МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ З ДИСЦИПЛІНИ "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ" ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 174 – АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

Дніпро УДХТУ 2024

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ УКРАЇНСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ НАУКИ І ТЕХНІКИ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ ДО ЛАБОРАТОРНИХ ЗАНЯТЬ З ДИСЦИПЛІНИ "СУЧАСНІ ПРОБЛЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ" ДЛЯ СТУДЕНТІВ СПЕЦІАЛЬНОСТІ 174 – АВТОМАТИЗАЦІЯ, КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ ТЕХНОЛОГІЇ ТА РОБОТОТЕХНІКА

Затверджено на засіданні кафедри комп'ютерно-інтегрованих технологій і метрології. Протокол № від грудня 2023 р.

Дніпро УДХТУ 2024

Методичні вказівки до лабораторних занять з дисципліни "Сучасні проблеми автоматизованого управління" для студентів спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка / Укл.: Г.І. Манко. – Дніпро: УДХТУ, 2024. – 56 с.

Укладач Г.І. Манко, канд. техн. наук

Відповідальний за випуск О.П. Мисов, канд. техн. наук

Навчальне видання

Методичні вказівки

до лабораторних занять

з дисципліни " Сучасні проблеми автоматизованого управління"

для студентів спеціальності 174 – Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка

Укладач: МАНКО Геннадій Іванович

Редактор Л.М. Тонкошкур Коректор Л.Я. Гоцуцова

Підп. до друку _____. Формат 60х84 1/16. Папір ксерокс. Друк різограф. Умовн.-друк. арк. _____Облік. – вид. арк. _____ Тираж ____прим. Зам. № _____ Свідотство ДК №303 від 27.12.2000.

УДХТУ, 49005, Дніпропетровськ-5, пр-т Гагаріна, 8

Видавничо-поліграфічний комплекс ІнКомЦентру

Лабораторна робота № 1

СТРУКТУРНІ МОДЕЛІ ДИНАМІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

Мета роботи: вивчення методів побудови структурних моделей динамічних процесів.

1.1 Загальні відомості

Прикладні методи дослідження систем автоматичного управління базуються, як правило, на використанні структурних моделей динамічних процесів, що протікають в них. Структурна схема є графічним зображенням математичної моделі системи у вигляді з'єднань ланок і дає наочне уявлення про зв'язки між ланками, проходження і перетворення сигналів в системі. На побудові структурних схем заснований метод імітаційного моделювання динамічних процесів в системах автоматичного управління.

Перевагами імітаційного моделювання в середовищі Хсоѕ є простота і наочність. Від користувача не потрібно знання яких-небудь мов програмування.

Розробка моделей засобами Xcos (надалі Xcos-моделей) заснована на використанні технології Drag-and-Drop. Для побудови Xcos-моделі використовуються модулі (чи блоки), що зберігаються у бібліотеках Xcos.

Блоки, що включаються в створювану модель, можуть бути пов'язані один з одним як за інформацією, так і по управлінню. Тип зв'язку залежить від типу блоку і логіки роботи моделі. Дані, якими обмінюються блоки, можуть бути скалярними величинами, векторами або матрицями довільної розмірності.

Будь-яка Xcos-модель може мати ієрархічну структуру, тобто складатися з моделей нижчого рівня, причому число рівнів ієрархії практично не обмежене.

Разом з іншими параметрами моделювання користувач може задавати спосіб зміни модельного часу (з постійним або змінним кроком), а також умови закінчення моделювання.

В ході моделювання є можливість спостерігати за процесами, що відбуваються в системі. Для цього використовуються спеціальні "оглядові вікна", що входять до складу бібліотеки Xcos. Характеристики системи, що цікавлять користувача, можуть бути представлені як в числовій, так і в графічній формі. Крім того, існує можливість включення до складу моделі засобів анімації.

Ще одна важлива перевага Xcos полягає в тому, що він є відкритою системою: склад бібліотеки може бути поповнений користувачем за рахунок розробки власних блоків.

1.2 Запуск ХСОЅ

Спочатку необхідно запустити Scilab будь-яким способом, передбаченим у Windows. Після запуску з'являється основне вікно системи Scilab. У панелі інструментів натиснути кнопку 🖾 або вибрати опцію «Xcos» з меню «Про-

грами». В результаті відкриваються два вікна: вікно «Перегляд палітри» блоків і вікно графічного редактора (рис 1.1)



Рисунок 1.1 – Вікна середовища Хсоз

У вікні «Перегляд палітри» міститься дерево компонентів бібліотек Хсоs. Для перегляду розділу бібліотеки треба виділити його мишею – в правій частині вікна з'явиться набір піктограм компонентів активного розділу бібліотеки. У вікні графічного редактора будується діаграма Хсоs.

1.3 Створення Хсоѕ-моделей

Процес побудови Хсоз-моделі включає компонування моделі і завдання необхідних параметрів. Компонування полягає у виборі з бібліотек Хсоз необхідних блоків, їх розміщення у вікні графічного редактора і з'єднання між собою. Додати з бібліотеки обраний блок до діаграми можна подвійним клацанням по його зображенню лівою клавішею миші (ЛКМ) або просто перетягнувши його мишею у вікно графічного редактора.

Далі на діаграмі для кожного блоку встановлюються відповідні параметри, що відповідають вимогам модельованої системи. Для їх зміни потрібно двічі клацнути по блоку і змінити потрібні значення в діалоговому вікні.

Блоки мають назви, які можна змінювати, клацнувши по назві ЛКМ і відредагувавши текст.

Блоки можна повертати. Для того, щоб повернути блок на 90 градусів, потрібно виділити його і натиснути клавіші Ctrl+R, щоб віддзеркалити Ctrl+M.

Блоки з'єднуються лініями зв'язку, по яких поширюються сигнали. Для того, щоб з'єднати блоки, треба протягнути мишкою лінію зв'язку між потрібними виходом і входом. При створенні відгалуження від існуючої сполучної лінії, тобто для з'єднання вхідного порту якого-небудь блоку з існуючою лінією, необхідно при виконанні з'єднання скористатися клавішею Ctrl. Також для створення точки розгалуження в сполучній лінії можна підвести курсор до передбачуваного вузла і, натиснувши праву клавішу миші (ПКМ), протягнути лінію.

Блок-діаграми XCOS можуть бути об'єднані в суперблоки, що дозволяє використати ієрархічне представлення структури моделі. Створення суперблоку можливе двома шляхами:

a) перенести з бібліотеки блоків «Порт і підсистема» блок **SUPER_f** (підсистема) і, розкривши його в окреме вікно, сформувати структуру підсистеми в цьому вікні;

б) збудувати блок-діаграму в основному вікні створюваної моделі, виділити її частину (призначену для об'єднання в підсистему) і, перейшовши в меню, вибрати опцію «Позначене у суперблок» меню «Змінити». В результаті в основному вікні автоматично утворюється вкладений блок, в якому знаходитиметься та частина блок-діаграми, що була виділена.

Для того, щоб запустити моделювання, потрібно клацнути ліву клавішу миші по кнопці на панелі інструментів вікна моделі. Ця ж кнопка дозволяє зупинити моделювання при необхідності. Запуск моделі на розрахунок можна здійснити також через опцію «Запустити» меню «Моделювання».

Заздалегідь перед запуском розробленої моделі необхідно:

а) встановити параметри роботи моделі (інтервал часу роботи моделі, метод інтеграції, погрішність та ін.). Установка цих параметрів здійснюється через опцію «Налаштування» меню «Моделювання». Найважливіші параметри це Загальний час моделювання і метод чисельної інтеграції рівнянь (Тип розв'язувача);

б) зберегти розроблену модель (опція «Зберегти» меню «Файл»).

1.4 Найбільш вживані блоки Хсоз

Бібліотека «Неперервні динамічні системи»

1	CLR – неперервна передатна функція, в параметрах задаються
$\boxed{1+s}$	Чисельник і Denominator (знаменник) у вигляді поліномів
xd = Ax+Bu	CLSS – модель в просторі станів, в параметрах задається четвір-
y = Cx+Du	ка матриць, що визначають модель, і початкові умови для векто-
	ру стану (Initial conditions).
	INTEGRAL_m – інтегратор з можливістю установки початко-
	вих умов, а також границь насичення. Коли сигнал виходу вихо-
	дить за границі, визначувані цими межами, інтеграція припиня-
	сться.
Continuous	ТІМЕ_DELAY – блок фіксованої затримки у часі.
Tix delay	

1	CONST_m– сигнал постійної величини.
	STEP_FUNCTION – ступінчастий сигнал, міняється час стрибка (<i>Step Time</i>), початкове (<i>Initial Value</i>) і кінцеве значення (<i>Final Value</i>).
	RAMP – лінійно зростаючий сигнал із заданим нахилом (<i>Slope</i>). Можна задати також час початку зміни сигналу (<i>Start Time</i>) і початкове значення (<i>Initial Value</i>).
	PULSE_SC – генератор прямокутних імпульсів, задаються ампліту- да (<i>Amplitude</i>), період (<i>Period</i>), ширина (<i>Pulse Width</i>) у відсотках від періоду, фаза (<i>Phase Delay</i>).
\mathbb{N}	GENSIN_f – синусоїдальний сигнал, задається амплітуда (<i>Magnitude</i>), частота (<i>Frequency</i>), фаза (<i>Phase</i>)
Random generator	RAND_m – генератор випадкових чисел з рівномірним (<i>flag</i> 0) або нормальним (<i>flag</i> 1) розподілом.

Бібліотека «Пристрої реєстрації»

AFFICH_m	AFFICH_m – цифровий дисплей, показує зміни вхідного сигналу в цифровому виді
	CSCOPE – осцилограф, показує зміни сигналу у вигляді графіку. Усі криві будуються в одних і тих же осях.
	СМЅСОРЕ – багатовіконний дисплей, що виводить декілька графіків в окремих осях
To workspace A [128]	TOWS_c – блок виведення даних у робочий простір Scilab для подальшої обробки

Бібліотека «Математичні операції»

• 1 •	GAINBLK_f – підсилювач, задається коефіцієнт посилення (Gain)
	SUMMATION – суматор, використовується для складання і відні- мання входів. Параметр <i>Number of inputs or sign vector</i> задає кіль- кість входів, їх знаки ("+1" для складання і "-1" для віднімання)
	PRODUCT – множення або ділення. Параметр <i>Number of inputs or sign vector</i> задає кількість входів, їх знаки ("+1" для множення і "-1" для ділення)
sin cos tan asin acos atan sinh cosh tanh asinhaœshatanh SI N	TrigFun – тригонометрична функція

	SWITCH_f – ручний перемикач, дозволяє перемикати вихід на
•	один з двох вхідних сигналів
Static: 1	
	MUX – мультиплексор, об'єднує декілька сигналів в один "джгут"
	(векторний сигнал), в параметрах задається число входів
MUX	
	DEMUX – демультиплексор, дозволяє "розбити" векторний сигнал
	на декілька скалярних, в параметрах задається число виходів
DEMUX	

1.5 Параметри моделювання

Загальний час інтегрування – цей час встановлюється дослідним шляхом. За замовчуванням становить 3.0Е01 (30 секунд). Час початку роботи завжди дорівнює нулю.

Динамічне масштабування — за його допомогою можна забезпечити зручну для спостереження швидкість відтворення процесу на екрані. За замовчуванням для цього параметра встановлене значення 0, тобто максимальна швидкість моделювання. Для наочності процесів рекомендується встановити 0.1.

Абсолютна похибка інтегрування являє собою прийнятну помилку. Її величина за замовчуванням 10⁻⁶.

Відносна похибка інтегрування задає помилку відносно величини кожного стану, тобто, відсоток від величини. Наприклад, 1.0Е-06 означає, що точність обчисленого стану в межах 10⁻⁴ %.

Максимальний час інтегрування – максимальний часовий інтервал для кожного виклику вирішувача. Він має бути зменшений, якщо надходить повідомлення «too many calls» (занадто багато запитів).

Максимальний розмір кроку –задає найбільший крок інтегрування, який може вибрати вирішувач. Ця установка важлива тим, що перешкоджає вибір вирішувачем занадто великого кроку.

1.6 Порядок виконання лабораторної роботи

1. На диску D комп'ютера створити свою власну теку з іменем, написаним латинськими символами.

2. Запустити пакет Хсоs, керуючись п. 1.2. Відкрити бібліотеку «Джерела сигналів». Перетягнути у вікно редактора нової Хсоs-моделі джерела синусоїдального GENSIN_f і одиничного ступінчастого STEP_FUNCTION сигналів, а також годинник SampleCLK. З бібліотеки «Пристрої реєстрації» витягнути осцилограф CSCOPE. Для одночасного спостереження декількох сигналів на одному осцилографі потрібний мультиплексор MUX, що знаходиться в бібліотеці «Пристрої реєстрації». 3. Зібрати схему, як показано на рис 1.2 а), сполучаючи мишею входи і виходи елементів, при необхідності змінюючи їх розміри за допомогою "ручок", що з'являються на кутах елементу при його виділенні.



Рисунок 1.2 – Схема дослідження генераторів сигналів

4. Для налаштування параметрів елементів схеми двічі клацнути їх мишею і у вікні, що відкрилося, встановити налаштування відповідно до номера варіанту *n*:

а) для блока **GENSIN_f** – амплітуду синусоїди рівною n;

б) для блока STEP_FUNCTION – час сходинки 6.28 с, кінцевий рівень final value рівним n;

в) для блока **CSCOPE** – Ymin= –1.2*n*, Ymax=2.1*n*;

u) для блока SampleCLK – час вибірки 0.1 с.

5. Запустити моделювання, натиснувши кнопку [▷] панелі інструментів. Осцилограма виводиться у графічне вікно. Поясніть вигляд осцилограм.

6. Видалити зі схеми мультиплексор і замінити його на суматор **SUMMATION** з бібліотеки «Математичні операції», як показано на рис. 1.2 б). У параметрах налаштування суматора указати, що обидва входи є сумуючими. Для цього змінити параметр *Number of inputs or sign vector* на [1;1]. Запустити моделювання і пояснити вигляд осцилограми.

7. Для дослідження інтеграції і диференціювання створити Хсоs-модель, показану на рис. 1.3, використовуючи генератор прямокутних імпульсів **PULSE_SC** з бібліотеки «Джерела сигналів», блоки диференціювання **DERIV** та інтегрування **INTEGRAL_f** з бібліотеки «Неперервні динамічні системи». Для мультіплексора **MUX** указати кількість вхідних портів 3. У параметрах генератора встановити амплітуду рівною номеру варіанта n, період 4 с, ширину імпульсу Pulse Width 30%. Для осцилографа задати Ymin= 0, Ymax=5n.



Рисунок 1.3 – Хсоз-модель для дослідження інтеграції і диференціювання

8. Запустити моделювання і пояснити отриманий результат.

9. Звіт з лабораторної роботи повинен містити мету роботи, схеми Xcos, осцилограми, що спостерігаються на кожному етапі роботи, а також пояснення вигляду осцилограм.

Контрольні питання

1. Що називається структурною схемою і які достоїнства структурних моделей?

2. Що таке палітра Хсоз?

- 3. Як зробити, щоб один і той же сигнал надходив на декілька блоків?
- 4. Як продублювати блок у вікні моделі?
- 5. Як скопіювати зображення моделі в документ Microsoft Word?
- 6. Як змінити знаки арифметичних дій в суматорі?
- 7. Як одночасно спостерігати на осцилографі кілька сигналів?

Лабораторна робота № 2

ДОСЛІДЖЕННЯ ПЕРЕХІДНИХ ХАРАКТЕРИСТИК КОЛИВАЛЬНОЇ ЛАНКИ

2.1 Теоретичні відомості

Мета роботи: отримання і аналіз перехідних характеристик коливальної ланки при різних значеннях її параметрів.

У цій роботі об'єктом досліджень є коливальна ланка. Розглянемо побудову моделі такої ланки на прикладі активного коливального RLC-контура (рис. 2.1).



Рисунок 2.1 – Активний коливальний контур Рівняння, що описує електричні процеси в цьому контурі:

$$LC\frac{d^2U_{BbIX}}{dt^2} + RC\frac{dU_{BbIX}}{dt} + U_{BbIX} = KU_{BX}$$
(2.1)

При необхідності дослідження процесів в елементах цього контура, а також з метою розкладання перетворення сигналів в контурі на прості обчислювальні операції (підсумовування, множення, інтеграція) будуємо структурну схему (рис. 2.2).



Рисунок 2.2 – Структурна модель коливальної ланки

У цій моделі різниця напруги U_{BX} і на конденсаторі U_c визначає сумарну напругу на індуктивності і опорі U_L+U_R (суматор 1). Якщо з сумарної напруги відняти величину напруги на опорі U_R , то залишиться напруга на індуктивності U_L (суматор 2). Шляхом інтеграції напруги на індуктивності за часом отримаємо потокозчеплення ψ (інтегратор 3), а діленням останнього на величину індуктивності – струм *i* (підсилювач 4). Зазвичай використовується об'єднана форма двох останніх перетворень:

$$U_L = L \frac{di}{dt}.$$

Струм *i* створює падіння напруги на опорі $U_R = iR$ (підсилювач 5). Інтегрування струму за часом дозволяє розрахувати заряд конденсатора q (інтегратор 6), а ділення заряду на величину ємності – напругу на конденсаторі U_C (підсилювач 7). Останні два перетворення записуються в такій формі:

$$i = C \frac{dU_C}{dt}$$

Шляхом множення напруги на конденсаторі на коефіцієнт посилення К знайдемо вихідну напругу U_{вих} (підсилювач 8).

Аналогічну структурну модель коливального контуру можна побудувати, не розглядаючи математичний опис окремих елементів, а використовуючи повне рівняння контура (2.1). Для цього в рівнянні треба виділити старшу похідну вихідної величини:

$$\frac{d^{2}U_{BbIX}}{dt^{2}} = -\frac{R}{L}\frac{dU_{BIX}}{dt} + \frac{1}{LC}(KU_{BX} - U_{BHX})$$
(2.2)

Відповідно до отриманого рівняння побудуємо структурну схему, почи $d^2 U_{\underline{BUX}}$ (рис. 2.3). Двічі проінтегрувавши цю величину, роз dt^2 наючи з величини dU_{BUX} и $U_{\text{вих}}$ (інтегратори 5 и 6). Шляхом множення $U_{\text{вх}}$ на K і відніdt рахуємо мання U_{вих} (суматор 2), а потім за допомогою множення результуючого сигналу на $\frac{1}{LC}$ (підсилювач 3) знайдемо $\frac{1}{LC}(KU_{BX} - U_{BUX})$. Віднявши від цієї величини

 $R dU_{BUX}$ (суматор 4), отримасформований за допомогою підсилювача 7 сигнал *L* dt



Рисунок 2.3 – Перетворена структурна модель коливальної ланки

Використовуючи правила перетворення структурних схем, можна довести еквівалентність моделей, показаних на рис. 2.2 і 2.3. У них застосовуються лише різні внутрішні змінні. Важливо відмітити, що усі подібні структурні моделі будуються на базі інтеграторів, масштабних підсилювачів і суматорів. Ця модель будується на двох послідовно сполучених блоках-інтеграторах, охоплених загальним негативним зворотним зв'язком з коефіцієнтом, рівним 1.

Загальний вигляд диференціального рівняння коливальної ланки:

$$T_2^2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} + y = kx,$$

проте в операторній формі звичайно його представляють так:

$$(T^2p^2+2\xi Tp+1)y=kx,$$

де
 ξ — параметр затухання (коефіцієнт демпфування), який лежить в межа
х $0 < \xi < 1.$

Параметри коливальної ланки можуть бути отримані шляхом аналізу перехідної характеристики. Перехідною характеристикою (перехідним процесом) h(t) називають реакцію якої-небудь системи на одиничну ступінчасту дію (рис. 2.4).



Рисунок 2.4 – Перехідна характеристика коливальної ланки

Параметри обчислюють по наступних формулах: $K = \frac{U_{BHX,VCT}}{U_{BX}}$ – коефіцієнт посилення; $\omega = \frac{2\pi}{T_{\kappa}}$ – частота власних коливань; $\alpha = \frac{1}{T_{K}} \ln \left(\frac{A_{1}}{A_{2}}\right)$ – коефіцієнт за-гасання; $\omega_{0} = \sqrt{\omega^{2} - \alpha^{2}}$ – резонансна частота; $T = \frac{1}{\omega_{0}}$ – стала часу коливальної ланки; $\xi = \frac{\alpha}{\omega_{0}}$ – міра демпфування.

2.2 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Для запуску пакету Хсоѕ клацніть по кнопці Шв командному вікні Scilab або введіть команду *xcos* в командному рядку. У випадку відсутності вікна «Перегляд палітри» відкрийте його, вибравши опцію «Перегляд палітри» меню «Перегляд».

2. У вікні консолі Scilab введіть значення змінних *L*, *C* і *R* згідно варіантів, наведених у табл. 2.1. Ємність *C* треба представити у фарадах.

Варіант	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
<i>L</i> , Гн	10	1	100	1	0,1	10	100	10	100	1000
С, мкФ	10	100	1000	100	200	1000	10	100	1000	100
<i>R</i> , Ом	50	5	15	50	5	10	150	15	1,5	1000

Таблиця 2.1

3. Перетягніть блок **GAINBLK_f** (підсилювач) з бібліотеки «Математичні операції» у вікно редактора і продублюйте його двічі. Перейдіть у вікно редагування властивостей кожного блоку (двічі натиснувши ЛКМ на зображенні блоку) і занесіть у поле *Підсилення* відповідні значення коефіцієнтів K1=1/L; K2=1/C; K3=R. Віддзеркальте блок R комбінацією клавіш Ctrl+M.

4. Перетягніть блок INTEGRAL_m (інтегратор) з бібліотеки «Неперервні динамічні системи» у вікно моделі і продублюйте його.

5. Перетягніть блок **SUMMATION** (суматор) з бібліотеки «Математичні операції») у вікно редактора і перейдіть у вікно редагування його властивостей (двічі натиснувши на ЛКМ на зображенні блоку). Для властивості *Number of inputs or sign vector* задайте [–1;1;–1], це говорить про те, що буде використано три входи, два, що віднімають, та один, що підсумовує.

6. З бібліотеки «Пристрої реєстрації» витягнути осцилограф СSCOPE.

7. Перетягніть у вікно редактора з бібліотеки «Джерела сигналів» блоки **STEP_FUNCTION**, а також годинник **SampleCLK**. Для джерела ступінчастого сигналу встановіть параметр *Час сходинки* рівним 0, для годинника *Час вибірки* 0.001.

8. Виконайте з'єднання блоків відповідно до схеми, представленої на рис. 2.5.



Рисунок 2.5 – Хсоѕ-модель коливальної ланки

9. Збережіть модель у своїй теці під ім'ям lab2.zcos.

10. Загальний час інтегрування (опція «Налаштування» меню «Моделювання») підбирайте так, щоб осцилограма була схожа на рис. 2.4.

11. Отримайте перехідні характеристики для трьох значень опору *R*. Для розрахунку параметрів перехідного процесу треба обробити осцилограми:

a) у вікні консолі Scilab введіть команді **xgrid** для нанесення сітки на графік:

б) розширити вікно графіка на весь екран;

в) у вікні графіка натиснути кнопку 🔍 («Підібрати за вмістом») для найкращого масштабування зображення;

в) натиснути кнопку 🗇 («Увімкнути режим підписів»);

г) щоб отримати координати точок графіка клацніть ЛКМ у потрібному місці; щоб прибрати координати, клацніть ПКМ;

д) занести результати в табл. 2.2.

Таблиця 2.2

Перехідна ха- рактеристика	$U_{\rm bx}$	$U_{\rm вих.уст}$	A1	A2	T_K	K	ω	α	ω ₀	Т	ŷ
R_{\min}											
R											
R _{max}											

Тут $U_{\text{вх}}$ – величина сходинки вхідного сигналу, $U_{\text{вих.уст}}$ значення вихідного сигналу, що встановилося, A1 и A2 – амплітуди першого і другого коливань, T_{K} – період коливань, вимірювані безпосередньо за перехідною характеристикою (див. рис. 2.1), R_{min} , R, R_{max} , – значення величини активного опору коливального контура R (в порядку зростання значень).

Значення R_{\min} рекомендується узяти в 2 ÷ 10 рази менше, ніж R, а R_{\max} - в 2 ÷ 10 рази більше. В ході досліджень U_{BX} , 1/L(K1) и 1/C(K2) повинні залишатися незмінними.

12. Збережіть перехідні характеристики для трьох значень опору.

13. Дослідіть зміни перехідної характеристики при змінах L і C і зробіть висновки.

14. Звіт повинен містити мету роботи, рисунок початкової структурної моделі, схеми Хсоs, таблицю з результатами, розрахункові формули і графіки перехідних характеристик, а також висновки про проведені дослідження.

Контрольні питання

1. Що називається перехідною характеристикою?

- 2. Що називається імпульсною перехідною характеристикою?
- 3 Що таке "одинична ступінчаста дія"?
- 4. Поясніть зміну перехідної характеристики при зміні *R*.
- 5. Які відмінності між ω и ω_0 ?

Лабораторна робота № 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ПІД-РЕГУЛЯТОРІВ

3.1 Теоретичні відомості

Мета роботи: визначення параметрів налаштування ПІД-регулятора і оцінка якісних показників процесу регулювання.

Передатна функція (ПФ) промислових об'єктів у багатьох випадках з достатньою точністю може бути представлена моделлю другого порядку з запізненням:

$$W_{oy}(s) = \frac{K_{o\delta}e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)},$$
(3.1)

де T₁, T₂ – сталі часу об'єкта управління; *K*_{oб} - коефіцієнт посилення об'єкта управління; τ - час чистого запізнювання.

Модель системи з ПІД-регулятором в загальному вигляді показана на рис. 4.1.



Рисунок 3.1 – Структура моделі системи з регулятором

Передатна функція ПІД-регулятора

$$W_p(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s,$$

де *K_p*, *K_i*, *K_d* – відповідно, налаштувальні коефіцієнти пропорційної, інтегральної і диференціальної складових.

Основною метою використання ПІД-регуляторів є зменшення статичної погрішності. Крім того, підбираючи параметри регуляторів, можна поліпшити показники перехідного процесу – час регулювання і перерегулювання.

Основні параметри, що характеризують перехідний процес, показані на рис. 3.2.



Статична погрішність $\varepsilon_{cT} \in$ різницею між сигналом, що подається на вхід, помноженим на коефіцієнт передачі K_{π} системи з регулятором, і сигналом, що встановилося на

Рисунок 3.2 – Параметри перехідного процесу

виході після закінчення перехідного процесу.

Період коливань T_к – час між однаковими переходами кривої перехідного процесу через лінію, що є паралельною осі абсцис і відповідає встановленому значенню регульованої величини. Визначається тільки у випадку коливального перехідного процесу.

Час регулювання t_p – це час, впродовж якого крива перехідного процесу входить в межі, що визначають точність регулювання. Ці межі встановлюються розробником системи. У цій роботі точність регулювання, тобто максимально допустиме відхилення кривої перехідного процесу, слід задавати не менше ±5% від значення, що встановилося. Таким чином, можна вважати, що перехідний процес закінчився після того, як крива перестала виходити із заданого діапазону.

Перерегулювання σ – це максимальне відхилення у відсотках перехідної характеристики від значення, що встановилося: $\sigma = \frac{\Delta X_{\text{вих}}}{X_{\text{вих ист}}} 100.$

Вплив коефіцієнта інтегральної складової на характери перехідного процесу можна побачити на наступному графіку:



3.2 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Створити Хсоѕ-модель об'єкта управління згідно формули (3.1), розділивши на три ланки, як показано на рис. 3.3. Для ланки запізнення використовуємо блок ТІМЕ_DELAY з бібліотеки «Неперервні динамічні системи».



Рисунок 3.3

2. Введіть чисельники і знаменники передатних функцій ланок, а також час запізнювання за наступною схемою:

Ланка 1	Ланка2	TIME_DELAY
Чисельник К	Чисельник 1	Затримка т
Denominator 1+ T1*s	Denominator 1+ T2*s	

Значення К, Т1, Т2 і τ взяти відповідно до номера варіанту з таблиці 3.1. Таблиця 3.1 – Варіанти завдань

N⁰	K	<i>T1</i>	<i>T2</i>	τ	N⁰	K	<i>T1</i>	T2	τ
1	1,5	10	5	2	14	3,5	14	4	3
2	2,0	15	4	3	15	3,2	11	5	2
3	3,0	17	3	4	16	0,5	16	3	3
4	3,5	18	4	2	17	1,2	15	4	2
5	3,2	12	5	3	18	2,5	14	5	4
6	0,5	13	7	4	19	1,7	16	4	5
7	1,2	14	6	3	20	2,1	17	3	3
8	2,5	11	3	2	21	1,5	14	5	4
9	1,7	18	3	3	22	1,7	16	6	3
10	2,1	12	4	4	23	2,2	11	5	4
11	1,5	13	2	3	24	1,8	14	7	3
12	2,0	12	3	4	25	2,4	10	4	2
13	3,0	17	4	5					

3. Додайте до схеми інші необхідні блоки згідно рис. 3.4. Для джерел ступінчастого сигналу зробіть текстові написи Task (Завдання) і Disturb (Збурення).



Рисунок 3.4 – Хсоз-модель для дослідження системи з ПІД-регулятором

4. Для моделювання ПІД-регулятора використайте блок SUPER_f з бібліотеки «Порт і підсистема». Введіть біля нього текст «PID». Двічи клацніть ЛКМ по цьому блоку. У вікні, що відкрилося, наберіть схему згідно рис. 3.5. Як суматор на три входи використайте блок SUM_f з бібліотеки «Математичні операції».



Рисунок 3.5 – Підсистема ПІД-регулятора

5. Задайте значення параметрів для усіх блоків.

Для блоку Завдання (Task) *Final Value* =1, для блоку збурення (Disturb) *Final Value* =0. Для обох цих блоків *Час сходинки* =0.

У першому суматорі другий вхід зробити від'ємним, тобто параметр *Знаки* задати як [1;-1].

Для годинника: Час вибірки = 0.1.

Для осцилографа:

а) замінити колір другого графіка – у віконці Стилі кривих другу цифру змінити з 3 на 1;

б) нижні границі для графіків *Ymin vector* указати -2 -1, верхні *Ymax vector* 4 2;

в) параметр *Refresh periods* установити як 100 100;

г) параметр *Розмір буфера* = 100;

д) у віконці Назва області 1 - Регулятор, 2 - Об'єкт.

6. Для розрахунку параметрів ПІД-регулятора використати програму TunePID, яку скачати з сайту кафедри за адресою <u>http://citm.ho.ua/Dist/Disc/TunePID2.1.zip</u>.

У програмі вибрати меню «Настройка». Фрагмент вікна, що з'явиться, показаний на рис. 3.6.

Идентификация	Настр	ойка	Адаптация							
🔳 📊 По	нагрузке		- 10							
Выбор типа м	дели объек	та регулиров	вания			Выбор типа	а регулятора			
6	$\overline{(T_1 \cdot s \cdot s)}$	$(T_{1}+1)\cdot (T_{2})$	$(x \cdot e^{-\tau \cdot s})$ $(x \cdot s + 1)$	$\cdot (T_3 \cdot s -$	+1)	2	1	$K_p + \frac{K_p}{T_I \cdot}$	$\frac{1}{s} + K_p \cdot T_D \cdot s$	
Параметры м	дели объек	та регулиров	вания			Параметрь	и настройки р	егулятора		
K	T_1	T_2	T_3	τ		K_p	T_I	T_D		
0	0	0	0	0	2	0	0	0		

Рисунок 3.6

У віконечку «Выбор типа модели объекта регулирования» вибрати тип 6 (як показано на рис. 3.6), у віконечку «Выбор типа регулятора» тип 2. У віконечку «Параметры модели объекта регулирования» введіть дані з табл. 3.1, залишивши значення Т₃ нульовим.

Натисніть кнопку (Начать настройку). У віконечку «Параметри настройки регулятора» зчитайте значення К_Р, Т_I, Т_D.

7. Занесіть одержані параметри в модель ПІД-регулятора.

TunePID знаходить налаштування для регулятора, що має наступну передатну функцію:

$$W_p(s) = K_P + \frac{K_P}{T_I s} + K_P T_D s,$$

Відкриваємо вікно підсистеми PID (рис. 3.5) і для блоків GAIN_f заносимо такі значення параметра *Підсилювання*:

а) у підсилювач Кр значення К_Р;

б) у підсилювач Кі значення К_Р/Т_І;

в) у підсилювач Kd значення K_P*T_D.

8. У вікні налаштувань моделі указуємо значення Загальний час інтегрування = 100. При необхідності цей час можна змінити.

9. Виконайте моделювання. Після закінчення треба обробити осцилограми для розрахунку параметрів перехідного процесу:

a) у вікні консолі Scilab введіть команду **xgrid** для нанесення сітки на графік;

б) розширити вікно графіків на весь екран;

в) у вікні графіків натиснути кнопку 🧟 («Підібрати за вмістом») для найкращого масштабування зображення;

в) натиснути кнопку 🖾 («Увімкнути режим підписів»);

г) щоб отримати координати точок графіку клацніть ЛКМ у потрібному місці; щоб прибрати координати, клацніть ПКМ;

д) занести результати в табл. 3.2.

Таблиця 3.2

X _{bx}	Хуст	ΔX	Ест	Тк	tp	σ, %	Характер перехідного процесу

10. Переведіть модель у режим відпрацювання збурення. Для цього у блоці Task установіть *Final Value* =0, а для у блоці Disturb *Final Value* =1. Виконайте моделювання і поясніть зміну вигляду осцилограм.

11. Звіт повинен містити мету роботи, рисунок початкової структури моделі, схеми XCOS, таблицю з результатами, розрахункові формули і графіки перехідних характеристик, а також висновки про проведені дослідження.

Контрольні питання

1. Яка мета використання регуляторів в САУ?

2. Які основні параметри перехідного процесу?

3. Як зміниться час регулювання t_p , якщо збільшити точність вимог до регулювання до ±1 %?

4. Що називається статичною погрішністю?

5. Як створити підсистему?

Лабораторна робота № 4 ДИСКРЕТНІ ДИНАМІЧНІ СИСТЕМИ

Мета роботи: дослідження динаміки дискретних систем

4.1 Теоретичні відомості

Для дискретних систем замість диференціальних рівнянь використовуються різницеві рівняння наступного вигляду:

 $a_0y[k] + a_1y[k-1] + \dots + a_ny[k-n] = b_0u[k] + b_1u[k-1] + \dots + b_mu[k-m].$

Якщо при дослідженнях неперервних систем до диференціальних рівнянь застосовується перетворення Лапласа, то для різницевих рівнянь використовується z-перетворення:

$$a_0Y(z) + a_1z^{-1}Y(z) + ... + a_nz^{-n}Y(z) = b_0X(z) + b_1z^{-1}X(z) + ... + b_mz^{-m}U(z).$$

Вираз z^{-i} трактується як оператор зсуву на *i* періодів дискретизації, тобто операції $f(k)\cdot z^{-i}$ відповідає взяття відліку f(k-i).

Відношення *z*-перетворення виходу до *z*-перетворення входу дає вираз для дискретної передатної функції:

$$W(z) = \frac{Y(z)}{U(z)} = \frac{b_0 + b_1 z^{-1} + \dots + b_m z^{-m}}{a_0 + a_1 z^{-1} + \dots + a_n z^{-n}}.$$

Розглянемо різницеве рівняння другого порядку, приведене до наступного вигляду діленням на коефіцієнт при y[k]:

$$y[k] + a_1 y[k-1] + a_0 y[k-2] = b_2 u[k] + b_1 u[k-1] + b_0 u[k-2].$$
(4.1)

Розв'яжемо його відносно поточного відліку y[k]:

$$y[k] = b_2 u[k] + b_1 u[k-1] + b_0 u[k-2] - a_1 y[k-1] - a_0 y[k-2].$$

Це рекурсивне рівняння дозволяє розрахувати поточне значення виходу по поточному значенню входу x[k] і попередніх значеннях входу і виходу.

Пристрій або програму, що реалізує такий рекурсивний алгоритм, називають цифровим фільтром. Фільтр обробляє деякий оцифрований сигнал у вигляді послідовності чисел. За вхідною послідовністю значень $\{u[k]\}$ фільтр будує вихідну послідовність $\{y[k]\}$:



Виконавши *z*-перетворення до рівняння (4.1), отримаємо:

$$(l+a_1z^{-l}+a_0z^{-2})Y(z) = (b_2+b_1z^{-l}+b_0z^{-2}) U(z).$$

Передатна функція фільтра:

$$W(z) = \frac{b_2 + b_1 z^{-1} + b_0 z^{-2}}{1 + a_1 z^{-1} + a_0 z^{-2}}.$$

Цей вираз можна привести до звичного вигляду, помноживши чисельник і знаменник на *z*²:

$$W(z) = \frac{b_2 z^2 + b_1 z + b_0}{z^2 + a_1 z + a_0}$$

У Scilab цифровий фільтр можна задати функцією syslin, першим аргументом якої ставиться символ 'd', наприклад:

```
--> b0=2; b1=3; b2=4; a0=3; a1=2;

--> sys = syslin('d', b2*%z^2+b1*%z+b0, %z^2+a1*%z+a0)

sys =

2 +3z +4z^2

------

3 +2z +z^2
```

Реакція системи на вхідний сигнал и розраховується функцією flts(u,sys).

Щоб задати *одиничний імпульсний* сигнал, створюється масив, перший елемент якого є рівним одиниці, в усі інші – нулю. Для цього виконуються команди:

```
--> t = [0:15];
--> xImp = zeros(t);
--> xImp(1) = 1;
```

Одиничний ступінчастий сигнал будується простіше – всі його значення дорівнюють 1, використовується функція **ones**:

```
--> t = [0:15]
```

```
--> xStep = ones(t)
```

Для побудови дискретного графіка використовується команда plot2d2: --> plot2d2(t,flts(xStep,sys))

Для моделювання цифрового фільтра в Хсоѕ використовується блок **DLR** (бібліотека «Дискретні динамічні системи»). У властивостях блоку потрібно ввести *Чисельник (z)* і *Denominator (z)* передатної функції фільтра. Крок дискретизації задається годинником **CLOCK_c** (параметр *Період*)..

Дискретизація неперервних сигналів здійснюється блоком **SAMPHOLD_m** з бібліотеки «Дискретні динамічні системи».

Дискретна модель у просторі станів представляється системою матричних різницевих рівнянь:

```
\begin{cases} \mathbf{x}[k+1] = \mathbf{A}\mathbf{x}[k] + \mathbf{B}\mathbf{u}[k]; \\ \mathbf{y}[k] = \mathbf{C}\mathbf{x}[k] + \mathbf{D}\mathbf{u}[k], \end{cases}
```

де x[k] – вектор дискретних змінних стану;

 $\mathbf{u}[k]$ – вектор дискретних змінних управління;

 $\mathbf{y}[k]$ – вектор дискретних виходів;

А, В, С, D – матриці коефіцієнтів.

Для прикладу розглянемо систему другого порядку з одним виходом. Матриці будуть виглядати так:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} \\ a_{21} & a_{22} \end{bmatrix}, \ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} b_1 \\ b_2 \end{bmatrix}, \ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} c_1 & c_2 \end{bmatrix}, \ \mathbf{D} = d.$$

Різницеві рівняння моделі:

$$\begin{aligned} x_1[k+1] &= a_{11} \cdot x_1[k] + a_{12} \cdot x_2[k] + b_1 \cdot u[k]; \\ x_2[k+1] &= a_{21} \cdot x_1[k] + a_{22} \cdot x_2[k] + b_2 \cdot u[k]; \\ y[k] &= c_1 \cdot x_1[k] + c_2 \cdot x_2[k] + d \cdot u[k]. \end{aligned}$$

Для створення системи у просторі станів (ss-моделі) в Хсоѕ використовується блок **DLSS** (бібліотека «Дискретні динамічні системи»).

Результати Хсоз-моделювання можна передавати в робочий простір Scilab, використовуючи блоки **TOWS_c** (бібліотека «Пристрої реєстрації»). В налаштуваннях такого блока указується ім'я структури, яка несе інформацію про той чи інший сигнал Хсоз-моделі. Структура містить два поля: вектор моментів часу і вектор відліків сигналу у ці моменти. Наприклад, якщо в налаштуваннях блоку указане ім'я A, то в командах консолі чи в сценаріях можна використовувати ці вектори наступним чином:

--> plot2d2 (A.time, A.values)

4.2 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Необхідно побудувати передатну функцію за різницевим рівнянням цифрового фільтра:

 $y[k] = n2 \cdot x[k] + n1 \cdot x[k-1] + n0 \cdot x[k-2] - d1 \cdot y[k-1] - d0 \cdot y[k-2]$

Коефіцієнти моделі брати із таблиці 4.1.

2. Вводимо числові дані згідно варіанту:

```
--> n2=2.7, n1=-1.6, n0=-0.3, d1=-0.8, d0=0.12
```

3. Створюємо цифровий фільтр:

--> num=n2*%z^2+n1*%z+n0

```
--> den=%z^2+d1*%z+d0
```

--> F=syslin('d',num,den)

4. Створюємо вхідний ступінчастий сигнал:

```
--> t = [0:15]
```

```
--> xStep = ones(t)
```

5. Будуємо перехідну характеристику:

--> plot2d2(t,flts(xStep,F))

6. Створимо Хсоѕ-модель для дослідження фільтра. Використовуємо блок **DLR** з бібліотеки «Дискретні динамічні системи». У вікні налаштування блока **DLR** для параметра *Чисельник* указуємо ім'я num, для параметра *Denominator* – den. Їх значення, розраховані раніше, будуть перенесені в Хсоѕ-модель. Щоб

задати інтервал дискретизації, використовуємо блок **CLOCK_с**, в налаштуваннях якого указуємо *Період* 1, *Час ініціалізації* 0. Збираємо схему згідно рис. 4.1.

Варіант	n_2	n_1	n_0	d_1	d_0	a_1	<i>a</i> ₂	c_1	<i>C</i> ₂
1	2.7	-1.6	-0.3	-0.8	0.12	0.74	-0.33	0.30	0.33
2	1.3	-1.6	2.2	-0.9	0.14	0.74	-0.33	0.39	0.42
3	1.0	3.0	-0.2	-1.0	0.16	0.80	-0.41	0.42	0.31
4	1.8	2.6	-0.4	-1.1	0.18	0.74	-0.27	0.29	0.30
5	2.1	-2.6	0.0	-0.7	0.10	0.40	-0.20	0.49	0.18
6	3.0	-1.7	0.4	-0.6	0.08	0.76	-0.27	0.31	0.20
7	1.2	-2.4	1.7	-0.5	0.06	0.74	-0.40	0.38	0.44
8	2.0	0.1	-1.0	-0.3	0.02	0.82	-0.45	0.47	0.36
9	2.7	1.4	-2.5	-0.2	-0.03	0.74	-0.37	0.43	0.48
10	2.9	2.9	-2.5	-0.1	-0.06	0.88	-0.61	0.47	0.40
11	2.6	1.3	2.3	0.0	-0.09	0.75	-0.22	0.39	0.23
12	1.8	-1.9	-2.7	0.1	-0.12	0.76	-0.30	0.48	0.32
13	1.7	2.8	-1.6	0.2	-0.15	0.75	-0.45	0.24	0.29
14	1.5	0.0	-1.3	0.3	-0.18	0.80	-0.41	0.42	0.31
15	1.6	1.3	-1.9	0.4	-0.21	0.74	-0.15	0.54	0.29
16	1.9	-0.7	-0.4	0.5	-0.24	0.86	-0.55	0.42	0.34
17	1.5	-2.8	-1.4	0.6	-0.27	0.74	-0.30	0.49	0.51
18	2.1	-0.5	-0.9	-0.5	0.04	0.76	-0.55	0.19	0.24
19	1.7	-3.0	0.0	-0.7	0.12	0.75	-0.25	0.37	0.23
20	1.8	2.4	-1.1	-0.9	0.20	0.76	-0.27	0.53	0.34

Таблиця 4.1



Рисунок 4.1 – Хсоя-модель для дослідження цифрового фільтра

Для генератора ступінчастого сигналу указуємо *Час сходинки* рівний нулю. В налаштуваннях осцилографа параметри *Ymin*, *Ymax* указуємо такі, як на осі ординат графіка, отриманого згідно п. 5. Параметр *Період оновлення* вибираємо рівним 16. Для отримання красивої картинки *Час вибірки* у годиннику зменшуємо до 0.01.

У меню «Моделювання» вибираємо опцію «Налаштування» і встановлюємо Загальний час інтегрування рівним 15 с. Запускаємо модель і порівнюємо графік перехідної характеристики з раніше отриманим графіком. 7. Створимо модель у просторі станів другого порядку яка описується системою рівнянь:

 $x_1[k+1] = a_1 \cdot x_1[k] + a_2 \cdot x_2[k] + u[k];$ $x_2[k+1] = x_1[k];$ $y[k] = c_1 \cdot x_1[k] + c_2 \cdot x_2[k].$ Уводимо значення елементів матриць A і C згідно варіанту з таблиці: --> a1=0.74, a2=-0.33, c1=0.3, c2= 0.33

Як витікає з вигляду рівнянь, перший рядок матриці А містить два елементи: a1 і a2, другий рядок містить коефіцієнт 1 для змінної стану $x_1[k]$ і коефіцієнт 0 для змінної стану $x_2[k]$. Створюємо матрицю:

--> A=[a1 a2; 1 0] A = 0.74 -0.33 1. 0. Матриця C складається з двох елементів: --> C=[c1 c2]

C =

```
0.3 0.33
```

Матриця **В** повинна містити коефіцієнти при u[k]. У заданих рівняннях у першому цей коефіцієнт є рівним 1, у другому рівнянні сигнал управління u[k] відсутній, тож другий коефіцієнт є рівним 0:

--> B=[1; 0] B =

1.

0.

Матриці **D** в заданій системі різницевих рівнянь немає:

--> D=0 D =

0.

Для заданої системи створюємо модель у просторі станів:

--> G = syslin('d', A, B, C, D)

8. Створимо чисельник і знаменник передатної функції регулятора (однакові для всіх варіантів):

 $\begin{array}{rcl} --> & nC &=& 0.97 \\ + & sz \\ --> & dC &=& sz \\ + & 0.46 \end{array}$

9 Побудуємо Хсоѕ-модель, як на рис. 4.2. Для моделі у просторі станів використовуємо блок **DLSS**, для регулятора блок **DLR**. Обидва блоки беремо з бібліотеки «Дискретні динамічні системи». Результати моделювання будемо передавати у робочий простір Scilab через блоки **TOWS_c** (бібліотека «Пристрої реєстрації»).

10. Коректуємо налаштування блоків. Для блока **STEP_FUNCTION** *Час сходинки* виставляємо рівним нулю. У блоці **DLR** для параметра *Чисельник* указуємо nC, для *Denominator* – відповідно, dC (переносяться з робочого простору Scilab). У параметрах ss-моделі вводимо імена матриць A, B, C, D, для *Initial State* указуємо вектор початкових значень змінних стану [0 0].

Верхній блок **TOWS_с** експортує вихідну величину модельованої системи, у його параметрах для *Sclab variable name* вводимо ім'я **out**, *Розмір буфера* указуємо рівним 15 відліків. Нижній блок передає у Scilab сигнал управління **u**, це ім'я треба указати в параметрах блоку.



Рисунок 4.2 – Хсоѕ-модель дослідження дискретної системи

Як і для схеми на рис. 4.1, в налаштуваннях блоку **CLOCK_с** указуємо *Період* 1, *Час ініціалізації* 0.

Установлюємо час моделювання рівним 15 с і запускаємо модель.

11. У редакторі Scinote створимо сценарій для побудови графіків результатів моделювання:

```
close (winsid())
subplot(2,1,1)
plot2d2(u.time,u.values)
xgrid
title('Керуючий сигнал регулятора')
subplot(2,1,2)
plot2d2(out.time,out.values)
xgrid
title('Вихідна величина')
```

Натискуємо клавішу F5 клавіатури і одержуємо графіки.

12. Розрахуємо параметри перехідного процесу модельованої системи, використовуючи методи, описані в Лабораторній роботі 3. Обробляємо перехідну характеристику, яка представлена вектором out.values. Вважаємо останній елемент цього вектора out.values(\$) значенням, що встановилось.

Для розрахунку перегулювання набираємо у консолі:

--> σ = 100*(max(out.values)-out.values(\$))/out.values(\$)
σ =

147.14883

Тобто перерегулювання становить 147 %.

Час перехідного процесу знайдемо як момент, коли перехідна характеристика зайде у коридор 5 %:

```
--> err = abs(out.values-out.values($));
--> h = find(err >= 0.05*out.values($))
--> set time = out.time(max(h)+1)
```

```
set_time =
  6.
   .
```

Час перехідного процесу 6 с.

Контрольні питання

1. Як побудувати передатну функцію по різницевому рівнянню?

2. Як знайти реакцію системи на відомий вхідний сигнал по різницевому рівнянню?

3. Як визначити порядок системи за моделлю у просторі станів?

4. Як результати Хсоѕ-моделювання передаються у робочий простір Scilab?

5. Як вибрати період спрацьовування таймера під час моделювання дискретних систем в Scilab?

Лабораторна робота № 5 ДИСКРЕТИЗАЦІЯ АНАЛОГОВИХ РЕГУЛЯТОРІВ

Мета роботи: набуття навиків виконання дискретизації неперервних динамічних систем

5.1 Теоретичні відомості

Передатну функцію аналогового ПІД-регулятора представляють в одній з форм:

а) стандартній

$$W(s) = K_{P} (1 + \frac{1}{T_{I} + 1} + T_{D} s),$$

де *Кр*, *T_I*, *T_D* – коефіцієнт передачі регулятора, сталі часу інтеграції і диференціювання;

б) паралельній

$$W(s) = K_P + K_I \frac{1}{s} + K_D s,$$

де *Кр, К_L, К_D* – коефіцієнти передачі пропорційної, інтегральної і диференціальної складових;

в) послідовній

$$C(s) = k_c \frac{(1+T_I s)}{T_I s} (T_D s + 1).$$

Регулятори, що реалізують ці передатні функції, мають суттєву ваду: вони посилюють високочастотні шуми і завади. Це пояснюється тим, що при диференціюванні синусоїдального сигналу Asin(ωt) диференціальна складова дає на виході Aωcos(ωt), тобто амплітуда на виході збільшується в ω разів.

Щоб послабити таку негативну дію, від сигналу, що подається на диференціальну складову, відфільтровують високочастотні коливання. У диференціальну гілку регулятора включають фільтр низьких частот першого порядку:

$$\frac{1}{\frac{T_d}{N}s+1},$$

де N задає граничну частоту фільтра і вибирається в межах від 2 до 20.

У паралельній формі передатну функцію ПІД-регулятора з фільтром представляють наступним чином:

$$C(s) = K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{NK_d}{1 + N/s}.$$
(5.1)

Дискретизація — перетворення функцій неперервних змінних у функції дискретних змінних, за якими початкові неперервні функції можуть бути відновлені із заданою точністю.

Розглянемо інтегратор, який інтегрує сигнал x(t):

$$y\left(t
ight) =\int_{0}^{t}x\left(au
ight) d au.$$

Для дискретизації інтегратора треба замінити таке рівняння різницевим. Це можна виконати кількома методами.

Метод Ейлера припускає, що площу під кривою функції x(t) можна замінити прямокутниками, як показано на рис. 5.1.



Рисунок 5.1 – Ілюстрація методу Ейлера

Тоді приріст інтегралу на (k+1)-ій ділянці оцінюється площею T·x[k], де T – крок дискретизації. Тобто:

$$y[k+1] \approx y[k] + T \cdot x[k].$$

Перехід від *k*-го до (*k*+1)-го кроку є зсувом вперед у часі. При виконанні z-перетворення такому зсуву відповідає множення на оператор *z*: y[k+1] = zy[k]. Підставивши це у попередній вираз, після елементарних перетворень маємо:

$$(z-1)y[k] \approx T \cdot x[k].$$

Дискретна передатна функція:

$$rac{y\left[k
ight]}{x\left[k
ight]}=rac{T}{z-1}.$$

Неперервна передатна функція інтегратора 1/s замінюється дискретною T/(z-1).Таким чином, дискретизація за методом Ейлера зводиться до заміни в передатній функції W оператора *s* на (z-1)/T. У Scilab це можна виконати наступною командою:

--> WEuler = horner(W, (\$z-1)/T)

Більш точним є метод Тастина, згідно якого для оцінки площі під кривою використовуються трапеції (рис. 5.2).



Рисунок 5.2 – Ілюстрація методу Тастина

Площа трапеції є рівною півсумі основ, помноженій на висоту. Таким чином:

$$y[k+1] \approx y[k] + 0.5T \cdot (x[k+1]+x[k]).$$

Виконавши такі ж перетворення, як і для методу Ейлера, приходимо до висновку, що для дискретизації за Тастином треба в передатній функції неперервної системи виконати заміну оператора *s* на

$$rac{2}{T}rac{z-1}{z+1}$$
 .

У Scilab:

--> WTustin = horner(W, 2*(%z-1)/(%z+1)/T)

Третій метод дискретизації – це метод фіктивного квантування, коли вході та виході системи, що дискретизується, встановлюються фіктивні (неіснуючі) імпульсні елементи. У Scilab для цього використовується функція dscr(W, T), де другим аргументом є крок дискретизації.

У цій лабораторній роботі треба виконати дискретизацію ПІД-регулятора, який керує об'єктом з передатною функцією:

$$P(s) = \frac{K}{(T_s s + 1)s}.$$
 (5.2)

Регулятор повинен забезпечити наступні характеристики якості регулювання:

а) час перехідного процесу не більше T_{nn} ;

б) показник коливальності не більше М.

Показник коливальності *М* визначається як відношення максимального значення амплітудно-частотної характеристики (модуля АФЧХ) до її значення при нульовій частоті ω =0 (початкової координати)

Враховуючи період вибірки *T*, інтегральний член *Ki/s* передатної функції (5.1) може бути представлений у дискретному вигляді так:

а) за методом Ейлера:

$$\frac{K_iT}{z-1};$$

б) за методом Тастина:

$$\frac{K_iT}{2}\frac{(z+1)}{(z-1)}$$

Аналогічно, диференціальний член у (5.1) може бути дискретизований так:

а) за методом Ейлера:

$$\frac{N}{1+NT/(z-1)} = \frac{N(z-1)}{z-1+NT};$$

б) за методом Тастина:

$$\frac{N}{1+NT(z+1)/2(z-1)} = \frac{N(z-1)}{(1+NT/2)z+NT/2-1}$$

Передатна функція:

а) за методом Ейлера:

$$C(z) = K_{p} + \frac{K_{i}T}{z-1} + \frac{K_{d}N(z-1)}{z-1+NT};$$

б) за методом Тастина:

$$C(z) = K_p + \frac{K_i T}{2} \frac{(z+1)}{(z-1)} + \frac{K_d N(z-1)}{(1+NT/2)z + NT/2 - 1}.$$

5.2 Порядок виконання лабораторної роботи

1. У консолі Scilab вводимо вихідні дані згідно варіанту з табл. 5.1: --> K=0.06; To=16; Tnn=15; M=1.1;

Варі- ант	K	Т,, с	T_{nn}, c	М	Варі- ант	K	T_s , c	T_{nn}, c	М
1	0,06	16	15	1,1	11	0,06	12	17	1,1
2	0,07	18	17	1,2	12	0,05	14	15	1,2
3	0,06	20	20	1,3	13	0,04	17	18	1,3
4	0,05	22	22	1,2	14	0,05	15	20	1,2
5	0,07	20	25	1,1	15	0,06	12	22	1,1
6	0,05	16	28	1,2	16	0,07	10	17	1,2
7	0,06	18	30	1,3	17	0,06	12	15	1,3
8	0,07	15	26	1,1	18	0,05	15	19	1,1
9	0,08	12	23	1,3	19	0,06	18	15	1,2
10	0,07	10	19	1,2	20	0,064	18,2	25	1,03

2. Створимо неперервну передатну функцію об'єкта згідно формули (5.2): --> Ps=syslin('c', К, (To*%s+1)*%s)

Ps = 0.06 ----s +16s^2

3. Для розрахунку параметрів ПІД-регулятора використаємо програму TunePID (див. розділ 3).

У цій програмі вибрати меню «Настройка». У віконечку «Выбор типа модели объекта регулирования» вибрати тип 2, у віконечку «Выбор типа регулятора» тип 2. У віконечку «Параметры модели объекта регулирования» введіть дані з табл. 5.1, залишивши значення т нульовим.

Натисніть кнопку (Начать настройку). У віконечку «Параметри настройки регулятора» зчитайте значення K_P, T_I, T_D і введіть їх у консолі Scilab: --> Kp=52.357; Ti=5.275; Td=10.595;

```
4. Коефіцієнти для стандартної форми ПФ регулятора:
--> Ki=Kp/Ti, Kd=Kp*Td
    5. Створимо передатну функцію регулятора у Scilab:
--> s=poly(0,'s');
--> C=syslin('c',Kp + Ki/s + Kd*s)
 C =
   9.9254976 +52.357s +554.72242s^2
                     S
    6. Передатна функція замкнутої системи
    --> W = C * P_S /.1
     W =
       0.5955299 +3.14142s +33.283345s^2
      _____
      0.5955299 +3.14142s +34.283345s^2 +16s^3
    7. Перехідна характеристика
--> t=0:30; // вектор часу
--> global v0;
--> y0=csim("step",t,W); // відгук системи
--> plot(t,y0)
    8. Розраховуємо час перехідного процесу T_{nn} як момент входження у ко-
ридор 1 % (див. розділ 4):
--> err = abs(y0 - y0($));
--> h = find(err >= 0.01*y0($));
--> set time = t(max(h)+1)
 set time
            =
   41.
    9. Визначаємо амплітудно-частотну характеристику системи:
```

```
--> ω = logspace(-2,2,100);// логарифмічний вектор частот
--> fResp = repfreq(W, ω/(2*%pi)); // ΑΦЧΧ
--> Aw = abs(fResp); // ΑЧΧ
```

11. Оцінюємо відповідність параметрів перехідного процесу T_{nn} і M заданим у табл. 5.1 значенням.

12. Створюємо і виконуємо сценарій для введення даних, які будуть використані в Хсоѕ-моделі:

```
N=20; // параметр фільтра диференціатора
Ts = 0.1; // крок дискретизації
z = poly(0,'z');
// Метод Ейлера
Inumz = Ts; //
Idenz = z-1;//
Dnumz = N*(z - 1);//
Ddenz = (z-1+N*Ts);//
//
//
// Метод Тастина
//Inumz = Ts*(z+1);
//Idenz = 2*(z-1);
//Dnumz = N*(z - 1);
//Ddenz = (1+0.5*N*Ts)*z + 0.5*N*Ts -1;
```

У цьому сценарії оператори для розрахунку даних за методом Тастина за-коментовані і поки що не використовуються.

13. Будуємо Хсоѕ-модель згідно рис. 5.3 для порівняння аналогового і дискретного регуляторів.

У аналоговому регуляторі в диференціальній частині використовуємо блок CLR з бібліотеки «Неперервні динамічні системи». Для моделювання передатних функцій інтегральної I(z) і диференціальної D(z) частин дискретного регулятора вводимо блоки DLR з бібліотеки «Дискретні динамічні системи».

У налаштуваннях блоків установлюємо:

```
а) джерело ступінчастого сигналу:
Час сходинки 1;
Final Value рівним номеру варіанту;
б) блок CLOCK_c:
Період 0.1;
Час ініціалізації 0.1;
в) годинник SampleCLK:
Час вибірки 0.01;
г) осцилограф:
Стилі кривих 1 1 3 ...;
Ymin vector 0 0;
Ymax vector двічі указати номер варіанту, помножений на 1.2;
Refresh periods 50 50 (підбирається для кращого вигляду графіків).
```



Рисунок 5.3 – Хсоз-модель

14. У меню «Моделювання—Налаштування» вводимо 50 (значення, аналогічне параметру *Refresh periods* осцилографа. Запускаємо модель і отримуємо графіки перехідних процесів.

15. У сценарії ведення даних Хсоѕ-моделі закоментовуємо оператори, що стосуються методу Ейлера, і звільняємо від символів коментарів «//» оператори з розділу «Метод Тастина». Виконуємо сценарій і запускаємо модель.

16. Порівняти графіки, отримані з використанням методів Ейлера і Тастина.

17. Звіт повинен містити мету роботи, схему Хсоѕ-моделі, лістинг команд консолі, графіки і висновки.

Контрольні питання

1. Як відбувається дискретизація за методом Ейлера?

2. Як відбувається дискретизація за методом Тастина?

3. Як змінити диференціальну частину ПІД-регулятора, щоб позбутись негативного впливу високочастотних завад?

4. Як розраховуються параметри перехідного процесу T_{nn} і M?

5. З якою метою в моделі використовується блок блок CLOCK_c?

Лабораторна робота № 6 АВТОМАТИЗОВАНА СИСТЕМА РЕГУЛЮВАННЯ РІВНЯ ВОДИ У ПАРОГЕНЕРАТОРІ

Мета роботи: моделювання процесів в парогенераторі, дослідження відпрацювання збурень.

3.1 Теоретичні відомості

Парогенератор (ПГ) – теплообмінний апарат для виробництва водяної пари з тиском вище атмосферного за рахунок теплоти первинного теплоносія. Побудова парогенератора показана на рис. 6.1.



Рисунок 6.1 – Побудова парогенератора

Регулювання живлення в парогенераторі зводиться до підтримки матеріального балансу між відведенням пари і поданням живильної води. Параметром, що характеризує матеріальний баланс, є рівень води в ПГ.

До стабілізації рівня пред'являються досить жорсткі вимоги. Точність підтримки рівня в статичних режимах становить ± 50 мм від номінального рівня L_{ном}, в динаміці ± 150 мм від L_{ном} (з урахуванням нечутливості регулятора). Підвищення рівня води від L_{ном} не допускається через затоплення та порушення роботи сепараційних пристроїв (закидання води в турбіну), а зниження рівня – через оголення поверхні нагріву.

Збурюючими стосовно рівня впливами є:

- витрата пари (навантаження на ПГ);
- зміна витрати живильної води;
- зміна температури живильної води.
- 33

При збуренні витратою пари проявляється явно виражене "набухання" рівня води, тобто. зміна його в початкові моменти часу в сторону, що не відповідає знаку впливу, що збурює. Явище "набухання" можна пояснити так. При зміні витрати пари, наприклад збільшенні, тиск у парогенераторі зменшується, відбувається додаткове закипання води, збільшення рівня. Надалі рівень води починає падати, оскільки витрата пари збільшилася, а витрата живильної води залишилася незмінною.

Розглянуті динамічні властивості парогенератора є украй несприятливими з погляду стабілізації рівня води. Цим пояснюється те що, що для автоматичного регулювання рівня води не придатні звичайні одноконтурні системи регулювання.

Застосування пропорційно-інтегрального (ПІ) закону регулювання для астатичного об'єкта з явищем "набухання" не забезпечує необхідної якості регулювання (тривалі слабозатухаючі коливання рівня при ступінчастому вхідному збуренні). Інтегральний закон також дає погану стійкість системи. Пропорційний закон не допустимо використовувати через статичну помилку регулювання. Тому для регулювання рівня води в парогенераторі застосовують комбіновану ACP: регулювання за відхиленням з П-регулятором і контуром інваріантності за основним впливом, що збурює, – витратою пари.

Двоконтурна схема регулювання не застосовується з таких причин:

- витрата поживної води через регулюючий живильний клапан залежить не тільки від положення клапана, але й від перепаду тиску на ньому, який може змінюватися в процесі експлуатації;

- в дифманометрах-витратомірах вихідний сигнал пропорційний кореню квадратному з числа перепаду тиску.

Зазначені недоліки двоконтурної САР усуваються введенням у регулятор третього імпульсу щодо витрати живильної води від дифманометравитратоміра. Така трьохімпульсна САР зображена на рис. 6.2.



Рисунок 6.2 – Трьохімпульсна САР

Сигнали з витрати пари та поживної води вводяться в регулятор із протилежними знаками. У сталому стані ці сигнали рівні, протилежні за знаком, і, отже, компенсують один одного. Сигнал за рівнем води в парогенераторі компенсується сигналом завдання. При зміні витрати пари миттєво змінюється відповідний сигнал на вході в регулятор і останній пропорційно змінює витрату живильної води, не чекаючи зміни рівня.

У регуляторі використовується ПІ-закон регулювання, проте внаслідок введення в регулятор практично безінерційного негативного зворотного зв'язку за витратою поживної води в ньому реалізується П-закон регулювання (аналогія жорсткого зворотного зв'язку за становищем регулюючого органу). Статична нерівномірність П-регулятора усувається коригуючим сигналом щодо витрати пари.

Експериментальним шляхом були отримані розгінні криві парогенератора за рівнем води при подачі на нього збурень витратою живильної води та витратою пари (рис. 6.3, 6.4).



Дані властивості парогенератора можна описати сумою передатних функцій інерційної та інтегральної ланок, а коефіцієнти визначити експертнодослідним шляхом за допомогою комп'ютерних систем моделювання. Структурна схема моделі представлена на рис. 6.5.



Рисунок 6.5 – Модель парогенератора

Рівень води в парогенераторі вимірюється датчиком типу Сапфір-22ДД з вихідним струмовим сигналом 4–20 мА, статична характеристика рівнеміра наведена на рис. 6.6, а). Витрата води вимірюється по перепаду тиску на звужуючому пристрої типу "діафрагма" датчиком Сапфір-22ДД з вихідним струмовим сигналом 4–20 мА, статична характеристика витратоміра наведена на рис. 6.6, б). Витрата пари оцінюється по температурі і тиску в трубопроводі. Сигнал витрати пари подається у вигляді нормованого струмового сигналу 4–20 мА.



Рисунок 6.6

Таким чином, вимірювальні перетворювачі можна описати передавальними функціями пропорційних ланок з коефіцієнтами передачі, які дорівнюють:

- 16 мА/м – для вимірювання рівня води в парогенераторі;

- 0,0288 мА/(кг/с) – для вимірювання витрат поживної води та пари відповідно.

Регулювання рівня води здійснюється шляхом зміни витрати поживної води через регулюючий орган (PB), який здійснює регулювання у межах 0...100 %. Позиціонер управляє приводом електродвигуна постійного струму регулюючого живильного клапана. На позиціонер надходить сигнал завдання відкриття клапана у вигляді нормованого струмового сигналу 4–20 мА. Максимальна швидкість переміщення штока становить 5 %/с.

Витратна характеристика регулюючого живильного клапана наведена на рис. 6.7.



Як видно, витратна характеристика клапана близька до лінійної. Таким чином, для моделювання витрати поживної води через клапан по каналу "степінь відкриття (%) – витрата на клапані (кг/с)" можна описати пропорційною ланкою з коефіцієнтом пропорціональності $K_{po} = 6,67$ (кг/с) /%.

На вхід ланки повинен подаватися сигнал положення штока у відсотках ходу регулюючого органу.

Трубопровід від клапана до парогенератора моделюється інерціальною ланкою першого порядку з коефіцієнтом передачі $K_{rp} = 1$ і сталою часу $T_{rp} = 2$ с.

6.2 Порядок виконання лабораторної роботи

1. Створити Хсоѕ-модель парогенератора згідно рис. 6.8. Для завдання збурень використайте блоки CONST_m (з бібліотеки «Джерела сигналів»).



Рисунок 6.8

2. Виконайте моделювання на протязі 200 с. Порівняйте осцилограму з рис. 6.3.

3. Установити збурення по парі 100 кг/с, а по воді 0 кг/с і повторити моделювання. Порівняйте осцилограму з рис. 6.4.

4. Задайте початкові параметри моделювання згідно варіанту табл. 6.1: --> Dw=510; tw=350; Ds=100; ts=650; L=1.1;

Таблиця 6.1

Варіант	D_w	t_w	D_s	t_s	L	Варіант	D_w	t_w	D_s	t_s	L
1	510	350	100	650	1.1	13	0,333	0,2	3	0,5	2.3
2	100	650	510	350	1.2	14	0,25	0,1	4	0,4	2.4
3	620	350	120	650	1.3	15	0,2	0,3	5	0,3	2.5
4	120	650	620	350	1.4	16	0,167	0,1	6	0,2	2.6
5	400	350	200	650	1.5	17	0,143	0,2	7	0,1	2.7
6	200	650	400	350	1.6	18	0,125	0,4	8	0,2	2.8
7	450	350	150	650	1.7	19	0,5	0,5	2	0,3	2.9
8	150	650	450	350	1.8	20	0,2	0,1	5	0,4	0.5
9	500	350	210	650	1.9	21	0,1	0,2	10	0,3	0.6
10	210	650	500	350	2.0	22	0,2	0,3	5	0,6	0.7
11	600	350	200	300	2.1	23	0,25	0,4	4	0,2	0.8
12	200	650	600	350	2.2	24	0,333	0,5	3	0,4	0.9

Тут позначені:

*D*_w – збурення по воді, кг/с;

*t*_w – момент дії збурення по воді, с;

- D_s збурення по парі, кг/с;
- *t*_s момент дії збурення по парі, с;
- *L* завдання по рівню, м.

5. Створити Хсоѕ-модель системи регулювання згідно рис. 6.9.



Рисунок 6.9

6. Хсоя-модель системи повинна містити три підсистеми: «Регулятор» (рис. 6.10, а) і «Позиціонер» (рис. 6.10, б) і «Парогенератор».



Рисунок 6.10

У суматорі регулятора обидва входи плюсові. Для моделювання обмеження швидкості позіціонера використайте блок **RUTELIMITER** з бібліотеки «Розриви».

Для підсистеми «Парогенератор» скопіюйте раніше створену модель (рис. 6.8), використавши меню «Змінити=>Позначене у суперблок».

7. У новій моделі встановіть коефіцієнти підсилювачів:

Помилка по парі	1
Помилка по рівню	0.7
Помилка по воді	1
Клапан	6.67
Датчик води	0.0288
Датчик рівня	16
Датчик пари	0.0288

Параметри блоків ступінчастих сигналів: a) «Збурення-Пара»: *Час сходинки* ts; *Final value* Ds; б) «Збурення-Вода»: Час сходинки tw; *Final value* Dw.
Блок «Завдання» – це **CONST_m** з параметром *L*.
Входи суматорів (рахуючи зліва направо): ++-, ++, -+.
Межі вимірювання для осцилографа спочатку задайте такі:
а) для рівня (*L*) від 0 до 3;
б) для витрати води від 0 до 1,5 · *D*_w;
в) для регулюючого органу (PO) ±100 %.

Після прогону моделі межі осей графіків можна скоректувати, натиснувши кнопку 🔍 графічного вікна.

8. Виконайте моделювання на протязі 1000 с.

9. Пояснити характер поведінки змінних, що виводяться на осцилограф. Занести результати у таблицю 6.2.

Таблиця 6.2

T	Пікове значення реа	кції на збурення	Час відпрацювання збурення			
L	по воді	по парі	по воді	по парі		

10. Звіт повинен містити мету роботи, схеми Хсоѕ-моделей, початкові значення параметрів налаштування регулятора, лістинг файлу **init6.sci**, графіки перехідних характеристик, копії вікон з результатами оптимізації, а також висновки про проведені дослідження.

Контрольні питання для захисту

- 1. Як обмежити швидкість переміщення штока клапана?
- 2. Як здійснюється завдання параметрів збурень?
- 3. Як задаються параметри моделі парогенератора?
- 4. Як моделюються датчики технологічних параметрів?
- 5. Як здійснюється моделювання витрати живильної води через клапан?

Лабораторна робота № 7

СИНТЕЗ І МОДЕЛЮВАННЯ ПОВНОГО СПОСТЕРІГАЧА

Мета роботи: опанувати методику синтезу модальної системи управління на основі спостерігача повного порядку

7.1 Теоретичні відомості

Для, щоб в системі управління можливо було використовувати зворотний зв'язок по стану об'єкта, необхідно оцінити вектор змінних стану, які часто є недоступними для виміру. Пристрої, що формують на виході вектор оцінки змінних стану, а також дозволяють відокремити корисний сигнал від шумів, називають спостерігачами.

Спостерігач може мати порядок, рівний порядку системи (спостерігач повного порядку), який оцінює стан об'єкта, враховуючи усі змінні стану, або менший (спостерігач зниженого порядку), який має розмірність на одну або кілька вимірюваних компонент менше, ніж порядок системи.

За відсутності завад за допомогою спостерігача зниженого порядку можна дуже точно оцінити координати вектора стану. Але в зашумлених системах такий спостерігач може невірно оцінити координати вектора стану, тому в умовах значного рівня завад і шумів використовують спостерігач повного порядку.

Нехай стаціонарний об'єкт описується традиційною системою рівнянь в просторі станів:

$$\begin{cases} \dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\mathbf{X}. \end{cases}$$
(7.1)

Припустимо, що матриці **A**, **B**, **C** відомі, тоді вектор **x** можна замінити вектором **x** моделі, яка має той же вхід **u**, що і реальний об'єкт:

$$\begin{cases} \hat{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\mathbf{U}; \\ \mathbf{Y} = \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}. \end{cases}$$
(7.2)

Якщо модель (7.2) є ідеальною апроксимацією системи (7.1), в тому сенсі, що їх параметри і початкові умови ідентичні, то стани **X** і $\hat{\mathbf{X}}$ також співпадають. Якщо початкові умови для систем (7.1) і (7.2) різні, то $\hat{\mathbf{X}}$ сходиться до **X** тільки тоді, коли система (7.1) асимптотично стійка.

При відновленні по моделі (7.2) не використовується вимірюваний вихід. Якість відновлення покращується, якщо ввести в модель різницю виміряного виходу і його оцінки **Y**–**CX** у вигляді зворотного зв'язку:

 $\hat{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\hat{\mathbf{X}} + \mathbf{B}\mathbf{U} + \mathbf{L}(\mathbf{Y} - \mathbf{C}\hat{\mathbf{X}}).$ (7.3)

Тут L - матриця коефіцієнтів зворотного зв'язку. Вибором коефіцієнтів матриці L можна забезпечити необхідний вигляд перехідних процесів спостерігача.

Загальний вигляд системи управління зі спостерігачем показаний на рис. 7.1.



Рис. 7.1

Додаткове включення спостерігача впливає на загальну динаміку системи, збільшуючи тривалість перехідних процесів в порівнянні з тривалістю цих процесів в системі з регулятором стану без спостерігача. Тому необхідно при розрахунку системи одночасно розраховувати коефіцієнти матриць **К** та **L**. Це можна виконати, наприклад, за допомогою скріпту MATLAB наступного змісту:

```
W1=tf([1.2], [10 1]) % створення ПФ W<sub>1</sub>(s)
W2=tf([1], [3 1],'ioDelay',3) % створення ПФ із запізнен-
ням W<sub>2</sub>(s)
W=series(W1, W2) % послідовне з'єднання W<sub>1</sub>(s) та W<sub>2</sub>(s)
sys=ss(W) % - модель об'єкта управління
[A,B,C,D]= ssdata(sys) % визначення матриць об'єкта
P=[-5 -5]; % бажані полюси спостерігача
K=acker(A,B,P); % матриця регулювальника
C_ = [C; 1,0] % модифікація матриці С, щоб отримати 2
виходи: х та у
D_ = [0; 0]; % теж саме для матриці D
L=acker(A',C',P); % матриця коефіцієнтів зворотних зв'яз-
ків спостерігача L
L=L' % транспонування матриці
```

У цьому скріпті використовується передатна функція об'єкта з лабораторної роботи № 4. При використанні пакету Scilab замість функції acker використовується функція ppol.

7.2 Порядок виконання роботи

1 Створити сценарій Scilab Lab7.sci для підготовки даних моделювання. Першим оператором сценарію ввести початкові дані згідно табл. 7.1:

A=[-2 4; 0 -4]; B=[1; 1]; C=[1 0];

Таблиця 7.1

Варіант	А	В	C	Варіант	А	В	С
1	$\begin{bmatrix} -2 & 4 \\ 0.5 & -4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	[1 0]	13	$\begin{bmatrix} 1 & -15 \\ 0.5 & -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	[1 0]
2	$\begin{bmatrix} -0.5 & 2 \\ -12 & -4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	[5 0.5]	14	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -15 & -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	[5 0.5]
3	$\begin{bmatrix} 0 & 2 \\ -10 & -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1 \\ 1 \end{bmatrix}$	[5 0]	15	$\begin{bmatrix} 2 & 2 \\ -15 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 1\\1 \end{bmatrix}$	[5 0]
4	$egin{bmatrix} 0.5 & 1 \ -15 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	[5 1]	16	$\begin{bmatrix} 1 & 2 \\ -10 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	[5 1]
5	$egin{bmatrix} 0.5 & -10 \ 1 & -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	[3 1]	17	$\begin{bmatrix} -1 & 2 \\ -10 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	[3 1]
6	$\begin{bmatrix} 1 & -15 \\ 1 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}$	[2 1]	18	$\begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -8 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2 \\ 0 \end{bmatrix}$	[2 1]
7	$\begin{bmatrix} 1 & -15 \\ 0.5 & -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2\\ 0\end{bmatrix}$	[0.5 1]	19	$\begin{bmatrix} -2 & 4 \\ 0.5 & -4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 2\\ 0\end{bmatrix}$	[0.5 1]
8	$\begin{bmatrix} 1 & 1 \\ -15 & -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	[10 1]	20	$\begin{bmatrix} -0.5 & 2 \\ -12 & -4 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	[10 1]
9	$\begin{bmatrix} 2 & 2 \\ -15 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	[8 1]	21	$\begin{bmatrix} 0 & 2 \\ -10 & -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	[8 1]
10	$egin{bmatrix} 1 & 2 \ -10 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	[8 2]	22	$egin{bmatrix} 0.5 & 1 \ -15 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix}$	[8 2]
11	$\begin{bmatrix} -1 & 2 \\ -10 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5\\1\end{bmatrix}$	[6 1.5]	23	$\begin{bmatrix} 0.5 & -10 \\ 1 & -2 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5\\1\end{bmatrix}$	[6 1.5]
12	$\begin{bmatrix} -1 & 1 \\ -8 & -1 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5\\1\end{bmatrix}$	[5 1]	24	$\begin{bmatrix} 1 & -15 \\ 1 & -3 \end{bmatrix}$	$\begin{bmatrix} 0.5\\1\end{bmatrix}$	[5 1]

2. Початкові дані об'єкта і спостерігача:

x0=[0 0]; x0e=[0 0];

3. Матриця керованості:

 $Cc = cont_mat(A, B);$

4. Виведення рангу матриці керованості:

disp(sprintf('Paнг керованостi = %g', rank(Cc)))

Якщо ранг матриці дорівнює порядку системи (2), матриця є керованою. Можна продовжувати синтез системи.

5. Вектор бажаних полюсів системи регулювання: P=[-5 -5];

6. Розрахування значень коефіцієнтів зворотних зв'язків:

K = ppol(A, B, P);

```
7. Визначення спостережуваності об'єкта управління:
```

```
N = obsv_mat(A, C);
```

```
disp(sprintf('Paнг спостережуваності = %g', rank(N)))
```

Якщо ранг матриці дорівнює порядку системи, об'єкт є спостережуваним, можна будувати спостерігач.

8. Вектор бажаних полюсів спостерігача: Pe = [-1,-2];

9. Розрахунок матриці зворотних зв'язків спостерігача:

```
L = ppol(A', C', Pe);
```

10. Модернізація матриць, щоб на виході об'єкта мати, крім вихідної величини **y**, ще й вектор змінних стану **x**:

 $C_{=}[C; 1,0]; D_{=}[0; 0];$

11. Зберегти сценарій з іменем Lab7.sci і виконати його.

12. Створити Хсоѕ-модель системи регулювання згідно рис. 7.2.



Рисунок 7.2

Об'єкт управління моделюється блоком CLSS з наступними налаштуван-



Матриця А	A
B matrix	В
C matrix	C_
D matrix	D_
Початковий стан	x0

Також додайте блок демультиплексора **DEMUX** (бібліотека «Маршрутизація сигналів) для витягання окремих координат вихідного вектора моделі [у, x].

13. Установити час моделювання 10 с і запустити модель. Виділіть на графіках інформативну частину, натиснувши кнопку 🔍 графічного вікна.

14. Створити Хсоѕ-модель системи зі спостерігачем. Для цього скоректуйте модель згідно рис. 7.3.



Рисунок 7.3

Для моделювання спостерігача використайте блок **SUPER_f** з бібліотеки «Порт і підсистема». Двічи клацнувши по цьому блоку, відкрийте вікно, в якому створіть схему у відповідності з рівнянням динаміки спостерігача (7.3), як на рис. 7.4.



Рисунок 7.4

Кожен з підсилювачів виконує множення відповідно до рівняння (7.3): блок **A** – множення $A\hat{X}$, блок **B** – множення **BU**, блок **L** – множення $L(Y - C\hat{X}) = L(Y - \hat{Y})$, блок **C** – множення $\hat{Y} = C\hat{X}$. Двічі клацнувши по кожному блоку, занести у поле *Gain* ім'я відповідної матриці **A**, **B**, **C**, **L**. На виході трьохвходового суматора отримаємо вектор похідних змінних стану, який інтегрується блоком INTEGRAL_m з бібліотеки «Неперервні динамічні системи».

6. Запустити моделювання. Порівняти поведінку змінних стану об'єкта і спостерігача.

7. Звіт повинен містити мету роботи, схеми Хсоѕ-моделей, лістинг файлу Lab7.sci, хід виконання цього файлу (у командному вікні), графіки перехідних характеристик, а також висновки про проведені дослідження.

Контрольні питання

- 1. Що таке спостерігач повного порядку?
- 2. Що таке спостерігач зниженого порядку?
- 3. Для чого спостерігач вводиться у систему управління?
- 4. Яку роль виконує матриця К на схемі 7.1?
- 5. Яку роль виконує матриця L на схемі 7.1?
- 6. Яке призначення функції ppol (A',C',Pe)?
- 7. Як впливає включення спостерігача на загальну динаміку системи?

Лабораторна робота №8

ЛІНІЙНО-КВАДРАТИЧНИЙ РЕГУЛЯТОР

Мета роботи: навчитися будувати регулятори, оптимальні за лінійним квадратичним критерієм.

8.1 Короткі теоретичні положення

Задача синтезу лінійної динамічної системи, показник якості якої є квадратичним функціоналом, називається задачею лінійно-квадратичного управління (ЛКУ). Відповідний регулятор називають лінійно-квадратичним регулятором (ЛКР, англ. Linear quadratic regulator, LQR).

Розглянемо систему, що описується моделлю у просторі станів:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u}$$

Вважаємо, що є задане початкове значення вектора стану $\mathbf{x}(0)$ і для управління використовується зворотний зв'язок за станом:

$$\mathbf{u}(t) = -\mathbf{K} \cdot \mathbf{x}(t),$$

де К – матриця коефіцієнтів регулятора.

Ставиться задача визначити матрицю зворотного зв'язку так, щоб замкнута система була асимптотично стійка, тобто за будь-яких початкових умов вона має повертися в положення рівноваги ($\mathbf{x}(t) = 0$, $\mathbf{u}(t) = 0$).

Згідно методу ЛКУ, якість регулювання оцінюється квадратичним критерієм:

$$J=\int_0^\infty \mathbf{x}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\mathbf{x}\,dt,$$

де добуток $\mathbf{x}^{\mathrm{T}} \cdot \mathbf{x}$ дає квадрат вектора $\mathbf{x}(t)$, \mathbf{Q} – вагова матриця, симетрична щодо головної діагоналі.

Матриця може бути діагональною, наприклад:

$$\mathbf{Q} = \begin{bmatrix} q_{11} & 0 \\ 0 & q_{22} \end{bmatrix}.$$

Тоді вираз, що інтегрується, перетворюється на $x^T Q x = q_{11} x_1^2 + q_{22} x_2^2$.

Щоб обмежити вектор управління **u**, квадрат його також вводять у критерій, який мінімізується:

$$J = \int_{0}^{\infty} (\mathbf{x}^{T} \mathbf{Q} \mathbf{x} + \mathbf{u}^{T} \mathbf{R} \mathbf{u}) dt,$$

де **R** – вагова матриця.

Задача синтезу LQR складається в пошуку матриці коефіцієнтів **K**, які забезпечують мінімальне значення квадратичного критерію *J*. Доведено, що така оптимальна матриця обчислюється за формулою:

$\mathbf{K} = (\mathbf{R} + \mathbf{B}^{\mathrm{T}} \mathbf{S} \mathbf{B})^{-1} \mathbf{B}^{\mathrm{T}} \mathbf{S} \mathbf{A},$

де використовується матриця S, яку можна знайти з рівняння Рікатті:

$$\mathbf{S} = \mathbf{A}^{\mathrm{T}}(\mathbf{S} - \mathbf{S}\mathbf{B}\mathbf{U}^{-1}\mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{S})\mathbf{A} + \mathbf{Q}, \quad \mathbf{U} = \mathbf{R} + \mathbf{B}^{\mathrm{T}}\mathbf{S}\mathbf{B}.$$

Ці доволі складні обчислення виконує функція Scilab lqr. Її синтаксис:

$$[K, X] = lqr(P, Q, R),$$

де Р – представлення у просторі станів лінійної динамічної системи;

Q і R – вагові матриці;

К – матриця коефіцієнтів регулятора;

Х – стабілізуючий розв'язок рівняння Ріккаті.

У цій лабораторній роботі треба виконати синтез регулятора для кута повороту робота, що можна представити структурною схемою на рис. 8.1.

$$\underbrace{u}_{T \ s+1} \underbrace{\omega}_{\sigma} \underbrace{\frac{1}{s}}_{\phi}$$

Рисунок 8.1 – Структурна схема об'єкта управління

Під дією керуючого сигналу u(t) робот повертається з кутовою швидкістю $\omega(t)$, інтегруванням якої отримується кут повороту $\varphi(t)$.

Уведемо вектор станів:

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \omega \\ \varphi \end{bmatrix}.$$

Тепер схему на рис. 8.1 можна представити системою рівнянь:

$$\begin{cases} \dot{x}_1 = -x_1 / T_s + (k / T_s)u; \\ \dot{x}_2 = x_1. \end{cases}$$

Відповідна модель у просторі станів:

$$\begin{cases} \begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -1/T_s & 0 \\ 1 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} k/T_s \\ 0 \end{bmatrix} u; \\ y = \varphi = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix}.$$

Матриці моделі:

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} -1/T_s & 0\\ 1 & 0 \end{bmatrix}; \ \mathbf{B} = \begin{bmatrix} k/T_s\\ 0 \end{bmatrix}; \ \mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 \end{bmatrix}.$$

Внаслідок відсутності датчика кутової швидкості ω необхідно оснастити систему управління спостерігачем стану. Структура системи зі спостерігачем показана на рис. 7.1.

Математична модель спостерігача:

$$\frac{d\mathbf{x}}{dt} = (\mathbf{A} - \mathbf{L}\mathbf{C})\hat{\mathbf{x}}(t) + \mathbf{B}\mathbf{u}(t) + \mathbf{L}\mathbf{y}(t),$$

де \hat{X} – створені спостерігачем змінні стану;

L – матриця параметрів спостерігаючого пристрою.

Функція ppol по транспонованим матрицям A, C і вектору полюсів Pe підбирає елементи матриці L:

-->L= ppol(A^{T} , C^{T} , Pe)

8.2 Порядок виконання лабораторної роботи

1. У редакторі SciNote створіть файл сценарію Lab8.sci. Першою командою сценарію задайте вихідні дані згідно табл. 8.1: k=2, Ts=3, ωm=1.0, p1=0, p2=0.2

Таблиця 8.1

Bapi-	k	Т, с	ω _m ,	p_1	p_2	Bapi-	k	Т, с	ω _{max} ,	p_1	p_2
ант			рад/ с			ант			рад/ с		
1	2	3	1,0	0,2	0,2	11	1	2	0,9	0,0	0,2
2	1	2	1,5	0,2	0,1	12	3	1	1,0	0,0	0,1
3	3	1	1,5	0,1	0,2	13	2	2	1,5	0,1	0,2
4	2	3	1,0	0,1	0,1	14	1	1	2,0	0,1	0,1
5	1	3	1,0	0,0	0,2	15	3	3	1,5	0,2	0,2
6	3	2	2,0	0,0	0,1	16	2	2	1,2	0,2	0,1
7	2	1	1,5	0,2	0,2	17	1	1	1,0	0,1	0,2
8	1	3	0,8	0,2	0,1	18	3	2	0,8	0,1	0,1
9	3	3	1,1	0,1	0,2	19	2	3	1,0	0,0	0,2
10	2	3	1,2	0,1	0,1	20	1	1	1,0	0,0	0,1

2. Введіть у сценарій команди побудови моделі у просторі станів:

```
A = [-1/Ts 0;1 0];
B = [k/Ts; 0];
C = [0 1];
D=0;
x0=[0 0];
W = syslin('c', A, B, C);
3.Введіть команди для LQR-синтезу:
Q = diag([0 1]);
R = 0.01;
K = lqr(W, Q, R)
4.Виконайте сценарій, натиснувши клавішу F5.
```

5. Створіть Хсоѕ-модель, як показано на рис. 8.3.



6. Введіть параметри блоків моделі.

Щоб задати вхідний сигнал по двох координатах x1 і x2 в схему після джерела ступінчастого сигналу введений блок **GAIN_f**, для якого треба установити векторний коефіцієнт підсилення [0; 1].

У суматорі обидва входи треба указати, як плюсові, оскілки негативний зворотний зв'язок забезпечується блоком GAIN_f з коефіцієнтом підсилення, заданим матрицею [-1 0;0 -1].

Як регулятор використовується ще один блок **GAIN_f** з коефіцієнтом підсилення –К. Мінус необхідній, бо розробники Scilab передбачали, що функція **lqr** розраховує коефіцієнти регулятора, що стоїть у колі негативного зворотного зв'язку, і тому вихід функції враховує цю негативність. У нашій схемі регулятор розміщений у прямій гілці контуру.

Для блока моделі у просторі станів CLSS:

Матриця А	A	
B matrix	В	
C matrix	[1 0;0 1]	
D matrix	0	
Початковий стан	x0	

Зверніть увагу: оскільки необхідно здійснити управління за двома змінними стану, треба, щоб на виході моделі були саме ці змінні стану. Тому замість С указується одинична матриця.

Для блока **TOWS_с** указуємо: *Розмір буфера* 1000; *Scilab variable name* out.

Цей блок керується сигналами від блока CLOCK_c, для якого указуємо Період 0.1.

У блоці **CMSCOPE**: *Ymin vector* -1 -1; *Ymax vector* 2 2; *Refresh periods* 30 30. Цей блок керується сигналами від блока SampleCLK, для якого указуємо *Час вибірки* 0.01.

У меню «Моделювання=>Налаштування» залишаємо час 30.

8. Збережіть модель з ім'ям *Lab8.zcos*.

9. Доповнити сценарій наступними командами.

```
xcos_simulate(scs_m, 4) // запуск Хсоs-моделі
x1max=max(out.values(:,1)) // максимальне значення ω
disp(sprintf('Makc. ω = %g', x1max))
figure();clf
```

```
plot(out.time,out.values(:,2),out.time,out.values(:,1));
```

10. Виконати сценарій. Пояснити вигляд отриманих графіків.

11. Виконайте обмеження кутової швидкості методом підбору коефіцієнта R до рівня ω_m з табл. 8.1. Для цього повторюйте виконання сценарію клавішею F5, кожного разу змінюючи в сценарії R з кроком, не більше як 0.01. Значення максимуму х₁ контролюйте на консолі.

12. Розрахуйте перерегулювання і час перехідного процесу для змінної $\varphi(t)$.

13. Переробіть Хсоѕ-модель, додавши до неї спостерігач. Спочатку створіть і виконайте новий сценарій, який задає вихідні дані для моделі:

```
close(winsid()) // закриття графічних вікон
k=1, Ts=3, ωm=1.0, p1=0.2, p2=0.1
A = [-1/Ts 0;1 0];
B = [k/Ts; 0];
C=[1 0; 0 1];
D=0;
x0e=[0 0];
We = syslin('c', A, B, C);
Pe = [p1, p2];
L= ppol(A',C',Pe)
xcos_simulate(scs_m, 4)
```

14. Приведіть модель до вигляду рис. 8.4.



Рисунок 8.4

Блоки CLSS на виході видають змінні стану, їх треба множити на матриці коефіцієнтів C, щоб отримати значенні виходів. Для цього в модель введені два додаткові підсилювачі GAIN_f. Третій підсилювач виконує множення сигналу и регулятора на матрицю B. Тому в блоці CLSS спостерігача замість B вводиться одинична матриця [1 0; 0 1]:

Матриця А	A	
B matrix	[1 0;0 1]	
C matrix	[1 0;0 1]	
D matrix	0	

15. Запустіть модель на виконання і порівняйте осцилограми об'єкта і спостерігача.

ЛІТЕРАТУРА

1. Ковальчук, В.В. Лабораторний практикум (SciLab). Рукопис. – Одеса: ОККТ ОДЕКУ, 2013. – 164 с.

2. Методичні вказівки до лабораторних робіт з дисципліни "Алгоритми та методи обчислень" для студентів спеціальності 123 "Комп'ютерна інженерія" всіх форм навчання / Укл.: В.В. Шкарупило, Т.В. Голуб, Н.В. Щербак. – Запоріжжя: ЗНТУ, 2017. – 62 с.

3. Моделювання об'єктів і систем : лабораторний практикум / В. М. Дубовой, О. Д. Никитенко, М. С. Юхимчук, А. В. Галущак. – Вінниця : ВНТУ, 2021. – 157 с.

4. Фетісов, В. С. Математична система Scilab : навч.-метод. посібн. 2-ге вид., перероб. і доп. – Ніжин : НДУ ім. М. Гоголя. – 2022. – 82 с.

5. Методичні рекомендації до організації практичних занять та самостійної роботи на основі програмного забезпечення пакету SCILAB/XCOS з навчальної дисципліни «Теорія автоматичного управління» (для студентів усіх форм навчання спеціальностей 141 – Електроенергетика, електротехніка та електромеханіка, 151 – Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології). Частина 2. Уклад. К.О. Сорока. – Харків : ХНУМГ ім. О.М. Бекетова, 2019. – 56 с.

6. Справка Scilab [Електронний ресурс]. – Режим доступу :

https://help.scilab.org/docs/6.0.1/ru_RU/index.html

7. Module 6: Discrete-time Control Systems [Електронний ресурс]. – Режимдоступу:<u>https://scilabdotninja.wordpress.com/scilab-control-engineering-basics/module-6-discrete-time-control-systems/</u>

8. Петік, Т.В. Автоматична система регулювання рівня води в парогенераторі енергоблоку 1000 МВт атомної електричної станції / Т.В. Петік, Г.П Лисюк / Вчені записки ТНУ імені В.І. Вернадського. Серія: технічні науки. – 2019. – Том 30 (69). – Ч. 2.– № 3. – С. 7–12.

ДОДАТОК А

МЕТОДИ ВИЗНАЧЕННЯ ПАРАМЕТРІВ НАЛАШТУВАННЯ РІД КОНТРОЛЕРІВ

Metog Ziegler-Nichols полягає в наступному:

- встановлюють коефіцієнти інтегральної Кі і диференціальної Кd складових PID-закону регулювання рівними нулю і збільшують коефіцієнт Кр пропорційної складової до тих пір, поки система стає нестійкою;

- позначають це значення Ku і вимірюють період коливань Pu;

- приймають наступні значення:

 $Kp = 3 \cdot Ku/5$, $Ki = 6 \cdot Ku / (5 \cdot Pu)$, и $Kd = 3 \cdot Ku \cdot Pu/40$.

Для об'єктів першого порядку можна користуватись формулами таблиці А.1.

Таблиця А.1–Орієнтировочні значення параметрів налаштування регулятора для об'єктів першого порядку із запізнюванням

Tur	Пополотии	Тип перехідного процесу					
регулятора	налаштування	аперіодичний	з 20%-м перерегулюванням	$_3 min \int y^2 dt$			
Ι	K_{p}	1/(4,5 <i>A</i>) *	1/(1,7A)	1/(1,7 A)			
П	$K_{ m p}$	0,3 <i>B</i> *	0,7 <i>B</i>	0,9 <i>B</i>			
	Kp	0,6 <i>B</i>	0,7 <i>B</i>	1,0 <i>B</i>			
ПІ	Ти	0,6 T _{об}	0,7 Т _{об}	1,0 T _{oб}			
	$K_{ m p}$	0,95 B	1,2 <i>B</i>	1,4 <i>B</i>			
ПІД-	Ти	2,4 τ _{οδ}	2,0 τ _{οδ}	1,3 τ _{οб}			
	Тд	0,4 τ _{οδ}	0,4 τ _{οδ}	0,5 τ _{οδ}			

* Примітка: $A = K_{ob}T_{ob}; B = T_{ob}/(K_{ob}\tau_{ob}).$