

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Національний університет кораблебудування
імені адмірала Макарова

**Н. М. Бровинська, М. Я. Хлопенко,
Д. Ю. Шарейко**

ПРАКТИКУМ З ДИСЦИПЛІНИ
"ПРОЕКТУВАННЯ ДИСКРЕТНИХ
ТА ЦИФРОВИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ"

Частина перша

Рекомендовано Методичною радою НУК

Миколаїв 2006

УДК 551.46: 629.12

Бровинська Н.М., Хлопенко М.Я., Шарейко Д.Ю. Практикум з дисципліни "Проектування дискретних та цифрових систем керування". У 2 ч. – Миколаїв: НУК, 2006. – Ч. 1. – 68 с.

Кафедра автоматики

Призначений для студентів електротехнічних спеціальностей НУК, зокрема для тих, що навчаються за спеціальністю 8.092203 "Електромеханічні системи автоматизації та електропривод".

Рецензент д-р техн. наук, професор В.С. Блінцов

ВСТУП

Практикум включає в себе дослідження дискретних систем автоматичного керування та деяких апаратних засобів систем цифрового керування за допомогою ПЕОМ, як ефективного інструмента імітаційного моделювання і аналізу систем керування, що допоможе студенту засвоїти комп'ютерну підтримку проектування цифрових систем автоматичного керування. Збірник задач охоплює основні теоретичні розділи курсу "Проектування дискретних та цифрових систем керування".

Розділ 1. МАТЕМАТИЧНИЙ ОПИС І АНАЛІЗ ДИСКРЕТНИХ ТА ЦИФРОВИХ СИСТЕМ

1.1. Дискретні системи

1. Визначте z -перетворення числової послідовності, яка отримана шляхом квантування функції $e(t) = u(t - 2)$ з частотою 5 Гц ($T = 0,2$ с). Отримайте z -перетворення у вигляді степеневого ряду.

2. Виконайте наступне:

а) Функція часу $e(t) = Ae^{-bt}$ піддається квантуванню з частотою 20 Гц. Отримана числова послідовність має z -перетворення

$$E(z) = \frac{2z}{z - 0,9}. \text{ Визначте параметри } A \text{ і } b.$$

б) Використовуючи результат п. "а", визначте, яка функція $e(t)$, що квантується з частотою 20 Гц, дає z -перетворення $E(z) = \frac{2}{z - 0,9}$.

в) Перевірте результати пп. "а" і "б", знайшовши z -перетворення кожної з функцій $e(t)$.

3. Розгляньте функцію $e(t)$, що має перетворення Лапласа $L[e(t)] = \exp(-Ts)/(s(s+1))$.

а) Визначте $e(t)$.

б) Функція $e(t)$ квантується з періодом T секунд. Визначте z -перетворення отриманої числової послідовності, представивши його у вигляді степеневого ряду, а також у замкнутій формі.

в) Перевірте результат п. "б", застосувавши до $E(z)$ зворотне z -перетворення.

4. Дано z -перетворення $E(z) = z[e(t)] = \frac{z}{z+1}$, $T = 0,001$ с. Виконайте наступне:

а) Визначте послідовність $e(kT)$.

б) Знайдіть функцію $e_1(t)$ таку, що $e_1(kT) = e(kT)$.

в) Знайдіть іншу функцію $e_2(t)$, таку, що $e_2(kT) = e(kT)$ і $e_2(t) \neq e_1(t)$.

г) Зобразити на одному графіку функції $e_2(t)$ і $e_1(t)$.

5. Дано z -перетворення $E(z) = z[e(t)] = \frac{3z}{(z-1)(z-0,5)(z-0,9)}$.

Виконайте наступне:

а) З цього виразу очевидно: $e(0) = e(1) = 0$, а $e(2) = 3$. Доведіть, що це дійсно так.

б) Визначте послідовність $e(k)$ як функцію від k .

в) Перевірте результат п. "б" за допомогою MATLAB, застосувавши метод розкладення на прості дроби.

г) Покажіть, що результат п. "б" відповідає твердженню в п. "а".

д) Чи подає теорема про кінцеве значення вірний результат?

е) Визначте вірне кінцеве значення $e(k)$ за допомогою двох різних методів.

6. Для кожної з наведених нижче функцій $E(z)$ знайдіть зворотне z -перетворення, скориставшись двома методами: розкладанням у степеневий ряд та на прості дроби. Порівняйте значення $e(k)$ для $k = 0, 1, 2, 3$, отримані цими двома методами:

$$\text{а) } E(z) = \frac{z}{(z-1)(z-0,8)}; \quad \text{б) } E(z) = \frac{z(z+1)}{(z-1)(z-0,8)};$$

$$\text{в) } E(z) = \frac{1}{(z-1)(z-0,8)}; \quad \text{г) } E(z) = \frac{1}{z(z-1)(z-0,8)}.$$

Перевірте отримані результати за допомогою MATLAB, застосувавши метод розкладення на прості дробки.

7. Виконайте наступне:

а) Синусоїдальний сигнал $e(t) = 5\cos 20t$ квантується з періодом 0,5 с. За таблицею z -перетворень знайдіть z -перетворення отриманої числової послідовності.

б) Чи можна до функції $E(z)$ застосувати теорему про кінцеве значення? Чому?

в) Синусоїдальний сигнал $e(t) = A\cos \omega t$ квантується з періодом $T = 0,1$ с. Отримана числова послідовність має z -перетворення

$$E(z) = \frac{5z(z-0,6967)}{z^2 - 1,3934z + 1}. \text{ Визначте параметри } A \text{ і } \omega.$$

г) Функція $e(t) = A_1 \cos \omega_1 t$ квантується з періодом $T = 0,2$ с. В результаті утворюється таке ж z -перетворення, що і в п. "в". Який зв'язок існує між A і A_1 та ω і ω_1 ? Чому?

8. Вирішіть наступне різницеве рівняння двома запропонованими методами. Переконайтеся, що обидва методи дають той самий результат для $k = 2; 3; 4$ і 5 : $x(k+2) + x(k+1) + x(k) = 0$ при $x(0) = 0$ і $x(1) = 2$:

а) Рекурентний метод.

б) Метод z -перетворення з використанням зворотного z -перетворення за таблицею.

в) Напишіть програму MATLAB, що дозволяє рекурентним методом визначити $x(k)$ для $k = 2; 3; 4; 5$.

9. Дано різницеве рівняння $x(k) - 3x(k-1) + 2x(k-2) = e(k)$, причому $x(-2) = x(-1) = 0$ і $e(k) = 1$ для $k \geq 0$. Виконайте наступне:

а) Визначте $x(k)$ для $k = 0; 1; 2; 3; 4$, використовуючи рекурентний метод.

б) Визначте $X(z)$.

в) Визначте $x(k)$ для $k = 0; 1; 2; 3; 4$, використовуючи метод розкладання у степеневий ряд.

г) Визначте $x(k)$ як функцію від k . Обчисліть $x(k)$ для $k = 0; 1; 2; 3; 4$.

д) За допомогою MATLAB перевірте результат п. "г", використовуючи метод розкладання на прості дробі.

10. Дано різницеве рівняння $x(k) - 3x(k-1) + 2x(k-2) = e(k)$, де $x(-2) = x(-1) = 0$, і $e(k) = \begin{cases} 1, & k = 0; 1 \\ 0, & k \geq 2 \end{cases}$. Виконайте наступне:

а) Визначте $x(k)$ для $k = 0; 1; 2; 3; 4$, використовуючи рекурентний метод.

б) Визначте $X(z)$.

в) Визначте $x(k)$ для $k = 0; 1; 2; 3; 4$, використовуючи метод розкладання в степеневий ряд.

г) Визначте $x(k)$ як функцію від k . Обчисліть $x(k)$ для $k = 0; 1; 2; 3; 4$.

11. Визначте кінцеве значення наступних функцій за їхнім z -перетворенням. Якщо це можливо, застосуйте теорему про кінцеве значення.

$$\text{а) } E(z) = \frac{0,1z}{z-1,2}; \quad \text{б) } E(z) = \frac{0,1z}{z-0,8};$$

$$\text{в) } E(z) = \frac{0,1z}{z^2 - 1,7z + 0,7}; \quad \text{г) } E(z) = \frac{0,1z}{z^2 - 1,7z + 1}.$$

12. На рис. 1.1 проілюстрована процедура чисельного інтегрування за методом прямокутників. Відповідно до цього методу інтеграл функції $x(t)$, позначений як $y(t)$, апроксимується сумою площ прямокутників, як показано на рис. 1.1.

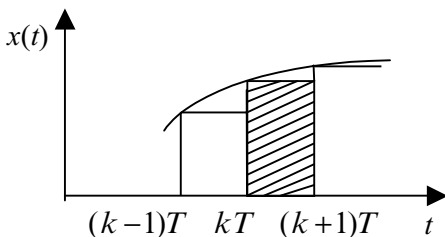


Рис. 1.1.

Виконайте наступне:

а) Запишіть різницеве рівняння, що пов'язує значення $y(kT)$; $y[(k+1)T]$ і $x(kT)$ для цього інтегратора.

б) Покажіть, що передатна функція цього інтегратора має вираз

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{T}{z-1}.$$

в) Визначте $y(t)$ для $y(t) = \int_0^t e^{-\tau} d\tau$ й обчисліть $y(1)$.

г) Інтеграл у п. "в" підлягає обчисленню за методом прямокутників. Визначте $X(z = z[e^{-T}])$ при $T = 0,1$ с. Потім визначте $y(kT)$ у п. "б" для $kT = 1$, тобто обчисліть значення інтегралу в п. "в" при $t = 1$ с, використовуючи метод прямокутників.

д) Порівняйте значення інтегралу, отримане в п. "в", з його значенням із п. "г".

е) Повторіть пп. "г" і "д" для випадку $T = 0,01$ с, зверніть увагу, наскільки збільшилася точність обчислень.

ж) Використовуючи MATLAB, запрограмуйте різницеве рівняння з п. "а", перевірте результати пп. "г" і "е".

13. На рис. 1.2 проілюстрована процедура чисельного інтегрування за методом трапецій. Відповідно до цього методу інтеграл функції $x(t)$, позначений як $y(t)$, апроксимується сумою площ трапецій, як показано на рис. 1.2.

а) Запишіть різницеве рівняння, що пов'язує значення $y[(k-1)T]$; $y(k)$, $x[(k-1)T]$ і $x(k)$ для цього інтегратора.

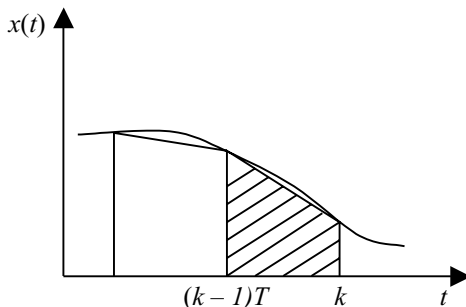


Рис. 1.2

б) Покажіть, що передатна функція цього інтегратора має вираз

$$\frac{Y(z)}{X(z)} = \frac{(T/2)(z+1)}{z-1}.$$

в) Повторіть пп. "г" і "д" задачі 12 для інтегрування за методом трапецій.

14. Передатна функція аналогового диференціатора (S) зворотна передатній функції аналогового інтегратора ($1/s$). Здається цілком справедливим і для операцій чисельного диференціювання й інтегрування. Вираз, зворотний передатній функції інтегратора, за методом прямокутників із задачі 12 дає

$$\frac{W(z)}{X(z)} = \frac{z-1}{T}.$$

а) Вважаючи, що $W(z)$ є вихід диференціатора, а $X(z)$ – його вхід, запишіть різницеве рівняння цього диференціатора.

б) Проілюструйте графічно процедуру чисельного диференціювання на зразок рис. 1.1.

15. На рис. 1.3 наведені дві різні схеми моделювання цифрового фільтра другого порядку.

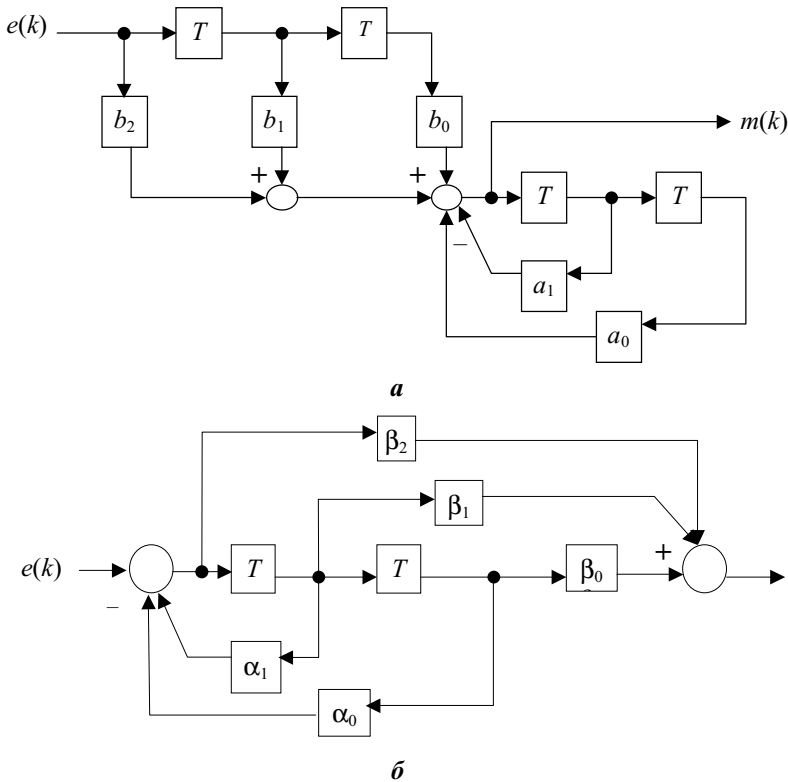


Рис. 1.3

а) Запишіть різницеві рівняння для реалізації цих двох фільтрів, базуючись на схемах моделювання. Канонічна форма програмування вимагає запису двох різницевих рівнянь.

б) Визначте, яким умовам повинні задовольняти коефіцієнти, щоб обидва фільтри мали однакову передатну функцію.

16. Запишіть різницеві рівняння для кожної з наведених нижче передатних функцій цифрових фільтрів:

$$a) \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{0,1z}{z-0,9}; \quad б) \frac{M(z)}{E(z)} = \frac{0,333(z^2 - 1,7z + 0,9)}{z^2 - 1,8z + 0,9}.$$

17. Дана програма MATLAB, яка вирішує різницеве рівняння цифрового фільтра:

```
s = 0;  
e = 1;  
for k = 0:4  
f = e - 0,7 * s;  
m = 0,8 * f + 0,4 * s;  
[k, m]  
s = f;  
end.
```

а) Зобразіть схему моделювання цього фільтра і позначте на ній усі змінні.

б) Визначте передатну функцію фільтра.

в) Знайдіть z -перетворення вихідної змінної фільтра.

г) Використовуючи зворотнє z -перетворення, визначте вихідну змінну.

д) Виконайте програму MATLAB і перевірте результат п. "г".

18. Дискретна система описується різницевим рівнянням $m(k+1) - 0,8m(k) = 1,3e(k+1) - 0,9e(k)$, де $e(k)$ є вхід, $m(k)$ – вихід системи. Виконайте наступне:

а) Зобразіть схему моделювання системи.

б) Використовуючи схему з п. "а", одержіть модель системи в змінних стану.

в) Визначте передатну функцію системи.

г) Перевірте результат п. "в", визначивши передатну функцію безпосередньо за різницевим рівнянням.

д) Перевірте результат п. "в", застосувавши до схеми моделювання формулу Мейсона.

е) Перевірте результат п. "в" за допомогою MATLAB.

19. Дискретна система описується різницевим рівнянням $y(k+2) - 1,2y(k+1) + 0,6y(k) = 0,035i(k+1) + 0,03i(k)$, де $i(k)$ – вхід, а $y(k)$ – вихід системи. Виконайте наступне:

а) Зобразити схему моделювання системи.

б) Використовуючи схему з п. "а", одержіть модель системи в змінних стану.

в) Визначте передатну функцію системи.

г) Перевірте результат п. "в", визначивши передатну функцію безпосередньо за різницевим рівнянням.

д) Перевірте результат п. "в", застосувавши до схеми моделювання формулу Мейсона.

е) Перевірте результат п. "в" за допомогою MATLAB.

20. Одержіть моделі в змінних стану для наступних систем, заданих своїми передатними функціями:

$$\begin{array}{ll} \text{а)} \frac{z+0,8}{(z-1)^2}; & \text{б)} \frac{0,02z^2+0,5z+0,025}{z^3-2,6z^2+1,9z-0,4}; \\ \text{в)} \frac{z+0,95}{z^2-1,9z+0,93}; & \text{г)} \frac{0,5z^2}{(z-1)^2}. \end{array}$$

д) Перевірте моделі, визначивши передатні функції за допомогою MATLAB.

21. Дискретна система описується рівняннями стану:

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -0,03 & 0,4 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k) + \begin{bmatrix} 0 \\ 1 \end{bmatrix} u(k); \quad y(k) = [1 \quad 1] \mathbf{x}(k).$$

Виконайте наступне:

а) Вважаючи $x_1(0) = x_2(0) = 0$ і $u(k) = 1, k \geq 0$, одержіть рішення для $y(k), k = 0; 1; 2; 3$ безпосередньо по рівнянням стану.

б) Одержіть рішення для $y(k)$, застосувавши до рівнянь стану z -перетворення, і перевірте результат п. "а".

в) За допомогою MATLAB перевірте результат п. "б".

г) Визначте передатну функцію $Y(z)/U(z)$.

д) За переданою функцією з п. "г" запишіть різницеве рівняння системи.

е) За допомогою MATLAB перевірте передатну функцію, що отримана в п. "г".

22. Дискретна система описується різницевими рівняннями

$$\mathbf{x}(k+1) = A\mathbf{x}(k) = \begin{bmatrix} 0 & 1 \\ -3 & 4 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k).$$

Виконайте наступне:

а) Визначте матрицю переходу системи A^k , використовуючи вираз $A^k = \xi^{-1}[z(zI - A)^{-1}]$.

б) Перевірте результат п. "а" шляхом обчислення A^k для $k = 0; 1; 2; 3$ на підставі даної матриці A .

в) За допомогою MATLAB перевірте результати п. "б".

23. Дане різницеве рівняння вільного руху дискретної системи

$$\mathbf{x}(k+1) = \begin{bmatrix} 1 & -1 \\ 1 & 3 \end{bmatrix} \mathbf{x}(k).$$

Виконайте наступне:

а) Визначте матрицю переходу системи $\Phi(k)$ як функцію від k .

б) Вважаючи $\mathbf{x}(0) = [1 \ -2]$, обчисліть $\mathbf{x}(3)$ безпосередньо за різницеvim рівнянням.

в) Визначте $\mathbf{x}(3)$, скориставшись результатом п. "а", тобто $\mathbf{x}(3) = \Phi(3)\mathbf{x}(0)$.

г) Визначте $\mathbf{x}(3)$ за допомогою MATLAB.

1.2. Імпульсні системи

1. Визначте $E^*(s)$ для кожної з наведених нижче функцій:

а) $e(t) = e^{-3t}$;

б) $E(s) = e^{-Ts}/(s + 3)$;

в) $e(t) = 1 - e^{-2t}$

г) $E(s) = (s + 3)/[s(s + 2)]$.

2. Виразіть перетворення з зірочкою для $e(t - kT)$ і $(t - kT)$, де k – позитивне ціле число, у функції від перетворення з зірочкою для $e(t)$.

3. Вважаючи $T = 0,1$ с, порівняйте положення полюсів і нулів $E^*(s)$ і $E(s)$ на s -площині для функцій із задачі 1.

4. Виконайте наступне:

а) При $T = 0,2$ с визначте $E^*(s)$ для кожної з наведених нижче функцій:

$$e_1(t) = \cos 4\pi t; \quad e_2(t) = \cos 14\pi t.$$

б) Чому ці два перетворення рівні?

в) Наведіть ще один синусоїдальний сигнал, який би мав таке ж перетворення з зірочкою, як у п. "а".

5. Виконайте наступне:

а) Синусоїда з частотою 3 Гц подана на вхід ланцюга, що надходить з квантователя і екстраполятора нульового порядку. Частота квантування дорівнює 12 Гц. Зазначте всі частоти, що присутні у спектрі вихідного сигналу екстраполятора і не перевищують 40 Гц.

б) Повторіть п. "а", якщо частота вхідної синусоїди дорівнює 9 Гц.

в) Чому результати пп. "а" і "б" однакові?

г) Наведіть ще чотири частоти, які дадуть той же самий результат, що й у пп. "а" і "б".

6. Сигнал $e(t)$ квантується ідеальним квантователем.

а) Сформулюйте умови, при яких $e(t)$ цілком може бути відновлений по $e^*(t)$, тобто умови, за яких у процесі квантування не буде відбуватися втрата інформації.

б) Зазначте, яка з умов, перерахованих у п. "б", може бути реалізована у фізичній системі. При цьому операція квантування як така не є фізично реалізованою.

в) На підставі відповідей, даних у п. "б", поясніть, чому ми з успіхом застосовуємо системи, у яких використовується операція квантування.

7. Система є лінійною, якщо до неї застосовується принцип суперпозиції. Чи є лінійним пристрій вибірки/збереження? Поясніть вашу відповідь.

8. Задано $E^*(s) = [e(t)]^* = e^{-3Ts}$, $T = 0,5$ с. Виконайте наступне:

а) Визначте $e(kT)$ для всіх k .

б) Чи можна знайти $e(t)$ за всією доступною інформацією? Поясніть вашу відповідь.

в) Зобразіть дві різних функції часу, що задовольняють п. "а".

9. Вихід ланцюга з квантователя і екстраполятора нульового порядку заданий виразом $E(s) = (e^{-2Ts} - e^{-3Ts})/s$ при $T = 1$ с.

а) Представте графічно сигнал $\bar{e}(t)$.

б) Визначте $e(kT)$ для всіх k .

в) Чи можна знайти $e(t)$ за всією доступною інформацією? Поясніть вашу відповідь.

г) Зобразити дві різні функції часу, що задовольняють п. "а".

10. Сигнал $e(t) = 5 \sin 2t$ подається на вхід ланцюга з квантователя і екстраполятора нульового порядку. Період квантування $T = \pi/6$ с. Виконайте наступне:

а) Вихідний сигнал містить компоненту з частотою $\omega = 2$ рад/с. Визначте амплітуду і фазу другої компоненти.

б) Повторіть п. "а", якщо вихідний сигнал містить компоненти з частотою 14 рад/с і 26 рад/с.

11. Розгляньте імпульсну систему, зображену на рис. 1.4, $E(s) = 1/s$; $M(s)$, $C(s)$. Виконайте наступне:

а) Визначте реакцію системи при $T = 0,1$ с в моменти квантування на одиничний східчастий вплив.

б) Перевірте результат п. "а", визначивши сигнал $m(t)$ на вході об'єкта, обчисливши $c(t)$ методами теорії безперервних систем.

в) Який ефект від присутності в системі квантователя і екстраполятора нульового порядку, якщо сигнал на вході квантователя зберігає постійне значення? Чому?

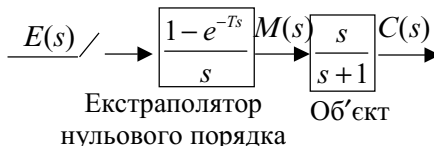


Рис. 1.4

12. Виконайте наступне:

а) Повторіть задачу 11 за умови, що об'єкт має передатну функцію

$$G_p(s) = \frac{2s+1}{(s+1)(s+2)}.$$

б) Перевірте результат за допомогою MATLAB, скориставшись методом розкладення на прості дроби.

13. Виконайте наступне:

а) Визначте реакцію системи на рис. 1.5 в моменти квантування на одиничний східчастий вплив. Представте $c(kT)$ у вигляді графіка.

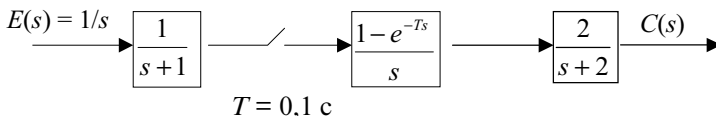


Рис. 1.5

б) За допомогою SIMULINK промодельуйте систему і перевірте графік $c(kT)$ із п. "а".

14. Виконайте наступне:

а) Визначте передатну функцію $C(z)/E(z)$ для системи, зображеної на рис. 1.6.

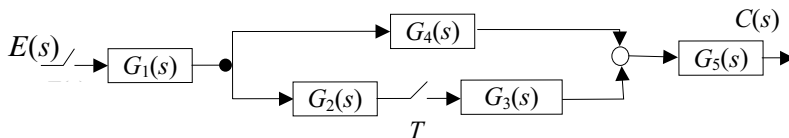


Рис. 1.6

б) Для цієї системи виразіть $C(z)$ як функцію від вхідного сигналу у випадку, якщо квантователь перед $G_1(s)$ відсутній.

в) Визначте передатну функцію $C(z)/E(z)$ у випадку, якщо квантователь перед $G_3(s)$ відсутній.

г) для систем із пп. "а"–"в" зазначте передатні функції, що у якості співмножника містять передатну функцію екстраполятора нульового порядку.

15. Виконайте наступне:

а) Визначте передатну функцію $C(z)/E(z)$ у системі на рис. 1.7, цифровий регулятор, на якому описується різницеvim рівнянням $m(k+1) = m(k) + 0,5e(k)$, де $e(k)$ – вхід регулятора, а $m(k)$ – його вихід. Частота квантування дорівнює 5 Гц.

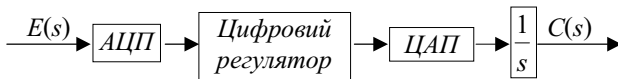


Рис. 1.7

б) Використовуючи результат п. "а", одержіть модель системи в змінних стану. Модель має другий порядок.

в) Переконайтеся, що модель із п. "б" має правильну передатну функцію.

16. Для кожної з систем на рис. 1.8 виразіть $C(z)$ як функцію від вхідного сигналу.

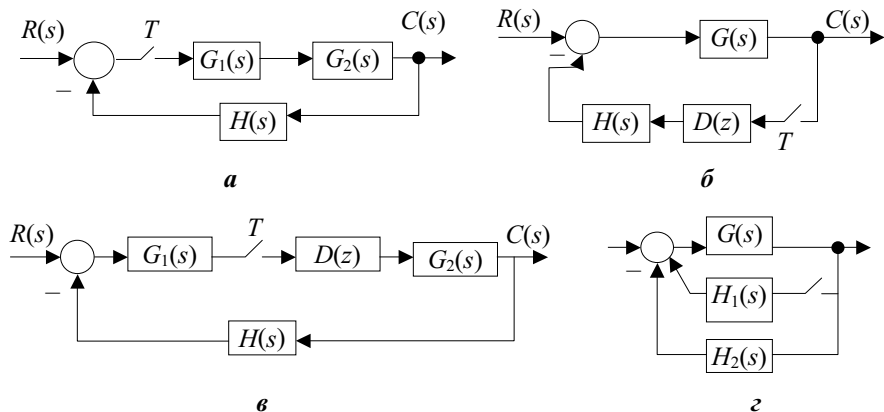


Рис. 1.8

17. На рис. 1.9 зображена система керування положенням супутника. У системі реалізована цифрова корекція, а період кванту-

вання дорівнює 0,1 с. Виконайте наступне:

а) Визначте імпульсну передатну функцію супутника.

б) Якщо $D(z) = 1$, визначте передатну функцію замкнутої системи.

в) Припустимо, що передатна функція цифрового регулятора

$D(z) = 1,2 + \frac{z-1}{z}$. Ця передатна функція відповідає ПД-регулятору.

Визначте передатну функцію замкнутої системи.

г) Перевірте передатну функцію, отриману в п. "а", за допомогою програми MATLAB.

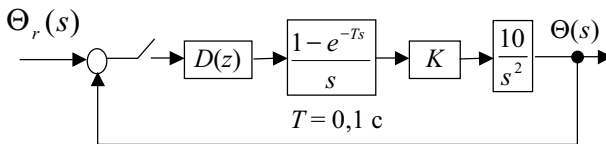


Рис. 1.9

18. Зверніться до системи керування положенням жорсткого супутника з задачі 17.

а) Одержіть модель об'єкта в дискретних змінних стану, враховуючи, що одна з них відповідає кутовому положенню супутника, а інша – кутовій швидкості.

б) Перевірте результат п. "а" за допомогою MATLAB.

в) Вважаючи, що $D(z) = 1$, використайте результат п. "а" для побудови моделі замкнутої системи в змінних стану.

г) Припустимо, що цифровий регулятор має передатну функцію $D(z) = 1,2 + \frac{z-1}{z}$. Зобразіть модель замкнутої системи в змінних стану. Для цього використайте результати п. "а", враховуючи, що модель має третій порядок.

д) За допомогою MATLAB визначте передатну функцію замкнутої системи, використовуючи результат п. "г" при $k = 1$. Таким чином будуть перевірені результати задачі 17, п. "в" у випадку, коли $k = 1$.

19. Розгляньте систему регулювання температури в кімнаті для температурних іспитів (рис. 1.10). У даній задачі вважайте, що обурення відсутнє.

а) Визначте передатну функцію об'єкта $G(z)$.

- б) За допомогою MATLAB перевірте визначення $G(z)$.
 в) Використовуючи вираження $G(z)$, зобразіть схему моделювання об'єкта, врахувавши, що $x(k) = y(k)$.
 г) За результатом п. "в" запишіть рівняння стану для об'єкта.
 д) Перевірте результат п. "г", визначивши передатну функцію об'єкта за його рівнянням стану.
 е) Перевірте результат п. "д" за допомогою MATLAB.

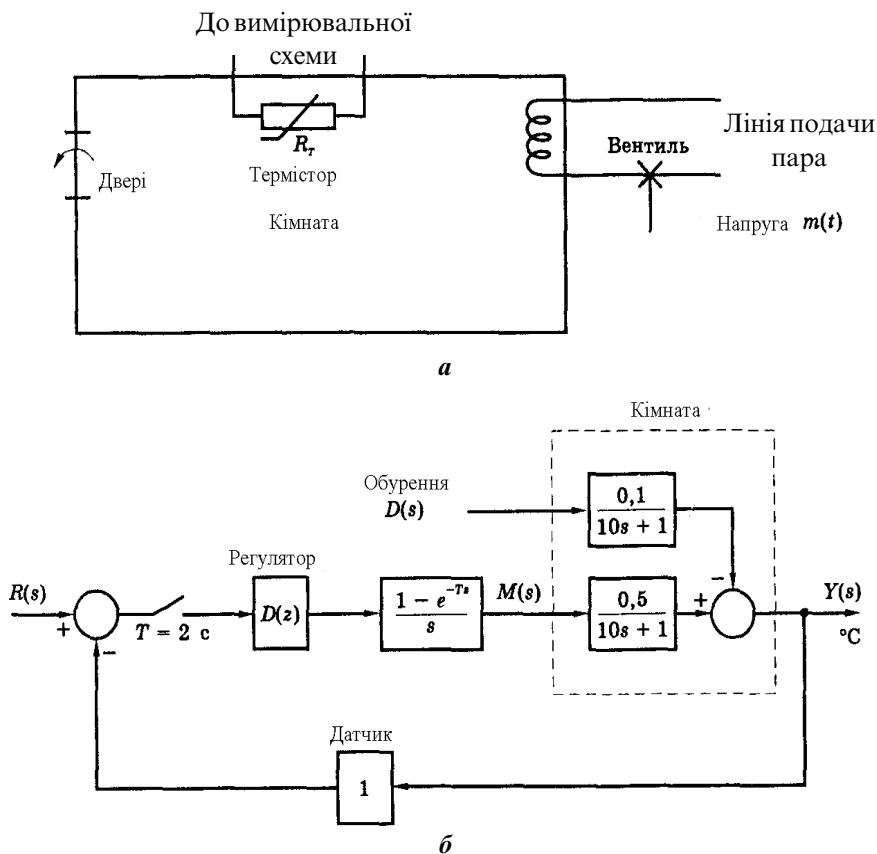


Рис. 1.10

20. Розгляньте систему керування ланкою руки робота на рис. 1.11. Передатна функція об'єкта має вигляд

$$\frac{\Theta_L(s)}{E_a(s)} = G_p(s) = \frac{0,15}{s(s+1)(s+5)}.$$

Виконайте наступне:

а) Без визначення передатної функції $G(z)$ зазначте положення полюсів $G(z)$, якщо $T = 0,02$ с.

б) На підставі п. "а" обчисліть поліном третього порядку, що відповідає знаменнику передатної функції об'єкта.

в) За допомогою MATLAB визначте імпульсну передатну функцію об'єкта $G(z)$. Знаменник цієї функції повинний мати вигляд поліному, знайденого в п. "б".

г) За допомогою програми MATLAB визначте модель об'єкта в дискретних змінних стану.

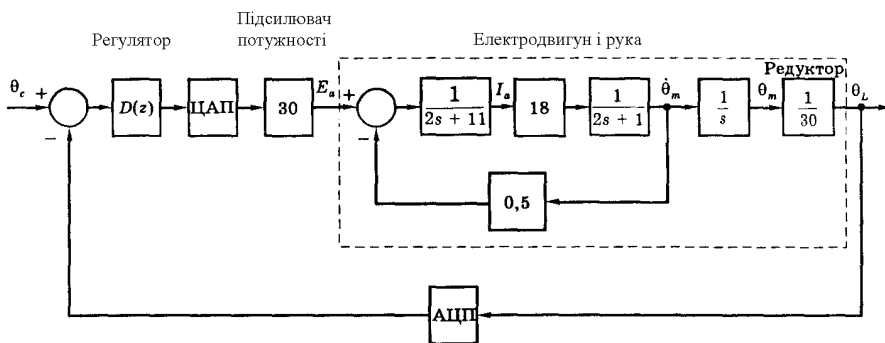


Рис. 1.11

21. На рис. 1.12 наведена структурна схема системи керування кількістю вуглекислого газу в камері для іспиту росту рослин. Запізненням у вимірювальному ланцюзі в даному випадку зневажаємо.

а) Зобразіть модель об'єкта (камери) у змінних стану.

б) Використовуючи результат п. "а", зобразити модель об'єкта в дискретних змінних стану.

в) Визначте модель замкнутої системи в дискретних змінних стану, враховуючи, що $D(z) = 1$. Збережіть той же фізичний зміст змінних стану, що і в п. "б".

г) Припустимо, що передатна функція цифрового фільтру

$D(z) = K_p + \frac{K_I T_z}{z-1}$ відповідає дискретному ПІ-регулятору. Таким

чином, замкнута система має другий порядок. Одержіть модель системи в дискретних змінних стану, зберігаючи умови п. "в".

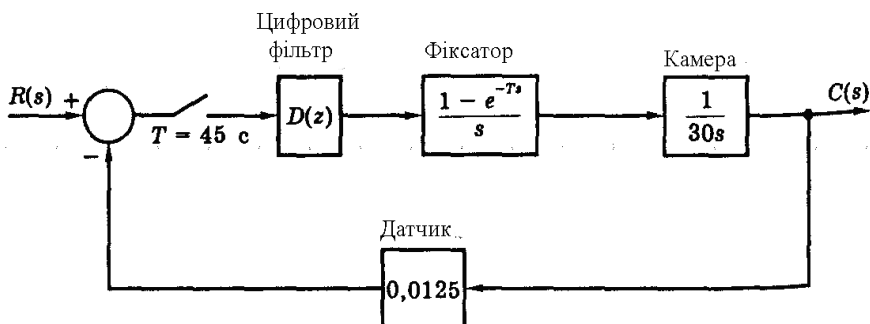


Рис.1.12

22. Розгляньте модель у змінних стану для супутника з прикладу 13:

а) За допомогою MATLAB перевірте правильність одержаної моделі в змінних стану.

б) За допомогою MATLAB визначте передатну функцію об'єкта $G(z)$ за його рівнянням стану.

в) За допомогою MATLAB одержіть інший вигляд моделі об'єкта в змінних стану.

г) За допомогою MATLAB перевірте передатну функцію об'єкта, отриману на підставі моделі в змінних стану з п. "в".

23. На рис. 1.13 наведена структура системи керування, що стежить за положенням пера плоттера.

а) Визначте положення полюсів передатної функції $G(z)$.

б) На підставі п. "а" запишіть поліном третього порядку, що відповідає знаменнику.

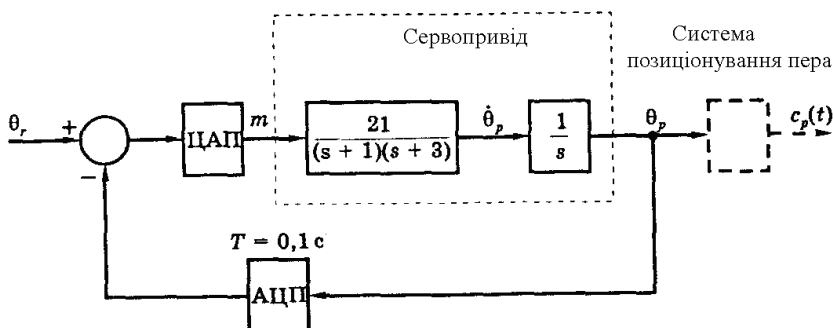


Рис. 1.13

в) За допомогою MATLAB знайдіть імпульсну передатну функцію об'єкта $G(z)$. Знаменник передатної функції має збігатися з поліномом із п. "б".

г) Одержіть модель об'єкта в безперервних змінних стану, що є компонентами вектора: $\mathbf{x}^T(t) = [\Theta_p(t) \dot{\Theta}_p(t) \ddot{\Theta}_p(t)]$.

д) За допомогою MATLAB одержіть модель у дискретних змінних стану на основі моделі в безперервних змінних стану з п. "г".

е) За допомогою MATLAB перевірте передатну функцію $G(z)$, отриману на підставі моделі з п. "д".

24. Всі пункти цієї задачі вимагають обчислень на комп'ютері. Розгляньте систему керування ланкою руки робота з задачі 20.

а) Використовуючи передатну функцію об'єкта $G_p(s)$, задану в задачі 20, за допомогою MATLAB одержіть модель об'єкта в безперервних змінних стану.

б) За допомогою MATLAB переконайтеся, що модель, отримана в п. "а", дає правильну передатну функцію.

в) Використовуючи результат п. "а", за допомогою MATLAB одержіть модель об'єкта в дискретних змінних стану.

г) За допомогою MATLAB на підставі результату п. "в" обчисліть імпульсну передатну функцію об'єкта.

д) За передатною функцією, отриманою в п. "г", за допомогою MATLAB визначте іншу конфігурацію моделі об'єкта в змінних стану.

е) За допомогою MATLAB переконайтеся, що модель об'єкта з п. "д" має правильну передатну функцію.

1.3. Цифрові системи

1. На рис. 1.14 зображена структурна схема системи регулювання температури рідини в баку. Об'єкт має постійну часу $t = 1$ с. Вважаючи $K = 1$, визначте перехідні функції системи для наступних випадків:

а) Період квантування $T = 1$ с.

б) Період квантування $T = 0,1$ с.

в) Квантователь і фіксатор віддалені, система є безперервною.

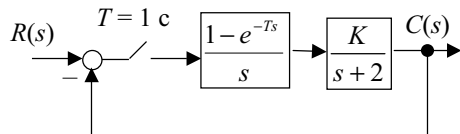


Рис. 1.14

-
- г) Зобразити три перехідні функції на одному графіку.
 - д) Стале значення вихідної змінної в пп. "а"—"в" однакове. Чому?
 - е) За допомогою програми MATLAB перевірте перехідну функцію, отриману в п. "а".

2. Для трьох систем із попередньої задачі виконайте наступне:

а) Запишіть характеристичні рівняння і визначте діапазон значень коефіцієнта K , при якому система є стійкою.

б) При $K = 8$ визначте діапазон значень періоду квантування T , при яких система є стійкою.

в) Перевірте результати пп. "а" і "б", промодельовавши систему за допомогою SIMULINK, і прослідкуйте, як вплине на стійкість системи і її перехідну характеристику зміна параметрів T і K .

3. У системі з задачі 1 замініть передатну функцію об'єкта на $G_p(s) = K/(s+1)$ і прийміть $T = 0,1$ с і $K = 1$.

а) Визначте передатну функцію розімкнутої системи.

б) Перевірте результат п. "а" за допомогою MATLAB.

в) Знайдіть передатну функцію замкнутої системи.

г) Обчисліть перехідну функцію системи.

д) На підставі п. "в" запишіть різницеве рівняння системи.

е) Напишіть програму MATLAB, яка б вирішувала це різницеве рівняння.

ж) Виконайте програму з п. "е" для випадку одиничного східчастого вхідного впливу і перевірте результат п. "г".

4. Якщо на рис. 1.14 передатну функцію $K/(s + 2)$ замінити на $G_p(s) = K/s(s+0,5)$, то одержимо систему керування положенням пера цифрового плоттера. Нехай у системі $K = 1$.

а) Обчисліть $G(z)$ при $T = 1$ с.

б) Обчисліть $G(z)$ при $T = 0,1$ с і зверніть увагу на проблеми, пов'язані з розрахунком чисел, приблизно рівних за розміром.

в) Перевірте результати пп. "а" і "б" за допомогою MATLAB.

г) Обчисліть передатні функції замкнутої системи для умов пп. "а" і "б".

д) Визначте постійні часу замкнутих систем.

е) Система відноситься до типу 1, тому що один з полюсів передатної функції $G_p(s)$ розташований в точці $s = 0$. Доведіть, що при цьому коефіцієнт підсилення замкнутих систем на нульовій частоті дорівнює одиниці.

5. Розгляньте систему керування положенням пера цифрового плоттера з задачі 4, враховуючи, що $T = 1$ с. Тут будуть корисні результати рішення задачі 4.

а) Визначте діапазон значень коефіцієнта K , при якому система буде стійкою.

б) Обчисліть значення K , при якому система буде знаходитися на межі стійкості і в ній виникнуть незатухаючі коливання.

в) Визначте частоту коливань, що відповідає результату п. "б".

г) За допомогою MATLAB промодельуйте систему, що знаходиться на межі стійкості, і перевірте результати пп. "б" і "в". Додатково побудуйте графік реакції системи на початкові умови.

д) Вважаючи $K = 0,6$, визначте значення параметрів ζ , ω_n і τ для даної системи.

6. Використовуючи критерій Джурі, визначте діапазон значень K , при якому система, зображена на рис. 1.15, буде стійка, за умов:

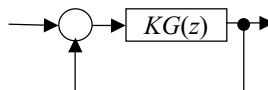


Рис. 1.15

$$\text{а) } G(z) = \frac{0,1z + 0,06}{(z-1)(z-0,7)}, \quad \text{б) } G(z) = \frac{0,1z + 0,06}{z(z-1)(z-0,7)}.$$

в) Приймаючи значення K , що відповідають межі стійкості для систем із пп. "а" і "б", за допомогою MATLAB обчисліть корені характеристичного рівняння і визначте модулі цих коренів.

7. Для системи регулювання температури з задачі 1 побудуйте кореневий годограф при зазначених нижче умовах. У кожному випадку визначте також діапазон значень K , при якому система є стійкою.

$$\text{а) } T = 1 \text{ с.} \quad \text{б) } T = 0,1 \text{ с.}$$

в) Квантователь і екстраполятор відсутні в системі, тобто вона є безперервною.

г) За допомогою MATLAB побудуйте кореневий годограф і перевірте отримані результати.

8. Для системи з задачі 4, приймаючи $T = 1$ с, виконайте наступне:

а) Побудуйте кореневий годограф.

б) Визначте положення коренів характеристичного рівняння при коефіцієнті K , що відповідає знаходженню системи на межі стійкості.

в) Знайдіть найбільше значення K , при якому перехідна функція системи не буде мати перерегулювання.

г) За допомогою MATLAB побудуйте кореневий годограф і перевірте результат п. "а".

-
- д) За допомогою MATLAB перевірте результат п. "б".
е) За допомогою MATLAB обчисліть перехідну функцію системи і перевірте результат п. "в".

9. Побудуйте кореневий годограф для системи, зображеної на рис.1.15, коли

$$\text{а) } G(z) = \frac{0,1z + 0,06}{(z-1)(z-0,7)}, \quad \text{б) } G(z) = \frac{0,1z + 0,06}{z(z-1)(z-0,7)}.$$

в) За допомогою MATLAB перевірте побудови, виконані в пп. "а" і "б".

10. У системі керування положенням пера плоттера з задачі 4 прийміть $T = 1$ с і $K = 1$.

- а) Побудуйте діаграму Найквіста.
б) За допомогою діаграми Найквіста визначте діапазон значень K , при яких система є стійкою.
в) Визначте частоту, з якою система буде здійснювати незатухаючі коливання, знаходячись на межі стійкості.
г) За допомогою MATLAB перевірте побудову діаграми Найквіста, виконану в п. "а".
д) За допомогою MATLAB перевірте результат п. "б".
е) За допомогою MATLAB обчисліть перехідну функцію системи для випадку, коли вона знаходиться на межі стійкості, перевірте результати пп. "б" і "в".

11. Для системи регулювання температури із задачі 1 за допомогою критерію Рауса–Гурвіца визначте діапазон значень K , при якому система буде стійкою, у наступних випадках:

$$\text{а) } T = 1 \text{ с.} \quad \text{б) } T = 0,1 \text{ с.}$$

в) Квантователь і екстраполятор відсутні, тобто система є безперервною.

12. Виконайте наступне:

- а) За допомогою критерію Рауса–Гурвіца визначте діапазон значень K , при якому система задачі 4 є стійкою ($T = 1$ с).
б) За допомогою MATLAB визначте корені характеристичного рівняння системи, що знаходяться на межі стійкості, і тим самим перевірте результат п. "а".

13. Розгляньте систему з задачі 4 при $T = 1$ с і $K = 1$. Виконайте наступне:

а) Побудуйте діаграму Боде і визначте запаси стійкості по модулю і по фазі.

б) Перевірте результат п. "а" за допомогою MATLAB.

14. Виконайте наступне:

а) Розгляньте систему з задачі 4 при $T = 1$ с і $K = 1$. Обчисліть сталі помилки при східчастому і лінійному вхідному впливі.

б) Повторіть п. "а" у випадку, якщо квантователь і екстраполятор відсутні.

в) За допомогою MATLAB перевірте результат п. "а" для випадку лінійного вхідного впливу задля досягнення системою сталого режиму при імітаційному моделюванні буде потрібно приблизно 250 с. Чому?

15. На рис. 1.16 зображена структурна схема системи керування положенням супутника. У даному випадку використовується цифрова корекція, однак будемо вважати, що $D(z) = 1$.

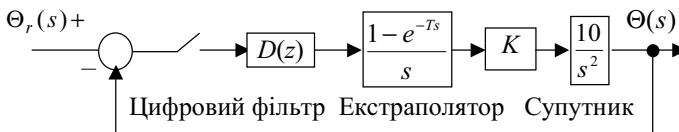


Рис. 1.16

а) За допомогою критерію Джурі визначте діапазон значень K , при якому система є стійкою.

б) Перевірте результат п. "а" за допомогою критерію Найквіста.

в) На підставі діаграми Найквіста, побудованої в п. "б", дослідіть, чи можна забезпечити стійкість системи, застосувавши регулятор із відставанням по фазі.

г) Синтезуйте регулятор із випередженням по фазі, що має одиничний коефіцієнт підсилення на нульовій частоті і забезпечує запас по фазі в 50° . Прийміть значення $\omega_{wl} = 10$.

д) За допомогою комп'ютера визначте запаси стійкості по модулю і по фазі в скоректованій системі.

16. На рис. 1.17 зображена структурна схема системи регулювання CO_2 в камері для вивчення росту рослин. Для аналізу проби повітря і визначення в ній CO_2 витрачається 45 с; цей час врахований у запізненні датчика. У даній задачі не будемо враховувати запізнення. Вважається, що датчик має передатну функцію $H(s) = 0,0125$. Значення $K = 50$.

а) Обчисліть передатну функцію розімкнутої системи і перевірте результат за допомогою MATLAB.

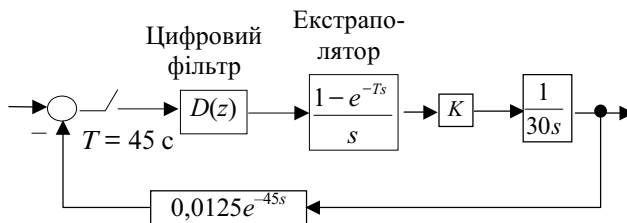


Рис. 1.17.

б) Зобразіть діаграму Бode для нескоректованої системи і відзначте на ній запаси по модулю і по фазі. Перевірте побудову діаграми Бode за допомогою MATLAB.

в) Побудуйте діаграму Найквіста для нескоректованої системи і визначте, чи є вона стійкою. Перевірте побудову діаграми Найквіста за допомогою MATLAB.

г) Побудуйте кореневий годограф для нескоректованої системи і з його допомогою визначте, чи є система стійкою. Перевірте побудову кореневого годографа за допомогою MATLAB.

д) Синтезуйте регулятор із відставанням по фазі, що має одиничний коефіцієнт підсилення на нульовій частоті і запас, що забезпечує запас по фазі в 70° ($T = 45$ с).

е) Чи можна синтезувати відповідний регулятор із випередженням по фазі й одиничному коефіцієнті підсилення? Зверніть увагу на запас по модулю.

17. Розгляньте систему регулювання CO_2 у камері з задачі 16. Повторіть рішення задачі 16, вважаючи, що датчик має запізнення в 45 с, а $K = 50$. Врахуйте, що передатна функція розімкнутої системи в даному випадку змінюється дуже просто.

18. Розгляньте безперервну систему керування, в якій об'єкт має передатну функцію $G_p(s) = \frac{50}{(s+1)(s+2)(s+5)}$. Характеристи-

чне рівняння системи має вигляд $1 + G_c(s)G_p(s) = 0$, а необхідне значення запасу по фазі дорівнює 55° . Синтезувавши аналоговий регулятор, реалізуйте його в дискретному вигляді з передатною функцією $D(z)$ при $T = 0,1$ с. Ця задача вирішується за допомогою комп'ютера.

а) Синтезований аналоговий ПІ-регулятор із передатною функцією $G_c(s) = 0,679 + \frac{0,114}{s}$. При цьому забезпечується запас по фазі в 45° . Визначте передатну функцію еквівалентного дискретного ПІ-регулятора і за допомогою MATLAB встановіть зменшення запасу по фазі, обумовлене цифровою реалізацією регулятора. Нагадаємо, що передатна функція об'єкта $G(z) = \frac{z-1}{z} \left[\frac{G_p(s)}{s} \right]$.

б) Аналоговий ПД-регулятор, що забезпечує запас по фазі в 45° , має передатну функцію $G_c(s) = 1,73 + 0,403s$. Визначте передатну функцію еквівалентного дискретного ПД-регулятора і за допомогою MATLAB встановіть зменшення запасу по фазі, обумовлене цифровою реалізацією регулятора.

в) Чому в п. "б" запас по фазі зменшився сильніше, ніж у п. "а"?

19. У системі керування положенням ручки плоттера з задачі 4 прийміть $T = 1$ с і $K = 1$. У системі має бути використаний цифровий регулятор, у результаті чого характеристичне рівняння приймає вигляд $1 + D(z)G(z) = 0$.

а) Синтезуйте регулятор із відставанням по фазі, що має одиничний коефіцієнт підсилення на нульовій частоті й запас по фазі в 40° .

б) Повторіть п. "а" для випадку регулятора з випередженням по фазі.

в) За допомогою MATLAB побудуйте частотні характеристики замкнутих систем із пп. "а" і "б".

г) За допомогою MATLAB обчисліть перехідні функції скоректованих систем і порівняйте часи наростання.

д) Повторіть п. "г", скориставшись програмою SIMULINK.

20. На рис. 1.18 зображена структурна схема системи керування, що стежить за одною з ланок руки робота.

а) Переконайтеся, що об'єкт має передатну функцію

$$G_p(s) = \frac{\Theta_L(s)}{E_a(s)} = \frac{0,475}{s(s+1)(s+10)}.$$

б) За допомогою комп'ютера визначте імпульсну передатну функцію $G(z)$, вважаючи $T = 0,25$ с.

в) За допомогою MATLAB побудуйте діаграму Бode, що відповідає функції $G(z)$.

г) За результатами п. "в" визначте запаси по модулю і по фазі, вважаючи $D(z) = 1$. При цьому має бути врахований коефіцієнт пропорційності підсилювача потужності.

д) Синтезуйте регулятор із випередженням по фазі, що має коефіцієнт підсилення на нульовій частоті, рівний 5, і запас по фазі в 40° . Прийміть $\omega_{w1} = 3$.

е) За допомогою SIMULINK одержить перехідну функцію системи і визначте значення часу наростання і відносного перерегулювання.

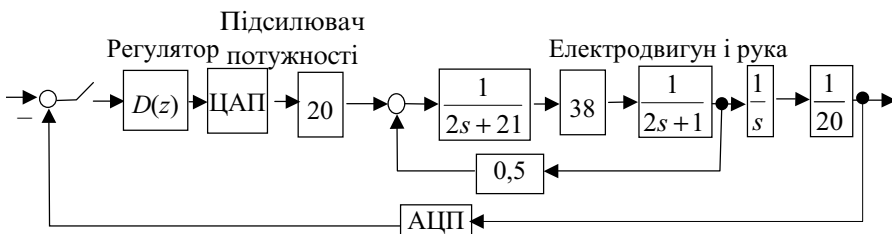


Рис. 1.18

Розділ 2. КОНТРОЛЬНІ ЗАДАЧІ ПО ДИСКРЕТНИМ ТА ЦИФРОВИМ СИСТЕМАМ КЕРУВАННЯ

2.1. Математичний опис і аналіз дискретних та цифрових систем

1. Зазначте, які з наступних величин є безперервними, а які дискретними: а) лінії рівної висоти на географічній карті; б) температура в помешканні; в) показання цифрових годинників; г) рахунків у баскетбольній грі; д) вихідний сигнал гучномовця.

2. Виконайте наступне:

а) Визначте значення $y(kT)$ для $k = 0; 1; 2; 3; 4$, якщо

$$Y(z) = \frac{z}{z^2 - 3z + 2}.$$

б) За отриманими значеннями $y(kT)$ знайдіть загальний вигляд цієї залежності як функції k .

Відповідь: $y(0) = 0$; $y(T) = 1$; $y(2T) = 3$; $y(3T) = 7$; $y(4T) = 15$.

3. Реакція системи $y(kT) = kT$ при $k \geq 0$. Знайдіть відповідне z -перетворення $Y(z)$.

Відповідь: $Y(z) = \frac{Tz}{(z-1)^2}$.

4. Дано функцію $Y(s) = \frac{5}{s(s+1)(s+5)}$. Використовуючи розкла-

дення на прості дробі і таблицю Z -перетворень, знайдіть $Y(z)$ при $T = 0,2$ с.

5. На рис. 2.1,а зображений космічний апарат (а) із рукою робота. Космонавт керує рукою робота (б) і захватом, користуючись візуальним спостереженням через ілюмінатор і зображенням на екрані монітора, одержаним від телекамер. Продумайте можливість використання для цих цілей цифрової системи керування і зобразіть її функціональну схему, де комп'ютер бере участь як у керуванні, так і у формуванні зображення на екрані.

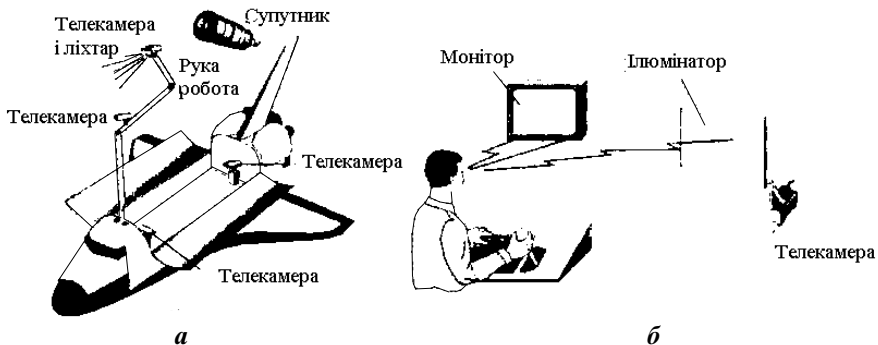


Рис. 2.1

6. На рис. 2.2 зображена система керування роботом, що здійснює фарбування корпусу автомобіля.

Структура системи з цифровим регулятором має вигляд

рис. 2.3, де $KG_p(s) = \frac{20}{s(0,5s+1)}$ – передатна функція безперервної

частини. Необхідно забезпечити запас по фазі 45° . Визначте $D(z)$, вважаючи $T = 0,001$ с.

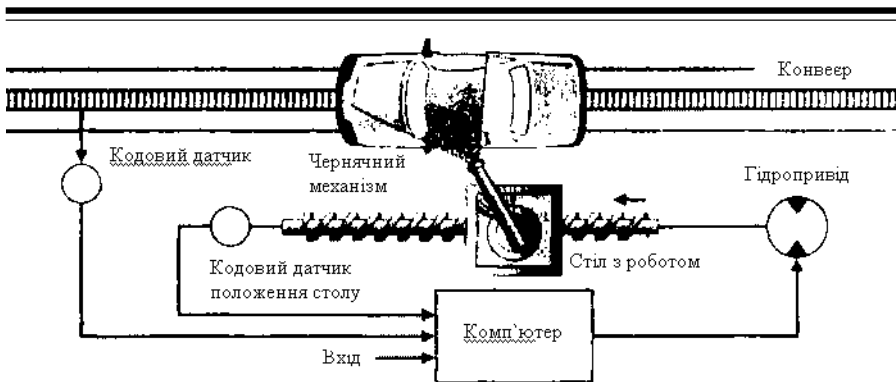


Рис. 2.2

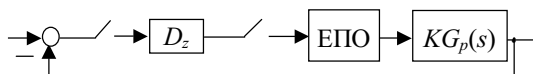


Рис. 2.3

7. Задано z -перетворення сигналу

$$Y(z) = \frac{z^3 + 2z^2 + 1}{z^3 - 1,5z^2 + 0,5z}.$$

Знайдіть перші чотири значення сигналу, тобто $y(0)$; $y(1)$; $y(2)$ і $y(3)$.

8. Визначте, чи стійка замкнута система, якщо її передатна функція $T(z) = \frac{z^2 + z}{z^2 - 0,1z - 0,2}$.

9. Виконайте наступне:

а) Визначте $y(kT)$ для $k = 0; 1; 2; 3$, якщо $Y(z) = \frac{z+1}{z^2-1}$.

б) Одержіть загальний вираз для $y(kT)$ як функцію k .

10. Передатна функція системи керування $G(z)$ задана виразом

$$G(z) = K \frac{(z-E)[T-\tau(z-1)]+\tau(z-1)^2}{(z-1)(z-E)},$$

де $T = 0,01$ с і $\tau = 0,008$ с.

а) Визначте значення K , при якому перерегулювання в замкнутій системі не буде перевищувати 40 %.

б) Визначте сталу помилку при лінійному входньому сигналі, що змінюється з одиничною швидкістю.

в) Обчисліть значення k , що мінімізує інтеграл від квадрата помилки.

11. Об'єкт керування має передатну функцію $G_p(s) = \frac{100}{s^2 + 100}$.

а) Визначте відповідну функцію $G(z)$ з урахуванням того, що об'єкту керування передуює екстраполятор нульового порядку. Період квантування дорівнює 0,05 с.

б) З'ясуйте, чи стійка цифрова система.

в) Зобразити імпульсну перехідну характеристику системи для перших 15 моментів квантування.

г) Зобразіть графік реакції системи на синусоїдальний сигнал тієї ж частоти, що і власна частота системи.

12. Визначте z -перетворення для $X(s) = \frac{s+3}{s^2+3s+2}$, якщо період квантування дорівнює 2 с.

13. Дискретна система має характеристичне рівняння

$$z^2 + (K - 1,5)z + 0,5 = 0.$$

Визначте діапазон значень K , при якому система стійка.

14. У дискретній системі, зображеній на рис. 2.4, об'єкт має передатну функцію $G_p(s) = \frac{K}{s(s+3)}$, а період квантування $T = 0,5$ с.

Визначте, чи стійка система, якщо $K = 5$. Знайдіть максимально припустиме значення K із міркувань стійкості.

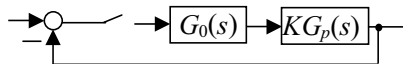


Рис. 2.4

15. Вхідний сигнал $r(t) = \sin \omega t$, де $\omega = 1/\pi$, піддається квантуванню

з періодом $T = 0,25$ с. Представте графічно цей сигнал і вихідний сигнал квантователя $r^*(t)$ для перших 2 с.

16. Вхідний сигнал $r(t) = \sin \omega t$, де $\omega = 1/\pi$, піддається квантуванню з періодом $T = 0,25$ с. Квантований сигнал надходить на вхід екстраполятора нульового порядку, як показано на рис. 2.5. Представте графічно вихідний сигнал екстраполятора $p(t)$ для перших 2 с.

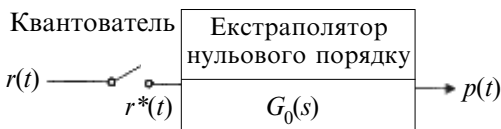


Рис. 2.5

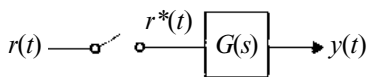


Рис. 2.6

17. У дискретній системі, зображений на рис. 2.6, $G(s) = 1/(s + 1)$, а вхідний сигнал $r(t) = t$; $t > 0$. Визначте $y(kT)$ для перших чотирьох моментів квантування. Період квантування $T = 0,2$ с.

18. У замкнутій системі, що містить екстраполятор, об'єкт має передатну функцію $G_p = \frac{2}{s+2}$. Визначте $G(z)$, якщо $T = 1$ с.

19. У системі із задачі 18 $r(t)$ є одиничний східчастий сигнал. Обчисліть реакцію системи шляхом ділення чисельника на знаменник.

20. Для системи із задачі 18 знайдіть початкове і кінцеве значення вихідного сигналу безпосередньо по $Y(z)$.

21. У замкнутій дискретній системі, зображеній на рис. 2.7, об'єкт керування має передатну функцію $G_p(s) = K / [s(0,5s + 1)]$. Виберіть коефіцієнт підсилення K і період квантування T так, щоб при одиничному східчастому вхідному сигналі перерегулювання не перевищувало 0,3, а при лінійному вхідному сигналі, що змінюється з одиничною швидкістю, стійка помилка була меншою 1,0.

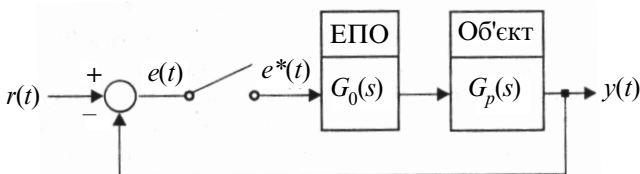


Рис. 2.7

22. Розгляньте систему з цифровою корекцією, зображену на рис. 2.3, де $T = 1$ с і $KG_p(s) = \frac{K}{s(s+10)}$. Вважаючи, що

$$D(z) = \frac{z - 0,3678}{z + r}, \text{ виберіть параметри } K \text{ і } r \text{ із діапазонів } 1 < K < 2 \text{ і } 0 < r < 1.$$

Визначте реакцію скоректованої системи на східчастий вхідний сигнал і порівняйте її з реакцією системи без корекції.

23. На рис. 2.8 зображена дистанційно керована підвішена над полем камера. Система керування дозволяє переміщувати камеру

по будь-якій з трьох координат і дозволяє спостерігати усе поле. Система керування приводом кожного підйомного блока має структуру, зображену на рис. 2.7,

$$\text{де } G_p(s) = \frac{10}{s(s+1)(0,1s+1)}.$$

У випадку безперервної системи необхідно підібрати $G_c(s)$ так, щоб запас по фазі був рівним 45° . Виберіть необхідне значення частоти зрізу і періоду квантування, щоб перейти до $D(z)$. Скористайтеся методом перетворення $G_c(s)$ у $D(z)$.

24. На рис. 2.9 зображена система, де "а" – робот з великими можливостями, оснащений великою кількістю датчиків: дотику,

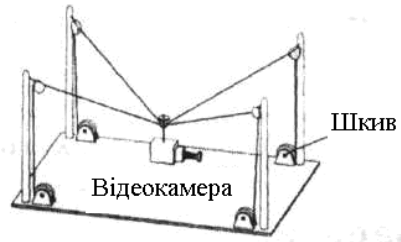
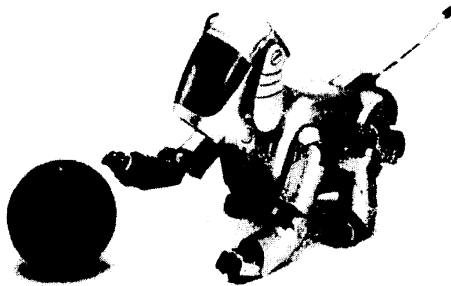
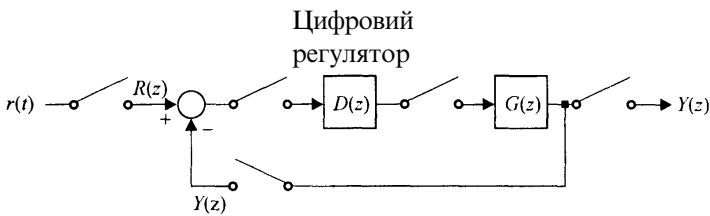


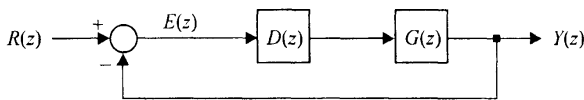
Рис. 2.8



а



б



в

Рис. 2.9

зору (за допомогою мініатюрної кольорової відеокамери), виявлення кулеподібних предметів, швидкості. Всередині робота знаходиться 64-розрядний мікропроцесор RISC і пристрій, що запам'ятовує, ємністю 16 Мб. Органи пересування мають 18 зчленувань і управляються 18 мікродвигунами; "б" – замкнута система з цифровим регулятором, "в" – структурна схема системи, де $G(z) = Z\{G_0(S)GP(S)\}$. До складу системи входить екстраполятор ну-

льового порядку, а об'єкт має передатну функцію $G_p(s) = \frac{1}{s(s+10)}$.

Період квантування $T = 0,1$ с.

- а) Прийміть $D(z) = K$ і визначте передатну функцію $G(z)D(z)$.
- б) Визначте характеристичне рівняння замкнутої системи.
- в) Обчисліть максимально припустиме значення K із міркувань стійкості системи.
- г) Знайдіть значення K , при якому перерегулювання було б менше 30 %.
- д) При значенні K , знайденому в пп. "г", визначте передатну функцію замкнутої системи $T(z)$ і побудуйте графік її перехідної характеристики.
- е) Визначте положення коренів характеристичного рівняння замкнутої системи і величину перерегулювання, якщо коефіцієнт K буде в 2 рази менше значення, знайденого в п. "в", "ж". Побудуйте графік перехідної характеристики при значенні K із п. "е".

25. Виконайте наступне:

а) Припустіть, що система, описана в задачі 24, є безперервною. Синтезуйте регулятор із відставанням по фазі $G_c(s)$, що забезпечує при східчастому вхідному сигналі перерегулювання менше 30 % і сталу помилку при лінійному вхідному сигналі менше 0,01.

б) Вважайте, що система є цифровою, містить квантователь і екстраполятор; шляхом перетворення $G_c(s)$ у $D(z)$ визначте цифровий корегуючий пристрій, що забезпечує показники якості, зазначені в п. "а". Період квантування $T = 0,1$ с.

в) Зобразіть перехідні характеристики безперервної системи з регулятором $G_c(s)$ із п. "а" і цифрової системи з $D(z)$ із п. "б". Порівняйте отримані результати.

г) Виконайте завдання п. "б" при $T = 0,01$ с, а потім повторіть п. "в".

д) Одержіть реакцію цифрової системи на лінійний вхідний

сигнал при $T = 0,1$ с і порівняйте її з аналогічною реакцією безперервної системи.

26. Передатна функція об'єкта керування разом із екстраполятором нульового порядку (див. рис. 2.7) дорівнює $G(z) = \frac{K(z+0,5)}{z(z-1)}$.

а) Побудуйте кореневий годограф системи.

б) Визначте діапазон значень K , при якому система стійка.

27. Система керування орієнтацією космічної станції реалізована з використанням квантователя і екстраполятора (див. рис. 2.7)

і має передатну функцію $G(z) = \frac{K(z^2 + 1,1206z - 0,0364)}{z^3 - 1,7358z^2 + 0,8711z - 0,1353}$.

а) Побудуйте кореневий годограф системи.

б) Обчисліть значення K , при якому характеристичне рівняння буде мати два однакових корені.

в) Визначте всі корені характеристичного рівняння при коефіцієнті K , знайденому в п. "б".

28. У дискретній системі, зображений на рис. 2.7, період квантування $T = 0,05$ с, а її передатна функція

$$G(z) = \frac{K(z^3 + 10,3614z^2 + 9,758z + 0,8353)}{z^4 - 3,7123z^3 + 5,1644z^2 - 3,195z + 0,7408}.$$

а) Побудуйте кореневий годограф системи.

б) Обчисліть значення K , при якому два дійсних корені відриваються від дійсної осі.

в) Визначте максимально припустиме значення K із міркувань стійкості системи.

29. У системі, структура якої зображена на рис. 2.7, об'єкт керування має передатну функцію $G_p(s) = \frac{10}{s-2}$. Обчисліть і зобразіть графічно значення $y(kT)$ на інтервалі $0 < t < 0,6$ с, якщо період квантування $T = 0,1$ с. Вхідний сигнал системи – одиничний ступінчастий сигнал.

30. У системі, зображений на рис. 2.7, об'єкт має передатну функцію $G_p(s) = \frac{1}{s(s+1)}$. На вхід системи поданий одиничний схід-

частий сигнал. Обчисліть і зобразіть графічно значення $y(kT)$ для $0 \leq k \leq 8$, якщо період квантування $T = 1$ с.

31. У системі, зображеній на рис. 2.7, об'єкт має передатну функцію $G_p(s) = \frac{K}{s(s+1)}$, а період квантування $T = 1$ с. Побудуйте кореневий годограф при $K \geq 0$ і обчисліть значення K , при якому два корені характеристичного рівняння знаходяться на одиничній окружності (на межі стійкості).

32. У системі, зображеній на рис. 2.7, об'єкт має передатну функцію $G_p(s) = \frac{K}{s(s+1)}$. Якщо система є безперервною ($T = 0$), то при $k = 1$ перехідна характеристика має перерегулювання 16 % і час усталення (за критерієм 2 %) 8 с.

При $K = 1$ побудуйте перехідні характеристики дискретної системи, варіюючи період квантування в діапазоні $0 \leq T \leq 1,2$ с із кроком 0,2 с. Відобразіть у вигляді таблиці залежність перерегулювання і часу усталення від періоду квантування T .

33. У системі, зображеній на рис. 2.7, об'єкт керування має передатну функцію $G_p(s) = \frac{K(1+as)}{s^2}$, де параметр a може настроюватися, виходячи з вимог до якості системи. Побудуйте кореневий годограф системи при $a = 10$. Визначте діапазон значень K , при якому система стійка. Період квантування $T = 1$ с.

34. В системі керування літака всі основні задачі зі збору інформації, координації дій і безпосередньому керуванню виконує комп'ютер. Це дозволяє реалізовувати цифрові системи керування, що володіють високим рівнем надійності та відмінної якості. Робочі характеристики системи керування польотом істотно залежать від динаміки виконавчого пристрою, зокрема від його спроможності підтримувати задане положення керуючої площини незважаючи на випадкові обурення з боку зовнішніх сил.

Одна з таких систем містить у собі підсилювач потужності, спеціальний двигун постійного струму і насос, з'єднаний із будь-якою з камер силового гідроциліндру. Шток гідроциліндру за допомогою механічної передачі з'єднаний безпосередньо з керуючою площиною, як показано на рис. 2.10,а. На рис. 2.10,б наведена структурна схема системи керування кутом відхилення площини. Потріб-

но, щоб перехідна характеристика системи мала перерегулювання менше 5 % і час установлення (за критерієм 2 %) не більш 4 с.

а) Синтезуйте регулятор $D(z)$ і побудуйте кореневий годограф системи.

б) Зобразіть графік перехідної характеристики системи, синтезованої в п. "а".

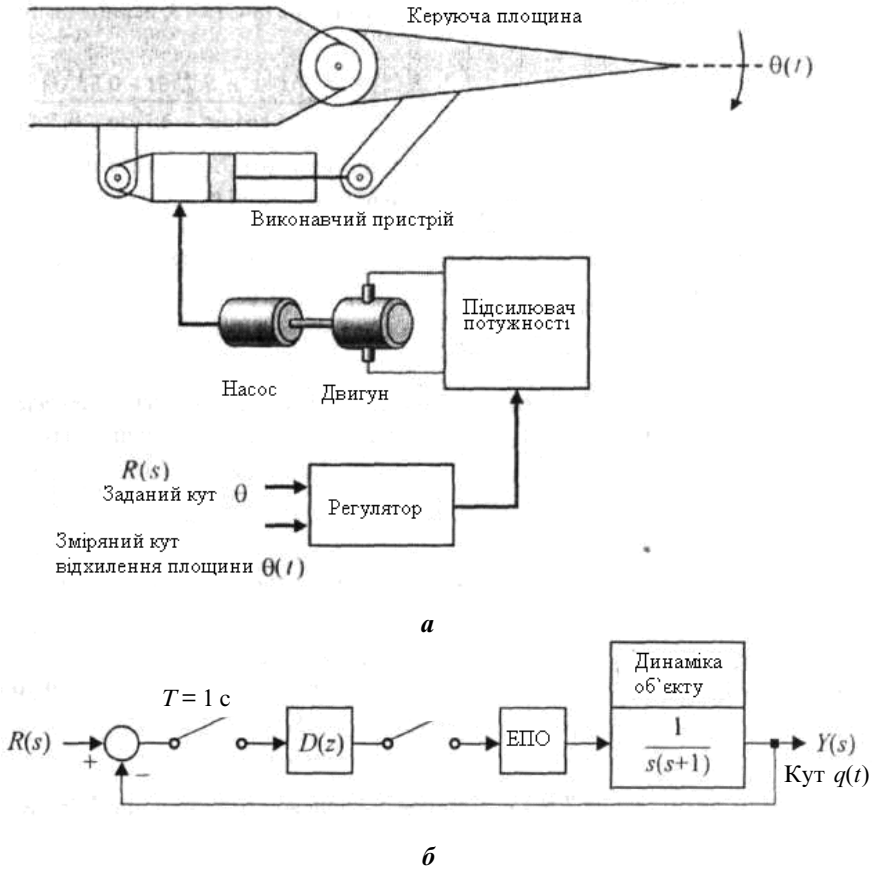


Рис. 2.10

35. На рис. 2.11 показано, як у швейному виробництві замість звичайного шва здійснюється склеювання матеріалу. Дуже важливо, щоб клей наносився на тканину рівномірно, щоб уникнути браку. Однак швидкість, з якою тканина проходить під голівкою, що розподіляє клей, не є постійною. Клей повинен видавлюватися з

голівки зі швидкістю, пропорційною швидкості руху тканини. Ця задача вирішується за допомогою спеціальної системи керування.

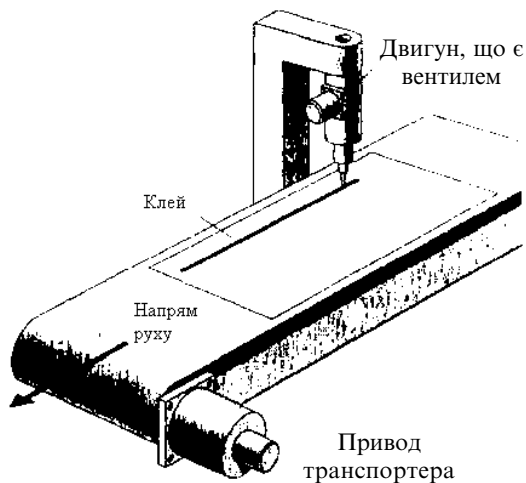


Рис. 2.11

Система керування має структуру, зображену на рис. 2.9, де $G_p(s) = 2/(0,03s+1)$ і об'єкту передують екстраполятор нульового порядку. Передатна функція цифрового регулятора має вигляд $D(z) = \frac{KT}{z-1} = \frac{KTz}{z-1}$, що відповідає операції інтегрування.

Знайдіть $G(z)D(z)$ при $T = 30$ мс і побудуйте кореневий годограф системи. Виберіть прийнятне значення K і зобразіть графік перехідної характеристики системи.

36. У системі, структура якої зображена на рис. 2.9, $D(z) = K$ та

$$G_p(s) = \frac{27}{s(s+27)}.$$

Вважаючи $T = 0,1$ с, обчисліть значення K , що забезпечує по можливості швидке наростання перехідної характеристики з перерегулюванням менше 10 %.

37. У системі, зображеній на рис. 2.7, об'єкт керування має передатну функцію $G_p(s) = \frac{10}{s+1}$. Визначте діапазон значень періоду квантування T , при якому система стійка. Потім виберіть відповідне, на вашу думку, значення T , при якому система була б стійкою і володіла високою швидкодією.

2.2. Синтез систем керування

1. Синтезуйте цифровий регулятор для системи керування положенням ковзної частини столу. Електродвигун, барабан і ко-

взну частину представте у вигляді моделі другого порядку. Структура системи при цьому має вигляд рис. 2.9.

При заданому періоді квантування $T = 1$ мс виберіть передатну функцію $D(z)$, що забезпечує прийнятну якість системи. Знайдіть реакцію синтезованої системи на східчастий вхідний сигнал $r(t)$.

2. Система регулювання температури має структуру, зображену на рис. 2.9, де передатна функція об'єкта $G_p(s) = \frac{0,8}{3s+1}$, а період квантування $T = 0,5$ с.

а) При $D(z) = k$ виберіть значення K , щоб система була стійкою.

б) Система може виявитися передемпфованою і мати великий час усталення, тому виникає необхідність синтезу регулятора з випередженням по фазі. Синтезуйте регулятор $G_c(s)$ і потім перейдіть до $D(z)$.

в) Перевірте правильність синтезу, побудувавши графік передньої характеристики системи при $D(z)$, отриманої в п. "б".

3. Структурна схема системи позиціонування голівки читання / запису дисководу зображена на рис. 2.9. Об'єкт має передатну

функцію $G_p(s) = \frac{10}{s^2 + 0,8s + 800}$. Система повинна мати високу

точність позиціонування.

Прийміть $T = 10$ мс і синтезуйте регулятор $D(z)$ методом перетворення $G_c(s)$ у $D(z)$, і методом кореневого годографа.

4. Якість керування рухом автомобіля можна значно підвищити при використанні системи, яка оптимізує зчеплення шини з дорогою, що перешкоджає заклинюванню коліс при гальмуванні і пробуксовуванню при прискоренні.

У якості керованої змінної в подібних системах обирається прослизання колеса, тобто різниця між швидкістю руху автомобіля і швидкістю колеса (за еталон приймається швидкість автомобіля при гальмуванні і швидкість колеса при прискоренні). У більшості випадків саме ця змінна впливає на якість керування рухом, оскільки в основному вона визначає силу зчеплення між шиною і дорогою. Система керування прослизанням для одного колеса зображена на рис. 2.12. Мета системи – мінімізувати прослизання, викликане обуренням через зміну дорожніх умов.

Синтезуйте регулятор $D(z)$ так, щоб система мала коефіцієнт демпфірування $\zeta = 1/\sqrt{2}$, і знайдіть відповідне значення K . Період

квантування $T = 0,1$ с. Одержіть графік перехідної характеристики і визначте розмір перерегулювання і часу усталення (за критерієм 2 %).

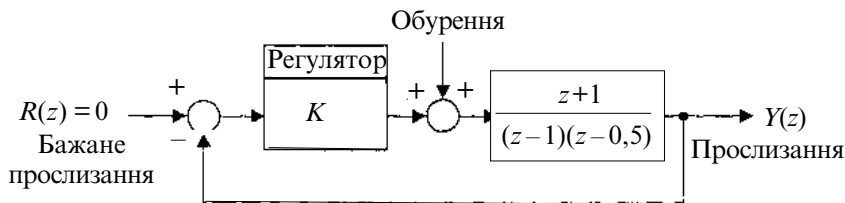
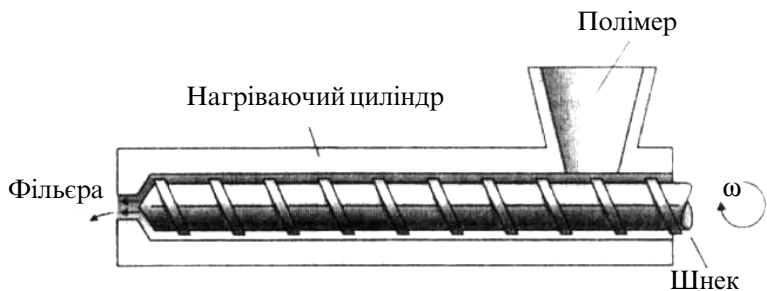


Рис. 2.12

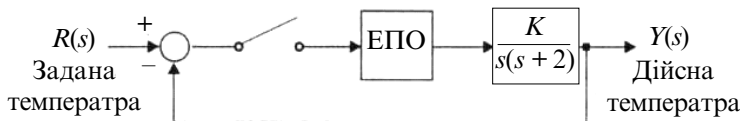
5. Система керування положенням інструмента металорізного верстата має структуру, зображену на рис. 2.9, де передатна функція об'єкта $G_p(s) = \frac{0,1}{s(s+1)}$. Період квантування $T = 1$ с. Потрібно,

щоб перехідна характеристика мала перерегулювання не більш 16 % і час усталення (за критерієм 2 %) не більш 12 с. Крім того, при вхідному сигналі $r(t) = t$ стала помилка не повинна перевищувати 1. Синтезуйте регулятор $D(z)$, що задовольняє цим вимогам.

6. При виробництві полімерів широко використовується метод видавлювання пластмаси (рис. 2.13,а). Такі екструзійні установки являють собою великий циліндр, розділений на декілька темпера-



а



б

Рис. 2.13

турних зон із завантажувальним бункером на одному кінці і фільтрою – на іншому. Пластмаса завантажується в циліндр із бункера у вигляді твердого напівфабрикату і проштовхується уздовж нього за допомогою шнека. При проходженні цієї маси через різні температурні зони відбувається її нагрівання з послідовним збільшенням температури. Тепло, що виділяється нагрівачами, а також утворюється при терті пластмаси о стінки циліндра і шнек, приводить до її плавлення, після чого ця маса видавлюється шнеком назовні і використовується далі для різних цілей.

Вихідними змінними є потік маси через фільтеру і її температура. Основною керуючою змінною є швидкість обертання шнека, оскільки її зміна скоріше позначається на якості ведення процесу.

На рис. 2.13,б зображена система керування температурою полімеру на виході установки. Виберіть коефіцієнт K і період квантування T так, щоб при східчастому вхідному сигналі перерегулювання складало 10 % і в той же час при лінійному вхідному сигналі стала помилка була якнайменше.

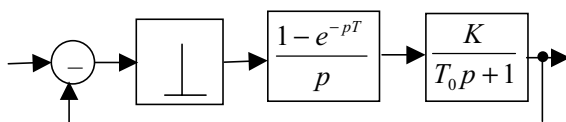
Розділ 3. КОНТРОЛЬНІ ЗАВДАННЯ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ДИСКРЕТНИХ ТА ЦИФРОВИХ СИСТЕМ

3.1. Дослідження імпульсних систем

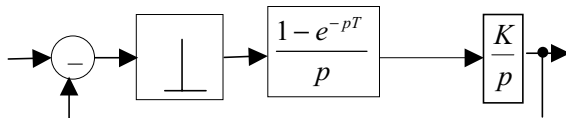
Задано: структурна схема (рис. 3.1), параметри досліджуваної системи (задаються викладачем); таблиця z -перетворень для передаточних функцій (табл. 3.1) та сигналів збурення (табл. 3.2).

Потрібно:

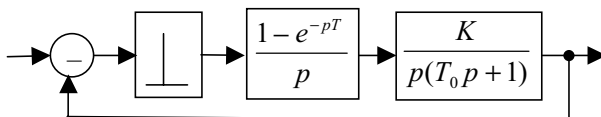
- 1) записати z -передаточну функцію та z -зображення вихідної величини системи при одиничному ступінчастому вхідному сигналі;
- 2) розрахувати координати перехідної характеристики системи;
- 3) за z -передаточними функціями неперервної частини та імпульсного елемента скласти структурну схему системи;
- 4) записати різниці рівняння для цифрового моделювання системи на ПЕОМ;
- 5) розрахувати на ПЕОМ перехідну характеристику системи;
- 6) в одній системі координат побудувати перехідні характеристики, одержані за даними аналітичного розрахунку та моделювання на ПЕОМ.



a



б



в

Рис. 3.1

Таблица 3.1. Вырази z-перетворень для передаточних функций

Номер	$W(p)$	$W(z)$
1	K	K
2	$\frac{K}{p}$	$\frac{Kz}{z-1}$
3	$\frac{K}{p^2}$	$\frac{KTz}{(z-1)^2}$
4	$\frac{K}{T_0 p + 1}$	$\frac{K}{T_0} \frac{z}{z - e^{-T/T_0}}$
5	$\frac{K}{p(T_0 p + 1)}$	$\frac{K(1 - e^{-T/T_0})z}{(z-1)(z - e^{-T/T_0})}$
6	$\frac{K(T_0 p + 1)}{p}$	$\frac{K(T_0 + 1) \left(z - \frac{T_0}{T_0 - 1} \right)}{z-1}$
7	$\frac{K(T_0 p + 1)}{p^2}$	$\frac{KT_0 z \left(z + \frac{T}{T_0} - 1 \right)}{(z-1)^2}$

Продовж. табл. 3.1

Номер	$W(p)$	$W(z)$
8	$\frac{K(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1}$	$\frac{K}{T_2} \left[T_1 + \left(1 - \frac{T_1}{T_2} \right) \frac{z}{z - e^{-T/T_2}} \right]$
9	$\frac{K(T_1 p + 1)}{p(T_2 p + 1)}$	$\frac{KT_1}{T_2} z \left[z + \frac{T_2}{T_1} (1 - e^{-T/T_2}) - 1 \right] \frac{1}{(z-1)(z - e^{-T/T_2})}$
10	$\frac{K}{(T_0 p + 1)^2}$	$\frac{KTe^{-T/T_0}}{T_0^2} \frac{z}{(z - e^{-T/T_0})^2}$

Таблиця 3.2. Вирази z -перетворень для сигналів збурення

Номер	$\varphi(t)$	$F(z)$
1	$a\delta(t)$	a
2	$al(t)$	$\frac{az}{z-1}$
3	at	$\frac{aTz}{(z-1)^2}$
4	$ae^{-\alpha t}$	$\frac{az}{z - e^{-\alpha T}} = \frac{az}{z - d}$
5	$aC^{t/T}$	$\frac{az}{z - C}$
6	$te^{-\alpha t}$	$\frac{Tze^{-\alpha T}}{(z - e^{-\alpha T})^2}$

Приклад 3.1

Визначити аналітичний вираз для розрахунку перехідної характеристики імпульсної системи, якщо передаточна функція її неперервної частини має вигляд

$$W_{\text{п.н.}}(p) = \frac{(1 - e^{-pT})K(T_0 p + 1)}{p^2}.$$

Тут K – коефіцієнт підсилення неперервної частини системи, с^{-1} ; T – період (шаг) квантування неперервного сигналу, с .

Запишемо z -передаточну функцію розімкнутої системи, використавши для цього табл. 3.1:

$$\begin{aligned} W(z) = z [W_{\text{п.н}}(p)] &= z \left[\frac{(1 - e^{-pT})K(T_0p + 1)}{p^2} \right] = \frac{z-1}{z} z \left[\frac{K(T_0p + 1)}{p^2} \right] = \\ &= \frac{KT_0z \left(z + \frac{T}{T_0} - 1 \right)}{(z-1)^2} \frac{z-1}{z} = \frac{KT_0 \left(z + \frac{T}{T_0} - 1 \right)}{z-1}. \end{aligned} \quad (3.1)$$

Вираз (3.1) одержаний за умовою, що $e^{pT} = z$, а $z[1 - e^{-pT}] = \frac{z-1}{z}$.

Нехай у нашому прикладі $K = 0,2 \text{ с}^{-1}$; $T_0 = 4 \text{ с}$; $T = 0,1 \text{ с}$. Тоді вираз (3.1) можна записати так: $W(z) = \frac{0,8(z-0,975)}{z-1}$. Тепер z -передаточна функція замкнутої системи

$$\Phi(z) = \frac{W(z)}{1+W(z)} = \frac{0,44(z-0,975)}{z-0,989} = \frac{Y(z)}{U(z)}, \quad (3.2)$$

де $U(z)$ – z -зображення вхідного сигналу.

Згідно з (3.2) z -зображення вихідного сигналу $Y(z) = \Phi(z)U(z) = \frac{0,44(z-0,975)}{z-0,989}U(z)$.

Якщо $U(z) = \frac{z}{z-1}$, то

$$Y(z) = \frac{z}{z-1} \frac{0,44(z-0,975)}{z-0,989}. \quad (3.3)$$

Вираз (3.3) запишемо так:

$$\frac{0,44(z-0,975)}{(z-1)(z-0,989)} = \frac{A}{z-1} + \frac{B}{z-0,989}.$$

Після обчислення маємо: $A = 1$; $B = -0,56$.

Згідно з табл. 3.2 знаходимо формулу для побудови перехідної характеристики:

$$Y(i) = 1(i) - 0,56(0,989)^i. \quad (3.4)$$

Приклад 3.2

Маючи z -передаточну функцію (3.1) розімкнутої системи, скласти структурну схему замкнутої системи та записати її різнищеві рівняння.

Згідно з (3.1) на рис. 3.2 зображена структурна схема системи.

Згідно з рис 3.2 можемо записати, що

$$\frac{x(z)}{U(z) - x(z)} = \frac{kT_0 z + kT - kT_0}{z - 1}.$$

Якщо $U(z) = \frac{z}{z - 1}$, то різни-

щеве рівняння у z -формі має вигляд

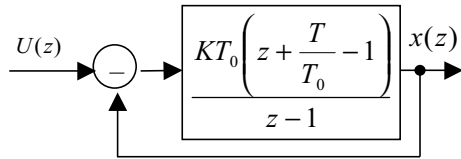


Рис 3.2

$$(1 + kT_0)z \cdot x(z) - (1 - k(T - T_0))x(z) = (kT_0 + k(T - T_0))U(z),$$

а також у часовій формі

$$x(i+1) = \frac{1 - k(T - T_0)}{1 + kT_0} x(i) + \frac{kT_0 + k(T - T_0)}{1 + kT_0} U. \quad (3.5)$$

Далі для параметрів $k = 0,2 \text{ с}^{-1}$; $T_0 = 0,4 \text{ с}$ одержуємо результати аналітичного розрахунку за (3.4) та розв'язання різницьового рівняння (3.5) на ПЕОМ.

3.2. Дослідження перехідних процесів в цифрових автоматичних системах

Задано: структурна схема (рис 3.3) та параметри (табл. 3.3) досліджуваної системи.

Потрібно:

1) записати z -передатну функцію зведеної безперервної частини цифрової системи;

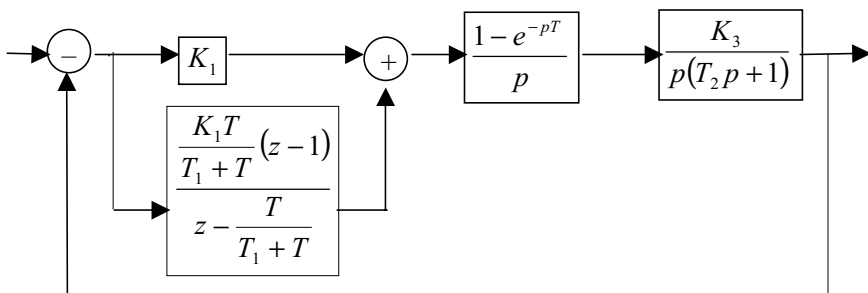
2) скласти розрахункову структурну схему, згідно з якою за-

писати різницеві рівняння цифрового регулятора та зведеної неперервної частини системи;

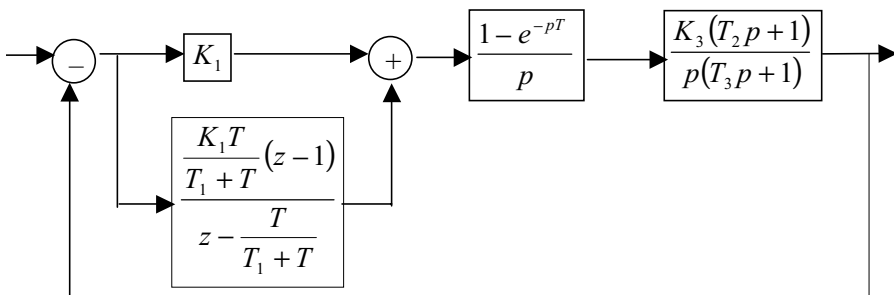
3) розрахувати на ПЕОМ перехідний процес у досліджуваній системі при одиничному ступінчастому входньому впливі;

4) записати z -передатну функцію та різницеве рівняння замкнутої системи;

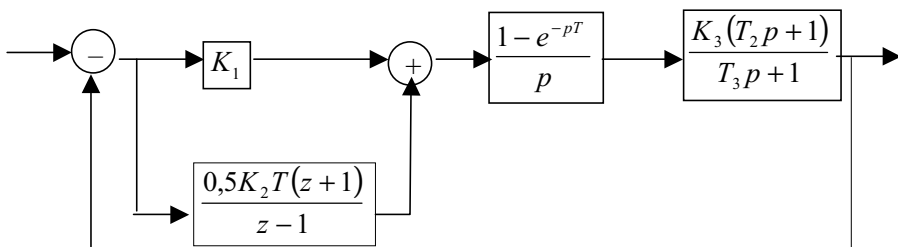
5) знайти аналітичний розв'язок одержаного різницевого рівняння при одиничному ступінчастому входньому впливі;



a



б



в

Рис 3.3

6) записати різницеві рівняння системи в змінних стану та розрахувати перехідний процес у системі на ПЕОМ;

7) в одній системі координат побудувати графіки перехідного процесу та визначити показники якості (максимальне перерегулювання, тривалість перехідного процесу та статичну похибку).

Таблиця 3.3. Параметри досліджуваних систем до роботи

Номер	Схема на рис. 3.3	K_1	K_2	K_3	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$	$T_3, \text{с}$	$T, \text{с}$
1	<i>a</i>	0,5	1,0	2,5	1,0	2,5	—	0,025
2	<i>б</i>	1,0	0,4	3,0	0,5	1,0	2,0	0,05
3	<i>в</i>	0,1	0,4	3,0	1,0	2,0	—	0,05
4	<i>a</i>	0,75	0,6	1,8	0,5	0,54	—	0,02
5	<i>б</i>	0,7	0,2	5,0	1,0	0,8	3,0	0,1
6	<i>в</i>	0,2	0,6	2,0	0,5	2,5	—	0,02
7	<i>a</i>	1,0	1,4	1,4	0,8	0,78	—	0,03
8	<i>б</i>	0,7	0,2	4,0	1,0	0,4	1,8	0,05
9	<i>в</i>	0,4	0,2	1,6	0,8	3,2	—	0,05
10	<i>a</i>	1,2	0,7	2,8	1,2	1,24	—	0,02
11	<i>б</i>	1,2	0,5	4,0	0,5	0,4	1,8	0,05
12	<i>в</i>	0,2	0,5	1,6	0,8	3,2	—	0,05
13	<i>a</i>	1,0	1,4	1,2	0,75	1,75	—	0,025
14	<i>б</i>	1,0	0,35	6,0	0,8	2,0	4,0	0,05
15	<i>в</i>	0,4	0,4	1,0	0,3	1,2	—	0,02
16	<i>a</i>	1,6	0,4	3,4	2,0	2,5	—	0,02
17	<i>б</i>	0,5	0,5	6,0	0,5	2,0	4,0	0,05
18	<i>в</i>	0,5	0,5	0,5	2,0	4,0	—	0,1

Приклад 3.3

Для цифрової системи, структурна схема якої задана на рис 3.4, *a*, знайти z -передаточну функцію $W_{\text{п.н}}(z)$ зведеної неперервної частини. Скласти розрахункову структурну схему згідно з z -передаточними функціями цифрового регулятора та зведеної неперервної частини. Записати різницеві рівняння для регулятора та зведеної неперервної частини.

Користуючись таблицями зворотного z -перетворення, знайти аналітичний вираз для розрахунку перехідної характеристики замкнутої системи. Визначити усталену похибку при одиничному ступінчастому входному впливові. Записати різницеві рівняння замкнутої системи та зобразити їх у змінних стану.

Z -передаточна функція зведеної неперервної частини

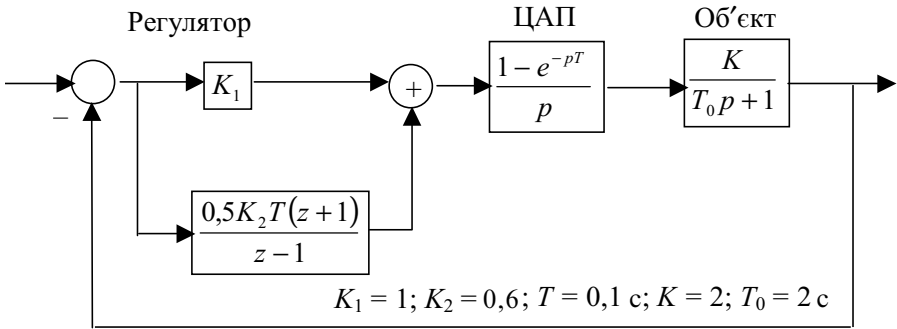
$$W_{п.н}(z) = z \left[\frac{1 - e^{-pT}}{p} \frac{K}{T_0 p + 1} \right] = \frac{z-1}{z} z \left[\frac{K}{p(T_0 p + 1)} \right] =$$

$$= \frac{z-1}{z} \frac{K(1 - e^{-T/T_0}) z}{(z-1)(z - e^{-T/T_0})} = \frac{K(1 - e^{-T/T_0})}{z - e^{-T/T_0}}. \quad (3.6)$$

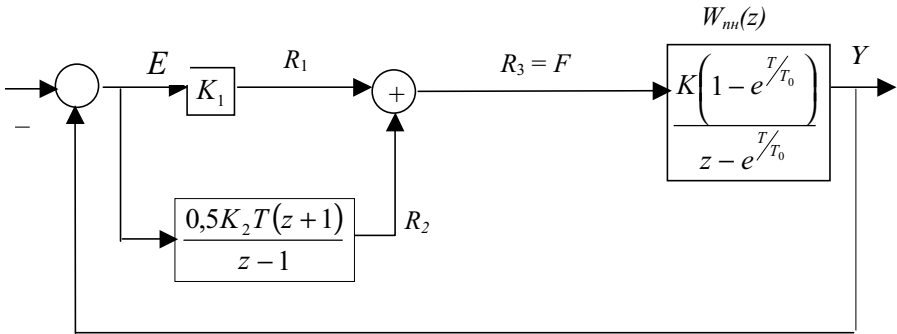
З урахуванням (3.6) складаємо розрахункову структурну схему системи (рис.3.4,б), згідно з якою запишемо різницеві рівняння елементів системи в z -формі:

для регулятора

$$R_1(z) = K_1 E(z); \quad R_2(z) = \frac{0,5K_2 T(z+1)}{z-1} E(z); \quad R_3(z) = F(z) = R_1(z) + R_2(z);$$



a



б

Рис. 3.4

для зведеної неперервної частини

$$Y(z) = \frac{K(1 - e^{-T/T_0})}{z - e^{-T/T_0}} F(z).$$

Переходимо тепер до різницевих рівнянь у часовій формі:
для регулятора

$$\begin{aligned} R_1(n+1) &= K_1 E(n+1); \\ R_2(n+1) &= R_2(n) + 0,5 K_2 T [E(n+1) - E(n)]; \\ R_3(n+1) &= F(n+1) = R_1(n+1) + R_2(n+1); \end{aligned} \quad (3.7)$$

для зведеної неперервної частини

$$Y(n+1) = e^{-T/T_0} Y(n) + K(1 - e^{-T/T_0}) F(n).$$

Згідно з рис. 3.4,б, враховуючи задані параметри, запишемо:
z-передаточні функції

$$D(z) = K_1 + \frac{0,5 K_2 T (z+1)}{z-1} = \frac{1,03z - 0,97}{z-1};$$

z-передаточна зведеної неперервної частини

$$W_{3.н}(z) = \frac{K(-T/T_0)}{z - e^{-T/T_0}} = \frac{0,098}{z - 0,951};$$

Z-передаточна функція розімкнутої системи

$$W(z) = D(z)W_{3.н}(z) = \frac{0,098(1,03z - 0,97)}{(z-1)(z-0,951)};$$

Z-передаточна функція замкнутої системи

$$\Phi(z) = \frac{W(z)}{1 + W(z)} = \frac{0,1z - 0,095}{z^2 - 1,851z + 0,856} = \frac{0,1z - 0,095}{(z - 0,902)(z - 0,949)}; \quad (3.8)$$

Z-передаточна функція системи за похибкою

$$\Phi_E(z) = \frac{(z-1)(z-0,951)}{(z-1)(z-0,951) + 0,098(1,03z - 0,97)}. \quad (3.9)$$

Підставивши в (3.9) $z = 1$, визначаємо, що усталена похибка

$E_{\text{уст}} = 0$. При $U(z) = \frac{z}{z-1}$ запишемо z -зображення керованої величини системи:

$$X(z) = \frac{(0,1z - 0,095)z}{(z - 0,902)(z - 0,949)(z - 1)}. \quad (3.10)$$

Скориставшись методом невизначених коефіцієнтів, вираз (3.10) можна записати так:

$$X(z) = \frac{(0,1z - 0,095)z}{(z - 0,902)(z - 0,949)(z - 1)} = \frac{z}{z - 1} - \frac{1,042z}{z - 0,902} + \frac{0,042z}{z - 0,949}.$$

Згідно з табл. 3.2 зворотного z -перетворення записуємо аналітичний вираз для кривої перехідного процесу:

$$X(i) = 1(i) - 1,042(0,902)^i + 0,042(0,949)^i.$$

Маючи z -передаточну функцію $\Phi(z)$ (3.8) замкнутої системи, можемо записати різницеве рівняння в z -формі:

$$(z^2 - 1,851z + 0,856)X(z) = (0,1z - 0,095)U(z)$$

або ж у часовій формі

$$X(n+2) - 1,851X(n+1) + 0,856X(n) = 0,1U(n+1) - 0,095U(n).$$

Для коефіцієнтів цього рівняння вводимо позначення:

$$a_0 = 0,856; \quad a_1 = -1,851; \quad a_2 = 1; \quad b_0 = -0,095; \quad b_1 = 0,1.$$

Запишемо різницеві рівняння в змінних стану

$$X_1(n+1) = X_2(n);$$

$$X_2(n+1) = -\frac{a_0}{a_2}X_1(n) - \frac{a_1}{a_2}X_2(n) + \frac{1}{a_2}U$$

та рівняння спостереження

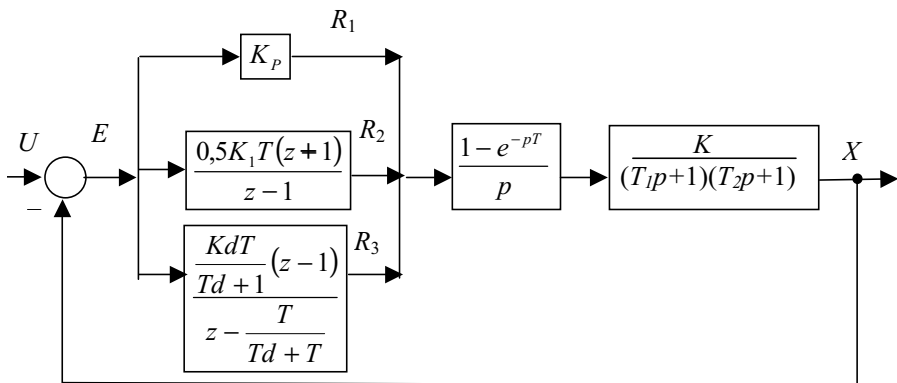
$$Y(n+1) = b_0X_1(n+1) + b_1X_2(n+1).$$

3.3. Дослідження цифрових систем з типовими законами управління

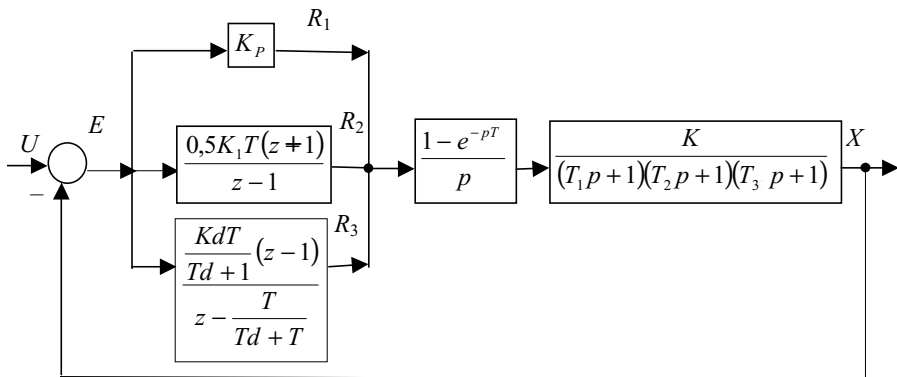
Задано: структурна схема досліджуваної системи (рис. 3.5); параметри неперервної частини системи та цифрового регулятора (табл. 3.4); таблиця z -перетворень для передаточних функцій (табл. 3.1)

Потрібно:

- 1) записати z -передаточну функцію зведеної цифрової системи;
- 2) скласти структурну схему цифрової системи та записати різниці рівняння для моделювання на ПЕОМ перехідних процесів при P -, PI - та PID -законах управління. При цьому, для P -закону



a



б

Рис. 3.5

коефіцієнт підсилення K_p прийняти спочатку рівним заданому, а потім збільшити його вдвічі;

3) для всіх розглянутих випадків за даними графіків перехідного процесу, а також аналітично визначити усталені похибки в досліджуваних системах. Визначити також величину перерегулювання та тривалість перехідного процесу.

Таблиця 3.4. Параметри досліджуваних систем

Номер	Схема на рис.3.5	T	K	T_1 , с	T_2 , с	T_3 , с	K_p	K_1	K_d	T_d
1	<i>a</i>	0,1	1,0	0,5	1,0	—	2,0	1,5	1,0	0,2
2	<i>б</i>	0,07	1,5	0,8	0,9	1,0	1,0	0,7	1,3	0,4
3	<i>в</i>	0,25	1,0	2,0	3,0	—	2,0	0,75	1,5	0,8
4	<i>a</i>	0,1	2,0	1,0	2,0	3,0	1,0	0,3	1,6	0,7
5	<i>б</i>	0,05	2,0	0,5	0,9	1,5	1,0	0,4	1,4	0,25
6	<i>в</i>	0,2	1,2	2,0	3,0	—	4,0	1,0	3,0	0,4
7	<i>a</i>	0,1	1,5	1,5	2,0	—	2,5	1,0	1,0	0,4
8	<i>б</i>	0,07	2,2	0,6	1,2	1,8	1,0	0,45	1,6	0,35
9	<i>в</i>	0,1	2,0	0,5	1,0	—	1,0	0,75	0,6	0,2
10	<i>a</i>	0,08	2,7	0,8	1,4	2,0	1,0	0,35	2,0	0,3
11	<i>б</i>	0,09	3,0	1,8	0,9	2,2	1,0	0,2	2,1	0,42
12	<i>в</i>	0,1	2,0	1,0	2,0	—	1,0	0,5	1,0	0,2
13	<i>a</i>	0,12	0,9	1,1	1,7	1,0	0,25	1,8	0,3	0,12
14	<i>б</i>	0,15	2,5	1,5	3,0	—	2,0	1,0	3,0	0,4
15	<i>в</i>	0,1	3,0	1,0	2,0	—	1,5	0,5	1,0	0,2
16	<i>a</i>	0,12	3,0	3,0	2,0	1,0	1,0	0,2	2,35	0,35
17	<i>б</i>	0,1	3,0	2,0	2,2	—	1,0	0,25	1,0	0,4
18	<i>в</i>	0,2	3,6	1,2	2,3	3,4	1,0	0,1	2,6	0,45

Приклад 3.4. Задана структурна схема цифрової САУ з типовими законами керування (рис. 3.6). Визначити перехідні процеси в системі при використанні типових законів управління – P -, PI - та PID -законів.

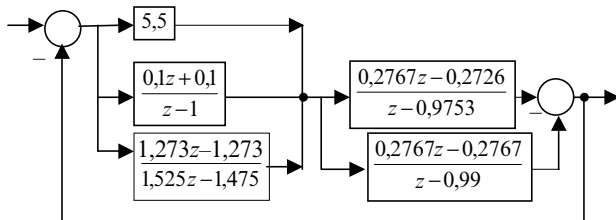


Рис. 3.6

Схема цифрової системи з типовими законами керування для дослідження на ПЕОМ відображена на рис. 3.7. Результати розрахунку наведені на рис. 3.8.

Графіки перехідних процесів показані в одній системі координат відповідно для P -, PI - та PID -законів.

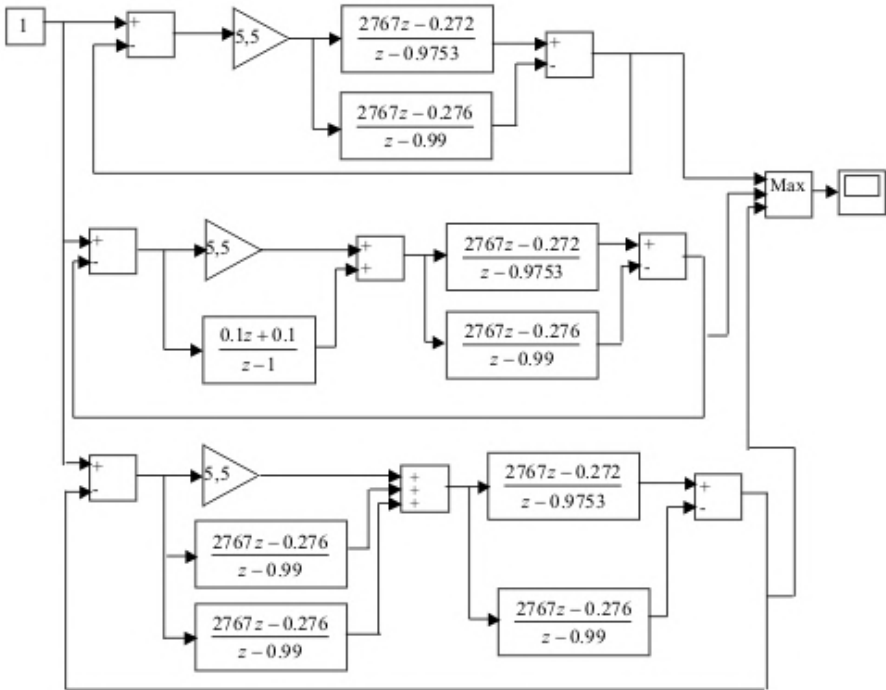


Рис. 3.7

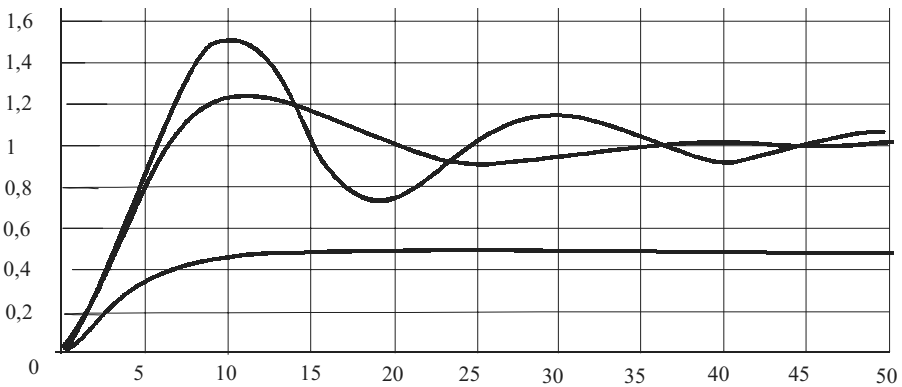


Рис. 3.8

3.4. Синтез алгоритмів управління в цифрових САУ

Задані: структурні схеми досліджуваних цифрових систем (рис. 3.9); параметри об'єктів управління (табл. 3.5); таблиця z-перетворень для передаточних функцій (див. табл. 3.1).

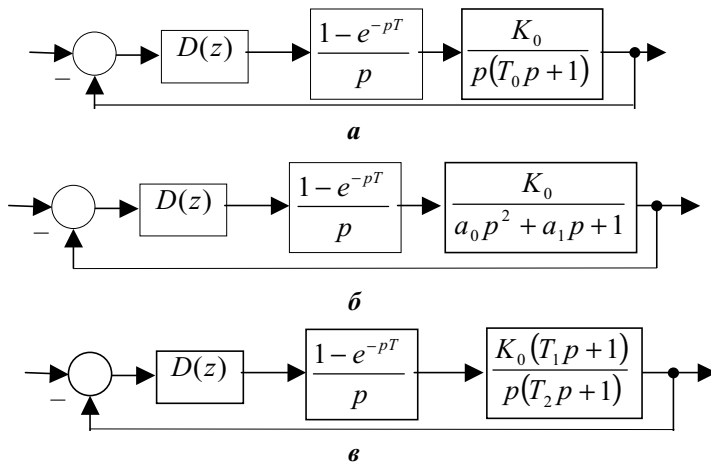


Рис. 3.9

Таблиця 3.5. Параметри досліджуваних систем

Номер	Схема на рис. 3.9	K_0	$T_0, \text{с}$	$a_0, \text{с}^2$	$a_1, \text{с}$	$T_1, \text{с}$	$T_2, \text{с}$
1	а	0,85	0,34				
2	б	1,45		24	11		
3	в	0,75				0,8	2,4
4	а	0,72	0,28				
5	б	0,95		100	25		
6	в	1,25				0,5	1,6
7	а	0,44	0,42				
8	б	1,34		60	19		
9	в	1,25				0,4	1,2
10	а	1,14	0,48				
11	б	0,78		56	15		
12	в	1,94				0,6	1,8
13	а	1,42	0,24				
14	б	0,72		200	30		
15	в	0,78				0,34	1,45
16	а	2,14	0,18				
17	б	0,48		250	35		
18	в	2,14				0,28	0,85

Потрібно:

1) записати z -передаточну функцію зведеної неперервної частини системи та визначити крок квантування T ;

2) визначити z -передаточну функцію цифрового алгоритму управління, який забезпечував би монотонний перехідний процес заданої тривалості (перехідний процес повинен закінчуватися за $i = 50$ кроків квантування);

3) скласти математичну модель синтезованої САУ та реалізувати цю модель на ПЕОМ при одиничному вхідному ступінчастому впливі.

Приклад 3.5

Виконати позначені вище умови для цифрової САУ, яка задана структурною схемою (рис. 3.10).

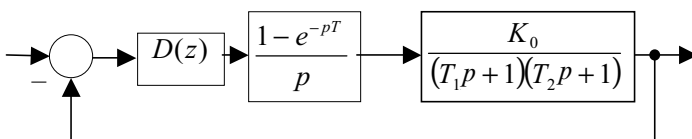


Рис. 3.10

Вихідні дані: $K_0 = 1$; $T_1 = 5$ с; $T_2 = 10$ с; $T = 1$ с. Запишемо z -передаточну функцію зведеної неперервної частини системи:

$$\begin{aligned}
 W_{3.н} &= z \left[\frac{1 - e^{-pT}}{p} \frac{K_0}{(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \right] = \frac{z-1}{z} z \left[\frac{K_0}{p(T_1 p + 1)(T_2 p + 1)} \right] = \\
 &= K_0 \left[\frac{T_1}{T_2 - T_1} \frac{z-1}{z - e^{-T/T_1}} - \frac{T_2}{T_2 - T_1} \frac{z-1}{z - e^{-T/T_2}} \right].
 \end{aligned}$$

З урахуванням вихідних даних маємо:

$$W_{3.н}(z) = \frac{0,009 K_0 (z + 0,889)}{(z - 0,819)(z - 0,905)}. \quad (3.11)$$

Беручи до уваги (3.11), запишемо z -передаточну функцію бажаного алгоритму управління:

$$D(z) = \frac{(z - 0,819)(z - 0,905)}{(z + 0,889)(z - 1)}.$$

Тепер z -передаточна функція бажаної розімкнутої САУ

$$W(z) = D(z)W_{3.н}(z) = \frac{0,009K_0}{z-1} = \frac{1-A}{z-A}.$$

Тут

$$0,009K_0 = 1-A. \quad (3.12)$$

z -передаточна функція замкнутої системи

$$W_{3.н}(z) = \frac{W(z)}{1+W(z)} = \frac{1-A}{z-1}.$$

З урахуванням $m = 3/i$ та $A = e^{-m}$ маємо: $t_0 = iT = 50 \cdot 1 = 50$ с;

$$m = \frac{3}{n} = \frac{3}{50} = 0,06.$$

$$A = e^{-m} = e^{-0,06} = 0,942. \quad (3.13)$$

Звідси за (3.12) та (3.13) визначаємо уточнене значення коефіцієнта підсилення об'єкта K_0 , за яким буде забезпечена задана тривалість перехідного процесу:

$$K_0 = 6,44.$$

Складемо тепер розрахункову структурну схему синтезованої САУ (рис. 3.11).

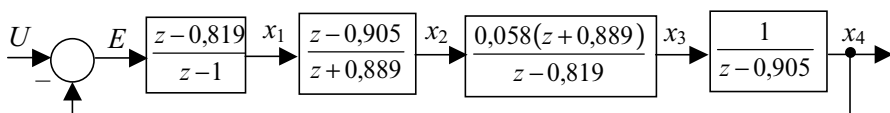


Рис. 3.11

За даними рис. 3.10 запишемо різниці рівняння розрахованої системи. Після виконання перетворень маємо:

$$E(n+1) = U(n+1) - x_4(n);$$

$$x_1(n+1) = x_1(n) + E(n+1) - 0,819E(n);$$

$$x_2(n+1) = x_1(n+1) - 0,905x_1(n) - 0,889x_2(n);$$

$$x_3(n+1) = 0,058x_2(n+1) + 0,0516x_2(n) + 0,819x_3(n);$$

$$x_4(n+1) = x_3(n) + 0,905x_4(n).$$

Перевірка результатів синтезу на ПЕОМ (рис. 3.12) свідчить про те, що умови прикладу виконані.

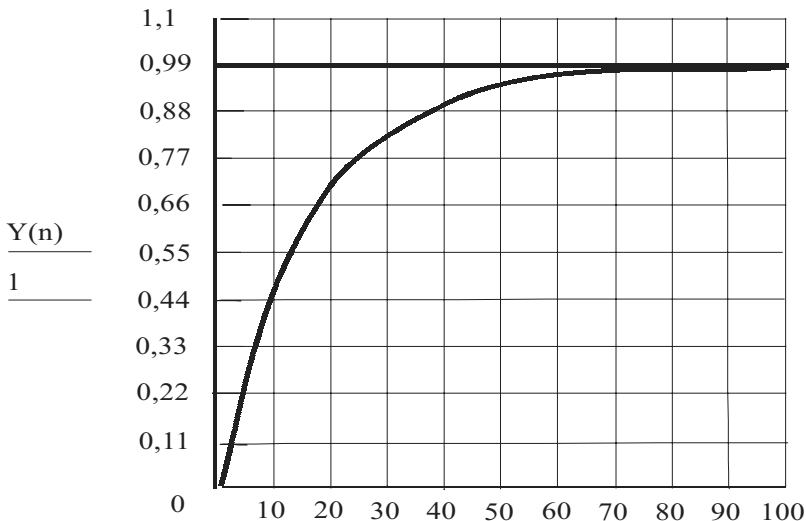


Рис. 3.12

Розділ 4. АНАЛІЗ ДИСКРЕТНИХ СИСТЕМ КЕРУВАННЯ ЗА ДОПОМОГОЮ MATLAB

Аналіз і синтез дискретних систем керування значно полегшується при використанні інтерактивних комп'ютерних засобів. Багато функцій MATLAB, що застосовуються до безперервних систем, мають аналоги, розроблені спеціально для дискретних систем. Моделі об'єктів у вигляді дискретних передатних функцій утворюються в MATLAB за допомогою функції *tf*. Застосування функції *tf* проілюстроване на рис. 4.1,*а*. За допомогою функцій *c2d* і *d2c* можна виконати перетворення моделі системи (рис. 4.1,*б,в*). Функція *c2d* перетворює безперервну систему в дискретну, а функція *d2c* – навпаки.

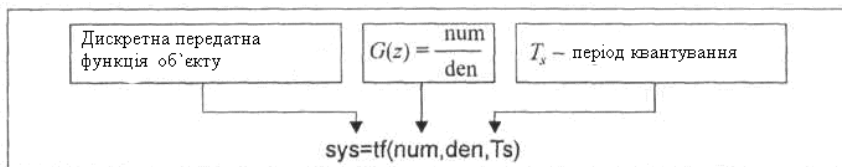
Приклад 4.1

Розглянемо об'єкт керування з передатною функцією

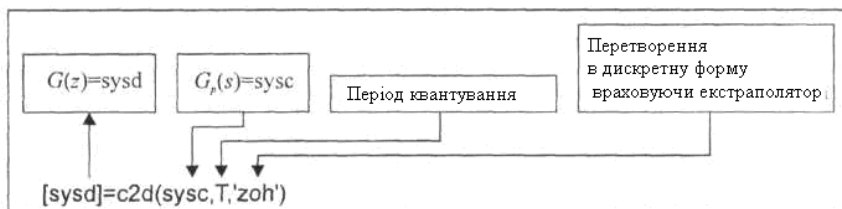
$$G_p(s) = \frac{1}{s(s+1)}.$$

При періоді квантування $T = 1$ передатна функція, що одержана аналітичними способами, має вигляд

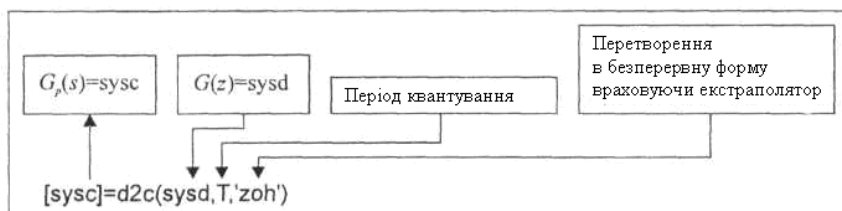
$$G(z) = \frac{0,3678(z + 0,7189)}{(z - 1)(z - 0,3678)} = \frac{0,3678z + 0,2644}{z^2 - 1,3678z + 0,3678}. \quad (4.1)$$



a



б



в

Рис. 4.1

На рис. 4.2 показано, як та ж сама передатна функція може бути отримана за допомогою MATLAB:

$$G(s) = G0(s)Gp(s) \text{ у } G(z).$$

При моделюванні дискретних систем також використовуються функції `step`, `impulse` та `lsim`. Застосування функції `step`, за допомогою якої визначається перехідна характеристика системи, проілюстроване на рис. 4.3. Реакція системи на одиничний імпульсний сигнал знаходиться за допомогою функції `impulse` (рис. 4.4), а функція `lsim` дозволяє знайти реакцію системи на довільний вхідний сигнал (рис. 4.5).



Рис. 4.2

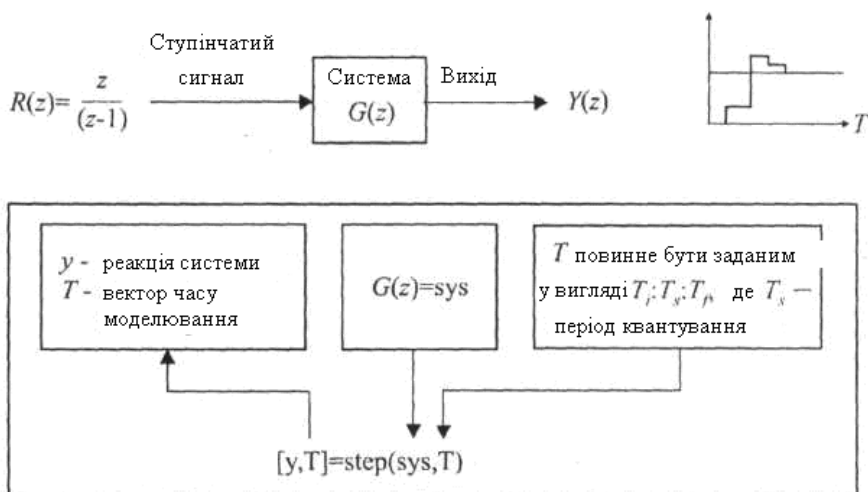


Рис. 4.3

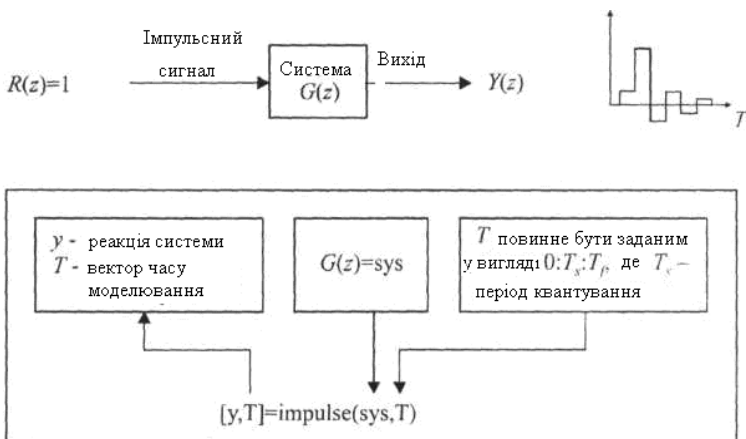


Рис. 4.4

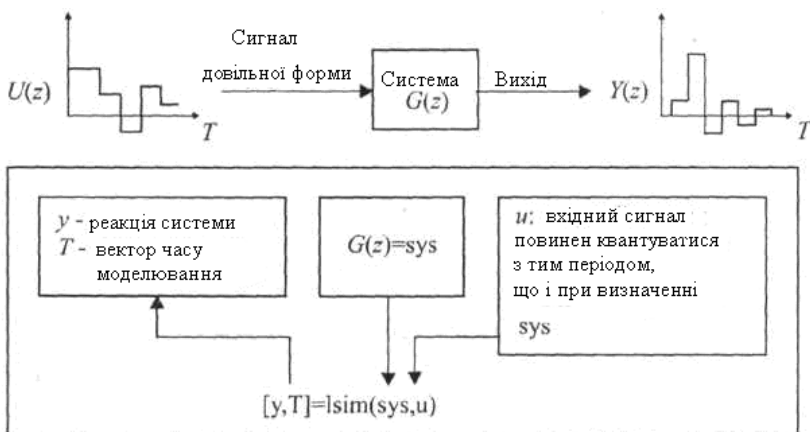


Рис. 4.5

Покажемо, як можна одержати перехідну характеристику, не вдаючись до процедури ділення чисельника на знаменник.

Приклад 4.2. Перехідна характеристика дискретної системи

Розглянемо задачу визначення перехідної характеристики замкнутої дискретної системи з передатною функцією

$$\frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{0,3678z + 0,2644}{z^2 - z + 0,6322}.$$

Відповідна перехідна характеристика дискретної системи другого порядку на одиничний східчастий вхідний сигнал зображена на рис. 4.6. Для визначення дійсної реакції системи у вигляді безперервної функції $y(t)$ був використаний скрипт MATLAB, наведений на рис. 4.7.

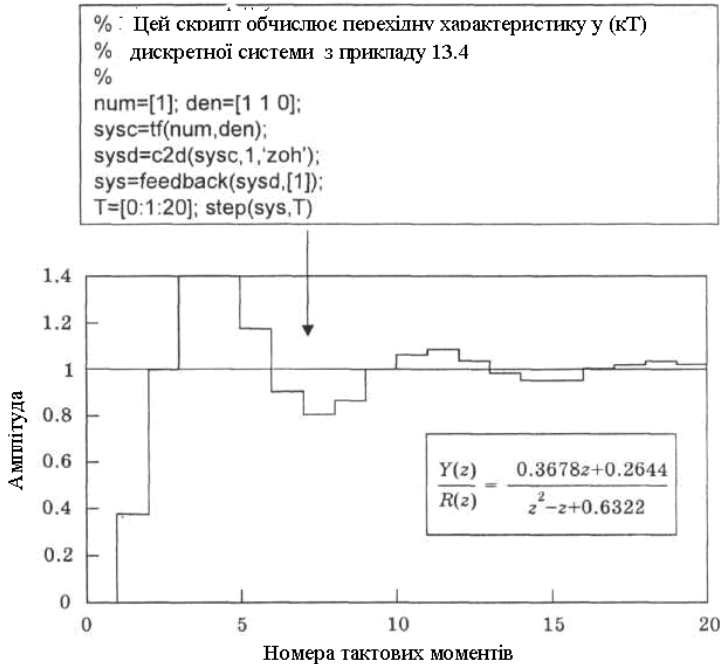


Рис. 4.6

У цьому скрипті член es був апроксимований дрібно-раціональним виразом за допомогою функції rade другого порядку при періоді квантування $T = 1$ с. Комп'ютер використовується в якості цифрового коригувального пристрою. У наступному прикладі розглянемо ту ж задачу, але вирішимо її за допомогою MATLAB.

Приклад 4.3. Кореневий годограф цифрової системи керування
Припустимо, що передатна функція об'єкта керування є

$$G(z) = \frac{0,3678(z + 0,7189)}{(z - 1)(z - 0,3678)}.$$

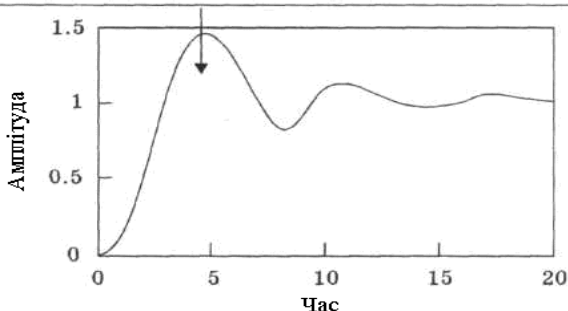


Рис. 4.7

Оберемо регулятор із передатною функцією

$$D(z) = \frac{K(z - 0,3678)}{z + 0,2400},$$

де K – параметр, що підлягає визначенню. Якщо

$$G(z)D(z) = K \frac{0,3678(z + 0,7189)}{(z - 1)(z + 0,2400)}, \quad (4.2)$$

то зіштовхуємося з задачею, для вирішення якої безпосередньо можна скористатися методом кореневого годографа. Функція `rlocus` стосовно дискретних систем (рис. 4.8) діє так само, як і для безперервних систем. На рис. 4.8 показано, як за допомогою цієї функції можна побудувати кореневий годограф, що відповідає виразу (4.2).

Нагадаємо, що область стійкості знаходиться всередині одиничної окружності на z -площині. Так само, як і в безперервних си-

стемах, функцію `rlocfind` можна використовувати для визначення коефіцієнта підсилення, що відповідає будь-якому заданому положенню коренів на годографі. Використовуючи цю функцію, ми можемо встановити, що корені характеристичного рівняння замкнутої дискретної системи будуть знаходитися на одиничній окружності при $k = 4,639$.

Приклад 4.4. Синтез системи зчитування інформації з диска

Синтезуємо цифровий регулятор для системи зчитування інформації з диска. При обертанні диска відповідний датчик, пов'я-

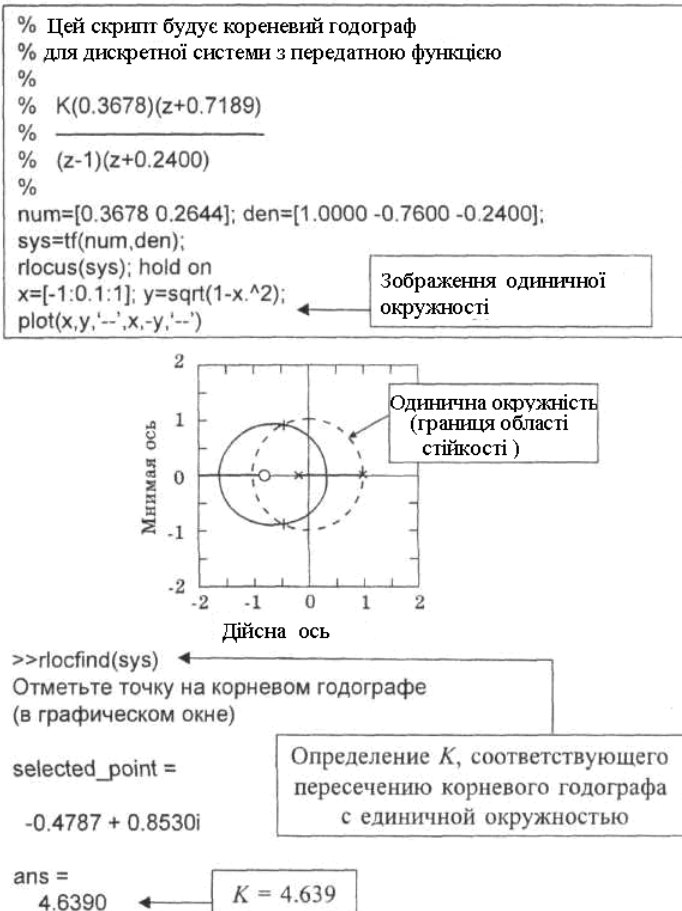


Рис. 4.8

заний з голівкою, визначає номер доріжки і дозволяє обчислити сигнал помилки. На підставі цього сигналу дисковод розпізнає, що доріжка знайдена невірно, і тому обертається. Так як диск обертається з постійною швидкістю, то час T між зміною положення голівки є постійним. Період квантування знаходиться в межах від 100 мкс до 1 мс. Таким чином, ми одержуємо інформацію про помилку в дискретні моменти часу. Щоб забезпечити бажану якість системи, можна використати цифровий регулятор, як показано на рис. 4.9, де $G(z) = Z\{G_0(s)G_p(s)\}$.

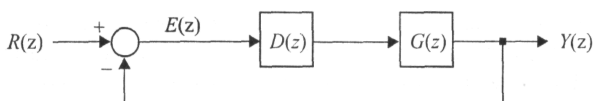


Рис. 4.9

Треба визначити $D(z)$.

Спочатку знайдемо $G(z) = Z\{G_0(s)G_p(s)\}$.

Оскільки

$$G_p = \frac{5}{s(s+20)}, \quad (4.3)$$

$$\text{то } G_0(s)G_p(s) = \left(\frac{1-e^{-sT}}{s} \right) \frac{5}{s(s+20)}.$$

Врахуємо, що при $a = 20$ і $T = 1$ мс $e^{-a} = 0,98$. Тоді очевидно, що полюс $s = -20$ у виразі (4.3) має незначний ефект, тому можна

приблизно вважати, що $G_p(s) \approx \frac{0,25}{s}$. Тоді отримуємо:

$$\begin{aligned} G(z) &= Z\left\{ \frac{1-e^{-sT}}{s} \cdot \frac{0,25}{s} \right\} = (1-z^{-1}) \cdot 25 \cdot Z\left\{ \frac{1}{s^2} \right\} = \\ &= (1-z^{-1}) \cdot 0,25 \cdot \frac{Tz}{(z-1)^2} = \frac{0,25T}{z-1} = \frac{0,25 \cdot 10^{-3}}{z-1}. \end{aligned}$$

Цифровий регулятор $D(z)$ обираємо так, щоб задовольнити

вимогам до якості системи. Якщо прийняти $D(z) = k$, то одержимо:

$$D(z)G(z) = \frac{K \cdot 0,25 \cdot 10^{-3}}{z-1}.$$

Кореневий годограф даної системи зображений на рис. 4.10.

Якщо $k = 4000$, то $D(z)G(z) = \frac{1}{1-z}$.

Отже, замкнута система має передатну функцію

$$T(z) = \frac{D(z)G(z)}{1 + D(z)G(z)} = \frac{1}{z};$$

таким чином, варто очікувати, що час реакції даної системи на східчастий вхідний сигнал буде мінімальним. Дійсно, перерегулювання дорівнює 0 %, а час уставлення складає 2 мс.



Рис. 4.10

Задачі на розв'язання за допомогою MATLAB

1. Дискретна система має передатну функцію

$$G(z) = \frac{0,2145z + 0,1609}{z^2 + 0,75z + 0,125}.$$

За допомогою MATLAB побудуйте графік реакції системи на одиничний східчастий сигнал. За графіком переконайтеся, що стало значення вихідного сигналу дорівнює 1.

2. Перетворіть наступні неперервні передатні функції в дискретну форму за допомогою функції **c2d**. Вважайте, що період квантування $T = 1$ с, і врахуйте наявність екстраполятора нульового порядку $G_0(s)$.

$$\text{а) } G_p(s) = \frac{1}{s}; \quad \text{б) } G_p(s) = \frac{s}{s^2 + 4};$$

$$\text{в) } G_p(s) = \frac{s+5}{s+1}; \quad \text{г) } G_p(s) = \frac{1}{s(s+4)}.$$

3. Передатна функція замкнутої дискретної системи має вигляд

$$T(z) = \frac{Y(z)}{R(z)} = \frac{1,7(z+0,46)}{z^2 + z + 0,5}.$$

а) Обчисліть перехідну характеристику системи за допомогою функції **step**.

б) Вважаючи, що період квантування $T = 0,1$ с, за допомогою функції **d2c** визначте безперервну передатну функцію, еквівалентну $T(z)$.

в) За допомогою функції **step** обчисліть перехідну характеристику отриманої безперервної системи і порівняйте її з результатом із п. "а".

4. Побудуйте кореневий годограф системи, що має передатну функцію $G(z)D(z) = K \frac{z}{z^2 - z + 0,1}$.

Визначте діапазон значень K , при якому система стійка.

5. Побудуйте кореневий годограф системи керування з цифровим регулятором, зображеної на рис. 4.11, і визначте діапазон значень K , при якому система стійка.

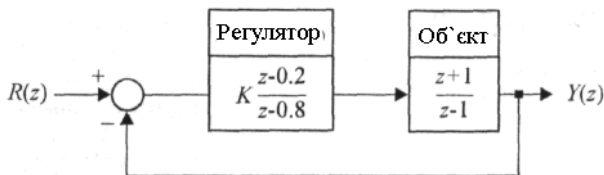


Рис. 4.11

6. Розгляньте дискретну систему, передатна функція якої в розімкнутому стані має вигляд $G(z)D(z) = K \frac{z^2 + 4z + 4,25}{z^2 - 0,1z - 1,5}$.

а) За допомогою функції **rlocus** побудуйте кореневий годограф системи.

б) За кореневим годографом з допомогою функції **rlcfind** визначте діапазон значень K , при якому система стійка.

7. Шліфувальний верстат має передатну функцію

$$G_p(s) = \frac{10}{s(s+5)}.$$

Для підвищення якості опрацювання поверхні пропонується використовувати цифрову систему керування, в якій комп'ютер представлено передатною функцією $D(z)$. У синтезованій системі запас по фазі має складати не менше 45°, а час установа (за критерієм 2 %) повинен бути менше 1 с.

а) Щоб задовольнити висунутим вимогам, синтезуйте регулятор із передатною функцією $G_c(s) = K \frac{s+a}{s+b}$.

б) Вважаючи, що період квантування $T = 0,02$ с, перетворіть $G_c(s)$ у $D(z)$.

в) Проделайте безперервну систему при одиничному східчастому вхідному сигналі.

г) Проделайте дискретну систему при одиничному східчастому вхідному сигналі.

д) Порівняйте результати, що отримані в пп. "в" і "г", і зробіть відповідні висновки.

РЕКОМЕНДОВАНА ЛІТЕРАТУРА

1. *Дорф Р.* Современные системы управления. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
 2. *Куо Б.* Теория и проектирование цифровых систем управления. – М.: Машиностроение, 1986. – 448 с.
 3. *Точки Рональдс, Уидмер Нил.* Цифровые системы. Теория и практика. – М.: Издательский дом "Вильямс", 2004. – 1024 с.
 4. *Филлипс Ч., Харбор Р.* Системы управления с обратной связью. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2001. – 616 с.
 5. *Шаруда В.Г.* Практикум з теорії автоматичного управління. – Дніпропетровськ: Національна гірнича академія України, 2002. – 414 с.
-

ЗМІСТ

Вступ	3
Розділ 1. Математичний опис і аналіз дискретних та цифрових систем	3
1.1. Дискретні системи	3
1.2. Імпульсні системи	11
1.3. Цифрові системи	19
Розділ 2. Контрольні Задачі по дискретним та цифровим системам керування	26
2.1. Математичний опис і аналіз дискретних та цифрових систем	26
2.2. Синтез систем керування	36
Розділ 3. Контрольні завдання для дослідження дискретних та цифрових систем	39
3.1. Дослідження імпульсних систем	39
3.2. Дослідження перехідних процесів в цифрових автоматичних системах	43
3.3. Дослідження цифрових систем з типовими законами управління	49
3.4. Синтез алгоритмів управління в цифрових САУ	52
Розділ 4. Аналіз дискретних систем керування за допомогою MATLAB	55
Рекомендована література	66

Навчальне видання

**БРОВИНСЬКА Ніна Михайлівна
ХЛОПЕНКО Микола Якович
ШАРЕЙКО Дмитро Юрійович**

**ПРАКТИКУМ З ДИСЦИПЛІНИ
"ПРОЕКТУВАННЯ ДИСКРЕТНИХ ТА ЦИФРОВИХ
СИСТЕМ КЕРУВАННЯ"**

У двох частинах

Частина перша

(українською мовою)

Редактор М.П. Фоміна
Комп'ютерна правка В.Г. Мазанко, Н.В. Чудновцева
Комп'ютерна верстка Н.В. Чудновцева
Коректор Н.О. Шайкіна

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи до Державного реєстру
видавців, виготівників і розповсюджувачів видавничої продукції
ДК № 1150 від 12.12.2002 р.

Підписано до друку 24.01.06. Папір офсетний. Формат 60×84/16.
Гарнітура "Таймс". Друк офсетний. Ум. друк. арк. 3,8. Обл.-вид. арк. 4,1.
Тираж 100 прим. Вид. № 24. Зам. № 46. Ціна договірна

Видавець і виготівник Національний університет кораблебудування,
54002, м. Миколаїв, вул. Скороходова, 5