

В. І. Барсов, Н. М. Харіна

**РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ САК
НА УНІВЕРСАЛЬНОМУ ДОСЛІДНОМУ СТЕНДІ**

2018

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут»

В. І. Барсов, Н. М. Харіна

**РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ САК
НА УНІВЕРСАЛЬНОМУ ДОСЛІДНОМУ СТЕНДІ**

Навчальний посібник
до курсового проектування

Харків «ХАІ» 2018

Рецензенти: канд. техн. наук В. О. Кочура,
канд. техн. наук М. О. Штомпель

Барсов, В. І.

С51 Реалізація математичних моделей САК на універсальному дослідному стенді [Електронний ресурс] : навч. посіб. до курс. проектування / В. І. Барсов, Н. М. Харіна. – Харків : Нац. аерокосм. ун-т ім. М. Є. Жуковського «Харків. авіац. ін-т», 2018. – 55 с.

Викладено теоретичний і практичний матеріал щодо основних принципів напівнатурного моделювання систем. Розглянуто способи отримання на універсальному лабораторному стенді схем моделювання систем у Матлаб. Наведено приклади отримання й реалізації моделей. Приділено увагу аналізу й експериментальному дослідженню систем автоматичного керування літальними апаратами. Висвітлено теоретичні питання, пов'язані з розрахунком масштабів при моделюванні.

Для студентів технічних спеціальностей денної й заочної форм навчання, які вивчають курс «Проектування систем керування».

Іл. 32. Бібліогр.: 3 назви

УДК 629.7.052

© Барсов В. І., Харіна Н. М., 2018
© Національний аерокосмічний
університет ім. М. Є. Жуковського
«Харківський авіаційний інститут», 2018

1. ПРИЗНАЧЕННЯ, СКЛАД І ПРИНЦИП ДІЇ УНІВЕРСАЛЬНОГО ДОСЛІДНОГО СТЕНДА

Одним із найважливіших етапів проектування систем автоматичного керування (САК) є напівнатурні моделювання (частина системи – реальна, частина – віртуальна). Під час напівнатурного моделювання можна перевірити й оцінити взаємодію елементів системи, здійснити вибір її параметрів з одночасною перевіркою їх впливу на функціонування системи керування (СК), оцінити її статичні й динамічні характеристики на основі поводження і взаємодії реальних пристроїв, що функціонують в замкненому контурі. Використання реальних елементів дає змогу врахувати властивості цих елементів при проведенні досліджень (врахувати всі нелінійні ефекти, які є характерними для реальних пристроїв і зазвичай не враховуються при числовому моделюванні з використанням лінійних моделей), а віртуальне відображення динаміки й властивостей об'єктів дає змогу досліджувати системи різних масштабів і порядків.

Універсальний дослідний стенд (УДС) призначено для проведення напівнатурного моделювання систем автоматичного керування. У складі стенда окремі елементи САК може бути реалізовано у вигляді реальних фізичних пристроїв, динамічно подібних або числових моделей.

Більшість сучасних СК мають у своєму складі як аналогову, так і цифрову частину. Таким чином, використання цифрових систем керування є актуальним напрямком сучасності, і на стенді реалізовано можливість дослідження систем обох видів. Аналогова частина (об'єкт керування (ОК), датчики, виконавчі пристрої) реалізується шляхом використання подібних пристроїв, або таких, що передбачається встановити на об'єкті. Зазвичай, ОК складно використовувати в стенді у вигляді фізичного пристрою через його габаритні розміри, велику вартість або особливості функціонування. Тому для моделювання ОК використовують динамічно подібну реалізацію.

Універсальним способом є застосування аналогової обчислювальної машини на основі операційних підсилювачів. Цифрова частина реалізується на персональному комп'ютері й через плату спряження пов'язана з аналоговими елементами системи.

1.1. Склад універсального дослідного стенда

Універсальний дослідний стенд містить:

- цифровий контролер на основі сучасного однокристального мікроконтролера типу ATmega16, що має засоби для введення аналогових і дискретних сигналів, і блок релейної комутації для реконфігурації системи керування;

- аналогову обчислювальну машину (АОМ) на основі операційних підсилювачів зі складальним полем для моделювання об'єктів та елементів систем керування;

- блок електромеханічних пристроїв: двигун постійного струму з незалежним збудженням (ЕД), тахогенератор (ТГ) та імітатор навантаження, виконані на основі двигуна типу СЛ-267 і розміщені на загальному валу;

- підсилювач потужності (ПП);

- джерело живлення;

- інструментальну ПЕОМ.

На рис. 1.1 зображено структуру універсального дослідного стенда.

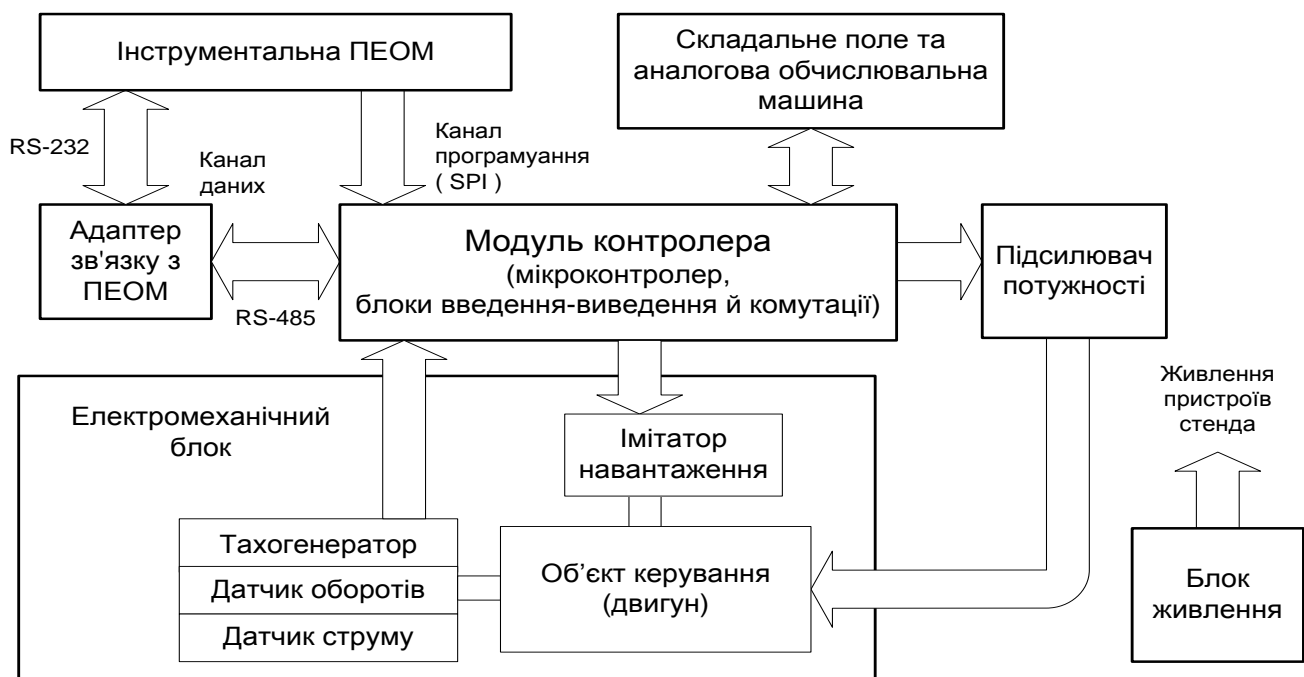


Рис. 1.1

Модуль контролера розміщено у вертикальній панелі стенда зліва і захищено пластиковою стінкою. Аналогову обчислювальну машину реалізовано на 16 операційних підсилювачах. Підсилювач потужності й джерело живлення побудовано на сучасній елементній базі (мікросхемах, потужних транзисторах). У стенді є електронно-променевий осцилограф. Джерело еталонної напруги й вольтметри на вертикальній панелі стенда працюють у звичайному режимі.

На рис. 1.2 показано зовнішній вигляд електромеханічного блока: 1 – двигун; 2 – генератор; 3 – тахогенератор.

Двигун, генератор і тахогенератор є двигунами постійного струму типу СЛ-267 і їх закріплено на одному валу.

На рис. 1.3 показано зовнішній вигляд підсумовувальних операційних підсилювачів.

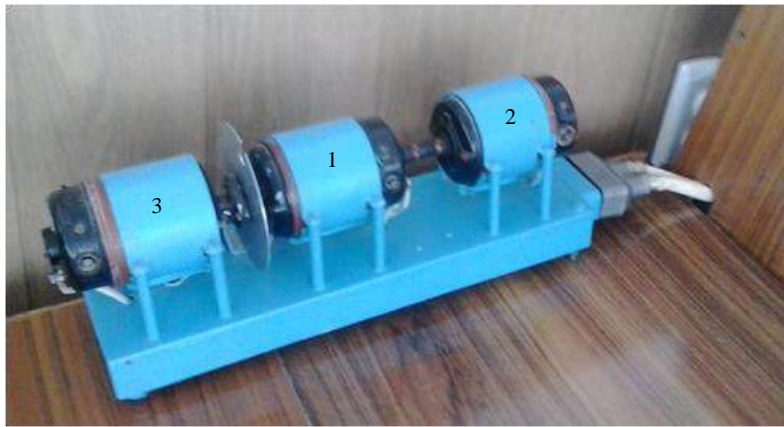


Рис. 1.2

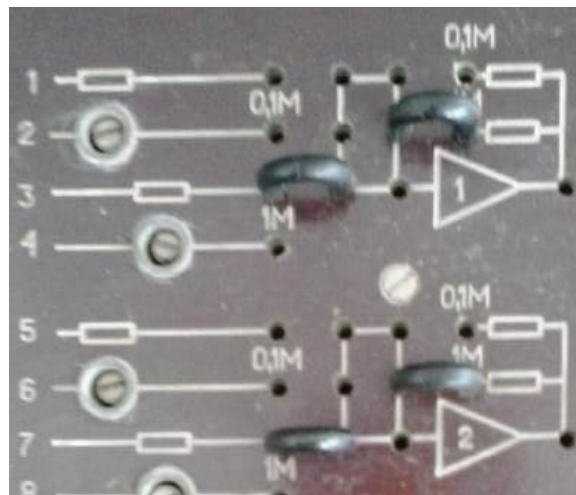


Рис. 1.3

Операційні підсилювачі 1 – 14 використовують як елементи, що виконують підсумовування й підсилення/зменшення (залежно від коефіцієнта) сигналу. У зворотний зв'язок цих операційних підсилювачів за замовчуванням розташовано резистори номіналом 1 або 0,1 МОм.

На рис. 1.4 зображено зовнішній вигляд інтегровальних операційних підсилювачів.

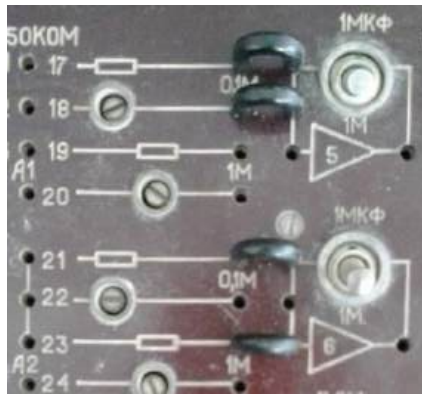


Рис. 1.4

Операційні підсилювачі 5–8, 15 і 16 містять у колі зворотного зв'язку конденсатор і правлять за інтегратор. Необхідно звернути увагу на те, що операційні підсилювачі є інвертувальними елементами, отже, знак сигналу на їх виході є протилежним знаку на вході.

Входи й виходи операційних підсилювачів і елементів стенда виведено на панелі «Входы» і «Выходы» відповідно. Номер елемента, написаний поряд з ним на панелі стенда, відповідає номеру входу або виходу на відповідній панелі «Входы» або «Выходы». Сигнал зворотного зв'язку подається на панель «Внешняя аппаратура» для подальшого передання його через плату спряження на ПК і реалізації вибраного закону керування (рис. 1.5).

На рис. 1.6 показано приклад розташування резисторів стенда. Необхідні значення коефіцієнтів отримують шляхом послідовного (для збільшення значення) або паралельного (для зменшення значення) під'єднання резисторів, розташованих на панелі УДС. Кожному резистору присвоєно номер, під яким його можна знайти на панелі «Входы» або «Выходы» для підімкнення до ланцюга.

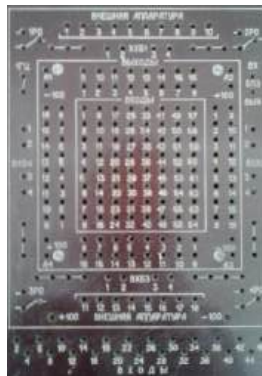


Рис. 1.5

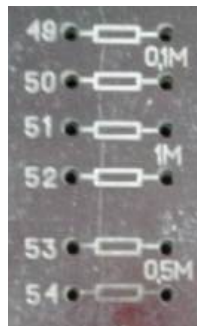


Рис. 1.6

Слід звернути увагу, що частина використовуваних резисторів мають постійний опір, а частина є регульованими. Номінали резисторів з постійним опором написано безпосередньо на робочому полі УДС.

На робочому полі УДС також розташовано лінійки (рис. 1.7), які являють собою кілька входів, з'єднаних між собою в один ланцюг. Якщо необхідно подати на вхід елемента кілька сигналів, то можна вивести цей вхід на лінійку, тоді всі підімкнені до лінійки сигнали будуть надходити на вхід цього елемента.

Складання схеми за умови, що стенд підготовлено до роботи, починається з підімкнення реальних елементів, які використовуються для вибраної схеми (наприклад, підсилювач потужності, двигун, тахогенератор як датчик).



Рис. 1.7

На панелі «Внешняя аппаратура» (див. рис. 1.5) вхід «10» є вихідом підсилювача потужності. Далі схема об'єкта моделювання складається відповідно до розробленої принципової схеми і з урахуванням обчислених масштабних коефіцієнтів.

1.2. Функціональні можливості стенда

У складі лабораторного комплексу реалізовано п'ять дослідних стендів, у кожному з яких є контролер. Усі контролери зв'язані з ПЕОМ з допомогою промислового стандарту мережного зв'язку RS-485. Це дає змогу під'єднати всі контролери до одного СОМ-порту ПЕОМ, забезпечивши при цьому роздільний доступ до кожного контролера з боку ПЕОМ.

Набір елементів стенда дає змогу моделювати системи керування, що описуються диференціальними рівняннями до 7-го порядку. Електромеханічний блок є реальною частиною обладнання, який у системах автоматичного керування править за приводну частину. На робочому полі моделюється безпосередньо динаміка досліджуваного об'єкта. Пристрій керування, у якому застосовується синтезований принцип і закон керування, реалізується на персональному комп'ютері.

2. РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ САК НА УДС

2.1. Застосування математичних моделей систем автоматичного керування

Математична модель – це наближений опис об'єкта моделювання з допомогою математичних символів.

Аналогове моделювання систем керування дає змогу:

- 1) визначати перехідні процеси об'єктів автоматичного керування (ОАК);
- 2) виявляти найкращі варіанти структури систем автоматичного керування (САК);
- 3) визначати раціональні закони керування і параметри регуляторів;
- 4) визначати найкращі схеми й конструкції об'єктів керування, їх статичні й динамічні характеристики;
- 5) відпрацьовувати алгоритми керування;
- 6) розраховувати характеристики складових надійності САК;
- 7) визначати характеристики техніко-економічної ефективності роботи САК.

Математичне моделювання з допомогою АОМ полягає в тому, що реальні ОАК і регулятори, наведені у вигляді систем диференціальних рівнянь, реалізовано на лічильно-обчислювальних блоках АОМ.

Для вирішення завдання напівнатурного моделювання математичних моделей САК на УДС необхідними даними є такі:

- функціональна схема САК;

- математичний опис об'єкта моделювання;
- види й діапазони задавальних сигналів і збурювальних впливів.

Напівнатурне моделювання дає змогу поєднати аналогове моделювання динаміки об'єкта на АОМ (робоче поле універсального лабораторного стенда) з проведенням експерименту на реальному обладнанні.

2.2. Підготовка до вирішення завдання напівнатурного моделювання математичних моделей САК на УДС

Для підготовки експериментального дослідження системи автоматичного керування методом напівнатурного моделювання на універсальному навчально-лабораторному стенді необхідно виконати такі дії:

1. За заданою функціональною схемою вирішити, яка частина реальної системи відповідає реальним елементам, а динаміка якої буде моделюватися на робочому полі УДС.

2. За заданим рівнянням входу-виходу об'єкта керування розробити функціональну схему моделі САК.

3. Задати або розрахувати масштаби відповідності реальних і машинних змінних (за часом, вхідними й вихідними змінними, за збурювальним впливом).

4. Побудувати принципову схему моделі САК.

5. За принциповою схемою моделі САК записати рівняння входу-виходу моделі. Для цього необхідно позначити входи й виходи підсилювачів потужності; записати вирази для визначення входів і виходів операційних підсилювачів; з набору n -рівнянь, що описують задану схему, необхідно отримати одне рівняння входу-виходу моделі, для чого виключити проміжні змінні й залишити ті змінні, що відповідають вхідним і вихідним впливам у

системі; за необхідності виконати інтегрування або диференціювання рівнянь.

6. Записати рівняння моделі у фізичних змінних (які використовуються для опису об'єкта моделювання), застосовуючи введені раніше масштаби.

7. Прирівнюючи коефіцієнти при однакових похідних у рівняннях об'єкта моделювання й моделі, визначити необхідні значення коефіцієнтів моделі, що забезпечують повну відповідність рівнянь об'єкта й моделі.

8. Розрахувати коефіцієнти операційних підсилювачів, скласти схему й настроїти коефіцієнти.

9. Зібрати схему регулятора (за необхідності), а також схеми для отримання статичних або динамічних характеристик у середовищі розроблення алгоритмів IDE_430, установити задавальний і збурювальний впливи.

10. Провести експериментальні дослідження.

11. Оцінити отримані результати і сформулювати висновки за результатами виконаної роботи.

2.3. Способи запису диференціальних рівнянь при моделюванні САК

Для будування аналогової моделі об'єкта керування можуть використовуватися чотири способи запису диференціальних рівнянь:

1) у вигляді одного рівняння n -го порядку, записаного для досліджуваної величини (стандартна форма):

$$a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_n y = b_0 \frac{d^m u}{dt^m} + \dots + b_m u \quad (2.1)$$

де $a_0, \dots, a_n, b_0, \dots, b_m$ – постійні коефіцієнти;

y – досліджувана (керована) величина;

u – вхідний (керувальний) вплив;

2) у вигляді системи рівнянь 1-го порядку (четверта форма – рівняння стану):

$$\frac{dx_i}{dt} = \sum_{j=1}^n a_{ij} x_j + u_i, i, j = \overline{1, n}, \quad (2.2)$$

де a_{ij} – постійні коефіцієнти;

x_j – досліджувана (керована) величина;

u_i – вхідний (керувальний) вплив;

3) у вигляді рівнянь динамічних ланок (передавальних функцій), наприклад

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = K \frac{\prod_{j=1}^m (T_j s + 1)}{s^v \prod_{i=1}^n (T_i s + 1)}, m \leq n \quad (2.3)$$

де K – коефіцієнт передачі;

T_i, T_j – сталі часу;

v – кількість інтегровальних елементів;

4) у вигляді системи рівнянь, розділеної на рівняння об'єкта автоматичного керування (ОАК) і рівняння пристроїв автоматичного керування (ПАК) або регуляторів – для систем з від'ємним зворотним зв'язком (може бути подано в 1, 3 або 4-й формі), наприклад

$$\begin{aligned} a_0 \frac{d^n y}{dt^n} + a_1 \frac{d^{n-1} y}{dt^{n-1}} + \dots + a_{n-1} \frac{dy}{dt} + a_n y = \\ = b_0 \frac{d^m u_p}{dt^m} + b_1 \frac{d^{m-1} u_p}{dt^{m-1}} + \dots + b_{m-1} \frac{du_p}{dt} + b_m u_p; \end{aligned} \quad (2.4)$$

$$u_p = f(\varepsilon); \quad (2.5)$$

$$\varepsilon = g - y, \quad (2.6)$$

де u_p – керувальний вплив – вихідний сигнал ПАК;

ε – вхідний сигнал ПАК (сигнал відхилення);

g – задавальний вплив.

2.4. Математичний опис законів керування для систем автоматичного керування

При проектуванні систем керування застосовуються класичні закони керування, реалізовані ПІД-регуляторами. Для математичного опису часто застосовуються рівняння лінійних регуляторів (законів керування):

1) пропорційного регулятора (П-регулятора)

$$u_p = -K_p \varepsilon, \quad (2.7)$$

де K_p – коефіцієнт передачі;

2) інтегрального регулятора (І-регулятора)

$$u_p = -K_u \int_0^t \varepsilon dt, \quad (2.8)$$

де K_u – коефіцієнт пропорційності інтегрального закону;

3) пропорційно-інтегрального регулятора (ПІ-регулятора)

$$u_p = -K_p \varepsilon - K_u \int_0^t \varepsilon dt = -K_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T_u} \int_0^t \varepsilon dt \right), \quad (2.9)$$

де T_u – стала часу інтегрального закону;

4) пропорційно-диференціального регулятора (ПД-регулятора)

$$u_p = -K_p \varepsilon - K_d \frac{d\varepsilon}{dt} = -K_p \left(\varepsilon + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right), \quad (2.10)$$

де K_p – коефіцієнт пропорційності диференціальної складової;

T_d – стала часу диференціальної складової;

5) рівняння пропорційно-інтегрально-диференціального регулятора (ПІД-регулятора)

$$u_p = -K_p \varepsilon - K_i \int_0^t \varepsilon dt - K_d \frac{d\varepsilon}{dt} = -K_p \left(\varepsilon + \frac{1}{T_i} \int_0^t \varepsilon dt + T_d \frac{d\varepsilon}{dt} \right). \quad (2.11)$$

2.5. Методи моделювання диференціальних рівнянь на операційних підсилювачах

Аналогове математичне моделювання диференціальних рівнянь (2.1) – (2.11) на АОМ здійснюється з використанням лічильно-обчислювальних блоків, реалізованих на операційних підсилювачах, двома способами:

1) за методом послідовного інтегрування – з використанням диференціального рівняння (1-ша, 4-та форми подання рівнянь динаміки);

2) за методом «блочного» інтегрування – з використанням передавальної функції (3-тя форма подання рівнянь динаміки).

Розглянемо обидва методи на прикладі.

Динамічні властивості об'єкта керування описуються лінеаризованим диференціальним рівнянням з нульовими початковими умовами:

$$T \frac{dy(t)}{dt} + y(t) = K u(t), \quad y(0) = \dot{y}(0) = 0; u(t) = \Delta u_0 1(t), \quad (2.12)$$

де y – керована величина (вихідний сигнал);

u – керівний вплив (вхідний сигнал);

K – коефіцієнт передачі;

T – стала часу.

Перший метод.

З рівняння (2.12) отримуємо вираз похідної максимального порядку:

$$\frac{dy}{dt} = \frac{K}{T} u(t) - \frac{1}{T} y(t). \quad (2.13)$$

Вираз (2.13) дає змогу побудувати функціональну схему аналогової моделі (рис. 2.1).

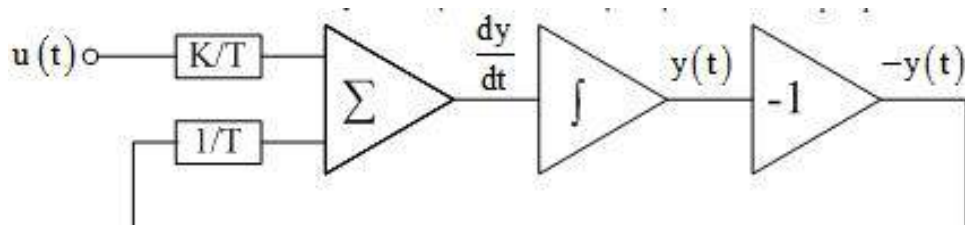


Рис. 2.1

Права частина рівняння (2.13) реалізується у вигляді суматора. Значення керованої величини отримують інтегруванням похідної в блоці «Інтегратор». Оскільки вихідний сигнал y має подаватися на вхід суматора зі знаком «мінус», то результат інтегрування інвертується в блоці «Інвертор».

На основі функціональної схеми аналогової моделі (див. рис. 2.1) будується принципова схема моделі (рис. 2.2).

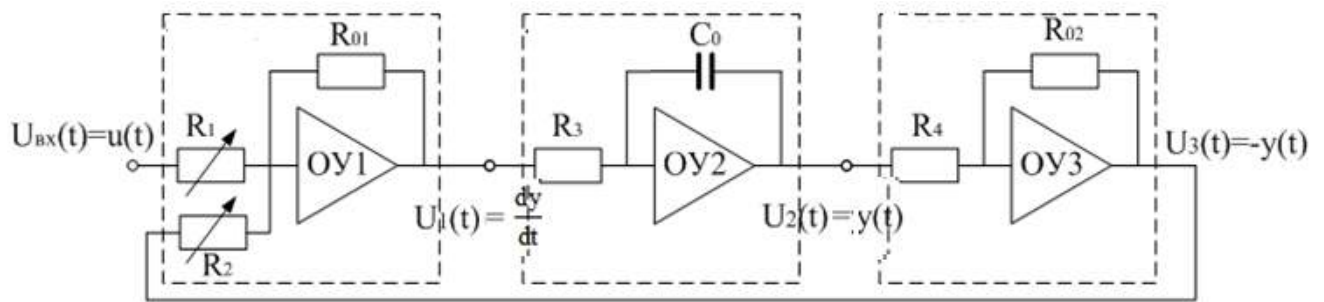


Рис. 2.2

Коефіцієнти в правій частині рівняння (2.13) реалізуються на підсумовувальному ОП1 шляхом установки резисторів R_{01} , R_1 , R_2 :

$$\frac{K}{T} = \frac{R_{01}}{R_1}; \quad \frac{1}{T} = \frac{R_{01}}{R_2}. \quad (2.14)$$

Інтегрування похідною в ОП2 здійснюється з дотриманням умови $T_2 = R_3 C_0 = 1 \text{ с}$, а інвертування в ОП3 – умови $K_3 = R_{02} / R_4 = 1$.

Другий метод

Наведемо рівняння (2.12) у вигляді передавальної функції, виконавши перетворення Лапласа кожного доданка при нульових початкових умовах (початкові умови надаються для вихідного сигналу системи й усіх його похідних):

$$TsY(s) + Y(s) = K U(s); \quad y(0) = \dot{y}(0) = 0; \quad u(t) = \Delta u_0 \cdot 1(t);$$

$$W(s) = \frac{Y(s)}{U(s)} = \frac{K}{Ts + 1}. \quad (2.15)$$

Структурна схема об'єкта моделювання будується з використання виразу (2.15) (рис. 2.3).

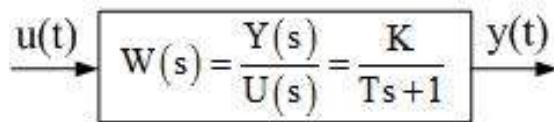


Рис. 2.3

На основі структурної схеми заданої аналогової моделі (рис. 2.3) будується принципова схема моделі (рис. 2.4) у вигляді блока, у якому моделюється рівняння (2.15), що являє собою аперіодичну (інерційну) ланку першого порядку.

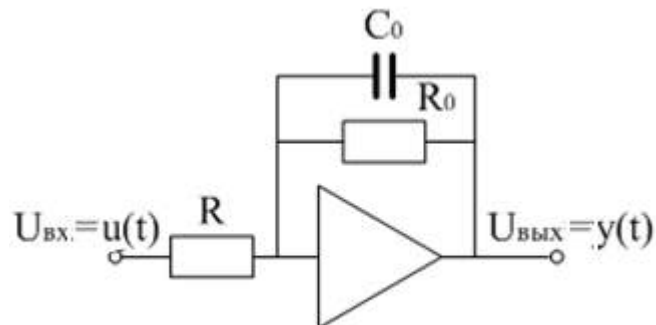


Рис. 2.4

Параметри передавальної функції визначаються такими співвідношеннями:

$$K = \frac{R_0}{R}; T = R_0 C_0.$$

Отримані аналогові моделі об'єкта (див. рис. 2.2 і 2.4) є еквівалентними.

Перевага методу послідовного інтегрування (див. рис. 2.2) полягає в тому, що при моделюванні динамічних процесів можна спостерігати як змінення в часі вихідного сигналу $y(t)$, так і його похідної $\frac{dy}{dt}$. Недоліком є

складна структура, що містить три операційних підсилювача, охоплених зворотним зв'язком.

Перевага методу «блочного» інтегрування – простота реалізації (в одному блоці реалізовано суматор, інтегратор та інвертор), недолік – неможливість оцінювання швидкості змінення вихідного сигналу (похідна $\frac{dy}{dt}$ є прихованою змінною)

2.6. Масштабування модельних рівнянь системи автоматичного керування

У більшості випадків коефіцієнти диференціальних рівнянь не дають змоги набирати завдання й розв'язувати його безпосередньо на робочому полі АОМ, тому що кожна машина має свій діапазон настроювання коефіцієнтів. Для машини МН-7 цей діапазон становить 0,01...10. Крім упорядкування коефіцієнтів необхідно скласти структурну схему розв'язання диференціальних рівнянь.

Для МН-7 вихідні напруги розв'язувальних пристроїв становлять ± 100 В. Якщо розв'язок задачі виходить за ці межі, то необхідно обробити рівняння моделі таким чином, щоб розв'язок потрапив у цей діапазон.

Розглянемо задачу масштабування для загального випадку, використовуючи рівняння (2.12).

Уведемо масштабні коефіцієнти за вхідним і вихідним сигналами й часом:

$$M_u = \frac{u_M}{u}; \quad M_y = \frac{y_M}{y}; \quad M_t = \frac{t_M}{t}, \quad (2.16)$$

де M_u , M_y , M_t – масштабні коефіцієнти;

u_M , y_M , t_M – вхідний, вихідний сигнали і час моделі;

u, y, t – вхідний, вихідний сигнал і час реального об'єкта.

При визначенні масштабів за u_M, y_M у (2.16) беруть максимальні значення напруги на виході розв'язувальних блоків (100 В), за u, y – максимальні значення вхідного й вихідного сигналів реального об'єкта.

Для отримання диференціального рівняння моделі з формули (2.16) виражають u, y, t і визначають похідну:

$$u = \frac{1}{M_u} u_M; \quad y = \frac{1}{M_y} y_M; \quad t = \frac{1}{M_t} t_M; \quad (2.17)$$

$$\frac{dy(t)}{dt} = \frac{d\left(\frac{1}{M_y} y_M(t)\right)}{d\left(\frac{1}{M_t} t_M\right)} = \frac{\frac{1}{M_y} dy_M(t)}{\frac{1}{M_t} dt_M} = \frac{M_t}{M_y} \frac{dy_M(t)}{dt_M}. \quad (2.18)$$

Отримані вирази (2.17) і (2.18) для $u, y, t, \frac{dy}{dt}$ підставляють у рівняння (2.12) реального об'єкта й отримують диференціальне рівняння моделі:

$$T \frac{M_t}{M_y} \cdot \frac{dy_M(t)}{dt_M} + \frac{1}{M_y} y_M(t) = K \frac{1}{M_u} u_M(t);$$
$$TM_t \cdot \frac{dy_M(t)}{dt_M} + y_M(t) = K \frac{M_y}{M_u} u_M(t); \quad (2.19)$$

$$T_M \cdot \frac{dy_M(t)}{dt_M} + y_M(t) = K_M u_M(t), \quad (2.20)$$

де $T_M = TM_t$ – стала часу моделі;

$K_M = K \frac{M_y}{M_u}$ – коефіцієнт передачі моделі.

Масштабування за часом застосовується в таких випадках:

1) перехідні процеси в САК (ОАК) є відносно швидкоплинними ($t_{\text{пр}} \leq 1$); якщо ввести масштаб часу $M_t < 1$, то модельний процес стане більш затяжним, що підвищить точність вимірювань;

2) частота коливань перехідних процесів є більшою за частоту коливань робочої смуги операційного підсилювача; при введенні масштабу частота коливань обмежується значенням $\Gamma \leq 100$ Гц;

3) деякі коефіцієнти при досліджуваних параметрах не піддаються змінню в бажаних межах з допомогою масштабування за параметрами.

Так, якщо в рівнянні (2.19) $K_M = K \frac{M_y}{M_u}$ набуде занадто великого значення, то, підібравши масштаб часу $M_t > 1$, можна зменшити коефіцієнт передачі:

$$T \frac{dy_M(t)}{dt_M} + \frac{1}{M_t} y_M(t) = K \frac{M_y}{M_u M_t} u_M(t) = K'_M i_M(t),$$

де $K'_M = K \frac{M_y}{M_u M_t} < K_M$.

2.7. Складання схеми регулятора в середовищі IDE_430

Вибраний закон керування, наприклад ПІД-регулятор, реалізується на ПК у середовищі IDE_430. При цьому існує можливість отримання статичних (регулювальна та навантажувальна) і динамічних (перехідні, частотні) характеристик досліджуваної системи.

На рис. 2.5 зображено схему реалізації ПІД-регулятора в середовищі IDE_430 і подальшого отримання перехідних характеристик системи.

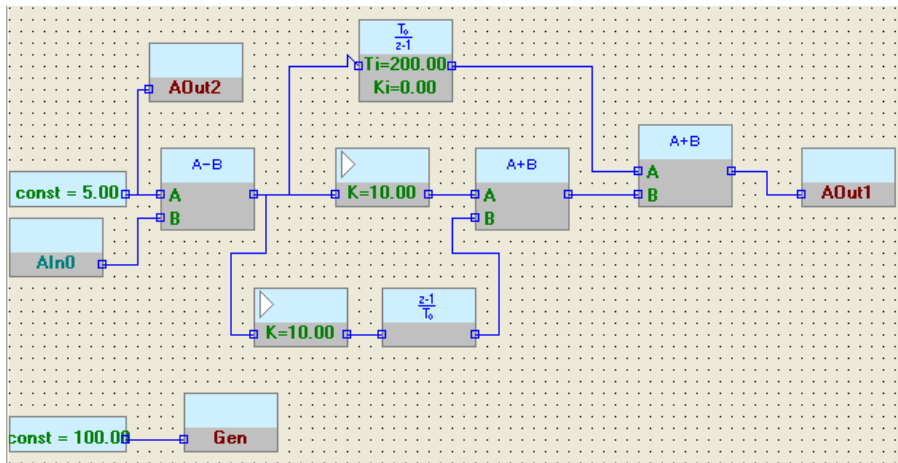


Рис. 2.5

Для зняття перехідної характеристики необхідно виконати такі дії:

1. Запустити інтегровану середу розроблення IDE_430 з робочого столу або через меню «Пуск».

Під час запуску відкриються два основних вікна системи:


- головне вікно, що містить меню системи, панель інструментів і рядок стану;
- багатовіконний редактор схем алгоритмів з бібліотекою функціональних алгоритмічних блоків (алгоблоков); для кожного стенда створюється окреме вікно редактора.

2. Наверху на панелі керування вибрати потрібний стенд, на якому будуть досліджуватися Ст1, Ст2, ..., Ст5.

3. Зібрати схему з допомогою бібліотеки алгоритмічних блоків, що знаходиться в лівій частині вікна, у якій A і B – константи (для присвоєння імені на блоці «Константа» клацнути один раз ПКМ і вибрати пункт «Имя»),

AOut2 – блок для спостереження константи A , Gen – блок для спостереження константи B , K – блок підсилення.

4. Налаштувати регулятор. У головному вікні вибрати «Проект» → «Налаштування регулятора» і встановити параметри регулятора.

5. У головному меню натиснути кнопку  або вибрати пункт меню «Проект» – «Управление решением». При цьому генерацію конфігураційної програми й завантаження її у використовуваний стенд буде проведено автоматично при запуску виконання з вікна «Управление решением».

6. У матриці вибору стенда й параметрів установити прапорці для необхідного стенда й контрольованих параметрів: вхід – AOut2, збурення – Gen, вихід – AIn0 (для тахогенератора), AIn7 (для датчика струму з якірного ланцюга), LightPulse (для імпульсного датчика обертів). Параметри можна активувати й відмикати динамічно під час відображення. Кольори графіків для окремих параметрів установлюються автоматично й відображаються в правому верхньому куті вікна.

7. Запустити виконання програми на вибраному стенді, для чого натиснути кнопку «Запуск». Для фактичного виведення графіків необхідно встановити прапорець «Опрос».

8. Подати задавальний вплив величиною +5 В з допомогою швидких клавіш (наприклад, для стенда № 1 – Ctrl +1). Налаштувати швидкі клавіші можна в меню «Налаштування».

9. Подати позитивний збурювальний сигнал з допомогою швидких клавіш (наприклад, для стенда № 1 – Alt +1).

10. Після отримання графіка перехідної характеристики натиснути кнопку «Стоп».

Отримані зображення необхідно зберегти для подальшого оброблення.

2.8. Приклад будівництва напівнатурної моделі

Розглянемо по пунктах приклад підготовки до напівнатурного моделювання математичних моделей САК. При складанні схеми моделювання на робочому полі використовується один із методів аналогового моделювання – блочне або послідовне інтегрування, описане вище. Для прикладу напівнатурного моделювання візьмемо системи автоматичного керування кутом тангажу літального апарата.

1. Вихідні дані для напівнатурного моделювання:

- коефіцієнт передачі системи $K_{сп}$, град./В – 2;
- стала часу $T_{сп}$, с – 0,5;
- діапазон керувального впливу $\delta_{рв}$, град. – ± 30 ;
- діапазон керованої змінної u , град. – ± 22 ;
- масштаб часу – 1.

На рис. 2.6 зображено функціональну схему САК кута тангажу літака, на якій наведено такі умовні позначення: ЗП – задавальний пристрій; Р – регулятор; ПП – підсилювач потужності; П – привід; ЛА – літальний апарат; Д – датчик; $g(t)$ – задавальний вплив; $U_3(t)$ – задавальний сигнал;

$U_{пп}(t)$ – сигнал на виході підсилювача потужності; $\delta_{рв}(t)$ – відхилення руля висоти літального апарата; $u(t)$ – кут тангажу ЛА; $U_d(t)$ – сигнал на виході датчика; $M_v(t)$ – збурювальний вплив.

Виберемо елементи, які відповідають реальним елементам стенда:

- задавальний пристрій – реалізується на ПК;
- регулятор – схема регулятора збирається на ПК у середовищі IDE_430;

– підсилювач потужності, привід, датчик – входять до складу УДС. Динаміка літального апарата буде моделюватися на робочому полі.

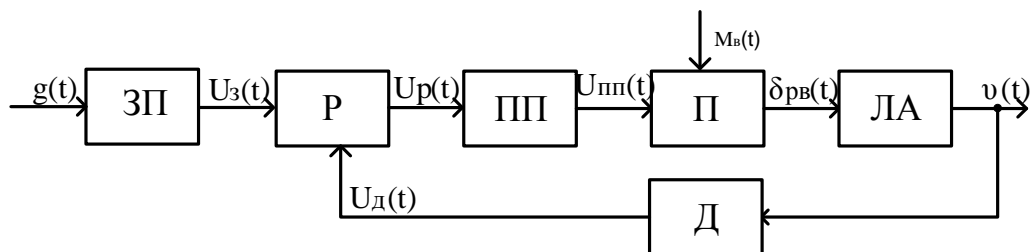


Рис. 2.6

2. Розробимо функціональну схему моделі САК. Математичний опис динаміки ЛА за кутом тангажу має вигляд

$$T_c \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} + \frac{d\vartheta}{dt} = k_1 \delta_{PB}(t); \quad (2.21)$$

$$\frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = -\frac{1}{T_c} \frac{d\vartheta}{dt} + \frac{k_1}{T_c} \delta_{PB}(t). \quad (2.22)$$

На рис. 2.7 зображено функціональну схему моделі САК, на якій наведено такі умовні позначення: ЗП – задавальний пристрій; ПЕОМ – персональна електронна обчислювальна машина; ПС – плата з'єднання; ЕК-1, ЕК-2 – електронний ключ; МК – мікроконтролер; ПП – підсилювач потужності; Д – двигун; ТГ – тахогенератор; СП – складальне поле.

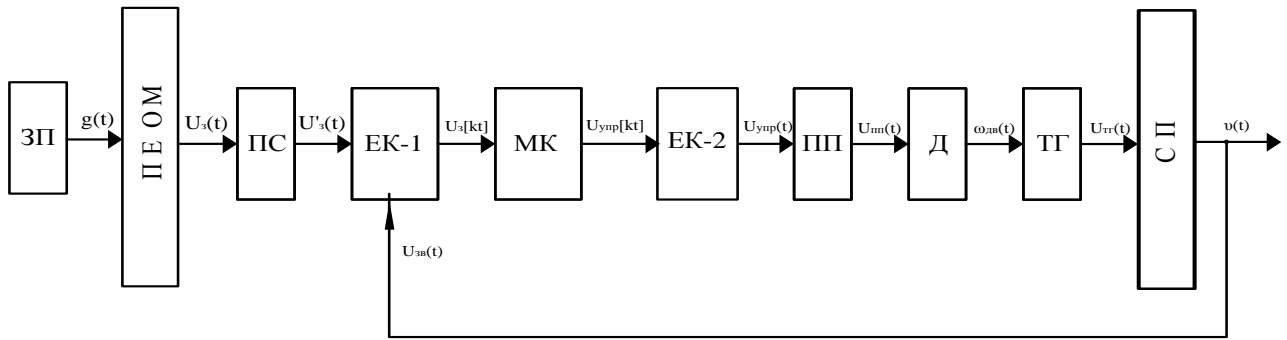


Рис. 2.7

3. Виберемо масштаби сигналів за такими формулами

– за змінними

$$m_k = \frac{k_{MAXx}}{k_{МОД}}, \quad (2.23)$$

де k_{max} – максимально можливе значення k -ї змінної;

$k_{МОД}$ – значення сигналу моделі, що відповідає k -ї змінній;

– за часом

$$m_t = \frac{t}{t_M} = \frac{1}{1} = 1, \quad (2.24)$$

де t – реальний час; t_M – час моделювання;

– за входом

$$m_{BX} = \frac{\delta_{PB_{MAX}}}{U_{\delta_{PB}}} = \frac{22}{10} = 2,2 \frac{град.}{В}, \quad (2.25)$$

де $\delta_{рв_{max}}$ – максимально можливе відхилення руля висоти ЛА; $U_{\delta_{рв}}$ – напруга на стенді, що відповідає вхідному впливу відхиленню руля висоти;

– за виходом

$$m_{вых} = \frac{\vartheta_{max}}{U_{\vartheta}} = \frac{30}{10} = 3 \frac{град.}{В}, \quad (2.26)$$

де ϑ_{max} – максимально можливе значення кута тангажу; U_{ϑ} – напруга на стенді, що відповідає певному значенню кута тангажу.

4. Розробимо принципову модель САК.

На рис. 2.8 зображено принципову схему моделі САК. За порядком похідної в рівнянні входу-виходу об'єкта моделювання визначимо кількість інтеграторів у розроблюваній принциповій схемі.

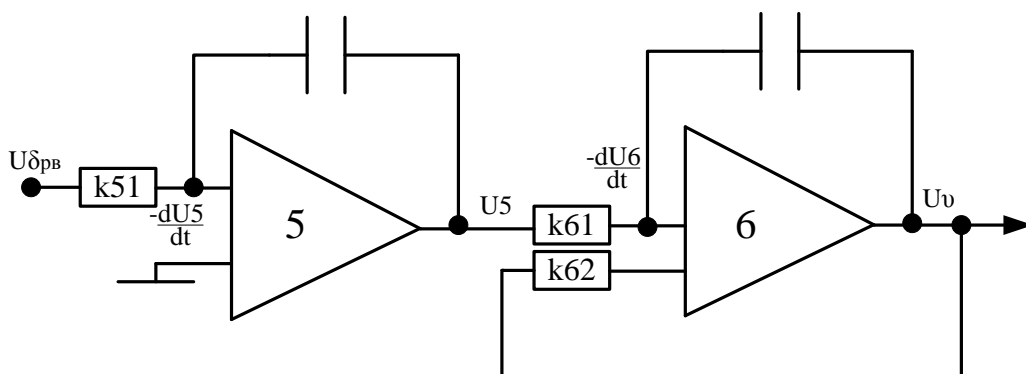


Рис. 2.8

5. Запишемо рівняння входу-виходу моделі. Для цього позначимо входи і виходи операційних підсилювачів (U_5 , U_9). Запишемо рівняння, які описують проміжні складові системи:

$$-\frac{dU_9}{dt} = k_{61}U_5(t) + k_{62}U_9(t); \quad (2.27)$$

$$-\frac{dU_5}{dt} = k_{51}U_{\delta_{pe}}(t). \quad (2.28)$$

Необхідно об'єднати ці рівняння з метою отримання повного опису об'єкта моделювання. Для цього продиференціюємо рівняння (2.7):

$$-\frac{d^2U_9}{dt^2} = k_{61}\frac{dU_5}{dt} + k_{62}\frac{dU_9}{dt}. \quad (2.29)$$

Підставимо рівняння (2.28) у вираз (2.29):

$$-\frac{d^2U_9}{dt^2} = -k_{61}k_{51}U_{\delta_{pe}}(t) + k_{62}\frac{dU_9}{dt};$$

$$-\frac{d^2U_9}{dt^2} - k_{62}\frac{dU_9}{dt} = -k_{61}k_{51}U_{\delta_{pe}}(t). \quad (2.30)$$

Перетворимо рівняння (2.30) на таке:

$$\frac{d^2 U_{\vartheta}}{dt^2} = -k_{62} \frac{dU_{\vartheta}}{dt} + k_{61} k_{51} U_{\delta_{p\vartheta}}(t). \quad (2.31)$$

6. Запишемо рівняння моделі у фізичних змінних, використовуючи вирази для визначення масштабу (2.24)–(2.26):

$$U_{\delta_{p\vartheta}} = \frac{\delta_{p\vartheta_{max}}}{m_{\vartheta x}}, \quad U_{\vartheta} = \frac{\vartheta_{max}}{m_{\vartheta yx}}. \quad (2.32)$$

Підставимо отримані вирази (2.12) у рівняння входу-виходу об'єкта моделювання в оригіналах (2.11):

$$\frac{1}{m_{\vartheta yx}} \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = \frac{-k_{62}}{m_{\vartheta yx}} \frac{d\vartheta}{dt} + \frac{k_{61} k_{51}}{m_{\vartheta x}} \delta_{p\vartheta}(t). \quad (2.33)$$

7. Обчислимо значення коефіцієнтів. Прирівнюючи коефіцієнти при однакових змінних і похідних виразів (2.33) і (2.22), складаємо вирази для визначення необхідних коефіцієнтів для напівнатурного моделювання:

$$\begin{aligned} \frac{-k_{62}}{m_{\vartheta yx}} &= -\frac{1}{T_c}, \quad k_{62} = \frac{m_{\vartheta yx}}{T_c}; \\ \frac{k_{61} k_{51}}{m_{\vartheta x}} &= \frac{k_1}{T_c}, \quad k_{51} = \frac{m_{\vartheta x} k_1}{T_c k_{61}}. \end{aligned} \quad (2.34)$$

Значення k_{61} виберемо самостійно, виходячи з того, що допустимими є коефіцієнти $k_i \in [0.01; 10]$, для напівнатурного моделювання на УДС $k_{61} = 1$. Обчислюємо значення інших коефіцієнтів:

$$k_{62} = \frac{3}{0,5} = 6, \quad k_{51} = \frac{2,2 \cdot 2}{0,5 \cdot 1} = 8,8.$$

8. Зберемо схему й настроїмо коефіцієнти. За розробленою принциповою схемою стендової моделі об'єкта моделювання (див. рис. 2.7), використовуючи обчислені значення коефіцієнтів моделювання, збираємо схему на робочому полі УДС з урахуванням реальних елементів, які використовуються, а також з'єднання з персональним комп'ютером (ПК).

9. Зберемо схему регулятора в середовищі IDE_430. На рис. 2.9 зображено схему реалізації ПІД-регулятора в середовищі IDE_430 для подальшого отримання перехідних характеристик системи.

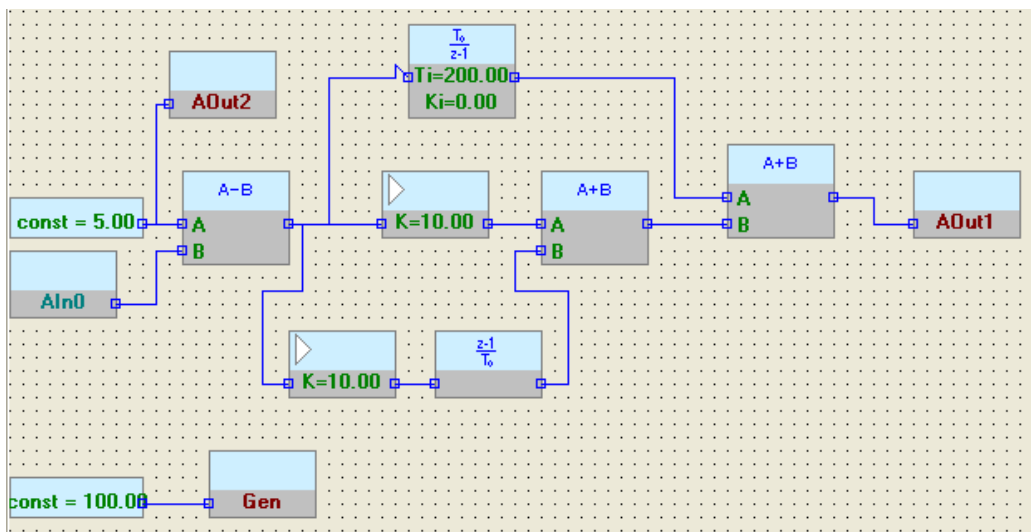


Рис. 2.9

10. Проведемо експериментальні дослідження. На рис. 2.10 наведено графік перехідного процесу, отриманий унаслідок напівнатурного моделювання САК кута тангажу літака.

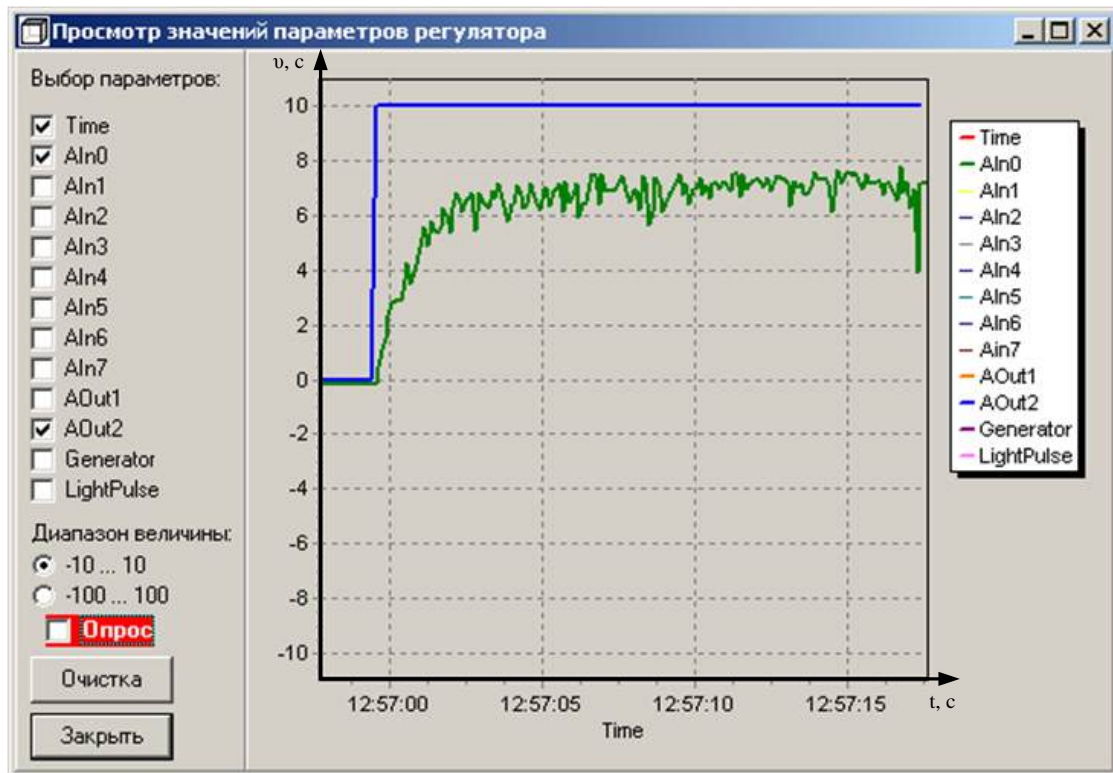


Рис. 2.10

11. Зробимо висновки. За отриманим графіком унаслідок напівнатурного моделювання САК кутом тангажу літака (див. рис. 2.10) необхідно оцінити показники якості досліджуваної системи і зробити висновки про їх відповідність вимогам технічного завдання. Для заданої СА: $t_{np} = 2,4$ с; $\sigma = 0$ %; $\varepsilon = 3^\circ$.

Графік (див. рис. 2.10) також наочно ілюструє наявність зони нечутливості двигуна, що відображається на загальному перехідному процесі системи.

Розглянемо ще один приклад підготовки системи до напівнатурного моделювання.

1. Математичний опис динаміки ЛА має вигляд

$$T_c \frac{d^2\vartheta}{dt^2} + \frac{d\vartheta}{dt} + \vartheta(t) = k_1 \delta_{p\vartheta}(t) + k_2 M_H(t) \quad (2.35)$$

2. На рис. 2.11 зображено функціональну схему стенової моделі САК і наведено такі умовні позначення: ЗП – задавальний пристрій; ПЕОМ – персональний комп'ютер; ПЗ – плата з'єднання аналогової моделі з комп'ютером; ЕК-1, ЕК-2 – електронні ключі; МК – мікроконтролер; ПП – підсилювач потуги; Д – двигун; ДН – двигун навантаження; ТГ – тахогенератор; СП – складальне поле.

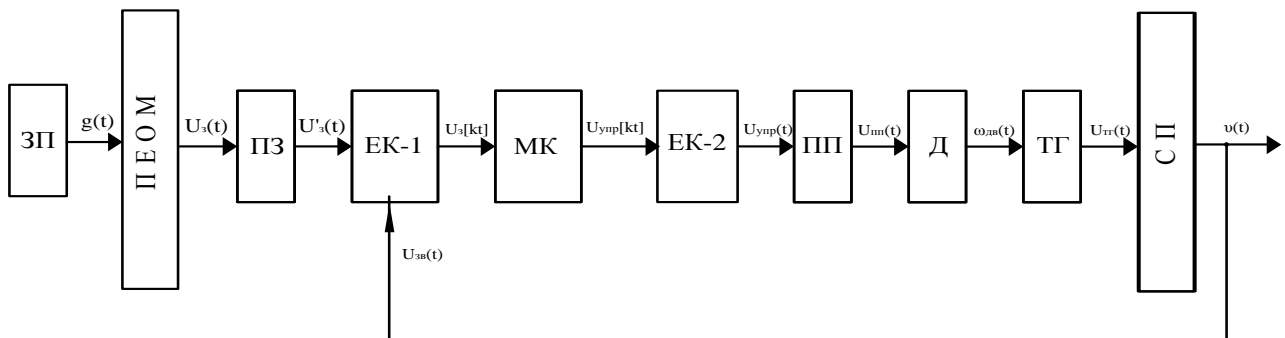


Рис. 2.11

3. Розраховуємо масштаби за відповідними формулами:

– за часом

$$m_t = \frac{t}{t_M} = \frac{1}{1} = 1, \quad (2.36)$$

де t – реальний час; t_M – час моделювання;

– за входом

$$m_{\text{вх}} = \frac{\delta_{\text{рвmax}}}{U_{\delta_{\text{рв}}}} = \frac{100}{10} = 10 \frac{\text{град.}}{\text{В}}, \quad (2.37)$$

де $\delta_{\text{рвmax}}$ – максимально допустиме відхилення руля висоти ЛА;
 $U_{\delta_{\text{рв}}}$ – напруга на стенді, що відповідає вхідному впливу відхилення руля висоти;

– за виходом

$$m_{\text{ввих}} = \frac{\vartheta_{\text{max}}}{U_{\vartheta}} = \frac{25}{10} = 2.5 \frac{\text{град.}}{\text{В}}, \quad (2.38)$$

де ϑ_{max} – максимально допустиме значення кута тангажу; U_{ϑ} – напруга на стенді, що відповідає заданому значенню кута тангажу;

– за збурювальним впливом

$$m_{\text{ввих}} = \frac{M_{\text{н}}}{U_{\text{F}}} = \frac{12}{10} = 1,2 \frac{\text{Нм}}{\text{В}}. \quad (2.39)$$

4. Розробляємо принципову модель САК. На рис. 2.12 зображено принципову схему стендової моделі САК.

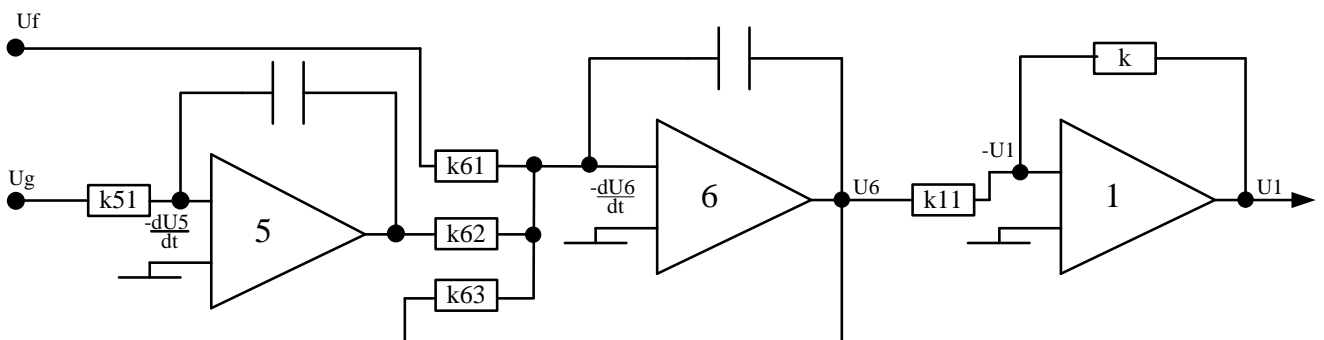


Рис. 2.12

5. Записуємо рівняння входу-виходу моделі. Для цього позначимо входи і виходи операційних підсилювачів (U_5, U_9).

Записуємо рівняння для визначення проміжних складових системи:

$$\frac{dU_5}{dt} = -k_{51}U_f(t) - k_{52}U_g(t); \quad (2.40)$$

$$\frac{dU_6}{dt} = -k_{61}U_f(t) - k_{62}U_5(t) - k_{63}U_6(t); \quad (2.41)$$

$$U_1 = -k_{11}U_6(t). \quad (2.42)$$

Об'єднуємо рівняння (2.40) – (2.42) для отримання повного опису об'єкта моделювання. Для цього з рівняння (2.42) виразимо вихід шостого операційного підсилювача:

$$U_6(t) = -\frac{U_1}{k_{11}}. \quad (2.43)$$

Підставимо вираз (2.43) у формулу (2.41):

$$-\frac{1}{k_{11}} \frac{dU_1}{dt} = -k_{61}U_f(t) - k_{62}U_5(t) + k_{63} \frac{U_1}{k_{11}}. \quad (2.44)$$

Продиференціюємо цей вираз:

$$-\frac{1}{k_{11}} \frac{d^2U_1}{dt^2} = -k_{61} \frac{dU_f}{dt} - k_{62} \frac{dU_5}{dt} + \frac{k_{63}}{k_{11}} \frac{dU_1}{dt};$$

$$\frac{d^2 U_1}{dt^2} = -k_{61} k_{11} \frac{dU_f}{dt} + k_{11} k_{62} \frac{dU_5}{dt} + \frac{k_{11} k_{63}}{k_{11}} \frac{dU_1}{dt}. \quad (2.45)$$

Підставимо вираз (2.40) у формулу (2.45):

$$\frac{d^2 U_1}{dt^2} = k_{61} k_{11} \frac{dU_f}{dt} - k_{11} k_{62} k_{51} U_f(t) - k_{11} k_{62} k_{52} U_g(t) - k_{63} \frac{dU_1}{dt}. \quad (2.46)$$

6. Запишемо рівняння моделі у фізичних змінних, використовуючи вирази для визначення масштабу (2.36) – (2.39):

$$U_g = \frac{\delta_{PB}}{m_{ex}}, \quad U_1 = \frac{\vartheta_{max}}{m_{вix}}, \quad U_f = \frac{M_H}{f}. \quad (2.47)$$

Підставимо отримані вирази (2.47) у рівняння входу-виходу об'єкта моделювання в оригіналах (2.46):

$$\begin{aligned} \frac{d^2 \vartheta}{dt^2} = & -k_{63} \frac{d\vartheta}{dt} - \frac{k_{62} k_{11} k_{52} m_{вix}}{m_{ex}} \delta_{PB} + \\ & + \frac{k_{11} k_{61} m_{вix}}{m_{ex}} \frac{dM_H}{dt} + \frac{k_{62} k_{11} k_{51} m_{вix}}{m_{ex}} M_H. \end{aligned} \quad (2.48)$$

7. Визначимо коефіцієнти. Прирівнюючи коефіцієнти при однакових змінних і похідних у виразах (2.48) і (2.35), складемо рівняння для визначення необхідних для напівнатурного моделювання коефіцієнтів:

$$k_{63} = 3;$$

$$k_{62} k_{11} k_{52} = 0,43; \quad (2.49)$$

$$k_{62} k_{11} k_{51} = 0,45.$$

Величини деяких коефіцієнтів виберемо самостійно, виходячи з того, що допустимими є коефіцієнти $k_i \in [0.01; 10]$, для напівнатурного моделювання на УДС $k_{62} = k_{62} = 1$. Обчислимо інші коефіцієнти:

$$k_{51} = k_{52} = 0,5.$$

8. Зберемо схему й настроїмо коефіцієнти. За розробленою принциповою схемою стендової моделі об'єкта моделювання (див. рис. 2.12), використовуючи обчислені значення коефіцієнтів моделювання, зберемо схему на робочому полі УДС з урахуванням реальних елементів, які використовуються, а також з'єднання з персональним комп'ютером (ПК).

9. Зберемо схему регулятора в середовищі IDE_430. Вибраний закон керування, наприклад ПІД-закон, реалізуємо на ПК у середовищі IDE_430. При цьому можна отримати статичні (регулювальні й навантажувальні) і динамічні (перехідні, частотні) характеристики досліджуваної системи. перехідні характеристики будуються аналогічно попередньому прикладу.

10. Проведемо експериментальні дослідження.

2.9. Будування напівнатурної моделі системи за її передавальною функцією

Розглянемо будування напівнатурної моделі за передавальною функцією на прикладі сервоприводу РАУ-107. Функціональну схему електромеханічного рульового сервоприводу СП РАУ-107, що застосовується на літаку СУ-27 для повороту елеронів, руля наряду й висоти, показано на рис. 2.13. На цьому рисунку наведено такі умовні позначення: ЗП – задавальний пристрій, ПП – підсилювач потужності, ДПС – двигун постійного струму, КШМ – кривошипно-шатунний механізм, ПЗЗ – пристрій зворотного зв'язку.

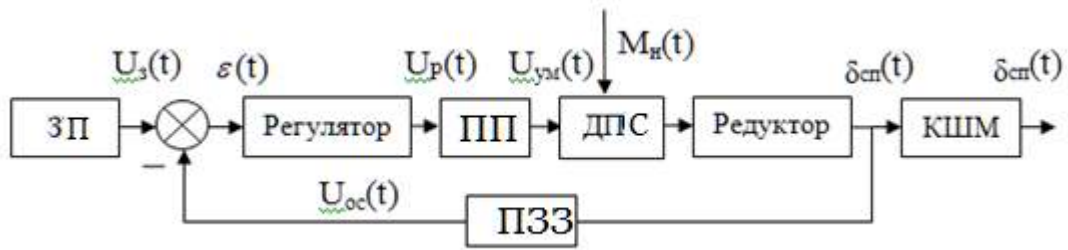


Рис. 2.13

Вихідні дані для моделювання:

- діапазон керувальних впливів U_3 , В – – 5...+5;
- діапазон збурювальних впливів M_n , Н·м – – 10...+10;
- діапазон вихідних параметрів $\delta_{сн}$, град. – – 22...+22;
- коефіцієнт передачі пристрою $K_{сн}$, град./В – 5;
- стала часу $T_{сн}$, с – 0,012;
- масштаб часу – 1.

Передавальна функція розімкнутої системи сервоприводу за задавальним впливом має вигляд

$$W_{сн}(s) = \frac{U_{oc}(s)}{U_3(s)} = \frac{K_{сн}}{s(T_{сн}+1)} = \frac{5}{s(0.012s+1)}. \quad (2.50)$$

Передавальну функцію замкненої системи сервоприводу за задавальним впливом розраховують за формулою:

$$\Phi_{сн}(s) = \frac{U_{oc}(s)}{U_3(s)} = \frac{K_{сн}}{s(T_{сн}+1)+K_{сн}} = \frac{5}{s(0.012s+1)+5}. \quad (2.51)$$

За передавальною функцією можна скласти рівняння входу-виходу СП РАУ-107:

$$T_{\text{сп}} \frac{d^2 U_{\text{oc}}}{dt^2} + \frac{dU_{\text{oc}}}{dt} + K_{\text{сп}} U_{\text{oc}}(t) = K_{\text{сп}} U_3(t);$$

$$0.012 \frac{d^2 U_{\text{oc}}}{dt^2} + \frac{dU_{\text{oc}}}{dt} + 5U_{\text{oc}}(t) = 5U_3(t). \quad (2.52)$$

Функциональну схему досліджуваної системи позиційного сервоприводу зображено на рис. 2.14.

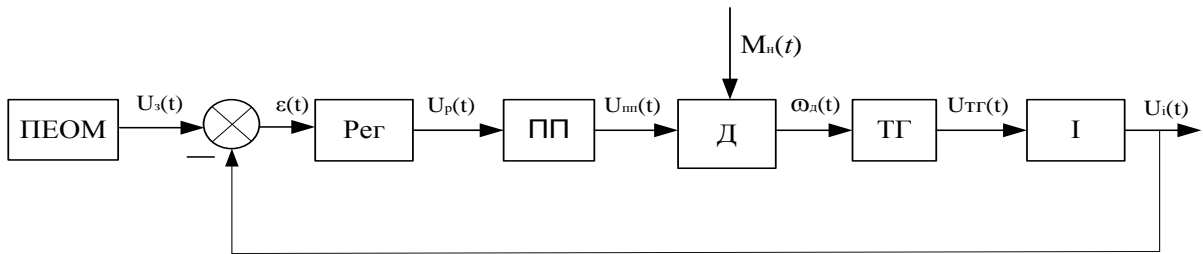


Рис. 2.14

Схему напівнатурного моделювання позиційного сервоприводу на універсальному дослідному стенді УДС-1 показано на рис. 2.15.

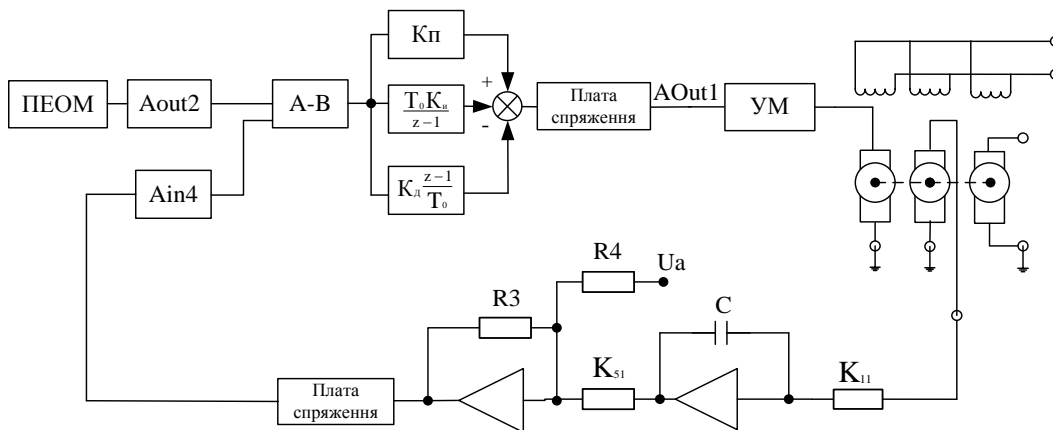


Рис. 2.15

Передавальна функція моделі сервоприводу в модельних змінних

$$\Phi_{\text{СПМ}}(s) = \frac{U_{\text{oc}}(s)}{U_3(s)} = \frac{K_{\text{ПП}}K_{\text{ДВ}}K_{\text{ТР}}K_{11}K_{51}}{s(T_{\text{Д}} + 1) + K_{\text{СП}}} = \frac{K_{\text{М}}}{s(T_{\text{Д}} + 1) + K_{\text{М}}}; \quad (2.53)$$

$$K_{\text{М}} = K_{\text{ПП}}K_{\text{ДВ}}K_{\text{ТР}}K_{11}K_{51}. \quad (2.54)$$

Рівняння входу-виходу моделі СП РАУ-107 має вигляд

$$T_{\text{Д}} \frac{d^2 U_{\text{М}}(t_{\text{М}})}{dt_{\text{М}}^2} + \frac{dU_{\text{oc}}(t_{\text{М}})}{dt_{\text{М}}} + K_{\text{М}} U_{\text{М}}(t_{\text{М}}) = K_{\text{М}} U_{3\text{М}}(t_{\text{М}}). \quad (2.55)$$

Уведемо масштаби за відповідними формулами:

$$m_t = \frac{t}{t_{\text{М}}} = \frac{t_{\text{СП}}}{t_{\text{Д}}} = \frac{0,012}{1} = 0,012; \quad (2.56)$$

$$m_{\text{oc}} = \frac{U_{\text{oc}}}{U_{\text{М}}} = \frac{25}{10} = 2,5; \quad (2.57)$$

$$m_3 = \frac{U_3}{U_{\text{М}}} = \frac{5}{10} = 0,5. \quad (2.58)$$

Сформуємо рівняння моделі СП РАУ-107 у фізичних змінних з урахуванням масштабів:

$$T_{\text{Д}} \frac{m_t^2 d^2 U_{\text{oc}}}{m_{\text{oc}} dt_{\text{М}}^2} + \frac{m_t dU_{\text{oc}}}{m_{\text{oc}} dt_{\text{М}}} + \frac{K_{\text{М}} U_{\text{oc}}}{m_{\text{oc}}} = \frac{K_{\text{М}} U_3}{m_3}; \quad (2.59)$$

$$0,012 \frac{d^2 U_{\text{oc}}}{m_{\text{oc}} dt_{\text{М}}^2} + \frac{dU_{\text{oc}}}{0,012 dt_{\text{М}}} + \frac{5U_{\text{oc}}}{0,012} = \frac{5U_3}{0,5};$$

$$\frac{d^2U_{oc}(t)}{dt_M^2} + \frac{1dU_{oc}}{T_d m_t dt_M} + \frac{K_M U_{oc}}{T_d m t^2} = \frac{K_M m_{oc} U_3}{m_3 T_d m t^2}; \quad (2.60)$$

$$\frac{d^2U_{oc}}{dt^2} + \frac{1 \cdot dU_{oc}}{0,012 dt} + \frac{5}{0,012} U_{oc}(t) = \frac{5}{0,012} U_3(t).$$

Прирівнявши відповідні коефіцієнти в рівняннях СП і його моделі, отримаємо співвідношення для обчислення коефіцієнтів моделі:

$$\frac{1}{T_d m_t} = \frac{1}{0,012} \rightarrow m_t = \frac{T_{СП}}{T_d} = 0,02;$$

$$\frac{K_M}{T_d m t^2} = \frac{5}{0,012} \rightarrow K_M = \frac{5 m t^2 T_d}{0,012} = 0,15;$$

$$\frac{K_M m_{oc}}{m_3 T_d m t^2} = \frac{5}{0,012} \rightarrow K_M = \frac{5 m_3 m t^2 T_d}{0,012 m_{oc}};$$

$$K_{11} K_{51} = \frac{0,15}{K_{yM} K_{дВ} K_{тГ}} = 76;$$

$$K_{11} = 10; K_{51} = 7.6;$$

10. Проведемо експериментальні дослідження. Зберемо на робочому полі УДС схему для дослідження позиційного сервоприводу. Запустимо середовище розроблення схем IDE_430. З допомогою комбінації клавіш Ctrl-N (або Файл → Нова структурна схема) створимо поле редактора схем для нової структурної схеми. Використовуючи стандартні блоки бібліотеки середовища, зберемо схему для дослідження позиційного сервоприводу (рис. 2.16).

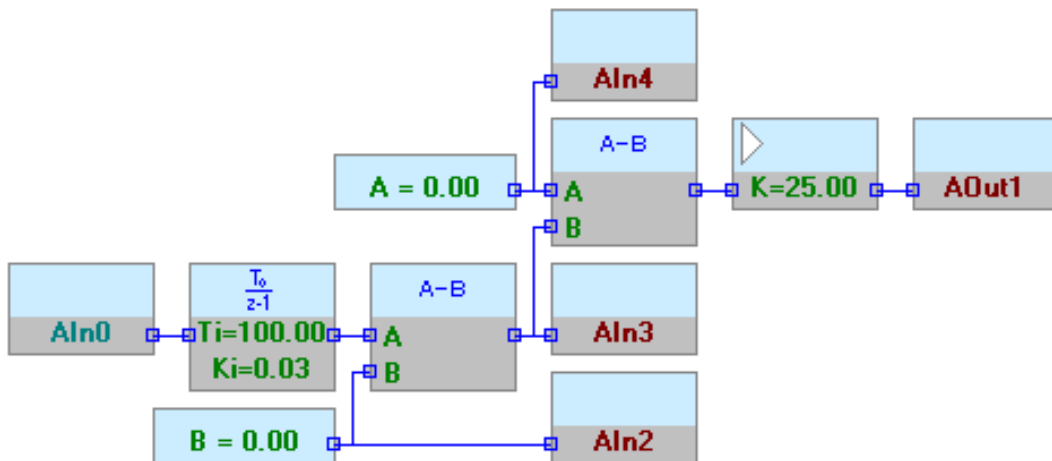


Рис. 2.16

Для будовання статичної характеристики виберемо меню «Исследование → Статическая характеристика» (у вікні задаємо вхід – AOut2, вихід – AIn0). Натиснемо кнопку «Загрузка кода» для виконання завантаження конфігураційної програми в контролер відповідного стенда. На вікні «Статическая характеристика» натиснемо кнопку «Начать», потім у головному вікні – кнопку «Запуск». При цьому запускається виконання програми на вибраному стенді. Статичну характеристику досліджуваної системи при $Kл = 1$ зображено на рис. 2.17.

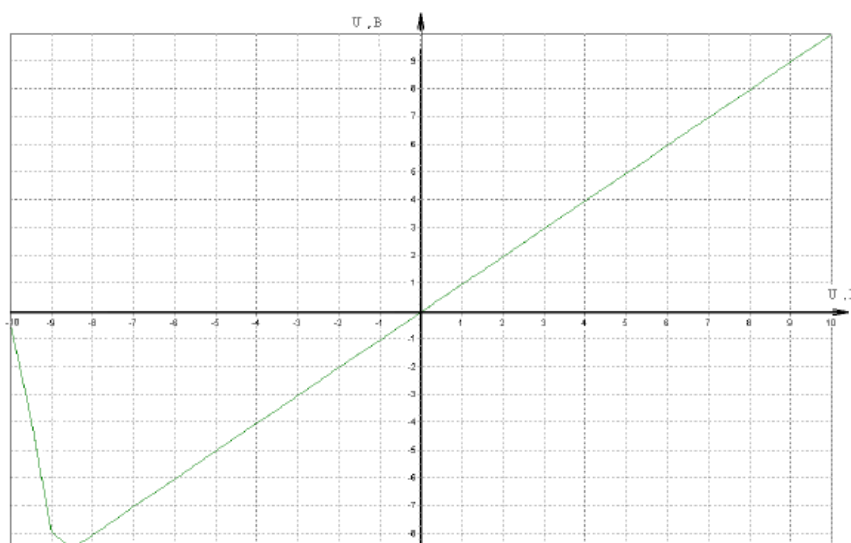


Рис. 2.17

Показники якості:

– лінійна частина статичної характеристики: $U_{зад} = -8...8 В$,

– робоча точка (Р.Т.) становить $|5| В$,

– коефіцієнт передачі сервоприводу $K_{сп} = \frac{\Delta U_{\delta}}{\Delta U_{зад}} = \frac{1}{1} = 1$.

Для будування перехідних характеристик необхідно сформулювати схему для дослідження позиційного сервоприводу аналогічно п.1. Для будування динамічної характеристики відкрити вікно будування графіків необхідно визначити параметри для відображення їх на екрані. Динамічну характеристику системи при $K_p = 0,5$ зображено на рис. 2.17, де 1 – задавальний вплив, 2 – вихідний сигнал, 3 – напруга навантаження.

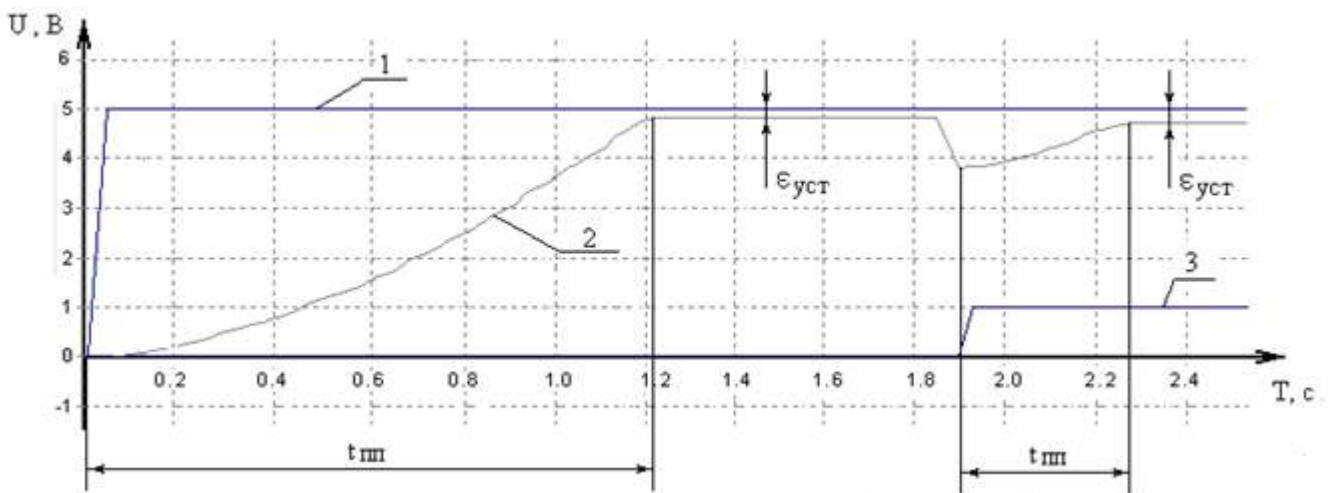


Рис. 2.17

Показники якості системи за задавальним впливом:

– стала похибка $\epsilon_{уст} = U_{max} - U_{уст} = 0,2 В$;

– час перехідного процесу $t_{рп} = 1,2 с$;

– відносна похибка $\sigma = \frac{U_{\max} - U_{\text{уст}}}{U_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{0.2}{4.8} \cdot 100\% = 4,16\%$.

Показники якості системи за збурювальним впливом:

– стала похибка $\varepsilon_{\text{уст}} = U_{\max} - U_{\text{уст}} = 0,3 \text{ В}$;

– час перехідного процесу $t_{\text{пр}} = 0,38 \text{ с}$;

– відносна похибка $\sigma = \frac{U_{\max} - U_{\text{уст}}}{U_{\text{уст}}} \cdot 100\% = \frac{0.3}{4.7} \cdot 100\% = 6,38\%$.

3. РЕАЛІЗАЦІЯ НА УДС МОДЕЛЕЙ САК, ОТРИМАНИХ У СЕРЕДОВИЩІ MATLAB/SIMULINK

Для вирішення завдання напівнатурного моделювання на УДС САК, отриманих у середовищі Matlab/Simulink, необхідно таке:

- функціональна схема САК;
- машинна модель САК у середовищі Matlab/Simulink;
- математичний опис об'єкта моделювання;
- види й діапазони задавальних і збурювальних впливів.

Дії з підготовки до вирішення завдання напівнатурного моделювання на УДС моделей САК, отриманих у середовищі Matlab/Simulink.

1. За заданою функціональною схемою вирішують, яка частина реальної системи відповідає реальним елементам, а динаміка якої буде моделюватися на робочому полі УДС.

2. За розробленою в середовищі Matlab/Simulink машинною моделлю складають передавальну функцію об'єкта моделювання, записують рівняння входу-виходу в зображеннях, а потім – в оригіналах.

3. За отриманим рівнянням входу-виходу об'єкта моделювання розробляють функціональну схему моделі САК.

4. Вибирають або розраховують масштаби відповідності реальних і машинних змінних (за часом, вхідними й вихідними змінними, збурювальним впливом).

5. Будують принципову схему моделі САК.

6. За принциповою схемою моделі САК записують рівняння входу-виходу моделі. Для цього позначають входи й виходи підсилювачів потужності; записують вирази для визначення входів і виходів підсилювачів потужності; з отриманого набору n -рівнянь, що описують задану схему, визначають одне рівняння входу-виходу моделі, для чого виключають проміжні змінні й залишають такі, що відповідають вхідним і вихідним впливам у системі; за необхідності виконують інтегрування або диференціювання рівнянь.

7. Записують рівняння моделі у фізичних змінних (змінні, які використовуються для опису об'єкта моделювання), з використанням уведених раніше масштабів.

8. Прирівнюючи коефіцієнти при однакових похідних у рівняннях об'єкта моделювання й моделі, знаходять необхідні коефіцієнти моделі, що забезпечують повну відповідність рівнянь об'єкта й моделі.

9. Розраховують коефіцієнти операційних підсилювачів, збирають схему й настраюють коефіцієнти.

10. Збирають схему моделювання.

11. Збирають схему регулятора (за необхідності), а також схему для отримання статичних або динамічних характеристик у середовищі розроблення алгоритмів IDE_430, установлюють задавальний і збурювальний впливи.

12. Проводять експериментальні дослідження.

13. Оцнюють отримані результати й формують висновки за результатами виконаної роботи.

Розглянемо приклад підготовки до напівнатурного моделювання моделей САК, отриманих у середовищі Matlab/Simulink.

Функціональну схему руху літального апарата в каналі крену зображено на рис. 3.1, на якому наведено такі умовні позначення: ЗП – задавальний пристрій; ПП – підсилювач потужності; СП – сервопривід; ОК – об'єкт керування; ДКШ – датчик кутової швидкості; ДК – датчик кута.

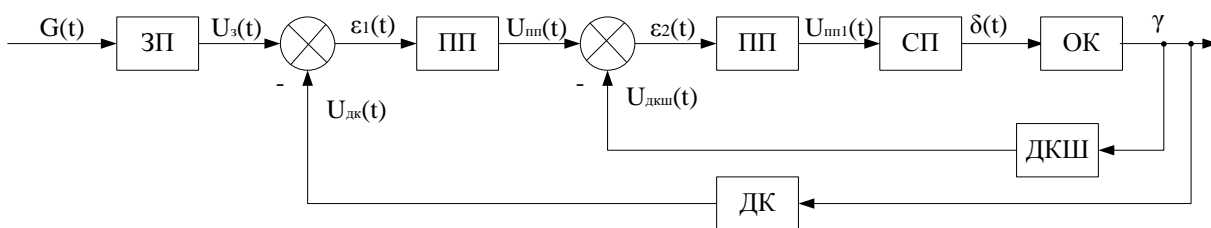


Рис. 3.1

Вибираємо елементи, які відповідають реальним елементам стенда:

- задавальний пристрій, який реалізується на ПК;
- підсилювач потужності, привід, датчик кута, що входять до складу УДС.

Динаміка літального апарата в каналі крену буде моделюватися на робочому полі.

На рис. 3.2 зображено схему руху літального апарата в каналі крену в середовищі Matlab/Simulink.

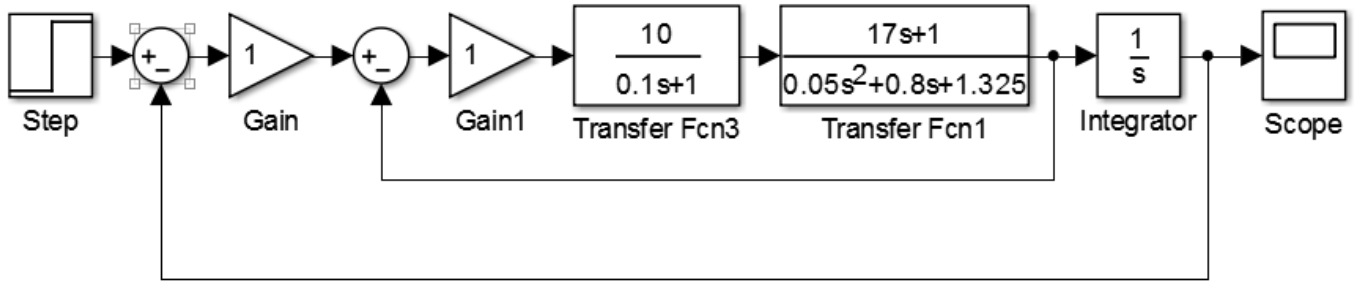


Рис. 3.2

На рис. 3.3 показано графік перехідного процесу в каналі крену в середовищі Matlab/Simulink.

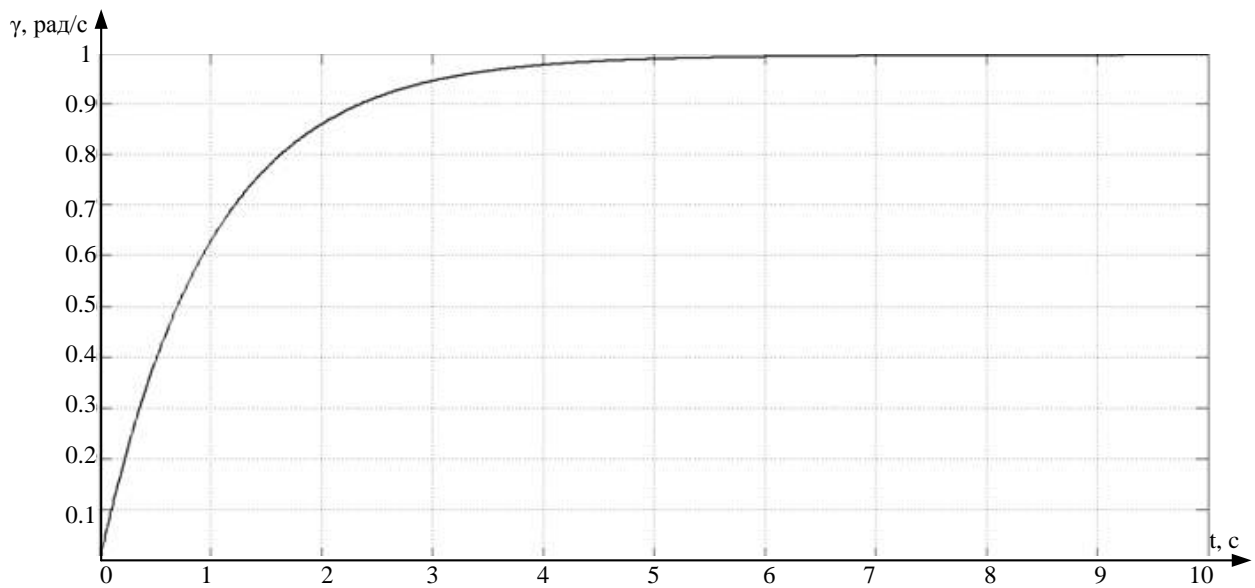


Рис. 3.3

Передавальна функція літального апарата в каналі крену має вигляд

$$W_{\text{ла}}(s) = \frac{\gamma(s)}{\delta_e(s)} = \frac{17s + 1}{s(0,05s^2 + 0,8s + 1,325)}$$

Запишемо рівняння входу-виходу об'єкта моделювання в зображеннях:

$$s(0,05s^2 + 0,8s + 1,325)\gamma(s) = (17s + 1)\delta_e(s);$$

а також в оригіналах:

$$0,05 \frac{d^3\gamma}{dt^3} + 0,8 \frac{d^2\gamma}{dt^2} + 1,325 \frac{d\gamma}{dt} = 17 \frac{d\delta_e}{dt} + \delta_e(t).$$

Розробимо функціональну схему САК. На рис. 3.4 зображено функціональну схему моделювання досліджуваної системи.

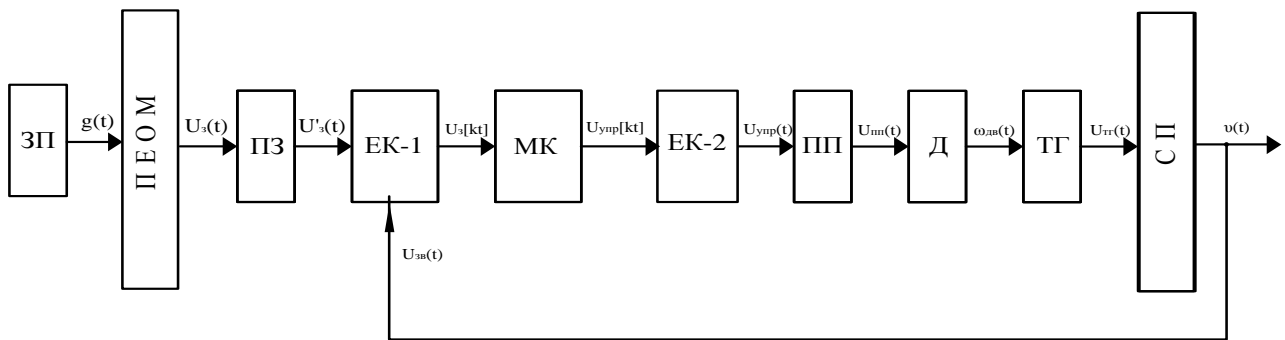


Рис. 3.4

На цьому рисунку наведено такі умовні позначення: ЗП – задавальний пристрій; ПЕОМ – персональна електронна обчислювальна машина; ПЗ – плата з'єднання; ЕК-1, ЕК-2 – електронний ключ; МК – мікроконтролер; ПП – підсилювач потужності; Д – двигун; ТГ – тахогенератор; СП – складальне поле.

Виберемо масштаби:

– за часом

$$m_t = \frac{t}{t_M} = \frac{1}{1} = 1, \quad (3.1)$$

де t – реальний час; t_M – час моделювання;

– за входом

$$m_{\text{ex}} = \frac{\delta_e}{U_{\delta_e}} = \frac{22}{10} = 2,2 \frac{\text{град.}}{\text{В}}, \quad (3.2)$$

де δ_e – максимально допустиме відхилення елеронів ЛА;
 U_{δ_e} – напруга на стенді, що відповідає вхідному;

– за виходом:

$$m_{\text{вих}} = \frac{\gamma_{\text{max}}}{U_\gamma} = \frac{17}{10} = 1,7 \frac{\text{град.}}{\text{В}}. \quad (3.3)$$

Складемо принципову схему моделі САК. На рис. 3.5 зображено принципову схему моделі САК, яка будується на основі отриманого раніше рівняння входу-виходу методом послідовного інтегрування.

Запишемо рівняння входу-виходу моделі. Для отримання модельного рівняння позначимо всі входи й виходи операційних підсилювачів і складемо рівняння для кожного з них (вирази 3.4 – 3.6).

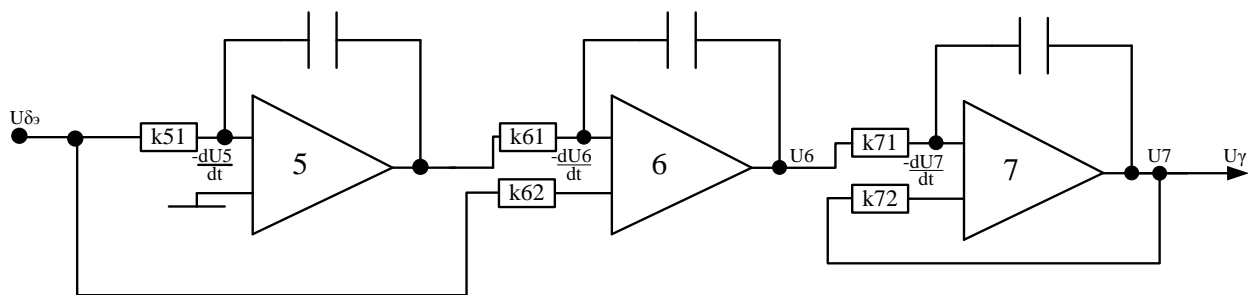


Рис. 3.5

$$\frac{dU_5}{dt} = -k_{51}U_\delta(t); \quad (3.4)$$

$$\frac{dU_6}{dt} = -k_{61}U_5(t) - k_{62}U_\delta(t); \quad (3.5)$$

$$\frac{dU_\gamma}{dt} = -k_{71}U_6(t) - k_{72}U_\gamma(t); \quad (3.6)$$

Продиференціюємо вираз (3.6):

$$\frac{d^2U_\gamma}{dt^2} = -k_{71}\frac{dU_6(t)}{dt} - k_{72}\frac{dU_\gamma}{dt}. \quad (3.7)$$

Підставимо вираз (3.5) у рівняння (3.7):

$$\frac{d^2U_\gamma}{dt^2} = k_{71}k_{61}U_5(t) + k_{71}k_{62}U_\delta(t) - k_{72}\frac{dU_\gamma}{dt}. \quad (3.8)$$

Продиференціюємо вираз (3.8) і підставимо в нього рівняння (3.4):

$$\frac{d^3 U_\gamma}{dt^3} = k_{71} k_{61} k_{51} U_\delta(t) + k_{71} k_{62} \frac{dU_\delta}{dt} - k_{72} \frac{d^2 U_\gamma}{dt^2}. \quad (3.9)$$

$$\frac{d^3 U_\gamma}{dt^3} + k_{72} \frac{d^2 U_\gamma}{dt^2} = k_{71} k_{62} \frac{dU_\delta}{dt} + k_{71} k_{61} k_{51} U_\delta(t). \quad (3.10)$$

Запишемо рівняння моделі у фізичних змінних (змінні, які використовувалися для опису об'єкта моделювання) із застосуванням уведених раніше масштабів.

Використовуючи вирази

$$U_{\delta_e} = \frac{\delta_e}{m_{\text{ВХ}}}, \quad U_\gamma = \frac{\gamma}{m_{\text{ВІХ}}}, \quad (3.11)$$

запишемо рівняння моделі у фізичних змінних з використанням отриманих масштабних коефіцієнтів:

$$\frac{1}{m_{\text{ВІХ}}} \frac{d^3 \gamma}{dt^3} + \frac{k_{72}}{m_{\text{ВІХ}}} \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = \frac{k_{71} k_{62}}{m_{\text{ВХ}}} \frac{d\delta_e}{dt} + \frac{k_{71} k_{61} k_{51}}{m_{\text{ВХ}}} \delta_e. \quad (3.12)$$

$$\frac{d^3 \gamma}{dt^3} + k_{72} \frac{d^2 \gamma}{dt^2} = \frac{k_{71} k_{62} m_{\text{ВІХ}}}{m_{\text{ВХ}}} \frac{d\delta_e}{dt} + \frac{k_{71} k_{61} k_{51} m_{\text{ВІХ}}}{m_{\text{ВХ}}} \delta_e. \quad (3.13)$$

Знайдемо необхідні коефіцієнти моделі, що забезпечують повну відповідність рівнянь об'єкта й моделі з допомогою встановлення відповідності між коефіцієнтами перед кожним із сигналів і їх похідних:

$$k_{72} = 0,8;$$

$$\frac{k_{71}k_{61}k_{51}m_{eUX}}{m_{eX}} = 1; k_{71}k_{61}k_{51} = \frac{1}{m_{eX}} = 1.3;$$

$$\frac{k_{71}k_{62}m_{eUX}}{m_{eX}} = 17; k_{71}k_{62} = 10.$$

Якщо кількість рівнянь є меншою, ніж кількість невідомих параметрів системи, і немає можливості визначити коефіцієнти, то виберемо значення деяких коефіцієнтів самостійно: $k_{71} = k_{61} = 1$, тоді $k_{51} = 1,3$, $k_{62} = 10$.

Зберемо схему в середовищі IDE_430 для дослідження й отримання перехідних характеристик досліджуваної системи стабілізації кута крену літака (рис. 3.6).

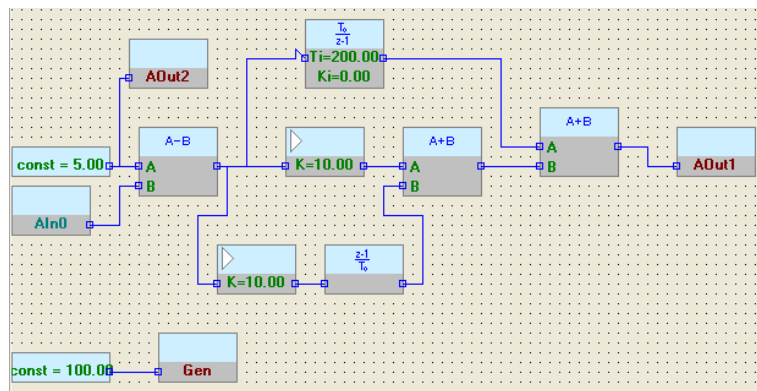


Рис. 3.6

Проведемо експериментальні дослідження. Після запуску програмного забезпечення й УДС отримаємо перехідні процеси системи за задавальним впливом (алгоритм отримання характеристик з допомогою стенда наведено в розд.1 цього посібника).

На рис. 3.7 показано графік перехідного процесу моделі. За графіком, отриманим унаслідок напівнатурного моделювання САК у каналі крену літака (див. рис. 3.7) необхідно оцінити показники якості досліджуваної системи, зробити висновки про їх відповідність вимогам технічного завдання

й порівняти отримані результати з результатами моделювання в середовищі Matlab/Simulink. Для заданої САК $t_{np} = 3$ с; $\sigma = 0$ %; $\varepsilon = 3,5^\circ$.

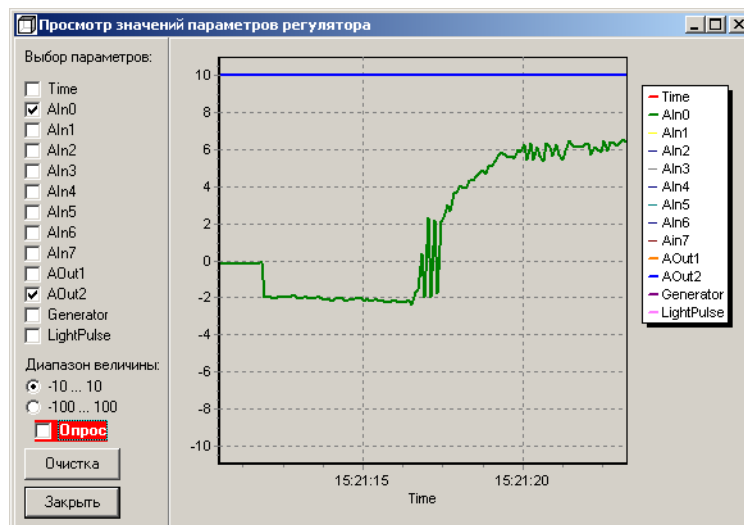


Рис. 3.7

Як видно, моделювання в середовищі Matlab/Simulink і напівнатурне моделювання мають деякі відмінності. Це пояснюється використанням реального обладнання при напівнатурному моделюванні з нелінійними статичними характеристиками. У цілому похибка між експериментальним і комп'ютерним моделюванням не перебільшує 10 %.

Зазначимо, що більш комплексним є відпрацювання системи керування на універсальному дослідному стенді, що максимально наближує модель до реальних умов функціонування. Для підвищення точності відповідності стендових результатів (напівнатурне моделювання) до модельних (Matlab/Simulink) необхідно якісно проводити перехід від моделі Matlab до напівнатурної моделі з урахуванням точності будування моделі, діапазонів змінення вхідних і вихідних сигналів. Важливо приділити увагу розрахунку масштабів для підвищення наглядності експериментальних графіків і полегшення їх подальшого аналізу й опрацювання.

БІБЛІОГРАФІЧНИЙ СПИСОК

1. Полунатурное моделирование и проектирование цифровых систем управления / В. Ф. Симонов и др. – Харьков : ХАИ, 2010. – 70 с.
2. Симонов, В. Ф. Проектирование систем управления : консп. лекций / В. Ф. Симонов. – Харьков : ХАИ, 2014. – 97 с.
3. Пасичник, С. Н. Моделирование систем управления : консп. лекций / С. Н. Пасичник. – Харьков : ХАИ, 2016. – 83 с.

ЗМІСТ

1. Призначення, склад і принцип дії універсального дослідного стенда	3
1.1. Склад універсального дослідного стенда	4
1.2. Функціональні можливості стенда.....	9
2. Реалізація математичних моделей САК на УДС	10
2.1. Застосування математичних моделей систем автоматичного керування	10
2.2. Підготовка до вирішення завдання напівнатурного моделювання математичних моделей САК на УДС.....	11
2.3. Способи запису диференціальних рівнянь при моделюванні САК.....	12
2.4. Математичний опис законів керування для систем автоматичного керування	14
2.5. Методи моделювання диференціальних рівнянь на операційних підсилювачах.....	15
2.6. Масштабування модельних рівнянь системи автоматичного керування	19
2.7. Складання схеми регулятора в середовищі IDE_430	21
2.8. Приклад будування напівнатурної моделі.....	24
2.9. Будування напівнатурної моделі системи за її передавальною функцією	36
3. Реалізація на УДС моделей САК, отриманих у середовищі MATLAB/SIMULINK	43
Бібліографічний список.....	54

Навчальне видання

**Барсов Валерій Ігорович
Харіна Наталія Миколаївна**

**РЕАЛІЗАЦІЯ МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ САК
НА УНІВЕРСАЛЬНОМУ ДОСЛІДНОМУ СТЕНДІ**

Редактор О. Ф. Серьожкіна

Зв. план, 2018

Підписано до друку 00.00.2018

Ум. друк. арк. 3.1. Обл.- вид. арк. 3.44. Електронний ресурс

Видавець і виготовлювач

Національний аерокосмічний університет ім. М. Є. Жуковського

«Харківський авіаційний інститут»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

<http://www.khai.edu>

Видавничий центр «ХАІ»

61070, Харків-70, вул. Чкалова, 17

izdat@khai.edu

Свідоцтво про внесення суб`єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготовлювачів і розповсюджувачів
видавничої продукції сер. ДК № 391 від 30.03.2001