

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ
УКРАЇНИ

ЦЕНТРАЛЬНОУКРАЇНСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ
ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ ТА ЕНЕРГЕТИКИ

КАФЕДРА АВТОМАТИЗАЦІЇ ВИРОБНИЧИХ ПРОЦЕСІВ

УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ

М Е Т О Д И Ч Н І В К А З І В К И

для виконання практичних робіт
магістрами спеціальності

151 “ Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології ”

Затверджено на засіданні кафедри
«Автоматизація виробничих
процесів»

Протокол №8 від 21.11.2018 р.

КРОПИВНИЦЬКИЙ
2018

Управління складними системами. Методичні вказівки для виконання практичних робіт магістрами спеціальності 151 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” / Укл.: Трушаков Д.В., Федотова М.О., Скринник І.О. – Кропивницький: ЦНТУ, 2018 – 123с.

Укладачі: Д.В. Трушаков, к.т.н., доцент
М.О. Федотова, к.т.н., асистент
І.О. Скринник, к.т.н., доцент

Рецензент: В.О. Версаль, к.т.н., доцент

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 1

ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ "МОДЕЛЮВАННЯ В ТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЯХ" (ПК "МВТУ") ДЛЯ АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ ЛІНІЙНИХ І ЛІНЕАРИЗОВАНИХ САР, ОПИСАНИХ У ЗМІННИХ "ВХІД – ВИХІД"

ЧАСТИНА 1

Мета роботи:

- ознайомлення з можливостями програмного комплексу "МВТУ";
- освоєння процедур формування структурної схеми САР і її параметрів;
- освоєння процедур роботи в режимі МОДЕЛЮВАННЯ, включаючи: вибір методу й параметрів інтегрування; вивід даних розрахунку й т.п.;
- формування структурної схеми САР найпростішої моделі ядерного реактора, описуваної в змінних "вхід-вихід";
- визначення стійкості САР ядерного реактору прямим моделюванням перехідних процесів при подачі керуючого й збурюючого впливів.

1. ЗАГАЛЬНІ ВІДОМОСТІ ПРО ПРОГРАМНИЙ КОМПЛЕКС "МВТУ"

1.1. Призначення, особливості роботи і переваги програмного комплексу "МВТУ"

Програмний комплекс "Моделювання в технічних пристроях" ("МВТУ") призначений для детального дослідження та аналізу динамічних процесів у ядерних і теплових енергетичних установках, у системах автоматичного управління (САУ), у слідкуючих приводах і роботах, у будь-яких технічних системах, опис динаміки яких може бути реалізований методами структурного моделювання.

Також цей програмний комплекс (ПК) використовується для моделювання нестационарних процесів у фізиці, в електротехніці, у динаміці машин і механізмів, в астрономії й т.д., а також для рішення нестационарних крайових задач.

Програмний комплекс "МВТУ" реалізує наступні режими роботи:

- МОДЕЛЮВАННЯ, що забезпечує:
 1. моделювання нестационарних процесів у безперервних, дискретних і гібридних технічних системах, у тому числі й при наявності обміну даними (синхронний або асинхронний) із зовнішніми програмами й пристроями;

2. редагування параметрів структурної схеми й розрахунку в режимі "on-line";
 3. розрахунок у реальному часі або в режимі масштабування модельного часу;
 4. рестарт, архівацію й відтворення результатів моделювання.
- ОПТИМІЗАЦІЯ, що дозволяє вирішувати завдання:
 1. параметричної оптимізації САУ й ідентифікації дослідних даних;
 2. синтезу оптимальних регуляторів і їх керування в багатокритеріальній постановці при наявності обмежень на значення динамічних змінних, керуючих впливів, параметрів елементів системи автоматичного керування, функціоналів якості.
 - АНАЛІЗ, що забезпечує:
 1. розрахунок амплітудно-фазових частотних характеристик для будь-якої лінійної й більшості нелінійних систем (ЛАХ, ФЧХ, різні годографи й ін.);
 2. розрахунок коефіцієнтів, полюсів і нулів передатних функцій.
 - КОНТРОЛЬ І КЕРУВАННЯ, що дозволяє:
 1. створювати електронні аналоги вимірювальних приладів і керуючих пристроїв для оперативного контролю й керування перехідними процесами;
 2. виконувати статистичну обробку сигналів (у тому числі й зовнішніх), засновану на швидкому перетворенні Фур'є.
 - СИНТЕЗ, що дозволяє:
 1. синтезувати регулятори із заданими характеристиками

Програмний комплекс "МВТУ" має наступні переваги:

- **відкритість** за рахунок реалізації в ПК "МВТУ" декількох механізмів обміну даними із зовнішніми розрахунковими програмами, а також за рахунок вбудованого в ПК інтерпретатора математичних функцій;
- **принцип вкладеності структур** (глибина вкладеності необмежена), що особливо актуально при моделюванні складних динамічних систем;
- **векторизація** алгоритмів передачі й обробки даних за рахунок реалізації ліній зв'язку типу "шина" даних і векторизації входів/виходів всіх типових блоків;
- наявність **найбільш повної** загальнотехнічної й ряду Спеціалізованих бібліотек типових блоків, у т.ч. бібліотеки теплофізичних властивостей основних робочих тіл;

- наявність бібліотеки **Контроль** і керування, що дозволяє формувати в ПК "МВТУ" панелі (щити) приладів для відображення й оперативного керування модульованою системою в процесі розрахунку;
- **16 алгоритмів інтегрування**, включаючи 10 нових ефективних алгоритмів (5 явних і 5 неявних) для **твердих** систем диференціальних рівнянь;
- функціонування в **будь-якій** версії WINDOWS, наявність докладної контекстної довідкової системи, ефективність у галузевих розробках і навчальному процесі.

1.2. Запуск програмного комплексу "МВТУ"

Запуск ПК "МВТУ" здійснюється файлом **Mbty.exe**, розташованим у підкаталозі **VIN**. У середовищі WINDOWS ПК "МВТУ" може бути запущений також за допомогою: кнопки **Пуск** і меню **Програми** або **Виконати**; **Провідника програм**; спеціально створеної для запуску піктограми. Більш докладна інформація про способи запуску програм приводиться в Інструкції Користувача WINDOWS. Через 1...3с після запуску на екрані монітора з'явиться заставка з фотографією головного корпусу МГТУ ім. Н.Е. Баумана й реквізитами авторів ПК "МВТУ" Через 3...5 секунд на екрані монітора з'явиться **Головне Вікно** програмного комплексу "МВТУ" (див. рис. 1.1), де у верхній частині **Головного Вікна** – *стрічкове Командне меню*, у центральній частині – *Панель інструментів* (командних кнопок), а нижче – *"Лінійка" типових блоків* з відповідними піктограмами й закладками назв окремих бібліотек, сформованих по функціональному принципі.

1.3. Командне меню Головного Вікна

Головне Вікно програмного комплексу "МВТУ" має наступні меню:

- **Файл:**
 - Створити (F3)
 - Відкрити (Ctrl + F3)
 - Зберегти... (F2)
 - Зберегти як ... (Ctrl + F2)
 - Протокол
 - Печатка... (Ctrl + P)
 - Установки печатки...
 - Вихід
- **Опції:**
 - Настроювання...
 - Настроювання палітри
 - Пошук блоку
 - Повторити пошук блоку (Ctrl + R)

Пошук змінної...
Пошук змінної в області пам'яті...
Повторити пошук в області пам'яті...
Графіки
Навігатор
Показати панелі
Переміщати палітру

- **Стиль:**
 - Шрифт підпису блоку (Ctrl + F)
 - Колір ліній (Ctrl + C)
 - Тіло блоку (Ctrl + B)
 - Тіло вікна (Ctrl + W)
 - Підпис блоку
 - Рисувати обрамлення
 - Установити імена блоків
 - Очистити імена блоків
 - Очистити підписи блоків
- **Моделювання:**
 - Почати (F9)
 - Зупинити (Shift + F9)
 - Розрахунок (Ctrl + F9)
 - Пауза
 - Параметри розрахунку...(F10)
 - Вікно повідомлень
 - Отладочна інформація
 - Емуляція розрахунку з файлу
- **Оптимізація:**
 - Розрахунок
 - Зупинити
 - Параметри...
 - Результати...
- **Аналіз:**
 - Частотний аналіз...
 - Передатні функції
 - ? :
 - Зміст (F1)
 - Про програму...

Примітки:

1. Більшість опцій *Командного меню* продубльовані в *Панелі інструментів* відповідними командними кнопками.

2. У ПК "МВТУ" натисканням клавіші **F1** або за допомогою меню "?" і опції **Зміст** викликається "навігатор" всієї контекстної довідкової системи, а

натисканням комбінації клавіш **Ctrl + F1** при виділеному типовому блоці викликається довідка по цьому блоці.

З огляду на те, що *всі* інтерфейсні команди *недоцільно* вносити в *Командне меню Головного Вікна*, частину команд реалізованих за допомогою:

- *Додаткової Панелі інструментів*, розташованої у верхній частині Головного або субмодельного схемного вікна і забезпечуючи виконання більшості команд і процедур редагування структурної схеми;

- *Додаткового командного меню*, виклик якого здійснюється натисканням **правої** клавіші "миші" при розташуванні її курсору у вільному місці схемного вікна (Головного або субмодельного).

На тлі головного Вікна представлено *Додаткове командне меню*, що містить 12 додаткових інтерфейсних опцій, частина з яких (опції *Сітка*, *Вставити субмодель*, *Додати/Замінити блок*, *Безперервна вставка блоку*, *Виділення групи*) фактично є додатковими процедурами графічного редактора ПК "МВТУ".

ІЛЮСТРАЦІЯ ДОДАТКОВОГО КОМАНДНОГО ВІКНА

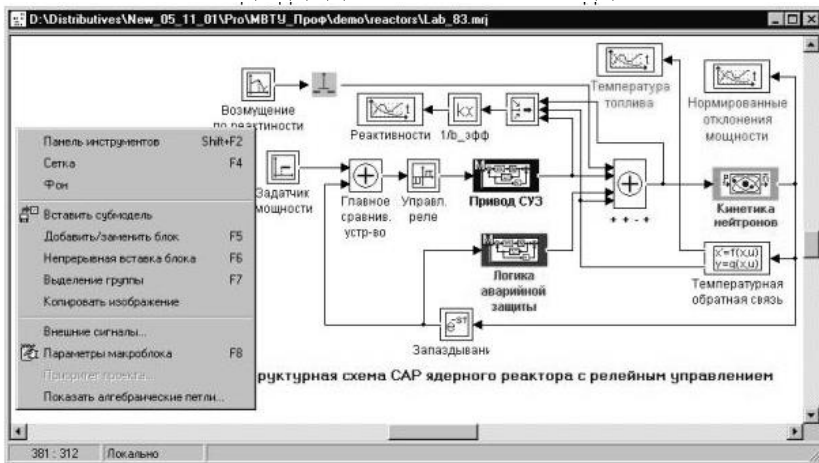


Рис. 1.1

1.4. Панель інструментів Головного Вікна

Панель інструментів, розташована в середній частині Головного Вікна, має спеціальні кнопки, що реалізують команди й опції:

Назва кнопки	Призначення кнопки
Новий	Відкриває Схемне Вікно нового проекту (завдання)
Відкрити	Відкриває вікно зчитування з диска раніше створеної структурної схеми динамічного завдання (за замовчуванням викликається кореневий каталог із вказівкою файлів, що мають розширення .mrj)
Зберегти	Зберігає структурну схему й параметри (за замовчуванням файл із розширенням .mrj), включаючи метод, параметри інтегрування, вікна відображення результатів розрахунку й т.п.
Навігатор	Відкриває вікно <i>Навігатора проекту</i>
Список графіків	Відкриває вікно <i>Списку графіків</i>
Пошук блоку	Відкриває діалогове вікно <i>Пошук блоку</i> в структурній схемі по ряду відмінних ознак (тип блоку, назва блоку й т.п.)
Продовжити пошук блоку	Продовжує пошук блоків у структурній схемі по обраній відмінній ознаці (тип блоку, назва блоку й т.п.)
Пошук змінної	Відкриває діалогове вікно <i>Пошук змінної</i> в структурній схемі по ряду відмінних ознак (ім'я глобальної змінної, джерело змінної або посилання на змінну)
Продовжити пошук змінної	Продовжує пошук змінної в структурній схемі по обраній відмінній ознаці (ім'я глобальної змінної, джерело змінної або посилання на змінну)

Параметри розрахунку	Викликає діалогове вікно вибору методу інтегрування, установки часу, кроку інтегрування, точності й т.д.
Старт	Виконує 1-й етап запуску проекту на рахунок, проводячи ініціалізацію всіх блоків і ліній зв'язку в схемних вікнах проекту на "нульовому" кроці інтегрування
Стоп	Завершує розрахунок зі збереженням в оперативній пам'яті параметрів моделі й стану системи
Продовжити	Запускає відразу завдання (проект) на розрахунок, якщо команда Старт не виконувалася; "дозапускає" завдання на розрахунок, якщо команда Старт виконувалася; продовжує процес моделювання до кінцевого часу, якщо він був перерваний кнопкою (командою) Пауза
Пауза	Перериває процес розрахунку зі збереженням в оперативній пам'яті параметрів моделі й поточного стану системи
Параметри оптимізації	Відкриває вікно <i>Параметри оптимізації</i>
Розрахунок оптимальних параметрів	Запускає на розрахунок оптимізаційне завдання
Стоп оптимізація	Перериває розрахунок оптимізаційного завдання
Результати оптимізації	Виводить таблицю розрахунків оптимізаційного завдання
Довідка	Відкриває вікно контекстної довідкової системи ПК "МВТУ"

Вийти	Завершує сеанс роботи в середовищі ПК із пропозицією зберегти поточну структурну схему
--------------	--

1.5. Додаткова панель інструментів

Додаткова панель інструментів, розташована у верхній частині **Схемного Вікна**, має спеціальні кнопки, що реалізують команди й опції:

Назва кнопки	Призначення кнопки
Параметри макроблоку	При активному Головному Схемному Вікні відкриває Вікно <i>глобальних параметрів проекту</i> (за допомогою Редактора <i>Інтерпретатора математичних функцій</i>). При активному субмодельному схемному вікні – <i>вікно глобальних параметрів макроблоку</i> (субмоделі)
Вирізати	Видаляє виділений блок або фрагмент структурної схеми зі збереженням його в Буфері Обміну
Копіювати	Копіює виділений блок або фрагмент структурної схеми в Буфер Обміну
Вставити	Копіює в Схемне Вікно вміст Буфера Обміну
Включити блок	Включає раніше виключений блок (або групу блоків) у динамічну модель (повертає вихідне тло блоку)
Заморозити	Кнопка призначена для підтримки (у процесі моделювання) постійним сигналом на виході динамічного блоку й рівного початковій умові для даного блоку
Розморозити	Кнопка скасовує команду Заморозити
Виділити все...	Виділяє повністю вміст активного Схемного Вікна

Показати все...	Перетворить зображення всієї структурної схеми проекту в поточний розмір Схемного Вікна
Показати виділення	Змінює виділений фрагмент структурної схеми проекту в поточний розмір Схемного Вікна
Сітка	Включає/виключає режим <i>Сітка</i> в схемному вікні

Крім цього, у *Додатковій панелі інструментів* розташована комбінована кнопка, призначена для ручного масштабування зображення в активному Схемному Вікні. Числа, відображувані у "вікні" кнопки, приблизно відповідає масштабу зображення структурної схеми у відсотках.

1.6. "Лінійка" типових блоків

У програмному комплексі "МВТУ" Бібліотека типових блоків складається (умовно) із Загальтехнічної й ряду Спеціалізованих бібліотек, доступ до яких здійснюється з "Лінійки" типових блоків, розташованої на екрані монітора під Панеллю інструментів ("лінійкою" командних кнопок) див. рис. 1.2

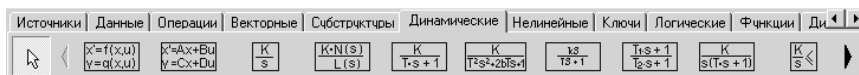


Рис. 1.2

"Лінійка" типових блоків складається з окремих каталогів (бібліотек), перемикачів яких здійснюється однократним клацанням лівої клавіші "миші" у поле "закладки" з відповідною назвою. З огляду на, що всі "закладки" не вміщуються по довжині "Лінійки" типових блоків, у правому верхньому куті "Лінійки" типових блоків передбачені спеціальні кнопки, однократне клацання лівою клавішею "миші" по яких зміщує "закладки" право-уліво на одну позицію.

Кожна з бібліотек, включена в "Лінійку" типових блоків, складається від 2 до 22 блоків. Ті бібліотеки, які не вміщуються по довжині "Лінійки", можуть бути "прокручені" вліво-вправо клацаннями лівої клавіші "миші" по спеціальних кнопках (на початку й кінці "Лінійки").

У навчальних версіях ПК "МВТУ" "Лінійка" типових блоків складається з 14-ти окремих бібліотек, згрупованих, в основному, по функціональній ознаці.

Загальтехнічна бібліотека типових блоків повністю входить у комплектацію будь-якої версії ПК "МВТУ" і містить наступні бібліотеки:

- *Джерела вхідних впливів* (18 типових блоків);
- *Дані* (9 типових блоків);
- *Операції математичні* (11 типових блоків);
- *Векторні операції* (13 типових блоків);
- *Субструктури* (13 типових блоків);
- *Динамічні ланки* (14 типових блоків);
- *Нелінійні ланки* (20 типових блоків);
- *Логічні ланки* (17 типових блоків);
- *Функції математичні* (20 типових блоків);
- *Ключі* (10 типових блоків);
- *Дискретні ланки* (9 типових блоків).

ЧАСТИНА -2-

2. КОРОТКИЙ ОПИС ПРОЦЕДУР РОБОТИ В ПК "МВТУ"

2.1. Основні етапи роботи в середовищі ПК "МВТУ"

Розглянемо лише основні процедури роботи, освоєння яких є обов'язковою умовою для самостійної роботи в середовищі програмного комплексу.

Команди й опції виконуються або за допомогою меню Головного Вікна, або за допомогою командних кнопок. Формування, редагування структурної схеми проекту (завдання), введення параметрів блоків, початкових умов, вибір методу й параметрів інтегрування проводяться з використанням, як спеціальних графічних процедур, так і за допомогою команд або командних кнопок.

Структурну схему досліджуваного завдання рекомендується попередньо зобразити на чернетці приблизно в тому ж виді, у якому Ви бажаєте бачити її на екрані монітора.

Формування структурної схеми і її параметрів, вибір методу, параметрів інтегрування й т.п. доцільно проводити в наступній послідовності:

- використовуючи "Лінійку" типових блоків заповніте Схемне Вікно необхідними блоками приблизно так само, як вони повинні бути розташовані в структурній схемі;
- використовуючи процедури "перетаскування" блоків, зміну орієнтації блоків і їхніх розмірів, можна додати структурній схемі потрібного виду;
- використовуючи ліву клавішу миші, з'єднайте блоки лініями зв'язку;

- рухаючись ліворуч-праворуч і зверху-вниз (по блоках у Схемному Вікні) задайте параметри блоків на структурній схемі (коефіцієнти підсилення, постійні часу, початкові умови й т.д.);
- використовуючи кнопку Параметри розрахунку, задайте кінцевий час інтегрування, виберіть необхідний метод інтегрування й інші параметри розрахунку;
- збережіть набрану схему (проект) під оригінальним ім'ям на жорсткий диск (наприклад, task_1. mrgj або, наприклад, poba. mrgj);
- запустіть завдання на розрахунок, подивіться поточні результати в графічних вікнах і аналізуйте Рекомендується виконувати процедуру збереження на жорсткий диск не наприкінці введення всіх умов завдання, а після кожного з перерахованих вище етапів.

Перший етап – введення структурної схеми (заповнення типовими блоками) – можна починати відразу після запуску програмного комплексу в чисте Схемне Вікно (створивши його однократним клацанням лівої клавіші "миші" по командній кнопці Новий).

2.2. Демонстраційний приклад по динаміці САР ядерного реактору

Для швидкого ознайомлення з математичними й сервісними можливостями ПК "Моделювання в технічних пристроях" розглянемо демонстраційний приклад, у якому виконане моделювання динаміки САР ядерного реактора.

Запустіть ПК "МВТУ" після чого, через 1...2 секунди на екрані з'явиться заставка ПК "МВТУ", а потім **Головне Вікно**.

Перемістіть курсор на кнопку **Відкрити** й клацніть 1 раз *лівою* клавішею "миші". Відкриється діалогове вікно оболонки WINDOWS зі списком всіх файлів, що мають розширення **.mrgj** і розташованих у тім же підкаталозі, де й основний виконавчий файл, **Mbty.exe**. Відкрийте підкаталог **DEMO\REACTORS**, перемістіть курсор на рядок **geas_lab.mrgj** і клацніть *лівою* клавішею, а потім перемістіть курсор на **Відкрити** й знову натисніть на *ліву* клавішу. Через кілька секунд відбудеться заповнення Схемного Вікна структурною схемою (див. рис. 2.1), а також відкриється графічне вікно із заголовком "*Реактивності в частках $\beta_{эфф}$ і відносні відхилення нейтронної потужності*".

Проробивши вищеописане, Ви завантажили в оперативну пам'ять ПЕВМ завдання, що відповідає дослідженню режиму автоколивань у релейному автоматичному регуляторі потужності реактора типу РБМК.

Спочатку розглянемо *автономну* САР (керуючий вплив від *Задатчика потужності* дорівнює нулю), що виведена зі стану рівноваги (початкова реактивність температурного зворотного зв'язку при $t = 0$ – *ненульова*, а дорівнює 1 % від ($\beta_{эфф}$)). Перемістіть курсор на кнопку **Старт** в "лінійці" командних кнопок і зробіть клацання *лівою* клавішею "миші": завдання буде ініціалізоване, про що "повідомить" командна кнопка **Продовжити** –

рисунок піктограми (людини, що біжить) стане темним. Перемістіть курсор на кнопку **Продовжити** й виконайте клацання лівою клавішею "миші": почнеться процес моделювання даної САР.

ЕКРАННА КОПІЯ СХЕМНОГО ВІКНА

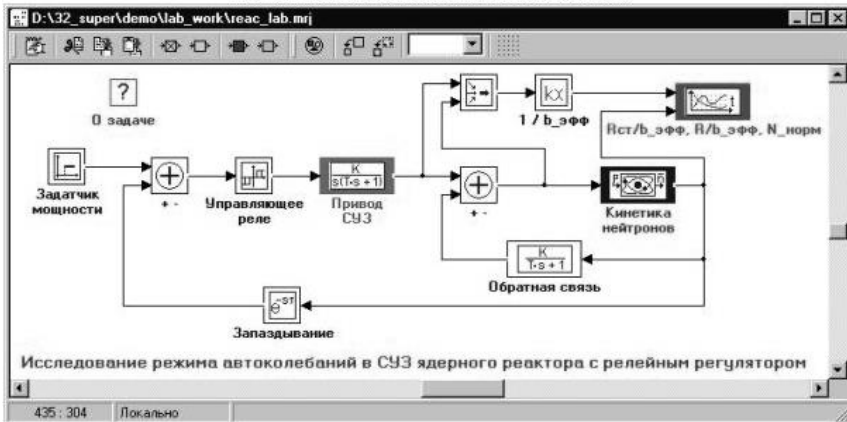


Рис. 2.1

Отримані результати свідчать (див. графіки перехідного процесу у верхній частині рис. 2.2), що в реакторі встановився режим високочастотних автоколиваний потужності (синя крива), амплітуда яких приблизно в 2 рази перевищує "уставку" по зоні нечутливості в *Керуючому реле* (1%). Причинами автоколиваний є вузька зона нечутливості в *Керуючому реле*, а також відносно висока швидкісна ефективність *Привода СУЗ*.

Примітка: процес моделювання можна було реалізувати не у два етапи (спочатку кнопка **Старт**, а потім кнопка **Продовжити**), а в один, виконавши однократне клацання лівою клавішею "миші" по кнопці **Продовжити**.

Перемістіть курсор на блок *Керуюче реле* й зробіть 2-х кратне клацання лівою клавішею "миші": відкриється діалогове вікно цього блоку (релейне неоднозначне із зоною нечутливості). Ініціюйте 1-й діалоговий рядок (**a1, a2, b1, b2, Y1, Y2**) і змініть параметри блоку на більш широкую зону нечутливості, а саме: введіть **-0.02 -0.016 0.016 0.02 -1 1** (роздільник – пробіл), що відповідає зоні нечутливості по відношенню відхиленню нейтронної потужності ($\pm 2\%$), коефіцієнту повернення **0.8** і значенню "стрибка" при спрацьовуванні реле (± 1.0). У другому діалоговому рядку задається початковий стан реле при $t = 0$: **Y(0) = 0**. Перемістіть курсор на кнопку і клацніть лівою клавішею "миші": діалогове вікно закриється. Знову запустіть завдання на розрахунок (по закінченні розрахунку можна перемасштабувати графічне вікно 2-х кратним клацанням лівої клавіші "миші" у поле графічного вікна). Характер поведінки графіків засвідчує

(див. графіки перехідного процесу в нижній частині рис. 2.2), що високочастотних автоколивань немає і САР асимптотично повертається в рівноважний (стаціонарний) стан.

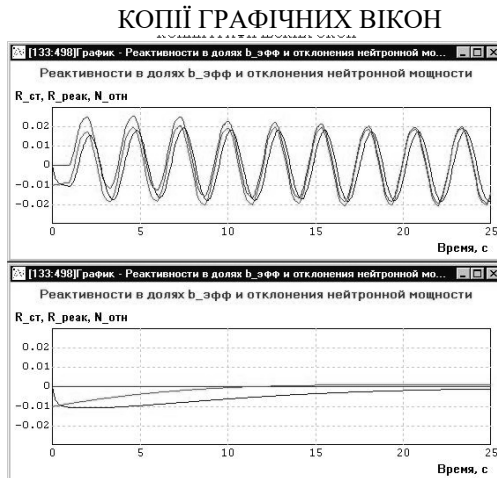


Рис. 2.2

Поверніть первісні значення параметрів в 1-ому рядку діалогового вікна блоку *Керуюче реле* (-0.01 -0.008 0.008 0.01 -1 1). Перемістіть курсор на блок *Привод СУЗ* і зробіть 2-х кратне клацання лівою клавішею "миші": відкриється діалогове вікно цього блоку, що є типовою лінійною динамічною ланкою, а саме: інерційно-інтегруючою. Ініціалізуйте поле введення (діалоговий рядок) коефіцієнта підсилення **K** і введіть менше значення: **1e-4**.

Закрийте діалогове вікно й запусіть завдання на розрахунок. По закінченні розрахунку перемасштабуйте графічне вікно: високочастотних автоколивань не буде.

Розглянемо *неавтономну* САР, що до $t \leq 10$ перебуває в рівновазі, а при $t > 10$ подається керуючий вплив, що повинне перевести ядерний реактор на підвищений рівень потужності (+10 %). Перемістіть курсор на блок *Зворотний зв'язок*, зробіть 2-х кратне клацання лівою клавішею "миші" і змініть в діалоговому вікні, що відкрилося, початкову умову на нульове. Закрийте це діалогове вікно й перемістіть курсор на блок *Задатчик потужності*. Відкрийте його діалогове вікно й встановіть в діалоговому рядку значення параметрів **10 0 0.1** (через пробіл), що відповідає наступному алгоритму роботи цього блоку: до $t \leq 10$ сигнал на виході – нульовий, а при $t > 10$ на вхід елемента порівняння буде поданий ступінчатий вплив **0.1*1(t)**. Перемістіть курсор на командну кнопку **Параметри розрахунку** й зробіть однократне клацання лівою клавішею "миші". Змініть Час інтегрування з **25** с

на **100** с. Закрийте це діалогове вікно, запустіть змінене завдання на розрахунок і по закінченні розрахунку перемасштабуйте графічні вікна. Аналіз отриманих результатів (див. рис. 2.3) показує, що ядерний реактор переведений на заданий рівень потужності (синя крива) з точністю до ширини зони нечутливості, регулюючий стрижень вніс додаткову позитивну реактивність $\sim 6\text{...}7\%$ від ($\beta_{эфф}$ (червона крива), а реактивність ядерного реактора в перехідному процесі в максимумі досягає $\sim 6\%$ від ($\beta_{эфф}$ (рожева крива) і прагне до нуля при $t > \infty$.

ПАРАМЕТРИ САР ПРИ ПЕРЕХОДІ НА ПІДВИЩЕНИЙ РІВЕНЬ ПОТУЖНОСТІ

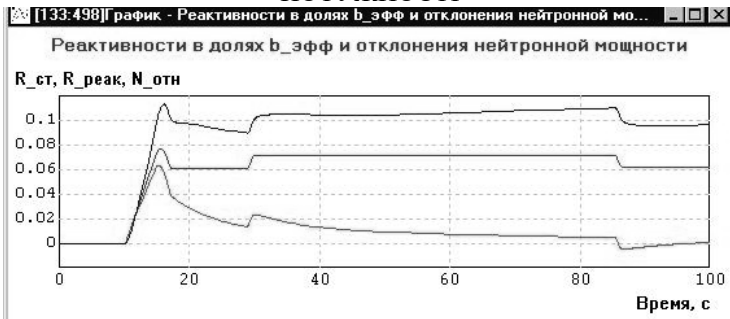


Рис. 2.3

Перегляньте діалогові вікна інших блоків даного завдання (можна викликати довідку по будь-якому блоці нажавши комбінацію клавіш **Ctrl+F1**). Відзначимо, що для відображення результатів розрахунку використана *векторизованная* обробка сигналів: сигнали реактивностей регулюючого стрижня й реактору за допомогою мультиплексора "згорнуті" в **один векторний** сигнал (2-жильний), а потім, використовуючи типовий блок Підсилювач, векторно нормовані на значення ефективної частки запізнілих нейтронів ($\beta_{эфф}$. Типовий блок *Часовий графік* у даному завданні має 2 входи (1-й вхід – векторний, 2-й – скалярний). "Нюанси" і особливості інших блоків знайдіть самі...

За допомогою системної кнопки в лівому верхньому кутку Схемного Вікна закрийте дане завдання, відповівши на запит про збереження поточного проекту (завдання) – **No**.

Проробивши процедури, аналогічні описаним у даному підрозділі, Ви можете переглянути й інші демонстраційні приклади. Всі приклади повністю готові до демонстрації й запускаються також, як і розглянутий вище приклад.

Схемне Вікно. Перемістіть курсор у верхній лівий кут Схемного Вікна й клацніть 1 раз *лівою* клавішею "миші": у полі Схемного Вікна з'явився потрібний елемент.

Перемістіть курсор на "закладку" **Операції математичні** й виконайте однократне клацання *лівою* клавішею "миші": Ви ініціювали відповідну типову бібліотеку. Перемістіть курсор на блок елемент порівняння і зробіть однократне клацання: тіло блоку зміниться. Перемістіть курсор у поле Схемного Вікна на місце, де Ви бажали б розташувати даний елемент і клацніть 1 раз *лівою* клавішею "миші": перенос *блоку пристрій* у Схемне Вікно виконаний. Повторіть вищеописані дії й перенесіть на вільне місце в Схемному Вікні (нижче й лівіше) і 2-й блок, необхідний для *моделювання Локального пристрою*, що порівнює.

Перемістіть курсор на "закладку" **Динамічні ланки** перенесіть необхідні блоки (*Інтегратор, Аперіодична й Коливальна ланки*) у Схемне Вікно по вищеописаній процедурі на бажані місця.

Виконайте останній перенос блоку в Схемне Вікно: перемістіть курсор на "закладку" **Дані**, ініціюйте дану бібліотеку типових блоків, перенесіть блок *Часовий графік* у Схемне Вікно на бажане місце.

Нарешті, перемістіть курсор на велику кнопку в лівій частині "*Лінійки*" *типових блоків* і зробіть однократне клацання: Ви тимчасово "відключили" процедуру переносу блоків у схемне вікно.

Етап 2 – проведення ліній зв'язку на структурній схемі.

Перемістіть курсор на один із блоків і натисніть на ліву клавішу "миші" і, не відпускаючи її, "перетягніть" цей блок так, щоб його верхній вхідний порт (надалі просто вхід) по горизонталі був на одному рівні з вихідним портом блоку *Керуючий вплив*.

Примітка: для спрощення цієї процедури рекомендується включити опцію *Сітка* в Схемному Вікні. Опція *Сітка* може бути включена 3-а способами: Перемістіть курсор на кнопку *Сітка* в **Додатковій панелі інструментів** і виконайте однократне клацання *лівої* клавіші "миші"; Перемістіть курсор на вільне місце в Схемному Вікні й зробіть однократне клацання *правою* клавішею "миші": "спливе" *Додаткове командне меню* в якому необхідно зробити клацання *лівою* клавішею "миші" по рядку *Сітка*; натисніть клавішу **F4** при активному Схемному Вікні. Далі, Перемістіть курсор на *вихідний* порт блоку *Керуючий вплив*, зробіть клацання *лівою* клавішею "миші" і, відпустивши клавішу, проведіть горизонтальну лінію зв'язку до верхнього входу елемента порівняння. Знову зробіть однократне клацання *лівою* клавішею: на верхньому вході з'явиться типова *вхідна стрілка*. Якщо Ви зробили клацання *лівою* клавішею раніше, ніж проведений зв'язок увійшов "у притягання" вхідного порту, дотягніть лінію зв'язку до відповідного вхідного порту й зробіть клацання *лівою* клавішею "миші".

Якщо потрібно зробити поворот на (± 90 градусів у лінії зв'язку, виконайте клацання *лівою* клавішею "миші" і продовжуйте проведення лінії зв'язку в новому напрямку. Якщо Ви бажаєте перервати процедуру проведення лінії зв'язку (наприклад, через зовнішній вигляд – "некрасива"), натисніть клавішу **Shift** і, не відпускаючи її, зробіть клацання *лівою* клавішею "миші": лінія обірветься. Далі можна видалити цю лінію: виділіть її (клацання *лівою* клавішею "миші" по лінії) і потім видалите лінію за допомогою командної кнопки **Вирізати** (піктограма "ножиці"). З використанням аналогічних процедур скорегуйте розташування блоків у прямого ланцюга структурної схеми ($W_1(s)$, *Локальний пристрій*, що порівнює, і $W_2(s)$) і проведіть лінії зв'язку. Перемістіть курсор на блок з $W_3(s)$, натисніть на клавіатурі клавішу **Shift** і, не відпускаючи її, натисніть 1 раз *ліву* клавішу "миші": порти блоку повернуться на 90 градусів проти годинникової стрілки. Повторіть цю процедуру ще 1 раз: орієнтація блоку стане *ліворуч*. Уточніть розташування блоку з $W_3(s)$, використовуючи процедуру "перетаскування" блоків у Схемному Вікні. Проведіть лінії зв'язку від блоку з $W_2(s)$ до блоку з $W_3(s)$ і далі від нього до 2-го (нижньому) вхідному порту елемент порівняння.

Перемістіть курсор на лінію зв'язку від блоку з $W_2(s)$ до блоку з $W_3(s)$ (переважніше на кут останнього повороту лінії зв'язку), натисніть на клавіатурі клавішу **Ctrl** і, не відпускаючи її, зробіть клацання *лівою* клавішею "миші": з'явиться темна крапка. Відпустивши обидві клавіші, проведіть лінію зв'язку вниз: Ви одержали "**відгалуження**" від існуючої лінії зв'язку (порівняйте з рис.2.4). Використовуючи вищеописані процедури, з'єднайте всі елементи у потрібному напрямку.

Перемістіть блок *Часовий графік*, зробіть "відгалуження" від Головного зворотного зв'язку й продовжіть його до входу в блок *Часовий графік* (див. рис.2.4). Збережіть введену частину завдання. Для цього відкрийте меню **Файл** у **Головному Вікні**, Перемістіть курсор на опцію **Зберегти як...** і зробіть однократне клацання *лівою* клавішею "миші": у діалоговому вікні, що з'явилося, ініціалізуйте рядок введення й наберіть оригінальне ім'я Вашого завдання, наприклад, **mvту_lab.mrj** (розширення може бути будь-яким, необов'язково*.mrj). Закрийте вікно **Збереження проекту**, клацнувши по кнопці **ОК**. Перемістіть курсор на лівий нижній кут рамки Схемного Вікна (з'явиться спеціальна *похила* двостороння стрілка) і змініть розмір Схемного Вікна так, щоб праве й нижнє поле було не менше 4...5 сантиметрів.

Якщо набрана структурна схема не "вписалася" у розміри Схемного Вікна, Перемістіть курсор на кнопку **Показати все** в *Додатковій панелі інструментів* і зробіть однократне клацання *лівою* клавішею "миші": відбудеться перемасштабування структурної схеми й вона стане видимою в

Схемному Вікні повністю. Знову збережіть завдання, клацнувши *лівою* клавішею "миші" по кнопці **Зберегти**.

Етап 3 – введення параметрів структурної схеми. Перемістіть курсор на блок *Керуючий вплив* і зробіть 2-х *кратне* клацання *лівою* клавішею "миші": відкриється діалогове вікно цього блоку з активною "закладкою" **Параметри** (див. рис. 2.5).

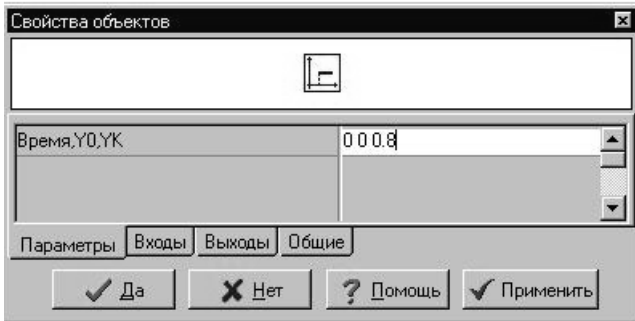


Рис. 2.5

Ініціалізуйте діалоговий рядок, уведіть *через пробіл* **0 0 0.8** (3 числа) і натисніть на кнопку **Так**. Повторіть аналогічні процедури для блоків з W_2 (s) і W_3 (s) і введіть відповідні значення k, T при початкових умовах. "Закладка" **Входи** дозволяє змінювати розташування входних портів (див. рис. 2.6), а "закладка" **Виходи** – змінювати розташування вихідних портів.

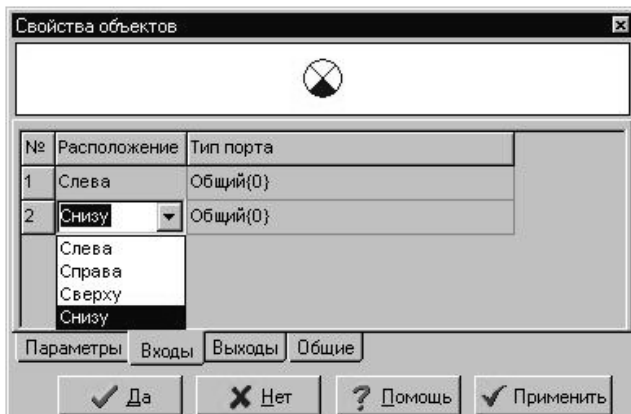


Рис. 2.6

"Закладка" **Загальні** (див. рис. 2.7) дозволяє: – змінювати ім'я блоку (починаючому Користувачеві краще це не робити);

- увести в спеціальному полі *Заголовок* підпис, з потрібним поясненням, під блоком;
- за допомогою *опції* Колір змінювати колір тіла блоку;
- за допомогою *опції* Шрифт змінювати тип і колір шрифту підпису під блоком;
- за допомогою *опції* Пароль "засекречувати" параметри типового блоку (деактивується **закладка** Параметри), а для блоку *Субмодель* за допомогою *опції* Пароль "закривати" небажаний доступ до внутрішньої структури субмоделі.

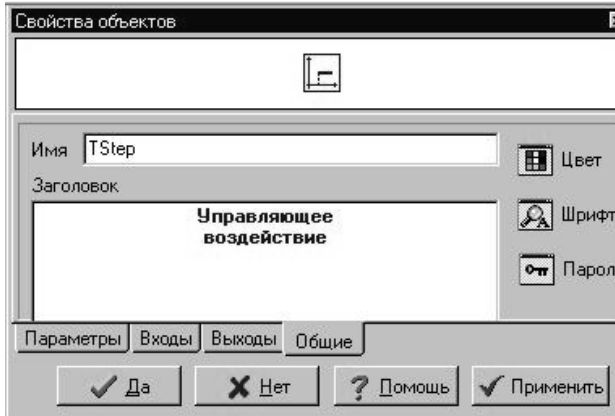


Рис. 2.7

Примітка. Діалогове вікно будь-якого типового блоку можна відкрити й *іншим способом*. Перемістіть курсор на блок, який потрібно редагувати і виконайте однократне клацання *правою* клавішею "миші": з'явиться "спливаюче" меню блоку (див. рис. 2.8), однократне клацання *лівою* клавішею "миші" по рядку *Властивості* якого викликає діалогове вікно блоку. Опції "спливаючого" меню блоку *Вирізати* й *Копіювати* дублюють однойменні кнопки *Додаткового командного меню*, а неактивна на рис. 2.8 опція *Зберегти субмодель* включається тільки при клацанні *правою* клавішею "миші" по блоці *Субмодель*.

СХЕМНЕ ВІКНО З "СПЛИВАЮЧОГО" МЕНЮ БЛОКУ

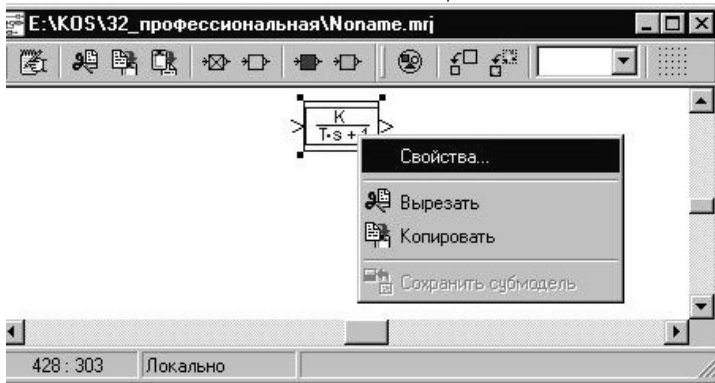


Рис. 2.8

Повернемося до введення параметрів структурної схеми. Відкрийте діалогове вікно елемента порівняння, і переконаєтесь в тому, що у діалоговому рядку вже уведені необхідні параметри (за замовчуванням): 1 (плюс 1) і -1 (мінус 1) (через пробіл). При моделюванні блок *realize алгебраїчне* додавання двох сигналів відповідно до введених вагових коефіцієнтів, тобто 1-й – з ваговим коефіцієнтом **1 (+1)**, а 2-й – з ваговим коефіцієнтом **-1** (мінус 1).

Якщо необхідно алгебраїчно скласти 3 сигнали, наприклад, з ваговими коефіцієнтами **0.8**, **-1.2** і **2.5**, то в рядку введення необхідно ввести відповідні параметри (через пробіл: **0.8 -1.2 2.5**). При закритті діалогового вікна блоку відбудеться перетворення цього блоку й він буде мати 3 вхідних порти, де верхній лівий вхідний порт (при орієнтації блоку ліворуч-праворуч) – для 1-го сигналу (коефіцієнт дорівнює **0.8**), нижній вхід – для 2-го сигналу (коефіцієнт дорівнює **-1.2**) і нижній лівий вхід – для 3-го сигналу (коефіцієнт дорівнює **2.5**). Повторіть аналогічні процедури для іншого елемента порівняння. Збережіть завдання, клацнувши по командній кнопці **Зберегти**.

Етап 4 – установка параметрів інтегрування. Перемістіть курсор на командну кнопку **Параметри розрахунку** й зробіть однократне клацання лівою клавішею "миші": відкриється діалогове вікно **Параметри інтегрування** з активною "закладкою" **Основні** (див. рис. 2.9). Інші "закладки" цього діалогового вікна призначені:

- "закладка" **Додаткові** – для установки точних параметрів розрахунку (початківець Користувач може залишити значення в полях цієї закладки, установлені "за замовчуванням");

- "закладка" **Швидкість** – для розрахунку в заданому масштабі часу (при включеному *Режимі масштабування часу* значення **1** у поле *Множник прискорення* відповідає розрахунку в реальному масштабі часу);
- "закладка" **Архівация** – для збереження в бінарному форматі (файл із розширенням **.rez**) всіх даних розрахунку, які можуть бути використані для прискореного відтворення процесу моделювання за допомогою опції *Емуляція розрахунку з файлу* в меню *Моделювання*;
- "закладка" **Рестарт** – для періодичного (наприклад, через 1 секунду) збереження в бінарному форматі (файл із розширенням **.rst**) основних даних розрахунку, по яких можна продовжити процес моделювання після завершення розрахунку;
- "закладка" **Мережа** – для реалізації режиму *Розрахунку на вилученому сервері*.

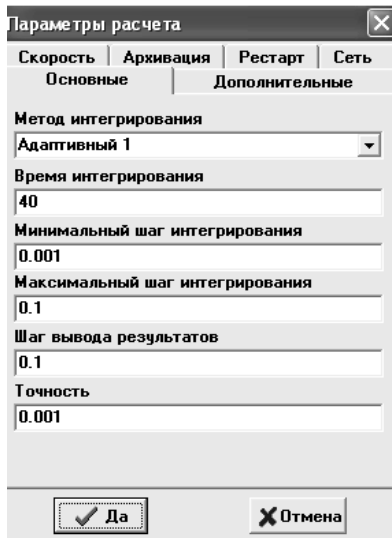


Рис. 2.9

Закрийте діалогове вікно, клацнувши *лівою* клавішею "миші" по кнопці **Так**. Знову збережіть завдання (кнопка **Зберегти**).

Етап 5 – *оформлення пояснюючих підписів, що пояснюють*. Виконаємо оформлення Схемного Вікна, як це зроблено на рис. 2.4. Перемістіть курсор під блок *Керуючий вплив* і зробіть 2-х кратне клацання *лівою* клавішею "миші": з'явиться тимчасове вікно для введення тексту. Перемістіть курсор у це вікно, зробіть клацання *лівою* клавішею "миші", а потім введіть заголовок даного блоку (у два рядки). Перемістіть курсор на вільне місце в Схемному

Вікні й зробіть 2-х кратне клацання *лівою* клавішею "миші": тимчасове вікно закриється й під блоком з'явиться бажаний надпис. Якщо підпис вийшов "неякісним" (з помилками), знову відкрийте тимчасове вікно для введення тексту (2-х кратне клацання *лівою* клавішею "миші" по тексту під блоком) і, використовуючи клавіші редагування (Backspace, Del і ін.), скорегуйте підпис.

Примітка: підпис під блоком можна виконати й іншим способом, а саме: як це показано на рис. 2.7. Інтерфейс ПК "МВТУ" дозволяє змінити в підписі тип, розмір і колір шрифту. Виділіть блок, відкрийте меню **Стиль** і виберіть опцію *Шрифт підпису блоку*. Відкриється діалогове вікно **Вибір шрифту**, у якому Ви можете встановити бажані параметри підпису, наприклад: шрифт – **MS Sans Serif**; вид – **Напівжирний**; колір – **Червоний**; розмір – **8**. При закритті вікна **Вибір шрифту** (клацання по кнопці **ОК**) відбувається автоматичне повернення в середовище ПК "МВТУ".

Використовуючи меню **Стиль** і його опції, можна змінити тіло блоку, тіло всього Схемного Вікна, колір ліній зв'язку (виділивши блок, що редагується попередньо, або лінію зв'язку однократним *клацанням* лівої клавіші "миші"). Виконайте кольорове оформлення структурної схеми самостійно. Також самостійно з'ясуйте призначення інших опцій у меню **Стиль**. Виконавши вищеописані процедури для всіх блоків, а також відключивши опцію *Малювати границі*, додайте уведений структурній схемі вид, близький рис. 2.4. Збережіть введені зміни, використовуючи командну кнопку **Зберегти**.

Етап 6 – відкриття Графічного вікна й зміна його розмірів. Перемістіть курсор на блок *Графік $y(t)$* , зробіть однократне клацання *правою* клавішею "миші" і в "спливаючому" меню блоку *лівою* клавішею "миші" виберіть рядок *Властивості*. Перший рядок (*Число входів*) у діалоговому вікні не вимагає редакції, тому що в ній за замовчуванням уведене значення 1. Перемістіть курсор на поле введення 2-й діалоговий рядок (*Вивід на кожному кроці*), у якому за замовчуванням уведено **Ні**, і виконайте однократне клацання *лівою* клавішею "миші": у полі введення з'явиться спеціальна кнопка. Клацнувши по цій кнопці *лівою* клавішею "миші", Ви маєте можливість вибору: **Немає** або **Так**. Якщо Ви вибрали **Так**, то при виконанні моделювання в графічному вікні будуть відображатися всі зміни лінії графіка після кожного кроку інтегрування, а якщо Ви вибрали **Ні**, то при виконанні моделювання в графічному вікні будуть відображатися зміни лінії графіка через часовий інтервал, рівний приблизно *Кроку виводу результатів*. В 3-у рядку діалогового вікна (*Проріджування точок*) за замовчуванням уведено **Так**. Якщо необхідно мати інформацію про всі розрахункові дані, виведених на графік, то Ви повинні в поле введення 3-го діалогового рядка змінити **Так** на **Немає**.

Цікаво, що якщо в 3-у діалоговому рядку уведено **Так**, то в обох варіантах заповнення 2-й діалоговий рядок (**Немає** або **Так**) відображувані

дані піддаються проріджуванню по наступному алгоритмі: якщо 3 послідовні розрахункові крапки лежать на одній прямій (із заданою точністю), то середня точка не відображається на графіку, тому що відрізок, проведений через 1-у і 3-ю точку містить і 2-у точку. Закрийте діалогове вікно блоку *Часовий графік* (клацання по кнопці Так) і виконайте 2-х кратне клацання *лівою* клавішею миші по зображенню цього блоку у Схемному вікні: відкриється графічне вікно із заголовком **Графік $y(t)$** . Якщо заголовок графічного вікна буде іншим, то закрийте графічне вікно (клацання "мишею" по системній кнопці у верхньому правому куті графічного вікна) і знову відкрийте його. Для переносу графічного вікна в інше місце необхідно перемістити курсор на його заголовок, нажати *лівою* клавішею "миші" і, не відпускаючи її, "перетягнути" вікно в бажане місце. Зміна його розмірів виробляється також, як і для будь-яких інших вікон у середовищі WINDOWS. Використовуючи процедури зміни розмірів вікон, додайте графічному вікну необхідний розмір ($\sim 1/4$ від площі Схемного Вікна). **Установку інших параметрів графічного вікна виконаємо після проведення процесу моделювання перехідних процесів.** Збережіть введені зміни, використовуючи командну кнопку **Зберегти**.

2.3.3. Моделювання перехідних процесів і варіантні розрахунки

Перемістіть курсор на командну кнопку **Продовжити** й клацніть *лівою* клавішею "миші": Ви запустили створене завдання на розрахунок. По закінченні розрахунку з'явиться спеціальне вікно **Повідомлення** з інформацією: **"Помилка: Задана точність не забезпечується"**. Перемасштабуйте графічне вікно 2-х кратним клацанням "миші". Перемістіть курсор на кнопку **Параметри розрахунку** й змініть крок інтегрування на нове значення (**1e-10**) і повторіть процес моделювання.

Дані розрахунку показують, що, по-перше, зовнішній вид перехідного процесу не змінився при різкому зменшенні кроку інтегрування, тому що при первісному кроці інтегрування (**0.001**) задана точність не забезпечувалася тільки на 1-у кроці моделювання (тобто при відпрацюванні східчастого впливу). Тому повідомлення про точність можна було проігнорувати. По-друге, дані розрахунку свідчать, що при $k_1 = 1$ вихідна САР нестійка й перехідний процес розбіжний (див. нижче по тексту рис. 2.12). Тепер повернемося до редагування графічного вікна. Перемістіть курсор у центральну частину графічного вікна й зробіть однократне клацання правою клавішею "миші": з'явиться командне меню графічного вікна (див. рис. 2.10).



Рис. 2.10

Ряд опцій командного меню блоку *Часовий графік* загальноприйнятій й не вимагають особливих пояснень (*Автомасштаб*, *Курсор*, *Завжди з переду*). Опція *Список* замінює графічне зображення на таблицю даних. Повернення до графічного зображення здійснюється клацанням правої клавіші "миші" у поле таблиці й наступним вибором у меню опції *Список*. Опція *Копіювати* реалізує операцію копіювання зображення графіка в буфер для наступної вставки у відповідні звітні документи, наприклад, у текстові документи WINWORD. Клацніть *лівою* клавішею "миші" по рядку *Властивості*: відкриється спеціальне діалогове вікно, що має заголовок *Настроювання* (див. рис. 2.11).

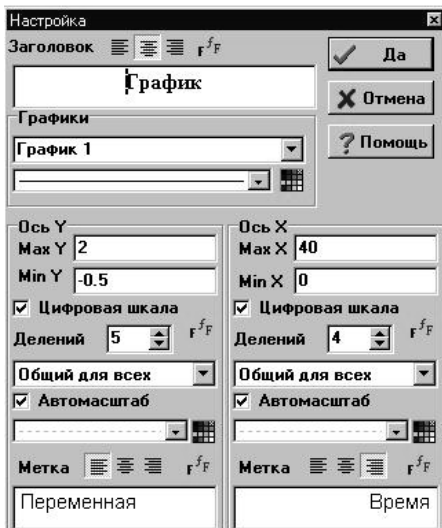


Рис 2.11

Перемістіть курсор у діалогове поле **Заголовок** і введіть нову назву **Графік перехідного процесу**. Перші 3 кнопки в рядку **Заголовок** призначені для "прив'язки" тексту заголовка (по лівому краю, по центрі, по правому краю), а остання (піктограма з буквами) – для завдання параметрів шрифту заголовка графіка. Подібним чином доповніть підпис під віссю **X** (праве діалогове поле **Мітка**): **Час, с**. Потім зітріть підпис (**Змінна**) для осі **Y** у лівому діалоговому полі **Мітка** і введіть новий підпис: **y(t)**. Кнопки в обох рядках **Мітка** призначені для "прив'язки" тексту підписів по осях графіка (перші 3 кнопки) і для завдання параметрів шрифту цих підписів (крайня права кнопка).

За допомогою діалогового вікна **Настроювання** можна змінювати: колір і тип лінії; колір і тип лінії сітки на графіку; колір поля графіка та рамки. Перемістіть курсор на верхню кольорову кнопку, клацніть 1 раз *лівою* клавішею "миші" і *лівою* клавішею "миші" виберіть новий колір лінії (**FG**), наприклад синій, а правою клавішею – колір поля графіка (**BG**), наприклад, білий.

Клацнувши по кольоровій кнопці в колонку **Вісь X** встановить *лівою* клавішею "миші" колір сітки по осі абсцис (**FG**), наприклад, сірий, а *правою* клавішею "миші" – колір границі графіка (**BG**), наприклад, білий. Повторіть вищеописані дії та змініть колір сітки по осі ординат (колонка **Вісь Y**) теж на сірий. Самостійно ознайомтесь з можливостями редагування графіка за допомогою інших опцій діалогового вікна **Настроювання**. Закінчивши процедури редагування параметрів графічного вікна, Перемістіть курсор на кнопку і закрийте дане діалогове вікно. Графічне вікно буде мати вигляд, подібний рис. 2.12. Змініть значення k_I на нове: **0.2**. Повторіть процес моделювання, перемасштабуйте вікно графіків по закінченні розрахунку. Дані свідчать, що хоча перерегулювання й відсутнє, але час перехідного процесу значно перевищує 20 секунд. Якщо Ви зміните в діалоговому вікні графічного вікна значення K у назві графіка, то графічне вікно з даними розрахунку буде мати вигляд, подібний рис. 2.13.

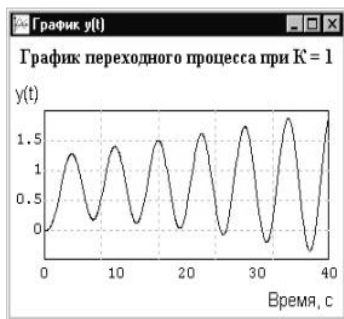


Рис 2.12

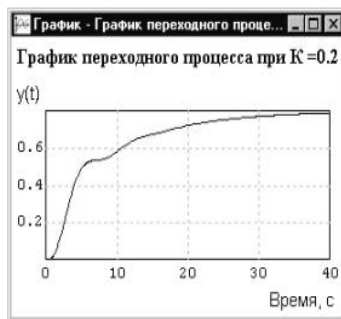


Рис 2.13

Знову змініть значення k_1 на нове: 0.35. Повторіть вищеописані процедури. Аналіз отриманих даних показує, що Ви домоглися необхідних характеристик перехідного процесу: перерегулювання – відсутнє; час входу в 5-ти відсотковий діапазон "трубку" не перевищує 20 секунд (див. рис. 2.14).



Рис. 2.14

Демонстраційно-ознайомлювальне завдання завершене. Збережіть завдання на диск.

Дана структурна схема САР (див. рис. 2.4) далі буде використана для освоєння процедур інших режимів роботи програмного комплексу "МВТУ", а саме: режиму АНАЛІЗ, а в наступному семестрі – режиму ОПТИМІЗАЦІЯ.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 2

АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ Й КОРЕКЦІЯ САР У СЕРЕДОВИЩІ ПК "МВТУ" ПО ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ І ПО ПОЛЮСАХ

Мета роботи:

- ознайомлення з додатковими можливостями ПК "МВТУ";
- освоєння основних процедур роботи в режимі АНАЛІЗ, включаючи:
 - підготовку структурної схеми САР для розрахунку АФЧХ;
 - розрахунок і побудова графіків різних фазових, амплітудно-фазових, частотних характеристик (ЛАХ, ФЧХ, годограф Найквіста та ін.);
 - аналіз стійкості замкнутої САР по фазових, амплітудно-фазових, частотних характеристиках розімкнутої САР, використовуючи графік годограф Найквіста або одночасний розгляд графіків ЛАХ і ФЧХ;
 - аналіз стійкості розімкнутих і замкнутих САР з використанням частотного критерію Михайлова;
 - розрахунок коефіцієнтів, полюсів і нулів передаточних функцій і визначення стійкості по теоремах Ляпунова (по полюсах або по власних числах);
- аналіз стійкості САР ядерного реактора з використанням частотних критеріїв (критерії Найквіста й Михайлова) і по теоремах Ляпунова (по полюсах) з наступною корекцією параметрів САР.

1. ОСНОВНІ МЕТОДИ Й ПРОЦЕДУРИ РОБОТИ В РЕЖИМІ АНАЛІЗ

1.1. Аналіз фазових, амплітудно-фазових, частотних характеристик

Методи й процедури, що забезпечують у ПК "МВТУ" режим роботи АНАЛІЗ, будуть розглянуті в процесі виконання додаткового завдання до розглянутого в лабораторній роботі № 1 демонстраційно-ознайомлювального завдання. Сформулюємо завдання, якою необхідно вирішити в процесі аналізу АФЧХ САР, структурна схема якої створена Вами в лабораторній роботі № 1 і збережена на жорсткому диску:

- досліджувати на стійкість вихідну САР з використанням критерію Найквіста по годографу АФЧХ і по спільному розгляді ЛАХ - ФЧХ;
- досліджувати на стійкість скоректовану САР з використанням критерію Найквіста по годографу АФЧХ і по спільному розгляді ЛАХ - ФЧХ, визначивши запаси по фазі й амплітуді;
- досліджувати на стійкість вихідну й скоректовану САР з використанням критерію Михайлова.

Оскільки структурна схема завдання (з вихідними даними) була збережена Вами на жорсткому диску, відкрийте це завдання (проект), використовуючи стандартні інтерфейсні процедури ПК "МВТУ". Треба зазначити, що зовнішній вигляд структурної схеми в проекті, що відкрився,

можливо відрізняється від того, котрий Ви зберігали раніше... Якщо Ви бажаєте відновити колишній вид, необхідно відключити опцію *Малювати обрамлення* в меню **Стиль**.

Етап 1 - дослідження стійкості вихідної САР.

Перемістите курсор на закладку *Субструктури* й *однократним* клацанням *лівої* клавіші "миші" ініціалізуйте однойменний каталог у Загальнотехнічній бібліотеці типових блоків. Перенесіть у Схемне Вікно 2 блоки в пам'ять й проведіть до них лінії зв'язку, як це показано на рис. 1.1. Увага: типовий блок в пам'ять (з пам'яті теж) в "Лінійці" типових блоків має оригінальну піктограму, а при переносі його в Схемне вікно його зображення - текст (за замовчуванням змінні мають імена **Y1**, **Y2** і т.д.).

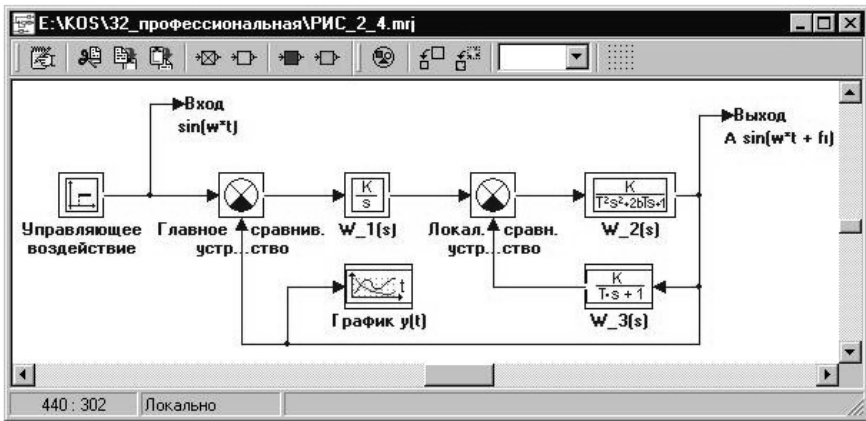


Рис. 1.1

Типові блоки в пам'ять й *3 пам'яті* призначені, в основному, для реалізації "бездротової" передачі даних, використовуючи механізм іменованих змінних. Можна вважати блок в пам'ять "передавачем", блок *3 пам'яті* - "приймачем". Однак, у режимі АНАЛІЗ типовий блок в пам'ять використовується для іншої мети. Перемістіть курсор на 1-ий блок в пам'ять (з текстом **Y1**), відкрийте його діалогове вікно й уведіть у верхньому рядку нове ім'я змінної, наприклад, **Вхід**. Точкою підключення 1-го блоку в пам'ять до лінії зв'язку між блоками *Керуючий вплив* і *елемент порівняння*, а також ім'ям змінної (Вхід) задана точка додатка одиничного гармонійного впливу. Закрийте діалогове вікно 1-го блоку й повторіть вищеописане для 2-го блоку в пам'ять, привласнивши новій змінної будь-яке "оригінальне" ім'я, наприклад, **Вихід**. Точка підключення 2-го блоку в пам'ять й ім'я змінної

(Вихід) задають точки виходу при розрахунку фазових, амплітудно-фазових, частотних характеристик. Виконайте оформлення підписів, що пояснюють (клацання правою клавішею "миші" по блоці, далі *опція* Властивості й далі ...) і структурна схема САР прийме вид, подібний рис. 1.1. Перевірте, що параметри всіх блоків у структурній схемі відповідають вихідним (у т.ч. коефіцієнт підсилення в блоці *Інтегратор* дорівнює **1.0**). Виконайте "контрольне" моделювання й переконаєтеся, що перехідний процес розбіжний.

Відомо, що критерій Найквіста дозволяє оцінити стійкість (або нестійкість) замкнутої лінійної САР (з одиничним зворотнім зв'язком) по АФЧХ розімкнутої САР. Тому, відкрийте діалогове вікно блоку елемент порівняння і *розімкніть Головний зворотний зв'язок*, установивши 2-й ваговий коефіцієнт *рівним* нулю. Виконайте моделювання й переконайтеся, що вид перехідного процесу типовий для САР, що перебувають на аперіодичній границі стійкості (один нульовий полюс). Перемістите курсор на напис **Аналіз** у командному меню й зробіть клацання "мишею". У меню, що відкрилось, виберіть опцію - *Частотний аналіз*, клацнувши по ній лівою клавішею "миші". Відкриється діалогове вікно *Параметри частотного аналізу*. Уведіть значення перших 3-х параметрів такими ж, як на рис. 1.2. Інші параметри залишіть без зміни.

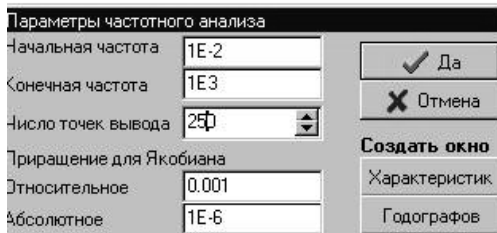


Рис. 1.2

У діалоговому вікні *Параметри частотного аналізу* параметрами *Початкова частота* й *Кінцева частота* задаються границі частотного діапазону (рад/с), а параметром *Число точок виводу* - кількість розрахункових точок, рівномірно розподілених (у логарифмічному масштабі) усередині частотного діапазону.

Значення параметрів полів *Збільшення для Якобіана* використовуються в розрахунку АФЧХ при автоматичній лінеаризації САР, а в чисто лінійних системах розрахунок частотних характеристик не використовує даних по відносних і абсолютних збільшеннях для Якобіана. Починаючому Користувачеві рекомендується використовувати ці параметри "за замовчуванням". Значення "за замовчуванням" полів *Збільшення для Якобіана* встановлені з особистого практичного досвіду авторів ПК "МВТУ".

Перемістіть курсор на кнопку **Характеристик** і виконайте клацання *лівою* клавішею "миші": створиться графічне вікно із заголовком **Частотні характеристики** й також зміниться форма діалогового вікна **Параметри частотного аналізу** (див. рис. 1.3). Перемістіть в цьому діалоговому вікні курсор на крайню ліву кнопку (із символом "+") і виконайте два клацання *лівою* клавішею "миші": у таблиці з'являться два нові рядки з номерами **1** і **2**.

Перемістите курсор на область *Входи* 1-го рядка, виконайте клацання *лівою* клавішею "миші", натисніть на спеціальну кнопку, що з'явилася в цій таблиці, і зі списку змінних виберіть *Вхід*. Повторіть аналогічні дії для області *Входи* 2-го рядка таблиці.

За аналогією з попереднім заповніть 2-й і 3-й стовпці таблиці (див. рис. 1.4).

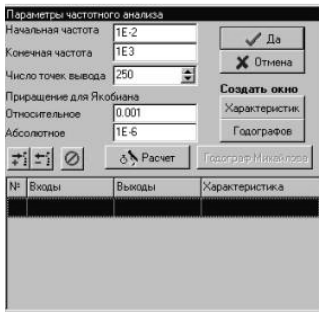


Рис 1.3

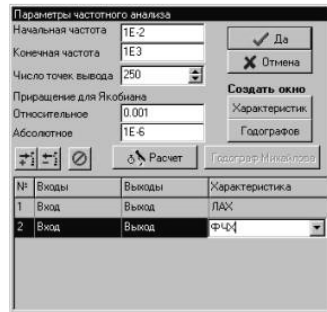


Рис 1.4

Заповнивши по інструкції діалогове вікно **Параметри частотного аналізу**, потрібно задати наступне: розрахувати $L_m(\square)$ (ЛАХ) і $\square(\square)$ (ФЧХ) розімкнутої САР, якщо:

- Початкова частота - 0.01 с^{-1} ;
- Кінцева частота - 1000 с^{-1} ;
- Число точок виводу - 250 (рівномірно в логарифмічному масштабі);
- Відносне збільшення для Якобіана - 0.001 (установлено за замовчуванням);
- Абсолютне збільшення для Якобіана - 10^{-6} (установлено за замовчуванням);
- Входи - змінна **Вхід** (та сама);
- Виходи - змінна **Вихід** (та сама).

Перемістіть курсор на кнопку **Розрахунок** і зробіть клацання *лівою* клавішею "миші": почнеться розрахунок частотних характеристик (кнопка **Розрахунок** має "бляклий" шрифт, тобто вона неактивна) і відображення результатів у спеціальному графічному вікні, причому автоматично зміняться заголовок графіка й підписи під осями координат. Через $\sim 2 \dots 10 \text{ с}$ розрахунок буде закінчено й кнопка **Розрахунок** знову стане активної (чіткий шрифт).

Перемістите курсор у поле *Графічного вікна* й виконайте 2-х кратне клацання *лівою* клавішею "миші": дане Графічне вікно перемасштабується. Використовуючи опції *Графічного вікна* (виклик "спливаючого" меню - однократним клацанням *правої* клавіші "миші") установіть наступні параметри осі ординат: *Min Y* - - **270**; *Max Y* - + **90**; Кількість розподілів - **4**. Якщо Ви виконаєте додаткове оформлення *Графічного вікна*, то одержите вид, близький до рис. 1.5.

Вид графіків на рис. 1.5 показує, що фазова характеристика перетинає лінію - **180°** начебто б трохи раніше, ніж характеристика $Lm(\square)$ перетинає лінію **0** дБ. Уточнимо те, що бачимо... Перемістіть курсор у поле *Графічного вікна*, виконайте клацання *правою* клавішею "миші" і виберіть опцію *Список* (клацання лівою клавішею "миші"): вікно графіків заміниться таблицею даних розрахунку. Прокручуванням таблиці знайдіть рядок, що відповідає $lg(\square) = 1.0413$ (див. рис. 1.6), і переконайтесь, що $Lm(\square) > 0$ (0.141233), а фазове зрушення $\square(\square) < -180^\circ$ (-184.6). Отже, при замиканні САР одиничним зворотним зв'язком вона буде нестійкої, що й показав раніше (у Лаб. Раб. № 1) графік перехідного процесу при вихідних параметрах САР.

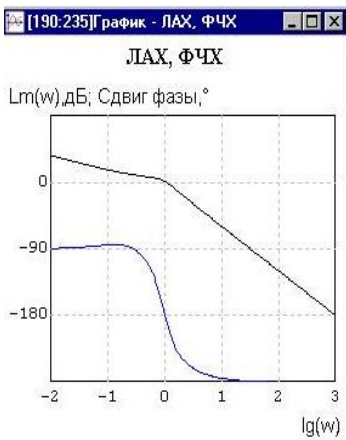


Рис 1.5

$lg(w)$	График 1	$lg(w)$	График 2
0.870964	3.2661	0.870964	-159.856
0.912011	2.62527	0.912011	-166.022
0.954993	1.89109	0.954993	-172.276
1	1.06196	1	-178.506
1.04713	0.141233	1.04713	-184.6
1.09648	-0.863289	1.09648	-190.464
1.14815	-1.94073	1.14815	-196.023
1.20226	-3.07868	1.20226	-201.228
1.25893	-4.26467	1.25893	-206.058
1.31826	-5.4872	1.31826	-210.507
1.38038	-6.73631	1.38038	-214.588
1.44544	-8.00378	1.44544	-218.321
1.51356	-9.2831	1.51356	-221.733
1.58489	-10.5693	1.58489	-224.85

Рис 1.6

Поверніть попередній вид вікна **Графік - ЛАХ, ФЧХ** (клацанням *правою* клавішею "миші" у поле таблиці, потім клацанням *лівою* клавішею "миші" по опції *Список*).

Перенесіть курсор на кнопку очищення таблиці *Входи-Виходи-Характеристика* (третя ліворуч у вікні *Параметри частотного аналізу*) і

виконаєте клацання *лівою* клавішею "миші": діалогове вікно стане таким же, як і рис. 1.3. Закрийте графічне вікно із заголовком **ЛАХ, ФЧХ** (клацанням по системній кнопці в правому верхньому куті вікна). Перенесіть курсор на кнопку **Годографів** і виконаєте клацання *лівою* клавішею "миші": з'явиться нове графічне вікно із заголовком **Годографи**.

Перемістите курсор на крайню ліву кнопку (із символом " + ") і виконаєте одне клацання *лівою* клавішею "миші": з'явиться номер рядка в таблиці. Перемістите курсор на рядок *Входи* рядка, виконаєте клацання лівою клавішею "миші", натисніть на спеціальну кнопку, що з'явилася в цьому рядку таблиці, і зі списку змінних виберіть **Вхід**. Повторіть аналогічні дії для рядку *Виходи* й виберіть змінну **Вихід**. В рядку *Характеристика* виберіть вид годографа - **Найквіста**. Вид заповненої таблиці повинен бути таким же, як і на рис. 1.7.

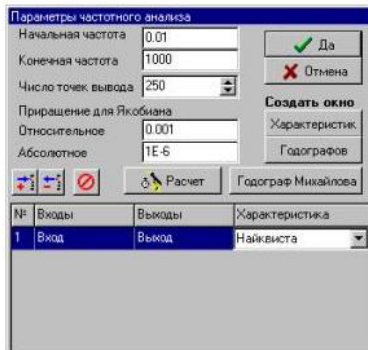


Рис. 1.7.

Виконайте клацання *лівою* клавішею "миші" по кнопці **Розрахунок**: почнеться розрахунок годографа АФЧХ (названого в ПК "МВТУ" годографом Найквіста), а в *Графічному вікні* - відображення результатів розрахунку.

Використовуючи опцію *Властивості* командного меню *Графічного вікна*, приведіть зображення графіка годографа до такого ж виду, як і на рис. 1.8.

Із критерію Найквіста відомо, що САР, яка перебуває на аперіодичній границі стійкості в розімкнутому стані, стане стійкою при її замиканні одиничним Головним зворотнім зв'язком, якщо годограф АФЧХ не охоплює на комплексній площині "точку Найквіста" $(-1, 0 \cdot i)$. Тому розглянемо більш "уважно" поведінку лінії годографа в околиці точки $(-1, 0 \cdot i)$. Для цього, використовуючи ще раз опцію *Властивості* командного меню *Графічного вікна*, приведіть зображення графіка годографа до такого ж виду, як і на рис. 1.9.

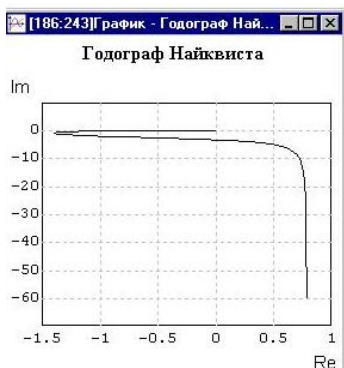


Рис 1.8

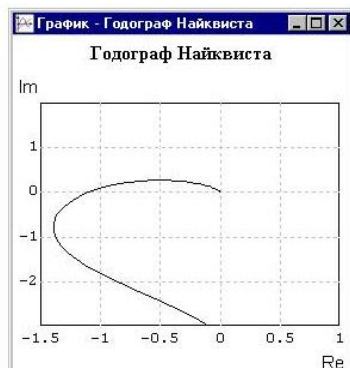


Рис 1.9

Лінія годографа розімкнутої САР на рис. 1.9 без сумніву охоплює точку $(-1, 0 \cdot i)$: тому вихідна САР у замкнутому стані буде нестійка.

Етап 2 - дослідження стійкості скоректованої САР.

Закрийте діалогове вікно **Параметри частотного аналізу**, клацнувши лівою клавішею "миші" по кнопці **Так**: на екрані монітора знову з'явиться Схемне Вікно.

Змініть коефіцієнт k_I у блоці $W_I(s)$ на **0.35**, що відповідає оптимальному значенню.

Перемістите курсор на командну кнопку **Старт** і зробіть клацання "мишею": відбудеться ініціалізація всіх блоків структурної схеми. Далі можна й не розраховувати перехідний процес, тому що вся інформація про структурну схему отримана й можна проводити розрахунок частотних характеристик. Перемістите курсор на командну кнопку **Стоп** і зробіть клацання "мишею": розрахунок буде перерваний, так і не почавшись.

Перемістите курсор на напис **Аналіз** у командному меню, зробіть однократне клацання "мишею" і в меню знову виберіть опцію **Частотний аналіз**. У діалоговому вікні, що **відкрилося**, **Параметри частотного аналізу** не потрібно переустановлювати, тому що вони збережені автоматично. Запустіть розрахунок годографа (у такий же спосіб, як Ви виконали це вище). Зробіть графік годографа більше "симпатичним", змінивши параметри осей координат **Графічного вікна** (див. рис. 1.10).

Ще раз змініть параметри осей координат **Графічного вікна** (див. рис. 1.11). Лінія годографа розімкнутої САР на рис. 1.11 без сумніву не охоплює точку $(-1, 0 \cdot i)$. Висновок: скоректована САР у замкнутому стані буде стійка.

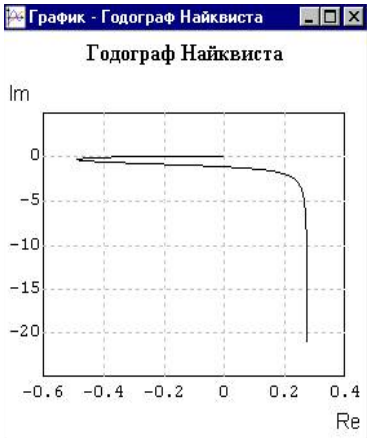


Рис 1.10

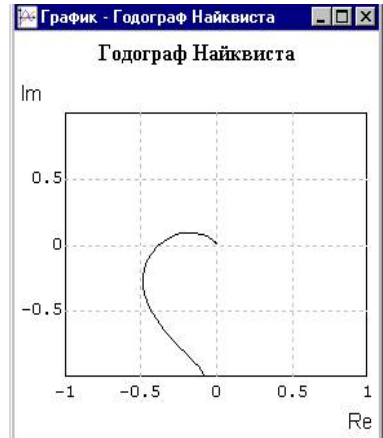


Рис 1.11

Перенесіть курсор на кнопку очищення таблиці **Входи-Виходи-Характеристика** й виконайте клацання *лівою* клавішею "миші": діалогове вікно стане таким же, як і на рис. 1.3. Закрийте графічне вікно із заголовком **Годографи**. Перенесіть курсор на кнопку **Характеристик** і виконайте однократне клацання *лівою* клавішею "миші": з'явиться нове графічне вікно із заголовком **Частотні характеристики**.

Перемістите в діалоговому вікні **Параметри частотного аналізу** курсор на крайню ліву кнопку (із символом "+") і виконайте два клацання *лівою* клавішею "миші": у таблиці з'являться два нові рядки з номерами **1** і **2**.

Перемістите курсор в область *Входи* 1-го рядка, виконайте клацання *лівою* клавішею "миші", натисніть на спеціальну кнопку, що з'явилася в цій області таблиці, і зі списку змінних виберіть **Вхід**. Повторіть аналогічні дії для області *Входи* 2-го рядка таблиці. За аналогією з попереднім заповніть 2-ий і 3-ий стовпці таблиці. Вид заповненого графічного буде таким же, як і на рис. 1.4.

Перемістите курсор на кнопку **Розрахунок** і зробіть клацання *лівою* клавішею "миші": почнеться розрахунок частотних характеристик і відображення результатів у спеціальному *графічному вікні*, причому знову автоматично зміняться заголовок графіка й підписи під осями координат. Перемістите курсор у поле *Графічного вікна*, виконайте клацання *правою* клавішею "миші", виберіть опцію **Властивості** й установіть в діалоговому вікні **Настроювання** параметри осі ординат графіка, як це виконано на рис. 1.12.

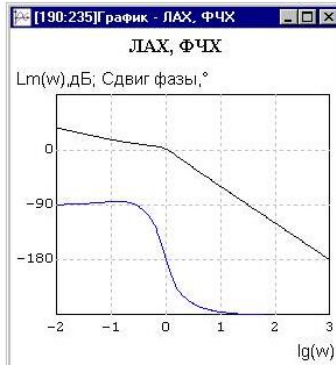


Рис. 1.12

Із критерія Найквіста відомо, що САР, яка перебуває на аперіодичній границі стійкості в розімкненому стані, стане стійкої при її замиканні одиничним зворотнім зв'язком, якщо графік ЛАХ перетинає лінію **0 дБ** раніше, ніж графік ФЧХ лінію **-180°**. Аналіз графіків $Lm(\omega)$ і $\varphi(\omega)$ показує, що при замиканні одиничним зворотним зв'язком САР стане стійкої.

Використовуючи опції *Графічного вікна* переведіть його в режим *Список* і визначіть запаси по фазі (у градусах) і амплітуді (у дБ). Ці запаси повинні становити ~ 86 про і ~ 8.2 дБ, відповідно (див. рис. 1.13 і рис. 1.14). Запас по фазі достатній, однак надто малий запас по амплітуді (вимога $\sim 30...40$ дБ) обґрунтовує "не дуже гарну" якість перехідного процесу в демонстраційно-ознайомлювальному завданні при $k_1 = 0.35$.

lg(w)	График 1	lg(w)	График 2
0.288403	0.761679	0.288403	-90.3833
0.301995	0.51668	0.301995	-91.3529
0.316228	0.274382	0.316228	-92.4144
0.331131	0.0346521	0.331131	-93.5727
0.346737	-0.202623	0.346737	-94.833
0.363078	-0.437538	0.363078	-96.2013
0.380189	-0.67018	0.380189	-97.6843
0.398107	-0.900639	0.398107	-99.2897
0.416869	-1.12903	0.416869	-101.026
0.436516	-1.35552	0.436516	-102.905
0.457088	-1.58038	0.457088	-104.936
0.47863	-1.80403	0.47863	-107.135
0.501187	-2.02711	0.501187	-109.518
0.524807	-2.25061	0.524807	-112.102

Рис 1.13

lg(w)	График 1	lg(w)	График 2
0.870964	-5.85254	0.870964	-159.856
0.912011	-6.49337	0.912011	-166.022
0.954993	-7.22755	0.954993	-172.276
1	-8.05668	1	-178.506
1.04713	-8.97741	1.04713	-184.6
1.09648	-9.98193	1.09648	-190.464
1.14815	-11.0594	1.14815	-196.023
1.20226	-12.1973	1.20226	-201.228
1.25893	-13.3833	1.25893	-206.058
1.31826	-14.6058	1.31826	-210.507
1.38038	-15.8549	1.38038	-214.588
1.44544	-17.1224	1.44544	-218.321
1.51356	-18.4017	1.51356	-221.733
1.58489	-19.6879	1.58489	-224.85

Рис 1.14

Перенесіть курсор на кнопку очищення таблиці **Входи-Виходи-Характеристика** й виконайте клацання *лівою* клавішею "миші": діалогове вікно стане таким же, як і рис. 1.3. Закрийте графічне вікно із заголовком **ЛАХ, ФЧХ** (однократне клацання по системній кнопці в правому верхньому куті вікна).

Закрийте діалогове вікно **Параметри частотного аналізу**, клацнувши *лівою* клавішею "миші" по кнопці **Так**: на екрані монітора знову з'явиться Схемне Вікно.

Етап 3 - аналіз стійкості САР з використанням критерію Михайлова.

Відомо, що критерій Михайлова заснований на аналізі частотних властивостей характеристичного полінома $D(s)$ замкнутої системи при підстановці $s = i \cdot \omega$. Якщо годограф Михайлова $D(i \cdot \omega)$ побудований на комплексній площині, то для стійкості замкнутої САР необхідно і достатньо, щоб при зміні ω від нуля до нескінченності лінія годографа почергово переходила з квадранта в квадрант проти годинникової стрілки, причому зміна аргументу $\arg D(i \cdot \omega) \approx n \cdot \omega / 2$, де n - порядок системи.

Замкніть зворотній зв'язок, увівши в діалоговому вікні блоку елемент порівняння, значення 2-го вагового коефіцієнту -1 (мінус 1). Поверніть вихідне значення коефіцієнта підсилення в блоці с підписом $W_1(s)$ ($k_1 = 1$).

Виконайте "контрольне" моделювання перехідного процесу й переконайтесь, що перехідний процес розбіжний, отже вихідна САР нестійка.

При відкритті діалогового вікна **Параметри частотного аналізу** його вид буде таким же, як і на рис. 1.2. Перемістите курсор на кнопку **Годографів** і виконайте клацання *лівої* клавіші "миші": з'явиться графічне вікно із заголовком **Годографи** й кнопка **Годограф Михайлова** стане активною (шрифт тексту в кнопці змінить колір із бляклого на чорний).

Виконайте клацання *лівою* клавішею "миші" по кнопці **Годограф Михайлова**: у *Графічному вікні* почне відображатися результат розрахунку. По завершенні розрахунку за допомогою командного меню *Графічного вікна* й опції *Властивості* змініть параметри осей координат на графіку годографа Михайлова, так як це виконано на рис. 1.15.

Аналіз графіка на рис. 1.15 показує, що при зміні ω від 0 до ∞ зміна аргументу (тому що порядок САР дорівнює 4, а ціна ділення по осі абсцис на 3 порядки більше, ніж по осі ординат), однак поведження лінії годографа в околиці початку координат у такому масштабі графіка не визначено. Виконайте "вирізання" фрагмента графіка в окружності початку координат за допомогою зміни в діалоговому вікні **Настроювання** параметрів осей координат (див. рис. 1.16).

Поводження кривої Михайлова на рис. 1.16 показує, що послідовний перехід із квадранта у квадрант не дотримується: точка (1, 0) при $\omega = 0 \rightarrow$ 1-ий квадрант \rightarrow 2-ий квадрант \rightarrow 1-ий квадрант \rightarrow 4-ий квадрант.

Висновок: вихідна САР нестійка.



Рис. 1.15

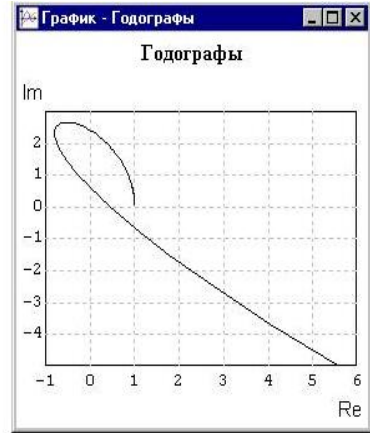


Рис.1.16

Закрийте діалогове вікно *Параметри частотного аналізу* (клацання "мишею" по кнопці **Так**). Змініть значення k_1 ($k_1 = 0.35$). Виконайте "контрольний" розрахунок перехідного процесу й переконаєтеся, що його вид відповідає стійкому процесу.

Відкрийте знову діалогове вікно *Параметри частотного аналізу*. Виконайте клацання лівою клавішею "миші" по кнопці **Годографів**: знову відкриється спеціальне *Графічне вікно* із заголовком *Годографи*.

Виконайте клацання лівою клавішею "миші" по кнопці **Годограф Михайлова**: у *Графічному вікні* почнеться відображення результатів розрахунку. По завершенні розрахунку за допомогою командного меню *Графічного вікна* й опції *Властивості* змініть параметри осей координат на графіку годографа Михайлова, так як це виконано на рис. 1.17. Вид кривої Михайлова на рис. 1.17 показує, що при зміні ω від 0 до ∞ зміна аргументу $\arg D(i\omega) = \arctan(4\omega/2)$ поведінка лінії годографа в околиці початку координат в цьому масштабі графіка також не визначена. Виконайте "вирізання" фрагмента графіка в окружності початку координат засобами зміни в діалоговому вікні *Настройка* параметрів осей координат (див. рис. 1.18).

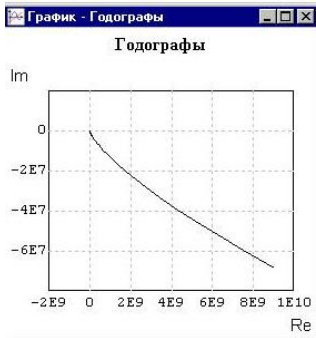


Рис 1.17

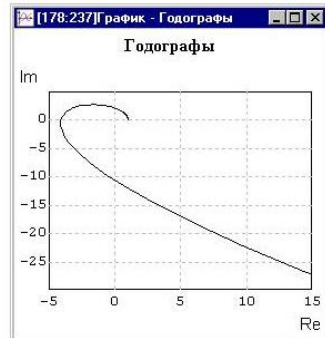


Рис 1.18

Поводження кривої Михайлова на мал. 1.18 показує, що послідовний перехід із квадранта у квадрант дотримується: точка (1, 0) при $\omega = 0 \rightarrow$ 1-ий квадрант \rightarrow 2-ий квадрант \rightarrow 3-ий квадрант \rightarrow 4-ий квадрант.

Висновок: скоректована САР стійка.

Закрийте діалогове вікно *Параметри частотного аналізу* (кляцання "мишею" по кнопці **Так**): на екрані монітора знову Схемне вікно (див. рис. 1.1).

1.2. Визначення полюсів, нулів і коефіцієнтів передаточних функцій

Поверніть вихідні значення швидкісної ефективності інтегруючого регулятора ($k_I = 1$). Розімкніть *Головний зворотний зв'язок* (2-ий ваговий коефіцієнт у елементі порівняння повинен бути рівним нулю).

Виконаєте кляцання "мишею" по кнопці **Старт** (структурна схема розімкнутої САР ініціалізувалась), а потім по кнопці **Стоп** (моделювання перерване, так і не почавшись).

Відкрийте меню *Аналіз* і виберіть опцію *Передаточні функції*: відкриється діалогове вікно *Розрахунок передаточних функцій* (див. рис. 1.19). Перемістіть курсор на нижню червону стрілку й виконайте кляцання "мишею": з'явиться номер **1** у таблиці *Входи-Виходи*. Перемістіть курсор на область *Входи* в 1-ому рядку таблиці і виконайте кляцання "мишею", натисніть на спеціальну кнопку, що з'явилася в цій області таблиці, і зі списку змінних виберіть *Вхід*. Повторіть аналогічні дії для області *Виходи* цього ж рядка таблиці й виберіть змінну *Вихід*. Заповнивши таблицю, Ви підготували дані для розрахунку полюсів, нулів і коефіцієнтів передаточної функції вихідної САР у розімкнутому стані. Діалогове вікно буде мати вигляд, аналогічний рис. 1.20.

Параметри діалогових рядків *Відносне збільшення для розрахунку Якобіана* й *Абсолютне збільшення для розрахунку Якобіана* можна залишити без змін, тому що в чисто лінійних САР розрахунок параметрів передаточних

функцій не використовує даних по збільшенню Якобіана. Використання даних по збільшеннях Якобіана має місце в розрахунку параметрів лінеаризуємих САР (ПК "МВТУ" автоматично виконує лінеаризацію в околиці базової точки). Значення "за замовчуванням" даних по збільшеннях Якобіана обрані з особистого досвіду авторів ПК "МВТУ". Починаючому Користувачеві рекомендується використовувати параметри "за замовчуванням".

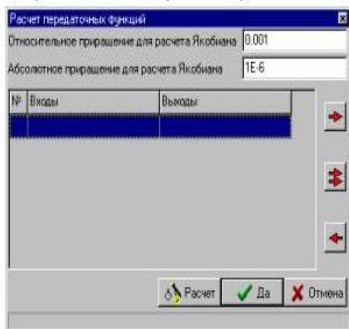


Рис 1.19

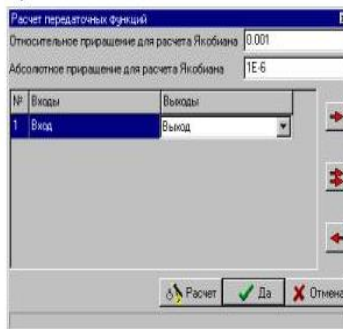


Рис 1.20

Перемістіть курсор на кнопку **Розрахунок** і виконайте клацання "мишею": практично миттєво з'явиться інформаційне вікно із заголовків *Результати розрахунку параметрів передаточних функцій*. У верхній частині цього вікна наведені результати розрахунку коефіцієнтів *Знаменника* й *Чисельників* по зростаючим ступеням s , а в нижній частині - полюси й нулі передаточних функцій САР (див. рис. 1.21).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ			
ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ			
Степень	Знаменатель	Числители (Вход - Выход)	
s	$L(s)$	Вход-Выход	
0	0	0.625	
1	1	3.125	
2	3.75		
3	3.75		
4	3.125		
ПОЛЮСИ И НУЛИ			
Номер	Полюсы	Нули (Вход - Выход)	
№	$P(s)$	Вход-Выход	
1	0	-0.2	
2	-0.3557		
3	-0.4222 + γ 0.8494		
4	-0.4222 - γ 0.8494		

Рис. 1.21

З огляду на те, що еквівалентна передаточна функція розглянутої розімкнутої САР визначається не дуже громіздким співвідношенням: прямою підстановкою вихідних передаточних функцій у це співвідношення легко переконатися в правильності розрахунку програмним комплексом "МВТУ" коефіцієнтів еквівалентної передатної функції (виконайте "ручний" розрахунок і порівняйте).

Результати розрахунку полюсів показують, що вихідна САР у розімкнутому стані перебуває на аперіодичній границі стійкості, тому що три полюси розташовані в лівій напівплощині, а один - на початку координат.

Закрийте послідовно інформаційне вікно (клацанням "мишею" по "хрестіку" у верхньому правому куті вікна) і потім діалогове вікно **Розрахунок передаточних функцій** (клацання "мишею" по кнопці **Так** у цьому вікні): на екрані монітора знову Схемне вікно.

Замкніть *Головний зворотній зв'язок*. У діалоговому вікні блоку з підписом *Вхід* змініть ім'я змінної на нове - **Input**. Виконаєте клацання "мишею" по кнопці **Старт** (структурна схема замкнутої САР ініціалізувалась) і потім по кнопці **Стоп** (моделювання перерване, так і не почавшись).

У командному меню **Аналіз** виберіть опцію *Передаточні функції*: відкриється незаповнене діалогове вікно **Розрахунок передаточних функцій**. Перемістите курсор на нижню червону стрілку й виконаєте клацання "мишею": з'явиться номер **1** у таблиці *Входи-Виходи*. Перемістите курсор в область *Входи* в 1-ий рядку таблиці й виконаєте клацання "мишею", натисніть на спеціальну кнопку, що з'явилася в цій області таблиці, і зі списку змінних виберіть **Input**. Повторіть аналогічні дії для області *Виходи* цього ж рядка таблиці й виберіть змінну **Вихід**. Заповнивши таблицю, Ви підготували дані для розрахунку полюсів, нулів і коефіцієнтів передаточної функції вихідної САР у замкнутому стані. Діалогове вікно буде мати вигляд, аналогічний рис. 1.22.

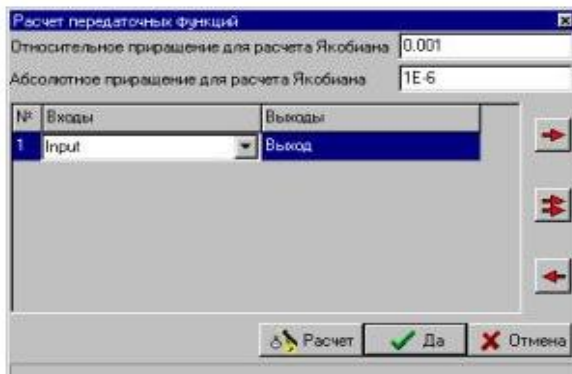


Рис. 1.22

Виконайте клацання по кнопці **Розрахунок** у цьому діалоговому вікні: в інформаційному вікні, що відкрилося, будуть наведені результати розрахунку параметрів передаточної функції вихідної САР у замкнутому стані. У верхній частині інформаційного вікна наведені результати розрахунку коефіцієнтів *Знаменника* й *Чисельника* по зростаючих ступенях s , а в нижній частині - полюси й нулі передаточних функцій САР (див. рис. 1.23).

У вірності розрахунку коефіцієнтів чисельника й знаменника передаточної функції замкнутої САР Ви можете переконатися, виконавши "ручний" розрахунок.

Аналіз нижньої таблиці в інформаційному вікні ще раз підтверджує висновок про відсутність стійкості вихідної САР у замкнутому стані: два дійсних полюси розташовані в лівій напівплощині, а два комплексно-спряжених полюси - у правій напівплощині.

Закрийте послідовно інформаційне вікно й потім діалогове вікно **Розрахунок передаточних функцій**: на екрані монітора знову Схемне вікно.

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ			
ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ			
Степень	Знаменатель	Числители (Вход - Выход)	
s	1	при Выход	
0	1	1	
1	6.6	5	
2	6		
3	6		
4	5		
ПОЛЮСЫ И НУЛИ			
Номер	Полюсы	Нули (Вход - Выход)	
№	Re+Im	при Выход	
1	0.02208 + j1.033	-0.2	
2	0.02208 - j1.033		
3	-0.1753		
4	-1.069		

Рис. 1.23

Змініть значення коефіцієнта k_1 на **0.35**, при якому замкнута САР безсумнівно повинна бути стійкої (див. рис. 1.11 або рис. 1.12).

Виконайте клацання "мишею" по кнопці **Старт** (структурна схема замкнутої САР ініціалізувалась), а потім по кнопці **Стоп** (розрахунок перерваний, так і не почавшись).

Відкрийте діалогове вікно **Розрахунок передаточних функцій** (у меню **Аналіз** опція *Передатні функції*). Виконайте клацання "мишею" по кнопці **Розрахунок**: відкриється вікно з результатами розрахунку для скоректованої САР (див. рис. 1.24).

РЕЗУЛЬТАТЫ РАСЧЕТА ПАРАМЕТРОВ ПЕРЕДАТОЧНЫХ ФУНКЦИЙ			
ПЕРЕДАТОЧНЫЕ ФУНКЦИИ			
Степень	Числитель	Знаменатель	Числители (Вход - Выход)
0	1	1	1
1	8.571	5	5
2	17.14		
3	17.14		
4	14.29		

ПОЛЮСЫ И НУЛИ			
Номер	Полосы	Импульс	Нули (Вход - Выход)
№	Re+*Im	Импульс	
1	-0.132		-0.2
2	-0.1993 + j0.8674		
3	-0.1993 - j0.8674		
4	-0.6693		

Рис. 1.24

Аналіз нижньої таблиці в інформаційному вікні (див. рис. 1.24) ще раз підтверджує висновок про стійкість скоректованої САР у замкнутому стані: всі чотири полюси розташовані в лівій напівплощині.

Закрийте послідовно інформаційне вікно, а потім діалогове вікно *Розрахунок передаточних функцій*: на екрані монітора знову Схемне вікно.

У діалоговому вікні блоку *Вхід* змініть ім'я змінної на старе - **Вхід**.

Збережіть структурну схему на жорсткий диск під "оригінальним" ім'ям, адже вона Вам ще буде потрібна при виконанні лабораторної роботи № 3.

1.3. Побудова графіків частотних характеристик ряду типових ланок

Перед виконанням самостійного дослідження частотних характеристик САР ядерного реактора (загляньте в наступний розділ) у якості "легкої розминки" необхідно побудувати графіки основних частотних характеристик для деяких типових ланок і зрівняти побудоване з аналогічними графіками в лекціях за курсом "так".

Використовуючи освоєні процедури роботи в режимі АНАЛІЗ, побудуйте для кожної з перерахованих нижче ланок наступні частотні характеристики:

- графіки годографів АФЧХ (годографів Найквіста);
- графіки $Lm(\square)$ (ЛАХ);
- графіки ФЧХ.

Рекомендується задавати **600** розрахункових точок, рівномірно розташованих у логарифмічному масштабі в наступному діапазоні частот: від 10^{-3} до 10^3 с^{-1} .

Список типових ланок, для яких необхідно побудувати вищевказані частотні характеристики:

1. Аперіодична ланка 1-го порядку: $k_1 = 10$; $T_1 = 1$ з; $k_2 = 10$; $T_2 = 10$ с.
2. Коливальна ланка: $k_1 = 10$; $T_1 = 1$ з; $\beta_1 = 0.8$; $k_2 = 10$; $T_2 = 1$ з; $\beta_2 = 0.2$.
3. Інерційно-диференціююча ланка: $k_1 = 10$ з; $T_1 = 1$ з; $\tau_2 = 10$ з; $T_2 = 10$ с.

Рекомендується будувати необхідні частотні характеристики відразу для двох ланок одного типу, що дозволить виявити вплив варіюємого параметра (T або β) на відповідні графіки (див. рис. 1.25).

Пример структурной схемы

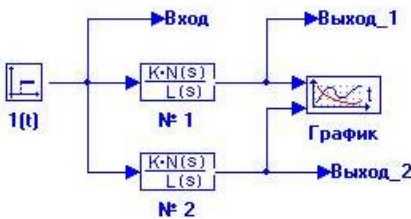


Рис.1.25

Увага: паралельно з дослідженням АФЧХ вищевказаних типових ланок у цьому завданні є можливість додатково "згадати" і перехідні функції досліджуваних типових ланок (при кінцевому часі моделюванні 40 с), тому структурні схеми на рис. 1.25 містять типовий блок *ступінчастий вплив* (з параметрами **0 0 1**) і типовий блок *Графічне вікно*.

2. АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ Й КОРЕКЦІЯ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА ПО АМПЛІТУДНО-ФАЗОВИХ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ

У процесі виконання лабораторної роботи № 1 Ви сформували структурну схему найпростішої математичної моделі динаміки САР ядерного реактора, зовнішній вигляд якої (з точністю до Ваших художньо-оформлювальних здібностей) мав вигляд, що приблизно відповідає структурній схемі на рис. 2.1.

У даній частині лабораторної роботи Вами має бути виконаний послідовний ряд етапів, спрямованих як на дослідження частотних характеристик тільки ядерного реактора ("голий" реактор, реактор з місцевим зворотним зв'язком), так і на аналіз САР ЯР у цілому (вихідної, а потім і скоректованої), включаючи аналіз стійкості САР ЯР з використанням частотного критерію Найквіста (різні варіанти його формулювання) і по теоремі Ляпунова (по полюсах).

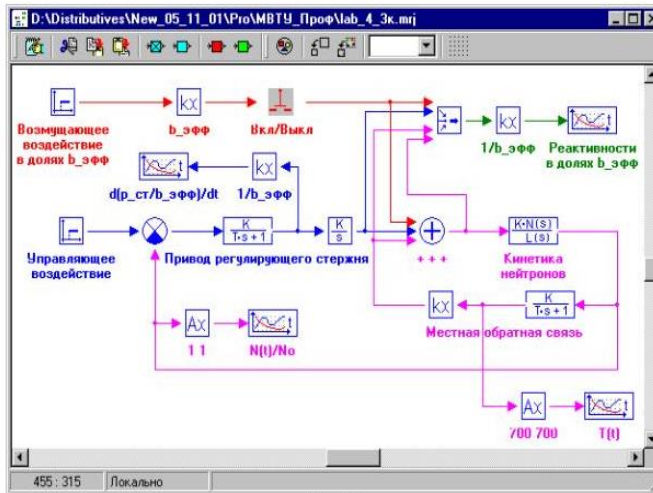


Рис. 2.1

З огляду на, те що для розрахунку в середовищі ПК "МВТУ" амплітудно-фазових частотних характеристик необхідно вказати на структурній схемі точки впливу одиничного гармонійного збурення й точки "виходу", Ви повинні визначити (самостійно) місце розташування вищевказаних точок і потім внести в структурну схему відповідні зміни.

Примітки:

1. При виконанні ряду етапів Вами має бути, досліджена АФЧХ "голого" реактора при двох значеннях часу життя миттєвих нейтронів і двох значеннях частки запізнених нейтронів. Для цього необхідно створити "додаткову" модель кінетики для другого ядерного реактора, яку Ви можете розмістити у вільному місці Схемного вікна (наприклад, у правому нижньому куті Схемного вікна (див. рис. 2.1).

2. При розрахунку й побудові графіків АФЧХ рекомендується задавати **700** розрахункових точок, рівномірно розташованих у логарифмічному масштабі в наступному діапазоні частот: від 10^{-3} до 10^4 с⁻¹.

Для виконання даної частини лабораторної роботи кожній підгрупі необхідно виконати наступні етапи:

- У рамках одного "сеансу" роботи в режимі АНАЛІЗ розрахувати АФЧХ "голого" реактора (без будь-яких зворотніх зв'язків) при двох значеннях часу життя миттєвих нейтронів $l = l_{ucx}$ (реактор типу РБМК) і $l = 0.01 \cdot l_{ucx}$ (реактор типу ВВЭР для плавучих АЕС) і побудувати графіки наступних характеристик:

- годографи Найквіста (два годографи на одному графіку);
- логарифмічно-амплітудні характеристики (дві ЛАХ на одному графіку);
- фазово- частотні характеристики (дві ФЧХ на одному графіку).

Проаналізувати якісний вплив на вид цих характеристик значення часу життя миттєвих нейтронів.

- У рамках одного "сеансу" роботи в режимі АНАЛІЗ розрахувати АФХЧ "голоного" реактора (без будь-яких зворотних зв'язків) при двох значеннях частки запізнених нейтронів $\beta = \beta_{\text{исх}}$ (паливо Pu^{239}) і $\beta = 0.3 \cdot \beta_{\text{исх}}$ (паливо Pu-239) і побудувати графіки наступних характеристик:

- годографи Найквіста (два годографи на одному графіку);
- логарифмічно-амплітудні характеристики (дві ЛАХ на одному графіку)
- фазово-частотні характеристики (дві ФЧХ на одному графіку).

Проаналізувати якісний вплив на вид цих характеристик значення часу життя миттєвих нейтронів.

- У рамках одного "сеансу" роботи в режимі АНАЛІЗ при вихідних параметрах САР ЯР розрахувати АФХЧ "голоного" реактора (без будь-яких зворотніх зв'язків) і АФЧХ ядерного реактора з місцевим зворотним зв'язком і побудувати графіки наступних частотних характеристик:

- годографи Найквіста (два годографи на одному графіку);
- логарифмічно-амплітудні характеристики (дві ЛАХ на одному графіку)
- фазово-частотні характеристики (дві ФЧХ на одному графіку).

Проаналізувати якісний вплив на вид цих характеристик від'ємного зворотного зв'язку по температурі палива.

- Виконати оцінку стійкості вихідної САР у розімкнутому й замкнутому станах, використовуючи безпосереднє обчислення полюсів відповідних передаточних функцій.

- Виконати "контрольне" моделювання при подачі керуючого впливу $u(t) = 0.05 \cdot 1(t)$ и впевнитись, що вихідна САР в замкнутому стані, чи не стійка, чи має явно "погану" якість перехідного процесу.

- У рамках одного "сеансу" роботи в режимі АНАЛІЗ виконати аналіз стійкості вихідної замкнутої САР, використовуючи критерій Найквіста в наступних варіантах його застосування:

- по годографу АФЧХ розімкнутої САР;
- по одночасному розгляді ЛАХ і ФЧХ розімкнутої САР.

Визначити в скільки разів необхідно зменшити швидкісну ефективність привода регулюючого стрижня, щоб запас стійкості по амплітуді становив не менш 30 дБ, а запас по фазі - не менше 60°.

- Виконати корекцію САР (зменшити K_{np}) і прямим моделюванням переконатися, що при подачі керуючого впливу $u(t) = 0.05 \cdot \mathbf{1}(t)$ скоректована САР стійка й має задовільну якість перехідного процесу.

- У рамках одного "сеансу" роботи в режимі АНАЛІЗ перевірити стійкість скоректованої замкнутої САР, використовуючи критерій Найквіста в наступних варіантах його застосування:

- по годографу АФЧХ розімкнутої САР;
- по одночасному розгляді ЛАХ і ФЧХ розімкнутої САР

Визначити запаси стійкості скоректованої САР по амплітуді й по фазі.

- Виконати перевірку стійкості скоректованої САР у замкнутому стані, використовуючи безпосереднє обчислення полюсів характеристичного полінома замкнутої САР.

- Визначити аналітичні вираження головної передаточної функції $\Phi(s)$ та передатної функції по збуджуючому впливу, $\Phi f(s)$.

Збережіть проект (завдання) на жорсткий диск, тому що він вам знадобиться при виконанні лабораторної роботи № 3.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 3

АНАЛІЗ У СЕРЕДОВИЩІ ПК "МВТУ" ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ, ЗАДАНИХ У ФОРМІ КОШІ І В ЗМІНИ СТАНУ

Мета роботи:

- ознайомлення з додатковими можливостями ПК "МВТУ";
- ознайомлення з новими методами формування математичних моделей динаміки САР у програмному комплексі "МВТУ", включаючи:
 - процедури створення багаторівневих структурних схем;
 - реалізацію механізму Глобальних параметрів;
 - опис математичної моделі динаміки САР у змінній стани;
 - використання Інтерпретатора *математичних функцій* для завдання рівнянь динаміки САР;
- методи реалізації "бездротової" передачі даних;
- самостійне дослідження перехідних процесів у найпростішій моделі САР ядерного реактора (САР ЯР), включаючи:
 - приведення математичного опису динаміки САР ЯР до завдання Коші;
 - формування математичної моделі САР ЯР з використанням:
 - опису в змінній стану (у матричній формі);
 - "Нового" блоку, що дозволяє якісно розширити варіанти компактного перетворення структурної схеми САР;
 - моделювання перехідних процесів у САР ЯР при подачі керуючих збуджуючих впливів.

1. НОВІ МЕТОДИ ФОРМУВАННЯ МАТЕМАТИЧНОЇ МОДЕЛІ САР У ПК "МВТУ"

1.1. Перетворення математичного опису САР і формулювання завдань чергового додаткового завдання

У даному розділі будуть розглянуті найбільш значимі нові програмно-методичні рішення, реалізовані в ПК "МВТУ", що не мають аналогів у вітчизняній і у більшості відомих закордонних ПК подібних напрямків.

Нові програмні можливості ПК "МВТУ" для формування математичної моделі динаміки об'єкта дослідження розглянемо в процесі виконання нової бази додаткового завдання до демонстраційно-ознайомлювального завдання, структурна схема якої після виконання завдань із розрахунку амплітудно-фазових частотних характеристик САР мала вигляд, близький до рис. 1.1



Рис. 1.1

У розглянутому демонстраційно-ознайомлювальному завданні *Об'єкт Керування* описується трьома блоками (ланками): блоки з передаточними функціями $W_2(s)$ і $W_3(s)$, а також блок Локальний елемент порівняння.

"Легко бачити", що динаміка *Об'єкта Керування* в даному завданні описується наступною системою лінійних рівнянь:

$$\begin{cases} T_2^2 \cdot \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + 2 \cdot \beta \cdot T_2 \cdot \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K_2 \cdot \varepsilon_1(t); \\ T_3 \cdot \frac{dy_{oc}(t)}{dt} + y_{oc}(t) = K_3 \cdot y(t); \\ \varepsilon_1(t) = u_1(t) - y_{oc}(t), \end{cases}$$

при нульових початкових умовах, тобто $y(0) = 0$, $y'(0) = 0$, $y_{oc}(0) = 0$.

Увівши нові динамічні змінні $y_1(t) = y(t)$ і $y_2(t) = y'(t)$ можна привести математичний опис динаміки *Об'єкта Керування* до форми Коші:

$$\begin{cases} y_1'(t) = y_2(t); \\ y_2'(t) = a_1 \cdot y_1(t) + a_2 \cdot y_2(t) + a_3 \cdot [u_1(t) - y_{oc}(t)]; \\ y_{oc}'(t) = b_1 \cdot y_{oc}(t) + b_2 \cdot y_1(t), \end{cases}$$

де $a_1 = -1 / T_2^2$; $a_2 = -2\beta / T_2$; $a_3 = K_2 / T_2^2$; $b_1 = -1 / T_3$; $b_2 = K_3 / T_3$, а початкові умови і для нових динамічних змінних дорівнюють нулю.

До форми Коші можна привести математичний опис рівнянь динаміки САР у цілому, додавши до системи (1.2) рівняння динаміки для інтегруючого регулятора (блок з підписом $W_I(s)$) і алгебраїчне співвідношення для Головного елемента порівняння. У цьому випадку система рівнянь динаміки САР, "підготовлена" для переходу до опису в змінних стану, прийме вид:

$$\begin{cases} y_1'(t) = y_2(t); \\ y_2'(t) = a_{21} \cdot y_1(t) + a_{22} \cdot y_2(t) + a_{23} \cdot y_{oc}(t) + a_{24} \cdot u_1(t); \\ y_{oc}'(t) = a_{31} \cdot y_1(t) + a_{33} \cdot y_{oc}(t); \\ u_1'(t) = a_{41} \cdot y_1(t) + b_{41} \cdot u(t), \end{cases}$$

де:

$$\begin{aligned} a_{21} &= -1 / T_2^2; & a_{22} &= -2 \cdot \beta / T_2; & a_{23} &= -K_2 / T_2^2; & a_{24} &= K_2 / T_2^2; \\ a_{31} &= K_3 / T_3; & a_{33} &= -1 / T_3; & a_{41} &= -K_1; & b_{41} &= K_1. \end{aligned}$$

Після введення чергових нових динамічних змінних $x_1(t)$, $x_2(t)$, $x_3(t)$ і $x_4(t)$, рівних, відповідно, $y_1(t)$, $y_2(t)$, $y_{oc}(t)$ і $u_1(t)$, опис динаміки САР можна представити в матричній формі, а саме, у змінних стану:

$$\begin{cases} x'(t) = A \cdot x(t) + B \cdot u(t); \\ y(t) = C \cdot x(t) + D \cdot u(t), \end{cases}$$

де вектор-стовпець похідних змінних стану $x'(t)$, вектор-стовпець змінних стани $x(t)$, матриця системи A , матриця входу B , матриця виходу C і матриця обходу D рівні (у цьому завданні):

$$x(t) = \begin{bmatrix} x_1(t) \\ x_2(t) \\ x_3(t) \\ x_4(t) \end{bmatrix}; \quad x'(t) = \begin{bmatrix} x_1'(t) \\ x_2'(t) \\ x_3'(t) \\ x_4'(t) \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} \\ a_{31} & 0 & a_{33} & 0 \\ a_{41} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}; \quad B = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \\ b_{41} \end{bmatrix}; \quad C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]; \quad D=0.$$

Сформулюємо, нарешті, окремі завдання, які Вам треба буде розв'язати при виконанні даного завдання:

1. - Додати до структурної схеми "основної" САР (див. рис. 1.1) нову "паралельну" САР у вигляді вкладеної субструктури (*Субмоделі*).
2. - Задати коефіцієнти системи рівнянь "паралельної" САР через механізм Глобальних параметрів.
3. - Задати опис рівнянь динаміки *Об'єкта Керування* (див. систему (1.2)) в "паралельній" САР з використанням "*Нового*" блоку з бібліотеки *Динамічні ланки*.
4. - Задати опис рівнянь динаміки САР у цілому (див. системи (1.3) і (1.4)) з використанням типового блоку *Змінних стану* з бібліотеки *Динамічні ланки*, розташованої усередині "паралельної" САР.
5. - Реалізувати "бездротовий" обмін даними між "основною" і "паралельною" САР, використовуючи блоки в пам'ять з бібліотеки *Субструктури*.

Варто зазначити, що запропоновані Вам етапи завдання пункти 2, 3 не можуть бути виконані в середовищі інших програмних комплексів аналогічної спрямованості (ні у вітчизняних, ні у закордонних), а пункти 1 і 4 у повному обсязі можуть бути виконані тільки в середовищі найбільш популярного закордонного програмного комплексу - SIMULINK.

1.2. Створення "паралельної" САР у вигляді нової Субмоделі

Додавання до структурної схеми (див. рис. 1.1) "паралельної" САР у вигляді нової *Субмоделі* виконаємо в наступній послідовності:

Етап 1 - *перенос типового блоку Макроблок (Субмодель) у Схемне Вікно.*

З огляду на те, що проект (завдання) зі структурною схемою, аналогічною рис. 1.1, було збережено Вами на жорсткий диск, відкрийте його. Перемістіть курсор на закладку Субструктури в "*Лінійці*" *типових блоків* і ініціалізуйте її клацанням *лівої* клавіші "миші". Далі з "*Лінійки*" *типових блоків* перенесіть у Схемне Вікно блок *Макроблок (Субмодель)* у такий же спосіб, як раніше Ви це робили з іншими блоками при виконанні демонстраційно-ознайомлювального завдання. У полі Схемного Вікна з'явиться новий блок - *Субмодель* (без вхідних і вихідних портів).

Етап 2 - заповнення внутрішньої структури Субмоделі.

Перемістіть в Схемному Вікні курсор на блок *Субмодель* і виконайте 2-х кратне клацання *лівою* клавішею миші: відбудеться відкриття субмоделного схемного вікна (тобто перехід на 1-ий рівень вкладеності).

Перенесіть у схемне вікно, що відкрилося чисте (субмоделне) із цієї ж *бібліотеки* (Субструктури) блок Порт входу (бажано в ліву частину схемного вікна) і блок Порт виходу (краще в праву частину схемного вікна), а також інші блоки: *елемент порівняння, Інтегратор, Часовий графік* і "Новий" блок.

Хоча на даному етапі виконання завдання в субмоделному вікні неможливо провести всі лінії зв'язку між блоками (тому що "Новий" блок не має поки ні вхідного, ні вихідного портів), проведіть у субмоделному схемному вікні ті лінії зв'язку між блоками, які можна провести. Після оформлення підписів, що пояснюють, субмоделне схемне вікно буде мати вигляд, подібний рис. 1.2.

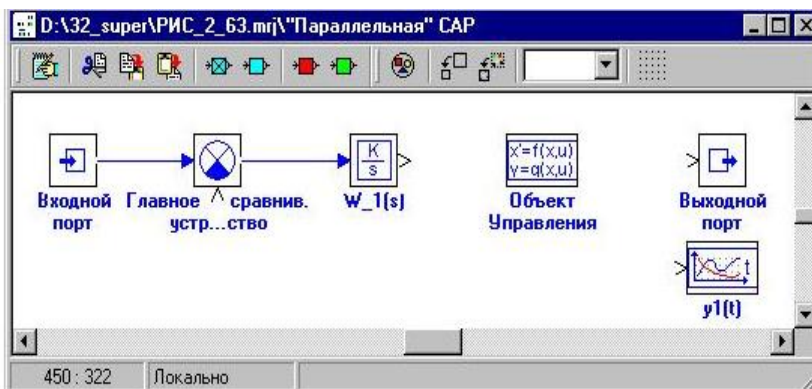


Рис. 1.2

Закрийте субмоделне схемне вікно 2-х кратним клацанням *лівою* клавішею "миші" у вільному місці субмоделного схемного вікна. Зображення *Субмоделі* в Головному Схемному Вікні зміниться: з'являться вхідний і вихідний порти.

Примітка. Процедури відкриття й закриття Субмоделі можна виконати й іншими способами. Відкриття Субмоделі - ініціалізацією її клацанням *лівою*

клавіші "миші" і натисканням клавіші PgUp. Закриття Субмоделі - натисканням клавіші PgDn.

Якщо умови завдання вимагають, щоб субмодельна структура мала, наприклад, 3 вхідних порти й 2 вихідних порти, то Ви повинні "перенести" у субмодельне схемне вікно три *Порта входу* й два *Порта виходу*. Першому перенесеному в це вікно *Порту входу* буде відповідати верхній вхідний порт (при орієнтації блоку *Субмодель ліворуч-праворуч*), другому - середній вхідний порт, а третьому - нижній вхідний порт (при орієнтації блоку *Субмодель ліворуч-праворуч*). Аналогічно, першому перенесеному в субмодельне вікно *Порту виходу* буде відповідати верхній вихідний порт (при орієнтації блоку *Субмодель ліворуч-праворуч*) і т.д.

Вхідні порти субструктури можуть бути векторними (багатожильними), наприклад, по першому входу передається одночасно 5 сигналів, по другому - 6 сигналів, а по третьому - 4 сигнали. Очевидно, що подібні векторні сигнали повинні бути попередньо сформовані, наприклад, за допомогою блоку *Мультиплексор*. Усередині субмодельного схемного вікна вихідні сигнали блоків *Порт входу*, звичайно, повинні бути демультимплексованими для наступної обробки.

Векторними можуть бути й вихідні порти субструктур, що вимагає відповідного попереднього націлення вихідних сигналів, що подаються усередині субструктури (*Субмоделі*) на блоки *Порт виходу*.

Увага! Якщо в *Субмоделі* кілька *Портів входу* й *Портів виходу*, рекомендується відразу після переносу кожного *Порта* зробити відповідний підпис, використовуючи стандартну процедуру оформлення послідовних підписів. Наприклад, дати 1-му перенесеному *Порту входу* "унікальне" ім'я:

Вхід № 1 і т.д.

Етап 3 - включення *Субмоделі* в основну структурну схему.

З'єднайте *Субмодель* лініями зв'язку із блоком *Керуючий вплив* і блоком *Графік $y(t)$* , попередньо змінивши на 2 число входів у блоці *Часовий графік*. Зробіть пояснюючий підпис, що пояснює, під новим блоком *Субмодель*: Головне Схемне Вікно прийме вид, подібний рис. 1.3.

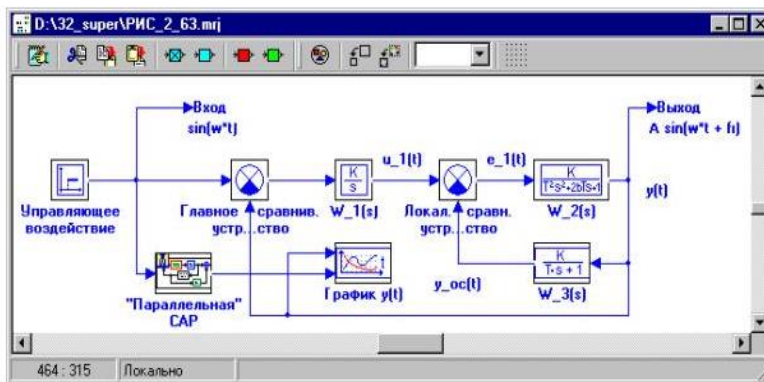


Рис. 1.3

На цьому процес включення створеної Вами нової субструктури ("Паралельна" САР) в основну структурну схему САР майже завершений.

Аналогічним способом можна внести в Головне Схемне Вікно ще трохи нових субструктур, а також можна внести нові субструктури й у субмодельне схемне вікно (субструктури 2-го рівня вкладеності).

При клацанні *правою* клавішею "миші" по блоці *Макроблок* з'являється мінівікно, що має додаткову опцію: *Зберегти субмодель*, що дозволяє зберегти *Субмодель* на жорсткому диску під оригінальним ім'ям (розширення .sub) і використовувати її як "заготівлю" при формуванні структурної схеми іншого завдання.

Діалогове вікно *Макроблоку* (див. рис. 1.4), може бути відкрите клацанням *правої* клавіші "миші" по блоці й потім клацанням *лівою* клавішею "миші" по опції *Властивості*, має в *закладці Параметри* три діалогові рядки, перший з яких (*Графічне зображення блоку*) призначена для зміни піктограми блоку на нову (в bmp-форматі), друга (*Редактор глобальних параметрів макроблоку*) - реалізує відкриття вікна *Редактор Глобальних параметрів* даної Субмоделі, а третій рядок (*Фон Субмоделі*) - призначений для заміни монотонного фону субмодельного вікна (за замовчуванням білого) на малюнок (в bmp-форматі), наприклад, із зображенням мнемосхеми, на фоні якої створюється структурна схема в даному субмодельному вікні. Необхідно зазначити, що зміна фону субмодельного вікна на малюнок потребує від Користувача попереднього "конструювання" цього образу.

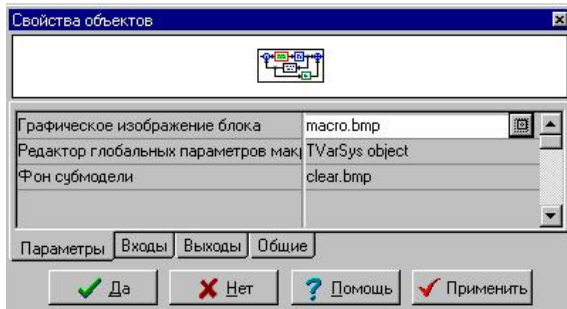


Рис. 1.4

1.3. Завдання параметрів САР через механізм Глобальних параметрів.

Вбудований у ПК "МВТУ" *Інтерпретатор математичних функцій* забезпечує функціонування вікна *Редактор Глобальних параметрів Проекту (Субмоделі)*, за допомогою якого можна реалізувати завдання параметрів блоків структурної схеми через механізм Глобальних параметрів.

Вікно *Редактор Глобальних параметрів Проекту (Субмоделі)* - фактично вікно текстового редактора, у якому Ви можете задати значення або вираження ряду параметрів САР, які називаються Глобальними параметрами, які в процесі моделювання залишаються постійними. *Інтерпретатор математичних функцій* "розпізнає" більше 30-ти операторів, включаючи чисто математичні (+, -, *, /, sin, tg, ln та т.п.), логічні (if, for і ін.) і функціональні оператори (time, step, interpol та ін.). Більш докладна інформація про *Інтерпретатор математичних функцій* буде представлена в наступному підрозділі.

Відкрийте вікно *Редактор Глобальних параметрів Проекту (Субмоделі)* клацанням лівої клавіші "миші" по командній кнопці *Параметри макроблоку* в *Додатковій панелі інструментів*, розташованій в *Схемному вікні*.

Уведіть із клавіатури текст, що описує завдання глобальних параметрів і коментарі (у фігурних дужках), аналогічно рис. 1.5.

Після введення основного тексту (колір шрифту - чорний) і коментарів до нього (колір шрифту - гірчичний), закрийте вікно *Редактора Глобальних параметрів Проекту (Субмоделі)*, клацнувши "мишею" по кнопці *Застосувати* (2-га праворуч).

На цьому процедурі завдання Глобальних параметрів завершені.

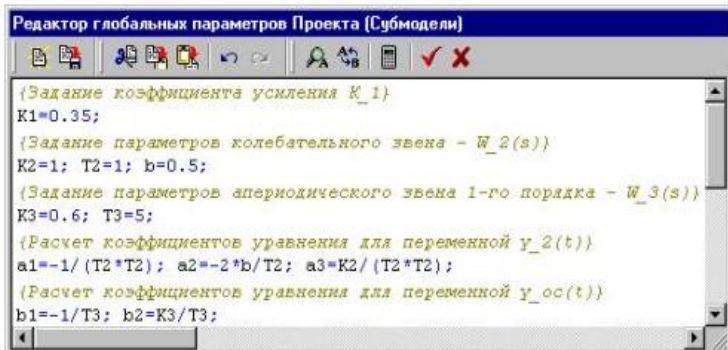


Рис. 1.5

Интерфейс Користувача у вікні Редактор Глобальних параметрів Проекту (Субмоделі) забезпечується 12-ма командними кнопками (див. рис. 1.5)

Якщо в проєкті якісь параметри САР задані як глобальні в Головному Схемному Вікні, то вони можуть бути використані для завдання параметрів конкретних блоків не тільки в цьому вікні, але й у всіх вкладених структурах (Субмоделах).

Якщо якийсь глобальний параметр (заданий у Головному Схемному Вікні) повторно заданий як глобальний у субмоделі ссхемному вікні, то останній перевизначає значення раніше заданого параметра і його можна використовувати для завдання параметрів конкретних блоків як у даному субмоделі ссхемному вікні, так і у всіх "дочірніх" субмоделах більше глибокого рівня вкладеності.

1.4. Формування рівнянь динаміки з використанням "Нового" блоку

З огляду на, те що неможливо сформувати абсолютно повну бібліотеку типових блоків, у ПК "МВТУ" розроблені засоби, які дозволяють Користувачеві розширити склад особистої бібліотеки за рахунок створення нових типів блоків, наприклад, за допомогою убудованого в ПК *Інтерпретатора математичних функцій*.

На базі *Інтерпретатора математичних функцій* функціонує й один з "нестандартних" типових блоків бібліотеки *Динамічні ланки*, а саме, "*Новий*" блок, що дозволяє прямо в процесі роботи створювати екземпляри блоків із своїми оригінальними математичними моделями.

Диалогове вікно цього блоку - повністю аналогічно вікну *Редактор Глобальних параметрів Проекту (Субмоделі)*. Користувач у текстовому виді запише рівняння динаміки у вигляді, близькому до їхнього запису ручкою на аркуші паперу.

Математичний опис блоку відповідає багатомірній нелінійній динамічній системі у формі Коші:

$$\begin{cases} x'(t) = f(x(t), u(t)) ; \\ y(t) = g(x(t), u(t)) , \end{cases}$$

де $f(x, u)$, $g(x, u)$ - відомі нелінійні функції змінних (x_1, x_2, \dots, x_n) і вхідних впливів (u_1, u_2, \dots, u_m) , причому як вхідні впливи можуть виступати й коефіцієнти (постійні або змінні), що входять у кожне з рівнянь (1.6).

Перше з рівнянь системи (1.6) може бути відсутнім: у цьому випадку "*Новий*" блок виконує алгебраїчні перетворення вхідних величин. Використання "*Нового*" блоку в якості функціонального досить ефективно у випадку наявності в моделі складних функціональних перетворень, коли використання для цих цілей елементарних функціональних типових блоків приведе до невиправданого ускладнення структурної схеми.

"*Новий*" блок "розпізнає" наступні стандартні математичні операції й функції:

+ - додавання;	abs - модуль;	sin - синус;	arcsin - арксинус;
- - вирахування;	sign - знак;	cos - косинус;	arccos - арккосинус;
* - множення;	exp - експонента;	tg - тангенс;	arctg - арктангенс;
/ - ділення;	ln - логарифм;	ctg - котангенс;	arcctg - арккотангенс;
^ - ступінь;	pi - 3.1415.....;	e - 2.71828.....;	() - дужки;

Додатково "Новий" блок "розпізнає" ряд спеціальних функцій:

time - модельний час;

step - зміщений ступінчастий вплив;

sqrt - корінь квадратний;

if - обчислення за умовою;

for - формування векторних даних за допомогою циклічних операцій;

interpol - інтерполяція даних (лінійна, статична).

Наприклад, запис $u = \text{step}(t_вкл, u_нач, u_кін)$; означає, що через час $t_вкл$ після початку моделювання змінна u змінить (стрибком) своє значення з $u_нач$ на $u_кін$. Параметри функції step можуть бути задані як у числовому виді, так і через іменовані параметри, значення яких повинні бути визначені вище по тексту в цьому ж вікні або вікні *Редактора Глобальних параметрів*.

Запис $pp = \text{if}(bb, a1, a2, a3)$ означає, що змінна pp приймає значення: $pp = a1$, якщо іменована змінна $bb < 0$;

$pp = a2$, якщо іменована змінна

$pp = a3$, якщо іменована змінна $bb > 0$.

В *Інтерпретатор математичних функцій* і, відповідно, в "Новий" блок справжньої версії ПК "МВТУ" входять 8 нових *спеціальних* функцій, що реалізують визначення основних термодинамічних властивостей води й водяної пари (відомі таблиці Вуколовича в докритичному діапазоні: тиску від 0.09 до 20 МПа й температури від 10 до 360 °С). Запис цих функцій має вигляд:

$\text{waterps}(P, \text{flag})$; - обчислення властивостей води по тиску на лінії насичення;

$\text{waterts}(T, \text{flag})$; - обчислення властивостей води по температурі на лінії насичення;

$\text{steamps}(P, \text{flag})$; - обчислення властивостей пари по тиску на лінії насичення;

$\text{steamts}(t, \text{flag})$; - обчислення властивостей пари по температурі на лінії насичення;

$\text{waterpt}(P, T, \text{flag})$; - обчислення властивостей води по тиску й температурі;

Наприклад, запис $v_{уд} = \text{waterps}(1e6,4)$; відповідає обчисленню *питомого об'єму* води $v_{уд}$ (flag дорівнює 4) на *лінії насичення* при тиску 1×10^6 Па (1 МПа=10 атм).

Значення параметра flag можуть змінюватися від 1 до 8 і відповідати обчисленню наступних термодинамічних характеристик води або водяної пари:

1 - тиск;	2 - температура;
3 - ентальпія;	4 - питомий обсяг;
5 - число Прандтля;	6 - динамічна в'язкість;
7 - коефіцієнт теплопровідності;	8 - ентропія.

$\text{waterph}(P,H,\text{flag})$; - обчислення властивостей води по тиску й ентальпії;
 $\text{steampt}(P,T,\text{flag})$; - обчислення властивостей пари по тиску й температурі;
 $\text{steamph}(P,H,\text{flag})$; - обчислення властивостей пари по тиску й ентальпії.

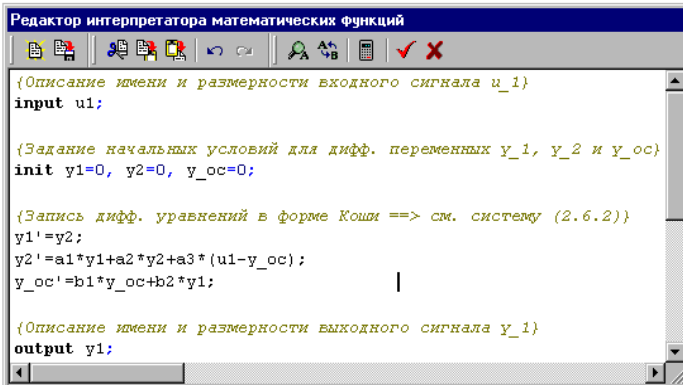
Освоєння процедур формування математичної моделі динаміки якогось пристрою або фрагмента робочого процесу з використанням *"Нового" блоку* розглянемо на прикладі формування рівнянь динаміки *Об'єкта Керування*, розташованого в субмодельному вікні 1-го рівня вкладеності (див. рис. 1.2).

Відкрийте субмодельне вікно *"Паралельна" САР*, перемістіть курсор на блок *Об'єкт Керування* (див. рис. 1.2) і виконайте 2-х кратне клацання *лівою* клавішею "миші": відкриється нове вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій*, у якому Ви повинні записати вирази і диференціальні рівняння, що відповідають математичній моделі даного блоку (система рівнянь (1.2)).

Панель інструментів (командні кнопки) вікна *Редактор інтерпретатора математичних функцій* і інтерфейс Користувача повністю ідентичні описаному вище вікну *Редактор Глобальних параметрів Проекту (Субмоделі)*.

Уведіть із клавіатури (у текстовому виді) математичну модель динаміки блоку *Об'єкт Керування*, як це показано на рис. 1.6, де представлена екранна

копія вікна *Редактор інтерпретатора математичних функцій* з математичною моделлю динаміки розглянутого блоку й коментарями до неї.



```
{Описание имени и размерности входного сигнала u_1}
input u1;

{Задание начальных условий для дифф. переменных y_1, y_2 и y_ос}
init y1=0, y2=0, y_ос=0;

{Запись дифф. уравнений в форме Коши ==> см. систему (2.6.2)}
y1'=y2;
y2'=a1*y1+a2*y2+a3*(u1-y_ос);
y_ос'=b1*y_ос+b2*y1;

{Описание имени и размерности выходного сигнала y_1}
output y1;
```

Рис. 1.6

Якщо *"Новий"* блок має входи (вхідні порти), то першим виконується рядок, що обов'язково містить оператор `input`, що описує вхідні сигнали данного блоку, включаючи ім'я входу і його розмірність.

Якщо *"Новий"* блок описує динаміку об'єкта моделювання у вигляді системи диференціальних рівнянь у формі Коші, то другим виконується рядок, що обов'язково містить оператор `init`, що описує початкові умови для динамічних (диференціальних) змінних, нижче по тексту для яких будуть записані звичайні диференціальні рівняння у формі Коші.

Якщо *"Новий"* блок має виходи (вихідні порти), то останнім виконується рядок, який, обов'язково містить оператор `output`, що описує вихідні сигнали з *"Нового"* блоку, включаючи імена виходів і їхні розмірності.

Якби *"Новий"* блок мав 2 векторних виходи (2-х жильний і 3-х жильний), то останнім виконувався рядок, що, мала б, наприклад, вид: `output z1[2], z2[3];`

У цьому випадку вище по тексту необхідно було визначити (розрахувати) всі тридцятилітні вихідних сигналів, наприклад:

$$z1[1]=a1+\sin(y1);$$

$$z1[2]=\exp(y2);$$

$$z2[1]=y1*y2;$$

$$z2[2]=\text{sqrt}(\text{abs}(y_{\text{oc}}));$$

$$z2[3]=(y2)^{a2};$$

Після уведення всього тексту у вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій* перемістіть курсор на командну кнопку Застосувати (2га праворуч) і зробіть клацання *лівою* клавішею "миші": вікно *Редактор інтерпретатора математичних функцій* закриється й відкриється субмодельне схемне вікно, у якому "*Новий*" блок буде мати один вхідний і один вихідний порту.

Якби "*Новий*" блок формував два виходи (наприклад, $z1$ і $z2 \implies$ див. вище), то зображення "*Нового*" блоку на структурній схемі мало б два вихідних порти. При орієнтації блоку " ліворуч-праворуч" 1-ий вихідний порт буде верхнім, а 2-ий вихідний порт - нижнім.

Завершіть оформлення субмодельного схемного вікна, з'єднавши всі блоки лініями зв'язку, а також увівши в діалоговому вікні блоку з підписом $W_1(s)$ нове значення коефіцієнта підсилення: k_1 . Структура прийме вид, аналогічний рис. 1.7.

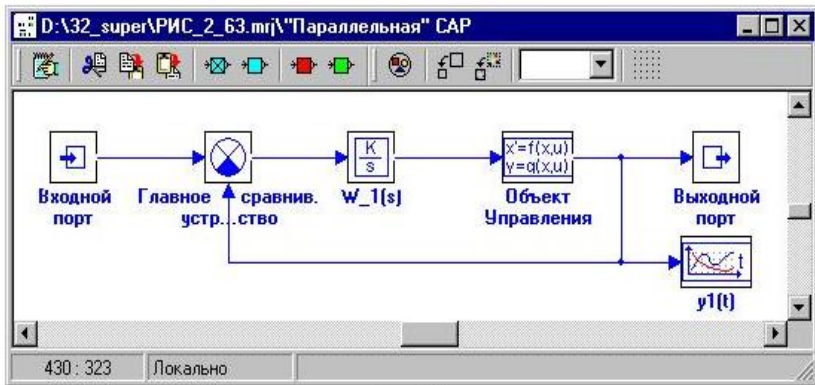


Рис. 1.7

Закрийте субмодельне схемне вікно (2-х кратним клацанням *лівої* клавіші "миші" у вільному місці схемного вікна) і переконайтеся, що в Головному Схемному Вікні коефіцієнт підсилення в блоці $W_1(s)$ дорівнює "оптимальному" ($k_1 = 0.35$). Клацанням "миші" по кнопці Продовжити запустить завдання на розрахунок і переконайтеся, що результати розрахунку

для "основної" і "паралельної" САР збігаються абсолютно. Для цього в діалоговому вікні *Настроювання* блоку *Графік $y(t)$* встановить для 1-ї лінії наступні параметри: тип лінії - суцільна подвійної товщини, колір лінії - рожевий, а для 2-ї лінії: тип лінії - пунктирна, колір - синій, накладені графіки розрахунку будуть мати вигляд, близький до рис. 1.8.

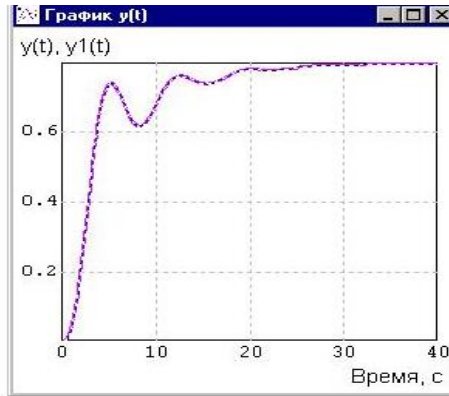


Рис. 1.8

Для створення математичної моделі робочого процесу, описуваного складними нелінійними диференціальними рівняннями зі змінними коефіцієнтами (наприклад, процеси теплогідродинаміки в елементах теплофізичного устаткування), доцільніше використовувати "Новий" блок тільки для формування правих частин системи диференціальних рівнянь (записаних у формі Коші).

У такому варіанті процедуру інтегрування можна реалізувати з використанням типового блоку *Інтегратор* (блок векторизований), розташованого за "Новим" блоком, причому вихідний сигнал блоку *Інтегратор* (звичайно векторний) подається на вхід "Нового" блоку, не створюючи алгебраїчної "петлі" (контуру).

Реалізуємо такий підхід для формування математичної моделі блоку *Об'єкт Керування* "паралельної" САР.

У верхній частині рис. 1.9 представлена екранна копія вікна *Редактор інтерпретатора математичних функцій*, у якому реалізований алгоритм обчислення правих частин диференціальних рівнянь, що описують динаміку блоку *Об'єкт Керування*.

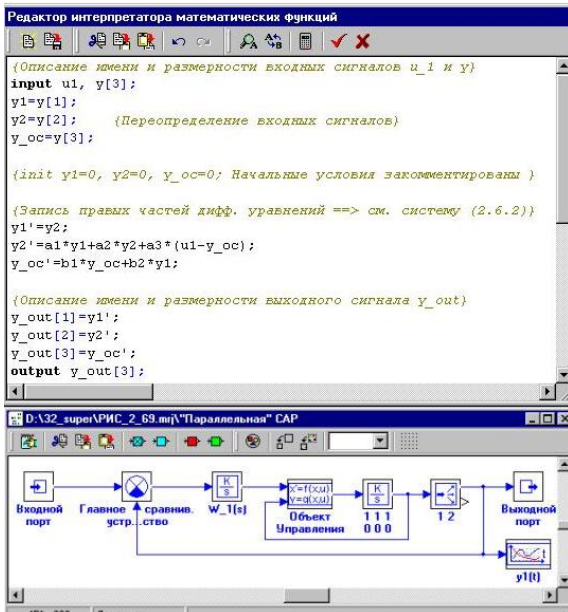


Рис. 1.9

Тільки зовні основний текст (у порівнянні з рис. 1.6) змінився незначно. Кардинальним чином змінився "зміст" символу апостроф: тепер запис $y1'$... позначає не перше диференціальне рівняння, а просто визначає нову змінну з ім'ям $y1'$. З'явився новий вхідний сигнал y , що є "рижильним" (векторним) і вводить в "Новий" блок значення динамічних змінних $y1$, $y2$ і $y_{ос}$ після кожного кроку інтегрування. На виході "Нового" блоку сформований векторний сигнал y_{out} з розмірністю, рівної трьом $y \implies = [y1 \ y2 \ y_{ос}]$.

Екранна копія субмодельного схемного вікна зі зміненою структурною схемою "паралельної" САР представлена в нижній частині рис. 1.9. Підпис під типовим блоком *Інтегратор* (у два рядки) "повідомляє", що даний блок виконує операцію інтегрування у "векторному" варіанті, причому в його діалоговому вікні встановлені коефіцієнти підсилення 1 1 1 (три числа 1 через пробіл) і нульові початкові умови (три числа 0 через пробіл). Блок *Демультіплексор* "витягає" з вектора сигнал $y1$.

Змініть текст у вікні *Редактора*. "Нового" блоку й скорегуйте структурну схему в субмодельному вікні, як це виконано на рис. 1.9.

Виконайте моделювання (кляцання по кнопці Продовжити) і переконайтеся, що графіки перехідних процесів (формовані блоком *Графік* $y(t)$ у Головному Схемному Вікні) в "основній" САР і в новій "паралельній" САР збігаються абсолютно.

Збережіть даний варіант проекту на жорсткому диску під новим ім'ям.

1.5. Формування рівнянь динаміки САР у змінних стану

Виконаємо **4-й етап** даного завдання, основною метою якого є освоєння методів формування рівнянь динаміки лінійних САР з використанням типового блоку *Змінних стану*. Для цього створимо другу "паралельну" САР, розташовану в Субмоделі "Паралельна" САР.

Відкрийте проект, структурна схема в субмоделному вікні якого має вигляд, подібний до схеми в нижній частині рис. 1.9.

Ініціалізуйте в "Лінійці" типових блоків закладку *Динамічні ланки* й перенесіть у субмоделне вікно типовий блок *Змінні стану*. З'єднавши блок лініями зв'язку й виконавши оформлення підписів, що пояснюють, додайте структурній схемі в субмоделному вікні вид, аналогічний рис. 1.10.

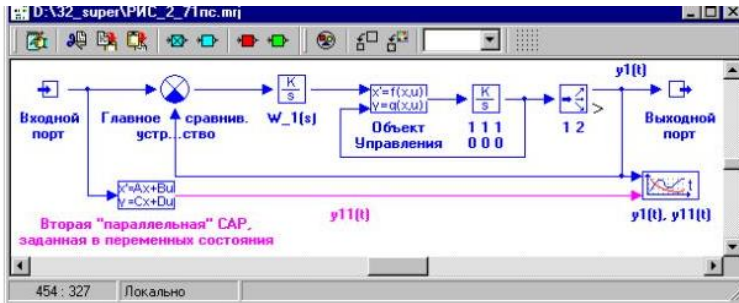


Рис. 1.10

Матриця також повинна представлятися як "особливий" вектор-рядок, що містить 4 елементи, кожен з яких є числовим вектором і тільки в даному завданні містить по одному елементу ==> див. нижче.

Завдання параметрів блоку *Змінні стану* виконаємо через механізм Глобальних параметрів. Перемістіть курсор на командну кнопку Параметри макроблоку в *Додатковій панелі інструментів* субмоделного схемного вікна й виконайте кляцання *лівою* клавішею "миші": відкриється вікно

Редактор *Глобальних параметрів*, Субмоделі "Паралельної" САР. Уведіть у вікно *Редактора*, текст, як це показано на рис. 1.11.

Оскільки коефіцієнти a_1, a_2, a_3, a_4 і K_1 визначені як глобальні у вікні *Редактор Глобальних параметрів*, Головного Схемного Вікна, у даному вікні *Редактора*, вони використовуються для завдання елементів матриці A , не рівних нулю або одиниці. Ліва частина рівняння $A1[4] = [0 \ a21 \ a31 \ a41]$ визначає, що векторна змінна $A1$ має 4 елементи, а права частина (у прямокутних дужках) задає значення цих елементів у числовому (0) або символьному виді ($a21$).

Увага! При завданні значень елементів будь-якої векторної змінної в символьному виді не допускається знак мінус перед символьним елементом.

Наприклад, запис $A1[4] = [0 \ a21 \ a31 \ -K1]$ є некоректним через останній елемент ($-K1$).

Якщо останній елемент вектора $A1$ задати в чисельному виді, то запис $A1[4] = [0 \ a21 \ a31 \ -0.35]$ є коректним.

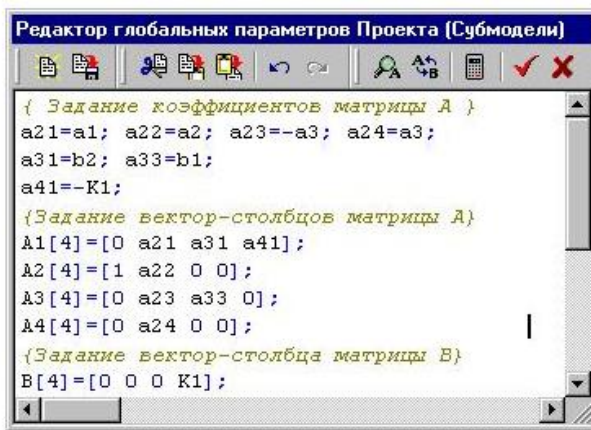


Рис. 1.11

Заповнивши вікно *Редактор Глобальних параметрів* субмоделного схемного вікна, закрийте його клацанням лівої клавіші "миші" по кнопці *Застосувати*: на екрані монітора знову з'явиться субмоделне схемне вікно.

Відкрийте діалогове вікно блоку *Змінні стану* й заповніть його діалогові рядки, що відповідають закладці *Параметри*, так само, як це виконано на

рис. 1.12, тобто задаючи всі елементи матриць A , B , C і D по стовпцях. У діалогових рядках будь-який вектор-стовпець показаний круглими дужками. За замовчуванням у діалоговому вікні між круглими дужками, що відокремлюють один вектор-стовпець від іншого, немає пробілу, однак для більшої наочності уведених даних рекомендується зробити 1...2 пробілу (як це виконано на рис. 1.12 при завданні матриці A).

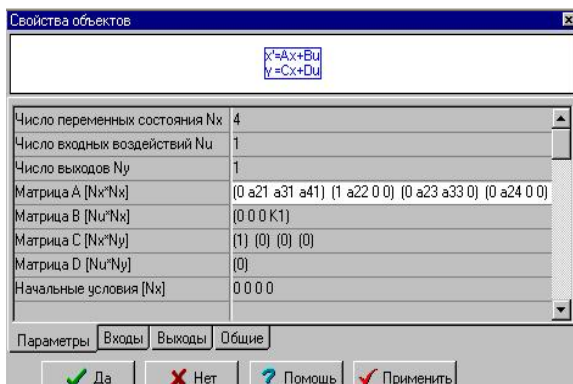


Рис. 1.12

Матриці A , B , C і D у діалоговому вікні можна задавати в більш компактному виді, використовуючи векторні змінні ($A1$, $A2$, $A3$, $A4$ і B), відображені як глобальні параметри у вікні *Редактор Глобальних*. ==> див. рис. 1.13.

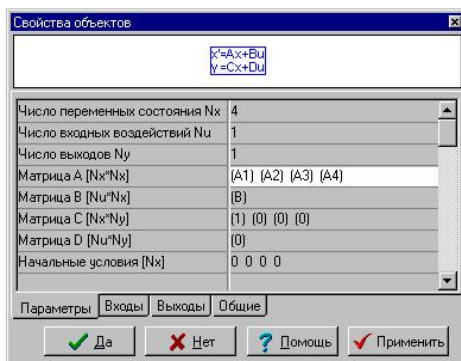


Рис. 1.13

Заповнивши діалогове вікно блоку *Змінні стану*, як це показано на рис. 1.12, закрийте його клацанням *лівої* клавіші "миші" по кнопці Так.

Запустіть завдання на розрахунок і переконайтеся, що графіки перехідних процесів в "паралельній" САР (заданої з використанням "*Нового*" блоку) і в другій "паралельній" САР (заданої з використанням блоку *Змінні стану*), збігаються абсолютно. Для цього в діалоговому вікні *Настроювання* блоку *Часовий графік* установіть для 1-ї лінії наступні параметри: тип лінії - суцільна подвійної товщини, а колір лінії - рожевий, а для 2-ї лінії: тип лінії - пунктирна, колір - синій. Накладені графіки розрахунку будуть мати вигляд, ідентичний рис. 1.8.

Примітка. Графіки перехідних процесів формуються блоком *Часовий графік* (підпис $yI(t)$, $yII(t)$), розташованих у субмоделльному схемному вікні (див. рис. 1.10). Абсолютний збіг графіків можна перевірити, перевівши графічне вікно в табличне (опція *Список* у падаючому меню *Графічного вікна*).

Знову відкрийте діалогове вікно блоку *Змінні стани* й змініть форму завдання матриць A і B на компактну (див. рис. 1.13). Повторіть процес моделювання й переконайтеся, що графіки перехідних процесів в "паралельній" САР і в другій "паралельній" САР (з компактним завданням матриць A і B) збігаються абсолютно.

Збережіть даний варіант проекту на жорсткому диску під новим ім'ям.

6. Реалізація "бездротової" передачі даних

Типовий блок *В пам'ять* використовувався в лабораторній роботі № 2 для завдання точок входу й виходу при розрахунку амплітудно-фазо-частотних характеристик САР і при обчисленні коефіцієнтів, полюсів і нулів передаточних функцій.

Однак основне призначення цього блоку - реалізація 1-го етапу "бездротової" передачі даних з однієї частини структурної схеми в іншу. Відповідно, типовий блок *З пам'яті* реалізує 2-ий етап "бездротової" передачі даних. Якщо застосувати радіотехнічну аналогію, то в механізмі "бездротової" передачі даних блок є "передавачем", а блок *З пам'яті* - "приймачем".

Насправді в ПК "МВТУ" реалізований наступний механізм. Після переносу в схемне вікно блоку *в пам'ять* й присвоєння ім'я змінної в

оперативній пам'яті ПЕВМ резервується певний динамічний масив. При запуску завдання на рахунок по розмірності сигналу на вході блоку *В пам'ять* визначається розмірність *іменованої змінної* й під неї виділяється відповідний обсяг оперативної пам'яті, у який у процесі моделювання будуть записуватися дані на кожному кроці розрахунку (кроці інтегрування).

Якщо в структурній схемі (або у субмодельному вікні) є присутнім типовий блок *З пам'яті*, то з його допомогою можна вважати *іменовані дані* з оперативної пам'яті й видати їх на вихід блоку *З пам'яті*. Потім за допомогою ліній зв'язку дані можуть бути передані на вхід іншого блоку, розташованого в цьому схемному вікні.

Освоєння процедур організації "бездротової" передачі даних виконаємо в рамках наступного невеликого завдання.

Переконайтеся, що проект, у якому структурна схема в субмодельному вікні має вигляд, аналогічний рис. 1.10, не закривайте його, а перейдіть у Головне Схемне Вікно, виконавши 2-х кратне клацання лівою клавішею "миші" у вільному місці субмодельного вікна. Якщо Ви закрили проект, то відкрийте його.

Перемістите курсор на лінію у зв'язки, що передає сигнал керуючого впливу на вхід Субмоделі "*Паралельна*" *САР* і виконайте клацання *правою* клавішею "миші", а потім у випадіючому меню виберіть опцію *Видалити лінію у зв'язку*, виконавши клацання *лівою* клавішею "миші": відгалуження лінії зв'язку до Субмоделі "*Паралельного*" *САР* буде вилучено.

Увага! У термінології, використовуваної в документації до ПК "МВТУ", прийнято розрізняти зв'язок (лінію зв'язку) і лінію у зв'язку. Головною відмінною ознакою є зв'язок, відзначений подвійним підкресленням. Зв'язок це одна лінія зв'язку, що вийшла з вихідного порту будь-якого блоку й закінчилася на вхідному порту якогось іншого блоку. Відгалуження від першої лінії зв'язку прийнято називати лінією у зв'язку.

Аналогічним чином видаліть зв'язок (першу і єдину лінію зв'язку), що з'єднує субмодель "*Паралельна*" *САР* і блок з підписом *Графік у(t)*.

Ініціалізуйте бібліотеку *Субструктури* й перенесіть у Головне Схемне Вікно *Макроблок*, розмістивши його, наприклад, у правому нижньому куті схемного вікна. Уведіть підпис "*Копія*" під цією субмоделлю (див. рис. 1.14).

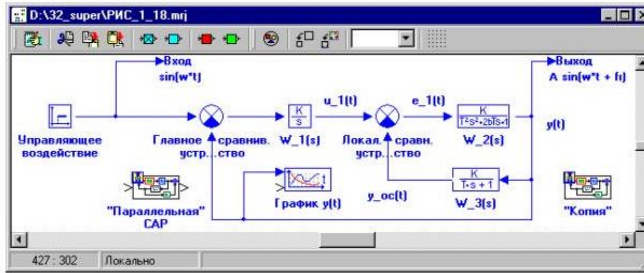


Рис. 1.14

Видаліть субмодель "Паралельна" САР (клацанням "мишею" по блоці й потім кнопці Вирізати).

Відкрийте схемне вікно Субмоделі "Копія", далі перемістіть курсор на командну кнопку Вставити (4-а ліворуч у Додатковій панелі інструментів субмодельного схемного вікна) і потім виконайте клацання лівою клавішею "миші" у поле субмодельного вікна: раніше вирізана субмодель "Паралельна" САР з'явиться в субмодельному вікні 1-го рівня вкладеності, а "внутрішній зміст" Субмоделі "Паралельна" САР (див. рис. 1.10) перейде в 2-ий рівень вкладеності. Перевірте це, відкривши субмодель "Паралельна" САР.

Перенесіть у субмодельне схемне вікно "Копія" з бібліотеки Субструктури блок На згадку, розташувачи його праворуч від Субмоделі "Паралельна" САР. Відкрийте його діалогове вікно й змініть ім'я змінної на Вихід_У.

Перенесіть у субмодельне схемне вікно "Копія" блок 3 пам'яті, розташувачи його ліворуч від Субмоделі "Паралельна" САР: блок поки не має ні піктограми, ні тексту всередині нього - тільки ініціалізовані чорні мітки по кутах. Відкрийте його діалогове вікно (2-х кратне клацання "мишею"). Виділіть у вікні Список-Джерело змінну Вхід (див. рис. 1.15) і потім клацніть по червоній одинарній стрілці :змінна Вхід перейде у вікно Список-Приймач (см. рис. 1.16).

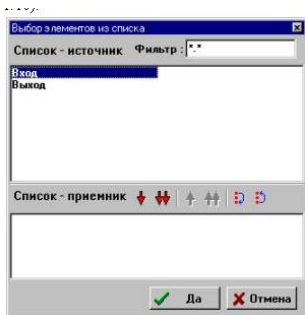


Рис 1.15

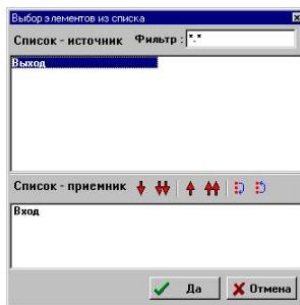


Рис 1.16

Пояснимо призначення командних кнопок (у вигляді стрілок) у діалоговому вікні типового блоку *3 пам'яті*:

Червона одинарна стрілка нагору (див. рис. 1.16) реалізує переміщення обраної змінної з вікна *Список-Приймач* у вікно *Список-Джерело*;

Червона подвійна стрілка униз реалізує переміщення всіх змінних, що перебувають у вікні *Список-Джерело* у вікно *Список-Приймач*, а червона подвійна стрілка нагору - переміщення всіх змінних, що перебувають у вікні *Список-Приймач* у вікно *Список-Джерело*;

Дві крайні кнопки праворуч призначені для примусового сортування змінних у вікні *Список-Приймач* (якщо змінних ≥ 2).

Увага!

1. При закритті діалогового вікна блоку *3 пам'яті* кількість вихідних портів на блоці буде дорівнювати кількості змінних у вікні *Список-Приймач*.

2. Блоки *в пам'ять* й *3 пам'яті* реалізують "бездротову" передачу як скалярних, так і векторних даних.

З'єднайте лініями зв'язку блоки *3 пам'яті* і *в пам'ять* із субмоделлю "*Паралельна*" *SAR*, як це показано на рис. 1.17.

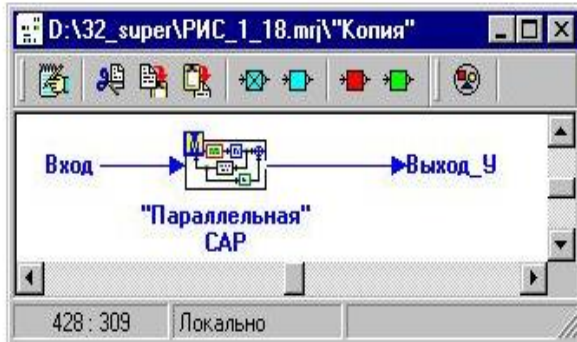


Рис. 1.17

Поверніться в Головне Схемне Вікно й перенесіть у нього блок *З пам'яті*, розташувавши його приблизно на те місце, де раніше була розміщена субмодель "Паралельна" САР. Відкрийте діалогове вікно блоку *З пам'яті* й перемістіть у вікно Список-Приймач змінну Вихід_У. З'єднайте вихід блоку *З пам'яті* із блоком *Графік y(t)*. Структурна схема прийме вид, аналогічний рис. 1.18.

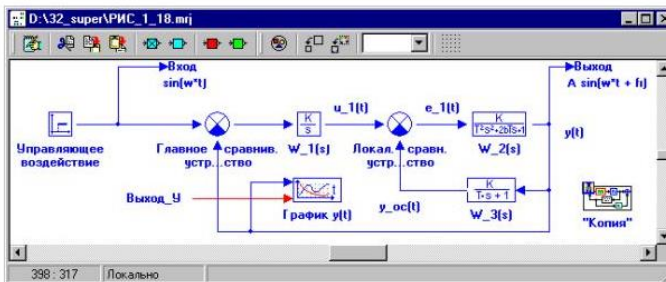


Рис. 1.18

На цьому "знайомство" із процедурами реалізації "бездротової" передачі даних завершено й можна переходити до виконання самостійної частини лабораторної роботи.

2. САМОСТІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІКИ САР ЗАДАНОЇ В ЗМІННИХ СТАНУ І У ФОРМІ КОШІ

У процесі виконання лабораторної роботи № 1 Ви сформували структурну схему найпростішої математичної моделі динаміки САР ядерного реактора. Оскільки завдання було Вами збережене на жорсткому диску, відкрийте "свою" модель динаміки САР ЯР, зовнішній вигляд структурної схеми якої (з точністю до Ваших художньо-оформлювальних здібностей) мав вигляд, що приблизно відповідає структурній схемі на рис. 2.1.

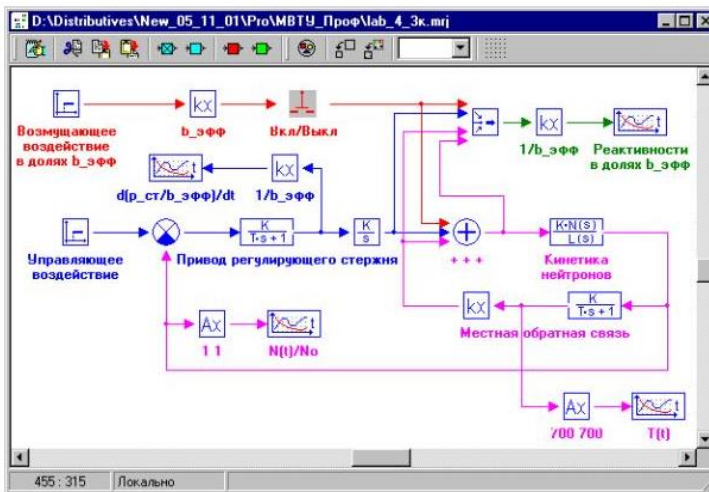


Рис. 2.1

Підписи під блоками, які формують перетворення й відображення сигналів (див. мал. 2.1) подають мінімальну інформацію, по якій Ви повинні "згадати" мету завдання в лабораторній роботі № 1 і застосовані Вами методи її рішення .

Проте, необхідно повторити вихідні рівняння й співвідношення, використання яких дозволило б Вам виконати лабораторну роботу № 1 і які, безсумнівно, необхідні Вам для виконання самостійного дослідження динаміки САР ЯР у даної лабораторній роботі.

Перехід до нормованих відхилень змінних і наступна лінеаризація диференціального рівняння для нормованих відхилень щільності нейтронів,

дозволяють представити математичну модель точочної кінетики нейтронів з одною ефективною групою запізнілих нейтронів у наступному виді:

$$\begin{cases} \frac{d\mathcal{N}(t)}{dt} = -\frac{\beta}{\ell} \cdot \mathcal{N}(t) + \frac{\beta}{\ell} \cdot \mathcal{Z}(t) + \frac{l}{\ell} \cdot \rho(t); \\ \frac{d\mathcal{Z}(t)}{dt} = \lambda \cdot \mathcal{N}(t) - \lambda \cdot \mathcal{Z}(t), \end{cases}$$

де $\beta_{эф}$ - ефективна частка запізнілих нейтронів; l - час життя миттєвих нейтронів; t - постійна розпаду ядер-попередників запізнілих нейтронів.

Місцевий зворотний зв'язок, обумовлений негативним температурним ефектом реактивності, описується наступними рівняннями:

$$\begin{cases} \rho_{oc}(t) = -\alpha \cdot [T(t) - T_o] = -\alpha \cdot T_o \cdot \left[\frac{T(t) - T_o}{T_o} \right] = -\alpha \cdot T_o \cdot \mathcal{T}(t); \\ \tau_{oc} \cdot \frac{dT(t)}{dt} = A \cdot \mathcal{N}(t) - T(t), \end{cases}$$

де: α - температурний коефіцієнт реактивності;

τ - стаціонарна температура палива в активній зоні й нормоване відхилення температури палива в активній зоні від стаціонару, відповідно;

$T_o, T(t)$ - постійна часу (інерційність) палива в активній зоні;

A - безрозмірний коефіцієнт.

Привод регулюючого стрижня (див. рис. 2.1) складається з електродвигуна постійного струму, редуктора, муфт, перетворювача руху, безпосередньо регулюючого стрижня й т.п., однак для спрощення завдання всі ці елементи об'єднані в одну ланку.

Нестационарні процеси в блоці (у ланці) *Привод регулюючого стрижня* описуються наступним диференціальним рівнянням:

$$\tau_{np} \cdot \frac{d^2 \rho_{cm}(t)}{dt^2} + \frac{d\rho_{cm}(t)}{dt} = K_{np} \cdot \varepsilon(t),$$

де: K_{np} – коефіцієнт швидкісної ефективності *Привода регулюючого стрижня*;

τ_{np} - постійна часу (інерційність) *Привода регулюючого стрижня*.

Необхідно відмітити, що хоча система рівнянь (2.1) і наведена до стандартної форми Коші, для включення її в повну систему рівнянь (описуючих динаміку всіх елементів розглянутої САР ЯР) необхідно виразити зміну реактивності $\rho(t)$ через її тридцятимільйонні $\rho_{cm}(t)$, $\rho_{oc}(t)$, $\rho_{возм}(t)$.

Рівняння, що описують динаміку місцевого зворотного зв'язку, вимагають "косметичної" редакції, а рівняння динаміки *Привода регулюючого стрижня* - переходу від опису в змінних "вхід-вихід" до змінних стану.

У самостійній частині даної лабораторної роботи кожній підгрупі необхідно виконати наступні етапи:

Виконати необхідні перетворення й записати математичну модель динаміки лінеаризованої САР у змінних стану, обчисливши всі елементи відповідних матриць (A, B, C і D) і векторів у символічному виді.

Перетворити структурну схему САР (див. рис. 2.1), додавши до неї "паралельну" САР ядерного реактора, описану повністю в змінних стану (з використанням типового блоку *Змінні стану* й завданням матриць A, B, C і D через механізм Глобальних параметрів у компактній формі).

Виконати моделювання перехідних процесів в "основній" САР (описуваної в змінних "вхід-вихід") і в "паралельній" САР (описуваної в змінних стану) при подачі керуючого впливу $\Delta u(t) = 0,05 \cdot u_0 \cdot I(t)$, побудувавши в одному *Графічному вікні* тимчасові залежності $N(t)/N_0$ для обох САР, а в іншому *Графічному вікні* тимчасові залежності $T(t)/T_0$ для обох САР, відповідно (виконуючи накладання графіків).

Виконати моделювання перехідних процесів в "основній" САР (описуваної в змінних "вхід-вихід") і в "паралельній" САР (описуваної в змінних стану) при подачі збурювання по реактивності $\rho_{возм}(t) = 0,1 \cdot \beta_{эфф} \cdot I(t)$, побудувавши в одному *Графічному вікні* тимчасові залежності $N(t)/N_0$ для обох САР, а в іншому *Графічному вікні* тимчасові залежності $T(t)/T_0$ для обох САР, відповідно (виконуючи накладання графіків).

Сформувати в середовищі ПК "МВТУ" новий проект (завдання), що описує математичну модель динаміки лінеаризованої САР у змінних стану з використанням типового блоку *Змінні стану*, а математичну модель нелінеаризованої САР - у формі Коші з використанням *"Нового" блоку*.

Примітки.

Формування в новому проєкті математичної моделі динаміки лінеаризованої САР у змінні стани доцільно реалізувати, використовуючи процедури копіювання в наступній послідовності: спочатку скопіювати у вікно *Редактор Глобальних параметрів Проєкту (Субмоделі)* нового проєкту зміст аналогічного вікна з попереднього проєкту, а потім скопіювати в Схемне вікно нового проєкту блок *Змінних стану* з попереднього проєкту.

Математична модель нелінеаризованої САР виходить із рівнянь динаміки лінеаризованої САР. Для цього необхідно "повернути" у лінеаризовані рівняння, відкинуті при лінеаризації, малі порядки.

Виконати моделювання перехідного процесу в лінеаризованій САР і в нелінеаризованій САР при подачі керуючого впливу $\Delta u(t) = 0,05 \cdot u_0 \cdot I(t)$, зрівнявши на одному графіку тимчасові залежності $N(t)/N_0$, а на іншому графіку тимчасові залежності $d[\rho_{\text{возм}}(t)/\beta_{\text{эфф}}]/dt$ для обох варіантів математичних моделей динаміки САР, відповідно (використовуючи накладення графіків).

Виконати моделювання перехідного процесу в лінеаризованій САР і в нелінеаризованій САР при подачі впливу, $\rho_{\text{возм}}(t) = 0,1 \cdot \beta_{\text{эфф}} \cdot I(t)$, зрівнявши на одному графіку тимчасові залежності $N(t)/N_0$, а на іншому графіку тимчасові залежності $d[\rho_{\text{возм}}(t)/\beta_{\text{эфф}}]/dt$ для обох варіантів математичних моделей динаміки САР, відповідно (використовуючи накладення графіків).

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 4

ДИНАМІЧНІ СИСТЕМИ ІЗ ЗАПІЗНЮВАННЯМ. ДОСЛІДЖЕННЯ ДИНАМІЧНИХ ЗАВДАНЬ МЕТОДАМИ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ

Мета роботи:

- вивчення математичного опису динаміки особливих лінійних систем, включаючи:
 - математичний опис *Ідеально запізнюючої ланки*;
 - апроксимація *Ідеально запізнюючої ланки* ланцюгом послідовно з'єднаних *Аперіодичних ланок 1-го порядку*;
 - визначення критичного значення постійного запізнювання;
 - аналіз впливу величин постійного запізнювання на якість перехідних процесів у лінійної САР із запізнюванням;
- вивчення математичної моделі блоку *Змінне транспортне запізнювання*;
- самостійне дослідження перехідних процесів у відомих динамічних завданнях з використанням методів структурного моделювання, включаючи:
 - дослідження поведінки нелінійних систем у тимчасовій області;
 - дослідження поведінки нелінійних систем на фазовій площині.

1. АНАЛІЗ ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ ІЗ ЗАПІЗНЮВАННЯМ

1.1. Блок *Ідеально запізнюючої ланки*

Рівняння динаміки ідеально запізнюючої ланки записується у вигляді найпростішого лінійного диференціального рівняння в частинних похідних:

$$\frac{\partial T(x, t)}{\partial t} + u \cdot \frac{\partial T(x, t)}{\partial x} = 0,$$

де $T(x, t)$ – якась скалярна субстанція (наприклад, температура потоку), що змінюється з постійною швидкістю u ; x – поздовжня координата.

Якщо, наприклад, розглядається транспортний перенос скалярної субстанції в трубопроводі постійного перетину й довжиною L , то математична модель динаміки переносу може бути представлена в змінних

“вхід-вихід” наступною трансцендентною передаточною функцією (передаточною функцією ідеально запізненої ланки):

$$W(s) = \frac{T(L, s)}{T(0, s)} = e^{-\tau \cdot s},$$

де $T(L, s)$ – зображення по Лапласові сигналу на виході із трубопроводу; $T(0, s)$ – зображення по Лапласові сигналу на вході в трубопроводу; $\tau = L / u$ – постійна запізнювання (час транспортування).

Часто передаточну функцію ідеально запізненої ланки апроксимують типовими лінійними ланками, наприклад, ланцюгом з n послідовно з’єднаних аперіодичних ланок 1-го порядку:

$$W(s) \cong \frac{1}{[\tau / n + 1]^n}.$$

У навчальній літературі нерідко затверджується, що якщо $n = 6 \dots 8$, то цього досить для апроксимації передаточної функції ідеально запізненої ланки. Покажемо, що це не зовсім так.

Сформуйте “з чистого схемного вікна” структурну схему, подібну рис.1.1.

На 1-у етапі перенесіть із “Лінійки” типових блоків у Схемне вікно необхідні блоки, розташуйте їх на необхідні місця й з’єднайте лініями зв’язку.

Другий етап вимагає пояснень. Головна особливість структурної схеми на рис. 1.1. – використання векторизованої обробки й передачі даних.

Перемістіть курсор на кнопку Параметри макроблоку в Додатковій панелі інструментів і виконайте клацання лівою клавішею “миші”: відкриється вікно Редактора глобальних параметрів Проекту (Субмоделі). Введіть із клавіатури текст, ідентичний наведеному на рис. 1.2 ($n_1=8$; $n_2=20$);). Числа n_1 і n_2 задають кількість послідовно з’єднаних аперіодичних ланок 1-го порядку у двох паралельних ланцюгах, що апроксимують властивості ідеально запізненої ланки. Закрийте вікно Редактора.

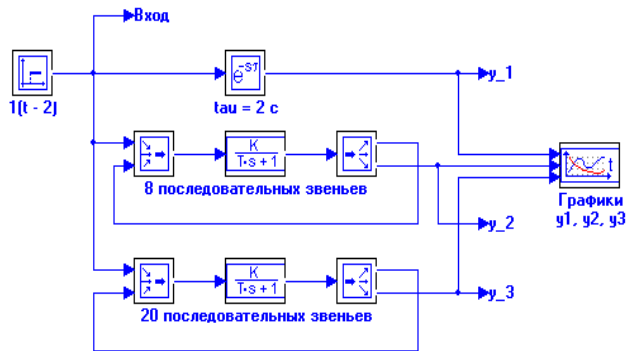


Рис. 1.1

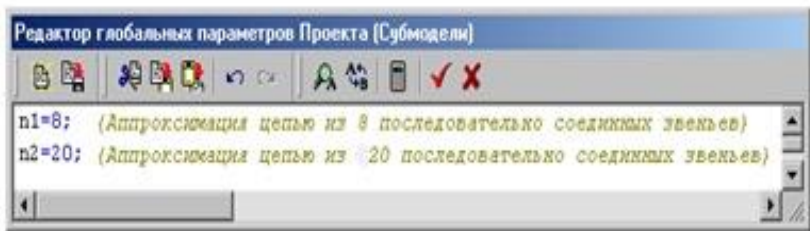


Рис. 1.2

Відкрийте діалогове вікно блоку *Сходінка* й введіть у діалоговому рядку параметри одиничного ступінчастого впливу (через пробіл): 2 0 1 (Час, Y_0 , Y_1). Введене означає, що через 2 с після початку моделювання сигнал на виході блоку стрибком зміниться з 0 (нуля) до 1 (одиниці).

Відкрийте діалогове вікно блоку *Ідеальне запізнювання* й введіть в 1-ому рядку число 2 (два), що означає, що даний блок реалізує постійне запізнювання 2 с.

Число введене в другому діалоговому рядку задає початковий розмір стека даних, у який будуть записуватися дані на вході блоку після кожного кроку інтегрування. Якщо стек заповниться повністю, то він буде збільшений до 1200, якщо знову заповниться – до 1400 і т.д. Вихідний сигнал визначається лінійною інтерполяцією значень у стеці даних. Залишіть початковий розмір стека (за замовчуванням).

Відкрийте діалогове вікно верхнього блоку *Аперіодична ланка 1-го порядку* (8 послідовних ланок) і заповніть так само, як це виконано на рис.1.3.

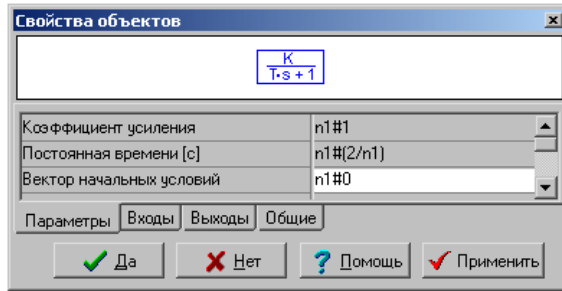


Рис. 1.3

В 1-ому діалоговому рядку (*Коефіцієнт підсилення*) введене $n1\#1$. Це означає, що в даному рядку введений числовий вектор з $n1$ (8) одиниць (1). Можна було ввести даний рядок і так: 1 1 1 1 1 1 1 1 (через пробіл). Символ # у діалогових рядках еквівалентний слову “по” ==> $n1$ – елементів по 1

В останньому діалоговому рядку (*Вектор початкових умов*) аналогічним образом заданий вектор з $n1$ (восьми) нулів.

У середній (в 2-у) діалоговому рядку заданий вектор з $n1$ (восьми) однакових постійних часу, рівних $2/n1 = 2/8 = 0.25$ с.

За аналогією з попереднім заповнить діалогове вікно для іншого блоку Аперіодична ланка 1-го порядку (див. рис. 1.4 нижче по тексту). Очевидно, що даний блок призначений для апроксимації ідеально запізнілої ланки ланцюгом з 20-ти послідовно з’єднаних аперіодичних ланок 1-го порядку.

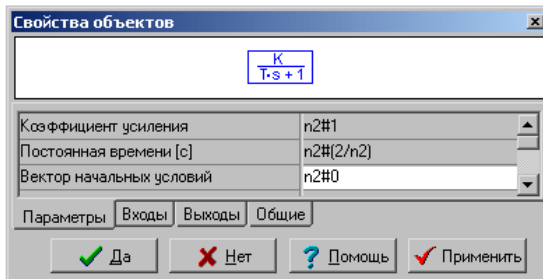


Рис. 1.4

Відкрийте діалогове вікно блоку Мультиплексор у ланцюзі, що реалізує 8 послідовно з'єднаних ланок, і заповніть діалоговий рядок, як це виконано на рис 1.5.

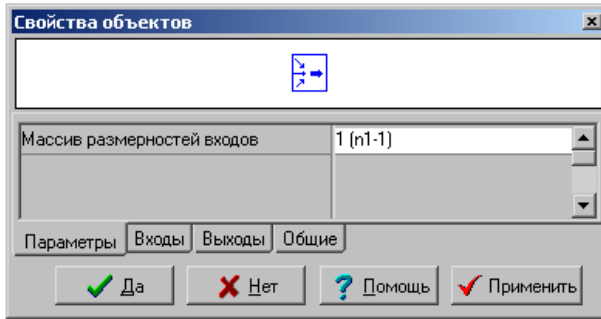


Рис. 1.5

Відкрийте діалогове вікно блоку Демультимплексор і заповніть його, як це показано на рис. 1.6.

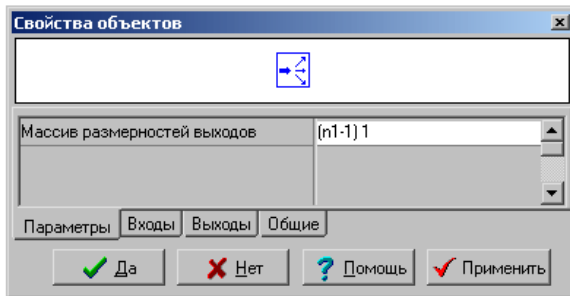


Рис. 1.6

Прокоментуємо введені параметри в останніх двох блоках.

Оскільки алгоритм роботи верхнього блоку *Аперіодична ланка 1-го порядку* (див. рис. 1.3) – векторизований, то на вхід блоку повинен надходити векторний сигнал, розмірністю $n1$ (8). Тому до скалярного сигналу від блоку *Сходінка* необхідно додати $(n1-1)$ сигналів, щоб після блоку *Мультиплексор* векторний сигнал мав розмірність $n1$.

Векторний сигнал, що надходить на 2-гий (нижній) порт блоку *Мультиплексор* сформований з $(n-1)$ на 1-ом вихідному порту блоку *Демультимплексор* (див. рис. 1.1).

Сигнал від блоку сходинок надходить на 1-у “жилу” вхідного порту \implies далі “прохід” через *Аперіодичну ланку* \implies далі сигнал 1-ї вихідної “жили” *Демультимплексора* подається на 2-у вхідну “жилу” *Мультиплексора* \implies далі “прохід” через *Аперіодичну ланку* \implies далі сигнал 2-ї вихідної “жили” *Демультимплексора* подається на 3-ю вхідну “жилу” *Мультиплексора* й т.д.

У підсумку на другому вихідному порту блоку *Демультимплексор* буде сигнал, що $n-1$ -раз “пройшов” через *Аперіодичну ланку 1-го порядку*

За аналогією з рис. 1.5 і рис. 1.6 заповніть діалогові вікна блоків *Мультиплексор* і *Демультимплексор* у ланцюги, що апроксимують ланку ідеального запізнення 20-ма послідовно з’єднаними ланками.

На цьому формування структурної схеми і її параметрів завершено.

Перемістіть курсор на командну кнопку Параметри розрахунку й заповніть діалогове вікно так само, як це виконано на рис. 1.7.

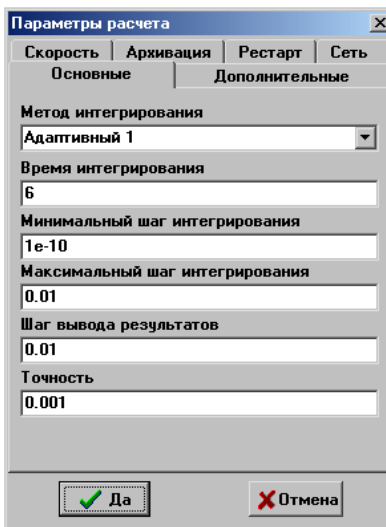


Рис. 1.7

Заповнивши вікно Параметри розрахунку, закрийте його клацанням “миші” по кнопці Так.

Запустіть завдання на розрахунок. Миттєво в графічному вікні відобразяться результати розрахунку. Використовуючи процедури редагування графічного вікна, додайте йому вид, близький рис. 1.8, де лінії: пунктирна – ланцюг з 8 блоків, суцільна – з 20 блоків.

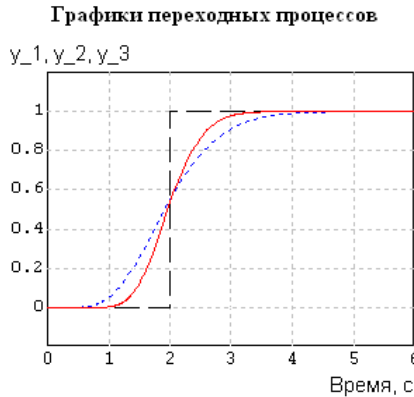


Рис. 1.8

Порівняння графіків перехідних процесів показує, що навіть при апроксимації блоку *Ідеально запізнювання* ланцюгом з 20-ти послідовно з'єднаних ланок “фронт” стрибка істотно “розмитий”, а при апроксимації ланцюгом з 8-ми блоків – тим більше.

Аналіз: порівняння даних результатів розрахунку показало, що вищезгадане твердження про достатність для апроксимації ланцюга з 6...8 послідовно з'єднаних *Аперіодичних ланок 1-го порядку* є фактично некоректним для вхідних впливів типу “сходінка”.

Доповнимо порівняння динамічних властивостей “класичного” *Ідеально запізнюючої ланки* і його “апроксиматорів” зіставленням амплітудно-фазових частотних характеристик.

На структурній схемі (див. рис. 1.1) блоки в пам'ять використовуються для вказівки точки входу й точок виходу при розрахунку частотних характеристик.

Оскільки Ви вивчили процедури роботи в режимі АНАЛІЗ, докладних інструкцій не потрібно.

Ви повинні самостійно й *правильно* виконати розрахунок амплітудно-фазових частотних характеристик для ланок.

На рис. 1.9...рис. 1.11 (у якості “еталона” для Ваших графіків) наведене порівняння годографів АФЧХ (годографів Найквіста), фазових частотних характеристик (ФЧХ) і логарифмічних амплітудних характеристик (ЛАХ), відповідно. Штриховими лініями представлені характеристики *Ідеально запізнлої ланки*, пунктирними лініями – для ланцюга з 8 ланок, і суцільною лінією – для ланцюга з 20 блоків.

Виконайте оформлення Ваших графіків подібно рис. 1.9 - рис. 1.11.

Аналіз графіків частотних характеристик показує, що в області низьких частот (менш 1.0 с^{-1}) апроксимуючі ланцюги близькі до *Ідеальної запізнлої ланки*.

При високочастотних вхідних впливах апроксимуючі ланцюги дають менше значення фазового зрушення й істотно різке ослаблення по амплітуді.

Тому: вищенаведене твердження про достатність для апроксимації ланцюга з 6...8 послідовно з'єднаних Аперіодичних ланок 1-го порядку є відносно коректним тільки для вхідних впливів, що повільно змінюються.

1.2. Визначення стійкості лінійних систем із запізнюванням

У минулих лабораторних роботах вивчення основних процедур роботи в середовищі ПК “МВТУ” Ви проводили в рамках демонстраційно-ознайомлювального завдання, у якій структурна схема САР, близька до рис. 1.12.

Об'єкт керування з передатною функцією $W2(s)$, відповідав типовій ланці (коливальному) з параметрами: $k2 = 1.0$; $T2 = 1 \text{ с}$; параметр демпфірування $b = 0.5$; початкові умови – нульові.

Місцевий зворотний зв'язок з передатною функцією $W3(s)$, відповідала типовій ланці – аперіодичній 1-го порядку з параметрами: $k3 = 0.6$; $T3 = 5 \text{ с}$.

Годографы Найквиста

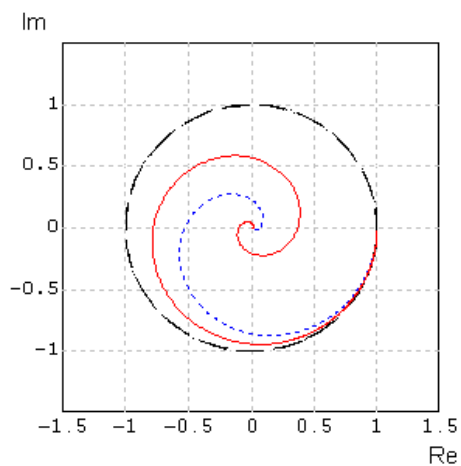


Рис. 1.9

ФЧХ

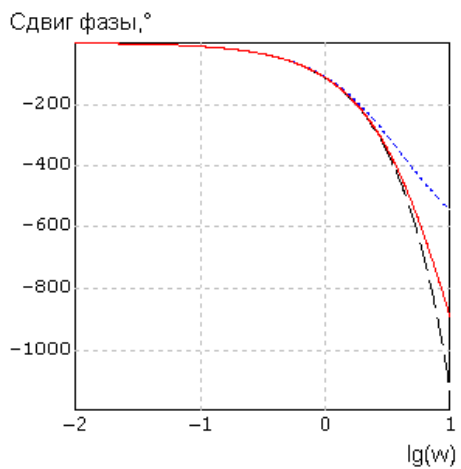
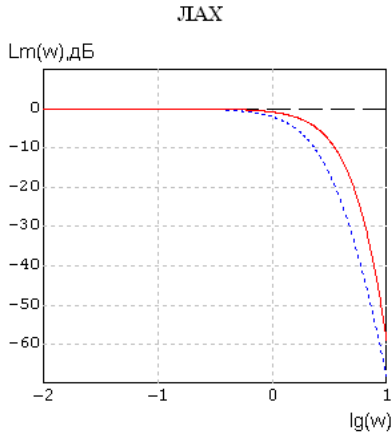


Рис. 1.10



Локальний елемент порівняння, забезпечував негативний зворотний зв'язок, тобто “працював” у режимі звичайного віднімання.

У ході виконання ознайомлювального завдання Ви підібрали коефіцієнт підсилення kI інтегруючого регулятора ($W_I(s)$) таким чином, що при подачі ступінчастого керуючого впливу $u(t) = 0.8 * 1(t)$ перегулювання було відсутнє (тобто $u_{max} \leq 0.8$) і час перехідного процесу не перевищувало 20 с. Значення коефіцієнта підсилення kI інтегруючого регулятора виявилось рівним 0.35.

У даній лабораторній роботі Вами має бути скореговано структурну схему САР, додавши в “пряму” ланцюг *Ідеальну запізнілу ланку*.

Структурна схема скорегованої САР повинна мати вигляд, близька до рис. 1.13.



Рис. 1.13

Ви повинні виконати наступні етапи:

1. Ви повинні знову сформуванати математичну модель динаміки “знайомої” САР (зі знайденим раніше “оптотиристорним” значенням $kI=0.35$).
2. Визначити критичне значення постійного запізнювання $\tau_{крит}$ в *Ідеальній запізнiлiй ланцi*.
3. Варіюючи постійне запізнювання в *Ідеальній запізнiлiй ланцi* в межах $0.1\tau_{крит} - 0.9\tau_{крит}$ (4 значення) виконати моделювання перехідних процесів.
4. Виконати аналіз отриманих результатів.

1.3. Блок Змінне транспортне запізнювання

Блок *Ідеальна запізнiла ланка* є найпростішим і описує динаміку трубопроводу тільки при постійній витраті теплоносія. Насправді витрата теплоносія в теплогiдрaвлiчних контурах енергетичних установок у перехідних режимах, в основному, є змінним у часі.

Тому в ПК “МВТУ” реалізований блок *Змінне транспортне запізнювання*, математична модель динаміки якого описується рівнянням

$$\frac{\partial y(z, t)}{\partial t} + u(t) \cdot \frac{\partial y(z, t)}{\partial z} = -\lambda \cdot y(z, t)$$

і заснована на допущенні про сталість лінійної швидкості переносу субстанції, що розпадається, у межах ділянки для кожного моменту часу при граничних умовах і початкових умовах. У рівнянні (1.4) $y(t)$ – стерпна скалярна субстанція, $u(t)$ – швидкість переносу, L – довжина ділянки переносу скалярної субстанції, z – просторова (поздовжня) координата.

Після уведення безрозмірної просторової координати $x=z/L$ і миттєвого часу переносу скалярної субстанції в межах ділянки $\tau(t)=L/u(t)$ рівняння запишеться як

$$\frac{\partial y(x,t)}{\partial t} + \frac{1}{\tau(t)} \cdot \frac{\partial y(x,t)}{\partial x} = -\lambda \cdot y(x,t),$$

а початкові умови приймають вид:

$$y(z, 0) = y_0(x), \quad x \in [0, 1]$$

Уводячи додаткове диференціальне рівняння для *нової* змінної θ

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{1}{\tau(t)},$$

диференціальне рівняння приймає вид:

$$\frac{\partial y(x, \theta)}{\partial \theta} + \frac{\partial y(x, \theta)}{\partial x} + \lambda \cdot \tau(t) \cdot y(x, \theta) = 0.$$

Використовуючи перетворення Лапласа, одержуємо рішення у вигляді:

$$y_{\hat{a}\hat{\delta}\hat{o}}(t) = y(1,0) = y_{\hat{a}\hat{\delta}\hat{o}}(\hat{a} - \tau_{\hat{c}\hat{a}\hat{i}}(t)) \cdot \exp(-\lambda \cdot \tau_{\hat{c}\hat{a}\hat{i}}(t)) = y(0, \theta - 1) \cdot \exp(-\lambda \cdot \tau_{\hat{c}\hat{a}\hat{i}}(t))$$

де співмножник $y(0, \theta - 1)$ описує обумовлену *тільки транспортним запізнюванням*, а співмножник $\exp(-\lambda \cdot \tau_{\hat{c}\hat{a}\hat{i}}(t))$ описує ослаблення вихідного сигналу блоку, обумовлене *тільки розпадом* субстанції за час її перебування в межах ділянки транспортного запізнювання.

Блок *Змінне транспортне запізнювання*, включений у бібліотеку *Нелінійні ланки*, векторизований і має 2 вхідних і 2 вихідних порти.

На 1-ий вхідний порт подається сигнал, що відповідає значенню скалярної субстанції на вході в ділянку транспортування. На 2-й вхідний порт подається сигнал, що відповідає значенню *миттєвого* часу переносу скалярної субстанції в межах ділянки транспортування.

На 1-ому вихідному порту формується сигнал, що відповідає значенню скалярної субстанції на виході з ділянки транспортування. На 2-ому

вихідному порту формується сигнал, що відповідає значенню часу перебування “мітки” скалярної субстанції в межах ділянки транспортування.

Блок *Змінне транспортне запізнювання* має 2 діалогові рядки. Для роботи блоку необхідно задати:

в 1-ому діалоговому рядку – вектор постійних розпадів в секундах;

в 2-ому діалоговому рядку – початковий розмір стека.

За замовчуванням блок *Змінне транспортне запізнювання* реалізує алгоритм перетворення скалярного вхідного сигналу для скалярної субстанції, що не розпадається.

Якщо значення *миттєвого* часу переносу скалярної субстанції в межах ділянки транспортування постійне, то даний блок реалізує математичну модель блоку *Ідеальна запізніла ланка*.

З іншого боку, якщо задати в *Ідеальній запізній ланці* значення часу запізнювання через *механізм Глобальних параметрів*, то ця ланка може реалізувати математичну модель блоку *Змінне транспортне запізнювання*.

Перевіримо вищенаведені твердження. Для цього створіть новий проект і перенесіть у Головне Схемне вікно: з бібліотеки *Джерела* блоки *Синусоїда* й *Довільний кусочно-лінійний вплив*; з бібліотеки *Динамічні ланки* блок *Ідеальна запізніла ланка*; з бібліотеки *Нелінійні ланки* блок *Змінне транспортне запізнювання*; з бібліотеки *Субструктури*; з бібліотеки *Дані* блок *Часовий графік*.

Перемістіть курсор “миші” у вільне місце Схемного вікна й виконайте клацання *правою* клавішею: відкриється *Додаткове командне меню* Схемного вікна, у якому необхідно вибрати опцію *Зовнішні сигнали* (рис. 1.14). Далі перемістіть курсор на верхню кнопку зі стрілкою в правій частині діалогового вікна *Вхідні сигнали моделі* й виконайте клацання *лівою* клавішею “миші”: з’явиться таблиця, у першій колонці якої – номер рядка (1), у другій колонці – *Ім’я сигналу* (U1), а в третій колонці – *Значення за замовчуванням* (0). Скорегуйте *Значення за замовчуванням* і введіть 2 (див. рис. 1.14).

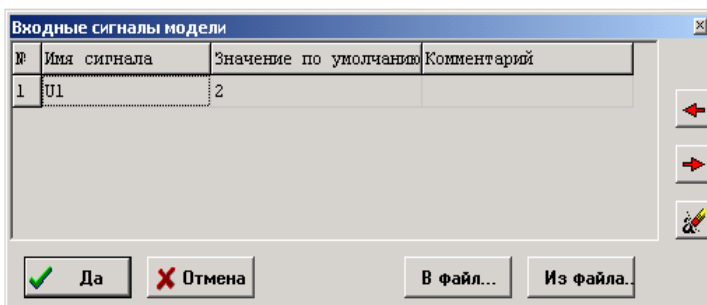


Рис. 1.14

Закрийте це діалогове вікно, виконавши клацання “мишею” по кнопці Так.

Перемістіть курсор на блок $Y \rightarrow U$ і відкрийте його діалогове вікно 2-х кратним клацанням “миші”. Використаємо крайню ліву кнопку (зі стрілкою вниз) у середній частині діалогового вікна (рис. 1.15) перемістіть U1 у Список-Приймач і далі клацанням “миші” по кнопці Так закрийте діалогове вікно: у блоку з’явився *Вхідний порт*. З’єднайте блоки лініями зв’язку, як це виконано на рис. 1.16.

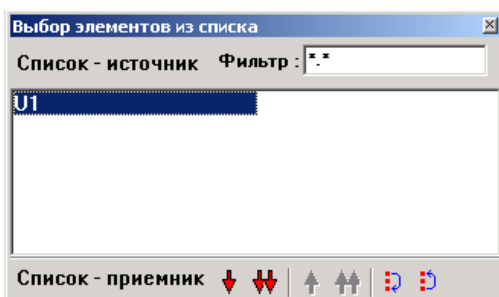


Рис. 1.15

Відкрийте вікно Редактора Глобальних параметрів Проект і введіть із клавіатури: tau=U1. Закрийте вікно Редактору.

Відкрийте діалогове вікно блоку *Синусоїда* й уведіть (через пробіл) значення амплітуди (1), частоти (0.5) і зрушення фази (0). Закрийте це діалогове вікно.

Відкрийте діалогове вікно блоку *Довільний кусочно-лінійний вплив* і введіть у першому рядку (через пробіл) 0 5 10 20 25 40, а в другому

діалоговому рядку (також через пробіл) 2 2 5 5 2 2. Закрийте це діалогове вікно.

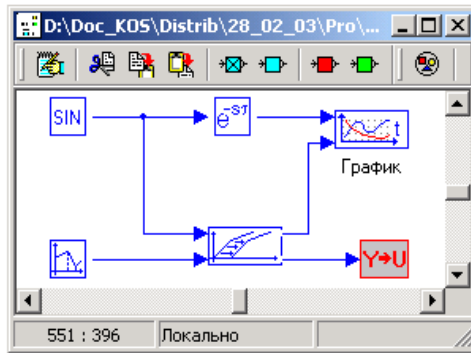


Рис. 1.16

Параметри блоку *Довільний кусочно-лінійний вплив* формують закон зміни *миттєвого* часу запізнювання в блоці *Змінне транспортне запізнювання*:

- на інтервалі 0...5 секунд *миттєвий* час запізнювання постійно дорівнює 2 с;
- на інтервалі 5...10 секунд *миттєвий* час запізнювання лінійно росте від 2 с до 5 с;
- на інтервалі 10...20 секунд *миттєвий* час запізнювання постійно дорівнює 5 с;
- на інтервалі 20...25 с *миттєвий* час запізнювання лінійно убуває від 5 с до 2 с;
- на інтервалі 25...40 секунд *миттєвий* час запізнювання постійно дорівнює 2 с.

Відкрийте діалогове вікно блоку *Ідеальна запізнана ланка* й введіть в 1-ому діалоговому рядку (*Вектор часів запізнювання*) раніше задане ім'я Глобального параметра tau. Відзначимо, що насправді параметр tau у процесі моделювання буде змінним, тому що його значення чисельно дорівнює фактичному часу запізнювання в блоці *Змінне транспортне запізнювання*.

Відкрийте діалогове вікно *Параметри розрахунку* й введіть: *Час інтегрування* – 40 с; *Мінірисний крок інтегрування* – 0.01 с; *Максирисний крок інтегрування* – 0.01 с; *Крок виводу результатів* – 0.01 с. Інші параметри – за замовчуванням.

Не забудьте зберегти проект на диск під оригінальним ім'ям.

Виконайте розрахунок перехідного процесу (кляцання по кнопці Продовжити). Якщо Ви виконаєте оформлення графічного вікна, то його вид буде подібний рис. 1.17. Дані розрахунку показують, що блок *Ідеальна запізнiла ланка* фактично реалізував математичну модель блоку *Змінне транспортне запізнювання*.

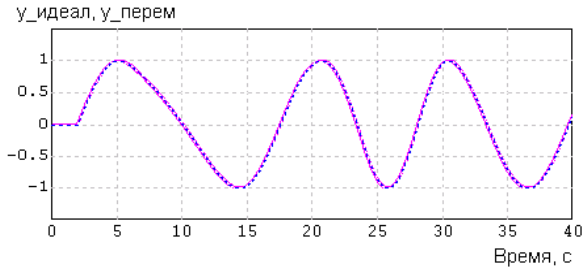


Рис. 1.17

Переконайтесь самостійно в тім, що якщо *миттєвий* час запізнювання в блоці *Змінне транспортне запізнювання* постійне, то блок фактично еквівалентний *Ідеальній запізнiлій ланці*.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 5

МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ НЕЛІНІЙНОЇ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Мета роботи:

- ознайомлення з описом математичних моделей нейтронно-кінетичних процесів у спеціалізованій бібліотеці *Кінетика нейтронів*, включаючи:
 - порівняльний аналіз частотних і перехідних характеристик кінетики ядерного реактора з використанням одногрупового й “класичного” (6-групового) опису ядер-попередників запізнілих нейтронів;
 - порівняння перехідних характеристик кінетики ядерного реактора без обліку й з урахуванням залишкового енерговиділення;
- самостійне дослідження нестационарних процесів у нелінійній САР ядерного реактора (САР ЯР) з релейним регулятором, включаючи:
 - формування математичної моделі САР ЯР з релейним регулятором;
 - моделювання перехідних процесів при варіюванні параметрів САР ЯР.

1. МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ НЕЙТРОННОЇ КІНЕТИКИ

1.1. Порівняння “класичної” і одногрупової моделі кінетики нейтронів

У минулих лабораторних роботах ви використовували *найпростішу* математичну модель нейтронно-кінетичних процесів у ядерному реакторі, а саме: “точкову” модель із одною *ефективною* групою запізнілих нейтронів.

Якщо розглядаються “тривалі” перехідні процеси, то значення *ефективного* постійного розпаду λ ядер-попередників запізнілих нейтронів в одногруповій моделі рекомендується одержувати осереднення “часів життя” груп запізнілих нейтронів по співвідношенню:

$$1/\lambda = \sum_{j=1}^6 \beta_j^* / \lambda_j$$

яке дає значення $\lambda = 0.0767 \text{ с}^{-1}$ (необхідно відмітити, що в деяких навчальних посібниках приводиться значення $\lambda = 0.072 \text{ с}^{-1}$).

Якщо розглядаються “короткі” перехідні процеси (наприклад, початковий етап розвитку перехідного процесу при значному стрибку реактивності), то значення ефективної постійної розпаду λ ядер-попередників запізнілих нейтронів в одногруповій моделі можна одержати зі співвідношення:

$$\lambda = \sum_{j=1}^6 \beta_j^* \cdot \lambda_j$$

яке дає значення $\lambda = 0.405 \text{ с}^{-1}$.

Виконаємо порівняння частотних і перехідних характеристик для одногрупової (для обох варіантів розрахунку λ) і для “класичної” моделей кінетики нейтронів. Сформуйте структурну схему, зовнішній вигляд якої повинен бути близький рис. 1.1.

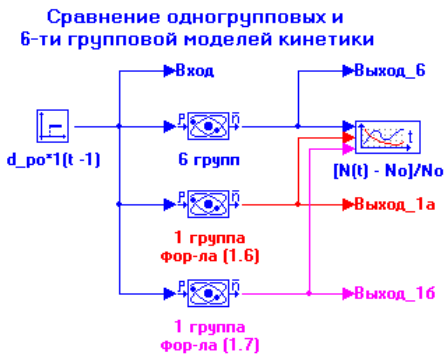


Рис. 1.1

Увага: Набрані структурні схеми, математичні викладення й результати розрахунків необхідно представляти викладачеві для “узгодження”.

Типові блоки в пам’ять на рис. 1.1 призначені для виконання аналізу частотних характеристик. Змінна **Вхід** “указує” точку входу гармонійного впливу, а змінні **Вихід_6**, **Вихід_1а** й **Вихід_1б** – точки виходу.

Відкрийте вікно **Редактора глобальних параметрів** і заповніть його в такий же спосіб, як це виконано на рис. 1.5.

Величина стрибка реактивності d_{po} задається параметром k (у частках).

Глобальні параметри Lam і Lam_1 – ефективні постійні розпаду, обчислені по співвідношеннях (1.1) і (1.2), відповідно.

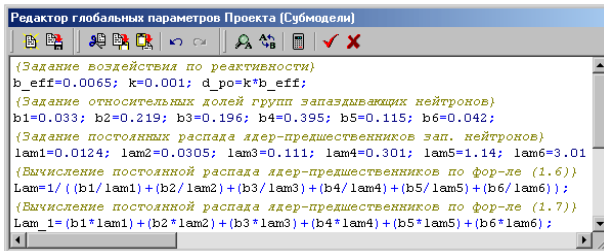


Рис. 1.2

Перемістіть у вікні Редактора курсор на кнопку **Обчислити константы** й виконайте клацання лівою клавішею миші: з’явиться таблиця з розрахунковими даними. Використовуючи “прокручування” таблиці, переконайтесь, що розраховані значення ефективних постійних розпаду ядер-попередників для “коротких” і “тривалих” перехідних процесів збігаються з наведеними вище значеннями.

Закрийте вікно Редактора і задайте параметри блоків структурної схеми. У блоці, що описує 6-ти групову модель кінетики нейтронів, залишіть параметри діалогових рядків за замовчуванням. У блоках, що описують одноступову модель кінетики нейтронів, у діалоговому рядку Постійні розпаду груп уведіть Lam або Lam_1 , відповідно. Щоб вводити в інших діалогових рядках цих блоків – необхідно визначити самостійно.

Виконаємо спочатку моделювання “тривалого” перехідного процесу при стрибку реактивності $0.01\beta_{эфф}$. Встановіть в діалоговому вікні Параметри розрахунку наступні параметри інтегрування: Час інтегрування – 1000; Мінірисний крок інтегрування – $1e-10$; Максирисний крок інтегрування – 0.1; Крок виводу результатів – 0.1. Параметри інших діалогових рядків – за замовчуванням.

Виконайте розрахунок перехідного процесу. Приведіть вид ліній і параметри осей координат у графічному вікні до виду, близькому до рис. 1.2.

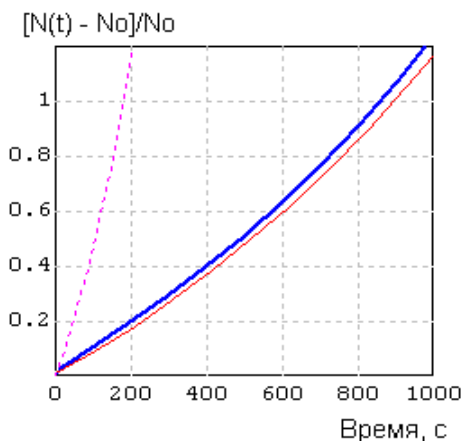


Рис. 1.2

На рис. 1.2 лінією подвійної товщини показаний графік перехідного процесу для “класичної” моделі кінетики нейтронів, суцільною одинарною лінією – для одногрупової моделі з *ефективної* постійної розпаду **Lam**, розрахованої по співвідношенню (1.1), а пунктирною лінією – для одногрупової моделі з *ефективної* постійної розпаду **Lam_1**, розрахованої по співвідношенню (1.2).

Результати рис. 1.6 показують, що з *ефективної* постійної розпаду **Lam** одногрупова модель кінетики лише приблизно відповідає “класичній” моделі кінетики, а з *ефективної* постійної розпаду **Lam_1** – розходження величезне (при $t = 1000$ с приблизно в 40 разів).

Виконаємо моделювання “короткого” перехідного процесу при стрибку реактивності $0.1\beta_{эфф}$. Встановіть в діалоговому вікні **Параметри розрахунку** наступні параметри інтегрування: *Час інтегрування* – **3**; *Мінірисний крок інтегрування* – **1e-10**; *Максирисний крок інтегрування* – **0.001**; *Крок виводу результатів* – **0.001**. Параметри інших діалогових рядків – за замовчуванням.

Виконайте розрахунок перехідного процесу. Приведіть вид ліній і параметри осей координат у графічному вікні до виду, близькому рис. 1.3.

Результати рис. 1.7 показують, що з *ефективної* постійної розпаду **Lam_1** одногрупова модель кінетики довше (до ~ 0.7 с) відповідає “класичній” моделі кінетики, а з *ефективної* постійної розпаду **Lam** – приблизно до 0.3 с.

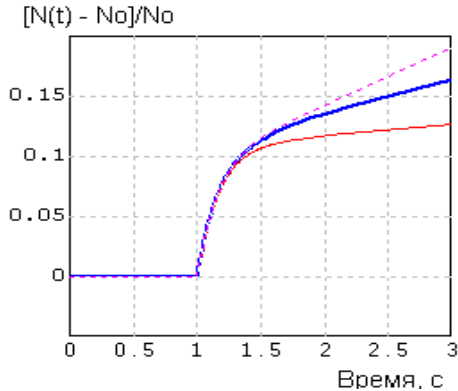


Рис. 1.3

Продовжуючи порівняння, виконаємо розрахунок частотних характеристик для “класичної” і одноступенчатої моделей кінетики нейтронів (для обох варіантів обчислення λ).

Виконайте клацання “мишею” по командній кнопці **Старт** і потім по кнопці **Стоп**: розрахунок буде перерваний, так і не почавшись; відбудеться ініціалізація структурної схеми при нульовому сигналі на вході блоків, що описують кінетику нейтронів.

Відкрийте діалогове вікно **Параметри частотного аналізу** й заповніть діалогові поля так само, як показано на рис. 1.4.

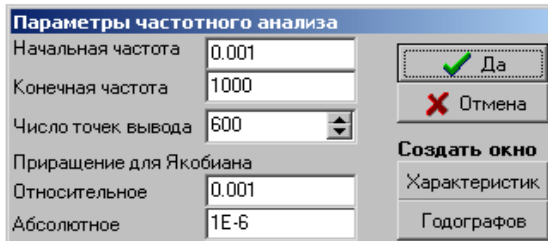


Рис. 1.4

Перемістіть курсор на кнопку **Годографів**, виконайте клацання “мишею” і потім заповніть таблицю.

Далі виконайте розрахунок годографів Найквіста для “класичної” і обох варіантів одноступенчатої моделі кінетики нейтронів. Скорегуйте параметри

ліній годографів і осей координат, додавши графічному вікну вид, близький до рис. 1.5.

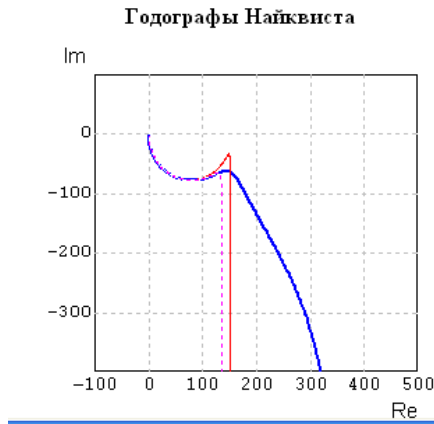


рис.1.5

На рис. 1.5 лінією подвійної товщини показаний годограф для “класичної” моделі кінетики нейтронів, суцільною одинарною лінією – для одногрупової моделі з *ефективною* постійною розпаду **Lam**, розрахованої по співвідношенню (1.1), а пунктирною лінією – для одногрупової моделі з *ефективною* постійною розпаду **Lam_1**, розрахованої по співвідношенню (1.7).

Аналіз даних рис. 1.5 показує, що в області високих частот всі 3 годографи майже збігаються, а в області низьких частот – помітна кількісна розбіжність.

Доповнимо вищевідзначені збіги/розбіжності порівнянням ЛАХ і ФЧХ для розглянутих математичних моделей кінетики нейтронів.

Перемістіть курсор на кнопку *Характеристик*, виконайте клацання “мишею” і далі заповніть таблицю, що з’явилася, для розрахунку ЛАХ.

Виконайте розрахунок ЛАХ для “класичної” і обох варіантів одногрупової моделі кінетики нейтронів. Скорегуйте параметри ліній і осей координат, додавши графічному вікну вид, близький до рис. 1.5.

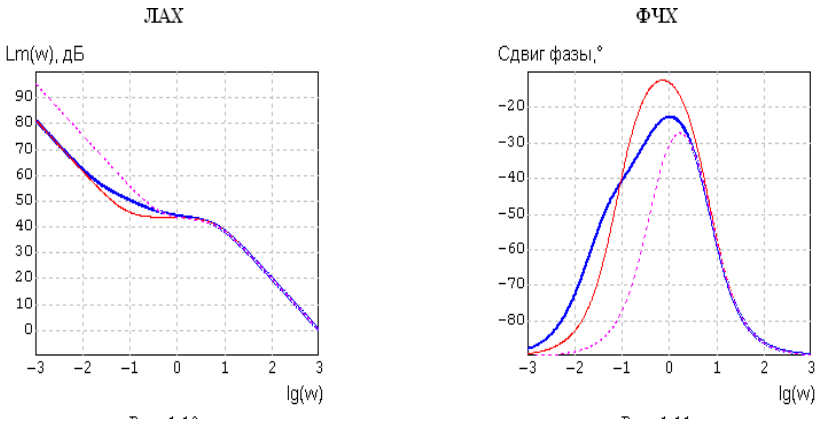


Рис 1.16

Замініть в таблиці (стовпець *Характеристика*) імена характеристик, що розраховуються, на ФЧХ. Виконайте розрахунок ФЧХ. Скорегуйте параметри ліній і осей координат, додавши графічному вікну вид, близький до рис. 1.11.

Дані рис. 1.6 підтверджують раніше відзначений збіг частотних властивостей для всіх 3-х варіантів математичної моделі кінетики нейтронів при високих частотах і, навпаки, помітна кількісна розбіжність у ЛАХ і ФЧХ при низьких частотах.

1.2. Роль залишкового енерговиділення в динаміці ядерного реактора

Якщо ядерний реактор працює в околиці номінального режиму, то для розрахунку його потужності (нейтронний і тепловий) можна використовувати тільки рівняння кінетики нейтронів (1.2), тому що в цьому випадку значення відносної нейтронної потужності (нормованої на номінальну нейтронну потужність) і відносної теплової потужності (нормованої на номінальну теплову потужність) приблизно рівні:

$$\frac{N_{\text{нейтр}}(t)}{N_{\text{нейтр}}^{\text{ном}}} \cong \frac{N_{\text{тепл}}(t)}{N_{\text{тепл}}^{\text{ном}}} \Rightarrow N_{\text{тепл}}(t) = N_{\text{тепл}}^{\text{ном}} \cdot \tilde{n}(t) \text{ и } N_{\text{нейтр}}(t) = N_{\text{нейтр}}^{\text{ном}} \cdot \tilde{n}(t)$$

Якщо нейтронна потужність реактора різко змінилася, то при розрахунку теплової потужності обов'язково потрібно враховувати внесок залишкового енерговиділення.

2. СТРУКТУРНА СХЕМА ТА МАТЕМАТИЧНІ МОДЕЛІ ДИНАМІКИ ЕЛЕМЕНТІВ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

2.1. Опис структурної схеми САР ядерного реактора

Лабораторна робота № 5 – перша частина Вашого завдання, інші частини завдання Ви виконаєте в наступних лабораторних роботах.

У рамках даної лабораторної роботи розглянемо спрощену САР ядерного реактора (ЯР), структурна схема якої (екранна копія Головного Схемного Вікна) представлена на рис. 2.1 і відповідає нелінійній САР релейного типу.

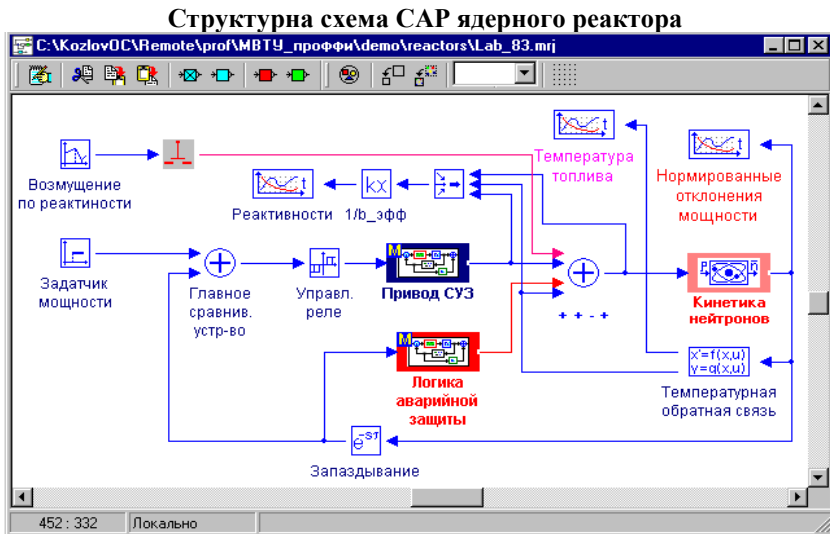


Рис. 2.1

Більшість ланок у структурній схемі, представленої на рис. 2.1, – типові блоки із Загальтехнічної бібліотеки. Блок *Кінетика нейтронів* – з Спеціалізованої бібліотеки *Кінетика нейтронів*, блоки *Привод СУЗ* і *Логика аварійного захисту* – субмоделі 1-го рівня вкладеності.

На відміну від лабораторних робіт минулого семестру й домашнього завдання за курсом “Керування в технічних системах”, де сигнал неузгодженості подавався безпосередньо на *Електродвигун Привода СУЗ*, у даної САР ЯР сигнал неузгодженості подається на *Керуюче реле* (типу релейне неоднозначне із зоною нечутливості), що при перевищенні уставок

видає сигнал керування на переміщення регулюючого стрижня з постійною швидкістю нагору або долилиць. Таке релейне керування істотно знижує зношування виконавчого механізму СУЗ у порівнянні зі схемою безперервного спостереження за потужністю ЯР.

Блок *Температурний зворотній зв'язок* – оригінальний типовий динамічний блок з бібліотеки *Динамічні ланки* (“Новий” блок), що дозволяє записати динамічні рівняння й інші вираження з використанням вбудованого в ПК “МВТУ” *Інтерпретатора математичних функцій*.

Реактивності регулюючого стрижня, температурного ефекту й безпосередньо ЯР, “стискаються” за допомогою мультиплексора у векторний (3-х жильний) сигнал, потім векторно нормуються на ефективну частку запізнених нейтронів і відображаються на відповідному *Тимчасовому графіку*.

У ланцюг *Головного зворотного зв'язку* включений блок *Запізнювання* (типовий блок *Ідеальна запізнена ланка*), що моделює тимчасову затримку, пов'язану з обробкою показань детекторів нейтронного потоку.

У рамках проведення лабораторних робіт і домашнього завдання в минулому семестрі *зовнішній* вплив, що обурює, по реактивності був тільки ступінчастим (тобто миттєвий стрибок реактивності). У даній лабораторній роботі введення збурювань по реактивності – *лінійний* (з різною швидкістю) з *обмеженням*, що реалізують відповідний блок і *Ключ выкл./вкл.* у верхній частині схеми на рис. 2.1.

Головний елемент порівняння, працює в режимі вирахування. Призначення інших блоків на рис. 2.1 – очевидно й додатково “розшифровується” піктограмами й відповідними підписами.

На рис. 2.2 представлений “зміст” субмоделі *Привод СУЗ*, де блок *Переміщення регулюючого стрижня* моделює переміщення регулюючого стрижня, блок *Концевики* (типовий блок *Ключ інтегратора* з бібліотеки *Ключі*) моделює досягнення верхнього або нижнього кінцевих вимикачів, а блок *Характеристика регулюючого стрижня* “переводить” координату нижнього кінця стрижня в реактивність. *Вхідний порт* і *Вихідний порт* забезпечують обмін даними з іншими блоками в системі (див. рис. 2.1).

Структурна схема Субмоделі Привод СУЗ



Рис. 2.2

У даній лабораторній роботі субструктура *Логіка аварійного захисту* має тільки *Вхідний* і *Вихідний порти* (з'єднані між собою). Дана *Субмодель* “відключена” за допомогою завдання в Головному Схемному Вікні в блоці *Суматор нульового* вагового коефіцієнта по відповідному входу (див. рис. 2.1). Набір структурної схеми *Логіки аварійного захисту* буде виконаний в останній (№ 7) лабораторній роботі, де дана *Субмодель* буде “відслідковувати” нейтронну потужність, період розгону ядерного реактора й температуру теплоносія на виході з активної зони з видачею логічного сигналу на скидання всіх стрижнів аварійного захисту (режим АЗ-5) при перевищенні заданих уставок.

2.2. Опис математичних моделей блоків САР ядерного реактора

У структурній схемі САР на рис. 2.1 математичні моделі всіх типових блоків відповідають їхньому опису в довідковій системі ПК “МВТУ” (при *ініціалізованому* блоці виклик довідки здійснюється одночасним натисканням клавіш **Ctrl** і **F1**).

Оскільки динаміка САР буде аналізуватися, в основному, у нормованих відхиленнях, для опису нейтронної кінетики доцільніше використовувати “класичну” модель точкової кінетики з 6-ма групами запізнілих нейтронів. Прийняте допущення, що при t_0 реактор перебуває в стаціонарному стані, тому при $t = 0$ на виході блоку *Кінетика нейтронів* $(0) = 0$.

Блок *Головний елемент порівняння*, реалізує звичайне вирахування, а 2-й блок *Суматор* – алгебраїчне додавання 4 вхідних сигналів.

Висота “сходи” у блоці *Керуюче реле* (релейне неоднозначне із зоною нечутливості) дорівнює **1.0**, а інші параметри будуть задані викладачем.

Динаміка *Температурного зворотного зв'язку* описується наступними рівняннями:

$$\begin{cases} c \cdot \gamma \cdot V \cdot \frac{dT(t)}{dt} = N(t) - K \cdot [T(t) - T_w]; \\ \rho_{oc}(t) = -\alpha \cdot [T(t) - T_o], \end{cases}$$

де $N(t)$ – потужність реактора (абсолютна);

$T(t)$ – температура палива;

T_w – температура теплоносія (у даній роботі вважається постійною);

T_o – температура палива в стаціонарі;

K – коефіцієнт, пропорційний теплообміну між ядерним паливом і теплоносієм;

c, γ, V – питома теплоємність, щільність і об'єм палива, відповідно;

$\lambda, \rho_{oc}(t)$ – коефіцієнт реактивності й температурний ефект реактивності.

Опис моделей інших блоків у Головному Схемному Вікні наочно ілюструється піктограмами й не вимагає додаткових пояснень.

Блок *Переміщення регулюючого стрижня* (див. рис. 2.2) описується наступним динамічним рівнянням:

$$\tau_{np} x''(t) + x'(t) = k_{np} * u(t),$$

де $x(t) = z(t) / H_{A3}$ – відносне положення нижнього кінця регулюючого стрижня

$x = 0$ – стрижень повністю занурений в активну зону,

$x = 1$ – стрижень повністю виведений з активної зони;

k_{np}, τ_{np} – відносна швидкість переміщення регулюючого стрижня й постійна часу, відповідно.

При $t = 0$ регулюючий стрижень нерухливий і занурений в активну зону наполовину, тобто $x(0) = 0,5$.

Блок *Характеристика регулюючого стрижня* (див. рис. 2.2) описується наступною *безінерційною* нелінійною залежністю:

$$\rho_{cm}(x) = 0,5\rho_{cm} * \sin(a \cdot x + b)$$

2.3. Завдання параметрів САР через механізм *глобальних параметрів*

Деякі параметри математичних моделей динаміки блоків на рис. 2.1 – 2.2 (включаючи й ряд параметрів блоку *Температурний зворотній зв'язок*) необхідно задати у вікні **Редактора глобальних параметрів Проекту (Субмоделі)**.

Найбільший ефект від використання механізму *глобальних параметрів* буде в тих випадках, коли той самий параметр (константа) використовують, як параметр (уводиться в діалоговому вікні) у багатьох блоках структурної схеми. У цьому випадку при зміні величини цього параметра можна

скорегувати його значення *тільки* у вікні **Редактор глобальних параметрів**, а не коректувати його значення у всіх блоках, де він використовується.

На рис. 2.3 представлена копія вікна **Редактор глобальних параметрів** з введеними значеннями й коментарями до них. За аналогією з рис. 2.3 введіть у вікно **Редактор** свої вихідні дані.

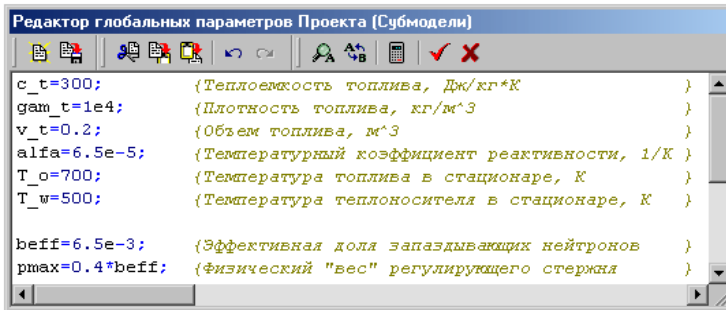


Рис. 2.3

Відкрийте діалогове вікно блоку *Кінетика нейтронів* і в 1-му діалоговому рядку замість числа **6.5e-3** введіть **beff**. Закрийте це діалогове вікно (кнопка **Так**). Відкрийте діалогове вікно блоку з підписом *1/beff* (див. рис. 2.1) і введіть у діалоговому рядку замість числа **1** вираження **1/beff**. Параметр **pmax** Вам необхідно буде використовувати при завданні параметрів блоку *Характеристика регулюючого стержня*.

2.4. Формування динамічної моделі блоку *Температурний зворотний зв'язок* з використанням “Нового” блоку

З огляду на те, що неможливо сформуванати абсолютно повну бібліотеку типових блоків, у ПК “МВТУ” розроблені засоби, які дозволяють Користувачеві розширити склад *особистої* бібліотеки за рахунок створення нових типів блоків, наприклад, за допомогою вбудованого *Інтерпретатора математичних функцій*, на базі якого функціонує й “Новий” блок, що дозволяє прямо в процесі роботи створювати екземпляри блоків зі своїми оригінальними математичними моделями.

Використання “Нового” блоку в якості функціонального досить ефективно у випадку наявності в моделі складних функціональних перетворень, коли використання для цих цілей *елементарних функціональних типових блоків* приведе до невиправданого ускладнення структурної схеми.

На рис. 2.4 представлена екранна копія вікна **Редактор інтерпретатора математичних функцій**, де в текстовому виді задана математична модель динаміки блоку *Температурний зворотній зв'язок*.

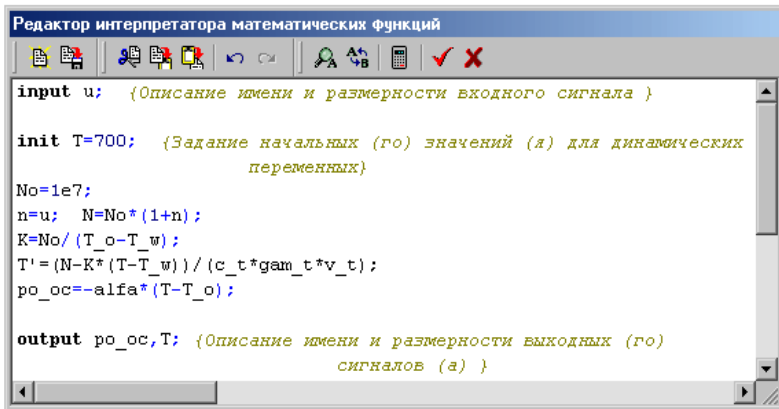


Рис. 2.4

Якщо “Новий” блок має входи (вхідні порти), перший рядок обов’язково повинен містити оператор **input**, що описує вхідні сигнали в даного блоку, включаючи ім’я входу і його розмірність.

У даному прикладі 1-й виконується рядок, (**input u;**) привласнює 1-му (і єдиному) входу унікальне ім’я – **u**. Якби, наприклад, цей блок мав би 2 входи, причому 1-ий вхід – 3-х жильний (векторний), а 2-й – 5-ти жильний, то 1-й виконується рядок, що, має вид: **input u[3],g[5];** Для опису розмірності входів використовуються *прямокутні дужки*.

Якщо “Новий” блок описує динаміку об’єкта моделювання у вигляді системи диференціальних рівнянь у формі Коші, то другий виконується рядок, (не вважаючи рядок коментарю) обов’язково повинен містити оператор **init**, що описує *початкові умови* для динамічних змінних, нижче по тексту для яких будуть записані звичайні диференціальні рівняння у формі Коші.

У даному прикладі 2-й виконується рядок, (**init T=700;**) задає *початкове значення* для єдиної динамічної змінної (температура палива в стаціонарі).

У тому випадку, коли математична модель динаміки блоку описується *декількома* диференціальними рівняннями, наприклад, 3-а, то 2-й виконується рядок, що, буде мати вигляд: **init x1=0,x2=1,x3=2,** де x_1 , x_2 , x_3 –

динамічні змінні, для яких нижче по тексту будуть записані відповідні диференціальні рівняння (точніше система рівнянь) у формі Коші.

Диференціальне рівняння для температури палива (**T**) записане в 6-у виконуємому рядку, де символ апострофа означає похідну за часом, а теплофізичні властивості палива й температура теплоносія в стаціонарі передаються в “Новий” блок за допомогою механізму глобальних параметрів.

Передостанній виконується рядок, що, описує ефект реактивності по температурі палива (2-е співвідношення в системі (2.1)).

Якщо “Новий” блок має виходи (вихідні порти), то останній буде виконуватись рядок, який, обов'язково повинен містити оператор **output**, який описує вихідні сигнали з “Нового” блоку, включаючи імена виходів і їхньої розмірності.

У цьому прикладі останній рядок (**output po_oc,T;**) описує 2 вихідних сигнали (**po_oc** і **T**) без вказівки в прямокутних дужках розмірностей вихідних сигналів.

Ввівши весь текст, закрийте Редактор інтерпретатора: “Новий” блок у Головному Схемному вікні буде мати 1 вхід і 2 виходи. Використовуючи процедури зміни орієнтації блоку, зробіть його орієнтацію “праворуч-ліворуч”. Перший вихідний порт (**po_oc**) буде нижнім ліворуч, а другий вихідний порт (**T**) – верхнім ліворуч.

Завершіть оформлення структурної схеми в Головному Схемному Вікні, з'єднавши всі блоки лініями зв'язку. Структурна схема САР повинна прийняти вид, подібний до рис. 2.1.

3. САМОСТІЙНЕ ДОСЛІДЖЕННЯ НЕЛІНІЙНОЇ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА З РЕЛЕЙНИМ РЕГУЛЯТОРОМ

3.1. Вихідні дані по параметрах елементів САР

У табл. 1 наведені вихідні дані по параметрах елементів САР ЯР, що повинні бути досліджуваними. Як видно з табл. 1, параметри САР Вашого варіанта не збігаються з даними, які наведені вище в розділі 2 справжніх вказівок.

Табл. №1

№	Элемент САР	Параметры элементов САР	Номер варианта		
			1	2	3
1	Задагчик мощности	$V_{ремя}, c$	10	10	10
		Y_0	0	0	0
		Y_1	0,1	0,1	0,1
2	Привод СУЗ	$\rho_{ст}^*/\beta_{эфф}$	0,6	0,6	0,6
		$\tau_{пр}, c$	0,2	0,25	0,25
		$T_{хода}, c$	5...50	5...50	5...50
3	Управляющее реле	b	0,02...0,005	0,02...0,005	0,02...0,005
		m	0,4	0,6	0,8
	
4	Ядерный реактор	$V_{топл}, м^3$	0,1	0,2	0,4
		$\gamma_{топл}, кг/м^3$	10000	9000	8000
		$C_{топл}, Дж/кг \cdot K$	300	350	400
		$\ell \cdot 10^3, c$	1	0,1	0,05
		$\beta_{эфф} \cdot 10^3$	6	6,5	7
		$N_0, МВт$	10	20	50
5	Температурная обратная связь	T_0, K	700	750	800
		T_w, K	500	550	550
		$\alpha \cdot 10^4, 1/K$	0,7...1,5	0,7...1,5	0,7...1,5
6	Возмущающее воздействие	$\Delta t_{возм}, c$	2...20	2...20	2...20
		$\Delta \rho_{возм}/\beta_{эфф}$	0,1...0,3	0,1...0,3	0,1...0,3
7	Запаздывание по каналу измерения	$\tau_{зам}, c$	0,2...1	0,2...1	0,2...1

Більша частина параметрів блоків у структурній схемі САР не вимагає особливих пояснень і коментарів. Ряд параметрів у табл. 1 необхідно прокоментувати.

У субмоделі *Привод СУЗ* параметром $T_{хода}$ позначений час переміщення регулюючим стрижнем СУЗ всієї активної зони (зверху-долілиць або навпаки). За допомогою цього параметра Ви визначите коефіцієнт швидкісної ефективності привода. На рис. 2.2 передаточна функція блоку *Переміщення регулюючого стрижня* невідома: її потрібно визначити на підставі рівнянь динаміки.

У блоці збурюючий вплив, що, $\Delta t_{возм}$ задається час, за який величина цього впливу, лінійно змінюється від нуля до $\Delta p_{возм}$.

Дані в табл. 1 типу **5...50** передбачають, що Ви повинні виконати якість дослідження при варіюванні відповідним параметром в зазначеному діапазоні (звичайно ще 2...3 додаткові точки усередині даного діапазону).

3.2. Порядок виконання лабораторної роботи

1. Використовуючи *Лінійку типових блоків*, процедури редагування й сервісні процедури, заповніть Головну й субмоделювану схемні вікна необхідними блоками й додайте структурним схемам вид, близький рис. 2.1 і рис. 2.2.

2. Використовуючи вікно **Редактора глобальних параметрів** і діалогові вікна блоків введіть параметри блоків у Головному й у субмоделювану схемних вікнах.

3. Використовуючи *"Новий" блок*, сформууйте (введіть) математичну модель блоку *Температурний зворотний зв'язок*.

4. Докажіть набрану модель САР викладачеві для перевірки правильності виконаного Вами етапу.

5. При вихідних значеннях параметрів структурної схеми ($\alpha = 7 \cdot 10^{-5}$ $1/K$, $\tau_{зан} = 0.2$ с, $T_{хода} = 20$ с, $b = 0.02$) виконайте моделювання (час моделювання до 100 с) процесу переключення реактора на *підвищеній* (+ 10 %) і *зниженій* (- 10 %) рівні потужності при варіюванні швидкісної ефективності привода (тобто при варіюванні $T_{хода}$). Зарисуйте якісний вид графіків перехідного процесу. Покажіть їх викладачеві з Вашими висновками.

6. Відновіть параметри структурної схеми у вихідний стан ($\alpha = 7 \cdot 10^{-5}$ $1/K$, $\tau_{зан} = 0.2$ с, $T_{хода} = 20$ с, $b = 0.02$) і виконайте моделювання (час

моделювання до 100 с) процесу переходу реактора на *підвищений* (+ 10 %) і *знижений* (- 10 %) рівні потужності при варіюванні інерційності каналу виміру (тобто при варіюванні $\tau_{зан}$). Зарисуйте якісний вид графіків перехідного процесу. Покажіть їх викладачеві з Вашими висновками.

7. Відновіть параметри структурної схеми у вихідний стан ($\alpha = 7 \cdot 10^{-5}$ $1/K$, $\tau_{зан} = 0.2$ с, $T_{хода} = 20$ с, $b = 0.02$) і виконайте моделювання (час моделювання до 100 с) процесу переходу реактора на *підвищений* (+ 10 %) рівень потужності при варіюванні коефіцієнта температурного зворотного зв'язку (тобто при варіюванні b). Зарисуйте якісний вид графіків перехідного процесу. Покажіть їх викладачеві з Вашими висновками.

8. Відновіть параметри структурної схеми у вихідний стан ($\alpha = 7 \cdot 10^{-5}$ $1/K$, $\tau_{зан} = 0.2$ с, $T_{хода} = 20$ с, $b = 0.02$) і виконайте моделювання (час моделювання до 100 с) процесу переходу реактора на *підвищений* (+ 10 %) рівень потужності при варіюванні ширини зони нечутливості в керуючому реле (тобто при варіюванні b). Зарисуйте якісний вид графіків перехідного процесу. Покажіть їх викладачеві з Вашими висновками.

9. Відновіть параметри структурної схеми у вихідний стан ($\alpha = 7 \cdot 10^{-5}$ $1/K$, $\tau_{зан} = 0.2$ с, $T_{хода} = 20$ с, $b = 0.02$) і виконайте моделювання (час моделювання до 20 с) перехідного процесу при подачі збурюючого впливу, $\Delta p_{возм} = 0.1 \cdot \beta_{эфф}$ і варіюванні швидкості введення збурювання по реактивності (тобто при варіюванні $\Delta t_{возм}$). Зарисуйте якісний вид графіків перехідного процесу. Покажіть їх викладачеві з Вашими висновками.

10. Відновіть параметри структурної схеми у вихідний стан ($\alpha = 7 \cdot 10^{-5}$ $1/K$, $\tau_{зан} = 0.2$ с, $T_{хода} = 20$ с, $b = 0.02$) і виконайте моделювання (час моделювання до 20 с) перехідного процесу при подачі впливу, збурюючого, $\Delta t_{возм} = 5$ з і варіювання величини збурювання по реактивності (тобто при варіюванні $\Delta p_{возм}$). Зарисуйте якісний вид графіків перехідного процесу. Покажіть їх викладачеві з Вашими висновками.

ПРАКТИЧНА РОБОТА № 6

ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ САР І МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІКИ АЛГОРИТМІВ АВАРІЙНОГО ЗАХИСТУ В САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА

Мета роботи:

- освоєння процедур роботи ПК «МВТУ» у режимі ОПТИМІЗАЦІЯ на прикладі синтезу інтегруючого регулятора;
- вивчення методів логічного керування стосовно формування алгоритмів аварійного захисту в системі керування й захисту (СУЗ) ядерного реактора;
- самостійне дослідження перехідних процесів у нелінійній САР ядерного реактора (САР ЯР), включаючи:
 - коректування математичної моделі робочих процесів в активній зоні з урахуванням змінності параметрів теплоносія;
 - моделювання перехідних процесів у САР ЯР з урахуванням алгоритмів аварійного захисту СУЗ.

1. ПРОЦЕДУРИ РОБОТИ В РЕЖИМІ ОПТИМІЗАЦІЯ

1.1. Формулювання завдань на параметричну оптимізацію САР

У всіх лабораторних роботах з курсу є *навчальна* частина, у якій Ви «по інструкції» знайомилися з методами й процедурами дослідження САР у середовищі ПК «МВТУ». Як об'єкт дослідження в *навчальній* частині лабораторних робіт використовується «базова» САР, математична модель динаміки якої у вигляді структурної схеми, близька до рис. 1.1.

СТРУКТУРНА СХЕМА САР



Рис. 1.1.

Об'єкт керування з передаточною функцією $W_2(s)$, відповідає типовій ланці (коливальному) з параметрами: $k_2 = 1.0$; $T_2 = 1$ с; параметр демпфування $b = 0.5$; початкові умови – нульові.

Місцевий зворотний зв'язок з передаточною функцією $W_3(s)$, відповідала типовій ланці – аперіодичному 1-го порядку з параметрами: $k_3 = 0.6$; $T_3 = 5$ с.

Локальний елемент порівняння, забезпечував негативний зворотний зв'язок, тобто «працював» у режимі звичайного віднімання.

Нагадаємо заключне завдання у Вашій 1-шій роботі.

Визначте значення *швидкісної ефективності* інтегруючого регулятора (коефіцієнта підсилення k_I у блоці *Інтегратор*), що забезпечує перехід замкнутої лінійної САР зі стану $y = 0$ при $t = 0$ у стан $y = 0.8$ (5-ти процентний допуск) при наступних обмеженнях:

- час перехідного процесу T_{np} , обумовлений по факту входу регульованої змінної в 5-ти процентну “трубку”, повинне бути *не більше* 20 секунд;

- перехідний процес повинен проходити без перерегулювання ($y_{max} \leq 0.8$).

1.2. Послідовність дій у режимі ОПТИМІЗАЦІЯ

Приведемо перелік основних етапів, які необхідно виконати в середовищі ПК “МВТУ” для реалізації режиму роботи ОПТИМІЗАЦІЯ:

- задати варіюємі параметри, як *глобальні параметри*, використовуючи відповідні інтерфейсні процедури;

- сформувані *локальні* критерії якості (оптимізації), які необхідні для рішення основного завдання оптимізації;

- ввести в діалогові вікна режиму ОПТИМІЗАЦІЯ необхідні дані, включаючи:

- імена *варіювання параметрів*, межі їхньої зміни й погрішність розрахунку;

- імена *локальних критеріїв* і припустимі межі їхніх значень;

- розрахунковий *метод оптимізації* і його параметри;

- запустити завдання на розрахунок і чекати.

Відкрийте проект, що відповідає лабораторній роботі №1, і відновіть схему САР у замкнутому стані. Якщо проекту немає в числі збережених, Ви повинні сформувані *новий* проект, подібний до рис. 1.1.

1.3. Завдання варіюємого глобального параметра.

Процедура завдання глобального параметра виконується в спеціальному вікні із заголовком Редактор Глобальних параметрів Проекту (Субмоделі), відкриття якого може бути виконане 3-а способами:

- переміщенням курсору на крайню ліворуч командну кнопку (з підписом *Параметри макроблоку*) Схемного вікна й клацанням *лівою* клавішею “миші”;

-натисканням клавіші F8 при *активному* Головному Схемному вікні;

-клацанням *лівої* клавіші “миші” по опції *Параметри макроблоку* в додатковому командному меню (викликуваного клацанням *правої* клавіші “миші” у вільному місці Головного Схемного вікна).

Відкривши вікно Редактор Глобальних параметрів кожним з вищеописаних способів, введіть із клавіатури в поле вікна текст: $K=1$;

На рис. 1.2 представлена копія вікна Редактор Глобальних параметрів (зменшеного по висоті), де текст у фігурних дужках – коментар до введеного оптимізуемого параметру K .

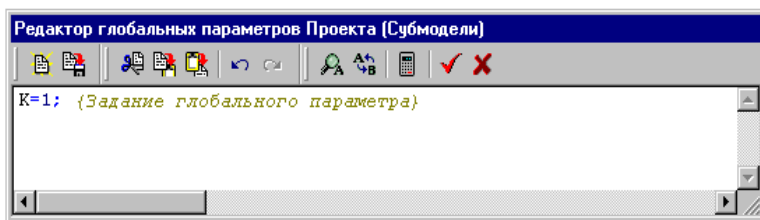


Рис. 1.2.

Закрийте вікно Редактор Глобальних параметрів, клацнувши “мишею” по кнопці Застосувати (2-а праворуч).

Відкрийте діалогове вікно *Інтегратора* (блок з підписом $W_I(s)$) і змініть значення коефіцієнта підсилення, ввівши замість 1 (числа) параметр K (символ).

1.4. Формування локальних критеріїв оптимізації

Перенесіть у Схемне Вікно блоки *Максимум* (бібліотека *Нелінійні ланки*) і *в пам'ять* (бібліотека *Субструктури*). Перемістіть їх у лівий нижній кут Схемного Вікна (див. рис. 1.3 нижче по тексту), проведіть необхідні лінії зв'язку й зробіть підписи, що пояснюють.

У діалоговому вікні блоку *в пам'ять* в рядку *Ім'я змінної* введіть u_{\max} .

Закрийте діалогове вікно блоку *в пам'ять* .

Перемістіть курсор у вільне місце Схемного вікна, виконайте клацання *правою* клавішею “миші” і в падаючому командному меню Схемного вікна

виберіть опцію *Вставити субмодель*: відкриється спеціальне діалогове вікно *Відкриття субмоделі*.

Знайдіть у каталозі ...\\Demo\\Lab_work файл *time_p_r.sub* і перенесіть його ім'я в рядок *Ім'я файлу*. Закрийте це вікно, клацнувши по кнопці *Відкрити*.

Перемістіть курсор у ту частину Схемного Вікна, де повинна бути розташована дана субмодель (див. рис. 1.3), і зробіть клацання *лівою* клавішею “миші”: у даному місці Схемного Вікна з'явиться субмодель лічильнику *часу ПП* (аббревіатура ПП – перехідний процес).

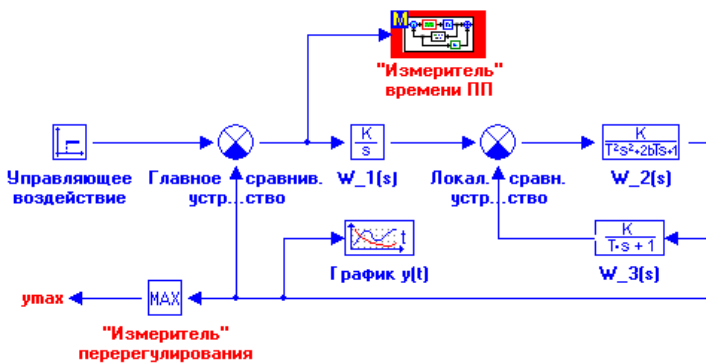


Рис. 1.3.

Перемістіть курсор на субмодель і виконайте 2-х кратне клацання *лівою* клавішею “миші”: відкриється *субмодельні* Схемне Вікно, екранна копія вмісту якого представлена на рис. 1.4 нижче по тексту.

Процедуру відкриття *субмодельного* Схемного Вікна можна виконати й іншим способом: при активному блоці *Субмодель* нажати клавішу Pg Dn.

Перемістіть курсор на блок з підписом *Величина* і змініть:

- в 1-у діалоговому рядку 0.05 на 0.04, що відповідає 5 %-ній “трубці” від майбутнього сталого значення регульованої змінної, рівного 0.8;
- в 2-у діалоговому рядку із двох варіантів Скаляр або Вектор виберіть перший.

Закрийте діалогове вікно блоку з підписом *Величина* “трубки”.

Перемістіть курсор на блок *в пам'ять* й, виконавши 2-х кратне клацання *лівою* клавіші “миші”, відкрийте його діалогове вікно.

Введіть у рядку *Ім'я змінної* *trp*. Закрийте діалогове вікно цього блоку.

Субмодель *лічильник часу ПП* реалізує вимір часу перехідного процесу й автоматичне присвоєння цього значення змінної *trp*.

Схема працює в такий спосіб.

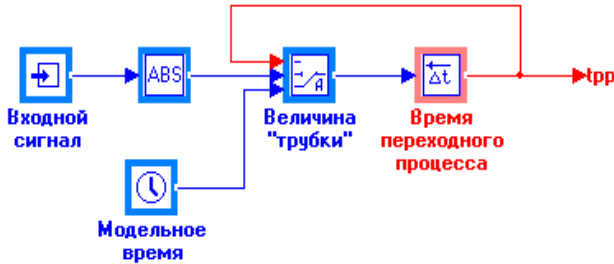


Рис. 1.4.

На середній (логічний) вхідний порт *Ключа-4А* (*Величина “трубки”*) подається модуль сигналу неузгодженості.

Якщо цей сигнал більше уставки (5 % від 0.8), то на вихід *Ключа-4А* передається сигнал з 3-го (нижнього) вхідні порти, тобто поточний модельний час.

Якщо керуючий сигнал (на середньому вхідному порту) менше уставки, то на вихід *Ключа-4А* передається сигнал з 1-го (верхнього) вхідного порту, тобто *той же сигнал, але затриманий на один крок інтегрування*.

Затримку на 1 крок інтегрування здійснює типовий блок з підписом *Час перехідного процесу* (типовий блок *Затримка на крок інтегрування* з бібліотеки *Дискретні ланки*).

Закрийте субмодель *лічильник часу ПП*, виконавши 2-х кратне клацання “мишею” у вільному місці субмодельного Схемного або нажавши на клавішу Pg Up.

1.5. Заповнення діалогових вікон у режимі ОПТИМІЗАЦІЯ

Перемістіть курсор на напис *Оптимізація* в командному меню, виконайте однократне клацання *лівою* клавішею “миші” і в падаючому меню виберіть опцію *Параметри*. Відкриється діалогове вікно *Параметри оптимізації* з активною (за замовчуванням) закладкою *Параметри* (див. рис. 1.5).

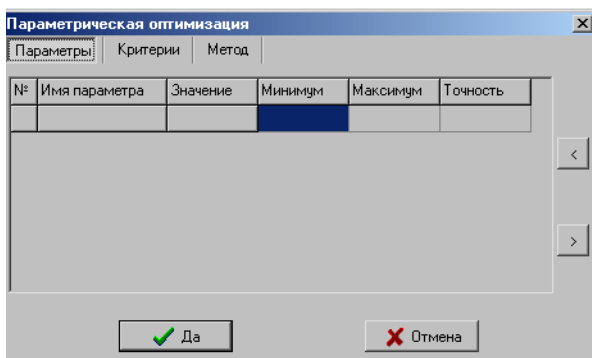


Рис. 1.5.

Примітка. Виклик діалогового вікна *Параметри оптимізації* можна було виконати й іншим способом: клацанням *лівою* клавішею “миші” по командній кнопці Параметри оптимізації в *Панелі інструментів* Головного Вікна (6-а праворуч).

Перемістіть курсор на спеціальну кнопку в правій частині діалогового вікна із зображенням символу “ < ” і зробіть однократне клацання *лівою* клавішею “миші”: відкриється додаткове діалогове вікно *Глобальні константи проекту* (див. рис. 1.6).

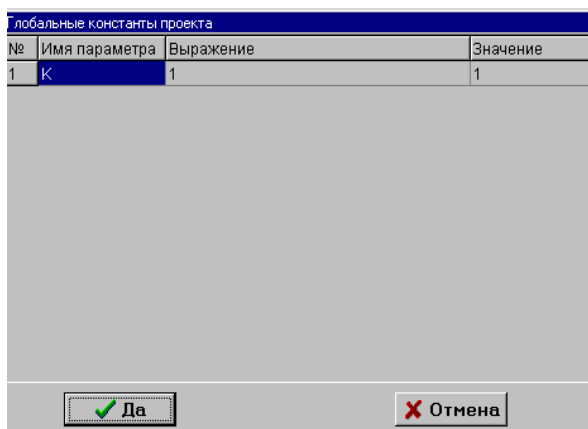


Рис. 1.6.

Оскільки у Вашім проекті (завданні) тільки *одна* глобальна константа (параметр $K = 1$), можна відразу клацнути по кнопці Так: це діалогове вікно

закриється і з'явиться знову попереднє діалогове вікно, що відповідає закладці *Параметри* із заповненим рядком по параметрі К.

Скорегуйте значення *Максимуму* для К: введіть замість 1 число 2. Значення точності визначення параметра К (колонка *Точність*) залишіть без змін (0.01 за замовчуванням).

Якби кількість глобальних констант були б, наприклад, 4, а для рішення оптимізаційного завдання потрібно тільки 3, то в додатковому вікні глобальних констант (параметрів) необхідно спочатку вибрати зі списку необхідні параметри й тільки потім клацнути по кнопці Так. Процедура виділення буде описана нижче при виборі критеріїв оптимізації.

Перемістіть курсор на закладку *Критерії* й зробіть однократне клацання *лівою* клавішею “миші”: відкриється *незаповнене* діалогове вікно для завдання *локальних* критеріїв оптимізації (аналогічне рис. 1.5).

Перемістіть курсор на спеціальну кнопку в правій частині діалогового вікна із зображенням символу “ < ” і зробіть однократне клацання *лівою* клавішею “миші”: відкриється спеціальне діалогове вікно *Глобальні змінні проекту* (див. рис. 1.7).

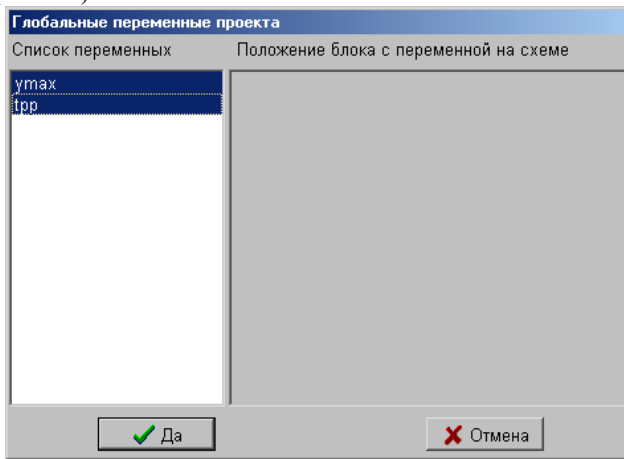


Рис. 1.7.

Виділіть у вікні *Список змінних* ті змінні, які відповідають *локальним* критеріям оптимізації.

Процедура виділення виконується в наступній послідовності: Перемістіть курсор на рядок з імям змінної, натисніть клавішу Shift і потім зробіть однократне клацання *лівою* клавішею “миші”.

Повторіть цю процедуру й для 2-го критерію оптимізації.

Перемістіть курсор на кнопку Так і зробіть клацання *лівою* клавішею “миші”: це діалогове вікно закриється й з'явиться діалогове вікно, що

відповідає закладці *Критерії* із заповненими (за замовчуванням) значеннями *Мінімум* і *Максимум* для кожного критерію оптимізації.

Скорегуйте значення в стовпці *Максимум*, як це показано на рис. 1.8.

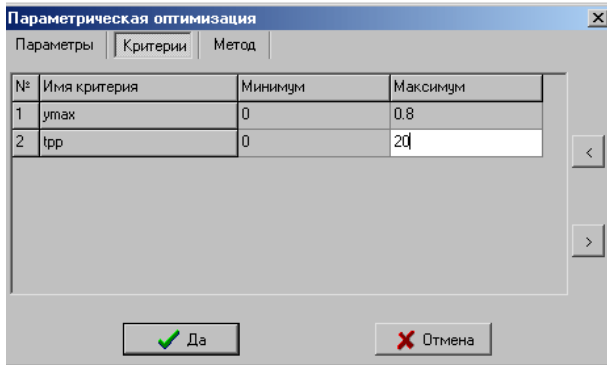


Рис. 1.8.

Значення *Максимум* для змінної *trp* формує вимога за часом перехідного процесу: *не більше 20 секунд*.

Значення *Максимум* для змінної *утах* формує вимога по перегулюванню: тому в стовпці *Максимум* для змінної *утах* уведене значення 0.8.

Перемістіть курсор на закладку *Метод* і зробіть однократне клацання *лівою* клавішею “миші”: відкриється діалогове вікно, що відповідає даній закладці.

Виберіть метод, максирисне число моделювань, вид згортки *локальних* критеріїв у *Глобальний* критерій і т.п., як це показано на рис. 1.9.

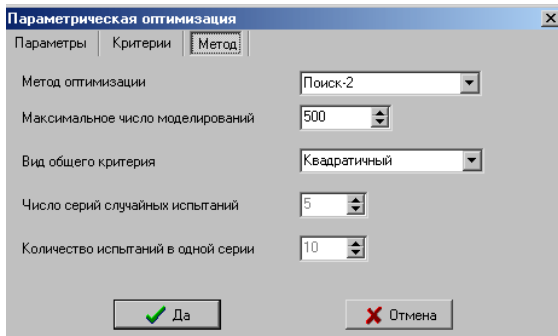


Рис. 1.9.

Обраний *Метод оптимізації* (Пошук-2), хоча і є одним з найпростіших алгоритмів прямого пошуку мінімуму функціонала (цільової функції), але має високу швидкодію й ефективність, особливо, у навчальних завданнях.

Задане *Максирисне число моделювань* (200) цілком достатньо для пошуку оптимуму в завданнях такого типу.

Обраний *Вид загального критерію* (Квадратичний) визначає, що *локальні* критерії (tpp і ymax) будуть згорнуті в *Глобальний* критерій з використанням *квадратичної форми*, причому значення *вагових коефіцієнтів* будуть розраховані автоматично по обмеженнях і точності для параметра К і *локальних* критеріїв.

Діалогові рядки *Число серій випадкових випробувань* і *Кількість випробувань в одній серії* заповнюються *тільки* при використанні *Стохастичного* методу.

Перемістіть курсор на кнопку *Так* і виконайте клацання *лівою* клавішею “миші”: діалогове вікно, що відповідає опції *Параметри* в меню *Оптимізація* закриється й на екрані монітора знову з’явиться *Головне Схемне Вікно*.

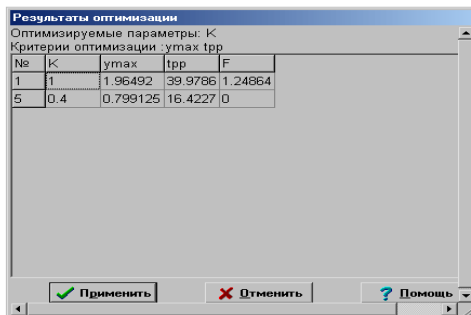
1.6. Проведення оптимізаційного розрахунку

Перемістіть курсор на командну кнопку *Параметри розрахунку*, виконайте клацання *лівою* клавішею “миші” і в діалоговому вікні, що *відкрилося*, *Параметри* розрахунку змінить метод інтегрування, наприклад, на метод *Рунге-Кутта*. Запустіть завдання на розрахунок і переконайтесь, що *перехідний процес* розбіжний.

Перемістіть курсор на командне меню *Оптимізація*, відкрийте його й виберіть опцію *Розрахунок*: з’явиться вікно *Результати оптимізації*, а в *Графічному вікні* будуть “миготіти” графіки *перехідних процесів* при варіюванні параметром К.

Примітка. Запуск оптимізаційного розрахунку можна виконати й іншим способом: клацанням *лівої* клавіші “миші” по командній кнопці *Почати розрахунок параметрів у Панелі інструментів* *Головного Вікна*.

Приблизно через 2...5 секунд пошук завершиться й інформаційне вікно *Результати оптимізації* прийме вид, аналогічний рис. 1.10.



№	K	ymax	tpp	F
1	1	1.96492	39.9786	1.24864
5	0.4	0.799125	16.4227	0

Рис. 1.10.

Зображення перехідного процесу в *Графічному вікні* після автомасштабування (2-х кратне клацання *лівої* клавіші “миші”), редагування заголовка графіка й параметрів осі ординат (за допомогою опції *Властивості* меню *Графічного вікна*) буде мати вигляд, близький рис. 1.11.

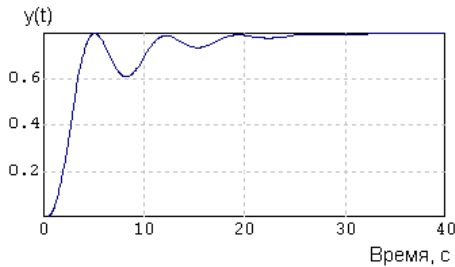


Рис. 1.11.

Виконайте клацання *лівою* клавішею “миші” по кнопці Застосувати у вікні *Результати оптимізації*: це інформаційне вікно закриється, а у вікні *Редактор Глобальних параметрів Проекту (Субмоделі)* відбудеться *автоматична заміна* вихідного значення параметра K ($K=1$;) на *оптимальне* ($K=0.4$).

Відкрийте вікно *Редактор Глобальних параметрів Проекту* клацанням *лівої* клавіші “миші” по кнопці Параметри макроблоку в *Панелі інструментів* Схемного вікна й переконайтеся, що відбулася *автоматична заміна* вихідного значення K на оптимальне.

Запустіть завдання на розрахунок перехідного процесу з новим значенням K (клацання по командній кнопці *Продовжити*) і переконайтесь, що перехідний процес, *повністю* відповідає поставленим умовам.

У проведеному оптимізаційному розрахунку значення коефіцієнта швидкісної ефективності K було знайдено при його “стартовому” значенні, рівному 1.

Подивимося, а чи зміниться результат, при іншому “стартовому” значенні коефіцієнта швидкісної ефективності K , наприклад, $K=0.1$.

Відкрийте вікно Редактора і змініть “стартове” значення K (введіть $K=0.1$).

Виконайте оптимізаційний розрахунок з новим “стартовим” значенням K .

Результати розрахунку (див. таблицю на рис. 1.12 і графік перехідного процесу на рис. 1.13) показують, що необхідним критерієм оптимізації (по u тах і t_{pp}) задовільняє й значення K , рівне 0.3. Очевидно, значення $K=0.3$ відповідає (приблизно) *нижній* границі діапазону оптимальності, а значення $K=0.4$ – *верхній* границі діапазону. Результат 1-го навчального завдання ($K=$

0.35) свідчить, що й між значеннями 0.3 і 0.4 умова оптимальності також виконується.

Результаты оптимизации				
Оптимизируемые параметры: k				
Критерии оптимизации : ymax tpp F				
№	k	ymax	tpp	F
1	0.1	0.726669	39.9359	0.918678
3	0.3	0.796993	18.5339	0

Рис. 1.12.

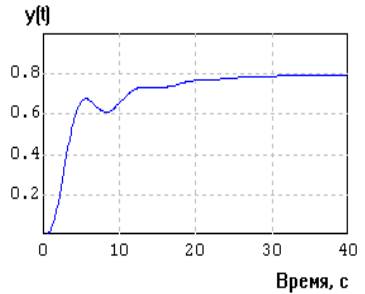


Рис. 1.13.

Збережіть завдання на диск під новим ім'ям, наприклад, dem_opt . mjt.

На цьому навчальна частина лабораторної роботи, присвячена освоєнню процедур роботи в режимі ОПТИМІЗАЦІЯ, завершена.

Список використаної літератури:

1. Инструкция пользователя программным комплексом «Моделирование в технических устройствах» / Козлов О.С., Кондаков Д.Е., Скворцов Л.М., Тимофеев К.А., Ходаковский В.В. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.

2. Лабораторные работы по дисциплине «Управление в технических системах» / Козлов О.С. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2003.

ЗМІСТ

ПРАКТИЧНА РОБОТА №1	3
ВИКОРИСТАННЯ ПРОГРАМНОГО КОМПЛЕКСУ "МОДЕЛЮВАННЯ В ТЕХНІЧНИХ ПРИСТРОЯХ" (ПК "МВТУ") ДЛЯ АНАЛІЗУ ДИНАМІКИ ЛІНІЙНИХ І ЛІНЕАРИЗОВАНИХ САР, ОПИСАНИХ У ЗМІННИХ "ВХІД – ВИХІД"	
ПРАКТИЧНА РОБОТА №2	29
АНАЛІЗ СТІЙКОСТІ Й КОРЕКЦІЯ САР У СЕРЕДОВИЩІ ПК "МВТУ" ПО ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИКАХ І ПО ПОЛЮСАХ	
ПРАКТИЧНА РОБОТА №3	49
АНАЛІЗ У СЕРЕДОВИЩІ ПК "МВТУ" ДИНАМІЧНИХ СИСТЕМ, ЗАДАНИХ У ФОРМІ КОШІ І В ЗМІНИ СТАНУ	
ПРАКТИЧНА РОБОТА №4	77
ДИНАМІЧНІ СИСТЕМИ ІЗ ЗАПІЗНЮВАННЯМ. ДОСЛІДЖЕННЯ ВІДОМИХ ДИНАМІЧНИХ ЗАВДАНЬ МЕТОДАМИ СТРУКТУРНОГО МОДЕЛЮВАННЯ	
ПРАКТИЧНА РОБОТА №5	93
МАТЕМАТИЧНЕ МОДЕЛЮВАННЯ ДИНАМІКИ НЕЛІНІЙНОЇ САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА	
ПРАКТИЧНА РОБОТА №6	110
ОПТИМІЗАЦІЯ ПАРАМЕТРІВ САР І МОДЕЛЮВАННЯ ЛОГІКИ АЛГОРИТМІВ АВАРІЙНОГО ЗАХИСТУ В САР ЯДЕРНОГО РЕАКТОРА	

Навчально-методичне видання

УПРАВЛІННЯ СКЛАДНИМИ СИСТЕМАМИ

Методичні вказівки до виконання практичних робіт з курсу “Управління складними системами” магістрами спеціальності 151 “ Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології”

Укладачі: Д.В. Трушаков, к.т.н. доцент
 М.О. Федотова, к.т.н., асистент
 І.О. Скриннік, к.т.н., доцент
