

**КРАСНОЛИМАНСЬКИЙ ЗАОЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра автоматички та комп'ютерних систем**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

**до виконання лабораторних робіт з дисципліни**

***«АВТОМАТИКА ТА АВТОМАТИЗАЦІЯ УСТАТКУВАННЯ  
ВАГОНІВ ТА ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ»***

**Харків – 2013**

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри автоматички та комп'ютерних систем

29 жовтня 2011 р., протокол № 2.

Рекомендуються для студентів спеціальності „Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту (вагони)” заочної форми навчання.

Укладачі:

доцент О.Ф. Єнікєєв,  
Д.Ю. Захаренков

Рецензент

доц. О.І. Семененко

## МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з дисципліни  
„Автоматика та автоматизація устаткування вагонів та  
технологічних процесів”

Відповідальний за випуск Єнікєєв О.Ф.

Редактор Решетилова В.В.

---

Підписано до друку 21.11.11 р.

Формат паперу 60x84 1/16. Папір писальний.

Умовн.-друк.арк. 1,0. Тираж 50. Замовлення №

Видавець та виготовлювач Українська державна академія залізничного транспорту,  
61050, Харків-50, майдан Фейербаха, 7.  
Свідоцтво суб'єкта видавничої справи ДК № 2874 від 12.06.2007 р.

**УКРАЇНСЬКА ДЕРЖАВНА АКАДЕМІЯ  
ЗАЛІЗНИЧНОГО ТРАНСПОРТУ**

**КРАСНОЛИМАНСЬКИЙ ЗАОЧНИЙ ФАКУЛЬТЕТ**

**Кафедра „Автоматика та комп’ютерні системи”**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання лабораторних робіт з дисципліни  
„Автоматика та автоматизація устаткування вагонів та  
технологічних процесів”

Харків - 2013

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано до друку на засіданні кафедри „Автоматика та комп'ютерні системи” 29 жовтня 2011 р., протокол № 2.

Рекомендуються для студентів спеціальності „Рухомий склад та спеціальна техніка залізничного транспорту (вагони)” заочної форми навчання.

Укладачі:

доцент О.Ф. Єнікєєв,  
Д.Ю. Захаренков

Рецензент

доц. О.І. Семененко

## ЗМІСТ

	Вступ .....	4
	Загальні методичні вказівки до виконання робіт .....	4
1	Лабораторна робота 1. ОЗНАЙОМЛЕННЯ ІЗ СЕРЕДОВИЩЕМ MATLAB .....	5
2	Лабораторна робота 2. ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ .....	10
3	Лабораторна робота 3. ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ САУ ...	13
4	Лабораторна робота 4. ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАНЬ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ САУ .....	16
5	Лабораторна робота 5. СИНТЕЗ САУ МЕТОДОМ КОРЕНЕВОГО ГОДОГРАФА .....	20
6	Лабораторна робота 6. ОЗНАЙОМЛЕННЯ З ПРОГРАМОЮ SIMULINK .....	23
	Список літератури .....	33
	Додаток А - Варіанти індивідуальних завдань .....	34

## **ВСТУП**

Предметом вивчення курсу є: основи теорії синтезу систем автоматичного управління (САУ) технологічними процесами виготовлення та ремонту рухомого складу залізничного транспорту (вагонів), методів отримання ними первинної інформації, принципи побудови та методи їхнього математичного моделювання, підходи до аналізу динамічних та статичних характеристик побудованих моделей, а також основні критерії синтезу та оцінювання якості роботи.

## **ЗАГАЛЬНІ МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ВИКОНАННЯ РОБІТ**

Методичні вказівки розраховано на виконання шести двогодинних лабораторних робіт. Вони присвячені дослідженню математичних моделей САУ з використанням можливостей операційної системи *Matlab*. Під час виконання лабораторних робіт студенти засвоюють навички роботи з операційною системою *Matlab*, досліджують частотні характеристики, вивчають методи перетворення структурних схем САУ та визначення їхньої стійкості, ознайомлюються з роботою програми *Simulink*.

Для виконання лабораторних робіт академічна група розбивається на підгрупи з двох-трьох студентів, які працюють на закріпленому комп'ютері. Для виконання лабораторної роботи студенти вивчають необхідні розділи конспекту лекцій. Керівник занять виконує перевірку готовності студентів до виконання лабораторної роботи та дає дозвіл на її виконання. Варіанти індивідуальних завдань для підгрупи у вигляді коефіцієнтів передатної функції наведені у додатку А. Результати виконання

лабораторної роботи затверджує керівник. До складу звіту про виконання лабораторної роботи входять такі обов'язкові пункти:

- назва та мета лабораторної роботи;
- результати теоретичних розрахунків;
- графіки, які отримано за допомогою операційної системи

*Matlab*;

- аналіз отриманих результатів;
- висновки.


## **1 Лабораторна робота 1**

### **ОЗНАЙОМЛЕННЯ ІЗ СЕРЕДОВИЩЕМ MATLAB**

*Мета роботи: вивчення середовища операційної системи Matlab, основних прийомів роботи в середовищі. Вивчення синтаксису й основних обчислювальних процедур.*

#### **1.1 Короткі теоретичні відомості**

Операційна система *Matlab* запускається до роботи за допомогою

іконки  (*matlab.exe*). При цьому з'являється робоче вікно системи.

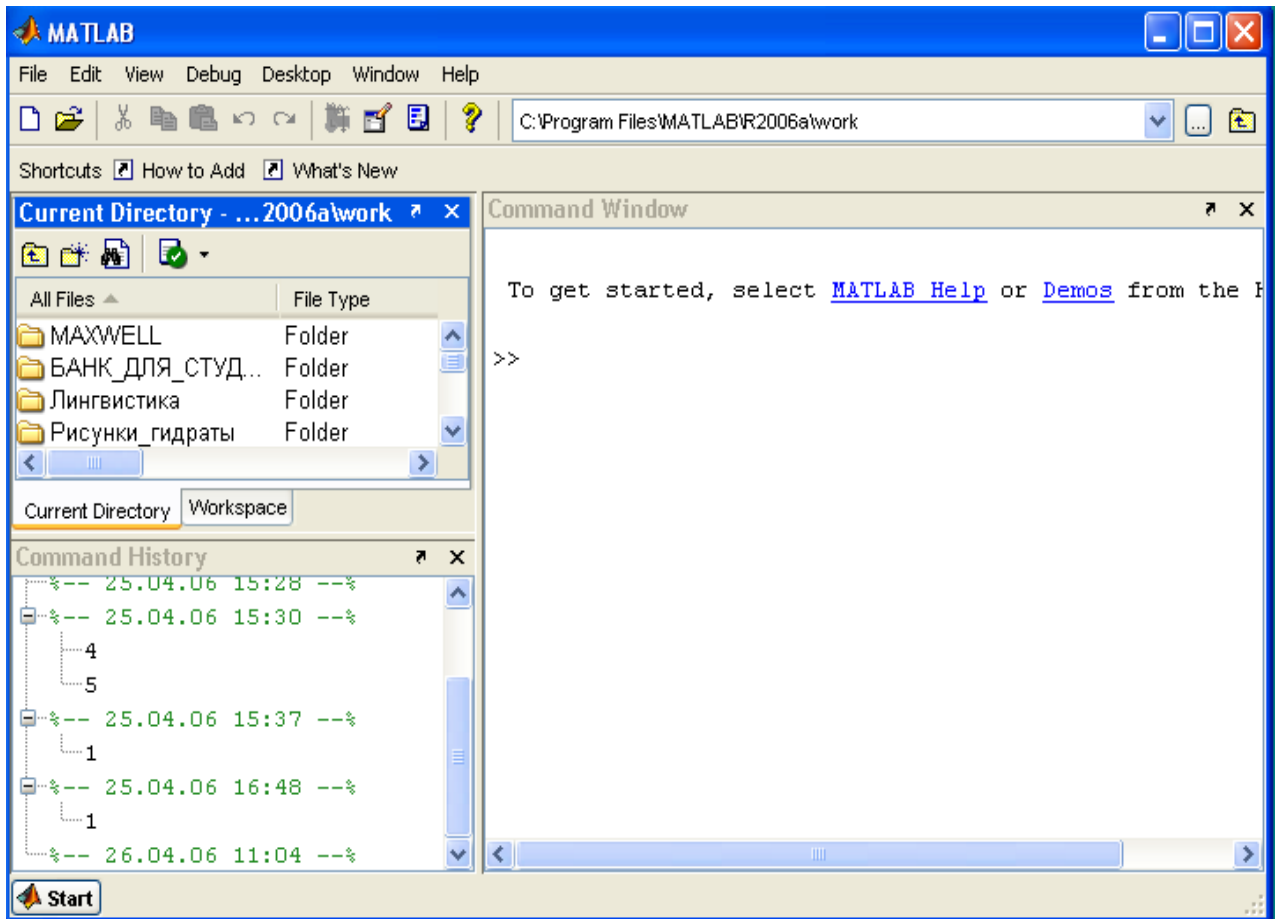


Рисунок 1.1 - Робоче вікно операційної системи *Matlab*

Рядок меню (File, Edit, View і т.д.) багато в чому схожий з аналогічним рядком редактора Microsoft Word. Розташований нижче рядок іконок також виконує ті ж операції, що й у редакторі Word (за винятком двох останніх). Тому, маючи навички роботи в Word, досить просто орієнтуватися в робочому вікні *Matlab*. На рисунку 1.1 у верхньому вікні ліворуч подається зміст директорії *Current Directory*. А також всі ці папки містяться в каталозі *Work* системи. У нижньому вікні наводиться послідовність виконаних команд. Форму робочого вікна можна міняти за допомогою меню *View*. Розміри вікон регулюються перетаскуванням границі за допомогою миші. У командному вікні після знака ">>" набирається командний рядок, який виконується після натискання клавіші "*Enter*".

Операційна система *Matlab* дозволяє створювати програмні



файли, аналогічні іншим мовам програмування високого рівня. Поряд з тим вона має властивості потужного програмувального калькулятора. Формат числа задається меню *File* (рисунок 1.1) у розділі *Preferences* за допомогою функції *Numeric Format*. Найбільш часто використовуються *Short* і *Long* – короткий і довгий формати чисел. Основні арифметичні операції виконуються за допомогою традиційних знаків: "+", "-", "\*", "/" (ділення ліворуч праворуч), "\" (ділення праворуч ліворуч), "^" (піднесення в ступінь). Визначення знака заданого числа  $a$ :  $sign(a)$ . Аргументом функції  $sign$  можуть бути числа, вирази, математичні функції. Округлення числа  $a$  до найближчого цілого:  $round(a)$ . Абсолютне значення заданого числа або виразу -  $abs$ . Обчислення виконуються в командному вікні після команди "Enter". Результат присвоюється параметру "ans".

Робота з матрицями:

- задання ряду чисел із заданим кроком і за замовчуванням  $t=(0:0.5:7)$ ;
- задання матриць (наприклад:  $a = [1\ 2\ 3;4\ 5\ 6]$ ). Матричні операції: додавання, віднімання (+, -); множення (\*);обіг (inv); ділення (/); піднесення в ступінь (^); транспонування ('). Інформативні відомості про матриці, вектори, числа: розмірність матриці  $A$ :  $size(A)$ ; довжина вектора  $P$ :  $length(P)$ ; розкладання числа  $N$  на прості множники:  $factor(N)$ . Підсумовування елементів вектора  $P$ :  $sum(P)$ . Підсумовування елементів стовпців матриці  $A$ :  $sum(A)$ . Формування добутку елементів вектора  $P$ :  $prod(P)$ .

Графічні побудови:

- графік у полярній системі координат  $polar(t,y)$ . Сполучення графіків в одній системі координат за допомогою функції *hold on*, наприклад,  $polar(t,y1), hold\ on,polar(t,y2,'r')$ ;
- графік у декартовій системі координат  $plot(t,y)$ ;
- формування пояснень до графіка за допомогою функції  $gtext$ , наприклад,  $plot(t,y), grid, gtext('t'), gtext('y')$  необхідні символи ( $t$  і  $y$ ) устанавлюються в позиції курсора миші;
- побудова графіків заданих функцій -  $fplot$ . Формування

пояснень до накреслення декількох графіків за допомогою функції *legend*:

- у лівому верхньому куті: *legend('s1','c2', 2)*;
- у лівому нижньому куті: *legend('s1','c2', 3)*;
- у правому нижньому куті: *legend('s1','c2', 4)*;
- у правому верхньому куті: *legend('s1','c2', 1)*
- або за замовчуванням: *legend('s1','c2')*;
- поза робочою областю графіка: *legend('s1','c2', -1)*.

## 1.2 Робоче завдання

Провести дослідження робочого середовища системи *Matlab* і основних прийомів роботи з матрицями й функціями, а так само побудови графіків функцій, керуючись наведеними нижче вказівками.

### *Робота з матрицями*

- 1 Створити в командному вікні *Matlab* матрицю:  $a = [1\ 2\ 3; 4\ 5\ 6]$  або  $a = [1,2,3;4,5,6]$ .
- 2 Транспонувати матрицю  $a$ :  $a1 = a'$ .
- 3 Створити матрицю  $b = [10\ 20\ 30; 40\ 50\ 60]$ .
- 4 Перемножити матриці  $a1$  і  $b$ :  $z = a1*b$ .
- 5 На екрані створити напис перемножування матриць  $a1$  і  $b$ : за допомогою *disp* (перемножування матриць  $a1$  і  $b$ : ').
- 6 Вивести результат перемножування, набравши в командному рядку позначення з і натиснути клавішу *Enter*.
- 7 Щоб не було виведення проміжних результатів, наприкінці кожного рядка (команди) слід ставити крапку з комою.
- 8 Опрацювати попередні пункти команд із крапкою з комою

й без.

9 Пункти 1-6 записати в М-файлі. Для цього в командному рядку набрати *edit*. Як тільки відкриється вікно текстового редактора, повторити набір команд пп. 1-6 і зберегти під яким-небудь ім'ям (наприклад, Lab1). Тим самим створили М-сценарій.

10 Вийти з редактора в командне вікно *Matlab*.

11 Запустити на виконання створений М-сценарій. Для цього в активному командному рядку набрати ім'я М-сценарію й натиснути клавішу *Enter*.

12 Для повернення в редактор з метою редагування створеного раніше М-файлу в командному рядку набрати *edit* і через пробіл ім'я бажаного файлу (наприклад, Lab1).

13 У М-файлі можна записувати коментар. Вони створюються за допомогою знака. Після знака можна писати як російською, так і англійською й т.д. Усе, що знаходиться за знаком, є невиконуваними діями, навіть якщо там будуть записані стандартні команди *Matlab*.

14 Створити М-сценарій з набором матриць і їхнім інвертуванням. Інвертування матриці з: *inv(c)*.

### *Побудова графіків функції*

Побудова графіків функції експонентного розподілу. Відповідно до сценаріїв 1.1 і 1.2 побудувати функції розподілу ймовірностей і функції щільності розподілу ймовірностей.

1 Задаємо цикл зміною  $j$

```
for j = 1 : 48 .
```

2 Задаємо функцію з генератором змінної

```
 $x(j) = -0.5 * \log(rand(1)) .$ 
```

3 Кінець циклу  
`end`

4 Сортування значень функції  
`t1=sort(x);`

5 Задаємо експонентний розподіл  
`F1=1-exp(-2*t1);`

6 На одному графіку виводимо значення функції та її експонентний розподіл.

`plot(t1,F1),grid`

## **2 Лабораторна робота 2 ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ЛІНІЙНИХ СИСТЕМ**

*Мета роботи: вивчити основні прийоми дослідження динаміки систем автоматичного управління у середовищі операційної системи Matlab.*

### **2.1 Короткі теоретичні відомості**

Перетворення, за Лапласом, в операційній системі *Matlab* - функція `laplace`:

`syms x y t;` - задання символічних змінних;  
`f1 = t;` - задамо функцію-оригінал;  
`L1 = laplace(f1)` - визначення зображення, за Лапласом, від лінійної функції;  
`f2 = sym('10')` - функцію  $f2 = 10$  виражаємо в символічному вигляді;  
`L2 = laplace(f2)` - визначення зображення від постійної;  
`f3 = sym('3')*t + sym('7')` - оригінал лінійної функції;  
`L3 = laplace(f3)` - зображення лінійної функції;  
`f4 = exp(-t)` - оригінал експонентної функції (зі знаком «мінус»);  
`L4 = laplace(f4)` - зображення експонентної функції;  
`f5 = exp(t)` - оригінал експонентної функції (зі знаком «плюс»);  
`L5 = laplace(f5)` - зображення експонентної функції;  
`f6 = sin(x);`  
`L6 = laplace(f6)` - зображення тригонометричної функції  $\sin(x)$ ;  
`L7 = laplace(cos(x))` - зображення тригонометричної функції  $\cos(x)$ ;

*Передатною функцією лінійної динамічної системи* називається відношення зображення, за Лапласом, вихідного сигналу до зображення, за Лапласом, вхідного сигналу при нульових початкових умовах. Передатна функція в загальному випадку є дрібнораціональною функцією щодо оператора перетворення Лапласа

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}, \quad m \leq n.$$

Умова  $m < n$  відповідає умові реалізованості систем. Створюються передатні функції за допомогою оператора - `tf`. Нулі передатної функції - це корінь чисельника, полюси - корінь знаменника. Вони визначаються за допомогою операторів - `zero`, `pole`.

*Перехідною характеристикою* (функцією) об'єкта (системи) управління називається його реакція в часі при впливі на нього одиничної функції (одиничного стрибка) при нульових початкових умовах. Формати запису `step` розглянемо на прикладах з

передатними функціями:

- W1=tf(12,[1 2 3 1]) - раціональна передатна функція;
- » step(W1),grid - з автоматичним встановленням часового інтервалу;
- » step(W1,25),grid - з заданням часового інтервалу від 0 до 25;
- » Z=zpk([],[-1 -2],4) - функція з виділеними нулями й полюсами;
- » step(Z),grid - з автоматичним встановленням часового інтервалу;
- » step(Z,13),grid - з часовим інтервалом від 0 до 13;
- » step(Z,13,'r\*'),grid,hold on,step(W1,'g\*') - сполучення двох графіків (1 спосіб);
- » step(Z,13,'r\*',W1,'g\*'),grid - сполучення двох графіків (2 спосіб).

*Імпульсною характеристикою* (функцією) системи називається реакція системи в часі при подачі на її вхід функції Дірака  $\delta(t)$  (з нескінченно великою амплітудою й нескінченно малої тривалості). Формат запису команди `impulse` аналогічний.

*Логарифмічною й частотною характеристикою* (функцією) системи називається реакція системи в часі при подачі на її вхід гармонійної функції  $(A\sin(\omega t + \varphi))$ . Формат запису команди `Bode` аналогічний.

## 2.2 Робоче завдання

Провести дослідження динамічних властивостей лінійної системи, яка задана такою передатною функцією

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}, \quad m \leq n.$$

Індивідуальні коефіцієнти передатної функції наведені у додатку А. Порядок виконання завдання наступний.

1 Створимо ЛТІ-об'єкт із ім'ям `w`, для цього виконаємо:

$w=tf([b_i],[a_i])$ .

2 Побудуємо перехідну функцію командою  $step(w)$ .

3 Побудуємо імпульсну перехідну функцію командою  $impulse(w)$ .

4 Діаграму Бодє одержимо, використовуючи команду  $bode(w)$ .

5 Аналогічні результати можна одержати, використовуючи команду  $ltiview(w)$ , з відповідними налаштуваннями в меню «Plot Configuration».

Кожна з побудованих характеристик повністю й однозначно визначає розглянуту систему управління.

### **3 Лабораторна робота 3 ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ САУ**

*Мета роботи: вивчити основні прийоми дослідження стійкості лінійних систем з використанням операційної системи Matlab.*

#### **3.1 Короткі теоретичні відомості**

Стійкість характеризує властивість системи обмежено реагувати на збурення її початкового стану та (або) вхідних діянь. На рисунку 3.1 наведений приклад нестійкого та стійкого станів

рівноваги кулі на поверхні. У нестійкому стані під дією будь-якої обмеженої сили куля необмежено рухатиметься вниз, після чого вона вже не повернеться у стан рівноваги. Якщо ж куля знаходиться у стійкому стані рівноваги, то рух кулі під дією обмеженої сили буде обмежений, а після припинення зовнішньої дії вона знов повернеться у стан рівноваги.

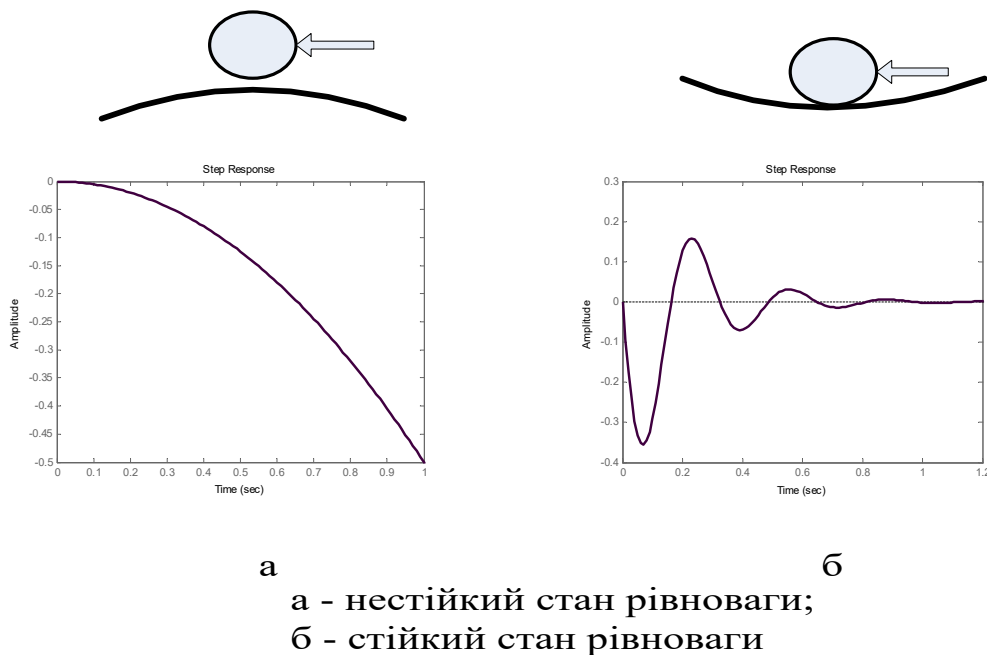


Рисунок 3.1 – Приклади станів рівноваги кулі:

а) нестійкого, б) стійкого

Таким чином, при відсутності стійкості невеликі збурення зовнішніх діянь або початкового стану можуть викликати появу значних змін характеру руху системи. Задача аналізу стійкості лінійної стаціонарної замкненої системи полягає у пошуку коренів характеристичного рівняння і визначенні знака їхньої дійсної частини. *Критерії стійкості* – сукупність умов, виконання яких гарантує виконання вимог до коренів характеристичного рівняння замкненої системи без їх безпосереднього отримання та аналізу. На практиці найбільшого застосування набули алгебраїчний критерій стійкості Гурвіца та частотний критерій стійкості Найквіста.

Критерій Гурвіца відноситься до так званих алгебраїчних критеріїв стійкості. Згідно з ним лінійна система, характеристичний поліном якої при  $a_i > 0$  дорівнює



$$G(p) = a_3 p^3 + a_2 p^2 + a_1 p + a_0,$$

стійка, якщо позитивні  $n$  головних визначників матриці Гурвіца

$$\begin{vmatrix} a_2 & a_0 & 0 \\ a_3 & a_1 & 0 \\ 0 & a_2 & a_0 \end{vmatrix}.$$

Порядок складання матриці Гурвіца наступний. На головній діагоналі записуються всі коефіцієнти, починаючи з першого. Далі заповнюються рядки: парними коефіцієнтами один по одному, якщо на головній діагоналі знаходиться парний коефіцієнт, і непарними, якщо на головній діагоналі знаходиться непарний коефіцієнт. Якщо який-небудь коефіцієнт відсутній, то замість нього заноситься нуль.

Для оцінки стійкості системи необхідно обчислити всі визначники Гурвіца  $\Delta_i$  ( $i = 1, 2, \dots, n$ ). Вони визначаються з вказаної матриці шляхом відкреслення рівного числа рядків і стовпців у лівому верхньому куті матриці. Система стійка, якщо  $\Delta_i > 0$  для всіх  $i = 1, 2, \dots, n$ .

Частотний критерій стійкості Найквіста відноситься до групи графоаналітичних критеріїв.

*Теорема. Для стійкості замкненої системи необхідно і достатньо, щоб в усіх областях частот, де ЛАЧХ розімкненої системи є додатною, кількість переходів ЛФЧХ розімкненої системи через рівень  $-180^\circ$  була парною.*

Ступінь віддалення параметрів системи від межі області стійкості визначають чисельними характеристиками, які називаються *запасами стійкості*. У теорії автоматичного керування використовують:

- *запас стійкості за підсиленням (амплітудою)* - характеризує межі зміни коефіцієнта підсилення розімкненої САУ, при яких замкнена система виходить на межі області стійкості;
- *запас стійкості за фазою* характеризує максимальну припустиму деформацію ФЧХ розімкненої САУ (при незмінному значенні її частоти зрізу), при якій замкнена система вийде на межу області стійкості.

### 3.2 Робоче завдання

Провести дослідження стійкості лінійної системи, яка задана такою передатною функцією

$$W(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_0}{a_n s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_0}, \quad m \leq n.$$

Індивідуальні коефіцієнти передатної функції наведені у додатку А. Порядок виконання завдання наступний.

1 Створимо LTI-об'єкт із ім'ям *w*, для цього виконаємо:  $w = \text{tf}([b_i], [a_i])$ .

2 Знайдемо полюси й нулі передатної функції з використанням команд *pole*, *zero*. На підставі отриманих полюсів передатної функції за допомогою кореневого критерію визначимо стійкість системи.

3 За допомогою критерію Гурвіца визначаємо стійкість системи.

4 Визначимо частотний годограф Найквіста виконавши для цього команду *nyquist(w)*. Змінюючи коефіцієнт підсилення, визначаємо проходження кривої через чверті. Робимо висновок про стійкість системи.

5 Визначаємо запас стійкості лінійної системи за амплітудою та фазою за допомогою команди *margin(w)*.

#### 4 Лабораторна робота 4

### ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕТВОРЮВАНЬ СТРУКТУРНОЇ СХЕМИ САУ

*Мета роботи: вивчення методів перетворення структурних схем математичних моделей САУ з використанням операційної системи Matlab.*

#### 4.1 Короткі теоретичні відомості

Для перетворення схеми математичної моделі САУ до одноконтурного вигляду виконують (у тій чи іншій послідовності) такі операції:

- заміну з'єднань ланок (послідовного, паралельного і охоплення зворотним зв'язком) еквівалентними ланками;
- зміну порядку підсумовування діянь;
- перенос суматора або точки розгалуження з виходу ланки на вхід, а також зворотний перенос.

Заміна з'єднань ланок еквівалентною ланкою з використанням операційної системи *Matlab* виконується за правилами. Для задання передаточної функції з'єднань ланок необхідно спочатку задати передаточні функції окремих ланок, після чого записати вираз для з'єднань відповідно до таких правил:

- послідовне з'єднання ланок  $K = K1 * K2$  ;
  - паралельне з'єднання ланок  $K = K1 + K2$  ;
  - зустрічно паралельне з'єднання ланок, у випадку коли ланку  $K1$  охоплено зворотним зв'язком за допомогою ланки  $K2$
- $$K = \frac{K1}{1 \mp K1 * K2},$$

де знак "мінус" записується при позитивному, а "плюс" при негативному зворотному зв'язку. Крім того, при негативному зворотному зв'язку в операційній системі *Matlab* є спеціальна функція  $K = feedback(K1, K2)$ . Ця команда дає кращий результат, тому що при її виконанні здійснюється мінімізація багаточленів чисельника та знаменника.

*Приклад 1.* Необхідно розрахувати передаточну функцію ланки, створеної у вигляді охоплення ланки з передаточною функцією

$$K_1(p) = \frac{10}{0.5p + 1}$$

негативним зворотним зв'язком через ланку

$$K_2(p) = \frac{0.5p}{0.1p + 1}.$$

У командному вікні набираємо

```
>> k1=tf([10],[0.5 1]);k2=tf([0.5 0],[0.1 1]);k=feedback(k1,k2)
```

Після натискання на клавішу Enter отримуємо таке:

Transfer function:

$$\frac{s + 10}{0.05 s^2 + 5.6 s + 1}$$

Як бачимо, кінцевий результат записаний зі скороченням загального множника  $(0.5p+1)$ .

Для нанесення масштабної сітки або поєднання графіків двох функцій необхідно після запису відповідної функції додати у командний рядок запис *grid* (наприклад:  $(step(K1, K2); grid)$ ).

*Приклад 2.* Розрахувати перехідні характеристики ланки

$$K_1(p) = \frac{10}{0.5p+1}$$

до та після охоплення її негативним зворотним зв'язком через ланку

$$K_2(p) = \frac{0.5p}{0.1p+1}.$$

У командному вікні набираємо

```
>> k1=tf([10],[0.5 1]);k2=tf([0.5 0],[0.1 1]);k=feedback(k1,k2);  
>> step(k,k1);grid
```

Після натискання на клавішу Enter отримуємо графік, який наведено на рисунку 4.1.

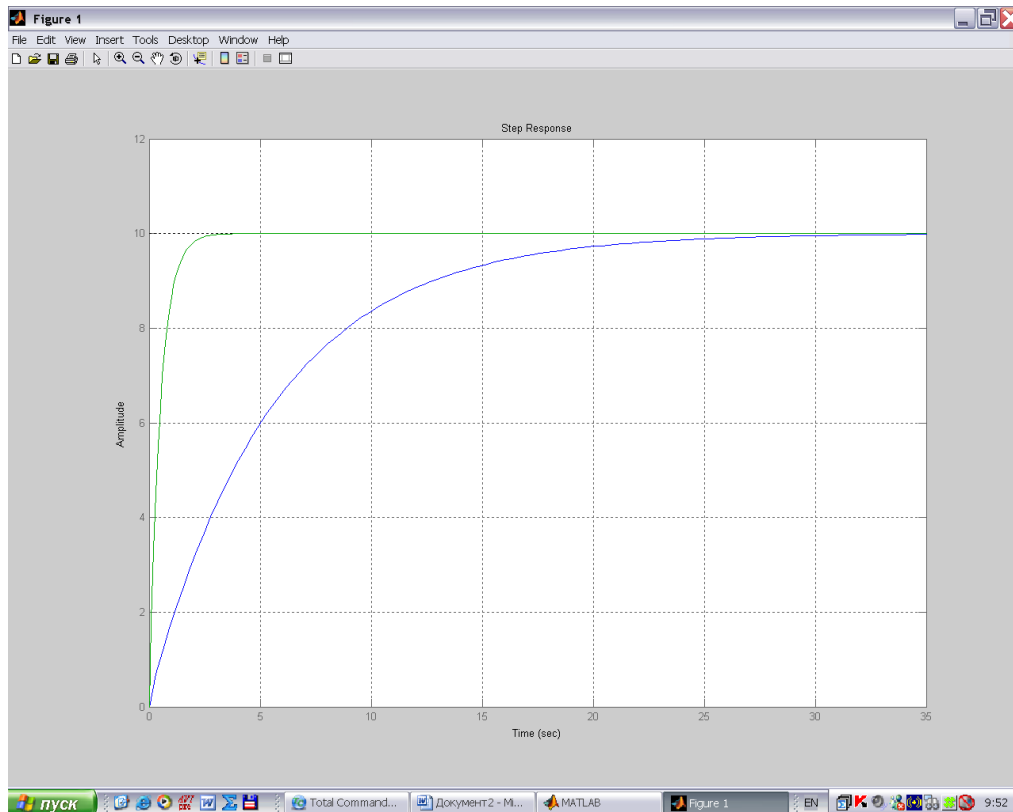


Рисунок 4.1 – Графіки перехідних функцій

## 4.2 Робоче завдання

1 Для таких передатних функцій

$$K_1(p) = \frac{1}{0.015p + 1}, \quad K_2(p) = \frac{0.025p}{0.001p + 1}.$$

Визначити передатні функції їхнього послідовного, паралельного та зустрічно паралельного з'єднання. Виконати порівняння графіків перехідних характеристик передатних функцій  $K(p)$  та  $K_1(p)$ .

2 Створимо ЛТІ-об'єкт із ім'ям  $w$ , для цього виконаємо:  $w = \text{tf}([b_i], [a_i])$ . Індивідуальні коефіцієнти передатної функції наведені у додатку А.

3 Визначити вплив коефіцієнтів  $a_i$  на діаграму Боде та на годограф Найквіста (для цього подаємо  $a_i = 0$ ).

## 5 Лабораторна робота 5

### СИНТЕЗ САУ МЕТОДОМ КОРЕНЕВОГО ГОДОГРАФА

*Мета роботи: вивчити метод кореневого годографа, засвоїти основні принципи аналізу й синтезу САУ за його допомогою.*

#### 5.1 Короткі теоретичні відомості

Формування передатних функцій з розкладанням на множники чисельника й знаменника із заданим коефіцієнтом передачі - zpk (zero-pole-gain), символ k відображає gain. Символ [] означає, що в чисельнику передатної функції характеристичний поліном нульовий. Сформуємо передатну функцію САУ зі статичним коефіцієнтом, який дорівнює 7.7, та з полюсами  $s_1 = -3.3$ ,  $s_2 = -0.25$ ,  $s_3 = -12.7$  й з нулями  $S_1 = -5$ ,  $S_2 = +4$ .

У командному рядку *Matlab* набираємо

```
W4=zpk([4,-5],[-3.3,-0.25,-12.7],7.7)
```

Результат подається у вигляді

Zero/pole/gain:

$$\frac{(s-4)(s+5)}{(s+3.3)(s+12.7)(s+0.25)}$$

Передатні функції описують об'єкти управління з одним входом і одним виходом - системи SISO (single input single output). Для розрахунку корінь характеристичного рівняння можна використати функцію eig.

```
» eig(W4)
ans =
    -2
    -1
```

Годограф — це геометричне місце точок кінця вектора комплексного коефіцієнта передачі на комплексній площині при зміні частоти від 0 до  $\infty$ . Значення частот відкладаються безпосередньо на годографі, що є амплітудно-фазовою характеристикою системи (АФЧХ). Для визначення модуля й фази комплексного коефіцієнта передачі на заданій частоті треба відповідну крапку годографа з'єднати прямій з початком координат. Довжина отриманого відрізка відповідає модулю комплексного коефіцієнта передачі. Кут, утвореної отриманій прямій з позитивною речовинною віссю, є фазою комплексного коефіцієнта передачі. Таке подання частотної характеристики САУ досить наочно, але не дозволяє просто одержувати кількісні характеристики для порівняння різних систем.

## 5.2 Робоче завдання

Провести аналіз передатної функції заданої САУ за допомогою системи SISO, а також синтезувати передатну функцію замкненої САУ методом кореневого годографа, керуючись наведеними нижче

вказівками. САУ має таку передатну функцію

$$W(s) = \frac{(0.2s + 1)}{s(0.1s + 1)(0.04s^2 + 2 \cdot 0.2 \cdot 0.3s + 1)} \cdot$$

Порядок виконання завдання:

1 Створимо ZPK-об'єкт розімкнutoї системи на підставі заданої передатної функції

$$s=zpk('s'); w=(0.2*s+1)/(s*(0.1*s+1)*(0.04*s^2+2*0.2*0.3*s+1)).$$

2 Запустимо SISO-Design Tool, настроїмо параметри й імпортуємо ZPK-об'єкт із робочого простору *Matlab*. У вікні Root Locus Editor інтерфейсу SISO-Design Tool побудується кореневий годограф.

3 Захопивши мишею, пересувати червоним курсором по кореневому годографі до перетинання областей із уявною віссю, визначити значення  $K^{кр}$ . Пересування курсора відбувається також при уведенні значення коефіцієнта підсилення  $C$  у відповідне поле уведення у верхній частині GUI-інтерфейсу. Для розглянутого випадку  $K^{кр} \approx 3$ . Значення  $\omega^{кр}$  відповідає уявній координаті перетинання КГ уявної осі. Переглянути це значення можна в нижній частині інтерфейсу або вибравши меню пункт “View/Closed-Loop Poles”.

4 Задамо значення  $0.5K^{кр}$  і визначимо значення полюсів.

5 Наприклад, для значення  $0.5K^{кр}$  побудуємо перехідну функцію замкнутої системи. Для цього необхідно вибрати в меню пункт “Tools/Loop Responses/Closed-Loop Step”. Видно, що система стійка. Мінючи значення  $C$ , можна побачити відповідну зміну перехідної функції або інших характеристик системи в динаміці. При зміні  $C$  відбувається автоматичне відновлення обраних характеристик замкнутої системи.



## 6 Лабораторна робота 6 ЗНАЙОМСТВО З ПРОГРАМОЮ SIMULINK

*Мета роботи: на прикладі диференціальних рівнянь першого й другого порядку освоїти етапи підготовки й моделювання об'єктів.*

### 6.1 Робоче завдання

Більшість об'єктів управління описуються лінійними диференціальними рівняннями з постійними коефіцієнтами. На прикладі об'єкта, який подано диференціальним рівнянням другого порядку, розглянемо всі етапи його моделювання. Також виконаємо аналіз властивостей об'єкта за допомогою програми *Simulink*. Візьмемо об'єкт, у якого вхідним впливом є витрати пару  $u_n$ , кг/година, а вихідним - температура  $x$ ,  $^{\circ}\text{C}$ , (рисунок 6.1).

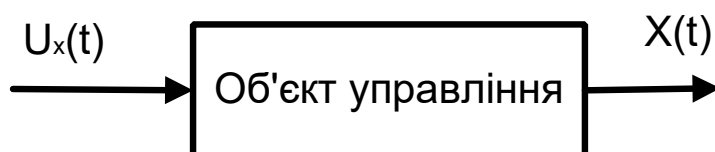


Рисунок 6.1 – Об'єкт управління

Динаміку об'єкта описує таке диференціальне рівняння

$$256 \left[ \frac{\text{мин}}{^{\circ}\text{C}} \right] \frac{d^2 x}{dt^2} + 118 \left[ \frac{\text{мин}}{^{\circ}\text{C}} \right] \frac{dx}{dt} + 7 \left[ \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right] x = 5 \left[ \frac{\text{год}}{\text{кг}} \right] u_x.$$

Функція  $u_x(t)$  - відома функція часу, а також задано початкові умови (температура об'єкта  $x|_{t=0} = 128 \text{ } ^{\circ}\text{C}$  та швидкість його остигання  $\left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = -1.6 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мин}} \right]$ ).

Таким чином, необхідно розв'язати на ЕОМ таке рівняння:

$$256 \left[ \frac{\text{мин}}{^{\circ}\text{C}} \right] \frac{d^2 x}{dt^2} + 118 \left[ \frac{\text{мин}}{^{\circ}\text{C}} \right] \frac{dx}{dt} + 7 \left[ \frac{1}{^{\circ}\text{C}} \right] x = 5 \left[ \frac{\text{год}}{\text{кг}} \right] u_x,$$

при початкових умовах

$$x|_{t=0} = 128 \text{ } ^{\circ}\text{C}, \quad \left. \frac{dx}{dt} \right|_{t=0} = -1.6 \left[ \frac{^{\circ}\text{C}}{\text{мин}} \right].$$

Для складання структурної схеми застосуємо метод зниження порядку похідної. Задача розв'язується у декілька етапів.

**Етап I.** Розв'язуємо диференціальне рівняння відносно вищої похідної

$$\frac{d^2 x}{dt^2} = -0.46 \left[ \frac{1}{\text{мин}} \right] \frac{dx}{dt} - 0.027 \left[ \frac{1}{\text{мин}^2} \right] x(t) + 0.02 \left[ \frac{^{\circ}\text{C} \text{ год}}{\text{кг} \text{ мин}^2} \right] u_x(t).$$

**Етап II.** Подаємо першу та другу похідні у вигляді інтегруючих ланок, які з'єднано послідовно. Граф послідовного з'єднання цих ланок подано на рисунку 6.2.

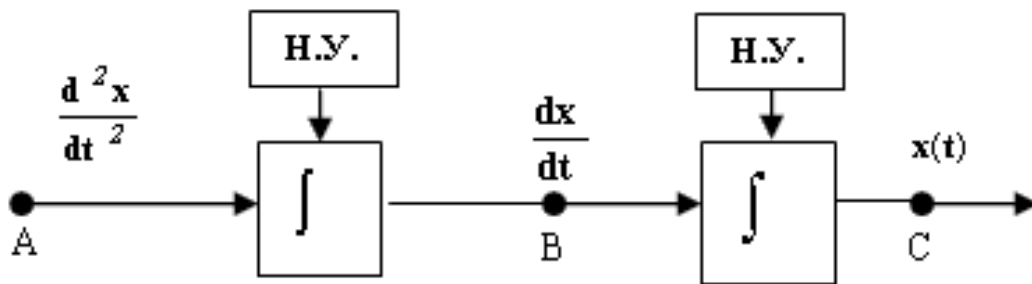


Рисунок 6.2 – Граф послідовного з'єднання інтегруючих ланок

**Етап III.** Права частина рівняння являє собою суму трьох функцій часу. Її подаємо у вигляді суматора. Граф такого з'єднання подано на рисунку 6.3.

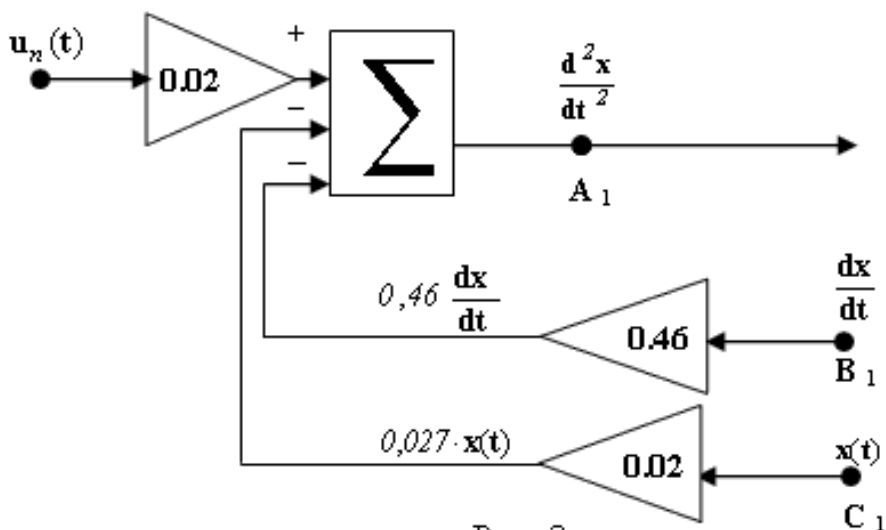


Рис. 3

Рисунок 6.3 – Граф правої частини рівняння

**Етап IV.** Виконуємо поєднання рисунків 6.2 та 6.3. У результаті цього маємо граф диференційного рівняння, яке розв'язуємо (рисунок 6.4).

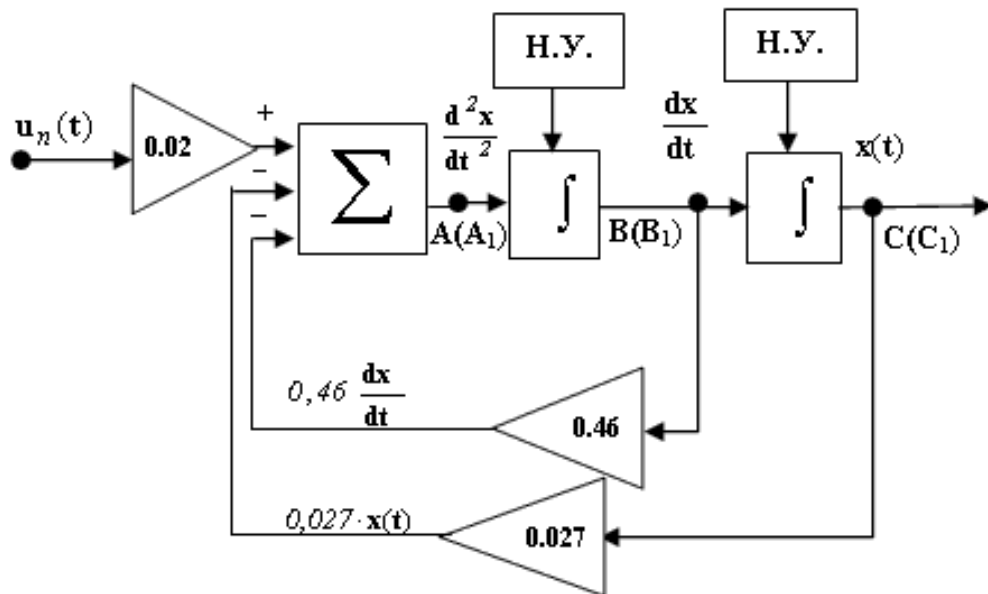


Рисунок 6.4 – Граф диференційного рівняння системи

**Етап V.** Встановивши початкові умови для інтеграторів, можемо виконувати розв’язування рівняння.

Інструментарій *Simulink* пакета *Matlab* саме й дозволяє моделювати й досліджувати системи, які подано (лінійними, лінійними зі змінними коефіцієнтами й нелінійними) диференціальними рівняннями. Єдина вимога до диференціальних рівнянь - вони повинні бути подані у вигляді структурних схем, подібних до зазначеної на рисунку 6.4.

## 6.2 Порядок виконання роботи

1 Запустити пакет *Matlab*. Запустити *Simulink* натисканням відповідної кнопки (див. рисунок 6.5).

2 Після запуску *Simulink* відкриє робоче вікно для рисування вашої моделі (поки під ім'ям *untitled*), а також вікно бібліотеки модулів (*Library: Simulink*), (рисунок 6.6). При виконанні завдання будуть потрібні Джерела сигналів збурювальних впливів (*Sources*). Приймачі сигналів (*Sinks*) і деякі з Лінійних ланок (*Linear*) - підсилювачі, інтегратори, суматори. Виклик набору елементів того або іншого типу здійснюється подвійним щигликом на відповідній іконці у вікні *Library: Simulink* (рисунок 6.6).

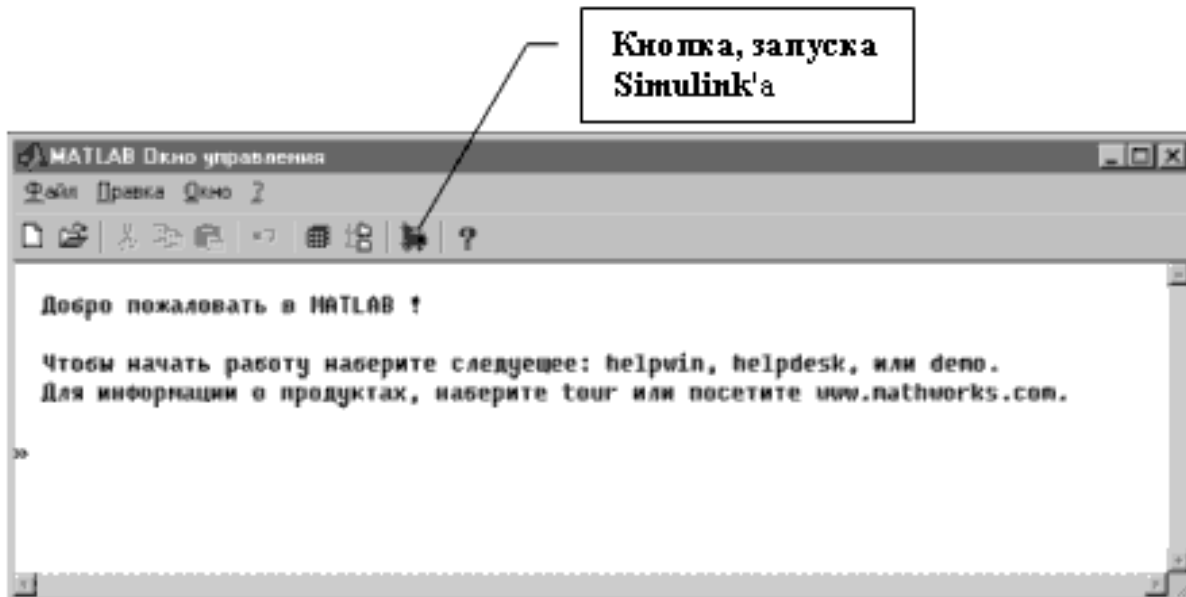


Рисунок 6.5 – Запуск *Simulink*

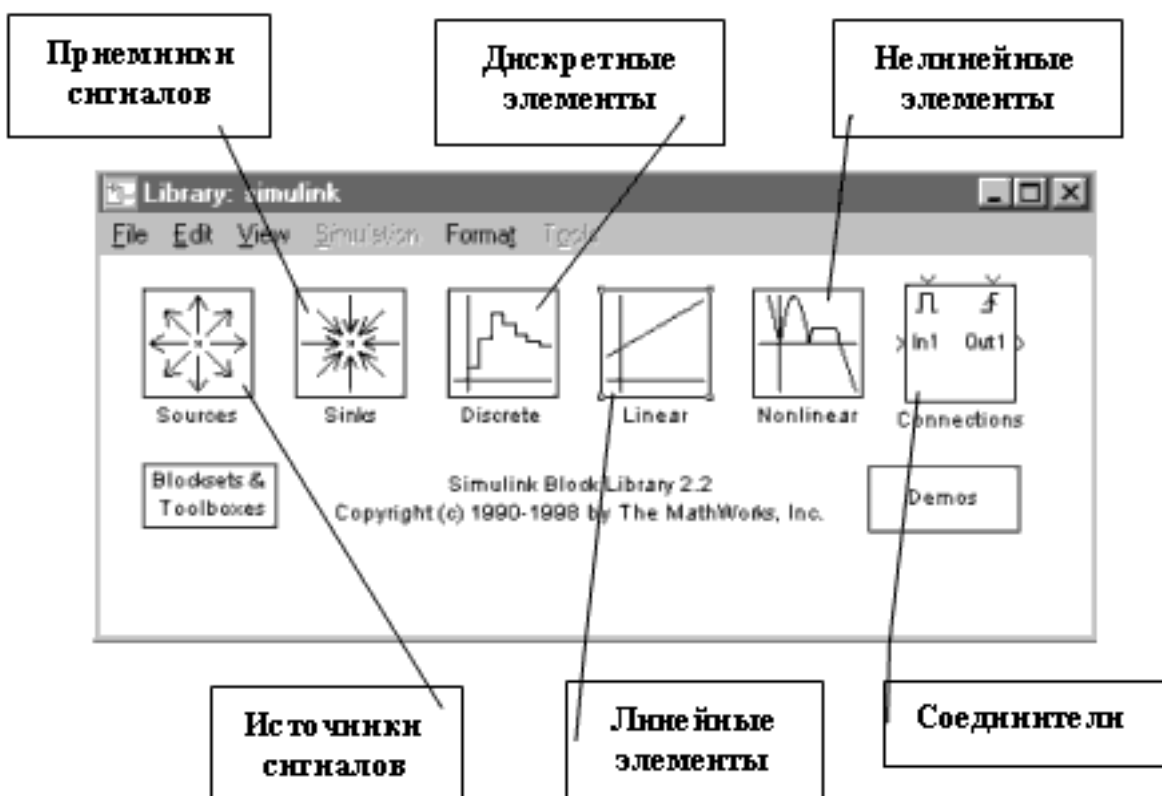




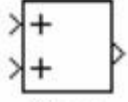
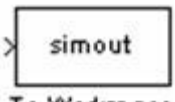

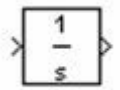



Рисунок 6.6 – Библиотеки *Simulink*

3 Зовнішній вигляд елементів, що зустрічаються найчастіше

показаний у таблиці 6.1. Щоб скласти схему, спочатку необхідно "перетягнути" всі потрібні ланки з відповідних наборів на простір *untitled*, призначений для складання блок-схеми вашої моделі. Робиться це в такий спосіб: нажати на елементі лівою кнопкою миші й, не відпускаючи кнопку, перенести покажчик миші у вікно побудови моделі й там відпустити. Відповідно до схеми на рисунку 6.6 нам необхідні: джерело стрибкоподібного збурювання, суматор, три підсилювачі, два інтегратори, два джерела постійного сигналу (для задання початкових умов) і осцилограф. У підсумку на структурній схемі моделі будуть поміщені всі необхідні елементи рисунка 6.6.

Таблиця 6.1 – Деякі елементи *Simulink*

Джерела (Sources)	Лінійні ланки (Linear)	Приймачі (Sinks)
<p>Джерело постійного сигналу</p>  <p>Constant</p>	<p>Підсилювач</p>  <p>Gain</p>	<p>Осцилограф</p>  <p>Scope</p>
<p>Джерело стрибкоподібного збурювання</p>  <p>Step</p>	<p>Суматор</p>  <p>Sum</p>	<p>Пам'ять</p>  <p>To Workspace</p>
<p>З файлу</p>  <p>From File</p>	<p>Інтегратор</p>  <p>Integrator</p>	<p>У файл</p>  <p>To File</p>

4 Тепер необхідно зв'язати між собою ці ланки, з'єднавши їх відповідно до схеми (рисунок 6.4). Для цього натиснути ліву кнопку миші на виході потрібної ланки. При цьому покажчик набуде вигляду перехрестя. Потім, не відпускаючи кнопки, "тягти" лінію, що з'явилася, до входу іншої ланки. Коли покажчик набуде вигляду подвійного перехрестя, відпустити кнопку. Система створить зв'язок між елементами й позначить її стрілкою по напрямку сигналу. Деякі воліють з'єднувати ланки за типом "вхід наступний з виходом попереднього", що іноді буває кращим.

Якщо підвести лінію від входу елемента до іншої, уже існуючої лінії зв'язку й відпустити кнопку миші, то система створить вузол, у якому сигнал розходить у двох напрямках.

Якщо необхідно перевернути ланку, то спочатку виділити одинарним щигликом миші (з'являться точки по кутах елемента). Потім, натискаючи Ctrl+R, домогтися потрібного розташування.

Лінії зв'язку, як і елементи, видаляють виділенням і натисканням Del. Виділений зв'язок позначається двома порожніми точками на її кінцях.

Переміщення цілої групи елементів "з витягуванням ліній зв'язку" здійснюється у два етапи. Спочатку виділяємо прямокутну область, що охоплює потрібні вам елементи. При цьому всі елементи цієї області будуть "позначені". Потім, "схопивши" будь-який відзначений елемент із цієї області, переміщаємо його в потрібне місце й відпускаємо. У результаті перемістяться всі елементи відзначеної області.

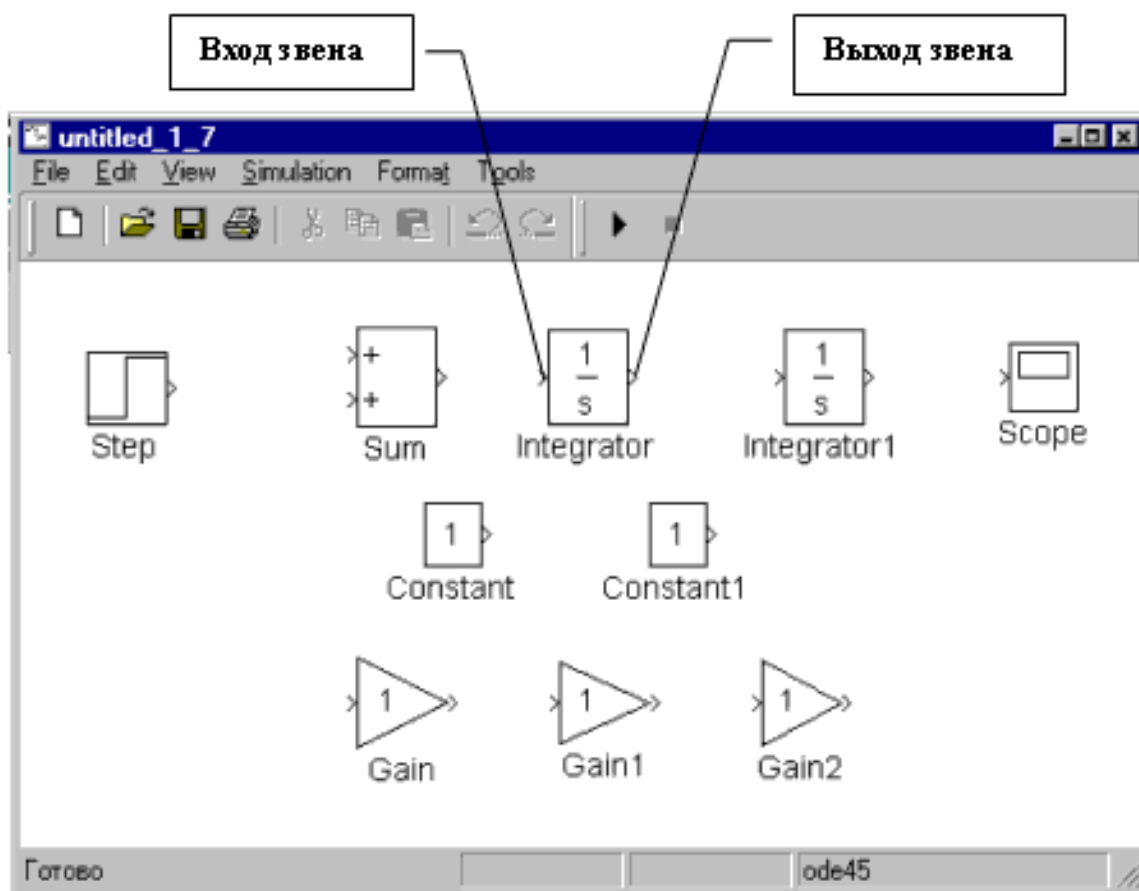


Рисунок 6.7 – Робоче вікно *Simulink*

6 Для того, щоб у суматора встановити потрібну кількість входів (у нашому прикладі - три) роблять таке: подвійним щигликом на суматорі відкривають меню його властивостей. У рядку цього меню задають послідовність плюсів і мінусів, що визначить кількість входів і відповідні знаки. У нашому прикладі вхідний вплив підсумується з позитивним знаком, а нульова й перша похідні - з негативними (комбінація "+ - -").

7 Щоб мати можливість задавати початкові умови інтеграторів, у меню Джерело початкових умов (Initial condition source) вибирають зовнішній (external). Після цього на іконці інтегратора з'являється ще один вхід (нижній), на який і подають сигнал задання початкової умови. У нашому прикладі це буде джерело постійного сигналу. Меню властивостей закривають натисканням кнопки (Apply) і потім кнопки (Close).

8 Величину постійного сигналу задають у властивостях



джерела (рядок Constant value). Величину коефіцієнта підсилення задають у властивостях підсилювача (рядок Gain). Величину й час стрибкоподібного збурювання задають у властивостях джерела. Там визначають момент надходження збурювання (рядок Step time), значення сигналу до й після збурювання (рядки Initial value і Final value відповідно).

9 Остаточний вигляд готової блок-схеми моделі показаний на рисунку 6.8.

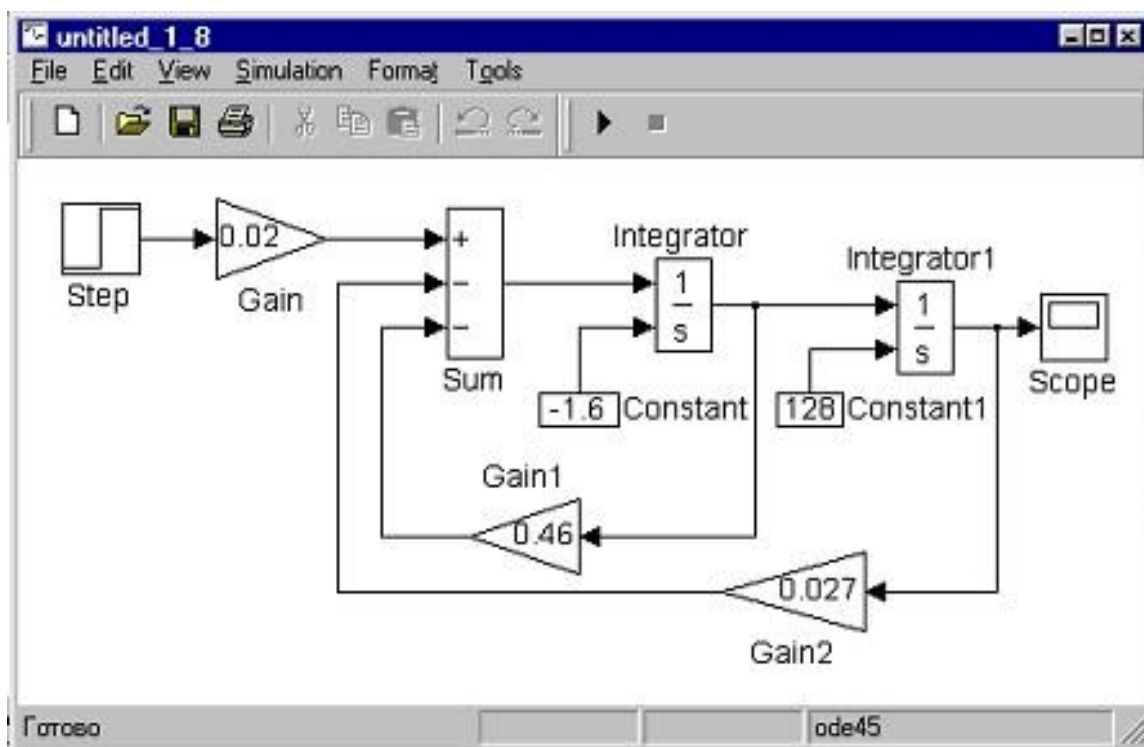



Рисунок 6.8 – Імітаційна модель САУ

10 Запуск моделі в роботу виконується натисканням кнопки  або через команду Start меню Simulation. Подвійний щиглик по іконці осцилографа (Scope) відкриває його вікно, у якому можна спостерігати зміну вихідних у часі (рисунок 6.9). Для зручності спостереження рекомендується розбити весь екран монітора по горизонталі на два поля: у верхньому розгорнути осцилограф, а в нижньому залишити модель (або навпаки, угорі блок-схема моделі, а внизу екран осцилографа, як показано на рисунках 6.7 і 6.8).

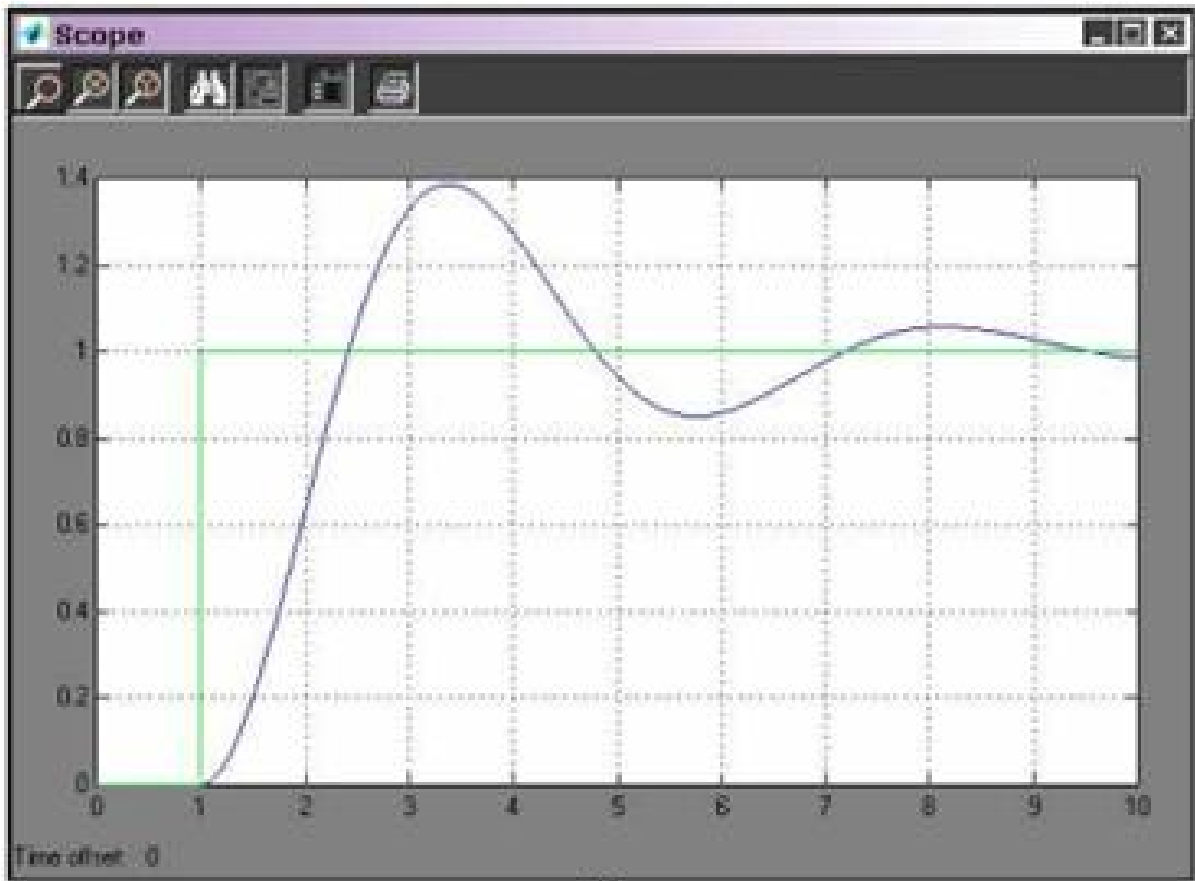




Рисунок 6.9 – Графік перехідного процесу

11 Настроювання тривалості процесу моделювання виконується в меню Simulation вікна побудови моделі untitled. У цьому меню в закладці Solver можна встановити час початку процесу моделювання (поле Start time) і його кінця (поле Stop time).

12 Настроювання параметрів осцилографа здійснюється в такий спосіб. При подвійному щиклику на іконку осцилографа з'являється його екран з координатною розміткою. При натисканні на другу праворуч кнопку на панелі інструментів з'являється вікно із двома закладками Axes і Settings. Використовуючи закладку Axes, установлюємо розміри по вертикалі ( $Y_{min}$ ,  $Y_{max}$ ). Кнопкою "бінокль"  на панелі інструментів осцилографа можна автоматично підібрати ступінь збільшення, при якій на осцилографі видні всі ділянки вже отриманих кривих без "зашкалення". Зберегти ці настроювання осцилографа можна кнопкою , розташованою там же, праворуч від "бінокля". Дію "збільшувальних стекел" X і Y треба випробувати самому. Вони призначені для розгортання на

весь екран якої-небудь частини графіків, що цікавить. Розмітка осі абсцис (часу) встановлюється автоматично відповідно до величин Start Time і Stop Time, п. 10 (якщо вжити слово auto у поле Time range).

13 Роботу моделі можна призупинити кнопкою Pause, у яку перетворюється кнопка запуску моделювання (п. 9) після її натискання. Поруч, праворуч розташована кнопка повернення в початковий стан.

14 *Simulink* автоматично перетворить блок-схему моделі в систему диференціальних рівнянь. Вибір методу інтегрування цієї системи можна зробити через меню Simulation, описане в п. 10. На панелі Solver options можна також виставити крок інтегрування (ліве поле) і тип вирішувача (праве поле). За замовчуванням виставлений авто підбір кроку (Variable step) і інтегрування методом Дорманда-Принца (ode5 Dormand-Prince). Там же можна виставити припустимі Абсолютну погрішність і Відносну погрішність інтегрування, поля Absolute tolerance і Relative tolerance відповідно. Рекомендуємо залишати всі ці параметри без змін.

15 Багатопроточний осцилограф виходить додаванням відповідного елемента - мультиплексора (Mux) з набору з'єднувачів (Connections), рисунок 6.9. У цьому випадку можна спостерігати в одних координатах одночасно кілька сигналів. Подвійним щигликом миші на мультиплексорі відкривається меню його властивостей, де можна виставити кількість входів.

## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
- 2 Воронов А.А. Основы теории автоматического регулирования – М.: Энергия, 1980.
- 3 Танатар А.И. Элементы промышленной автоматики и их динамические свойства – К.: Техника, 1975. - 232 с.
- 4 Болотин М.М., Новиков В.Е. Системы автоматизации

производства и ремонта вагонов: Учебник для вузов ж. д. транспорта. - 2-е изд., перераб. и доп. – М.: Маршрут, 2004. - 310 с.

5 Технология производства и ремонта вагонов: Учебник для вузов ж. д. трансп./ К.В. Мотовилов, В.С. Лукашук, В.Ф. Криворудченко, А.А. Петров; Под ред. К.В. Мотовилова. – М.: Маршрут, 2003. - 382 с.

## Додаток А

### Варіанти індивідуальних завдань

варіантаНомер	Коефіцієнт	Індекс				
		4	3	2	1	0
1	$a_i$	0	0	0	$1,034 \cdot 10^{-3}$	1

	$b_i$	$0,599 \cdot 10^{-12}$	$1,995 \cdot 10^{-9}$	$2,215 \cdot 10^{-6}$	$0,846 \cdot 10^{-3}$	0
2	$a_i$	0	0	0	$0,43 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,188 \cdot 10^{-12}$	$0,833 \cdot 10^{-9}$	$1,295 \cdot 10^{-6}$	$0,726 \cdot 10^{-3}$	0
3	$a_i$	0	0	0	$1,02 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,155 \cdot 10^{-12}$	$0,698 \cdot 10^{-9}$	$1,185 \cdot 10^{-6}$	$0,726 \cdot 10^{-3}$	0
4	$a_i$	0	0	0	$1,496 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,286 \cdot 10^{-12}$	$1,341 \cdot 10^{-9}$	$2,576 \cdot 10^{-6}$	$0,68 \cdot 10^{-3}$	0
5	$a_i$	0	0	0	$0,726 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,479 \cdot 10^{-12}$	$1,602 \cdot 10^{-9}$	$2,383 \cdot 10^{-6}$	$1,02 \cdot 10^{-3}$	0
6	$a_i$	0	0	0	$0,68 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,127 \cdot 10^{-12}$	$0,471 \cdot 10^{-9}$	$0,678 \cdot 10^{-6}$	$0,43 \cdot 10^{-3}$	0
7	$a_i$	0	0	0	$0,846 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,475 \cdot 10^{-12}$	$1,194 \cdot 10^{-9}$	$1,378 \cdot 10^{-6}$	$0,65 \cdot 10^{-3}$	0
8	$a_i$	0	0	0	$0,68 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,397 \cdot 10^{-12}$	$1,745 \cdot 10^{-9}$	$2,774 \cdot 10^{-6}$	$1,496 \cdot 10^{-3}$	0
9	$a_i$	0	0	0	$1,034 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,852 \cdot 10^{-12}$	$2,222 \cdot 10^{-9}$	$1,805 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-3}$	0
10	$a_i$	0	0	0	$0,726 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,139 \cdot 10^{-12}$	$0,698 \cdot 10^{-9}$	$1,313 \cdot 10^{-6}$	$1,034 \cdot 10^{-3}$	0
11	$a_i$	0	0	0	$1,496 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,106 \cdot 10^{-12}$	$0,522 \cdot 10^{-9}$	$1,043 \cdot 10^{-6}$	$0,68 \cdot 10^{-3}$	0
12	$a_i$	0	0	0	$0,43 \cdot 10^{-3}$	1
	$b_i$	$0,396 \cdot 10^{-12}$	$1,126 \cdot 10^{-9}$	$1,18 \cdot 10^{-6}$	$0,56 \cdot 10^{-3}$	0