення об'єктів

Для видалення об'єкта його слід попередньо виділити, а потім виконати команду **Edit** → **Clear** або скористатися клав'яшею **Delete** на клавіатурі. Варто врахувати, що команда **Clear** видаляє блок без переміщення його в буфер обміну.

Зміна розмірів блоків

Для зміни розміру блока його виділяють, потім курсор миші встановлюють на один з маркерів у кутах блока. Після зміни вигляду курсора на двосторонню стрілку, необхідно натиснути ліву клав'яшу миші і розтягти (або стиснути) зображення блока.

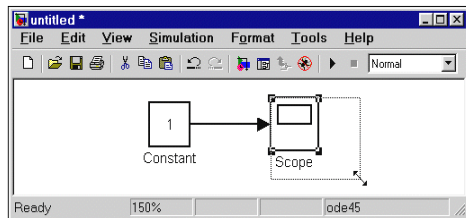


Рисунок 1.10 – Зміна розміру блока

Переміщення блоків

Будь-який блок моделі можна перемістити, виділивши його і пересунувши при натиснутій лівій клав'яші миші. Якщо до входів і виходів блока підведені сполучні лінії, то вони не розриваються, а лише змінюються за довжиною. У з'єднання можна також вставити блок, що має один вхід й один вихід. Для цього його слід розташувати в потрібному місці сполучної лінії.

Збереження моделі у вигляді файлів

Створену структурну схему необхідно зберегти у вигляді файлу на диску. Для цього потрібно з меню **File** вибрати **Save As...** (Зберегти як...)

у вікні створеної схеми та зазначити папку для збереження та ім'я файлу, який за умовчанням матиме розширення «*m*». Ім'я файлу має починатися з літери та не перевищувати 32 символи. Також, не можна використати символи кирилиці та спеціальні символи. При наступному редагуванні схеми можна користуватися пунктом меню **File** → **Save** (Зберегти).

Завершення роботи з моделлю

Після завершення роботи необхідно зберегти модель у файлі, закрити вікно моделі, вікно огляду бібліотек, а також робоче вікно пакету MATLAB.

При повторних запусках програми Simulink завантаження схеми здійснюється за допомогою меню **File** → **Open...** у вікні огляду бібліотеки або з основного вікна MATLAB.

Установка параметрів та виконання розрахунку

Перед запуском моделі необхідно встановити параметри моделювання, це виконується у вікні налаштування параметрів розрахунку **Simulation** (моделювання), яке знаходиться у меню робочого вікна моделі під його заголовком (рис. 1.11).

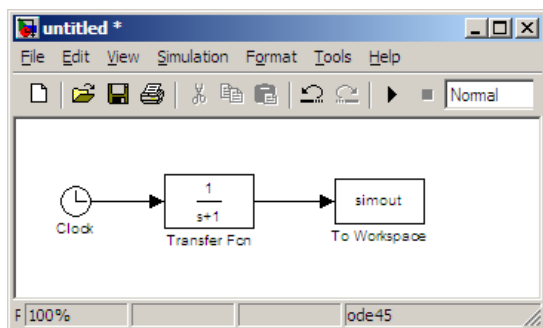


Рисунок 1.11 – Розташування меню *Simulation* на робочому вікні Untitled

Необхідно натиснути на панелі керування меню **Simulation** → **Simulation Parameters...** (рис. 1.12).

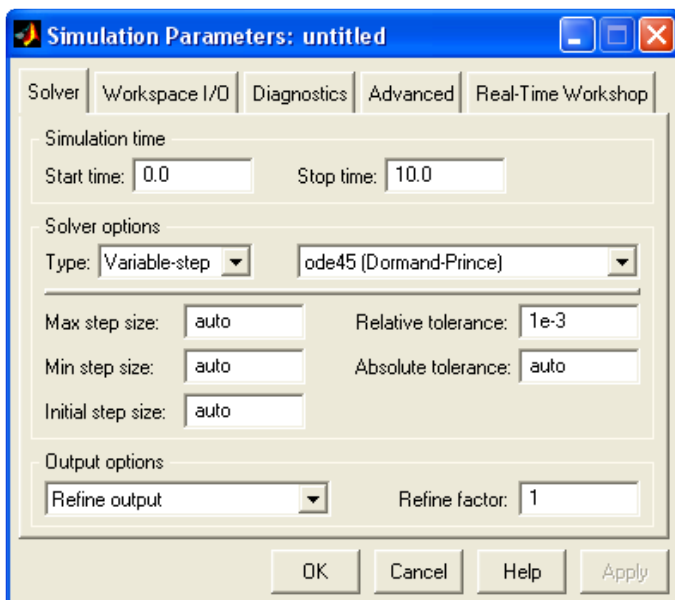


Рисунок 1.12 – Вікно налаштування параметрів розрахунку *Simulation parameters*

Задавання параметрів моделювання виконується у закладці **Solver**. Елементи цієї панелі розділені на групи:

- **Simulation time** (інтервал часу моделювання). Інтервал часу моделювання задається шляхом завдання початкового (Start time) і кінцевого (Stop time) значень часу розрахунку. Як правило, початковий час розрахунку задається рівним нулю, а кінцевий час розрахунку задається користувачем, виходячи з умов розв’язуваної задачі.
- **Solver options** (параметри розрахунку). В параметрах розрахунку (Type) спочатку зі списку необхідно вибрати крок інтегрування:
 - variable-step – змінний крок інтегрування. Як правило, використовується для моделювання безперервних систем;
 - fixed-step – фіксований крок інтегрування. Застосовується для моделювання дискретних систем.

Оскільки в курсі «Теорія автоматичного керування. Частина 1» розглядаються безперервні системи, вибираємо крок інтегрування для розра-

хунку безперервних систем.

Потім в Туре із списку вибираємо один із методів чисельного розрахунку, що розташовані у вікні праворуч. Ці методи різні для змінного (Variable-step) і для фіксованого (Fixed-step) кроку інтегрування часу і являють собою процедури розв’язання систем диференціальних рівнянь. Перший варіант (**discrete**) використовується для розрахунку дискретних систем. Інші методи придатні для розрахунку безперервних систем:

- ode45 (Dormand-Prince) – однокрокові явні методи Рунге-Кутта 4-го і 5-го порядку;
- ode23 (Bogacki-Shampine) – однокрокові явні методи Рунге-Кутта 2-го і 3-го порядку;
- ode113 (Adams) – багатокроковий метод Адамса-Башворта-Мултона змінно-го порядку;
- ode15s (stiff / NDF) – багатокроковий метод змінного порядку (від 1 до 5), який використовує формули чисельного диференціювання;
- ode23s (stiff / Mod. Rosenbrock) – однокроковий метод, який використовує модифіковану формулу Розенброка 2-го порядку;
- ode23t (mod. Stiff / Trapezoidal) – метод трапецій з інтерполяцією;
- ode23tb (stiff /TR-BDF2) – неявний метод Рунге-Кутта на початку рішення і метод, який використовує формули зворотного диференціювання 2-го порядку в наступному.

У текстовому вікні **Max step size** (максимальний крок розрахунку) задаємо максимальний крок інтегрування Δt_{int} . За умовчанням установлюється автоматично (**auto**). Його значення в цьому випадку

$$\Delta t_{\text{int}} = \frac{T_{\text{stop}} - T_{\text{start}}}{50}.$$

Досить часто це значення виявляється занадто великим,

і спостережувані графіки являють собою ламані (а не плавні) лінії. У цьому випадку розмір максимального кроку розрахунку необхідно задавати, виходячи зі значення найменшої сталої часу T_{min} динамічних ланок досліджуваної системи: $\Delta t_{\text{int}} \leq \frac{T_{\text{min}}}{10}$.

Значення параметрів у текстових вікнах **Min step size** (мінімальний крок розрахунку), **Initial step size** (початкове значення кроку моделюван-

ня), **Relative tolerance** (відносна точність обчислень, за умовчанням дорівнює 10^{-3}) та **Absolute tolerance** (абсолютна точність обчислень, за умовчанням - **auto**) бажано залишити незмінними.



Параметри групи **Output options** (параметри виведення вихідних сигналів системи, що моделюється) бажано залишити незмінними:

- **Refine output** (скоректоване виведення) – дозволяє змінювати дискретність реєстрації часу моделювання та сигналів, які зберігаються в робочій області MATLAB за допомогою блока **To Workspace**. Установка значення дискретності виконується в рядку редагування **Refine factor**, розташованому праворуч. Може набувати тільки цілих додатних значень:

- 1 – реєстрація виконується для кожного значення часу моделювання;
- 2 – реєструється кожне друге значення сигналів;
- 3 – реєструється кожне третє значення сигналів і т. д.

Після редагування параметрів слід натиснути клавішу **OK** або **Apply**.

Запуск моделювання моделі

Запуск розрахунку (моделювання) виконується шляхом натискання на панелі інструментів робочого вікна моделі кнопки **Start Simulation** . Дostroково зупинити моделювання (до закінчення заданого інтервалу моделювання) можна натисканням на панелі інструментів робочого вікна моделі кнопки **Stop Simulation** .

1.2. Завдання для виконання роботи

1. Вивчити інтерфейс програми та основні поняття.
2. Запустити браузер Simulink.
3. Створити файл для створення моделі Untitled.
4. Відкрити бібліотеку Simulink.

Із бібліотеки джерел сигналів і впливів **Sources** (сюди входять блоки, які не мають входу, а мають тільки вихід) перетягнути мишею у вікно побудови моделі наступні джерела:

➤ **Clock** (джерело часового сигналу) формує сигнал, значення якого на кожному кроці розрахунку дорівнює точному часу моделювання;



➤ **Constant** (джерело постійного сигналу) задає постійний за рівнем сигнал, що не залежить від часу;

➤ **Ramp** (джерело лінійно-наростаючого сигналу) формує лінійно-наростаючий сигнал із затримкою у часі;

➤ **Sine Wave** (джерело синусоїдального сигналу) формує синусоїдальний сигнал у функції часу $y = A \cdot \sin(\omega t + \varphi_0 + \varphi)$;

➤ **Pulse Generator** (джерело імпульсного сигналу) забезпечує формування прямокутних імпульсів.

З розділу бібліотеки **Sinks** перетягнути мишею у вікно побудови моделі блок збереження даних у робочій області **To Workspace** (він має вхід і не має виходу), за допомогою якого створюється матриця із заданим ім'ям **Variable name**, що містить значення векторів вхідних сигналів. Кожний сигнал, що реєструється, записується в окремий стовпець матриці. Один рядок матриці містить стан усіх сигналів у конкретний момент часу.

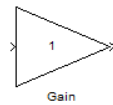
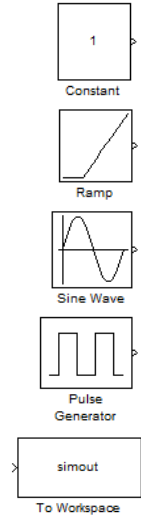
Із бібліотеки розподілу сигналів **Signal Routing** перетягнути мишею у вікно побудови моделі блок ручного перемикача **Manual Switch** (він має вхід і має вихід), який виконує перемикання вхідних сигналів за командою користувача. Командою на перемикання є подвійне клацання лівою клавішею миші на зображенні блоку. При цьому зображення блоку змінюється, показуючи, який вхідний сигнал у цей момент проходить на вихід блоку. Перемикання блоку можна виконувати як до початку моделювання, так і в процесі розрахунку.

З розділу бібліотеки блоків математичних операцій **Math Operations** перетягнути мишею у вікно побудови моделі блок підсилювача сигналів **Gain**, який виконує множення вхідного сигналу на незмінний коефіцієнт.

5. Зібрати схему, як показано на рис 1.13, з'єднуючи входи і виходи елементів, копіюючи достатню кількість елементів, при необхідності змінюючи їх розміри.

6. Виконати задавання параметрів елементів схеми.

Для цього необхідно двічі клацнути мишею на вибраному елементі і у вікні **Block Parameters** елементу, ввести значення необхідних параметрів.



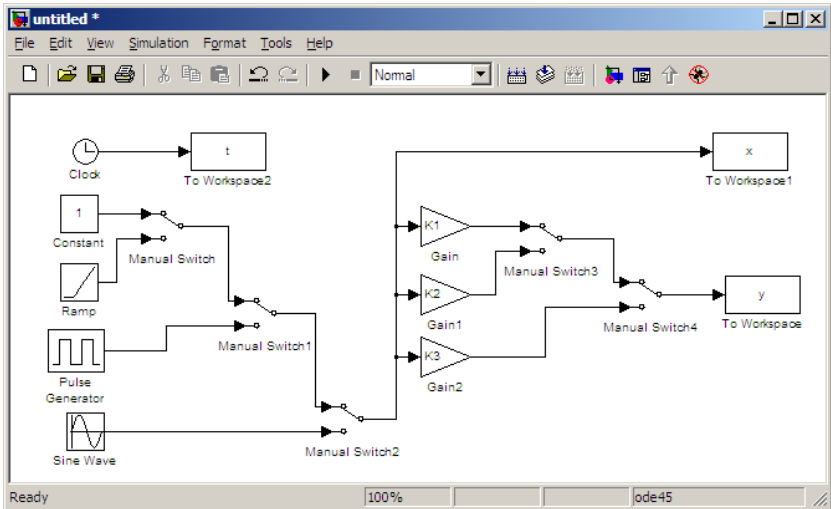


Рисунок 1.13 – Модель для дослідження блоку Gain з можливістю варіації вхідних сигналів

➤ У **Block Parameters Constant** (рис. 1.14) задається постійна величина у вікні *Constant value* у вигляді константи, значення якої може бути дійсним або комплексним числом, що обчислюється виразом, вектором або матрицею.

Interpret vector parameters as 1-D (прапорець) інтерпретує, що заданий вектор параметрів є одновимірним.

В лабораторній роботі задати сигнал **Constant** як одиничний ступеневий $x(t)=1(t)$, що миттєво зростає від нуля до одиниці й далі залишається незмінним;

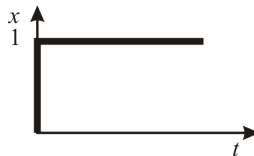
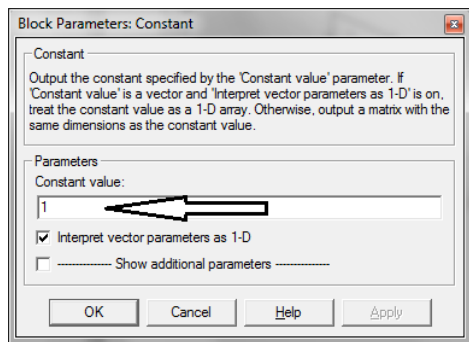


Рисунок 1.14 – Задавання параметрів постійного сигналу у блоці **Constant**

➤ **Block Parameters Ramp** дозволяє задавати швидкість зміни вихідного сигналу блоку у вікні *Slope*, час початку формування сигналу у вікні *Start time* та початковий рівень сигналу на виході блоку *Initial value*.

Interpret vector parameters as 1-D (прапорець) інтерпретує, що заданий вектор параметрів є одновимірним.

В лабораторній роботі пропонується задати сигнал **Ramp** як лінійно зростаючий сигнал – $x(t) = 1 \cdot t$ (рис. 1.15), швидкість зміни вихідного сигналу блоку встановити 1, що відповідає нахилу графіка сигналу $x(t) = 1 \cdot t$ до вісі абсцис під кутом 45° , час початку формування сигналу встановити 0;

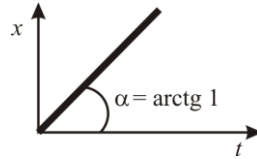
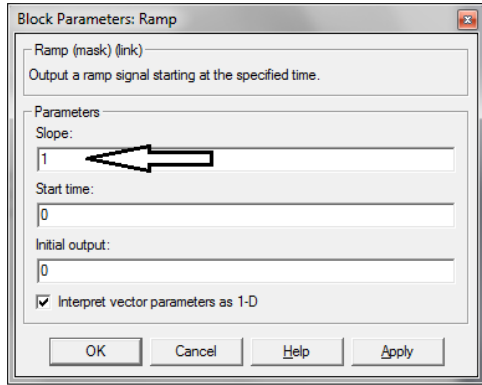


Рисунок 1.15 – Завдання лінійно зростаючого сигналу за допомогою блока **Ramp**

➤ За допомогою **Block Parameters Sine Wave** формується гармонічний сигнал (рис. 1.16) з потрібними параметрами: амплітудою *Amplitude* (A), кутовою частотою (рад/с) *Frequency* (ω), початковою фазою (рад) *Phase* (φ_0) та зсувом сталої складової сигналу *Bias* (φ). На рис. 1.17 показано вікно для задавання цих параметрів.

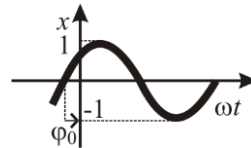


Рисунок 1.16 – Гармонічний вихідний сигнал

Параметри *Sine Type* (вид алгоритму для формування вихідного сигналу блоку) вибираються зі списку:
 Time-based – за поточним часом;
 Sample-based – за значенням кроку часу моделювання.

Параметр *Sample time* (крок часу моделювання) використовується для узгодження роботи джерела та інших компонентів моделі за часом і може набувати наступних значень:

- нуль (за умовчанням) – застосовується при моделюванні безперервних систем;

- додатне значення – задається при моделюванні дискретних систем. У цьому випадку крок часу моделювання можна інтерпретувати як крок квантування вихідного сигналу за часом.

В лабораторній роботі слід задати сигнал **Sine Wave** як гармонічний сигнал одиначної амплітуди $A = 1$, з кутовою частотою $\omega = 1$ та з початковою фазою $\varphi_0 = 0$ – $x(t) = 1 \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi_0)$.

➤ Використання **Block Parameters Pulse Generator**

дозволяє створювати імпульсні сигнали.

В лабораторній роботі розглядається одиначна імпульсна функція – $x(t) = \delta(t)$, яка має таку властивість: $\delta(t) = 0$ при $t < 0$ і $t > 0$, тобто вона існує тільки в момент часу $t = 0$ (рис. 1.18) і $\delta(0) \rightarrow \infty$.



Рисунок 1.18 – Одиначна імпульсна функція

На рис. 1.19 показано вікно для завдання параметрів одиначної імпульсної функції:

Amplitude – амплітуда ($A \rightarrow +\infty$) – задається великим числом, наприклад, 100;

Period (secs) – період. Задається в секундах для **Time-based Pulse Type** або в кроках часу моделювання для **Sample-based Pulse Type**. Період одиначної імпульсної функції ($T \rightarrow +\infty$) – задається великим числом, на-

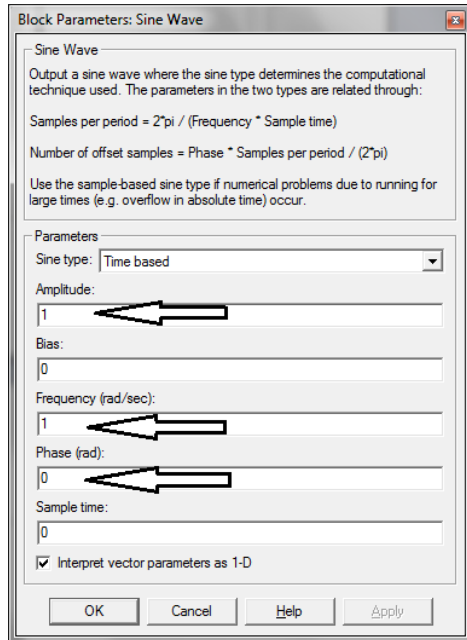


Рисунок 1.17 – Задавання синусоїдального вихідного сигналу блоку **Sine Wave**

приклад, 100;

Pulse Width (% of period) – ширина імпульсів. Задається у відсотках щодо періоду **Pulse Type** при умові, що площа одиничного імпульсу прямокутної форми дорівнює $S = A \cdot \tau = 1$ (рис. 1.20). Звідки ширина імпульсу виражається за формулою: $\tau = 1/A$.

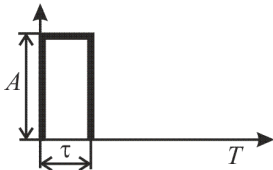


Рисунок 1.20 – Розрахунок параметра **Pulse Width**

Розрахування ширини імпульсу τ як відсоток від періоду T здійснюється за умовою, що:

$$\text{період } T - 100\%$$

ширина імпульсу $\tau - \text{PulseWidth}\%$;

Звідси випливає, що

$$\text{Pulse Width} = \frac{\tau \cdot 100\%}{T}.$$

Phase delay (secs) – фаза затримка. В лабораторній роботі прийняти 0.

➤ В блоці **Block Parameters To Workspace** (рис. 1.21) задаються:

Variable name – ім'я змінної величини, дані якої записуються в робочий простір. На рис. 1.21 це ім'я позначено: **simout**.

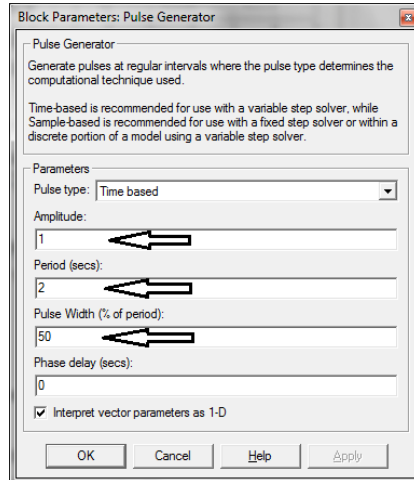


Рисунок 1.19 – Формування генератора імпульсів за допомогою блока **Pulse Generator**

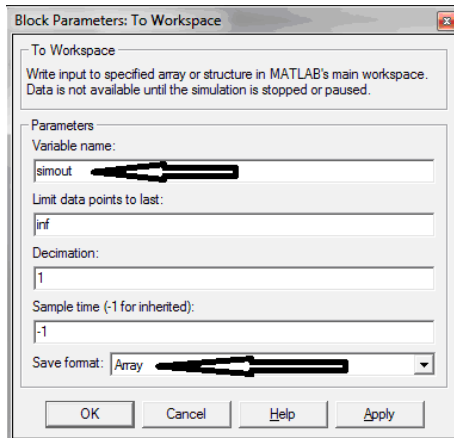


Рисунок 1.21 – Оформлення вихідних параметрів моделі

В лабораторній роботі в моделі на рис. 1.13 ім'я вхідного сигналу позначено x , вихідного сигналу – y , сигнал часу – t .

Максимальна кількість розрахункових точок, що зберігаються за часом, **Limit data points to last** задано як **inf**, тобто всі дані будуть збережені у робочій області з кратністю **Decimation** – 1.

Формат збереження даних **Save format** бажано вибрати **Array**, в якому дані зберігаються як масив, у якому число рядків визначається числом розрахункових точок за часом, а число стовпців – розмірністю вектора, що подається на вхід блока. Якщо на вхід подається скалярний сигнал, то матриця міститиме лише один стовпець.

➤ В блоці **Block Parameters Gain** задається коефіцієнт передачі (підсилення) **Gain** (рис. 1.22), який може бути додатним або від'ємним числом, за модулем більшим або меншим за 1. Коефіцієнт передачі **K** можна задавати у вигляді скаляра, матриці або вектора, а також у вигляді обчислювального виразу. За умовчанням коефіцієнт підсилення є дійсним числом типу **double**.

В лабораторній роботі спосіб виконання операції **Multiplication** обирається по **element-**

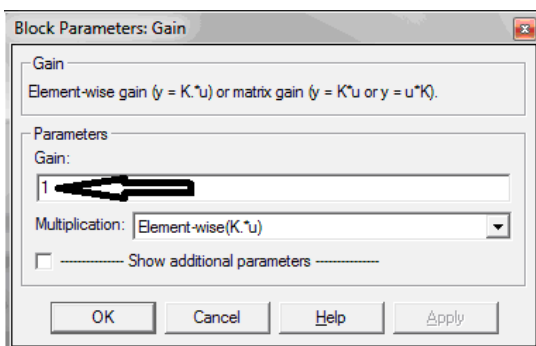


Рисунок 1.22 – Задавання коефіцієнта підсилення

wise K·u, тобто для студентів при виконанні роботи значення коефіцієнту передачі **K** викладач задаватиме у трьох варіантах:

1) за номером прізвища студента N у списку групи $K_2 = N$;

2) у два рази менше номера N у списку групи $K_1 = \frac{N}{2}$;

3) у два рази більше номера N у списку групи $K_3 = 2 \cdot N$.

7. Виконати моделювання досліджуваної моделі (рис. 1.13) з почерговим використанням джерел стандартних вхідних сигналів $x(t)$;

8. Побудувати в одних координатних осях графіки зміни вхідного $x(t)$ і вихідного $y(t)$ сигналів.

Щоб отримати графічне зображення результатів розрахунків потрібно в робочому вікні MATLAB набрати команду **plot** з побудовою масштабної сітки **grid on**:

```
>> plot(t,x,'k-',t,y,'k--');grid on
```

При виконанні цієї команди будуть побудовані графіки у вікні MATLAB під ім'ям **Figure 1**. Їх можна редагувати (див. Додаток А).


За завданням на лабораторну роботу потрібно дослідити модель при трьох різних значеннях коефіцієнту передачі **K**, тому в робочому вікні моделі перемикаємо перемикач на виході блоків **Gain**, змінючі послідовно значення **K** ($K_1 \rightarrow K_2 \rightarrow K_3$).

Виконуємо моделювання. Після закінчення розрахунку переглядаємо результати. Щоб отримані результати відображалися в попередньому графічному вікні **Figure 1**, необхідно скористатися командою **hold on** (наложення графіків) і знову повторити команду **plot**:

```
>> hold on  
>> plot(t,x,'k-',t,y,'k--');grid on
```

В Додатку А наведено приклад досліджуваної моделі і результати моделювання при подачі на вхід одиничного ступеневого сигналу. Аналізуючи результати, можна наочно перекоонатися в працездатності моделі: з виходу елемента **Constant** на вхід елемента **Gain** надходить сигнал дорівнений $x = 1$. Елемент **Gain** примножує цей сигнал на задане значення, наприклад, на $K_2 = 50$ і на його виході утворюється сигнал, дорівнений $y = 50$.

9. Зберегти модель та результати моделювання у вигляді графічних файлів.

Збереження файлів здійснюється в буфері обміну Windows шляхом виконання послідовності команд з меню графічного вікна **Edit** → **Copy Figure**. Далі, попередньо відкривши **Word**-документ, вставити в нього рисунок з буфера обміну за допомогою команди **Правка** → **Вставити** або кнопки на панелі інструментів меню **Word**-документа *Вставити* .

10. Оформити звіт про лабораторну роботу та зробити висновок.

11. Одержати оцінку результатів своєї роботи у викладача, відповідаючи на його контрольні питання.

1.3. Питання для самоконтролю

1. Що таке Simulink?

2. Які розділи каталогу бібліотеки Simulink Library Browser використовувались в лабораторній роботі?

3. Як складаються моделі в Simulink?

4. З яких блоків складається досліджувана модель в лабораторній роботі?

5. Як задаються параметри блоків, що використовувались в лабораторній роботі?

6. Опишіть основні операції над блоками.

7. Які функції виконують блоки розділу бібліотеки **Sources**.

8. Як встановлюються параметри моделювання блоків розділу бібліотеки **Sources**, які використовувались в лабораторній роботі?

9. Як встановлюються параметри моделювання моделі?

10. Як створити графічні файли за допомогою команди **plot**?

11. Як перенести модель і графічні файли в **Word**-документ?

12. Назвіть і запишіть рівняння типових вхідних сигналів.

Лабораторна робота 2
*Дослідження часових характеристик
типових лінійних ланок*

Мета роботи: набуття навичок аналізу динамічних властивостей типових лінійних ланок за реакцією на стандартні вхідні сигнали з використанням математичного моделювання на персональному комп'ютері (ПК) у середовищі пакета MATLAB розширення Simulink.

2.1. Теоретичні положення

Динамічні ланки називаються *типовими*, якщо описуються диференціальними рівняннями не вище другого порядку.

Типові динамічні ланки діляться:

- на елементарні,
- складові.

Передаточні функції **елементарних** ланок являють собою одноклен нульового чи першого степеня s , де s – оператор диференціювання (оператор Лапласа), або дріб, знаменник якої є простий поліном першого чи другого степеня s , що не розкладається.

Складові ланки можна представити як послідовне або паралельне з'єднання двох або трьох елементарних ланок.

З типових динамічних ланок складаються структурні алгоритмічні схеми автоматичних систем керування (АСК). Знання характеристик типових ланок значно полегшує вирішення задач дослідження властивостей систем та виконання синтезу систем з бажаними показниками якості керування.

Кожна лінійна ланка характеризується:

▪ **рівнянням динаміки** – диференціальним рівнянням першого порядку:

$$T \frac{dy}{dt} + y(t) = K \cdot \left(T_0 \frac{dx}{dt} + x(t) \right), \quad (2.1)$$

де $x(t)$ – вхідна величина; $y(t)$ – вихідна величина; T_0, T – сталі часу (коефіцієнти при похідних вхідної та вихідної величин відповідно);

K – коефіцієнт передачі ланки,
або рівнянням другого порядку:

$$T^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + 2\xi T \frac{dy}{dt} + y(t) = K \cdot \left(T_0^2 \frac{d^2 x}{dt^2} + 2\xi_0 T_0 \frac{dx}{dt} + x(t) \right), \quad (2.2)$$

де ξ_0, ξ – коефіцієнти демпфірування, що характеризують схильність до коливань вхідного сигналу та вихідної координати відповідно;

- **передаточною функцією**, що визначається як відношення зображення Лапласа вихідної величини $y(s)$ до зображення Лапласа вхідної величини $x(s)$ при нульових початкових умовах: $W(s) = y(s) / x(s)$;

- **перехідною функцією** $h(t)$, що є реакцією ланки на вхідний сигнал у вигляді одиничної ступеневої функції $x(t) = 1(t)$;

- **імпульсною або ваговою функцією** $k(t)$, що є реакцією ланки на одиничний імпульс, площа якого дорівнює 1 при нескінченно малій тривалості та при висоті, яка прагне до нескінченності $x(t) = \delta(t)$.

За алгоритмом перетворення вхідного сигналу розрізняють наступні типи динамічних ланок, які описуються передаточними функціями $W(s)$:

- пропорційна (П) – $W(s) = K$;
- інтегрувальна (І) – $W(s) = \frac{K}{s} = \frac{1}{T \cdot s}$;
- ідеальна диференціальна (Д) – $W(s) = T \cdot s$;
- аперіодична ланка першого порядку (А-1) – $W(s) = \frac{K}{T \cdot s + 1}$;
- коливальна (К) – $W(s) = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1}$, де $\xi < 1$;
- консервативна (Кон) – $W(s) = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 1}$, де $\xi = 0$;
- аперіодична ланка другого порядку (А-2) – $W(s) = \frac{K}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_1 \cdot T \cdot s + 1} = \frac{K}{(T_1 \cdot s + 1) \cdot (T_2 \cdot s + 1)}$,
де $\xi_1 \geq 1$.

Зв'язок між передаточною та перехідною функціями має вигляд:

$$h(t) = L^{-1} \left\{ \frac{W(s)}{s} \right\}, \quad (2.3)$$

тобто перехідну функцію можна отримати, якщо виконати зворотнє перетворення Лапласа вихідної координати $Y(s)$ при одиничному ступеневому вхідному сигналі $x(t) = 1(t) \rightarrow X(s) = \frac{1}{s}$, $Y(s) = W(s) \cdot X(s) = \frac{W(s)}{s}$.

Перехідні функції типових динамічних ланок $h(t)$ наведені нижче:

- П – $h(t) = K \cdot 1(t)$;
- І – $h(t) = K \cdot t$;
- Д – $h(t) = T \cdot \delta(t)$;
- А-1 – $h(t) = K \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{T}} \right)$;
- К – $h(t) = K \cdot \left[1 - e^{-\frac{\xi}{T}t} \cdot \left(\cos \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot t \right) - \frac{\xi}{\sqrt{1-\xi^2}} \cdot \sin \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot t \right) \right) \right]$;
- Кон – $h(t) = K \cdot \left[1 - \cos \left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot t \right) \right]$;
- А-2 – $h(t) = K \cdot \frac{K \cdot T_1}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_1}} + \frac{K \cdot T_2}{T_1 - T_2} \cdot e^{-\frac{t}{T_2}}$,
де $T_1 = \frac{T}{\xi - \sqrt{\xi^2 - 1}}$, $T_2 = \frac{T}{\xi + \sqrt{\xi^2 - 1}}$.

Зв'язок між передаточною та ваговою функцією має вигляд:

$$k(t) = L^{-1} \{ W(s) \}, \quad (2.4)$$

тобто вагову функцію можна отримати, якщо виконати зворотнє перетворення Лапласа передаточної функції $W(s)$.

Вагові функції типових динамічних ланок $k(t)$ наведено нижче:

- П – $k(t) = K \cdot \delta(t)$;
- І – $k(t) = K$;
- Д – $k(t) = T \frac{d\delta(t)}{dt}$;
- А-1 – $k(t) = \frac{K}{T} e^{-\frac{t}{T}}$;
- К – $k(t) = \frac{K}{T\sqrt{1-\xi^2}} \cdot e^{-\frac{\xi}{T}t} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot t\right)$
- Кон – $k(t) = \frac{K}{T} \cdot \sin\left(\frac{\sqrt{1-\xi^2}}{T} \cdot t\right)$
- А-2 – $k(t) = \frac{K}{T_1 - T_2} \cdot \left(e^{\frac{t}{T_1}} - e^{\frac{t}{T_2}} \right)$.

Зв'язок між перехідної та ваговою функцією має вигляд:

$$k(t) = h'(t) \quad \text{або} \quad h(t) = \int_0^t k(t) \cdot dt . \quad (2.5)$$

Перехідна функція $h(t)$ та вагова функція $k(t)$ є **часовими характеристиками** типових ланок.

2.2. Завдання та порядок виконання роботи

1. Вивчити лекційний матеріал за темою «Часові характеристики типових динамічних ланок».

2. Відповісти на питання для самоконтролю, які наведені нижче.

3. Отримати індивідуальне завдання для виконання лабораторної роботи. Номер варіанту значень параметрів типових ланок співпадає з номером прізвища студента у списку групи N .

4. На базі структурної алгоритмічної схеми (див. рис. А.2,а додатка А.5) підготувати в пакеті MATLAB розширення Simulink структурні алгоритмічні схеми для дослідження типових динамічних ланок (див. рис. Б.1

додатка Б):

- аперіодичної ланки першого порядку;
- інтегрувальної ланки;
- диференціальної ланки;
- коливальної ланки;
- консервативної ланки;
- аперіодичної ланки другого порядку.

В структурних моделях передбачено можливість почергового використання джерел стандартних вхідних сигналів $x(t)$ (див. лабораторну роботу 1).

Блоки відповідних лінійних безперервних ланок знаходяться в бібліотеці Simulink **Continuous**:

- Блок **Transfer Fcn** $\left(\frac{1}{s+1}\right)$ будемо використовувати для запису

передаточної функції аперіодичної ланки першого порядку та ланок другого порядку (А-2, К, Кон, А-2). Цей блок дозволяє реалізовувати передаточну функцію в загальному вигляді як відношення поліномів чисельника m -го ступеня та знаменника n -го ступеня:

$$W(s) = \frac{Y(s)}{X(s)} = \frac{b_0 \cdot s^m + b_1 \cdot s^{m-1} + \dots + b_{m-1} \cdot s + b_m}{a_0 \cdot s^n + a_1 \cdot s^{n-1} + \dots + a_{n-1} \cdot s + a_n}$$

Вхідними параметрами блоку **Transfer Fcn** є коефіцієнти ступеневих поліномів чисельника (**Numerator**) і знаменника (**Denominator**), які необхідно розміщати у вікні відповідного рядку в порядку зменшення ступенів оператора Лапласа s (починати з коефіцієнта b_0 (або a_0) при старшій ступені s полінома). Коефіцієнти слід вводити через пробіл (рис. 1.7). **Порядок ступеня полінома чисельника повинен бути меншим або дорівнювати порядку ступеня полінома знаменника ($m \leq n$).**

- Інтегрувальний блок **Integrator** $\left(\frac{1}{s}\right)$ використовується для запису

інтегрувальної ланки (І). Виконує інтегрування вхідного сигналу із заданою початковою умовою. Швидкість зміни вихідної величини пропорційна вхідній величині, а коефіцієнт передачі K називають коефіцієнтом передачі за швидкістю.

➤ Блок обчислення похідної **Derivative** $\left(\frac{du}{dt}\right)$ використовується

для запису диференціальної ланки (Д). Виконує числове диференціювання вхідного сигналу за наближеною формулою Ейлера. Тут u – значення зміни вхідного сигналу за поточне значення кроку часу моделювання t .

Схеми моделювання інтегрувальної і диференціальної ланок наведено на рис. 2.1.



Риунок 2.1 – Схеми складання інтегрувальної і диференціальної ланок

5. За індивідуальним варіантом завдання згідно номеру за списком у журналі N виконати розрахунок досліджуваних моделей з варіацією параметрів:

– для типових динамічних ланок першого порядку змінювати сталі часу T_1 , T_2 та T_3 як наведено в табл. 2.1;

– для типових динамічних ланок другого порядку для заданного значення коефіцієнта демпфування ξ та ξ_1 та умов:

- – $\omega_{\text{вх}} < \omega_{\text{ланки}}$, де $\omega_{\text{вх}} = 1$, $\omega_{\text{ланки}} = \frac{1}{T_1}$;
- – $\omega_{\text{вх}} = \omega_{\text{ланки}}$, де $\omega_{\text{вх}} = 1$, $\omega_{\text{ланки}} = \frac{1}{T_2}$;
- – $\omega_{\text{вх}} > \omega_{\text{ланки}}$, де $\omega_{\text{вх}} = 1$, $\omega_{\text{ланки}} = \frac{1}{T_3}$.

6. Побудувати в одних координатних осях графіки зміни вхідного $x(t)$ і вихідного $y(t)$ сигналів досліджуваних ланок, зберігаючи графічні результати розрахунків у вигляді файлів.

7. Оформити звіт про лабораторну роботу (див. рис. Б2 додатка Б).

8. Одержати оцінку результатів своєї роботи у викладача, відповівши на контрольні питання.

2.3. Питання для самоконтролю

1. Сформулюйте визначення типової динамічної ланки.
2. Назвіть динамічні ланки, які відносяться до елементарних.
3. Сформулюйте визначення передаточної функції.
4. Які характеристики називаються часовими? Наведіть визначення перехідної та вагової функцій.
5. Як по передаточній функції визначити перехідну та вагову функції?
6. Як по перехідній характеристиці визначити імпульсну характеристику динамічної ланки?
7. Запишіть передаточну функцію та накресліть часові характеристики типових ланок першого та другого порядку.
8. Оцініть вплив варіації параметрів динамічних ланок на їх часові характеристики.
9. Як з графіка перехідної функції аперіодичної ланки першого порядку визначити коефіцієнт передачі K та сталу часу T .
10. Як відрізнити перехідні характеристики типових аперіодичних ланок першого та другого порядку?

Таблиця 2.1 – Варіанти значень параметрів типових ланок

N	1	2	3	4	5	6	7	8	9
K	10	15	20	25	30	35	40	45	50
T_1	0,1	0,1	0,1	0,2	0,2	0,2	0,3	0,3	0,3
T_2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T_3	1,5	2	2,5	3	3,5	4	4,5	5	1,5
ζ	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,5	0,6
ζ_1	1,0	1,1	1,2	1,3	1,4	1,5	1,6	1,7	1,8

N	10	11	12	13	14	15	16	17	18
K	10	15	20	25	30	35	40	45	50
T_1	0,4	0,4	0,4	0,5	0,5	0,5	0,6	0,6	0,6
T_2	1	1	1	1	1	1	1	1	1
T_3	2	2,5	3	3,5	4	4,5	2	2,5	3
ζ	0,7	0,3	0,4	0,5	0,6	0,7	0,3	0,4	0,5
ζ_1	2,0	2,1	2,2	2,3	2,4	2,5	2,6	2,7	2,8

Лабораторна робота 3
*Дослідження частотних характеристик
типових лінійних ланок*

Мета роботи: набуття навичок побудови та аналізу частотних характеристик типових лінійних ланок з використанням структурного математичного моделювання на персональному комп'ютері у середовищі пакета MATLAB розширення Simulink, а також встановлення закономірного зв'язку частотних характеристик з динамічними властивостями ланок.

3.1. Теоретичні положення

Частотні характеристики мають важливе значення для дослідження систем автоматичного управління. Вони показують як реагує ланка або система на вхідні гармонічні сигнали, встановлюють взаємозв'язок між параметрами періодичних сигналів на вході і виході.

Частотні характеристики являють собою залежність амплітуди і фази вихідного сигналу ланки в сталому режимі від кутової частоти ω вхідного гармонійного сигналу $x(t) = A_{\text{вх}} \sin(\omega \cdot t)$ з незмінною амплітудою $A_{\text{вх}}$ ($-\infty < \omega < \infty$). Після закінчення перехідного процесу, викликаного $x(t)$, на виході ланки встановлюються гармонічні коливання тієї ж частоти ω , але, як правило, вони мають іншу амплітуду $A_{\text{вих}}(t)$ і фазовий зсув $\varphi = \left(\frac{\Delta t}{T}\right) \cdot 360^\circ$ у градусах (рис. 3.1):

$$y(t) = A_{\text{вих}} \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi). \quad (3.1)$$

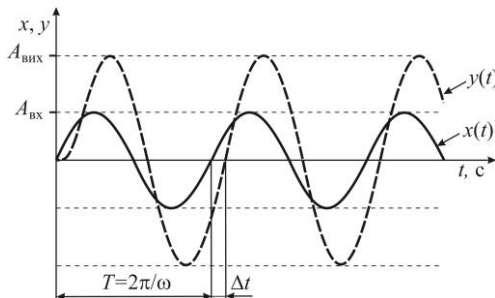


Рисунок 3.1 – Вхідний $x(t)$ і вихідний $y(t)$ гармонічні сигнали ланки

Відгук лінійної динамічної ланки або системи на гармонічні сигнали певного частотного діапазону зручно представляти *амплітудно-фазовою частотною характеристикою* ($W(j\omega)$ -АФЧХ) у вигляді графіка в комплексних координатах. Частота ω виступає як параметр кривої (рис.3.2), а фаза $\varphi(\omega)$ і амплітуда $A(\omega)$ на заданій частоті представляються кутом і довжиною радіус-вектора кожної точки характеристики. По суті такий графік об'єднує на одній площині амплітудну $A(\omega)$ частотну і фазову $\varphi(\omega)$ частотну характеристики.

Залежність відношення амплітуд вихідного і вхідного сигналів від частоти називається *амплітудною частотною характеристикою* (АЧХ) – $A(\omega)$ пропускання елементом сигналів різної частоти. $A(\omega) = \frac{A_{\text{вих}}(\omega)}{A_{\text{вх}}(\omega)}$.

Залежність від частоти фазового зсуву між вхідним і вихідним сигналами називається *фазовою частотною характеристикою* (ФЧХ) – $\varphi(\omega)$.

Об'єднання амплітудної і фазової частотних характеристик дає *амплітудно-фазову частотну характеристику* (АФЧХ) – $W(j\omega)$. Вона являє собою функцію комплексної змінної $j\omega$, модуль якої дорівнює відношенню амплітуди вихідної величини $A_{\text{вих}}$ до амплітуди вхідної $A_{\text{вх}}$, а аргумент – фазовий зсув φ вихідної величини відносно вхідної:

$$\begin{aligned} W(j\omega) &= A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)} = U(\omega) + jV(\omega) = \\ &= A(\omega) \cdot \cos\varphi(\omega) + jA(\omega) \cdot \sin\varphi(\omega); \\ \varphi &= \arg W(j\omega), \end{aligned} \tag{3.2}$$

де $W(j\omega) = A(\omega) \cdot e^{j\varphi(\omega)}$ – показникова форма запису АФЧХ;

$W(j\omega) = U(\omega) + jV(\omega)$ – алгебраїчна форма запису АФЧХ;

$W(j\omega) = A(\omega) \cdot \cos\varphi(\omega) + jA(\omega) \cdot \sin\varphi(\omega)$ – тригонометрична форма запису АФЧХ,

$A(\omega) = \sqrt{U(\omega)^2 + V(\omega)^2}$ – амплітуда або модуль частотної передаточної функції $W(j\omega)$;

$\varphi(\omega) = \arctg W(j\omega) = \arctg \frac{V(\omega)}{U(\omega)}$ – аргумент або фаза частотної передаточної функції $W(j\omega)$;

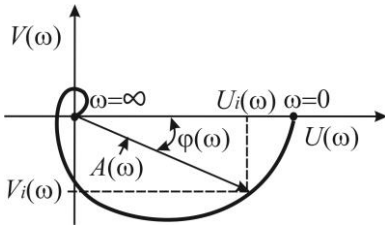


Рисунок 3.2 – Амплітудно-фазова частотна характеристика $W(j\omega)$

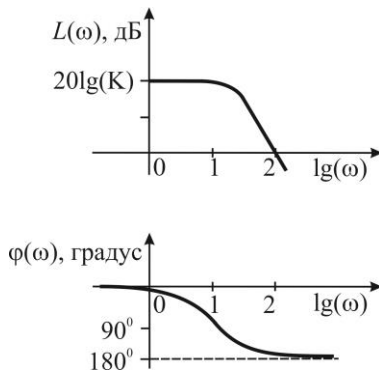


Рисунок 3.3 – ЛАЧХ та ЛФЧХ

ЛАЧХ) і фазової частотної характеристики ($\varphi(\omega)$ – ЛФЧХ), які зазвичай розташовуються один під одним (рис. 3.3):

$$L(\omega) = 20 \cdot \lg|W(j\omega)| = 20 \cdot \lg A(\omega) = 20 \cdot \lg(K).$$

Вираз для АФЧХ динамічної ланки отримується з передаточної функції $W(s)$ шляхом заміни оператора Лапласа на комплексну величину $s = j\omega$. Частотні передаточні функції типових динамічних ланок $W(j\omega)$ наведені нижче:

- аперіодична ланка першого порядку (А-1) –

$$W(j\omega) = \frac{K}{(T \cdot \omega)^2 + 1} - j \frac{K \cdot T \cdot \omega}{(T \cdot \omega)^2 + 1};$$

$U(\omega)$, $V(\omega)$ – дійсна та уявна складові частотної передаточної функції $W(j\omega)$.

Залежності від частоти ω проєкції вектора $W(j\omega)$ на дійсну та уявну осі називають, відповідно, дійсною $U(\omega)$ і уявною $V(\omega)$ частотними характеристиками. Дійсна частотна характеристика завжди являє собою парну функцію частоти, а уявна характеристика – непарну функцію частоти.

На практиці для побудови частотних характеристик часто використовують логарифмічний масштаб, тобто *амплітудно-фазову частотну характеристику* (АФЧХ) – $W(j\omega)$ представляють логарифмічною АФЧХ

(ЛАФЧХ) і будують у вигляді двох графіків: логарифмічної амплітудно-частотної характеристики ($L(\omega)$ –

- інтегральна ланка (І) – $W(j\omega) = -j \frac{K}{\omega}$;
- ідеальна диференціальна ланка (Д) – $W(j\omega) = jK \cdot \omega$;
- коливальна (К) та аперіодична ланка другого порядку (А-2) –

$$W(j\omega) = \frac{K \cdot (1 - T^2 \cdot \omega^2)}{(1 - T^2 \cdot \omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot T \cdot \omega)^2} - j \frac{K \cdot 2 \cdot \xi \cdot T \cdot \omega}{(1 - T^2 \cdot \omega^2)^2 + (2 \cdot \xi \cdot T \cdot \omega)^2};$$

- консервативна (Кон) – $W(j\omega) = \frac{K}{1 - (T \cdot \omega)^2}$.

Для побудови перелічених вище частотних характеристик для кожної типової динамічної ланки найзручніше використовувати вбудований в MATLAB редактор m-файлів. З його допомогою можна набирати команди, виконувати їх всі відразу або частинами, зберігати в файлі, редагувати і використовувати в подальшому.

M-файли запускаються з робочого середовища MATLAB по командам головного меню **File** → **New** → **M-file** або з самого редактору m-файлів. Новий файл у вікні редактору m-файлів має вигляд (рис. 3.4).

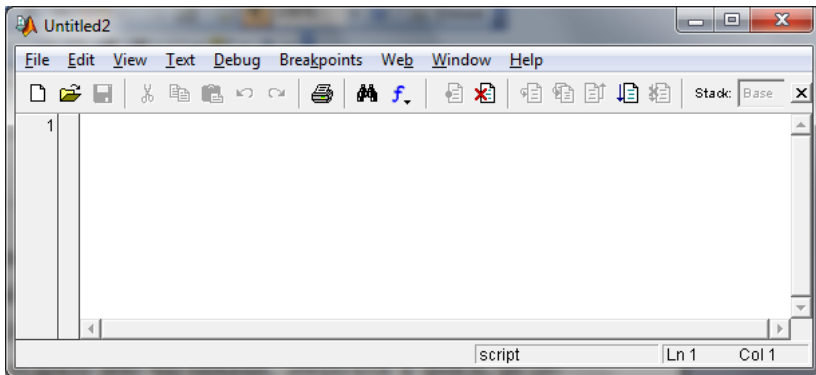


Рисунок 3.4 – Вікно редактора m-файлу

У вікні редактора m-файлу необхідно записувати пошагове виконання команд для побудови частотних характеристик по передаточній функції типової ланки. Нижче наведено список таких команд, однако потрібно урахувати особливості кожної динамічної ланки окремо.

clc;	Очистити командне вікно
clear all;	Видалення змінних та функцій з пам'яті
w=[0:0.1:100];	Задавання спектра частот ω від 0 до 100 з шагом $\Delta t = 0,1$
s=j*w;	Заміна оператора Лапласа на комплексну величину $s = j\omega$
K =	Задавання величини коефіцієнту передачі динамічної ланки
a ₂ = T^2	Задавання величини коефіцієнту при старшому ступені оператора Лапласа в знаменнику передаточної функції динамічної ланки
a ₁ =	Задавання величини коефіцієнту при першому ступені оператора Лапласа в знаменнику передаточної функції динамічної ланки
a ₀ = 1	Задавання вільного коефіцієнту в знаменнику передаточної функції динамічної ланки
W=K./(a ₂ .*s.^2+ a ₁ .*s+a ₀);	Запис передаточної функції в загальному вигляді типової динамічної ланки $W(s) = \frac{K}{a_2 s^2 + a_1 s + a_0}$. За результатами команди s=j*w передаточна функція в операторній формі Лапласа W(s) перетворюється на частотну передаточну функцію W(j ω)
re=real(W); im=imag(W);	Виділення дійсної U(ω) та уявної V(ω) складих з передаточної функції W(j ω)

Продовження

<code>A=sqrt(re.^2+im.^2);</code>	Розрахунок амплітуди частотної передаточної функції $W(j\omega)$ $A(\omega) = \sqrt{U(\omega)^2 + V(\omega)^2}$
<code>figure;plot(re,im);grid on</code>	Побудова АФЧХ в окремому графічному вікні
<code>figure;plot(w,re);grid on</code>	Побудова дійсної частотної характеристики в окремому графічному вікні
<code>figure;plot(w,im);grid on</code>	Побудова уявної частотної характеристики в окремому графічному вікні
<code>figure;plot(w,A);grid on</code>	Побудова АЧХ в окремому графічному вікні
<code>figure;bode([K],[a2 a1 a0]);grid on</code>	Побудова в окремому графічному вікні ЛАЧХ і ЛФЧХ один під одним, де <i>Magnitude (dB)</i> – вісь значень ЛАЧХ в децибелах, <i>Phase (deg)</i> – вісь значень ЛФЧХ у градусах, <i>Frequency (rad/sec)</i> – вісь частоти (в радіанах на секунду).

3.2. Завдання та порядок виконання роботи

1. Вивчити лекційний матеріал за темою «Частотні характеристики типових динамічних ланок».

2. Відповісти на питання для самоконтролю, які наведені нижче.

3. За номером індивідуального варіанту (табл. 2.1) одержати дані значень параметрів типових ланок.

4. Відкрийте редактор m-файлів з робочого середовища MATLAB за командами головного меню **File** → **New** → **M-file**. Записати в m-файлі команди для побудови частотних характеристик типових динамічних ланок за передаточною функцією для:

- аперіодичної ланки першого порядку;
- інтегрувальної ланки;

- диференціальної ланки;
- коливальної ланки;
- консервативної ланки;
- аперіодичної ланки другого порядку.

5. Виконати розрахунок та побудувати частотні характеристики досліджуваних ланок, зберігати графічні результати розрахунків у вигляді файлів.

6. Для перелічених динамічних ланок розрахувати асимптотичні ЛАЧХ. Відобразити в одній системі координат асимптотичну ЛАЧХ і ЛАЧХ, яку побудовано за допомогою команди **bode**.

7. Оформити звіт про лабораторну роботу (додаток В).

8. Одержати оцінку результатів своєї роботи у викладача, відповівши на його контрольні питання.

3.3. Питання для самоконтролю

1. Що називається частотними характеристиками?
2. Як, маючи передаточну функцію ланки, визначити частотні характеристики?
3. Яка характеристика називається АФЧХ і як її побудувати?
4. Які характеристики називаються дійсною $U(\omega)$ і уявною $V(\omega)$ частотними характеристиками і як її побудувати?
5. Як розрахувати та побудувати АЧХ? Як визначити амплітуду і аргумент на АФЧХ?
6. Які характеристики називаються ЛАЧХ і ЛФЧХ і як її побудувати? Як зміняться ЛАЧХ і ЛФЧХ ланки, якщо коефіцієнт передачі зростає в 100 разів?
7. Як розрахувати та побудувати асимптотичну ЛАЧХ.
8. Яка типова ланка не змінює фазу гармонічного сигналу будь-якої частоти?
9. Які одиниці виміру прийнято на координатних осях ЛАЧХ і ЛФЧХ?
10. Дати визначення частоти зрізу, частоти сполучення, резонансної частоти.
11. Основні відмінності АЧХ і ФЧХ інтегрованої і диференціальної ланок.

Лабораторна робота 4

Дослідження динамічних режимів двигуна постійного струму з незалежним збудженням

Мета роботи: набуття навичок побудови структурних алгоритмічних схем за диференціальними рівняннями, що описують роботу АСК, на прикладі двигуна постійного струму з незалежним збудженням (ДПС НЗ), а також навичок аналізу динамічних властивостей ДПС НЗ в різних режимах роботи шляхом математичного моделювання на персональному комп'ютері у середовищі пакета MATLAB розширення Simulink.

4.1. Теоретичні положення

В електроприводах постійного струму часто використовуються ДПС НЗ (*DC motor*). Графічне зображення цього двигуна на електричній принциповій схемі наведено на рис. 4.1. Складові елементи ДПС НЗ: M – якір двигуна (*motor armature*); $F1-F2$ – обмотка збудження (*excitation*); I_a , I_E – струм у колах обмоток якоря та збудження, А; U_a , U_E – напруга, що подається відповідно на обмотки якоря та збудження, В; L_a , L_E – індуктивність обмоток якоря та збудження, Гн; $R_{a\Sigma} = R_a + R_{adp} + R_{cw} + R_b$ – сумарний опір якоря, що складається з опорів обмотки якоря R_a , додаткових полюсів R_{adp} (*additional pole*), компенсаційної обмотки R_{cw} (*compensator winding*) та щіткового контакту R_b (*brush contact*), Ом; R_E – опір обмотки збудження, Ом; Ω – кутова швидкість електродвигуна, рад/с; M_{em} , M_l (I_l) – електромагнітний момент двигуна та статичний момент (струм) навантаження (опору руху) (*load*), Н·м.

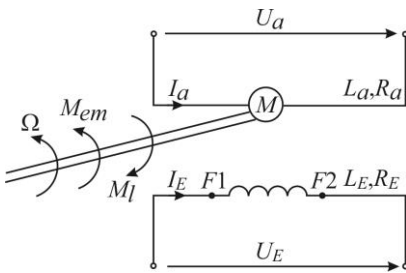


Рисунок 4.1 – Електрична схема включення ДПС НЗ

опір обмотки збудження, Ом; Ω – кутова швидкість електродвигуна, рад/с; M_{em} , M_l (I_l) – електромагнітний момент двигуна та статичний момент (струм) навантаження (опору руху) (*load*), Н·м.

При створенні математичної моделі ДПС НЗ приймаємо такі допущення:

- сигнал завдання – $x(t) = U_a(t)$;
- сигнал збурення – $f(t) = M_l(t)$ або $f(t) = I_l(t)$;
- вихідна або регульована координата – $y(t) = \Omega(t)$;
- система абсолютно жорстка, тобто двигун має один ступінь свободи;
- маса обертових частин постійна;
- статичний момент (струм) опору, приведений до вала двигуна, постійний: $M_l(t) = \text{const}$ або $I_l(t) = \text{const}$, тобто навантаження має активний характер;
- реакція якоря скомпенсована;
- залежність кутової швидкості обертання вала двигуна від напруги якоря U_a лінійна;
- потік збудження електродвигуна в обмотці збудження незмінний і дорівнює номінальному значенню, яке обране за паспортними даними: $\Phi = \Phi_N = \text{const}$;
- температура обмоток не змінюється.

Система диференціальних рівнянь, яка описує динамічні процеси в електродвигуні з урахуванням прийнятих допущень, має вигляд:

$$\left\{ \begin{array}{l} U_a = I_a \cdot R_{a\Sigma} + L_a \frac{dI_a}{dt} + E; \\ E = K \cdot \Phi_N \cdot \Omega; \\ J \frac{d\Omega}{dt} = M_{em} - M_C; \\ M_{em} = K \cdot \Phi_N \cdot I_a; \\ M_l = K \cdot \Phi_N \cdot I_l, \end{array} \right. \quad (4.1)$$

- де E – ЕРС обертання електродвигуна, В;
 K – конструктивний коефіцієнт машини;
 J – момент інерції якоря, $\text{кг} \cdot \text{м}^2$.

Структурна алгоритмічна схема ДПС НЗ являє собою графічне представлення системи рівнянь динаміки, записаних в формі зображень Лапласа:

$$\begin{cases} U_a(s) = R_{a\Sigma} \cdot I_a(s) + L_a \cdot s \cdot I_a(s) + E(s); \\ J \cdot s \cdot \Omega(s) = K \cdot \Phi_N \cdot (I_a(s) - I_l(s)), \end{cases} \quad (4.2)$$

де s – комплексна змінна.

У першому рівнянні системи (4.2) залишимо в правій частині складові, які мають струм якорного кола, а в ліву частину рівняння віднесемо всі інші складові:

$$\begin{cases} U_a(s) - E(s) = (R_{a\Sigma} + L_a s) \cdot I_a(s); \\ J \cdot s \cdot \Omega(s) = K \Phi_N \cdot (I_a(s) - I_l(s)). \end{cases} \quad (4.3)$$

З першого рівняння системи (4.3) одержуємо передаточну функцію для електричної частини електродвигуна:

$$W(s) = \frac{I_a(s)}{U_a(s) - E(s)} = \frac{1}{R_{a\Sigma} + L_a s} = \frac{1/R_{a\Sigma}}{\frac{L_a}{R_{a\Sigma}} s + 1} = \frac{1/R_{a\Sigma}}{T_a s + 1}, \quad (4.4)$$

де $T_a = \frac{L_a}{R_{a\Sigma}}$ – електромагнітна стала часу якорного кола, с;

$L_a = \alpha \cdot \frac{U_N}{2 \cdot p \cdot n_N \cdot I_N}$ – індуктивність якорного кола, визначається за

формулою Уманського з використанням паспортних даних ДПС НЗ;

$\alpha = 5 \div 6$ – коефіцієнт для скомпенсованих машин;

$\alpha = 2 \div 3$ – коефіцієнт для некомпенсованих машин;

U_N – номінальна напруга електродвигуна, В;

p – кількість пар полюсів;

n_N – номінальна частота обертання електродвигуна, об/хв;

I_N – номінальний струм у колі обмотки якоря електродвигуна, А.

З другого рівняння системи (4.3) одержуємо передаточну функцію механічної частини електродвигуна:

$$W(s) = \frac{\Omega(s)}{I_a(s) - I_l(s)} = \frac{\Omega(s)}{I_d(s)} = \frac{K \cdot \Phi_N}{J \cdot s} = \frac{K \cdot \Phi_N \cdot J \frac{R_{a\Sigma}}{(K \cdot \Phi_N)^2}}{J \cdot s \cdot T_M} = \frac{R_{a\Sigma}}{T_M \cdot s}, \quad (4.5)$$

де $T_M = J \cdot \frac{R_{a\Sigma}}{(K \cdot \Phi_N)^2}$ – електромеханічна стала часу, с;

$I_a(s) - I_l(s) = I_d(s)$ – динамічна (*dynamic*) складова струму якоря електро- двигуна, А.

При допущенні $\Phi = \Phi_N = \text{const}$ маємо:

$$K \cdot \Phi_N = \frac{U_N - I_N \cdot R_{a\Sigma}}{\Omega_n}, \quad (4.6)$$

де $\Omega_n = \frac{\pi \cdot n_N}{30}$ – зв'язок номінальної кутової швидкості обертання електродвигуна, рад/с, з номінальною частотою обертання n_N , об/хв.

Добуток конструктивного коефіцієнта машини і потоку збудження електродвигуна $K \cdot \Phi_N$ вимірюється у $\frac{\text{В} \cdot \text{с}}{\text{рад}}$.

З урахуванням викладеного створимо структурну алгоритмічну схему ДПС НЗ (рис. 4.2).

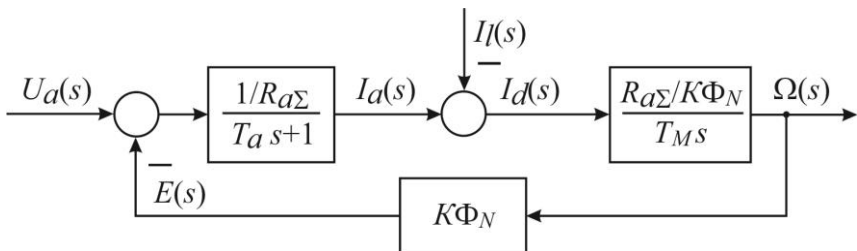


Рисунок 4.2 – Структурна алгоритмічна схема ДПС НЗ

Зі структурної алгоритмічної схеми визначимо передаточні функції ДПС НЗ за сигналом завдання $U_a(s)$:

$$W_{U_a}(s) = \frac{\Omega(s)}{U_a(s)} = \frac{1/(K \cdot \Phi_N)}{T_a \cdot T_M \cdot s^2 + T_M \cdot s + 1} = \frac{k_D}{T_a \cdot T_M \cdot s^2 + T_M \cdot s + 1}, \quad (4.7)$$

де $k_D = \frac{1}{K \cdot \Phi_N}$ – коефіцієнт передачі електродвигуна з напруги якоря;

та сигналом збурення $I_l(s)$:

$$W_{I_l}(s) = \frac{\Omega(s)}{I_l(s)} = \frac{R_{a\Sigma}/(K \cdot \Phi_N)}{T_a \cdot T_M \cdot s^2 + T_M \cdot s + 1} = \frac{k_I}{T_a \cdot T_M \cdot s^2 + T_M \cdot s + 1}, \quad (4.8)$$

де $k_I = \frac{R_{a\Sigma}}{K \cdot \Phi_N}$ – коефіцієнт передачі електродвигуна зі статичного

струму.

Як бачимо, ДПС НЗ при прийнятих допущеннях описується передаочною функцією другого порядку, загальноприйнятій запис якої має вигляд

$$W_{U_a}(s) = \frac{k_D}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1} = \frac{R(s)}{Q(s)};$$

$$W_{I_l}(s) = \frac{k_I}{T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1} = \frac{L(s)}{Q(s)},$$

де ξ – коефіцієнт демпфірування;

$R(s)$, $L(s)$ – поліноми чисельників передаточних функцій за сигналом завдання $W_{U_a}(s)$ та сигналом збурення $W_{I_l}(s)$;

$Q(s)$ – характеристичний поліном ДПС НЗ. Він не залежить від вхідного сигналу і тому однаковий для передаточних функцій $W_{U_a}(s)$ та $W_{I_l}(s)$.

Характер перехідних процесів в двигуні залежить від значення коефіцієнта демпфірування ξ , що обчислюється з характеристичного рівняння ДПС НЗ. *Характеристичним* називається рівняння, отримане в результаті прирівнювання полінома знаменника передаточної функції $Q(s)$ нулю, тобто

$$Q(s) = T^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi \cdot T \cdot s + 1 = 0. \quad (4.9)$$

Перехідні процеси матимуть коливальний характер, якщо

$$\xi = \frac{T_M}{2 \cdot \sqrt{T_a \cdot T_M}} < 1 \quad \text{або} \quad m = \frac{T_M}{T_a} < 4; \quad (4.10)$$

аперіодичний характер – якщо

$$\xi = \frac{T_M}{2 \cdot \sqrt{T_a \cdot T_M}} \geq 1 \quad \text{або} \quad m = \frac{T_M}{T_a} \geq 4. \quad (4.11)$$

4.2. Завдання та порядок виконання роботи

1. Вивчити лекційний матеріал з тем: «Математичний опис АСК» і «Побудова структурних алгоритмічних схем АСК».

2. Відповісти на питання для самоконтролю, які наведені нижче.

3. Одержати у викладача індивідуальний варіант значень параметрів ДПС НЗ (табл. 4.1).

4. Підготувати в пакеті MATLAB розширенні Simulink структурну алгоритмічну схему моделі ДПС НЗ (див. рис. Г.1 додатка Г).

Із бібліотеки математичних функціональних блоків **Math Operations** перетягнути мишею у вікно створеної моделі блок обчислення суми поточних значень сигналів **Sum**, який сприймає тільки скалярні вхідні сигнали та підсумовує ці сигнали з відповідними знаками плюс (+) або мінус (-).

Блок **Sum** може бути зображений або у формі кола (round) або у формі прямокутника (rectangular).

Із бібліотеки вхідних сигналів **Sources** перетягнути мишею у вікно створеної моделі генератор ступінчастого сигналу **Step** (рис. 4.3), який забезпечує в заданий момент часу **Step time** стрибкоподібну зміну вхідного си-

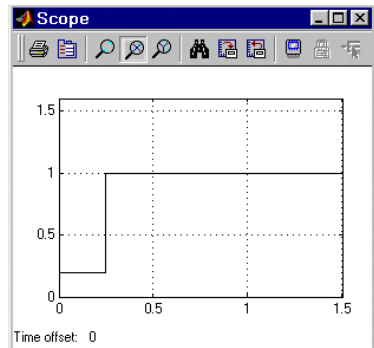


Рисунок 4.3 – Завдання одиничного ступінчастого вхідного сигналу за допомогою блока **Step**

гналу між двома постійними рівнями. Перепад рівня сигналу може бути як у більший бік (кінцеве значення *Final value* більше початкового *Final value*), так і в менший (кінцеве значення *Final value* менше початкового *Final value*). Значення початкового та кінцевого рівнів можуть бути не тільки додатними, але й від'ємними.

5. Відкрийте редактор m-файлів з робочого середовища MATLAB через низку команд головного меню **File** → **New** → **M-file**. Записати в m-файлі параметри типу ДПС НЗ за номером у списку N (див. табл. 4.1) та формули розрахунку параметрів для окремих блоків структурної алгоритмічної схеми моделі ДПС НЗ (див. додаток Г).

6. Одержати перехідні процеси $U_a = f(t)$, $I_a = f(t)$, $I_l = f(t)$, $I_d = f(t)$, $\Omega = f(t)$ в загальній координатній площині у таких режимах роботи ДПС НЗ:

а) пуск двигуна на неробочому (холостому) ході (*open circuit operation*) ($I_l = 0$) до усталеного значення кутової швидкості $\Omega_o = \frac{U_N}{K\Phi_N}$;

б) пуск при наявності опору руху валу двигуна (рух з навантаженням $I_l = I_N$) до усталеного значення кутової швидкості Ω_n ;

в) пуск двигуна на нерабочому ході ($I_l = 0$) до усталеного значення кутової швидкості Ω_o з подальшим поданням навантаження ($I_l = I_N$) в момент часу $t = t_{\text{вер}}$ та рухом до усталеного значення кутової швидкості Ω_n , де $t_{\text{вер}}$ – час розгону двигуна до усталеної кутової швидкості Ω_o , с, визначеної у п. 6а) (див. рис. Г.3 додатка Г);

г) останов (відключення) двигуна з початкової кутової швидкості Ω_o на нерабочому ході ($I_l = 0$);

д) останов (відключення) двигуна з початкової кутової швидкості Ω_n з навантаженням $I_l = I_N$;

е) реверс двигуна з початкової кутової швидкості Ω_o на нерабочому ході ($I_l = 0$);

ж) реверс двигуна з початкової кутової швидкості Ω_n з навантаженням $I_l = I_N$.

7. Виконати розрахунки досліджуваної моделі, зберігаючи графічні

результати розрахунків у вигляді файлів.

8. Записати передаточну функцію ДПС НЗ за сигналами задавання $W_{U_a}(s)$ та збурення $W_{I_1}(s)$ (див. (4.7) та (4.8)).

9. Визначити характер очікуваного перехідного процесу за (4.10) та (4.11).

10. Оформити звіт про лабораторну роботу.

11. Одержати оцінку результатів своєї роботи у викладача, відповівши на його контрольні питання.

4.3. Питання для самоконтролю

1. Запишіть систему диференціальних рівнянь, що описують динамічні процеси в ДПС НЗ.

2. Назвіть допущення, при яких побудовано структурну алгоритмічну схему ДПС НЗ. Накресліть її та назвіть параметри і регульовані координати, сигнали завдання та збурення.

3. Дайте визначення передаточної функції АСК. Запишіть передаточні функції ДПС НЗ за сигналами завдання та збурення.

4. Що називається коефіцієнтом передачі АСК? Назвіть коефіцієнти передачі двигуна за сигналами завдання та збурення і запишіть формули для їх визначення.

5. Як визначити очікуваний характер перехідного процесу кутової швидкості обертання ДПС НЗ за його передаточною функцією?

6. Поясніть фізичний зміст коефіцієнта демпфірування.

7. Що таке динамічний момент M_d (струм I_d) ДПТ НЗ? За якими умовами $I_d = I_a$, $M_d = J \frac{d\Omega}{dt} = 0$?

8. Поясніть, яким чином в процесі моделювання реалізується реверс двигуна? Чому при виконанні дослідів п.бд кутова швидкість електродвигуна не дорівнює нулю, а набуває від'ємного значення? Як обчислити зменшення («осідання») кутової швидкості $\Delta\Omega_C$ при появі навантаження на валу двигуна?

9. Поясніть, чому в досліді п.бж стале значення кутової швидкості при пуску відрізняється від її сталеного значення при реверсі електродвигуна.

Таблиця 4.1 – Паспортні (кагаложні) дані ДПС НЗ

№ шп	ОСНОВНІ ДАНІ										ПАРАМЕТРИ ЯКРНОГО КОДА					ПАРАМЕТРИ КОДА ЗБУЖДЕННЯ				
	Тип живильної ланки	Напрямок живильної ланки, $U_{\%}, B$	Потужність на валу, $P_{\%}, кВт$	Частота обертання, $n_{\%}, об/хв$	Струм якоря, $I_{\%}, A$	Кількість актив. проводів. в пазу, N	Кількість швел. гнізд якоря, $2a$	Опір якорної обмотки, $R_{ад} = R_{ад} + R_{сч} + R_{б}, Ом$	Момент інерції, $J, кг \cdot м^2$	Кількість головних полюсів, $2p$	Номинальний струм КЗ, $I_{ог}, A$	Номинальний потік КЗ, $\Phi_{\%}, Вб$	Кількість витків КЗ, $W_{пар}, вит$	Опір КЗ, $R_{с}, Ом$						
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15						
1	П11	220	0,3	1500	2,1	3304	2	22,6	0,003125	2	0,27	0,0019	4000	670						
2	П11	220	0,7	3000	4,3	1708	2	5,3	0,003125	2	0,27	0,0022	4000	670						
3	П12	220	0,2	1000	1,4	3360	2	26,8	0,00375	2	0,23	0,0031	4000	785						
4	П12	220	0,45	1500	2,9	2352	2	11,76	0,00375	2	0,23	0,003	4000	785						
5	П12	220	1,0	3000	6,0	1288	2	3,29	0,00375	2	0,23	0,003	4000	785						
6	П21	220	0,3	1000	2,0	3384	2	16,6	0,0105	2	0,24	0,0031	5300	740						
7	П21	220	0,7	1500	4,3	2376	2	6,75	0,0105	2	0,3	0,0031	4800	600						
8	П21	220	1,5	3000	9,0	1224	2	1,99	0,0105	2	0,3	0,0032	4800	600						
9	П22	220	0,3	750	1,95	3240	2	14,3	0,013	2	0,25	0,0045	4800	712						
10	П22	220	0,45	1000	2,75	2484	2	9,65	0,013	2	0,25	0,0045	4800	712						
11	П22	220	1,0	1500	5,9	1728	2	4,17	0,013	2	0,25	0,0043	4800	712						
12	П22	220	2,2	3000	12,5	864	2	1,03	0,013	2	0,25	0,0047	4800	712						
13	П31	220	0,45	750	2,9	2844	2	9,48	0,0225	2	0,29	0,0052	5000	605						
14	П31	220	0,7	1000	4,25	2160	2	5,45	0,0225	2	0,38	0,0053	4600	470						
15	П31	220	1,5	1500	8,7	1512	2	2,455	0,0225	2	0,38	0,0051	4600	470						
16	П31	220	3,2	3000	17,5	720	2	0,642	0,0225	2	0,62	0,0057	3600	285						
17	П32	220	0,7	750	4,2	1908	2	4,98	0,029	2	0,31	0,0081	4600	564						
18	П32	220	1,0	1000	5,7	1440	2	3,17	0,029	2	0,49	0,0043	3600	358						
19	П32	220	2,2	1500	12,0	936	2	1,205	0,029	2	0,49	0,0086	3600	358						
20	П32	220	4,5	3000	24,3	504	2	0,352	0,029	2	0,65	0,0082	3600	270						

Продовження табл. 4.1

№ п/п	ОСНОВНІ ДАННІ						ПАРАМЕТРИ ЯКІРНОГО КОДА						ПАРАМЕТРИ КОДА ЗБУДЕННЯ					
	Тип двигуна	Напряга живлення якоря, $U_{\text{я}}, \text{В}$	Потужність на валу, $P_{\text{я}}, \text{кВт}$	Частота обертання, $n_{\text{я}}, \text{об/хв}$	Струм якоря, $I_{\text{я}}, \text{А}$	Кількість активн. проводів в шару, N	Кількість парал. гілок якоря, $2a$	Опір якорної обмотки, $R_{\text{ак}}=R_{\text{дг}}+R_{\text{обд}}+R_{\text{суп}}+R_{\text{л}}, \text{Ом}$	Момент інерції, $J, \text{кг}\cdot\text{м}^2$	Кількість полюсів, $2p$	Номинальний струм КЗ, $I_{\text{кз}}, \text{А}$	Номинальний потік КЗ, $\Phi_{\text{кз}}, \text{Вб}$	Кількість витків КЗ, $W_{\text{кз}}, \text{вит}$	Опір КЗ, $R_{\text{кз}}, \text{Ом}$				
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15				
21	П41	220	1,0	750	6,8	1890	2	5,35	0,0375	4	0,6	0,0036	2100	280				
22	П41	220	1,5	1000	9,3	1458	2	2,9	0,0375	4	0,6	0,0038	2100	280				
23	П41	220	3,2	1500	18,4	972	2	1,032	0,0375	4	0,84	0,004	1750	198				
24	П41	220	6,0	3000	33,0	540	2	0,36	0,0375	4	0,6	0,0037	2100	280				
25	П42	220	1,5	750	9,75	1404	2	2,92	0,045	4	0,69	0,0051	1800	242				
26	П42	220	2,2	1000	13,3	1080	2	1,75	0,045	4	0,69	0,0052	1800	243				
27	П42	220	4,5	1500	25,4	756	2	0,78	0,045	4	0,73	0,0051	1350	228				
28	П51	220	2,2	750	13,6	1364	2	1,91	0,0875	4	0,99	0,0054	1600	168				
29	П51	220	3,2	1000	18,3	1054	2	1,051	0,0875	4	0,99	0,0055	1600	168				
30	П51	220	6,0	1500	33,2	682	2	0,472	0,0875	4	1,27	0,0058	1500	132				
31	П52	220	3,2	750	19,0	992	2	1,073	0,1	4	0,91	0,0077	1650	184				
32	П52	220	4,5	1000	25,2	744	2	0,632	0,1	4	0,91	0,0079	1650	184				
33	П61	220	6,0	1000	32,6	744	2	0,494	0,14	4	1,05	0,0079	1950	158				
34	П62	220	8,0	1000	43,0	558	2	0,328	0,1625	4	1,23	0,0107	1700	136				
35	П62	220	14,0	1500	73,5	370	2	0,1275	0,1625	4	1,44	0,0111	1600	116				
36	П71	220	7,0	750	42,0	810	2	0,546	0,35	4	1,49	0,0092	1500	106				
37	П71	220	10,0	1000	63,0	594	2	0,3	0,35	4	1,85	0,0097	1400	85				
38	П71	220	19,0	1500	103,0	396	2	0,1235	0,35	4	2,04	0,0101	1250	76,8				
39	П72	220	10,0	750	58,0	594	2	0,357	0,4	4	1,69	0,0127	1300	92,5				
40	П72	220	12,5	1000	78,0	540	2	0,237	0,4	4	1,46	0,0107	1450	108				

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

1. Попович М.Г., Ковальчук О.В. Теорія автоматичного керування: підручник. Київ : Либідь, 1997. 544 с.
2. Воронов А.А. Основы теории автоматического управления: Автоматическое регулирование непрерывных линейных систем. Москва : Энергия, 1980. 312 с.
3. Вешеневский С.Н. Характеристики двигателей в электроприводе. Москва : Энергия, 1977. 432 с.
4. Герман-Галкин С.Г. Линейные электрические цепи: лабораторные работы. СПб. : КОРОНА – Принт, 2002. 320 с.
5. Никульчев Е.В. Пособие «Control System Toolbox» [Электронный ресурс] – режим доступа: [http:// www.matlab.exponenta.ru](http://www.matlab.exponenta.ru).
6. Дьяконов В.П. MATLAB 6.5 SP 1/7.0 Simulink 5/6 в математике и моделировании. Москва : СОЛОН-Пресс, 2005. 575 с.
7. Черных И.В. Моделирование электротехнических устройств в MATLAB. SimPowerSystems и Simulink. Москва : ДМК Пресс, 2007. 288 с.
8. Методические указания к выполнению лабораторной работы «Исследование типовых динамических звеньев в пакете MATLAB» по дисциплине «Теория автоматического регулирования» для студентов всех форм обучения специальности «Электроника», в том числе для иностранных студентов /сост. Бутова О.А., Фетюхина Л.В., Шишкин М.А., Шамардина В.Н., Асмолова Л.В. Харьков : НТУ «ХПИ», 2019. 72 с.


ДОДАТКИ

ДОДАТОК А

Основні прийоми форматування й оформлення графічних зображень у Word-документ для звіту

А.1. Створення рисунка SIMULINK-моделі у WORD-документі звіту

Для передачі структурної схеми моделі як графічного об'єкта в інші Windows-додатки слід записати її в буфер обміну Windows за допомогою команди меню **Edit** → **Copy model to clipboard**. За умовчанням схема моделі зберігається у форматі **WMF** (Windows Metafile).

Потім необхідно експортувати даний рисунок з буфера обміну Windows у **WORD**-документ, установивши курсор на ту позицію, де потрібно вставити зображення, і вставити рисунок за допомогою команди **Правка** → **Вставити** або кнопки на панелі інструментів меню **Word**-документа *Вставити* .

А.2. Команди побудови графіків двовимірних функцій

Функції однієї змінної $y(x)$ знаходять широке застосування в практиці математичних та інших розрахунків, а також у техніці комп'ютерного математичного моделювання. Для відображення таких функцій використовуються графіки в декартовій системі координат. При цьому будуються дві вісі – горизонтальна X та вертикальна Y – і задаються координати $x; y$, що визначають вузлові точки $y(x)$. Ці точки з'єднуються одна з одною відрізками прямих. Оскільки **MATLAB** використовує матричну систему, то сукупність точок $y(x)$ задається векторами **X** та **Y** одновимірного масиву.

Для побудови графіків функцій у декартовій системі координат використовують команду **plot**:


- **plot (X,Y)** – буде графік функції $y(x)$, координати точок $(x; y)$ беруться з векторів одинарного розміру **X** та **Y**. Якщо **X** або **Y** – матриця, то будуються графіки за даними в матриці;
- **plot (X1,Y1,'S1',X2,Y2,'S2'...)** – ця команда буде на одному графіку ряд ліній, поданих у вигляді $(X_i, Y_i, 'S_i')$, де **X_i** та **Y_i** – вектори або матриці, а

Продовження додатка А

S_i – рядки. За допомогою такої конструкції можлива побудова, наприклад, графіка функції лінійно, колір якої відрізняється від кольору вузлових точок. За відсутності вказівки на колір ліній і точок він вибирається автоматично одним із кольорів з таблиці кольорів. Якщо ліній більше шести, то вибір кольорів повторюється. Константа **S** може бути задана такими символами:

<i>Колір лінії</i>	<i>Тип крапки</i>		<i>Тип лінії</i>
y – жовтий	. – крапка	* – зірочка	-- цілісна
m – фіолетовий	o – коло	s – квадрат	: – подвійний пунктир
c – блакитний	x – хрест	d – ромб	-. – штрих-пунктир
r – червоний	+ – плюс		-- – штрихова
g – зелений	p – п'ятикутник		
b – синій	h – шестикутник		
w – білий	v – трикутник (кутом униз)		
k – чорний	^ – трикутник (кутом угору)		
	< – трикутник (кут уліво)		
	> – трикутник (кут управо)		

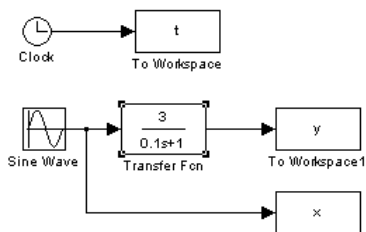
А.3. Створення текстових написів на графіках

Для підвищення наочності графічного зображення зручно вдаватися до текстових написів. Для створення напису потрібно за допомогою команди меню графічного вікна **Insert** → **Text** або за допомогою кнопки на панелі інструментів графічного вікна *Insert Text* , указавши мишею місце напису, клацнути лівою клавішею миші. Після цього з'явиться курсор для введення текстового напису.

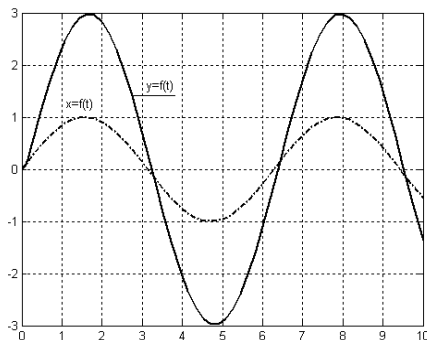
Варто мати на увазі, що розглянута версія програми Simulink не адаптована до кирилических шрифтів і їх застосування може мати найрізноманітніші наслідки: написи можуть не прочитатися, обрізатися, може з'явитися повідомлення про помилки, а також стане неможливим відкриття моделі після її збереження. Тому використання написів російською та українською мовами для поточної версії Simulink украй небажане.

Як приклад, для структурної схеми, наведеної на рис. А.1, а, побудовані часові характеристики (рис. А.1, б).

Продовження додатка А



>> plot(t,x,'r-',t,y,'b-.');grid on



a

б

Рисунок А.1 – Побудова графіків двох функцій $x = f(t)$ та $y = f(t)$ в одній системі координат зі спеціалізацією типу і кольору ліній (для $x = f(t)$ – червона цілісна, для $y = f(t)$ – синя штрих-пунктирна і текстового напису кожного графіка

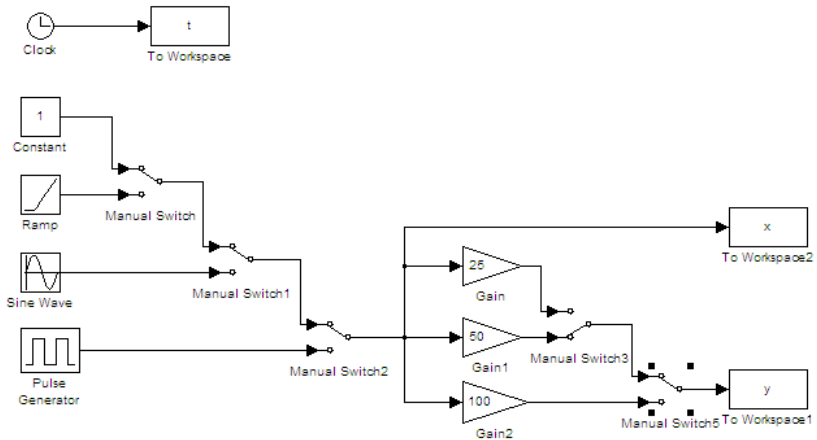
А.4. Команди оформлення графіків

Після побудови графіка MATLAB дозволяє виконати оформлення його в потрібному вигляді. Основні команди подано в таблиці А.1.

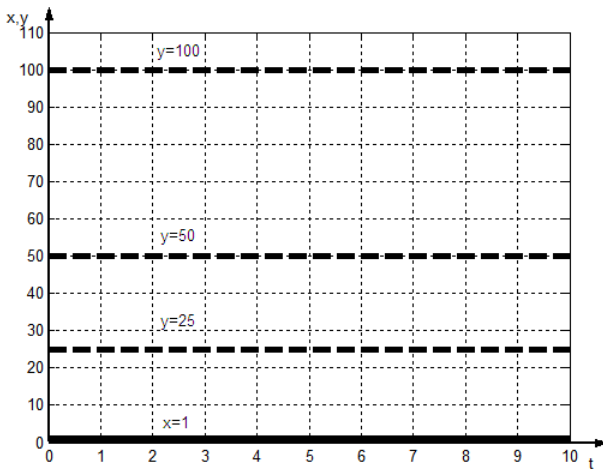
Таблиця А.1 – Команди оформлення графіків

Команда	Коментарій
>>title('Текст заголовка')	Установка титульного напису
>>xlabel('Заголовок осі X')	Установка осьового напису по осі X
>>ylabel('Заголовок осі Y')	Установка осьового напису по осі Y
>>zlabel('Заголовок осі Z')	Установка осьового напису по осі Z
>>gtext('Текст-Коментар')	Розміщення тексту в області графіка за допомогою миші
>>grid on	Включає відображення масштабної сітки
>>grid off	Відключає масштабну сітку
>>zoom on	Включає режим зміни масштабу для поточного графічного вікна
>>zoom out	Забезпечує повний перегляд

А.5. Приклад оформлення звіту



a



б

Рисунок А.2 – Перехідні процеси блоку *Gain* при подачі на вхід одиничного ступінчастого сигналу $x = 1$ при різних значеннях коефіцієнта передачі K

ДОДАТОК Б
Фрагмент звіту до лабораторної роботи 2
«Дослідження часових характеристик
типових лінійних ланок»

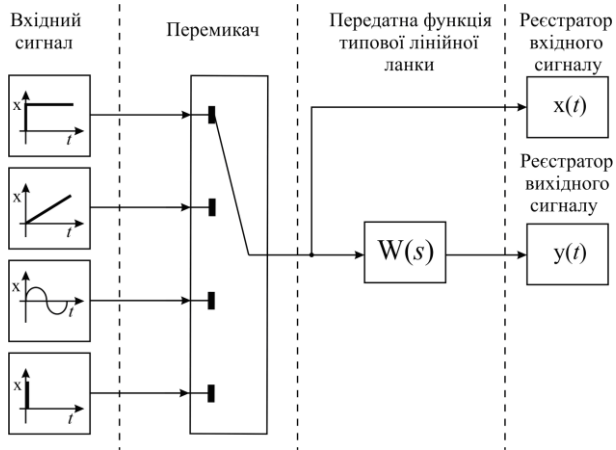


Рисунок Б.1 – Макет структурної алгоритмічної схеми моделей

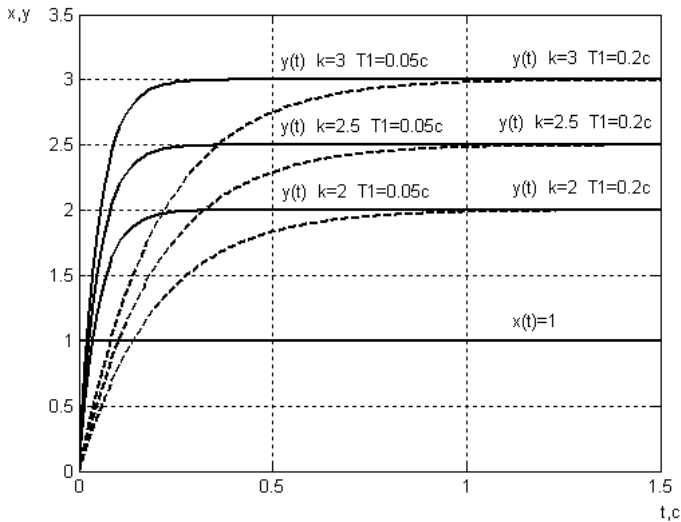


Рисунок Б.2 – Перехідні процеси аперіодичної ланки при подачі на вхід одиничного ступінчастого сигналу

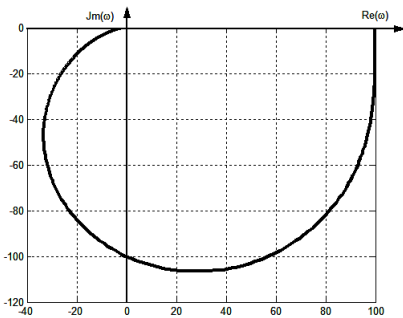
ДОДАТОК В
Фрагмент звіту до лабораторної роботи 3
«Дослідження частотних характеристик
типових лінійних ланок»

Коливальна ланка $W(s) = \frac{100}{0,01s^2 + 0,1s + 1}$

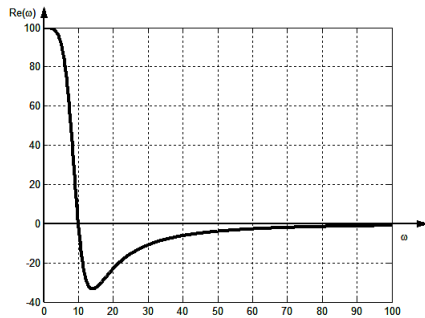
m-файл для побудови частотних характеристик для коливальної ланки:

```
clc;
clear all;
w=[0:0.1:100];
s=j*w;
K=100
T=0.1
ksi=0.5
W=K./(T.^2.*s.^2+2.*ksi.*T.*s+1);
re=real(W);
im=imag(W);
A=sqrt(re.^2+im.^2);
figure;plot(re,im);grid on
figure;plot(w,re);grid on
figure;plot(w,im);grid on
figure;plot(w,A);grid on
figure;bode([K],[T^2 2*ksi*T 1]);grid on
```

Результати моделювання:



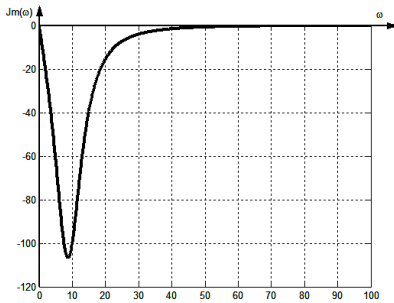
a – АФЧХ



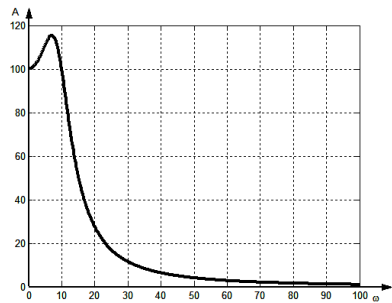
б – Дійсна частотна характеристика

Рисунок В.1 – Частотні характеристики коливальної ланки

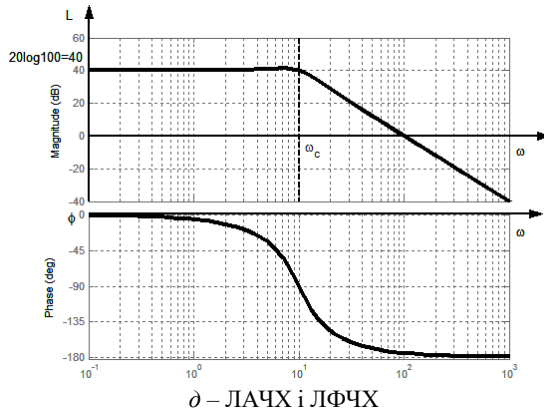
Закінчення додатка В



ϕ – Уявна частотна характеристика



ε – Амплітудна частотна характеристика



δ – ЛАЧХ і ЛФЧХ

Рисунок В.1 – Частотні характеристики коливальної ланки (продовження)

Розрахунок асимптотичної ЛАЧХ:

1) амплітуда: $20 \cdot \lg K = 20 \cdot \lg 100 = 10$ дБ

2) частота сполучення: $\omega = \frac{1}{T} = \frac{1}{\sqrt{0,01}} = 10$ рад/с

3) нахили асимптот: $N_1 = -20 \cdot (\text{кількість}_I - \text{кількість}_D) = 0$ дБ/дек,
 $N_2 = N_1 + N_{\text{кол}} = 0 - 40 = -40$ дБ/дек.

ЛАЧХ асимптотична і ЛАЧХ, яка побудована за допомогою `bode` збігаються.

Додаток Г

Фрагмент звіту до лабораторної роботи 4

«Дослідження динамічних режимів двигуна постійного струму з незалежним збудженням»

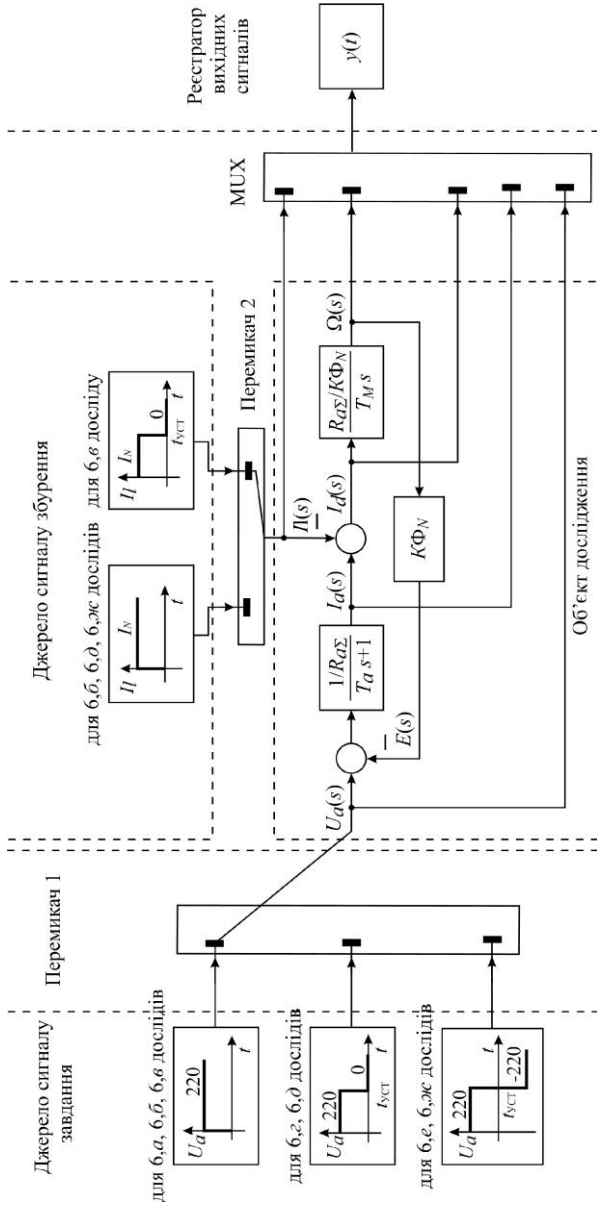


Рисунок Г.1 – Макет структурної алгоритмічної схеми ДПС НЗ при роботі його у різних динамічних режимах

Продовження додатка Г

m-файл розрахунку параметрів ДПС НЗ типу ПЗ2 $P_{\text{ном}} = 0,7$ кВт:

```
clc;
clear all;
Ua=220
nom=750
Ia=4.2
Ra=4.98
J=0.029
par=1

% Розрахунок параметрів ДПС НЗ
wnom=(pi*nom)/30           %розрахунок номінальної швидкості
KF=(Ua-Ia*Ra)/wnom
w0=Ua/KF                   %розрахунок швидкості нерабочого ходу
La=5.5*(Ua/(par*nom*Ia))  %розрахунок індуктивності якірної об-
                           %мотки
Ta=La/Ra                   %розрахунок електромагнітної сталої
                           %часу
Tm=J*(Ra/((KF)*(KF)))    %розрахунок електромеханічної сталої
                           %часу
Kdv=1/KF                   %розрахунок коефіцієнту передачі елек-
                           %тродвигуна за сигналом завдання
```

Команда для побудови перехідних характеристик ДПС НЗ:

```
plot(t,w,'r-',t,Id*3,'b-',t,I_load*3,'m-',t,Ia*3,'g-',t,Ua*0.5,'k-');grid on
з урахуванням масштабних коефіцієнтів:
```

```
mUa = 0,5
mIa = 3
mI_load = 3
mId = 3
```

Закінчення додатка Г

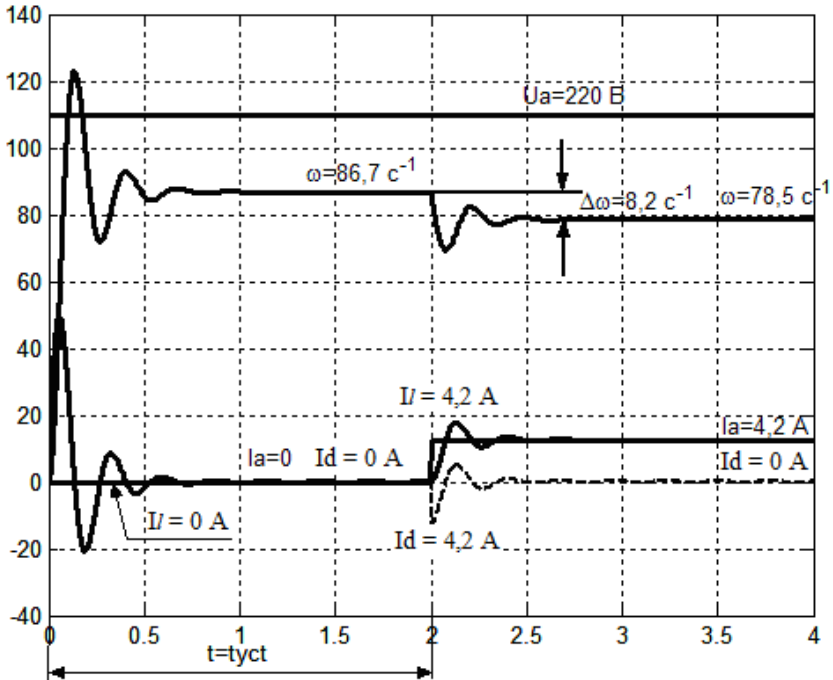


Рисунок Г.3 – Перехідні процеси в ДПТ НЗ в режимі пуску на неробочому ході і подачі навантаження на вал двигуна при $t = t_{\text{ycr}} = 2$ с

$$\text{Передаточна функція } W(s) = \frac{0,3945}{0,0017s^2 + 0,0225s + 1}$$

$$T_a =$$

$$0.0771339325556193$$

$$T_m =$$

$$0.0224767951425937$$

$$K_{dv} =$$

$$0.39450591880686$$

$$m = \frac{T_M}{T_a} = \frac{0,02247}{0,07714} = 0,29 < 4$$

Характер перехідного процесу коливальний.

ЗМІСТ

ПЕРЕДМОВА	3
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 1. <i>Ознайомлення з операційним середовищем SIMULINK. Побудова простіших моделей</i>	4
1.1 Теоретичні положення	4
1.2 Завдання та порядок виконання роботи.....	17
1.3 Питання для самоконтролю	25
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 2. <i>Дослідження часових характеристик типових лінійних ланок</i>	26
2.1 Теоретичні положення	26
2.2 Завдання та порядок виконання роботи.....	29
2.3 Питання для самоконтролю	32
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 3. <i>Дослідження частотних характеристик типових лінійних ланок</i>	33
3.1 Теоретичні положення	33
3.2 Завдання та порядок виконання роботи.....	38
3.3 Питання для самоконтролю	39
ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 4. <i>Дослідження динамічних режимів двигуна постійного струму з незалежним збудженням</i>	40
3.1 Теоретичні положення	40
3.2 Завдання та порядок виконання роботи.....	45
3.3 Питання для самоконтролю	47
СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ.....	50
ДОДАТОК А. <i>Основні прийоми форматування й оформлення графічних зображень у Word-документ для звіту</i>	51
А.1. Створення рисунка SIMULINK-моделі у WORD-документі звіту	51
А.2. Команди побудови графіків двовимірних функцій	51
А.3. Створення текстових написів на графіках	52
А.4. Команди оформлення графіків.....	53
А.5. Приклад оформлення звіту.....	54
ДОДАТОК Б. <i>Фрагмент звіту до лабораторної роботи 2 «Дослідження часових характеристик типових лінійних ланок»</i>	55
ДОДАТОК В. <i>Фрагмент звіту до лабораторної роботи 3</i>	

<i>«Дослідження частотних характеристик типових лінійних ланок»</i>	<i>56</i>
<i>ДОДАТОК Г. Фрагмент звіту до лабораторної роботи 4</i>	
<i>«Дослідження динамічних режимів двигуна постійного струму з незалежним збудженням»</i>	<i>58</i>

Навчальне видання

АСМОЛОВА Лариса Валеріївна
ШАМАРДІНА Віра Миколаївна

ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ ЛІНІЙНИХ ДИНАМІЧНИХ
СИСТЕМ У СЕРЕДОВИЩІ ПАКЕТУ MATLAB

Лабораторний практикум
для студентів усіх форм навчання за спеціальністю
141 Електроенергетика, електротехніка і електромеханіка

Роботу до видання рекомендував проф. В.І. Мілих

В авторській редакції

План 2020 р., поз. 2

Підп. до друку 01.07.2020. Формат 60×84 1/16. Папір офсетний.
Riso-друк. Гарнітура Times New Roman. Ум. друк. арк. 3,72.
Наклад 50 прим. Зам. № 1045. Ціна договірна.

Видавничий центр НТУ «ХП».

Свідоцтво про державну реєстрацію ДК № 5478 від 21.08.2017 р.
61002, Харків, вул. Кирпичова, 2

ТОВ «ПромАрт»
61023, Харків, вул. Весніна, 12
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи серії ДК № 5748 від 06.11.2017.
тел. (057) 717–28–80
www.promart.in.ua
e-mail: promartizdat@gmail.com