

Міністерство освіти та науки України  
Національний університет водного господарства та  
природокористування  
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-  
інтегрованих технологій

**04-03-405M**

### **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до виконання індивідуальної роботи з навчальної дисципліни  
**«Теорія керування в робототехніці»**  
для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за  
освітньо-професійною програмою «Автоматизація,  
комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»  
спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані  
технології та робототехніка»  
денної та заочної форм навчання

Рекомендовано науково-  
методичною радою з якості  
ННІЕАВГ  
Протокол № 5 від 30.12.2024 р.

Рівне – 2024

Методичні вказівки до виконання індивідуальної роботи з навчальної дисципліни «Теорія керування в робототехніці» для здобувачів вищої освіти першого (бакалаврського) рівня за освітньо-професійною програмою «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» спеціальності 174 «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка» денної та заочної форм навчання [Електронне видання] / Христюк А. О. – Рівне : НУВГП, 2024. – 21 с.

Укладач: Христюк А. О., к.т.н., доцент кафедри АЕКІТ.

Відповідальний за випуск: Древецький В. В., д.т.н., професор, завідувач кафедри АЕКІТ.

Керівник освітньої програми «Автоматизація, комп'ютерно-інтегровані технології та робототехніка»: Христюк А. О., к.т.н., доцент кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій.

© А. О. Христюк, 2024  
© НУВГП, 2024

## Передмова

Для кращого засвоєння і розуміння теоретичного матеріалу з дисципліни «Теорія керування в робототехніці», передбачено можливість виконання індивідуальної роботи здобувачами вищої освіти денної та заочної форм навчання .

Індивідуальна робота складається з трьох теоретичних завдань описового характеру і однієї задачі. Варіанти завдань студенти визначають за двома цифрами порядкового номера в журналі академічної групи.

При виконанні індивідуальної роботи здобувачі вищої освіти закріплюють матеріал, викладений на лекціях, вчать досліджувати та аналізувати нелінійні та імпульсні системи.

Індивідуальна робота виконується у виді пояснювальної записки. Записку оформляють на аркушах паперу формату А4.

При виконанні індивідуальної роботи необхідно дотримуватись таких вимог:

- на титульній сторінці вказуються зверху назви навчального закладу, ННІ і кафедри;
- повна назва роботи;
- нижче з правої сторони потрібно написати “Індивідуальну роботу виконав...” і далі прізвище, ім’я і по батькові, номер варіанта;
- прізвище та ініціали викладача;
- внизу сторінки проставляють рік виконання;
- на другій сторінці записують завдання.

В кінці роботи приводиться список використаної літератури.

Пояснювальна записка має бути в представлена у друкованому або рукописному вигляді.

## Теоретична частина

### Питання до контрольної роботи

1. Особливості нелінійних систем. Типові нелінійні елементи і їх характеристики.
2. Складання рівнянь нелінійних систем. Визначення статичних характеристик послідовного, паралельного та зустрічно-паралельного з'єднань нелінійностей.
3. Дослідження нелінійних систем методом фазового простору (фазової площини).
4. Фазові портрети лінійних та нелінійних систем. Особливі точки та особливі лінії на фазових портретах нелінійних систем.
5. Методи побудови фазових траєкторій нелінійних систем.
6. Побудова часових характеристик за фазовими траєкторіями.
7. Метод гармонічної лінеаризації (гармонічного балансу).
8. Гармонічний коефіцієнт передачі нелінійного елемента та методи його визначення.
9. Дослідження параметрів автоколивальних в нелінійних системах методом гармонічного балансу.
10. Стійкість нелінійних систем.
11. Визначення стійкості за О. М. Ляпуновим. Види стійкості.
12. Критерій абсолютної стійкості В.М.Попова.
13. Нелінійні корегуючі ланки. Коригування нелінійних систем.
14. Випадкові величини і їх характеристики.
15. Випадкові процеси і їх характеристики в системах автоматичного управління.
16. Аналіз систем автоматичного управління при випадкових впливах.
17. Дискретні системи, їх основні поняття та визначення.
18. Різницеві рівняння в системах автоматичного управління.
19. Дискретне зображення Лапласа. Імпульсна передаточна функція.
20. Ідеальний імпульсний елемент і формуюча ланка.
21. Передаточні функції та особливості частотних характеристик імпульсних систем.
22. Теорема Котельникова про неспотворену передачу інформації в імпульсних системах.
23. Аналіз стійкості імпульсних систем.
24. Методи побудови перехідних характеристик імпульсних систем і аналіз якості регулювання.
25. Цифрові системи управління.

26. Математичний опис систем з ЕОМ в контурі керування.
27. Реалізація типових законів регулювання у цифровій формі.
28. Системи зі змінною структурою.
29. Синтез систем зі змінною структурою (метод фазової площини).
30. Математичне формулювання задачі та характеристика методів реалізації оптимального керування.
31. Системи автоматичного керування оптимальні за швидкодією.
32. Синтез систем автоматичного керування оптимальних за швидкодією.
33. Адаптивні системи управління, загальні положення.
34. Алгоритми адаптивного управління з еталонною моделлю.
35. Аналіз екстримальних систем управління.
36. Ідентифікація і модель для отримання оцінки.
37. Типи ідентифікаторів.
38. Математичний опис багатомірних систем, матрична передаточна функція.
39. Аналіз систем пов'язаного та непов'язаного управління.
40. Системи багатозв'язного керування. Типові динамічні компенсатори.

Номери трьох запитань (теоретичне завдання) вибирають за шифром з табл.1.

Таблиця 1

Остання цифра шифру Передостання цифра шифру	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
0	1, 13 16	1, 14 27	1, 16 28	1, 17 29	1, 18 30	1, 19 31	1, 21 32	1, 22 33	2, 23 34	2, 24 35
1	2, 13 26	2, 14 27	2, 16 28	2, 17 29	2, 18 30	2, 19 31	3, 21 32	3, 22 33	3, 23 34	3, 24 35
2	3, 13 32	3, 15 33	3, 16 34	3, 17 35	4, 18 36	4, 20 37	4, 21 31	4, 22 32	4, 23 33	4, 25 37
3	4, 13 28	4, 15 27	5, 16 26	5, 17 29	5, 18 30	5, 20 26	5, 21 27	5, 22 28	5, 23 29	5, 25 36
4	6, 14 31	6, 15 32	6, 16 33	6, 17 34	6, 19 26	6, 20 36	6, 21 28	6, 22 38	7, 24 39	7, 25 40
5	7, 14 29	7, 15 30	7, 16 31	7, 17 32	7, 19 33	7, 20 36	8, 21 37	8, 22 38	8, 24 39	8, 25 40
6	8, 14 26	8, 15 27	8, 16 28	8, 18 29	9, 19 30	9, 20 31	9, 21 32	9, 23 33	9, 24 34	9, 25 35
7	9, 14 26	9, 15 27	10, 16 28	10, 18 29	10, 19 30	10, 20 31	10, 21 34	10, 23 35	10, 24 34	10, 25 35
8	11, 14 38	11, 15 39	11, 17 40	11, 18 41	11, 19 42	11, 20 26	11, 22 27	11, 23 28	12, 24 29	12, 25 30
9	12, 14 31	12, 15 32	12, 17 33	12, 18 34	12, 19 35	12, 20 36	13, 22 37	13, 23 38	13, 24 39	13, 25 40

## Практична частина

Практична частина складається з розв'язку однієї поставленої задачі трьома методами та порівняльного аналізу отриманих результатів. Для цього потрібно:

- побудувати фазовий портрет системи на підставі диференціальних рівнянь;
- побудувати фазовий портрет системи методом ізокін;
- побудувати фазовий портрет системи за допомогою модуля Simulink системи MatLab;
- провести порівняльний аналіз побудованих різними методами фазових портретів; оцінити їх точність, витрати часу та визначити доцільність використання кожного з методів для розв'язування поставленої задачі.

Структурна схема САУ наведена на рис.1.

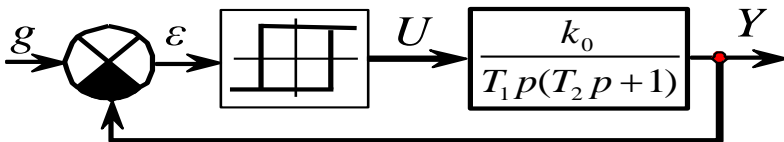


Рис.1. Структурна схема системи автоматичного управління до розв'язку задачі 1

Параметри ланок та початкові умови ( $x_1$ ;  $x_2$ ) вибираються з табл.2 та табл.3.

Таблиця 2

Остання цифра шифру	$k_0$	$T_1$	$T_2$
0	0,5	0,50	0,35
1	1,0	0,25	0,32
2	2,0	0,70	0,27
3	2,5	0,10	0,23
4	3,0	0,40	0,19
5	1,5	1,00	0,15
6	4,0	0,65	0,11
7	5,0	0,90	0,14
8	4,5	0,35	0,18
9	3,5	0,85	0,25

Таблиця 3

Остання цифра суми двох останніх цифр шифру	$B$	$a$	Початкові умови	
			$x_1$	$x_2$
0	1	1,0	0	0
1	2	1,5	1,5	0
2	3	2,5	0	0
3	4	3,0	3,0	0
4	5	2,0	2,0	0
5	1	3,5	3,5	0
6	2	4,5	0	0
7	3	5,0	5,0	0
8	4	4,0	4,0	0
9	5	0,5	0	0

### Пояснення до розв'язування практичної частини

Розглянемо виконання поставленого завдання для таких параметрів ланок:  $T_1=1$ ,  $T_2=1$ ,  $B=1$ ,  $a=1$ ,  $k_0=1$ .

Побудову фазового портрету системи на підставі диференціальних рівнянь проводять зазвичай наступним чином.

На основі структурної схеми записують рівняння розімкнутої САУ:

$$Y(p) = \frac{k_0}{T_1 p(T_2 p + 1)} \cdot U(\varepsilon). \quad (1)$$

Тоді диференціальне рівняння в операторній формі буде мати вигляд:

$$Y(p)T_1T_2p^2 + Y(p)T_1p = k_0U(\varepsilon). \quad (2)$$

Використавши обернене перетворення Лапласа, перейдемо до оригіналів і отримаємо:

$$T_1T_2 \frac{d^2y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} = k_0U(\varepsilon). \quad (3)$$

Статична характеристика нелінійного елемента описується наступною системою рівнянь:

$$U(\varepsilon) = \begin{cases} B, & \text{при } \varepsilon > a \\ B, & \text{при } |\varepsilon| < a, \quad \frac{d\varepsilon}{dt} < 0 \\ -B, & \text{при } \varepsilon < -a \\ -B, & \text{при } |\varepsilon| < a, \quad \frac{d\varepsilon}{dt} > 0. \end{cases} \quad (4)$$



Оскільки функція  $U(\varepsilon)$  може приймати значення  $+B$  та  $-B$ , то матимемо:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} = k_0 B \quad (5)$$

та

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y}{dt^2} + T_1 \frac{dy}{dt} = -k_0 B. \quad (6)$$

В нашому випадку нелінійність складається з двох відрізків прямих ліній, яким відповідають рівняння (5) та рівняння (6).

Запишемо в 1-й нормальній формі Коші:  
розв'яжемо рівняння (5) та (6) відносно старшої похідної

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = \frac{k_0}{T_1 T_2} B - \frac{1}{T_2} \frac{dy}{dt}; \quad (7)$$

$$\frac{d^2 y}{dt^2} = -\frac{k_0}{T_1 T_2} B - \frac{1}{T_2} \frac{dy}{dt}; \quad (8)$$

та введемо нові змінні:

$$x_1 \equiv y; \quad (9)$$

$$\frac{dx_1}{dt} = x_2; \quad (10)$$

отримаємо для рівняння (7)

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{k_0}{T_1 T_2} B - \frac{1}{T_2} x_2, \quad (11)$$

та для рівняння (8):

$$\frac{dx_2}{dt} = -\frac{k_0}{T_1 T_2} B - \frac{1}{T_2} x_2. \quad (12)$$

Розділивши рівняння (11) на рівняння (10), отримаємо:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{k_0 B - T_1 x_2}{T_1 T_2 x_2}, \quad (13)$$

та, відповідно, розділивши рівняння (12) на рівняння (10), отримаємо:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{-k_0 B - T_1 x_2}{T_1 T_2 x_2}, \quad (14)$$

або, розділивши змінні в рівняннях (13) та (14) відповідно, отримаємо:

$$dx_1 = \frac{T_1 T_2 x_2}{k_0 B - T_1 x_2} dx_2, \quad (15)$$

$$dx_1 = \frac{T_1 T_2 x_2}{-k_0 B - T_1 x_2} dx_2. \quad (16)$$

Проінтегрувавши рівняння (15) та (16), знайдемо  $x_1$  для рівнянь (7) та (8) відповідно:

$$x_1 = -T_2 x_2 - \frac{T_2 B k_0}{T_1} \ln |T_1 x_2 - B k_0| + C_1, \quad (17)$$

$$x_1 = -T_2 x_2 + \frac{T_2 B k_0}{T_1} \ln |T_1 x_2 + B k_0| + C_2. \quad (18)$$

Враховувавши вихідні дані, а саме  $T_1=1$ ,  $T_2=1$ ,  $B=1$ ,  $a=1$ ,  $k_0=1$ . маємо :

$$x_1 = -x_2 - \ln |x_2 - 1| + C_1, \quad (19)$$

$$x_1 = -x_2 + \ln |x_2 + 1| + C_2. \quad (20)$$

Маємо дві лінії переключення та дві області побудови, які описуються:

$$\begin{cases} 1, & \text{при } x_1 < -a & x_2 < 0 \\ 1, & \text{при } x_1 < a & x_2 > 0 \\ -1, & \text{при } x_1 > -a & x_2 < 0 \\ -1, & \text{при } x_1 < a & x_2 > 0. \end{cases} \quad (21)$$

З початкових умов (приймаємо нульові початкові умови) знайдемо з рівняння (19):

$$C_1 = x_1 + x_2 + \ln |x_2 - 1| = 0$$

Будуємо табл. 4 залежності  $x_1$  від  $x_2$  за рівнянням (19). Таблиця формується наступним чином. Розпочинаючи з прийнятих початкових умов, задаємося значеннями  $x_2$  (чим менший крок зміни – тим вищою буде точність побудови) та визначаємо відповідні їм величини  $x_1$  за рівнянням (19). Розрахунки продовжуємо до моменту, коли отримана точка потрапить на лінію переключення, величина  $x_1$  стане рівною величині  $a=1$ .

Таблиця 4

$X_2$	$X_1$
0	0
0,4	0,111
0,6	0,316
0,8	0,809
0,8415	1

Коли  $x_1$  стало рівним  $a=1$ , то приймаємо кінцеві значення  $x_1$  та  $x_2$  як початкові умови для розрахунку  $C_2$  :

$$C_2 = x_1 + x_2 - \ln|x_2 + 1| = 1.23 .$$

Будуємо табл. 5 залежності  $x_1$  від  $x_2$  за рівнянням (20) для  $\tilde{N}_2 = 1.23$ , аналогічно тому, як показано вище.

Таблиця 5

$X_2$	$X_1$
0,8415	1,000
0,600	1,100
0,400	1,167
0	1,231
-0,400	1,120
-0,600	0,915
-0,900	-0,172
-0,95	-0,815
-0,9588	-1

Коли  $x_1$  стало рівним  $a=-1$  – крива нашого фазового портрету дійшла до лінії переключення, то приймаємо кінцеві значення  $x_1$  та  $x_2$  як початкові умови для розрахунку  $C_1'$  :

$$C_1' = x_1 + x_2 + \ln|x_2 - 1| = -1,286 .$$

Будуємо табл. 6 залежності  $x_1$  від  $x_2$  за рівнянням (19) для  $\tilde{N}_1' = -1,286$ , аналогічно тому, як показано вище.

Таблиця 6

$X_2$	$X_1$
-0,9588	-1,000
-0,500	-1,192

0	-1,286
0,200	-1,263
0,500	-1,093
0,800	0,477
0,900	0,116
0,960	0,972
0,9612	1,000

Коли  $x_1$  стало рівним  $a=1$  – крива нашого фазового портрету дійшла до лінії переключення, то приймаємо кінцеві значення  $x_1$  та  $x_2$  як початкові умови для розрахунку  $\tilde{N}'_2$  :

$$C'_2 = x_1 + x_2 - \ln|x_2 + 1| = 1,288.$$

Будуємо табл. 7 залежності  $x_1$  від  $x_2$  за рівнянням (20) для  $\tilde{N}'_2 = 1,288$ , аналогічно тому, як показано вище.

Таблиця 7

$X_2$	$X_1$
0,9612	1,000
0,600	1,158
0,400	1,224
0	1,288
-0,200	1,264
-0,600	0,971
-0,900	-0,115
-0,950	-0,758
-0,9611	-1,000

За даними таблиць 4-7 послідовно будуємо графік. Для цього беремо дані послідовно таблиця за таблицею і наносимо точки на осі координат  $x_2(x_1)$ .

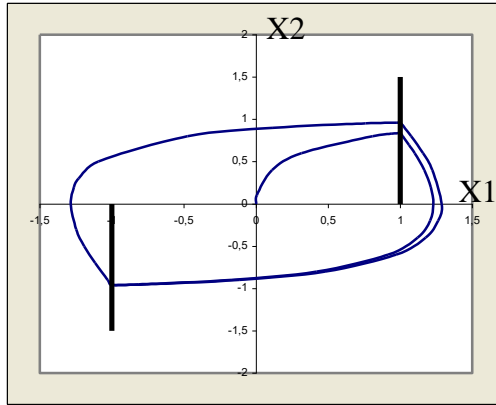


Рис. 2. Фазовий портрет

Графік на рис. 2 і є шуканим фазовим портретом.

Побудову фазового портрету системи методом ізоклін проводять зазвичай наступним чином.

Динамічні властивості нелінійної системи описуються як послідовне з'єднання елементів, і в операторній формі передаточна функція має наступний вигляд:

$$Y(p) = U(\varepsilon) \cdot \frac{k_0}{T_1 p (T_2 p + 1)}, \quad (22)$$

або

$$Y(p) T_1 p (T_2 p + 1) = k_0 U(\varepsilon). \quad (23)$$

Диференціальне рівняння (23) в розгорнутому виді буде мати вигляд:

$$T_1 T_2 p^2 Y(p) + T_1 p Y(p) = k_0 U(\varepsilon). \quad (24)$$

Застосувавши обернене перетворення Лапласа отримаємо:

$$T_1 T_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} = k_0 U(\varepsilon). \quad (25)$$

Статична характеристика нелінійного елемента має вигляд:

$$U(\varepsilon) = \begin{cases} B & \text{при } \varepsilon \geq -a \text{ і } \dot{\varepsilon} < 0 \text{ або } \varepsilon \geq a \text{ і } \dot{\varepsilon} > 0 \text{ (I)} \\ -B & \text{при } \varepsilon < -a \text{ і } \dot{\varepsilon} < 0 \text{ або } |\varepsilon| < a \text{ і } \dot{\varepsilon} > 0 \text{ (II)} \end{cases} \quad (26)$$

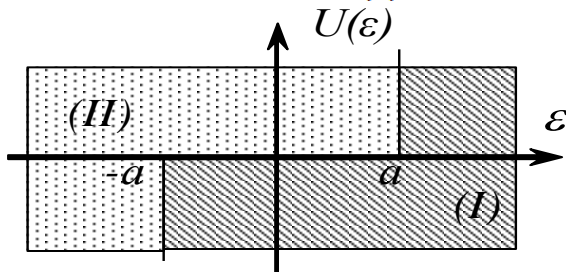


Рис.3. Статична характеристика нелінійного елемента

На рис.3 показано залежність вихідного сигналу нелінійного елемента (реального двопозиційного реле) від сигналу розузгодження що подається на його вхід. На графіку маємо два поля, які визначаються параметрами нелінійного елемента.

Для заданих умов (26) диференціальне рівняння руху системи буде мати вигляд:

$$\begin{cases} T_1 T_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} = k_0 B & (27) \\ T_1 T_2 \frac{d^2 y(t)}{dt^2} + T_1 \frac{dy(t)}{dt} = -k_0 B & (28) \end{cases}$$

Так як фазова площина, відповідно до можливих станів неінійного елемента, може бути розбита на дві області, то необхідно визначити рівняння ізоклін для кожної області.

Знайдемо рівняння ізоклін для області (I) на рис. 3. Введемо позначення

$$x_1 = y; \quad \frac{dy}{dt} = x_2;$$

$$\frac{dx_2}{dx_1} = N - \text{для рівняння (27);}$$

$$\frac{dx_2}{dx_1} = M - \text{для рівняння (28).}$$

Останні вирази визначають нахил фазової траєкторії в даній точці. Рівняння (27) і (28) запишемо в наступному вигляді:

$$T_1 T_2 \frac{dx_2}{dt} + T_1 x_2 = k_0 B, \quad (29)$$

$$T_1 T_2 \frac{dx_2}{dt} + T_1 x_2 = -k_0 B, \quad (30)$$

або

$$\frac{dx_2}{dt} = \frac{k_0 B}{T_1 T_2} - \frac{x_2}{T_2}, \quad (31)$$

$$\frac{dx_2}{dt} = -\frac{k_0 B}{T_1 T_2} - \frac{x_2}{T_2}. \quad (32)$$

Для виключення часу  $t$  розділимо рівняння (31) та (32) на  $\frac{dx_1}{dt} = x_2$ .

В результаті отримаємо:

$$\frac{dx_2}{dx_1} = \frac{k_0 B}{T_1 T_2 x_2} - \frac{1}{T_2}, \quad (33)$$

$$\frac{dx_2}{dx_1} = -\frac{k_0 B}{T_1 T_2 x_2} - \frac{1}{T_2}. \quad (34)$$

Звідси

$$N = \frac{dx_2}{dx_1} = \frac{k_0 B - T_1 x_2}{T_1 T_2 x_2}, \quad (35)$$

$$M = \frac{dx_2}{dx_1} = \frac{-k_0 B - T_1 x_2}{T_1 T_2 x_2}. \quad (36)$$

Отримуємо рівняння ізоклін. Для цього з (35) та (36) маємо:

$$N = \frac{k_0 B - T_1 x_2}{T_1 T_2 x_2}, \quad (37)$$

$$M = \frac{-k_0 B - T_1 x_2}{T_1 T_2 x_2}. \quad (38)$$

Звідки після нескладних перетворень отримаємо, відповідно, для (27) та (28):

$$x_2 = \frac{k_0 B}{NT_1 T_2 + T_1}, \quad (39)$$

$$x_2 = \frac{-k_0 B}{NT_1 T_2 + T_1}. \quad (40)$$

Ізокліни представляють собою прямі, паралельні до осі  $Ox$  і знаходяться від початку координат на відстанях, що залежать від величини нахилу  $N$  та  $M$  при заданих параметрах системи. Задаючи значення  $N$  та  $M$  від 0 до нескінченності, отримаємо сім'ю ізоклін.

Для побудови фазового портрета зручніше спочатку виразити параметри  $N$  та  $M$  через координату  $x_2$ .

Після підстановки числових значень параметрів:  $T_1=1$ ,  $T_2=1$ ,  $B=1$ ,  $a=1$ ,  $k_0=1$ , отримаємо:

$$N = \frac{-x_2 + 1}{x_2}, \quad (41)$$

$$M = \frac{-x_2 - 1}{x_2}. \quad (42)$$



Для рівнянь (41) та (42) при зміні  $x_2$  обчислимо  $N$ ,  $M$ ,  $\arctg N$  та  $\arctg M$ . Значення  $x_2$  обираються в межах від  $-\frac{k_0 B}{T_1}$  до  $\frac{k_0 B}{T_1}$  (ці межі отримуються з рівнянь (37) (38) за умови, що нахил ізоклін у верхньому та нижньому положеннях рівний нулю).

Таблиця 8

$x_2$	1,25	1	0,75	0,5	0,25	0	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,25
$N$	-1,8	-2	-2,33	-3	-5	0	3	1	0,33	0	-0,2
$\arctg N$	-60,94	-63,43	-66,80	-71,56	-78,69	90	71,56	45	18,43	0	-11,30

Таблиця 9

$x_2$	1,25	1	0,75	0,5	0,25	0	-0,25	-0,5	-0,75	-1	-1,25
$N$	-0,2	0	0,33	1	3	0	-5	-3	-2,33	-2	-1,8
$\arctg M$	-11,30	0	18,43	45	71,56	90	-78,69	-71,56	-66,80	-63,43	-60,94

Згідно таблиць 8 і 9 на фазовій площині проводимо ізокліни. На кожній ізокліні наносимо лінії, що вказують нахил фазової траєкторії  $\arctg N$  і  $\arctg M$ , коли вона перетинає дану ізокліну. Далі, починаючи з початкової точки (визначається початковими умовами (приймаємо точку (1;0))) проводимо побудову фазового портрета, шляхом послідовного проведення відрізків між ізоклінами, з умовою, що відрізок перетинає ізокліну під вказаним кутом.

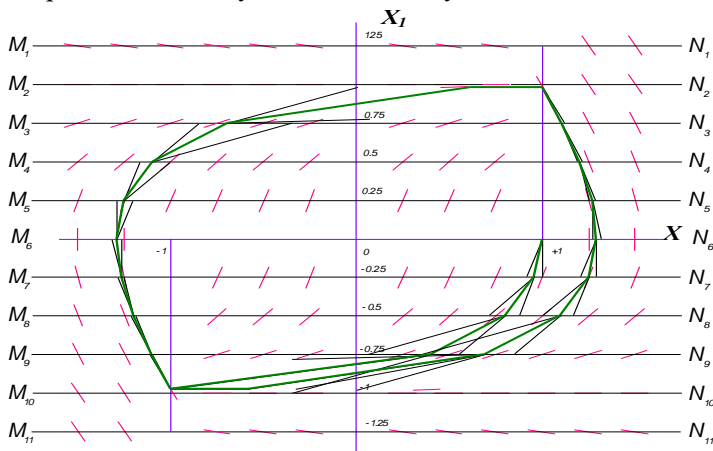


Рис.4. Фазовий портрет, отриманий побудовою методом ізоклін

Для побудови фазового портрету в системі MatLab складемо структурну схему заданої системи використавши бібліотеки модуля Simulink. Виходячи з визначення фазового портрету, сигнал з виходу системи подаємо на два елементи: на вхід  $X$  моделі осцилографа та на вхід диференціатора. На другий вхід моделі осцилографа подати сигнал з виходу диференціатора.

Задавши в програмі MathLab вихідні значення параметрів наступним чином:

- одинична ступінчаста функція – встановлюємо нульове значення вхідного сигналу (рис.5).

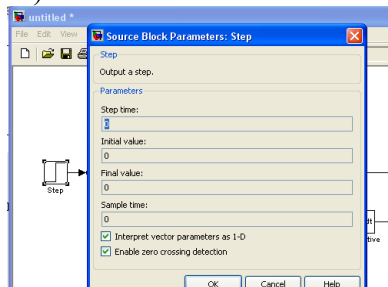


Рис.5. Настроювання блока "Step"

- нелінійний елемент (реальне двопозиційне реле) – встановлюємо параметри реле йного елемента  $B=1, a=1$ .

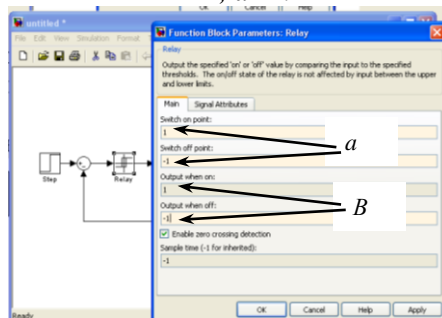


Рис. 6. Настроювання блока "Relay"

- блоки що формують лінійну частину – встановлюємо параметри  $T_1=1, T_2=1, k_0=1$ .

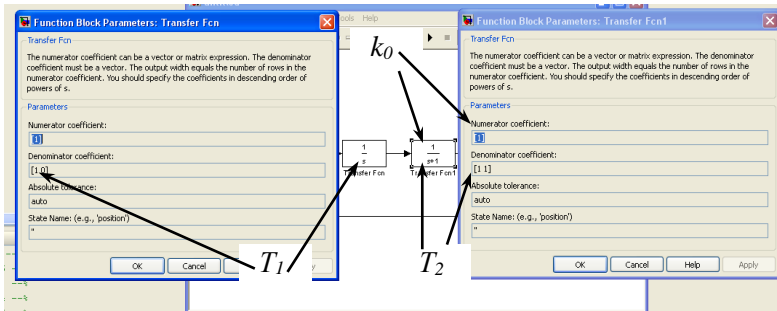


Рис. 7. Налаштування блоків лінійної частини

Налаштування блоку диференціатора ("Derivative") залишаємо без змін, а для осцилографа ("XY Graph") встановлюємо максимальні та мінімальні значення за осями:

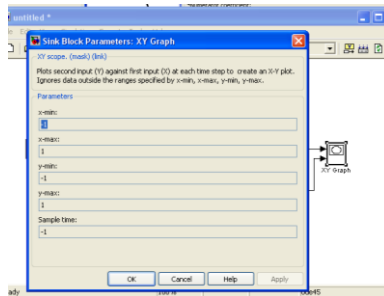


Рис. 8. Налаштування блоку осцилографа

Отримуємо структурну схему (рис.9), готову до моделювання.

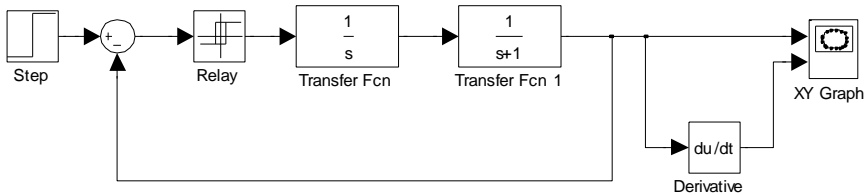


Рис. 9. Структурна схема системи

Обравши тривалість часу моделювання у вікні модуля Simulink (рис. 10), отримаємо фазовий портрет (рис.11).

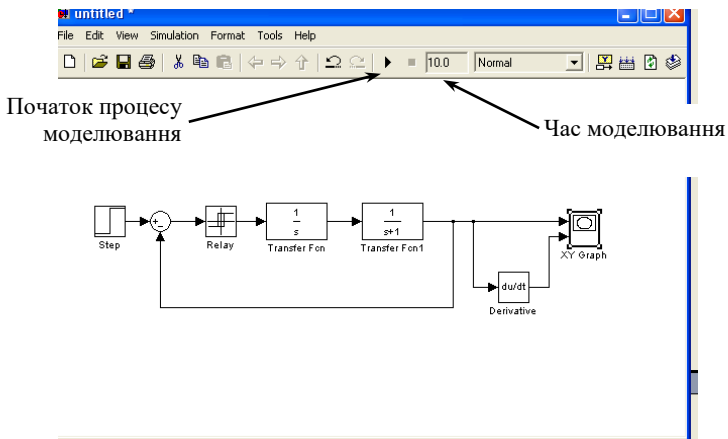


Рис. 10. Вікно модуля Simulink

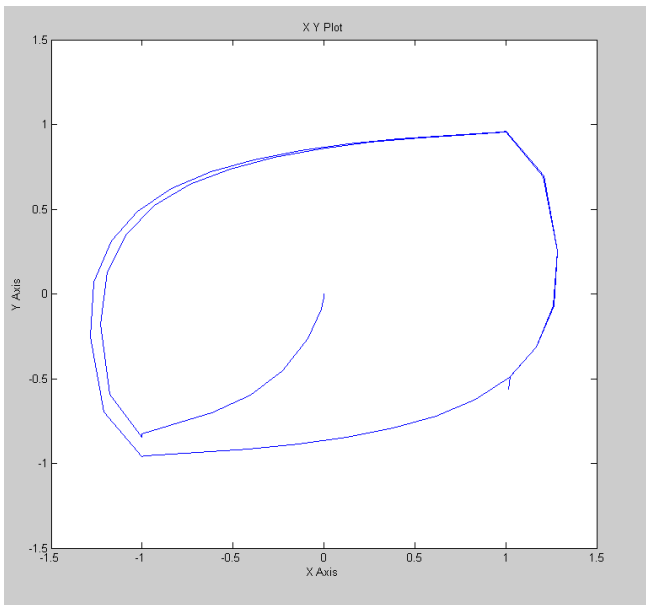


Рис. 11. Фазовий портрет, отриманий шляхом моделювання

Після того як отримано всі три зображення фазового портрету, доцільно звести їх на одній фазовій площині з метою отримання візуальної можливості оцінки подібності отриманих результатів. Після цього необхідно провести аналіз того, коли і який спосіб доцільно використовувати, про їх точність та трудоемкість.

## Література

1. Попович М. Г., Ковальчук О. В. Теорія автоматичного керування : підручник. 2-ге вид., перероб. і доп. К. : Либідь, 2007. 656 с.
2. Аблесімов О. К. Теорія автоматичного керування : навчальний посібник. К. : «Освіта України», 2019. 270 с.
3. Теорія автоматичного керування: Частина II: Курс лекцій / Уклад. М. Г. Попович, Б. І. Приймак. К. : НТУУ «КПІ», 2012. 165 с. URL: <http://ela.kpi.ua/handle/123456789/2209>.
4. Control System Toolbox. User's Guide, The MathWorks, Release 2009b, 2009.
5. Аблесімов О. К., Александров Є. Є., Александрова І. Є. Автоматичне керування рухомими об'єктами і технологічними процесами : навч. посіб. у 4 т. Харків : НТУ «ХПІ», 2008.