

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ ТА НАУКИ УКРАЇНИ
ДОНЕЦЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ

до виконання лабораторних робіт з курсу
"ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ"

ЧАСТИНА ІІІ

Для студентів, що навчаються за напрямом
6.050201 "Системна інженерія"
(для денної та заочної форм навчання)

Затверджено
на засіданні кафедри
автоматики й телекомунікацій
Протокол № 9 від 30.08.2010.

Затверджено на засіданні навча-
льно-видавничої ради ДонНТУ
Протокол № 4 від 07.10.2010

Донецьк, ДонНТУ 2010 р.

УДК 62-52 (071)

Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу "Теорія автоматичного управління", частина 3 (для студентів за напрямом підготовки 6.050201 "Системна інженерія" (СУА) денної та заочної форм навчання)/ Укладачі: Р.В. Федюн, В.О. Попов, Т.В. Найдьонова - Донецьк: ДонНТУ, 2010.- 36 с.

Наведено опис пакету прикладних програм MATLAB і його застосування при виконанні лабораторних робіт, короткі відомості з теорії, порядок виконання робіт, зміст звіту, список літератури.

Укладачі:

Р.В. Федюн, доц.

В.О. Попов, доц.

Т.В. Найдьонова, ас.

Рецензент

О.І. Секірін, доц.

Формуюча ланка є лінійним безперервним елементом схеми і його відносять до безперервної частини системи (БЧ) і цю частину системи називають приведеною безперервною частиною системи (ПБЧ). Таким чином, розрахункова модель дискретної системи в розімкненому стані являє собою схему, що складається з послідовного з'єднання ідеального імпульсного елемента й приведеної безперервної частини системи (рис. 15.1,в).

Ідеальний імпульсний елемент, що здійснює квантування за часом, можна розглядати як амплітудноімпульсний модулятор (рис.15.2).

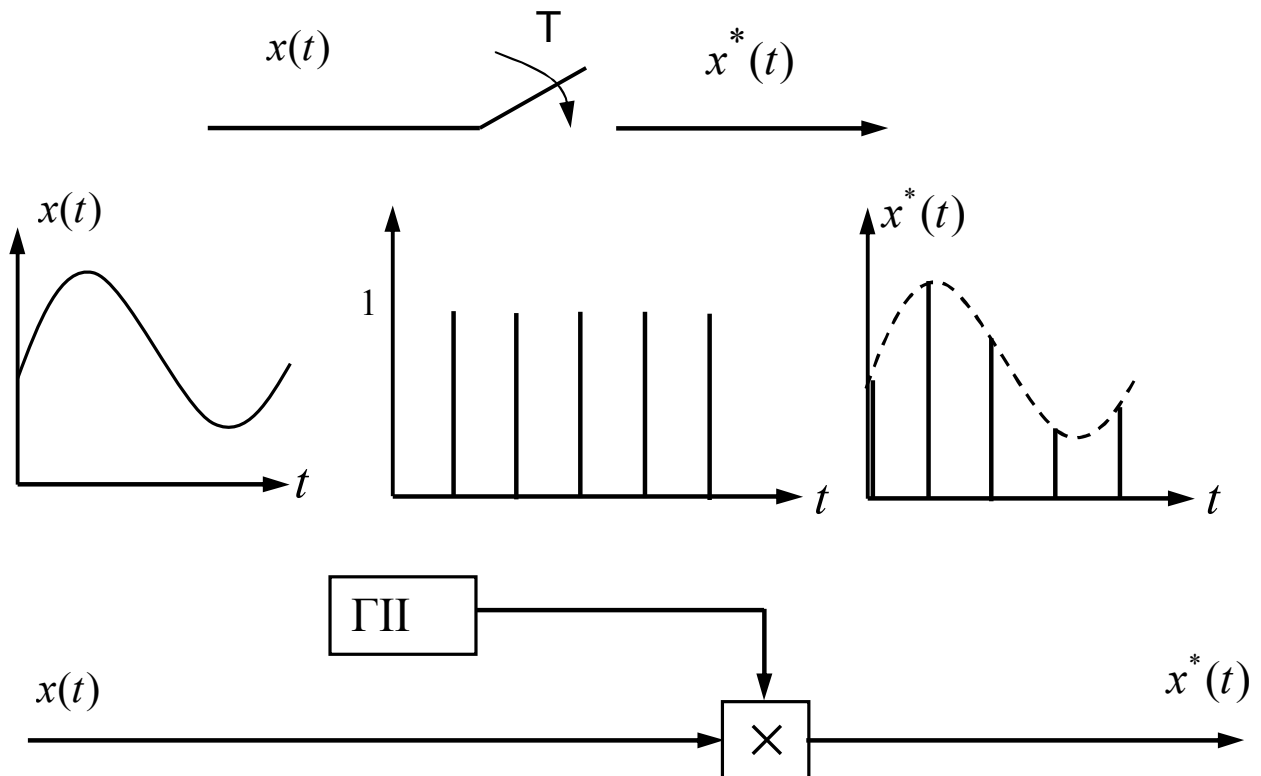


Рисунок 15.2. Ідеальний імпульсний елемент, як амплітудноімпульсний модулятор

Модулятор множить несучий сигнал – послідовність ідеальних імпульсів генератора ідеальних імпульсів (ГП), на сигнал, що модулює, - вхідний безперервний сигнал $x(t)$. Дискретний сигнал $x^*(t)$, утворюється при цьому на виході, являє собою послідовність імпульсів, амплітуди яких пропорційні (рівні) миттєвим значенням безперервного сигналу.

Процеси в реальному імпульсному елементі (рис.15.1,б) відрізняються від

процесів в ідеальному елементі й представлені на рис.15.3.

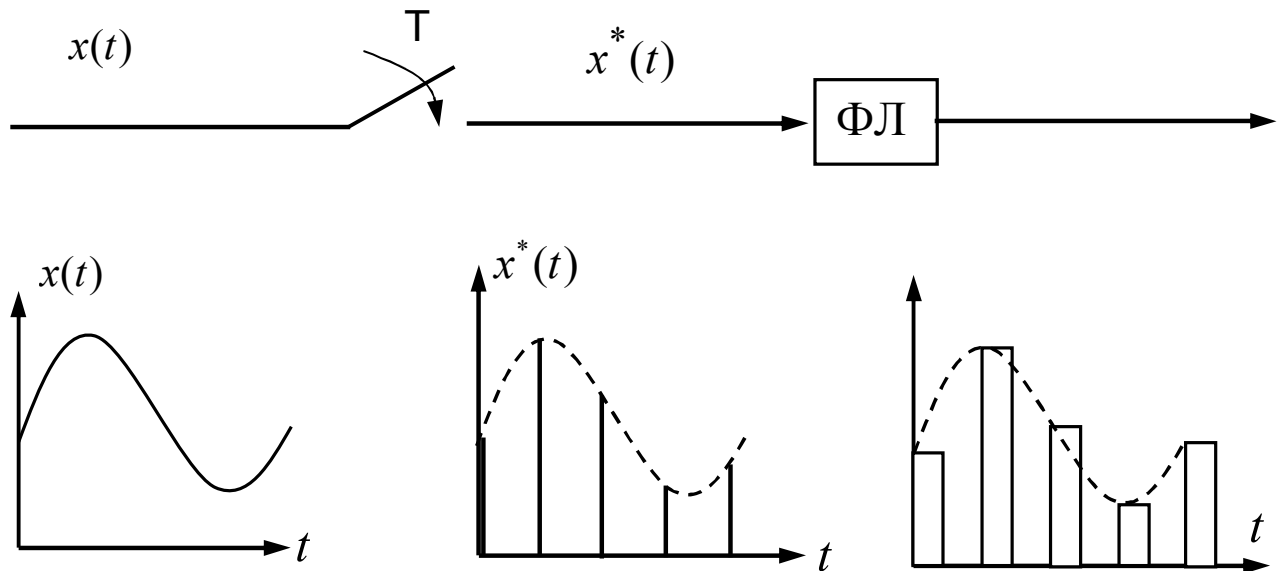


Рисунок 15.3 Еквівалентна схема реального імпульсного елемента

Ідеальний імпульсний елемент виробляє сигнал у вигляді послідовності ідеальних імпульсів $\{u^*(k)\}$. Формуюча ланка перетворює послідовність $\{u^*(k)\}$ у сигнал $u(t)$.

Оскільки для відновлення аналогового сигналу на інтервалі $k \leq t < (k+1)T$ можна використовувати тільки попередні значення керуючої послідовності (до $u^*(k)$ включно), необхідно прогнозувати значення сигналу протягом чергового інтервалу квантування, тобто, виконати екстраполяцію. Тому формуючі пристрої називають екстраполяторами.

Найчастіше екстраполятор використовує тільки останнє обмірюване значення сигналу $u^*(k)$, при цьому його імпульсна характеристика дорівнює нулю при $t > T$. Такий екстраполятор називається екстраполятором нульового порядку.

У більш складних випадках для відновлення аналогового сигналу на інтервалі $k \leq t < (k+1)T$ використовуються також значення

$$u^*(k-1), u^*(k-2), u^*(k-3), \dots, u^*(k-s)$$

У цьому випадку говорять про екстраполятор порядку s , його імпульсна

характеристика дорівнює нулю при $t > (s + 1)T$.

У моделі лінійної системи з амплітудноімпульсною модуляцією формуюча ланка перетворює послідовність δ -функцій у послідовність прямокутних імпульсів, тобто прямокутний імпульс є реакцією формуючого елемента на вплив у вигляді δ -функцій. Таким чином, реакція формуючої ланки на δ -функцію являє собою вагову характеристику $w_\phi(t)$. Як відомо, зображення по Лапласу вагової функції є передаточна функція.

Визначимо передаточну функцію формуючої ланки. Для цього представимо прямокутний імпульс - вагову функцію формуючої ланки у вигляді, як показано на рис.15.4:

$$w_\phi(t) = k(t) - k(t - \gamma T)$$

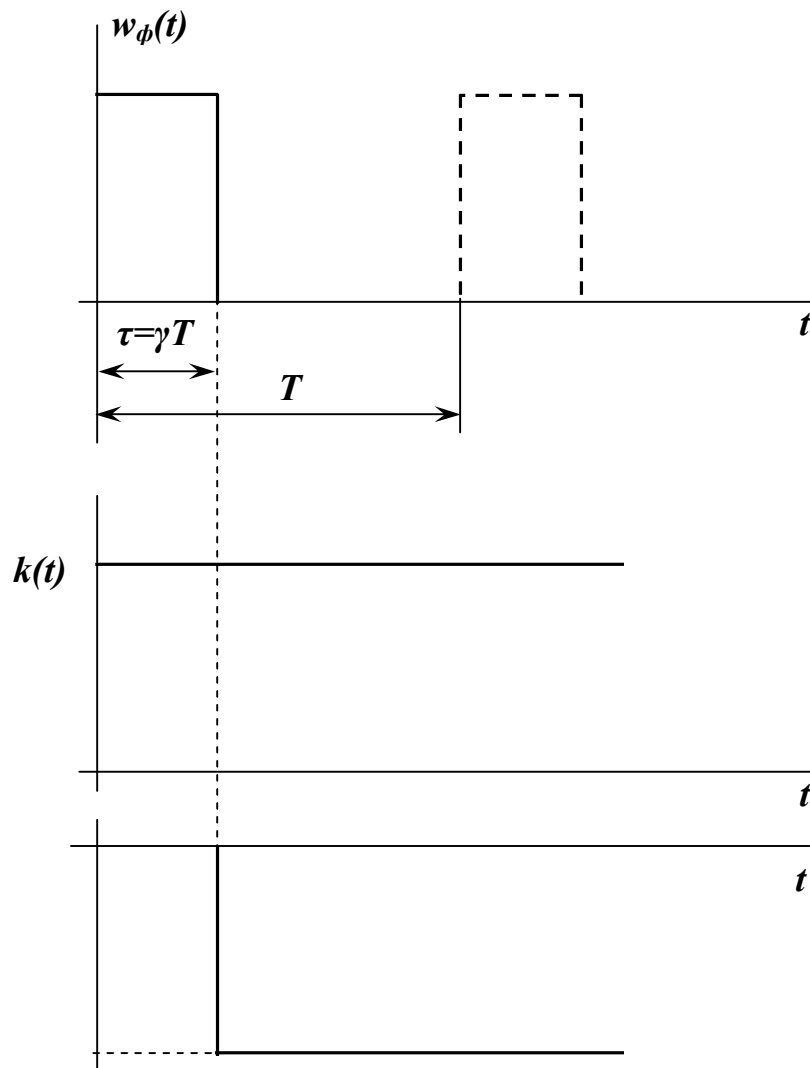


Рисунок 15.4. Представлення прямокутного імпульсу у вигляді двох

стрибкоподібних функцій

Амплітуду прямокутного імпульсу прийmemo рівній одиниці.

Зображення по Лапласу вагової функції $w_{\phi}(t)$:

$$H(p) = L\{w_{\phi}(t)\} = \frac{1}{p} - \frac{1}{p} e^{-\gamma T p} = \frac{1 - e^{-\gamma T p}}{p}.$$

Дане вираження являє собою передаточну функцію формуючої ланки.

Якщо амплітуда прямокутного імпульсу відмінна від одиниці й дорівнює $k_{И}$, то передаточна функція формуючого елемента має вид:

$$H(p) = k_{И} \frac{1 - e^{-\gamma T p}}{p}.$$

Аналогічно визначається передаточна функція формуючого елемента, що має на виході імпульси іншої форми.

Якщо $\gamma = 1$, то передаточна функція формуючого елемента визначається вираженням:

$$H_0(p) = k_{И} \frac{1 - e^{-T p}}{p}.$$

Формуючий елемент із такою передаточною функцією називається фіксатором (екстраполятором) нульового порядку. Такі фіксатори одержали найбільше поширення в практиці застосування цифрових керуючих машин. Переважна більшість реальних пристроїв, що відновлюють, описуються саме моделлю фіксатора нульового порядку. Це найбільш простий екстраполятор, який легко реалізувати за допомогою стандартних апаратур (ЦАП).

Іноді розглядають фіксатор першого порядку (англ. first-order hold, FOH), що виконує лінійну екстраполяцію на основі двох попередніх значень дискретного сигналу (рис 15.5).

Безперервний сигнал на інтервалі $k \leq t < (k+1)T$ відновлюється за законом лінійної екстраполяції:

$$u(t) = u^*(k) + \frac{t - kT}{T} [u^*(k) - u^*(k-1)]$$

Імпульсна характеристика фіксатора першого порядку (його реакція на одиничний дискретний імпульс) показана на рис. 15.6.

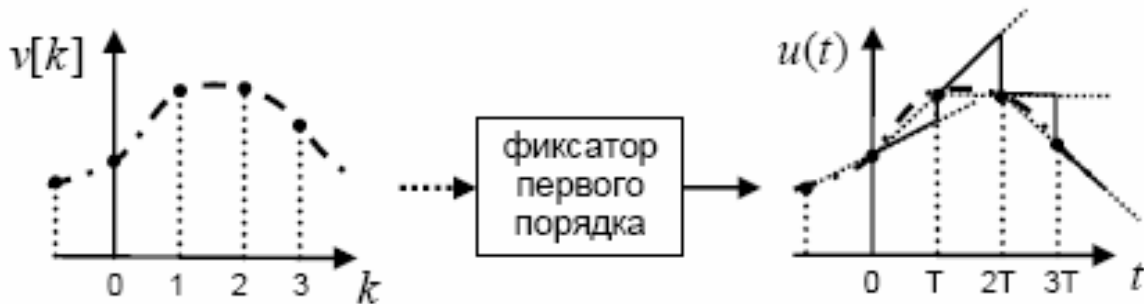


Рисунок 15.5. Фіксатор першого порядку



Рисунок 15.6. Імпульсна характеристика фіксатора першого порядку

Передаточна функція фіксатора першого порядку обчислюється як перетворення Лапласа від його імпульсної характеристики:

$$H_1(p) = \int_0^{\infty} w_1(t) e^{-pt} dt = \left(\frac{1 - e^{-pT}}{p} \right)^2 \left(\frac{Tp + 1}{T} \right)$$

На практиці використання фіксатора першого порядку може дати деякий виграш у точності відновлення сигналу при частому квантуванні досить гладких сигналів.

Існують і більше складні екстраполятори. У деяких задачах цифрової фільтрації при випадкових перешкодах оптимальним є так званий експонентний екстраполятор, імпульсна характеристика й передаточна функція якого мають вигляд

$$w_{\text{exp}}(t) = \begin{cases} e^{\alpha t}, & 0 \leq t \leq T \\ 0, & t > T \end{cases}$$

$$H_{\text{exp}}(p) = \frac{1 - e^{-(p-\alpha)T}}{p - \alpha}$$

де α – постійна.

Технічна реалізація таких екстраполяторів у реальних системах досить складна, тому вони використовуються головним чином у теоретичних дослідженнях.

15.2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Вивчити набір блоків і їхні можливості бібліотеки Discrete пакета simulink.
2. Дослідити роботу ідеального імпульсного елемента за допомогою моделі, яка представлена на рис. 15.7. Період дискретності прийняти рівним 1 с. Представити у звіті необхідні графіки й проаналізувати їх.

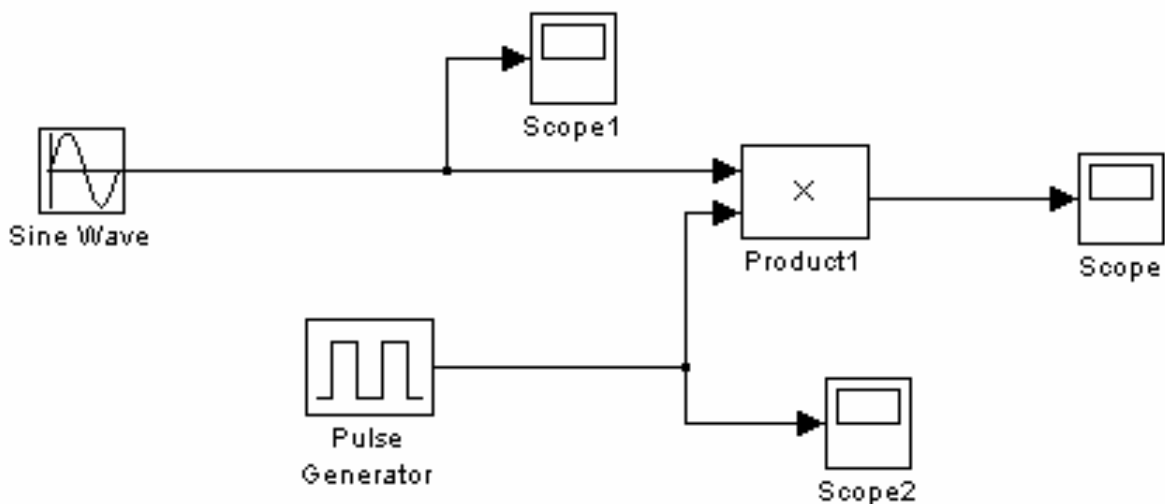


Рисунок 15.7. Модель ідеального імпульсного елемента

3. Використовуючи модель ідеального імпульсного елемента, отримати гратчасті функції безперервних сигналів при різних періодах квантування. Для цього зібрати схему (рис.15.8). Привести у звіті графіки безпе-

рервних сигналів та відповідних гратчастих функцій і виконати аналіз отриманих результатів.

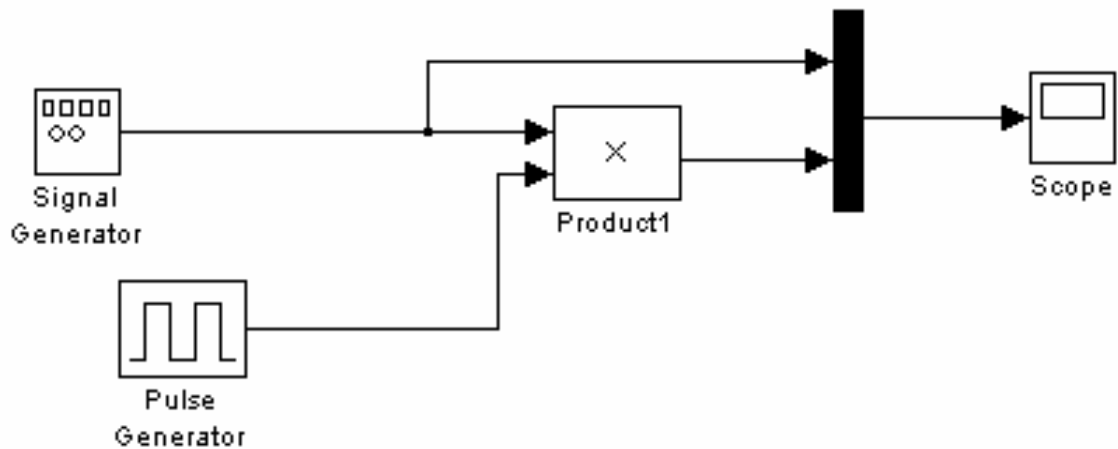


Рисунок 15.8. Схема одержання гратчастих функцій

4. Дослідити екстраполятор (фіксатор) нульового порядку, для чого зібрати схему моделювання – рисунок 15.9. Період квантування в ідеальному імпульсному елементі й фіксаторі нульового порядку повинен бути однаковим. Виконати моделювання для різних сигналів при різних періодах квантування. Результати моделювання привести у звіті.

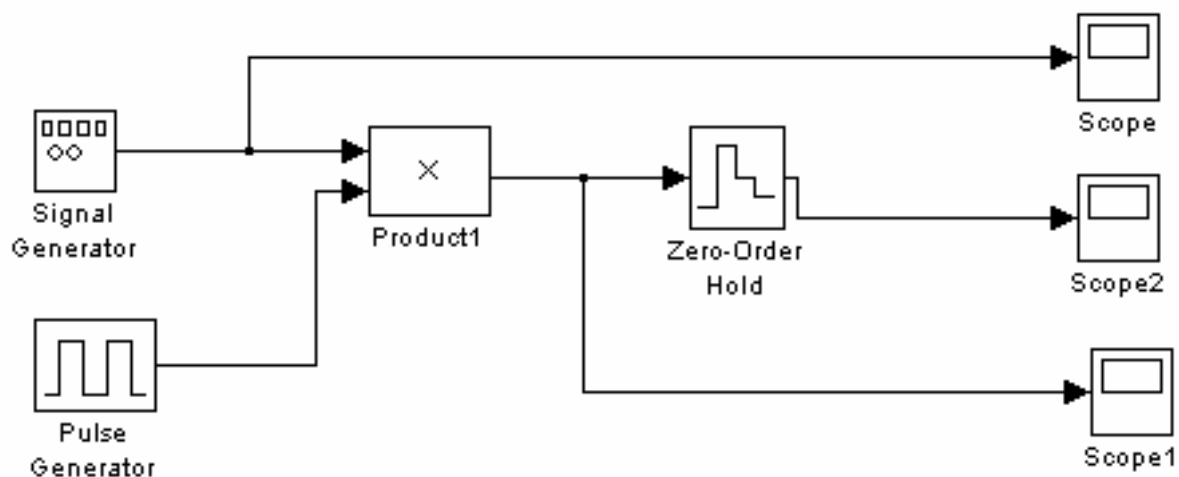


Рисунок 15.9. Схема дослідження екстраполятора нульового порядку

5. Дослідити екстраполятор (фіксатор) першого порядку, для чого зібрати схему моделювання – рисунок 15.10. Період квантування в ідеальному імпульсному елементі й фіксаторі першого порядку повинен бути одна-

ковим. Виконати моделювання для різних сигналів при різних періодах квантування. Результати моделювання привести у звіті.

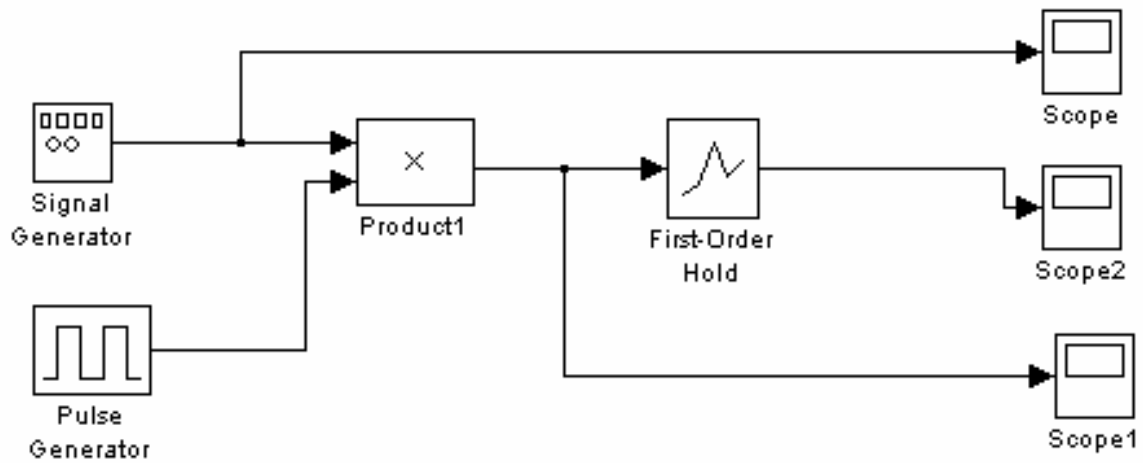


Рисунок 15.10. Схема дослідження екстраполятора першого порядку

6. Дослідити вплив різних екстраполяторів на динамічні процеси в дискретній системі, для чого зібрати схему - рисунок 15.11. Період квантування в ідеальному імпульсному елементі й фіксаторі повинен бути однаковим. Необхідні коефіцієнти приведені в таблиці 15.1. Виконати моделювання для заданих параметрів. Результати моделювання привести у звіті.

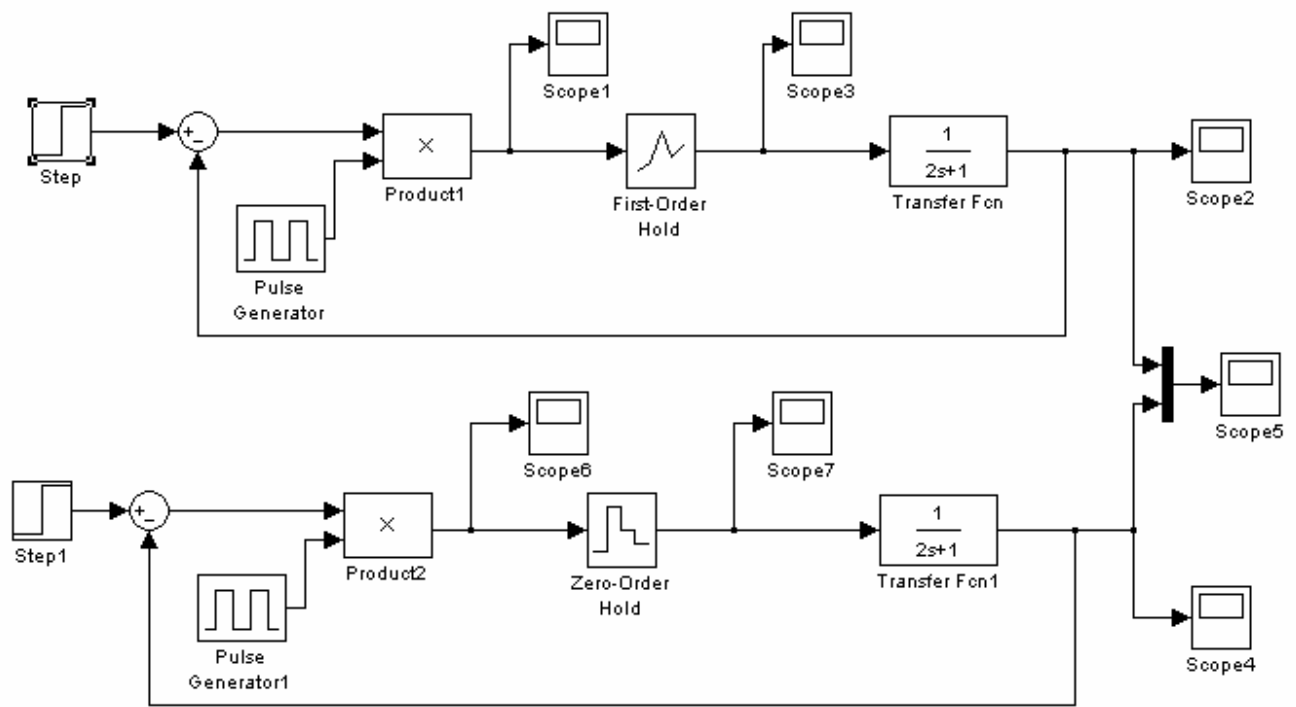


Рисунок 15.11. Дослідження впливу різних екстраполяторів на динамічні процеси в дискретних системах

15.3. ЗМІСТ ЗВІТУ

У звіті про лабораторну роботу необхідно привести:

1. Назва й ціль лабораторної роботи.
2. Схеми моделей лінійної дискретної САУ.
3. Графіки, які отримані по кожному пункту досліджень.
4. Виводи по лабораторній роботі.

Таблиця 15.1. Варіанти завдань до лабораторної роботи №15.

| Варіант | T_1 | k_1 | Період дискретності, T | | | |
|---------|-------|-------|--------------------------|-----|------|------|
| | | | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 0,8 | 0,4 | 1 | 0,5 | 0,1 | 0,01 |
| 2 | 0,9 | 1,2 | 0,9 | 0,3 | 0,1 | 0,03 |
| 3 | 1,1 | 1,5 | 1,2 | 0,4 | 0,2 | 0,02 |
| 4 | 1,2 | 0,7 | 1,3 | 0,5 | 0,09 | 0,03 |

| | | | | | | |
|----|-----|------|-----|-----|------|------|
| 5 | 1,4 | 1,2 | 1,5 | 0,3 | 0,1 | 0,01 |
| 6 | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 0,6 | 0,08 | 0,01 |
| 7 | 1,8 | 0,8 | 1,0 | 0,4 | 0,1 | 0,03 |
| 8 | 2,0 | 1,5 | 1 | 0,5 | 0,1 | 0,01 |
| 9 | 2,2 | 0,7 | 0,9 | 0,3 | 0,1 | 0,03 |
| 10 | 2,4 | 1,1 | 1,2 | 0,4 | 0,2 | 0,02 |
| 11 | 0,5 | 1,9 | 1,3 | 0,5 | 0,09 | 0,03 |
| 12 | 0,7 | 1,3 | 1,5 | 0,3 | 0,1 | 0,01 |
| 13 | 2,5 | 0,6 | 1,2 | 0,6 | 0,08 | 0,01 |
| 14 | 1,7 | 1,2 | 1,0 | 0,4 | 0,1 | 0,03 |
| 15 | 0,8 | 1,8 | 1 | 0,5 | 0,1 | 0,01 |
| 16 | 2,1 | 1,6 | 0,9 | 0,3 | 0,1 | 0,03 |
| 17 | 2,7 | 0,8 | 1,2 | 0,4 | 0,2 | 0,02 |
| 18 | 3,3 | 0,9 | 1,1 | 0,7 | 0,1 | 0,04 |
| 19 | 1,2 | 2,0 | 1,8 | 0,4 | 0,09 | 0,01 |
| 20 | 1,9 | 1,35 | 1,5 | 0,6 | 0,08 | 0,02 |

Закінчення таблиці 15.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|-----|------|-----|-----|------|------|
| 21 | 1,1 | 1,65 | 1,4 | 0,5 | 0,07 | 0,01 |
| 22 | 2,5 | 1,8 | 1,5 | 0,8 | 0,1 | 0,03 |
| 23 | 2,1 | 0,5 | 1,1 | 0,4 | 0,1 | 0,05 |
| 24 | 1,3 | 0,7 | 1,0 | 0,3 | 0,1 | 0,03 |
| 24 | 1,5 | 1,8 | 1,2 | 0,4 | 0,2 | 0,02 |
| 26 | 1,8 | 1,3 | 1,1 | 0,7 | 0,1 | 0,04 |
| 27 | 0,8 | 0,5 | 1,8 | 0,4 | 0,09 | 0,01 |
| 28 | 2,5 | 1,1 | 1,5 | 0,6 | 0,08 | 0,02 |
| 29 | 2,3 | 1,3 | 1,4 | 0,5 | 0,07 | 0,01 |
| 30 | 1,6 | 0,9 | 1,5 | 0,8 | 0,1 | 0,03 |
| 31 | 1,3 | 1,4 | 1,1 | 0,4 | 0,1 | 0,03 |
| 32 | 1,7 | 0,8 | 1,2 | 0,5 | 0,09 | 0,02 |
| 33 | 1,9 | 0,9 | 1,1 | 0,6 | 0,1 | 0,04 |

| | | | | | | |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|
| 34 | 2,9 | 1,4 | 1,5 | 0,7 | 0,1 | 0,05 |
|----|-----|-----|-----|-----|-----|------|

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 16

ДОСЛІДЖЕННЯ ЧАСТОТНИХ ХАРАКТЕРИСТИК ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ

Ц І Л Ь Р О Б О Т Ї - експериментальне визначення частотних характеристик дискретної системи, побудова за експериментальними даними амплітудної й фазової характеристик, а також амплітудно-фазової характеристики з перевіркою значень експериментальних і теоретичних характеристик для даних частот.

16.1. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ З ТЕОРІЇ

Побудова частотних характеристик дискретних систем має ряд особливостей, які обумовлені їхньою періодичністю з періодом, кратним частоті квантування $\omega_0 = \frac{2\pi}{T_0}$.

Вираження для частотних характеристик імпульсних систем утворюються із їхніх передаточних функцій шляхом заміни оператора z на $e^{j\omega T_0}$. Частота ω входить у показник ступеня числа e , тому частотні характеристики являються періодичними функціями частоти, період зміни яких дорівнює $\pm \pi/T_0$. Отже, не можна розрізнити складові, частоти яких кратні частоті квантування імпульсного елемента $\omega_0 = 2\pi/T_0$.

Таким чином, частотна передаточна функція розімкненої імпульсної системи має вигляд:

$$W(e^{j\omega T}) = W(z)|_{e^{j\omega T}}$$

Функція $W(e^{j\omega T_0})$ являє собою комплексний спектр дискретної передаочної функції розімкнутої імпульсної системи $W(z)$ і повністю характеризує частотні властивості розімкнутої системи, тобто дозволяє обчислити сталу реакцію системи на гратчастий гармонійний вплив $x(nT) = X_m \sin(\omega n T_0)$ довільної частоти ω .

Як і для безперервних лінійних систем розглядають амплітудну, фазову, дійсну й мниму частотні характеристики:

$$A(\omega) = |W(e^{j\omega T_0})|;$$

$$\varphi(\omega) = \arg W(e^{j\omega T_0});$$

$$P(\omega) = \operatorname{Re} W(e^{j\omega T_0});$$

$$Q(\omega) = \operatorname{Im} W(e^{j\omega T_0}).$$

Амплітудно-фазова частотна характеристика розімкнутої імпульсної системи $W(e^{j\omega T_0})$ будується по точках в інтервалі частот $0 \leq \omega \leq T_0$.

Існують наступні способи побудови частотних характеристик:

- 1) по дискретній передаточній функції $W(z)$ із заміною $z = e^{j\omega T_0}$;
- 2) по ваговій функції приведеної безперервної частини дискретної системи;
- 3) по частотній характеристиці безперервної частини на основі співвідношення:

$$W^*(p) = \frac{1}{T_0} \sum_{r=-\infty}^{\infty} W(p - jr\omega_0),$$

- 4) з використанням w -перетворення.

Одним з достоїнств застосування частотних характеристик є можливість їхнього експериментального одержання. Експеримент полягає в наступному. На вхід системи (ланки) подається синусоїдальний сигнал певної частоти ω (рис. 16.1):

$$x(t) = X_m \sin \omega t .$$

Через якийсь час, що необхідний для протікання перехідного процесу

(рис.15.1), елемент увійде в режим сталих змушених коливань. При цьому, вихідна величина $y(t)$ буде змінюватися за гармонійним законом з тією же частотою ω , але з амплітудою, що відрізняється, Y_m та зрушенням Δt_φ по осі часу (рис. 16.1):

$$y(t) = Y_m \sin(\omega t + \varphi),$$
$$\varphi = (\Delta t_\varphi / T) \cdot 360 \quad (16.1)$$

φ - фазове зрушення між вхідним і вихідним сигналами, градус.

Повторюючи такий експеримент при фіксованому X_m для різних значень частоти (від 0 до ∞), можна встановити, що амплітуда Y_m і фазове зрушення φ вихідного сигналу конкретного елемента залежать від частоти впливу. Подаючи гармонійний вплив на вхід різних елементів, можна переконатися, що величини Y_m і φ залежать також від типу й параметрів елемента. Отже, залежності амплітуди Y_m і зрушення фаз φ від значень частоти ω можуть служити характеристиками динамічних властивостей елементів. Амплітуда вихідного сигналу Y_m залежить ще від амплітуди вхідного сигналу X_m , тому доцільно при описі передаточних властивостей елементів розглядати відношення амплітуд Y_m/X_m .

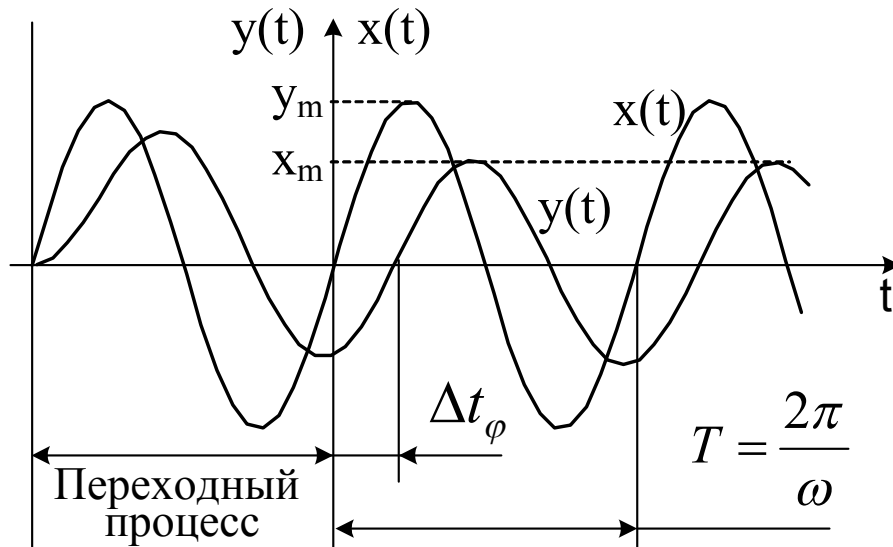
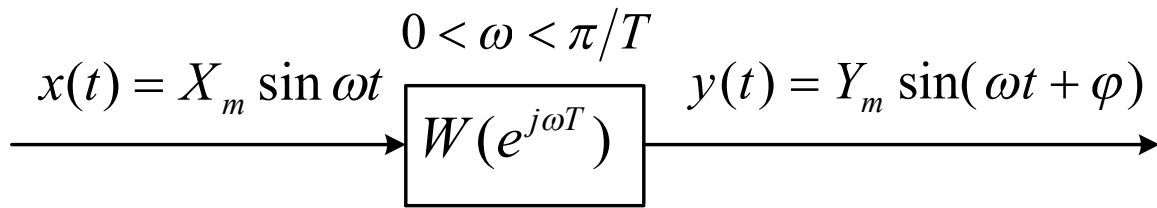


Рисунок 16.1. До визначення частотних характеристик.

У даній роботі визначаються частотні характеристики для аперіодичної, реальної інтегруючої та коливальної ланки.

16.2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати схему одержання частотних характеристик ланок згідно рис. 16.2. В якості об'єкта досліджування використовувати модель аперіодичної ланки з параметрами, якв приведені в таблиці 16.3. Амплітуду вхідного синусоїдального сигналу встановити рівній одиниці: $X_m = 1$. Період дискретності T_0 вибрати по таблиці 16.3 відповідно до варіанта.

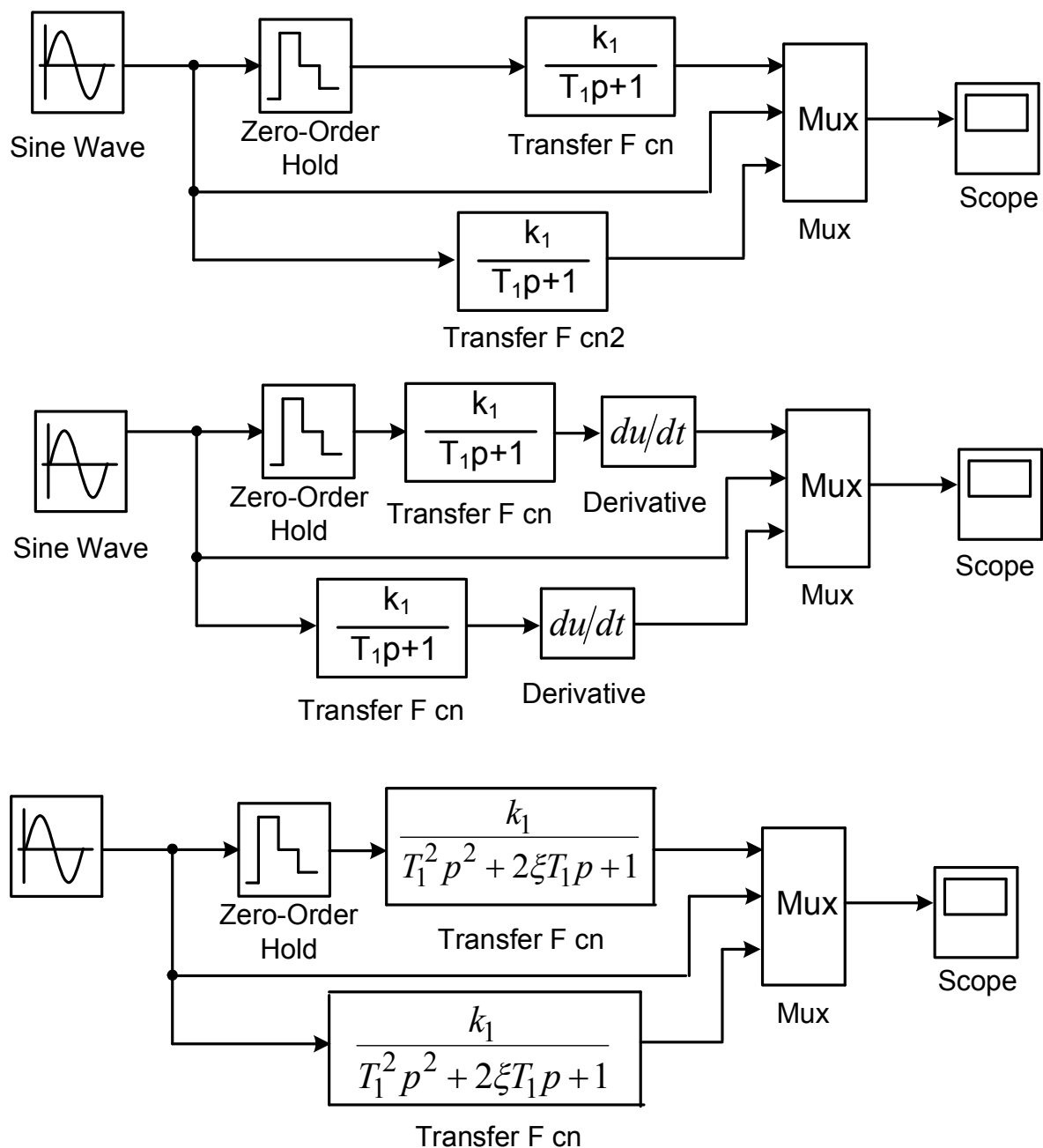


Рисунок 16.2. Схема одержання частотних характеристик .

2. Змінюючи частоту вхідного сигналу виміряти й занести в таблицю 16.1. значення амплітуди Y_m і зрушення по осі часу Δt_φ для кожного значення частоти при заданих значеннях періоду дискретності. Вимірювання амплітуди Y_m і зрушення по осі часу Δt_φ виконуються після закінчення перехідного процесу - коли амплітуда вихідного сигналу Y_m стає постійною.

Таблиця 16.1.

| | | | | | | | | | | | | | |
|------------------|------------------------|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|--|
| ω , рад/с | | | | | | | | | | | | | |
| $T_0=0$ | Δt_φ , с | | | | | | | | | | | | |
| | Y_m | | | | | | | | | | | | |
| T_0' | Δt_φ , с | | | | | | | | | | | | |
| | Y_m | | | | | | | | | | | | |
| T_0'' | Δt_φ , с | | | | | | | | | | | | |
| | Y_m | | | | | | | | | | | | |

При виконанні моделювання необхідно для кожного діапазону частот задавати свій час моделювання $t_{\text{мод}}$ (Stop time).

3. Виконати моделювання й одержати частотні характеристики для реальної інтегруючої ланки. Результати занести в таблицю 16.1.

4. Виконати моделювання й одержати частотні характеристики для коливальної ланки з параметрами $\xi = 0.5$, k і T - таблиця 16.3. Результати занести в таблицю 16.1

5. За отриманим даними розраховуються частотні характеристики $A(\omega)$, $\varphi(\omega)$ - використовуючи формулу (16.1), а також $P(\omega) = A(\omega) \cos \varphi(\omega)$; $Q(\omega) = A(\omega) \sin \varphi(\omega)$; $W(j\omega) = P(\omega) + jQ(\omega)$. Результати занести в таблицю 16.2.

Таблиця 16.2.

| Замір | ω , рад/с | $A(\omega)$ | $\varphi(\omega)$ | $P(\omega)$ | $Q(\omega)$ | $W(j\omega)$ |
|-------|------------------|-------------|-------------------|-------------|-------------|--------------|
| | | | | | | |

6. Побудувати експериментальні частотні характеристики досліджуваних ланок: амплітудну частотну характеристику, фазову частотну характеристику, дійсні й мниму частотні характеристики, амплітудно-фазову частотну характе-

ристику.

7. Вивести співвідношення для частотних характеристик кожного з досліджуваних ланок, взявши за основу вираження для їхніх передатних функцій. Розрахувати й побудувати теоретичні криві амплітудно-фазочастотної, амплітудно-частотної, фазочастотної, дійсної і мнимої частотних характеристик на одних графіках з експериментальними кривими (результати розрахунку звести в таблицю виду табл. 16.2). Порівняти їх.

Для кожної ланки побудувати теоретичну логарифмічну амплітудно-частотну характеристику асимптотично.

16.3.ЗМІСТ ЗВІТУ

1. Короткий опис завдання й методу дослідження.
2. Схема одержання частотних характеристик.
3. Результати експерименту, зведені в таблицю.
4. Результати розрахунку за експериментальним даними, зведені в таблицю.
5. Виведені співвідношення для теоретичної побудови частотних характеристик.
6. Результату розрахунку за теоретичним даними, зведені в таблицю.
7. Графіки теоретичних і експериментальних кривих частотних характеристик.
8. Виводи про роботу.

Таблиця 16.3. Варіанти завдань до лабораторної роботи №16.

| Варіант | T_1 | k_1 | Період дискретності, T_0 | |
|---------|-------|-------|----------------------------|-----|
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
| 1 | 2,5 | 1,1 | 0,1 | 0,4 |
| 2 | 2,7 | 1,2 | 0,2 | 0,5 |
| 3 | 3,3 | 0,8 | 0,1 | 0,5 |
| 4 | 1,9 | 0,6 | 0,85 | 0,3 |

Закінчення таблиці 16.3

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 |
|----|-----|------|------|------|
| 5 | 3,5 | 1,5 | 0,2 | 0,4 |
| 6 | 2,8 | 1,3 | 0,1 | 0,3 |
| 7 | 3,8 | 0,5 | 0,15 | 0,35 |
| 8 | 5,0 | 0,7 | 0,25 | 0,7 |
| 9 | 2,1 | 1,1 | 0,07 | 0,35 |
| 10 | 4,5 | 0,6 | 0,15 | 0,55 |
| 11 | 3,9 | 0,8 | 0,2 | 0,5 |
| 12 | 1,7 | 1,2 | 0,1 | 0,4 |
| 13 | 2,3 | 1,4 | 0,15 | 0,5 |
| 14 | 3,2 | 1,1 | 0,2 | 0,6 |
| 15 | 5,5 | 0,7 | 0,25 | 0,6 |
| 16 | 4,2 | 0,5 | 0,1 | 0,4 |
| 17 | 4,8 | 0,8 | 0,15 | 0,45 |
| 18 | 5,2 | 1,3 | 0,2 | 0,55 |
| 19 | 5,6 | 1,2 | 0,3 | 0,7 |
| 20 | 2,0 | 1,3 | 0,08 | 0,3 |
| 21 | 3,0 | 0,9 | 0,1 | 0,35 |
| 22 | 4,0 | 0,7 | 0,2 | 0,5 |
| 23 | 1,9 | 1,4 | 0,07 | 0,35 |
| 24 | 2,9 | 1,2 | 0,1 | 0,45 |
| 24 | 3,9 | 0,8 | 0,15 | 0,5 |
| 26 | 4,9 | 1,1 | 0,2 | 0,55 |
| 27 | 2,2 | 1,3 | 0,1 | 0,3 |
| 28 | 3,3 | 0,75 | 0,1 | 0,4 |
| 29 | 4,4 | 0,65 | 0,15 | 0,45 |
| 30 | 5,5 | 1,25 | 0,2 | 0,6 |
| 31 | 5,1 | 1,1 | 0,15 | 0,5 |
| 32 | 4,7 | 0,85 | 0,1 | 0,4 |
| 33 | 3,8 | 1,2 | 0,15 | 0,3 |
| 34 | 2,0 | 1,4 | 0,1 | 0,3 |

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 17

ДОСЛІДЖЕННЯ СТІЙКОСТІ ЛІНІЙНИХ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО УПРАВЛІННЯ

ЦІЛЬ РОБОТИ - експериментальне дослідження динамічних процесів у лінійній дискретній системі при різних параметрах елементів системи й періоду дискретності, визначення умов стійкості й дослідження впливу зміни параметрів на стійкість.

17.1. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ З ТЕОРІЇ

Як і для безперервних систем, стійкість дискретних систем є необхідною умовою їхньої працездатності.

Стійкість системи характеризується її вільним рухом, що визначається вільною складовою процесу регулювання вихідної величини. Лінійна дискретна система називається стійкою, якщо вільна складова процесу регулювання $y_{cv}(n, \sigma)$ загасає із часом. Сформульована умова стійкості зводиться до виконання рівності:

$$\lim_{n \rightarrow \infty} y_{cv}(n, \sigma) = 0 \quad (17.1)$$

для всіх σ з інтервалу $0 < \sigma < 1$. Якщо хоча б для одного значення σ

$$\lim_{n \rightarrow \infty} y_{cv}(n, \sigma) = \infty \quad (17.2)$$

то дискретна система називається нестійкою. Якщо, нарешті,

$$\lim_{n \rightarrow \infty} y_{cv}(n, \sigma) = const \quad (17.3)$$

або не існує, то дискретна система перебуває на границі стійкості.

У переважній більшості випадків величина межі $\lim_{n \rightarrow \infty} y_{cv}(n, \sigma)$ при кожному σ визначається його значенням при $\sigma = 0$. У тих випадках, коли при $\sigma = 0$ виконується співвідношення (17.1), а при $\sigma \neq 0$ - кожне зі співвідношень (17.2), (17.3) говорять про так звану високочастотну нестійкість дискретної системи.

Таким чином, щоб оцінити стійкість дискретної системи, необхідно знайти вільну складову процесу регулювання. Вільна складова процесу регулювання визначається рішенням однорідного різницевого рівняння замкнутої дискретної системи

$$a_0 y(n) + a_1 y(n-1) + a_2 y(n-2) + \dots + a_m y(n-m) = 0, \quad (17.4)$$

де m - порядок системи.

Рішення однорідного різницевого рівняння при некрратних коріннях характеристичного рівняння може бути записане в такий спосіб:

$$y_{ce}(n) = \sum_{i=1}^m C_i z_i^n \quad (17.5)$$

де z_i - корінь характеристичного рівняння

$$a_0 z^m + a_1 z^{m-1} + a_2 z^{m-2} + \dots + a_m = 0 \quad (17.6)$$

C_i - постійні коефіцієнти, значення яких залежать від властивостей системи, характеру зовнішнього впливу й відносного часу σ .

З рішення (17.5) треба, що для стійкості імпульсної системи необхідно й досить, щоб всі корені характеристичного рівняння замкнутої системи (полюса передаточної функції замкнутої дискретної системи $W_3(z)$) задовольняли умові

$$|z_i| < 1; \quad i = 1, 2, 3, \dots, m \dots \quad (17.7)$$

Якщо хоча б один корінь $|z_i| > 1$, система буде нестійкою. Значенням якогось-небудь кореня $|z_i| = 1$ при всіх інших $|z_i| < 1$ визначається границя стійкості дискретної системи.

Графічно область стійкості дискретної системи на площині z коренів характеристичного рівняння зображується одиничним колом.

Таким чином, дослідження стійкості зводиться до вивчення розташування коренів характеристичного рівняння замкнутої дискретної системи щодо одиничної окружності.

Критерії стійкості використовуються для дослідження стійкості дискретних систем без знаходження коренів характеристичного рівняння.

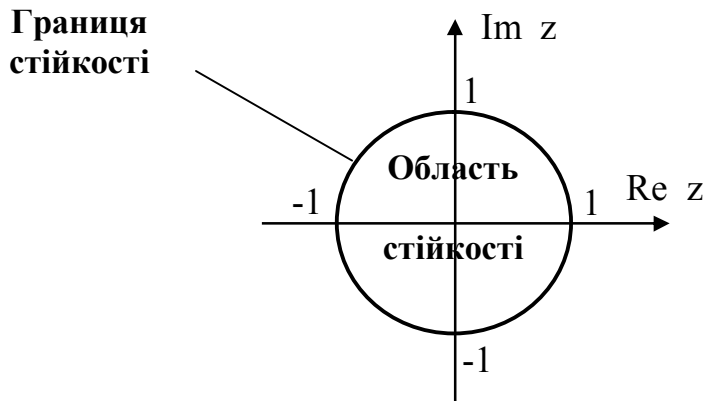


Рисунок 17.1. Області стійкості на площині Z

Для судження про стійкість дискретних систем можна використовувати звичайні критерії стійкості лінійних систем, але при цьому доводиться враховувати лише деякі особливості дискретних систем. Так, для того щоб застосувати критерій Гурвіца, необхідно попередньо в характеристичному рівнянні замкненої дискретної системи

$$a_0 + a_1 z + a_2 z^2 + \dots + a_n z^n = 0$$

зробити заміну змінної z на змінну ω шляхом підстановки

$$z = \frac{1 + \omega}{1 - \omega}$$

У результаті підстановки одержуємо перетворене характеристичне рівняння:

$$A_0 \omega^n + A_1 \omega^{n-1} + A_2 \omega^{n-2} + \dots + A_n = 0.$$

Дослідження стійкості по отриманому перетвореному характеристичному рівнянню виконується відповідно до критерію Гурвіца для безперервних систем.

Для дослідження стійкості дискретних систем за критерієм Михайлова застосовують наступне формулювання:

дискретна система стійка, якщо при зростанні ω від 0 до π/T характеристичний вектор системи $F(e^{j\omega T})$ повернеться проти годинникової стрілки на кут $n\pi$. Якщо годограф характеристичного вектора $F(e^{j\omega T})$ проходить через початок координат, то система перебуває на границі стійкості.

У даній роботі необхідно експериментально й теоретично дослідити стійкість замкнутих дискретних систем 2-го й 3-го порядку.

17.2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати схему системи, яка моделюється згідно рис.17.2,а.

2. Установити коефіцієнти моделі згідно таблиці 17.1; $k_1 > 0$.

3. Визначити експериментально граничне значення коефіцієнта передачі розімкнутої системи. Для цього необхідно, поступово збільшуючи значення коефіцієнта k_1 , домогтися незатухаючих коливань на виході системи. Графік перехідного процесу представити у звіті.

4. Змінюючи значення k_1 , одержати три види перехідних процесів у системі: аперіодичний монотонний, аперіодичний с перерегулюванням і загасаючий коливальний. Для кожного виду перехідного процесу вказати значення k_1 і представити у звіті графіки перехідних процесів.

5. Змінити значення періоду дискретності T_0 і повторити п. 3-4.

6. Зібрати схему системи згідно рис.17.2,б і повторити п.3-5.

7. Зібрати схему системи згідно рис.17.2,в і повторити п.3-5.

8. Зібрати схему системи згідно рис.17.2,г і повторити п.3-5.

9. Використовуючи загальну умову стійкості оцінити стійкість досліджуваних систем (рис.17.2).

10. Оцінити стійкість досліджуваних систем (рис.17.2) за критерієм Гурвіца.

11. Для системи, яка представлена на рис. 17.2,в,г оцінити стійкість за критерієм Михайлова.

12. Побудувати АФЧХ системи (рис.17.2,в,г) для розімкнутого ланцюга при чотирьох значеннях k і оцінити стійкість дискретної системи.

13. Побудувати логарифмічні амплітудні й фазову частотні характеристики системи (рис.17.2,в,г) для розімкнутого ланцюга при чотирьох значеннях k і оцінити стійкість дискретної системи.

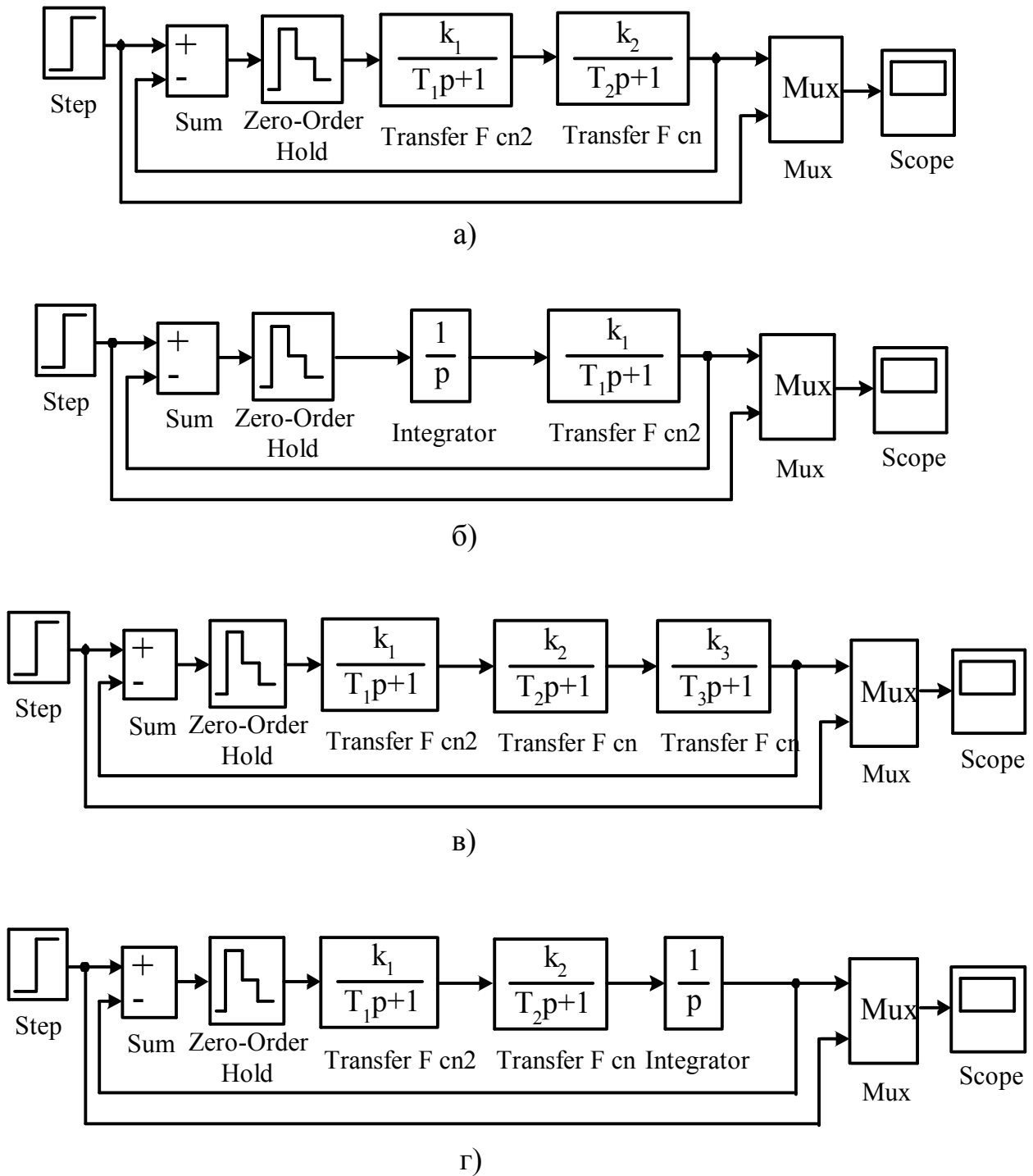


Рисунок 17.2. Схема дослідження стійкості дискретних систем

Таблиця 17.1. Варіанти завдань до лабораторної роботи №17.

| Варіант | k_1 | T_1 | k_2 | T_2 | T_3 | Період дискретності | |
|---------|-------|-------|-------|-------|-------|---------------------|-------|
| | | | | | | T_0 | T_0 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
| 1 | 0,8 | 1,4 | 1 | 2,5 | 3,1 | 0,1 | 0,7 |

Закінчення таблиці 17.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 |
|----|-----|------|-----|-----|-----|-----|-----|
| 2 | 0,9 | 1,2 | 0,9 | 2,3 | 3,1 | 0,3 | 0,8 |
| 3 | 1,1 | 1,5 | 1,2 | 2,4 | 3,2 | 0,2 | 0,9 |
| 4 | 1,2 | 1,7 | 1,1 | 2,5 | 3,3 | 0,3 | 0,8 |
| 5 | 1,4 | 1,2 | 0,5 | 2,3 | 3,5 | 0,1 | 0,7 |
| 6 | 1,6 | 1,4 | 0,4 | 2,6 | 3,4 | 0,1 | 0,9 |
| 7 | 1,8 | 1,8 | 1,0 | 2,4 | 3,1 | 0,3 | 0,8 |
| 8 | 1,0 | 1,5 | 1 | 2,5 | 3,3 | 0,1 | 0,7 |
| 9 | 1,2 | 1,7 | 0,9 | 2,3 | 3,2 | 0,3 | 0,9 |
| 10 | 1,4 | 1,1 | 1,2 | 2,4 | 3,2 | 0,2 | 0,7 |
| 11 | 0,5 | 1,9 | 1,3 | 2,5 | 3,1 | 0,3 | 0,9 |
| 12 | 0,7 | 1,3 | 1,5 | 2,3 | 3,2 | 0,1 | 0,8 |
| 13 | 0,9 | 1,6 | 1,2 | 2,6 | 3,3 | 0,1 | 0,7 |
| 14 | 1,7 | 1,2 | 1,0 | 2,4 | 3,4 | 0,3 | 0,8 |
| 15 | 0,8 | 1,8 | 1 | 2,5 | 3,1 | 0,1 | 0,9 |
| 16 | 2,1 | 1,6 | 0,9 | 2,3 | 3,2 | 0,3 | 0,7 |
| 17 | 2,7 | 1,8 | 0,2 | 2,4 | 3,4 | 0,2 | 0,9 |
| 18 | 1,3 | 1,9 | 1,1 | 2,7 | 3,3 | 0,1 | 0,6 |
| 19 | 1,2 | 1,2 | 1,0 | 2,4 | 3,5 | 0,1 | 0,8 |
| 20 | 1,4 | 1,35 | 1,1 | 2,6 | 3,2 | 0,2 | 0,8 |
| 21 | 1,1 | 1,65 | 1,4 | 2,5 | 3,4 | 0,1 | 0,6 |
| 22 | 0,5 | 1,8 | 1,5 | 2,8 | 3,1 | 0,3 | 0,7 |
| 23 | 1,1 | 1,5 | 1,1 | 2,4 | 3,2 | 0,1 | 0,8 |
| 24 | 1,3 | 1,7 | 1,0 | 2,3 | 3,4 | 0,3 | 0,9 |
| 24 | 1,5 | 1,8 | 1,2 | 2,4 | 3,2 | 0,2 | 0,6 |
| 26 | 1,3 | 1,3 | 1,1 | 2,7 | 3,1 | 0,1 | 0,9 |
| 27 | 0,8 | 1,5 | 1,8 | 2,4 | 2,9 | 0,1 | 0,7 |
| 28 | 1,2 | 2,1 | 1,1 | 2,6 | 2,2 | 0,2 | 0,8 |
| 29 | 1,3 | 1,3 | 1,4 | 2,5 | 3,7 | 0,1 | 0,7 |
| 30 | 1,6 | 1,9 | 0,8 | 2,8 | 3,1 | 0,3 | 0,8 |
| 31 | 1,3 | 1,4 | 1,1 | 2,4 | 3,1 | 0,3 | 0,9 |
| 32 | 1,4 | 1,8 | 1,2 | 2,5 | 3,4 | 0,2 | 0,7 |
| 33 | 1,3 | 1,9 | 1,1 | 2,6 | 3,5 | 0,3 | 0,8 |
| 34 | 1,9 | 1,4 | 0,5 | 2,7 | 3,1 | 0,1 | 0,7 |

17.3 ЗМІСТ ЗВІТУ

Звіт про лабораторну роботу повинен містити:

1. Короткий опис завдання й методу дослідження.
2. Схему моделювання.
3. Графіки перехідних процесів із зазначенням коефіцієнтів передачі.
4. Оцінка стійкості дискретної системи по пунктах порядку виконання роботи.
5. Логарифмічні амплітудні й фазові частотні характеристики системи.
6. Виводи по роботі з аналізом результатів і розрахунків.

ЛАБОРАТОРНА РОБОТА 18

ДОСЛІДЖЕННЯ ЯКОСТІ УПРАВЛІННЯ В ЛІНІЙНИХ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМАХ УПРАВЛІННЯ

Ц І Л Ь Р О Б О Т И – експериментальне й теоретичне визначення показників точності лінійних дискретних систем автоматичного управління, експериментальне й теоретичне визначення показників якості лінійних дискретних систем автоматичного управління.

18.1. КОРОТКІ ВІДОМОСТІ З ТЕОРІЇ

Для дослідження дискретних систем широке поширення одержав апарат z -перетворення. Z -перетворення пов'язане з дискретним перетворенням Лапласа за допомогою підстановки: $z = e^{pT}$.

Дискретною передаточною функцією називається відношення z -зображень вихідної $Y(z)$ і вхідної $X(z)$ величин при нульових початкових умо-

вах. У практичних задачах дискретну передаточну функцію визначають по передаточній функції безперервної частини використовуючи таблиці відповідності між перетворенням Лапласа й z-перетворенням для часових функцій.

Визначимо дискретну передаточну функцію системи, передаточна функція приведеної безперервної частини якої дорівнює:

$$H(p) = \frac{1 - e^{-Tp}}{p}; \quad W_1(p) = \frac{k_1}{p(T_1p + 1)}.$$

$$W(p) = H(p) \cdot W_1(p) = \frac{1 - e^{-Tp}}{p} \cdot \frac{k_1}{p(T_1p + 1)} = \frac{k_1(1 - e^{-Tp})}{p^2(T_1p + 1)},$$

$$W(z) = k_1(1 - z^{-1}) \cdot z \left\{ \frac{1}{p^2(T_1p + 1)} \right\}.$$

Представимо вираження $\frac{1}{p^2(T_1p + 1)}$ у вигляді суми найпростіших дробів:

$$\frac{1}{p^2(T_1p + 1)} = \frac{1}{p^2} - \frac{T_1}{p} + \frac{T_1}{p + \frac{1}{T_1}}$$

Визначимо по таблицях z-перетворень:

$$\frac{1}{p} \rightarrow \frac{z}{z-1}; \quad \frac{1}{p^2} \rightarrow \frac{Tz}{(z-1)^2}; \quad \frac{1}{p + \frac{1}{T}} \rightarrow \frac{z}{z-d}, \quad \text{де } d = e^{-\frac{T}{T_1}}.$$

$$\begin{aligned} W(p) &= k_1(1 - z^{-1}) \left(\frac{Tz}{(z-1)^2} - \frac{T_1z}{z-1} + \frac{T_1}{z-d} \right) = \\ &= k_1T \frac{z-d - \frac{T_1}{T}(1-d)(z-1)}{(z-1)(z-d)} = \frac{Az + B}{(z-1)(z-d)}, \end{aligned}$$

$$\text{де } A = k_1T - k_1T_1(1-d); \quad B = k_1T_1(1-d) - k_1Td.$$

Якість дискретних систем управління характеризується такими ж показниками, як і якість безперервних систем: точністю в сталих режимах, триваліс-

ттю й перерегулюванням перехідного процесу.

Тривалість і перерегулювання оцінюють безпосередньо по перехідній характеристиці. Перехідна характеристика дискретної системи будується набагато простіше, ніж для безперервної системи. Для цього записують z -зображення вихідної величини при одиничному східчастому впливі

$$X(z) = \frac{z}{z-1} \Phi(z),$$

а потім по зображенню знаходять оригінал – гратчасту функцію $x(i)$.

У простих випадках функцію $x(i)$ можна знайти за допомогою таблиць зворотного z -перетворення, розклавши попередньо зображення $X(z)$ на прості дроби.

У тих випадках, коли розкладання на дроби пов'язане із труднощами, доцільно розкласти функцію $X(z)$ у степеневий ряд по негативних ступенях z (діленням чисельника на знаменник):

$$X(z) = \sum_{i=0}^{\infty} c_i z^{-i} = c_0 + c_1 z^{-1} + c_2 z^{-2} + \dots + c_l z^{-l} + \dots$$

З визначення z -перетворення випливає, що коефіцієнти степеневого ряду по степенях z^{-l} являють собою значення перехідної характеристики $h(t)$ у дискретні моменти часу $t = i$ ($i = 1; 2; 3; \dots$):

$$c_0 = x(0); \quad c_1 = x(T); \quad c_2 = x(2T); \quad \dots; \quad c_l = x(lT); \quad \dots$$

Точність дискретної системи оцінюють за сталим значенням сигналу помилки:

$$\varepsilon(\infty) = \lim_{i \rightarrow \infty} \varepsilon(iT) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} E(z) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} W_E(z) X(z).$$

При східчастому впливі $x(t) = a1(t)$ стала помилка:

$$\varepsilon(\infty) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{z-1}{z} \frac{1}{1+W(z)} \frac{az}{z-1} = \frac{a}{1+W(z)}.$$

ї називається статичною помилкою або помилкою системи по положенню.

При $x(t) = a \cdot t$ стала помилка називається помилкою системи від швидко-

сті й визначається як

$$\varepsilon(\infty) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{aT}{(1-z)W(z)}$$

Якщо $x(t) = \frac{a \cdot t^2}{2!}$, то одержуємо помилку системи від прискорення:

$$\varepsilon(\infty) = \lim_{z \rightarrow 1} \frac{aT^2}{(1-z)^2 W(z)}$$

З останніх двох виражень випливає, що стала помилка від задаючого впливу дискретної системи не тільки прямо пропорційна величині впливу, але й періоду дискретності.

Дискретні системи класифікуються відповідно до числа полюсів дискретної передаточної функції розімкнутої системи $W(z)$ при $z = 1$. Якщо дискретна передаточна функція дискретної розімкнутої системи

$$W(z) = \frac{W^*(z)}{(z-1)^{\nu}}$$

а $W^*(z)$ не містить полюсів при $z = 1$, то при $\nu = 0$ система називається **статичною**, при $\nu = 1$ - **астатичною першого порядку** й т.д.

Для того щоб дискретна система мала нульову сталу помилку від задаючого впливу необхідно, щоб степінь ν астатизму системи перевищувала степінь q полінома вхідного впливу $x(t)$, тобто:

$$\varepsilon(\infty) = 0, \text{ якщо } q < \nu;$$

$$\varepsilon(\infty) = \frac{aT^q}{W(1)}, \text{ якщо } q = \nu;$$

$$\varepsilon(\infty) = \infty, \text{ якщо } q > \nu;$$

Звідси видно, що при східчастому впливі помилка дорівнює нулю, якщо передаточна функція $W(z)$ розімкнутого контуру має хоча б один полюс, який дорівнює одиниці. Аналогічно можна показати, що при лінійному впливі помилка дорівнює нулю, якщо не менш двох полюсів дорівнюють одиниці.

18.2. ПОРЯДОК ВИКОНАННЯ РОБОТИ

1. Зібрати схему моделювання дискретної системи, що приведена на рис.18.1. Дослідити вплив періоду дискретності на якість управління в лінійній дискретній системі. Для цього встановити параметри моделі (рис.18.1), згідно таблиці 18.1. Параметри дискретної моделі у вигляді Z-перетворення розраховуються по формулах, які приведені у теоретичній частині.

2. Не змінюючи значення T_1 , k , одержати перехідні процеси при заданих значеннях періоду дискретності (табл.18.1). Для кожного перехідного процесу вказати значення T и представити у звіті графіки перехідних процесів.

3. Виконати аналітичні розрахунки перехідних процесів у дискретній системі для приведених значень періоду дискретності.

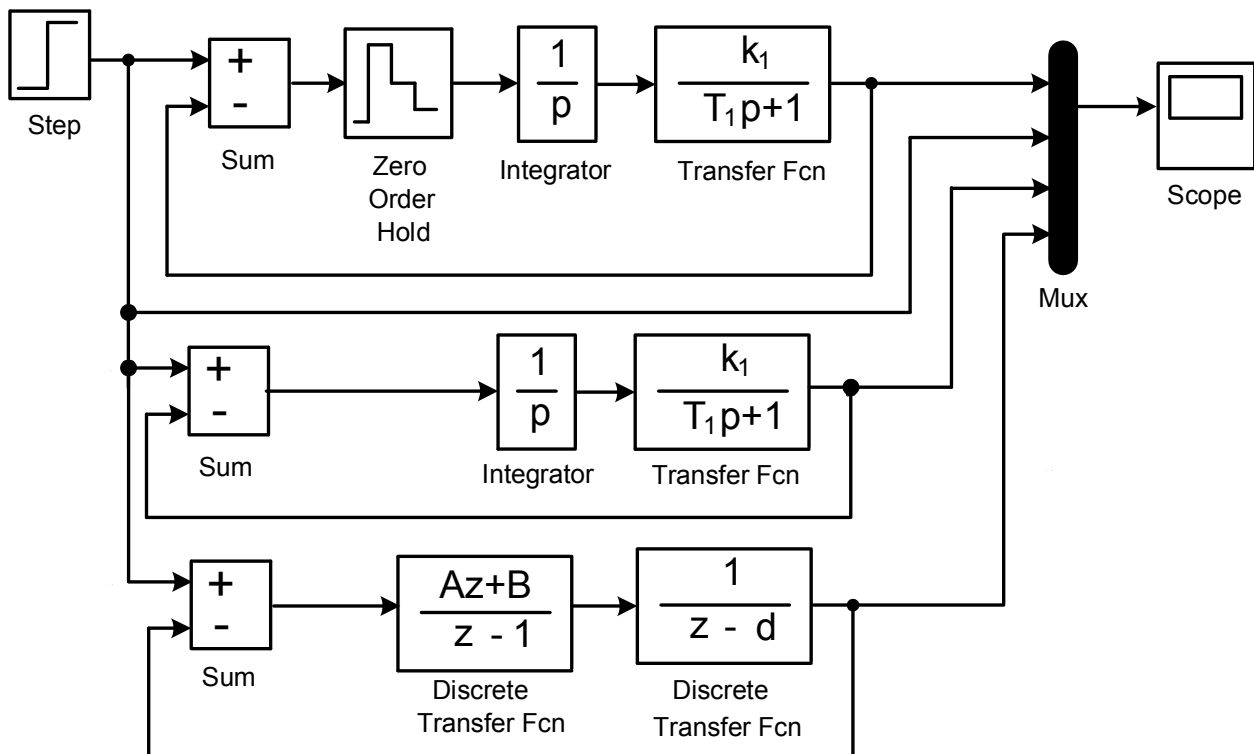


Рисунок 18.1. Схема дослідження показників якості дискретної системи.

4. Зібрати схему моделювання рис.18.2,а. За графіком перехідного процесу визначити сталі значення сигналу помилки при східчастій зміні задаючого впливу, $x(t) = 1(t)$. Графік перехідного процесу привести у звіті.

5. Дослідити вплив коефіцієнта передачі розімкнутого контуру на вели-

чину сигналу помилки. Для цього одержати графіки перехідних процесів і визначити величину сигналу помилки при різних значеннях коефіцієнта передачі. У звіті привести відповідні графіки перехідних процесів.

6. Дослідити вплив періоду дискретності на величину сигналу помилки. Для цього одержати графіки перехідних процесів і визначити величину сигналу помилки при заданих значеннях періоду дискретності (табл.18.1). У звіті привести відповідні графіки перехідних процесів.

7. Зібрати схему моделювання рис.18.2,б. За графіком перехідного процесу визначити сталі значення сигналу помилки при лінійній зміні задаючого впливу, $x(t) = 0,5 t 1(t)$. Графік перехідного процесу привести у звіті.

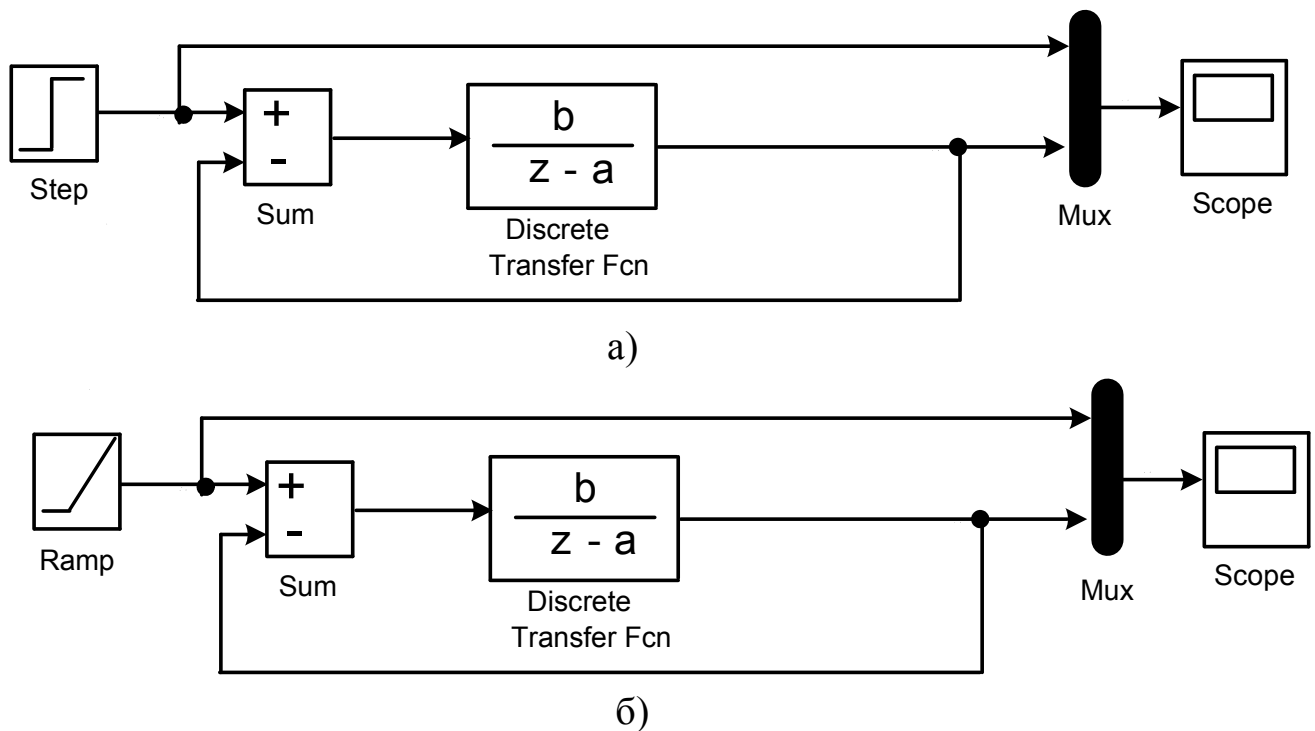


Рисунок 18.2. Схема дослідження точності статичної дискретної системи при різних вхідних впливах

8. Дослідити точність дискретної системи з астатизмом першого порядку при східчастому задаючому впливі. Для цього зібрати схему моделювання, яка приведена на рис. 18.3,а. Виконати моделювання й визначити сталі значення сигналу помилки. Привести у звіті графік перехідного процесу.

9. Дослідити показники точності дискретної системи з астатизмом першого порядку при лінійному задаючому впливі $x(t) = 0,5 t 1(t)$. Для цього необхідно зібрати схему, яка представлена на рис. 18.3,б. Виконати моделювання й визначити сталі значення сигналу помилки. Привести у звіті графік перехідного процесу.

10. Дослідити вплив періоду дискретності на величину сигналу помилки. Для цього одержати графіки перехідних процесів і визначити величину сигналу помилки при заданих значеннях періоду дискретності (табл.18.1). У звіті привести відповідні графіки перехідних процесів.

11. Для досліджень, передбачених пунктами 5 - 11 розрахувати теоретичні значення сигналу помилки й зрівняти їх з експериментальними значеннями. Зробити висновки.

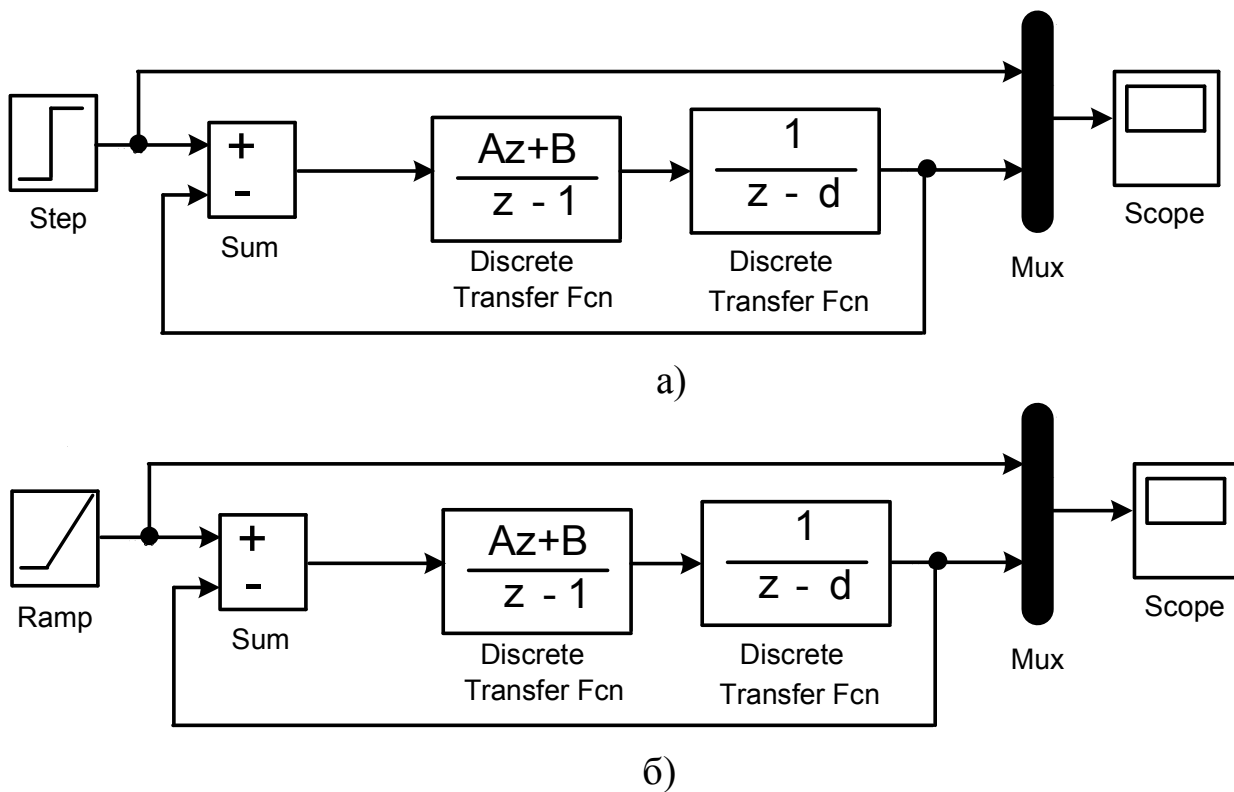


Рисунок 18.3. Схема дослідження точності астатичної дискретної системи при різних вхідних впливах

18.3. ЗМІСТ ЗВІТУ

У звіті про лабораторну роботу необхідно привести:

1. Назва й ціль лабораторної роботи.
2. Схеми моделей лінійних дискретних САУ.
3. Графіки перехідних процесів по кожному пункту порядку виконання роботи
4. Показники якості, розраховані по експериментальним і теоретичним даним.
5. Показники точності, розраховані по експериментальним і теоретичним даним.
6. Висновки по лабораторній роботі.

Таблиця 18.1. Варіанти завдань до лабораторної роботи № 18.

| Варіант | T_1 | k_1 | Період дискретності, T | | | |
|---------|-------|-------|--------------------------|-----|------|------|
| | | | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
| 1 | 0,8 | 0,4 | 1 | 0,5 | 0,1 | 0,01 |
| 2 | 0,9 | 1,2 | 0,9 | 0,3 | 0,1 | 0,03 |
| 3 | 1,1 | 1,5 | 1,2 | 0,4 | 0,2 | 0,02 |
| 4 | 1,2 | 0,7 | 1,3 | 0,5 | 0,09 | 0,03 |
| 5 | 1,4 | 1,2 | 1,5 | 0,3 | 0,1 | 0,01 |
| 6 | 1,6 | 1,4 | 1,2 | 0,6 | 0,08 | 0,01 |
| 7 | 1,8 | 0,8 | 1,0 | 0,4 | 0,1 | 0,03 |
| 8 | 2,0 | 1,5 | 1 | 0,5 | 0,1 | 0,01 |
| 9 | 2,2 | 0,7 | 0,9 | 0,3 | 0,1 | 0,03 |
| 10 | 2,4 | 1,1 | 1,2 | 0,4 | 0,2 | 0,02 |
| 11 | 0,5 | 1,9 | 1,3 | 0,5 | 0,09 | 0,03 |
| 12 | 0,7 | 1,3 | 1,5 | 0,3 | 0,1 | 0,01 |
| 13 | 2,5 | 0,6 | 1,2 | 0,6 | 0,08 | 0,01 |
| 14 | 1,7 | 1,2 | 1,0 | 0,4 | 0,1 | 0,03 |

Закінчення таблиці 18.1

| 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 |
|----|-----|------|-----|-----|------|------|
| 15 | 0,8 | 1,8 | 1 | 0,5 | 0,1 | 0,01 |
| 16 | 2,1 | 1,6 | 0,9 | 0,3 | 0,1 | 0,03 |
| 17 | 2,7 | 0,8 | 1,2 | 0,4 | 0,2 | 0,02 |
| 18 | 3,3 | 0,9 | 1,1 | 0,7 | 0,1 | 0,04 |
| 19 | 1,2 | 2,0 | 1,8 | 0,4 | 0,09 | 0,01 |
| 20 | 1,9 | 1,35 | 1,5 | 0,6 | 0,08 | 0,02 |
| 21 | 1,1 | 1,65 | 1,4 | 0,5 | 0,07 | 0,01 |
| 22 | 2,5 | 1,8 | 1,5 | 0,8 | 0,1 | 0,03 |
| 23 | 2,1 | 0,5 | 1,1 | 0,4 | 0,1 | 0,05 |
| 24 | 1,3 | 0,7 | 1,0 | 0,3 | 0,1 | 0,03 |
| 24 | 1,5 | 1,8 | 1,2 | 0,4 | 0,2 | 0,02 |
| 26 | 1,8 | 1,3 | 1,1 | 0,7 | 0,1 | 0,04 |
| 27 | 0,8 | 0,5 | 1,8 | 0,4 | 0,09 | 0,01 |
| 28 | 2,5 | 1,1 | 1,5 | 0,6 | 0,08 | 0,02 |
| 29 | 2,3 | 1,3 | 1,4 | 0,5 | 0,07 | 0,01 |
| 30 | 1,6 | 0,9 | 1,5 | 0,8 | 0,1 | 0,03 |
| 31 | 1,3 | 1,4 | 1,1 | 0,4 | 0,1 | 0,03 |
| 32 | 1,7 | 0,8 | 1,2 | 0,5 | 0,09 | 0,02 |
| 33 | 1,9 | 0,9 | 1,1 | 0,6 | 0,1 | 0,04 |
| 34 | 2,9 | 1,4 | 1,5 | 0,7 | 0,1 | 0,05 |

\

ПЕРЕЛІК ЛІТЕРАТУРИ

1. Лукас В.А. Теория автоматического управления: Учеб. для вузов. - 2-е изд., перераб. и доп.- М.: Недра, 1990. - 416 с.
2. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория автоматического регулирования и управления. - М.: Наука, 1972. - 768 с.
3. Васильев Д.В., Чуич В.Г. Системы автоматического управления (примеры расчета). - М.: "Высшая школа", 1967. - 419 с.
4. Сборник задач по теории автоматического регулирования и управления. Под редакцией В.А. Бесекерского, издание пятое, переработаное, издательство "Наука", М., 1978. - 512 с.

Навчальне видання
Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з курсу
"Теорія автоматичного управління"
Частина 3

Для студентів, що навчаються за напрямом
6.050201 "Системна інженерія"
(для денної й заочної форм навчання)

Укладачі: Федюн Роман Валерійович
Попов Владислав Олександрович
Найдьонова Тетяна Володимирівна

Рецензент Секірін Олександр Іванович