



Національний університет
водного господарства
та природокористування

Міністерство освіти і науки України
Національний університет водного господарства та
природокористування
Навчально-науковий інститут автоматики, кібернетики та
обчислювальної техніки
Кафедра автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-
інтегрованих технологій

04-03-103

Методичні вказівки

до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Основи
автоматики і автоматизація виробничих процесів в
гідромеліорації" студентами за напрямом підготовки
6.060103 "Гідротехніка (водні ресурси)" денної та заочної
форм навчання

Рекомендовано методичною
комісією за напрямом підготовки
"Гідротехніка (водні ресурси)"
Протокол № 7 від 25.03.2014 р.

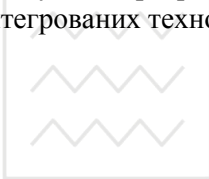
Рівне 2014



Методичні вказівки до виконання лабораторних робіт з дисципліни "Основи автоматики і автоматизація виробничих процесів в гідромеліорації" студентами за напрямом підготовки 6.060103 "Гідротехніка (водні ресурси)" денної та заочної форм навчання / С.К. Матус – Рівне: НУВГП, 2014 – 38 с.

Упорядник: С.К. Матус, к.т.н., старший викладач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій

Відповідальний за випуск: В.В. Древецький, д.т.н., професор, завідувач кафедри автоматизації, електротехнічних та комп'ютерно-інтегрованих технологій



ЗМІСТ

	стр.
1. Лабораторна робота № 4 "Дослідження логічних елементів".....	3
2. Лабораторна робота № 5 "Дослідження характеристик виконавчих механізмів".....	11
3. Лабораторна робота № 6 "Дослідження перехідних характеристик елементарних ланок".....	23



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 4

"Дослідження логічних елементів"

4.1. Мета роботи

Вивчити будову і принцип дії безконтактних логічних елементів і інтегральних мікросхем. Навчитися реалізувати основні логічні функції на базовому елементі АБО-НІ. Синтезувати дискретну систему автоматичного керування методами алгебри логіки і провести її випробування.

4.2. Основні теоретичні положення

У системах керування складними технологічними процесами пристрої зберігання і перетворення інформації часто являють собою логічну схему, що реалізує задану логічну функціональну залежність. З алгебри логіки відомо, що будь-яку логічну функцію можна представити сукупністю простих логічних операцій: додаванням (диз'юнкцією), множенням (кон'юнкцією) і запереченням (інверсією). Пристрої, що реалізують ці прості операції з сигналами, називаються логічними елементами.

Логічні елементи характеризуються тим, що вхідні і вихідні сигнали приймають лише два значення. Ці значення умовно позначають математичними символами «0» і «1». За нуль найчастіше приймають низький рівень сигналу, а за одиницю - високий.

Конструктивно логічні елементи поділяються на контактні і безконтактні. Як контактні елементи використовують різні реле. При цьому розімкнутий стан контактів відповідає логічному 0, а замкнутий - логічній 1. Безконтактні елементи будуються на основі напівпровідникових приладів. Існує багато різних схем логічних елементів, з яких найбільш простими є діодні схеми.

На рис. 4.1,а представлено схему діодного логічного елемента, що виконує операцію додавання сигналів x_1 і x_2 .

Дійсно, при подачі на один із входів напруги – U_{ex} відповідний діод відкривається, і через опір R_n протікає струм. Тому що опір діода в провідному напрямку незначний, то $U_{вих} \approx U_{ex} = 1$, тобто $y=0V1 = 1$ або $y=1V0=1$. Якщо сигнали 1 подати на обидва входи, то вихідна напруга $U_{вих}$ також буде близькою до – U_{ex} і $y=1V1=1$.



При відсутності сигналів на обох входах сигналу на виході не буде. Отже, $y=1$, якщо $x_1=1$ або $x_2=1$; або $x_1=1$ і $x_2=1$. Тому схему, що реалізує операцію логічного додавання, називають елементом АБО.

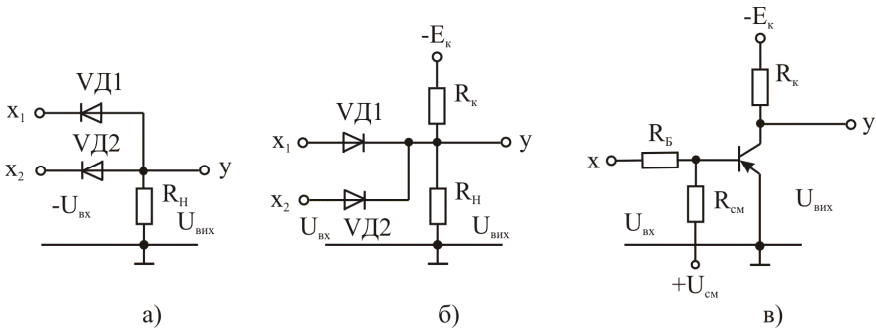


Рис. 4.1. Принципова схема напівпровідникових логічних елементів: а - АБО; б - І; в - ІІ.

Логічна схема, що реалізує операцію множення двох сигналів x_1 і x_2 (рис. 4.1,б), працює у такий спосіб. При подачі на один із входів сигналу 0 ($U_{вх} = 0$) відповідний діод відкритий і струм протікає через відкритий діод і резистор R_k . Напруга на виході $U_{вих}$ близька до нуля ($y=0$). Якщо на двох входах 0, то обидва діоди відкриті і $U_{вих}=0$. При подачі на обидва входи сигналів, рівних 1 ($U_{вх} > E_k$), обидва діоди закриваються. Струм протікає через резистори R_k , R_n і $U_{вих} = E_k R_n / (R_n + R_k)$. Ця напруга приймається за 1. Таким чином, розглянута схема виконує операцію множення і її називають логічним елементом І.

Хоча діодні логічні елементи досить прості, їх використовують не часто через те, що сигнали на виході завжди менші сигналів на входах. Цього недоліку позбавлені транзисторні логічні елементи, що одночасно з виконанням логічних операцій підсилюють вхідні сигнали. На рис. 4.1, в показана схема транзисторного елемента, що виконує операцію заперечення $y = \bar{x}$. При відсутності вхідного сигналу ($U_{вх} = 0$) транзистор VT закритий позитивною напругою $U_{зм}$. Струм колектора і спад напруги на резисторі R_k будуть дуже малі і майже вся напруга джерела живлення E_k прикладається до переходу колектор-емітер і $U_{вх} \approx E_k$. Отже, при $x=0$ $y=1$. Якщо на вхід подати від'ємний потенціал, який приймають за 1, то транзистор відкривається, опір його зменшується і $U_{вих}$ знижується до мінімального рівня (частини вольта), прийнятого за логічний 0.



Цим забезпечується виконання інверсії $y = \bar{x}$ і одночасно підсилюється вихідний сигнал, тому що $U_{ex} < U_{вих}$. Схема, що реалізує операцію заперечення, називається елементом НІ.

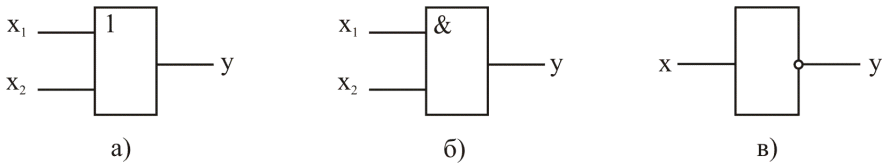


Рис. 4.2. Позначення логічних елементів: а – АБО; б – І; в – НІ.

Графічні позначення логічних елементів показані на рис. 4.2. При цьому з лівої сторони прямокутника показується стільки ліній, скільки є входів.

З метою уніфікації здійснюють об'єднання діодних і транзисторних логічних елементів. Найбільше поширення одержали елементи АБО-НІ і І-НІ. За допомогою кожного з цих елементів можна реалізувати будь-яку логічну функцію.

Схема діодно-транзисторного елемента АБО-НІ на три входи (рис. 4.3,а) являє собою послідовне з'єднання елементів АБО і НІ. За допомогою діодів $VД1-VД3$ виконується операція АБО, а транзистор VT , підсилюючи й інвертуючи вхідні сигнали, реалізує операцію НІ.

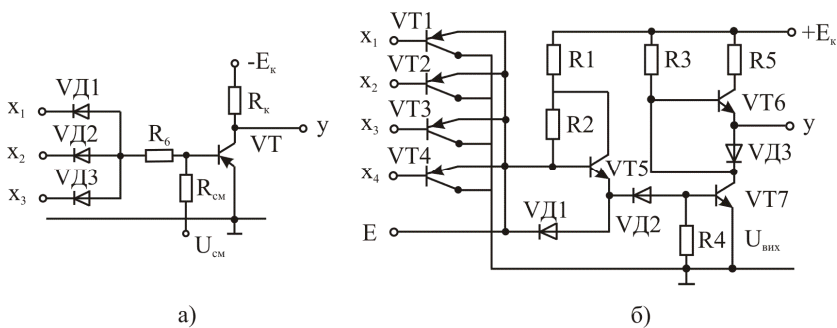


Рис. 4.3. Принципові схеми базових логічних елементів: а – АБО-НІ (модульна); б – І-НІ (інтегральна).

У залежності від конструктивного виконання логічні елементи поділяються на мікромодульні і інтегральні. Останні в даний час використовують найбільше часто.



Інтегральні логічні елементи виготовляють методами інтегральної технології у виді плівок або кристалів. Основні переваги інтегральних схем – висока щільність розміщення елементів (до 500 елементів у 1 см^2), малі габарити і маса, висока надійність і низька вартість.

У даний час випускається багато серій логічних елементів та інтегральних мікросхем. У системах автоматики частіше всього використовують серію з базовим елементом І-НІ (рис. 4.3, б). Вхідна частина схеми, виконана на транзисторах $VT1-VT4$, реалізує операцію І на чотири входи й одночасно посилює вхідні сигнали. Транзистор $VT5$ є буферним підсилювачем. Діод $VD1$ забезпечує динамічну завадостійкість, тому що прискорює розсіювання основних носіїв струму у області бази транзистора $VT5$. Діод $VD2$, що має поріг відкриття 6В, забезпечує статичну стійкість. Транзистори $VT6$ і $VT7$ утворюють вихідний інвертор і виконують операцію НІ. Схема передбачає розширення входів шляхом підключення до виводу E транзисторного елемента І.

Серія К.511 складається з 11 типів мікросхем: шести логічних елементів І-НІ з різним числом входів, двох елементів НІ, перетворювачів високого рівня напруги в низький і навпаки, двох тригерів, двійково-десятькового лічильника і дешифратора двійково-десятькового коду в десятковий. Напруга живлення мікросхем 15 В, вихідна напруга логічного 0 не більш 1,5 В; логічної 1 - не менш 12 В; вхідний струм логічного 0 не більш 0,48 мА; логічної 1 - не більш 0,005 мА і час затримки не перевищує 400 нс.

Мікропроцесори. Застосування логічних схем як елементів автоматичних систем виправдано у тих випадках, якщо програма роботи змінюється рідко. При частій зміні програми або коли формування керуючих впливів зв'язано з обробкою великого числа змінних доцільно використовувати мікропроцесори, що виконують арифметико-логічні операції відповідно до записаної в пам'ятовуючому пристрої програми. Вони складаються з двох основних частин: операційної, у якій виконуються операції над кодами чисел, і керуючої, де формуються сигнали керування.

Мікропроцесори виконують у виді однієї або декількох великих інтегральних схем (ВІС) зі ступенем інтеграції до десятків тисяч компонентів в одному кристалі. Тому вони мають низьку вартість, малі габарити і невисоку споживану потужність, що обумовлює



їхнє широке застосування. Операції з числами роблять мікропроцесори універсальними.

4.3. План роботи

1. Ознайомитися з конструктивним виконанням і електричними схемами логічних елементів і інтегральних мікросхем.
2. Провести дослідження простих логічних елементів, які реалізують операції АБО, І та НІ.
3. Зібрати і випробувати схеми, що реалізують функції АБО, І та НІ на базі логічних елементів АБО-НІ.

4.4. Опис лабораторної установки

На лабораторному стенді для дослідження логічних елементів і зборки логічної частини системи автоматичного керування розміщені такі пристрої та елементи: блок живлення, логічні елементи АБО, І та НІ, схеми яких представлені на рис. 4.4, три елементи АБО-НІ з виводами на комутаційне поле, дві інтегральні мікросхеми К511ЛА1, К511ЛА2 (рис. 4.4, б) і два імітерні повторювачі, що використовуються як вихідні елементи логічної схеми керування (рис. 4.4, в).

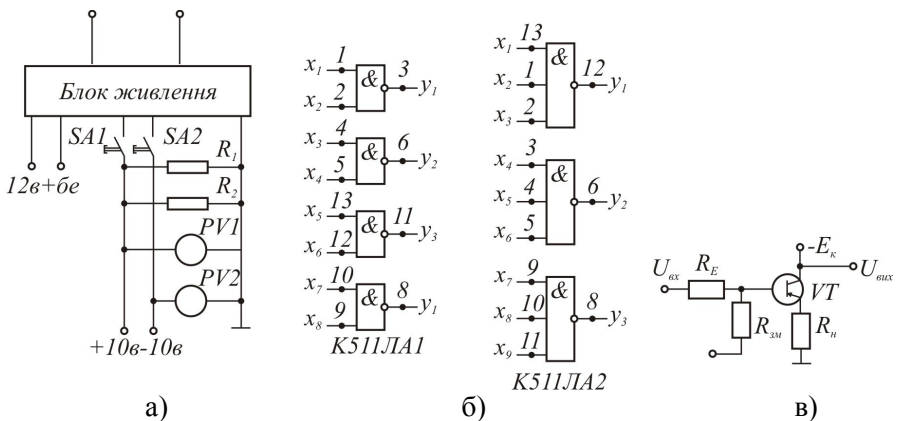


Рис. 4.4. Схема лабораторного стенда для випробування логічних елементів: а – блок живлення; б – інтегральні схеми; в – емітерний повторювач



Для вимірювання вихідних напруг логічних елементів користуються вольтметром V .

Резистори $R1$ і $R2$ імітують внутрішній опір давачів і забезпечують нерозривність кіл при вимиканні вимикачів $SB1$ і $SB2$.

4.5. Порядок виконання роботи

1. Ознайомитись з будовою і вивчити принципи дії логічних елементів і інтегральних мікросхем, що представлені на лабораторному стенді.

2. Щоб випробувати логічний елемент АБО (рис. 4.1, а), треба подавати вимикачами $SA1$ і $SA2$ на його входи різні комбінації напруг (вихідних сигналів) і по вольтметру визначати значення логічної функції. Аналогічним чином проводять випробування елементів І та НІ (рис. 4.1, б і 4.1, в). Результати випробувань заносять до таблиць 4.1, 4.2, 4.3.

Таблиця 4.1

Схема АБО

$X1$	$X2$	Y
0	0	
1	0	
0	1	
1	1	

Таблиця 4.2

Схема І

$X1$	$X2$	Y
0	0	
1	0	
0	1	
1	1	



Таблиця 4.3

Схема НІ

$X1$	Y
0	
1	

3. Випробування схем, які реалізують з елементів АБО-НІ логічні функції АБО, І та НІ, проводять у такій послідовності. Спочатку подають напруги – E_k і E_{3M} на три елементи АБО-НІ. Потім по черзі збирають схеми НІ, АБО та І, як показано на рис. 4.3, і визначають відповідність між наборами комбінацій вхідних величин (сигналів) і значеннями функцій. Результати випробувань заносять до таблиць 4.4 і 4.5.

Таблиця 4.4

Схема АБО-НІ

$X1$	$X2$	$Y1$	$Y2$
0	0		
1	0		
0	1		
1	1		

Таблиця 4.5

Схема І-НІ

$X1$	$X2$	$Y1$	$Y2$
0	0		
1	0		
0	1		
1	1		



4.6. Контрольні запитання

1. Які системи керування називаються дискретними?
2. Який математичний апарат використовують для побудови дискретних систем керування?
3. Які значення може приймати логічна функція?
4. Чому дорівнює число наборів логічної функції двох змінних?
5. Через які елементарні операції можна виразити логічну функцію?
6. Які рівні потенціалу відносно землі приймають на виході логічних елементів за 1 і 0?
7. Яку перевагу має універсальний (базовий) логічний елемент (наприклад серії K511)?
8. Що представляють собою інтегральні схеми?
9. У чому відмінність комбінаційних систем керування від послідовних?
10. До чого зводиться синтез керуючої частини системи автоматичного регулювання?

4.7. Література

1. Баховець Б. А. Основи автоматики і автоматизація виробничих процесів в гідромеліорації: [Лабораторний практикум] / Б. А. Баховець. – Рівне: УДАВГ, 1997. – 167 с.
2. Баховець Б. А. Основы автоматики и автоматизация производственных процессов в гидромелиорации: [учеб. пособ.] / Б. А. Баховец, Я. В. Ткачук. – Л. : Выща шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. – 336 с.
3. Бочаров С. Ю. Автоматизация водорегулирующих комплексов: [монография] / С. Ю. Бочаров. – Ровно. : РДТУ, 2000. – 110 с.
4. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / Е. П. Попов. – М. : Наука, 1989. – 304 с.
5. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: [Підручник] / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – Київ: Либідь, 1997. – 525с.



ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 5

"Дослідження характеристик виконавчих механізмів"

5.1. Мета роботи

Експериментально встановити конструктивні характеристик виконавчих механізмів (ВМ) і визначити їх придатність до експлуатації.

5.2. Основні теоретичні положення

Електродвигунні виконавчі механізми (електродвигунний виконавчий механізм типу МЕР). МЕР – це такі виконавчі механізми, вихідний вал яких здійснює лінійне поступальне переміщення з постійною швидкістю. Такі виконавчі механізми використовуються для приводу клапанів, шибєрів при обмежених значеннях переміщень і зусиль.

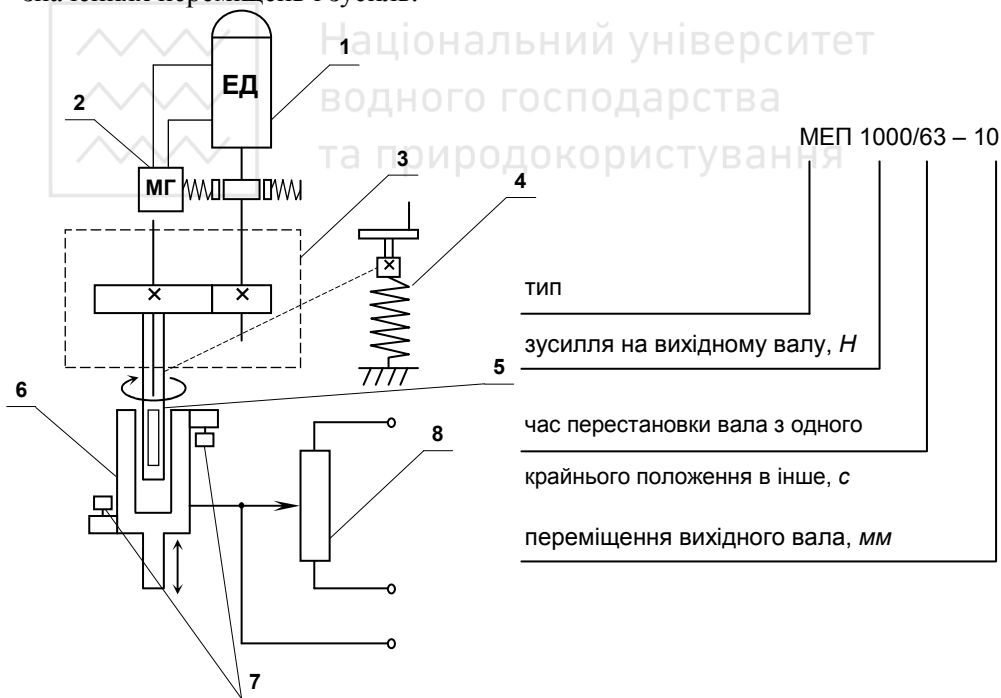


Рис. 5.1. Кінематична схема МЕР



На кінематичній схемі (рис. 5.1), зображено:

1. Електродвигун.
2. Магнітні гальма, що служать для компенсації моменту інерції двигуна (редуктора і т. п.) при зупинці. Гальма включаються паралельно одній з обмоток живлення.
3. Циліндричний редуктор, який розрахований на відповідний обертовий номінальний момент.
4. Ручний аварійний привод.
5. Вихідний вал редуктора.
6. Вихідний вал виконавчого механізму, що з'єднується з давачами положення, яких повинно бути не менше двох.
7. Кінцеві вимикачі. Вони призначені для зупинки двигуна в крайніх положеннях, для узгодження переміщення вихідного вала ВМ з робочим ходом РО, а також для сигналізації положення вала.
8. Давачі положення, яких повинно бути не менше двох, можуть бути реостатні з опором 100 Ом відповідної потужності та індуктивні трансформаторні перетворювачі, які використовуються для ВМ з малими переміщеннями вихідного вала.

Існують наступні типорозміри МЕР:

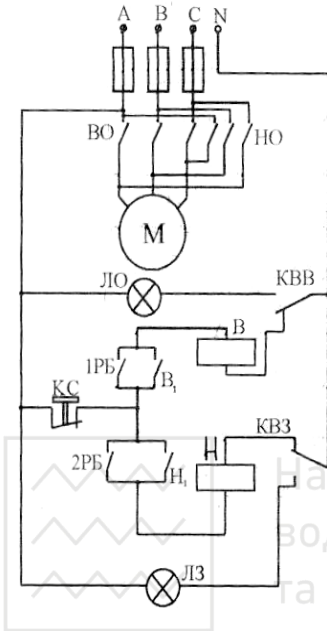
- МЕР 2500/10 – 63
- МЕР 2500/25 – 63
- МЕР 2500/63 – 63
- МЕР 2500/160 – 160
- МЕР 6300/10 – 63
- МЕР 16000/10 – 63
- МЕР 250000/10 – 63

По типу електродвигуна МЕР можуть комплектуватися двигунами: трифазними асинхронними з $U=220/380$ 50 Гц і однофазними асинхронними.

Виконавчі механізми типу МЕР використовуються для всіх регулюючих органів, при умові узгодження вихідного зусилля вала з перестановочним зусиллям регулюючого органу. Для керування виконавчими механізмами використовуються безконтактні пускачі (для малих і середніх потужностей), дистанційні давачі положення і засоби сигналізації. Засоби керування двигунами повинні бути



реверсивними. Для потужних ВМ, крім вказаних елементів, має місце обмежувач моменту вала електродвигуна.



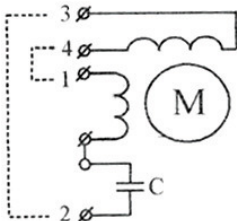
1РБ:2РБ - контакти регулятора

Клемна колодка

Коло	Контакт
Фаза А	1
Фаза В	2
Фаза С	3
	5
	6
	7
	8
	9
	10
	11
	12

Рис. 5.2. Схема електрична ВМ типу МЕР з трифазним двигуном

Для однофазного двигуна схема відрізняється лише характером вмикання самого електродвигуна.



Коло	Контакт
Обмотка І	1
Конденсатор	2
Обмотка Y1	3
Обмотка Y2	4
S1	5
S1	6
S2	9
S2	10
Обмотка В1	28

Рис. 5.3. Схема вмикання однофазного електродвигуна

Виконавчий механізм типу МЕР (МЕР). МЕР – це такі виконавчі механізми, вихідний вал яких здійснює певну кількість повних



водного господарства та природокористування
обертів. Такі виконавчі механізми використовуються для приводу гвинтових підйомників, регулюючих органів з великими лінійними переміщеннями і значними перестановочними зусиллями, для керування шиберами, засувками.

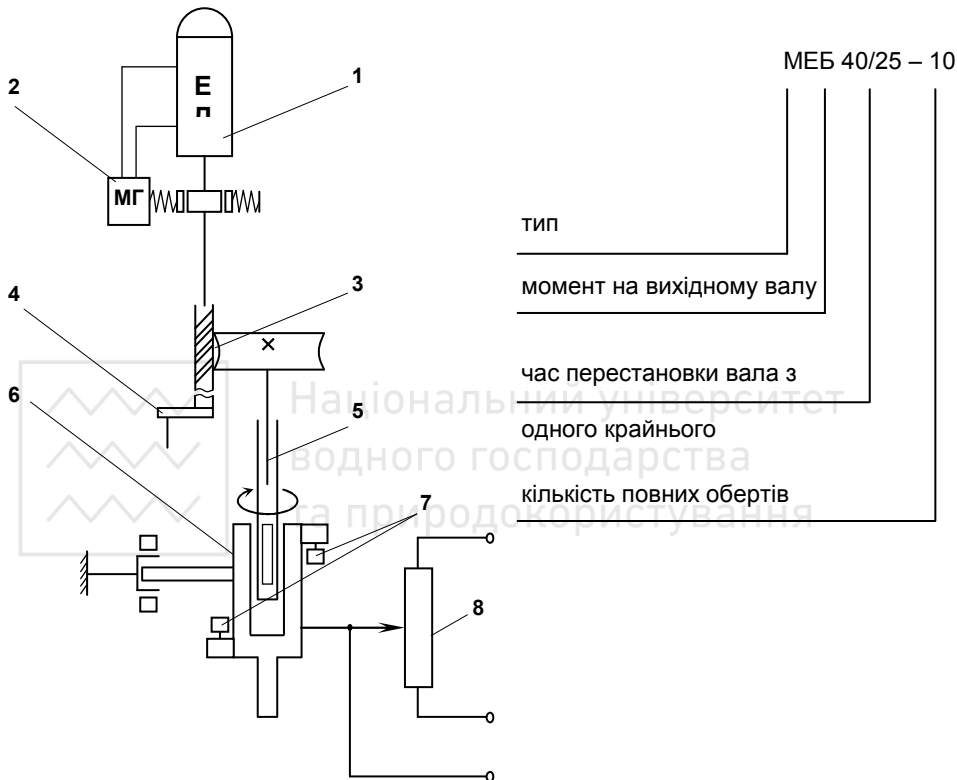


Рис. 5.4. Кінематична схема МЕБ

На кінематичній схемі (рис. 5.4), зображено:

1. Електродвигун.
2. Магнітні гальма.
3. Черв'ячний редуктор.
4. Ручний аварійний привод.
5. Вихідний вал редуктора.



3. Кривошип (вихідний орган);
4. Електромагнітні гальма;
5. Ручний аварійний привід;
6. Пристрої зупинки ЕД в крайніх положеннях;

Для реверсу трифазного двигуна пускова апаратура повинна забезпечувати переміну двох фаз при реверсі. При реверсі однофазних двигунів допоміжну обмотку вмикають через конденсатор, пускова апаратура повинна забезпечувати переміну початку і кінця допоміжної обмотки.

Маркування ВМ здійснюється наступним чином:

МЕО 16 /63 -85

Тип, марка

Момент на валу, Н·м

Час перестановки, с

Кутове переміщення, град



Розрізняють МЕО за потужністю ЕД, схемою керування ЕД, типом пускової апаратури, типом редуктора.

Настройка ВМ.

1. Настройка відповідності кута переміщення ВМ і РО.

Ручним приводом установити в одне із крайніх положень, перемістити кінцевий вимикач так, щоб мала місце сигналізація даного положення; перемістити РО в інше крайнє положення, повторити настройку.

2. Настройка здавачів положення.

Здійснюється по аналогії з кінцевими вимикачами, при цьому змінюють положення рухомого контакту.

Соленоїдні ВМ – це електричні ВМ, які забезпечують лінійне переміщення регулюючого органу з допомогою електромагніта (соленоїда).



розрізняють аналогове (рис. 5.6) та імпульсне (рис. 5.7)

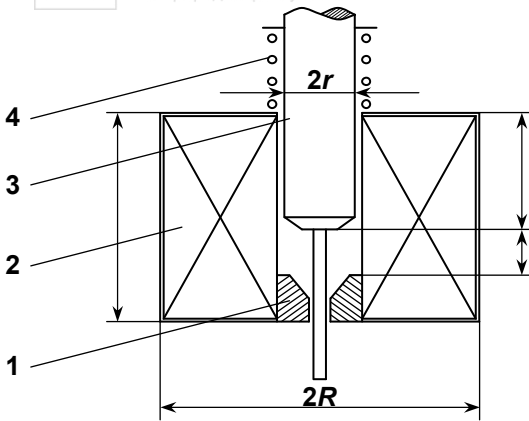


Рис. 5.6

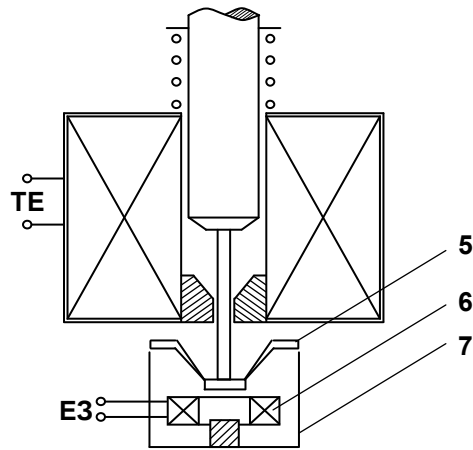


Рис. 5.7

живлення соленоїдів. Конструктивно соленоїдні ВМ мають наступну будову:

- | | |
|----------------------|------------------|
| 1. Нерухомий якір | 5. Защіпка |
| 2. Обмотка соленоїда | 6. Електромагніт |
| 3. Рухомий якір | 7. Рухомий якір |
| 4. Зворотна пружина | |

Тяговою характеристикою соленоїдного ВМ називають залежність тягового зусилля P_E на вихідному штоці соленоїда від положення якоря (від величини робочого повітряного проміжку δ) при визначеному значенні намагнічуючої сили.

Розраховується тягове зусилля за виразом:

$$P_E = 6,4 \cdot 10^{-8} (i \cdot n)^2 \cdot \left[\frac{S}{\delta^2 \cdot \sin \alpha} + g \left(\frac{z}{l} \right)^2 \right], \text{кГс.} \quad (5.1)$$

де S – площа перерізу полюса магнітної системи;

i – струм в обмотці;

n – число витків обмотки;

δ – повітряний проміжок;

l і z – конструктивні характеристики;



g – питома провідність розсіювання; $g = \frac{2\pi}{\ln \frac{R}{r}}$.

R – повний магнітний опір;

r – опір повітряного проміжку.

$2r = d = 32$ мм; $2R = D = 60$ мм; $L = 56$ мм; $Z = 31$ мм; $\delta_{\max} = 21$ мм

Переваги соленоїдних ВМ:

1. Простота конструкції і схеми керування;

2. Малі масогабаритні характеристики.

Недоліком соленоїдних ВМ є залежність зусилля від переміщення

5.3. План роботи

Електродвигунні виконавчі механізми (електродвигунний виконавчий механізм типу МЕП).

1. Визначити конструктивне узгодження елементів ВМ.
2. Засвоїти електричну схему вмикання.
3. Визначити конструктивні характеристики:
 - робоче переміщення Р.О.;
 - передаточне відношення ручного приводу;
 - діаграму замикання контактів кінцевих вимикачів;
 - діаграму замикання контактів сигналізації;
 - діаграму положення давачів.

Виконавчий механізм типу МЕБ (МЕО).

1. Визначити конструктивне узгодження елементів ВМ.
2. Засвоїти електричну схему вмикання.
3. Визначити конструктивні характеристики:
 - робоче переміщення Р.О.;
 - передаточне відношення ручного приводу ;
 - діаграму замикання контактів кінцевих вимикачів;
 - діаграму замикання контактів сигналізації;
 - діаграму положення давачів.



1. Зобразити ескіз дослідного соленоїдного ВМ і встановити призначення елементів.
2. Виміряти основні конструктивні розміри необхідні для розрахунку тягової характеристики.
3. Розрахувати тягове зусилля для 5-6 значень повітряного проміжку δ .
4. Побудувати тягову характеристику.

5.4. Порядок виконання роботи

Електродвигунні виконавчі механізми (електродвигунний виконавчий механізм типу МЕП).

1. Для визначення робочого переміщення вмикають ВМ і по шкалі вказівника вихідного вала визначають лінійне переміщення в мм та час перестановки РО з одного крайнього положення в інше.
2. Для визначення передаточного відношення ручного приводу натискають маховик ручного приводу і переставляють вихідний вал з одного крайнього положення в інше, зафіксувавши при цьому кількість обертів.

$$K_p = \frac{h}{n},$$

де h – переміщення;
 n – кількість обертів.

3. Перемішуючи з допомогою ручного приводу шток ВМ заміряти положення штока та стан контактів кінцевих вимикачів і сигналізації.

Дані вимірювань занести в таблицю 5.1.

Таблиця 5.1.

Положення штока	Закр. мм	2	4	6	8	10	Відкр. мм
Положення ручного приводу							
Контакт 8–9							
Контакт 9–10							
Контакт 11–12							



Контакт 12–13							
Опір реостатного давача (Ом) (контакти 15–16–17)							
Положення інд. давача (мм)							

4. Згідно отриманих даних визначити, які із контактних перемикачів слід використати як кінцеві вимикачі, а які, як сигналізуючі положення контактів.

5. Зробити висновки стосовно відповідності конструктивних характеристик паспортним. У випадку невідповідності здійснити регулювання ВМ.

Виконавчий механізм типу МЕБ (МЕО).

1. Переміщуючи з допомогою ручного приводу шток ВМ заміряти положення штока та блок контактів кінцевих вимикачів і сигналізації.

2. Згідно отриманих даних визначити, які із контактних перемикачів слід використати як кінцеві вимикачі, а які, як сигналізуючі положення контактів.

3. Зробити висновки стосовно відповідності конструктивних характеристик паспортним. У випадку невідповідності здійснити регулювання ВМ.

Дані вимірювань занести в таблицю 5.2:

Таблиця 5.2.

Положення штока	Закр. мм	2	4	6	8	10	Відкр. мм
Положення ручного приводу							
Опір реостатного давача (Ом)							



Соленоїдні ВМ.

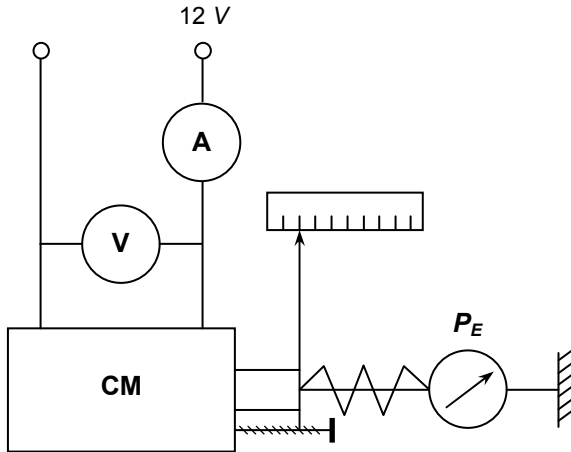


Схема дослідної установки.

СМ – соленоїдний ВМ;

P_E – динамометр;

A – амперметр;

V – вольтметр.

1. Виміряти конструктивні розміри дослідного ВМ.
 2. Розрахувати тягове зусилля P_E за виразом (1).
- Результати розрахунків звести в таблицю 5.3.

Таблиця 5.3.

№ п/п	δ	$z = z_0 + \delta_{\max} - \delta$	$6,4 \cdot 10^{\square 8} (i \cdot n)^2$	$\left[\frac{S}{\delta^2 \cdot \sin \alpha} + g \left(\frac{z}{l} \right)^2 \right]$	$P_E, (H)$
1	2				
2	4				
3	6				
4	8				
5	10				
6	12				
7	14				
8	16				



3. Побудувати графічну залежність P_E від δ .

Варіанти вихідних даних до розрахунку наведені в таблиці 5.4.

Вихідні дані до розрахунку ВМ.

Таблиця 5.4.

Варіанти	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13
i (А)	5	6	7	8	9	10	5	6	7	8	9	10	11
n (вит)	220	210	200	190	180	170	350	340	330	320	310	300	290
δ (м)	15	16	19	19	18	18	20	20	23	23	21	21	21

За допомогою досліду перевірити відповідність характеристики.

5.5. Контрольні запитання

1. Перерахуйте основні технічні характеристики виконавчих механізмів.
2. Дайте характеристику ВМ типу МЕБ 40/25-10 ?
3. Поясніть призначення кінцевих вимикачів в конструкції електродвигуних виконавчих механізмів.
4. Яке призначення давачів положення ?
5. Вкажіть особливості використання соленоїдних (електромагнітних) ВМ.
6. Що таке тягова характеристика соленоїдних (електромагнітних) ВМ.
7. Вкажіть які параметри і як впливають на тягове зусилля соленоїдного ВМ.
8. Де використовують аналогове керування соленоїдними ВМ.
9. В чому переваги імпульсного керування соленоїдними ВМ.

5.7. Література

1. Баховець Б. А. Основи автоматики і автоматизація виробничих процесів в гідромеліорації: [Лабораторний практикум] / Б. А. Баховець. – Рівне: УДАВГ, 1997. – 167 с.
2. Баховець Б. А. Основы автоматики и автоматизация производственных процессов в гидромелиорации: [учеб. пособ.] / Б. А. Баховець, Я. В. Ткачук. – Л. : Выща шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. – 336 с.
3. Бочаров С. Ю. Автоматизация водорегулирующих комплексов: [монография] / С. Ю. Бочаров. – Ровно. : РДТУ, 2000. – 110 с.

**ЛАБОРАТОРНА РОБОТА № 6****"Дослідження перехідних характеристик елементарних ланок"****6.1. Мета роботи**

Навчитися експериментально визначати перехідні характеристики типових ланок.

6.2. Основні теоретичні положення

Будь-яка система автоматичного регулювання складається з ряду елементів, що виконують цілеспрямоване перетворення сигналів керування. Хоча число елементів автоматичних систем досить велике і принципи їх роботи самі різні, але загальним для них є те, що вони здійснюють передачу інформації. Щоб виявити розмаїтість елементів за їх передавальними властивостями, введено поняття елементарної ланки.

Елемент автоматичної системи або його частина, що здійснює найпростіше перетворення інформації (таке, котре не може бути замінено комбінацією інших), називається *елементарною ланкою*. Вид елементарної ланки визначає тільки математична залежність між вихідною і вхідною величинами $x_{вих}=f(x_{вх})$ (рис. 6.1), яку називають характеристикою ланки. Якщо в елементарній ланці не відбувається нагромадження енергії або речовини, то $x_{вих}=f(x_{вх})$ являє собою алгебраїчне рівняння. При нагромадженні енергії або речовини в ланці зв'язок між вихідною і вхідною величинами описується диференціальним рівнянням. Рівняння складають на підставі аналізу фізичних процесів, що протікають у ланці, і законів збереження енергії і речовини. При складанні рівняння необхідна деяка ідеалізація для того, щоб врахувати тільки основні явища і зв'язки.

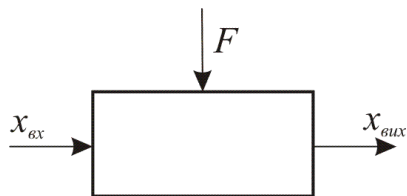


Рис. 6.1. Схематичне зображення елементарної ланки.



Реальне представлення про передавальні властивості ланки дає рішення рівняння. Знайти його можливо за умови, якщо відома вхідна величина $x_{ex}(t)$ як функція часу.

Дуже часто має місце різка зміна вхідної величини, наприклад, швидка зміна рівня води в б'єфі, включення електродвигуна тощо. При різкій (гранично миттєвій) зміні x_{ex} виникає найбільша динамічна похибка в перетворенні сигналів керування. Тому в якості типового вхідного впливу на елементарну ланку приймають одиничну ступінчасту функцію

$$x_{ex}(t) = I(t) = \begin{cases} 0 & \text{при } t < 0, \\ 1 & \text{при } t \geq 0. \end{cases} \quad /6.1/$$

Реакція ланки або системи на одиничний вхідний сигнал називається перехідною характеристикою і її прийнято позначати $h(t)$. Вона являє собою рішення рівняння ланки при $x_{ex}(t) = I(t)$ і описує процес переходу від одного стану рівноваги до іншого. Тому графік перехідної характеристики іноді називають *кривою розгону*. Якщо відома перехідна характеристика $h(t)$, а $x_{ex}(t) = A \cdot I(t)$, де $A = const$, то вихідна величина $x_{вих}(t) = A \cdot h(t)$.

Знання перехідних характеристик полегшує вивчення роботи автоматичних систем, бо будь-яку систему можна представити сукупністю певних елементарних ланок.

За видом залежності $x_{вих} = f(x_{ex})$ розрізняють шість елементарних ланок.

Пропорційна ланка. Ця ланка характеризується тим, що вихідна величина пропорційна вхідній

$$x_{вих} = k \cdot x_{ex}, \quad /6.1/$$

де k - коефіцієнт підсилення. Підсилюючу ланку ще називають пропорційною або безінерційною.

Перехідна характеристика, передаточна функція й амплітудно-фазова частотна характеристика підсилюючої ланки рівні k . Це означає, що ланка без спотворення підсилює вхідний сигнал будь-якого виду. Прикладами підсилюючої ланки можуть бути важіль, напівпровідниковий підсилювач тощо.

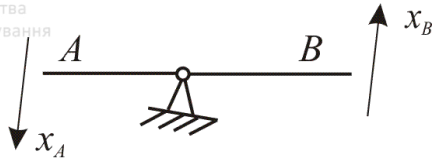


Рис. 6.2. Підсилююча ланка.

Якщо знехтувати масою важеля і вважати його абсолютно жорстким, то переміщення точок A і B (рис. 6.2) зв'язані залежністю

$$x_B = \frac{l_1}{l_2} x_A = k_1 x_A. \quad /6.2/$$

Вихідна і вхідна напруги підсилювача на польовому транзисторі, схема якого представлена на рис. 2.28, знаходяться в співвідношенні

$$U_{вих} = k_1 \cdot x_{вх}. \quad /6.3/$$

Рівняння /6.2/ і /6.3/ одного виду. Тому ці два різні елементи є підсилюючими ланками.

Інтегруюча ланка. До інтегруючих відносяться ланки, у яких вихідна величина пропорційна інтегралу від вхідної величини:

$$x_{вих} = k \int_0^t x_{вх} dt, \quad /6.4/$$

де k — коефіцієнт підсилення ланки.

Прикладами інтегруючих ланок є басейн, з якого вода відкачується помпою зі сталою витратою, (рис. 6.3), гідравлічний підсилювач без зворотного зв'язку і інші.

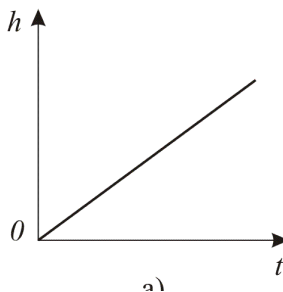


Рис. 6.3. Перехідна характеристика інтегруючої ланки.



Перехідна характеристика ланки

$$h(t) = k \int_0^t 1(t) dt = kt \quad /6.5/$$

є пряма лінія (рис. 6.3). Тому що $h(t)$ - лінійна функція, то коефіцієнт k іноді називають швидкістю розгону. Передаточна функція інтегруючої ланки

$$W(p) = k/p.$$

Диференціююча ланка. Диференціюючою є ланка, вихідна величина якої пропорційна похідній вхідної величини:

$$x_{\text{вих}} = k \frac{dx_{\text{вх}}}{dt}, \quad /6.6/$$

де k — коефіцієнт пропорційності.



Рис. 6.4. Диференціююча ланки

Прикладами таких ланок є електричний конденсатор, тахогенератор тощо (рис. 6.4). Дійсно, струм у ємності

$$i = C \frac{du}{dt}, \quad /6.7/$$

де C і u – ємність і напруга на конденсаторі, напруга на затискачах тахогенератора

$$U = k\omega_T = k \frac{d\alpha}{dt}, \quad /6.8/$$

де ω_T - кутова швидкість; α - кут повороту вала тахогенератора, описуються рівняннями виду /6.6/.

Перехідна характеристика ланки $h(t) = k \frac{d}{dt} 1(t) = k\delta(t)$



представляє собою δ -функцію, тобто імпульс нескінченно великої амплітуди і нескінченно малої ширини.

Передаточна функція диференціюючої ланки: $W(p)=kp$.

Інерційна ланка. Ця ланка є однією з найпоширеніших ланок систем автоматичного регулювання. Вона описується рівнянням

$$T \frac{dx_{вих}}{dt} + x_{вих} = k \cdot x_{ex}, \quad /6.9/$$

де T - стала часу, що характеризує швидкість зміни енергії або речовини в ланці; k - коефіцієнт підсилення. Тому що інерційна ланка описується диференціальним рівнянням першого порядку, то її також називають ланкою першого порядку.

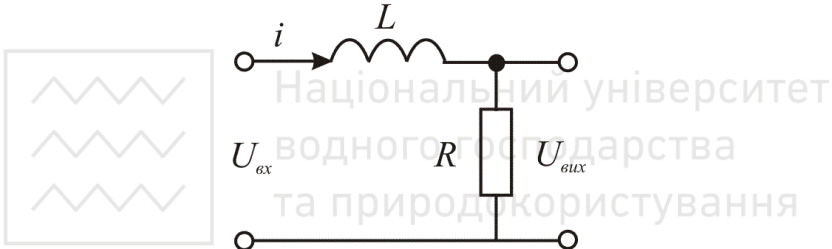


Рис. 6.5. Інерційна ланка

Прикладами інерційних ланок можуть служити багато об'єктів регулювання, виконавчі пристрої, гідропідсилювачі, електричні кола, що містять індуктивність або ємність, тощо.

Басейн, з якого вода витікає через отвір сталого перерізу і гідравлічний підсилювач зі зворотним зв'язком описуються рівнянням виду /6.9/. Електричне коло, що складається з індуктивності й опору (рис. 6.5), також описується рівнянням /6.9/. Дійсно

$$U_{ex} = L \frac{di}{dt} + Ri. \quad /6.10/$$

Тому що $U_{вих} = Ri$, то рівняння /6.10/ зводиться до виду

$$\frac{L}{R} \frac{dU_{вих}}{dt} + U_{вих} = T \frac{dU_{вих}}{dt} U_{вих} = U_{ex}. \quad /6.11/$$



В рівнянні /6.11/ стала часу $T = \frac{L}{R}$ і коефіцієнт підсилення $k = 1$.

Передаточна функція інерційної ланки

$$W(p) = \frac{k}{Tp + 1}. \quad /6.12/$$

Ланка другого порядку. Ця ланка описується диференціальним рівнянням другого порядку виду

$$\frac{d^2 x_{\text{вих}}}{dt^2} + 2\eta\omega_0 \frac{dx_{\text{вих}}}{dt} + \omega_0^2 x_{\text{вих}} = k\omega_0^2 x_{\text{вх}}, \quad /6.13/$$

де η - коефіцієнт згасання; ω_0 - частота власних коливань і k - коефіцієнт підсилення.

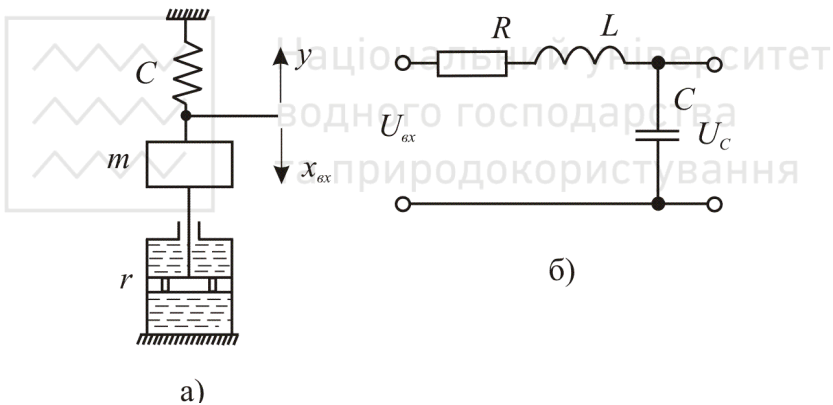


Рис. 6.6. Ланки другого порядку: а - модель пружної механічної системи; б - електричний коливальний

Прикладами ланки другого порядку можуть служити пружна механічна система (рис. 6.6, а), електричний коливальний контур (рис. 6.6, б), циліндричний регулятор прямої дії й інші пристрої.

Для пружної механічної системи рівняння сил, що діють на вантаж масою m , відповідно до другого закону Ньютона має вид

$$m \frac{d^2 y}{dt^2} = c(x_{\text{вх}} - y) - r \frac{dy}{dt}, \quad /6.14/$$

де y - переміщення вантажу; c - коефіцієнт жорсткості пружини; r - коефіцієнт в'язкого тертя демпфера.



Після нескладних перетворень рівняння /6.14/ зводиться до виду

$$\frac{d^2 y}{dt^2} + 2\eta\omega_0 \frac{dy}{dt} + \omega_0^2 y = \omega_0^2 x_{ex}, \quad /6.15/$$

де $\eta = \frac{r}{2} \sqrt{\frac{l}{c \cdot m}}$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{c}{m}}$; $k = 1$.

Для коливального контуру відповідно до другого закону Кірхгофа

$$L \frac{di}{dt} + Ri + U_c = U_{ex}, \quad /6.16/$$

де R - активний опір; L - індуктивність; U_c - спад напруги на конденсаторі.

Оскільки $i = C \frac{dU_c}{dt}$, то рівняння /6.16/ зводиться до виду

$$\frac{d^2 U_c}{dt^2} + 2\eta\omega_0 \frac{dU_c}{dt} + \omega_0^2 U_c = \omega_0^2 U_{ex}, \quad /6.17/$$

де $\eta = \frac{R}{2} \sqrt{\frac{c}{L}}$; $\omega_0 = \sqrt{\frac{l}{LC}}$; $k = 1$.

Рівняння /6.14/, /6.16/, /6.17/ одного виду і тому пристрої, що описуються цими рівняннями, є ланками другого порядку.

Перехідна характеристика ланки - це рішення рівняння /3.24/ при $x_{ex} = I(t)$. Її вид залежить від коренів характеристичного рівняння

$$p^2 + 2\eta\omega_0 p + \omega_0^2 = 0. \quad /6.18/$$

При затуханні $\eta > 1$ корені рівняння /6.18/ є дійсними від'ємними числами, і

$$h(t) = k \left[1 + \frac{p_2}{p_1 - p_2} \exp(p_1 t) - \frac{p_1}{p_1 - p_2} \exp(p_2 t) \right], \quad /6.19/$$

де $p_{1,2} = -\eta\omega_0 \pm \omega_0 \sqrt{\eta^2 - 1}$.

При $\eta < 1$ корені - комплексно-спряжені з від'ємною дійсною частиною, і

$$h(t) = k \left[1 - \frac{1}{\beta} \exp(-\eta\omega_0 t) \sin(\beta\omega_0 t + \varphi) \right], \quad /6.20/$$

де $\beta = \sqrt{1 - \eta^2}$; $\varphi = \arctg \frac{\beta}{\eta}$.



Графіки перехідних характеристик для різних η наведені на рис. 6.7. При $\eta \geq 1$ перехідний процес аперіодичний, а при $\eta < 1$ - коливально-затухаючий. Тому ланку другого порядку при $\eta < 1$ називають також коливальною ланкою.

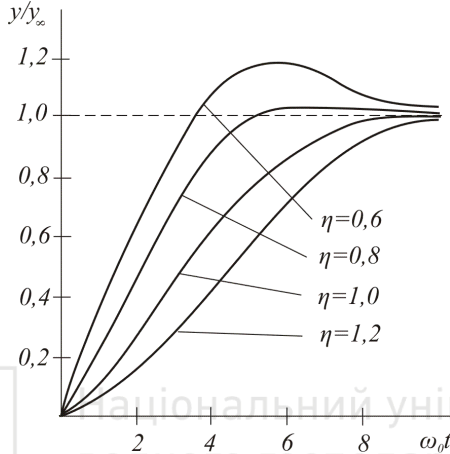


Рис. 6.7. Перехідні характеристики ланки другого порядку

Ланка зі сталим запізненням. Ця ланка характеризується тим, що відтворює на виході вхідний сигнал без зміни, але з запізненням на час τ .

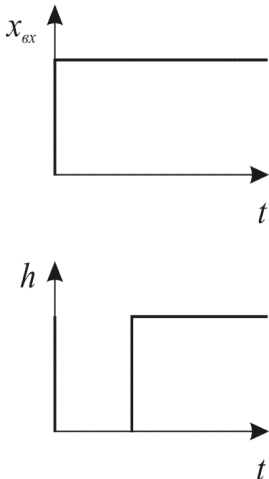


Рис. 6.8. Перехідні характеристики ланки зі сталим запізненням

Запізнення властиве багатьом елементам автоматики, зокрема, поточно-транспортним пристроям, довгим трубопроводам й іншим елементам. Дійсно, якщо за вхідну величину прийняти подачу матеріалу на транспортер, а за вихідну - його появу у кінці транспортера, то час запізнення



$$\tau = l / v, \quad /6.21/$$

де l - довжина транспортера; v - швидкість його руху.

Рівняння ланки зі сталим запізненням

$$x_{вих}(t) = x_{вх}(t - \tau), \quad /6.22/$$

при цьому $x_{вих} = 0$ для $t < \tau$. Вираз /6.22/ показує, що вихідна величина повторює вхідну зі зсувом у часі на час τ .

Ступінчастий вхідний сигнал і перехідна характеристика $h(t) = I(t - \tau)$ показані на рис. 6.8.

Передаточна функція ланки

$$W(p) = \exp(-p\tau). \quad /6.23/$$

6.3. План роботи

1. Ознайомитись з лабораторним модельним комплексом.
2. Зняти і побудувати перехідну характеристику пропорційної ланки, визначити коефіцієнт пропорційності і порівняти його з встановленим на моделі. Оцінити похибку.
3. Зняти і побудувати перехідну характеристику інтегруючої ланки, визначити коефіцієнт пропорційності інтегруючої ланки і порівняти його з встановленим на моделі. Оцінити похибку.
4. Зняти перехідні характеристики для двох значень коефіцієнта пропорційності диференціюючої ланки.
5. Зняти перехідні характеристики інерційної ланки для двох значень сталої часу, визначити її параметри і порівняти з встановленими на моделі. Оцінити похибки.
6. Зняти перехідні характеристики ланки другого порядку для таких сталих часу, щоб одержати аперіодичний процес і процес у вигляді затухаючих коливань. Визначити параметри і порівняти їх зі встановленими на моделі. Оцінити похибку.



6.4. Опис лабораторної установки

Лабораторна робота виконана на лабораторному модельному комплексі, який належить до класу аналогових обчислювальних машин. Основним елементом комплексу є операційний підсилювач із від'ємним зворотним зв'язком.

Якщо в коло зворотного зв'язку включити активний опір, то моделюється пропорційна ланка, а якщо – конденсатор, то – інтегруюча ланка. При їх паралельному включенні одержуємо модель інерційної ланки. З'єднання інерційної та інтегруючої ланок з зворотним від'ємним зв'язком дає ланку другого порядку.

Конструктивно лабораторна модель виконана у вигляді настільного приладу. На панелі управління розміщені перемикачі, ручки потенціометрів і кнопки, за допомогою яких встановлюються необхідні зв'язки і параметри ланок. На панелі прямокутниками

позначені такі ланки: k_n - пропорційна, $\frac{k_n}{S}$ - інтегруюча, $k_0 S$ - диференціююча, $\frac{k_0}{T_{01S} + I}$ - інерційна та інші.

В прямокутниках розташовані регулятори коефіцієнтів, сталих часу і кнопки, при натисканні на які підключається вольтметр. За допомогою вольтметра встановлюють коефіцієнти і сталі часу.

Для визначення перехідних характеристик використовуються вольтметр, осцилограф і електронний секундомір. параметри ланок задаються викладачем.

6.5. Порядок виконання роботи

1. До початку роботи викладач видає картку, де вказані параметри всіх ланок, які необхідно дослідити. Вони мають ті ж позначення, що і на панелі лабораторної установки.

Користуючись описом модельного комплексу, знайти розташування органів, за допомогою яких встановлюються вказані параметри вимірювальних приладів і засобів комутації.

2. Для знаття перехідних характеристик пропорційної і диференціюючої ланок складають схему, представлену на рис. 6.9.

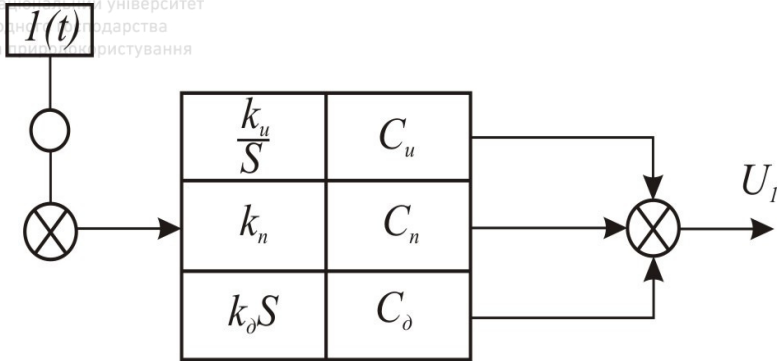


Рис. 6.9. Схема дослідження пропорційної, інтегруючої і диференціюючої ланок

Так, як схема загальна, то при знятті характеристики пропорційної ланки регулятори інтегруючої C_u і диференціюючої C_d ланок і потенціометр початкових умов HU переводять в крайнє ліве (нульове) положення. За допомогою перемикача подають на вхід $h = I(t)$. Встановлюють потенціометром C_n коефіцієнт пропорційності, перемикач вольтметра переводять в положення U_1 .

Зняття характеристики починають, натиснувши пускову кнопку "Режим роботи" і припиняють кнопкою "Початкове положення". Процес повторюють два-три рази і дані заносять до таблиці. потім будують графік $h(t)$, з якого визначають коефіцієнт пропорційності k_n як точку перетину $h(t)$ з віссю ординат.

3. Для зняття характеристики інтегруючої ланки потенціометр C_n ставлять в нульове положення. Регулятором C_u встановлюють заданий коефіцієнт. Натиснувши пускову кнопку, спостерігають за вольтметром і секундоміром. Визначивши час повного відхилення стрілки вольтметра, вираховують через які інтервали часу необхідно зняти 3-4 точки характеристики. Після цього знімають характеристику $h(t)$. За одержаними даними будують графік, з якого визначають коефіцієнт пропорційності k_i як тангенс кута нахилу функції $h(t)$ до осі часу.



4. Перехідну характеристики диференціюючої ланки знімають у такій послідовності регулятор U/C_n і C_u переводять в нульові положення, регулятором встановлюють перший заданий коефіцієнт і знімають характеристику за показами вольтметра і секундоміра. Після експеримент повторюють для другого значення коефіцієнта пропорційності.

За одержаними даними будують характеристики $h(t)$ і визначають їх відмінність.

5. Для одержання характеристик інерційної ланки і ланки другого порядку засобами комутації збирають схему, приведену на рис. 6.10.

Характеристику $h(t)$ знімають у такій послідовності: коефіцієнт пропорційної ланки виставляють рівним одиниці ($k_n = 1$), при цьому сигнал на вході $U_1 = 1$; регулятором C_0 і перемикачем T_{01} встановлюють задані величини; вольтметр переводять в положення $Y1$.

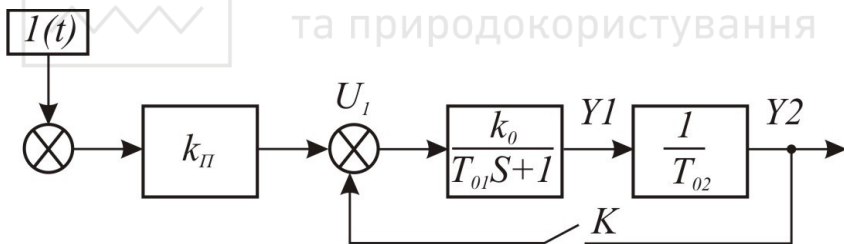


Рис. 6.10. Схема дослідження інерційної ланки і ланки другого порядку

Запустивши модель пусковою кнопкою через рівні проміжки часу записують вольтметра і секундоміра. експеримент повторюють для інших значень k_0 і T_{01} . За одержаними даними будують характеристики $h(t)$.

Коефіцієнт пропорційності k_0 , як видно із рис. 6.6, дорівнює усталеному значенню функції $h(t)$. стала часу дорівнює величині піддотичної або часу, за який $h(t)$ досягне значення $0,63k_0$, так як



$$h(t) = k_0 \left(1 - e^{-\frac{t}{T_{01}}} \right) = k_0 (1 - e) = k_0 (1 - 0,27) = 0,63k_0.$$

6. Щоби одержати модель ланки другого порядку, необхідно з'єднати послідовно інерційну та інтегруючі ланки і охопити їх зворотним від'ємним зв'язком, замкнувши ключ К. У цьому випадку одержимо рівняння

$$\frac{T_{01}T_{02}}{k_0} \frac{d^2Y_2}{dt^2} + \frac{T_{02}}{k_0} \frac{dY_2}{dt} + Y_2 = 1(t) \quad /6.24/$$

Рівняння /6.24/ аналогічне рівнянню /6.13/ за умов

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{a_0}} = \sqrt{\frac{k_0}{T_{01}T_{02}}} \quad \text{і} \quad \eta = \frac{a_1}{2\sqrt{a_0}} = \frac{T_{02}}{2\sqrt{k_0T_{01}T_{02}}}. \quad /6.25/$$

Для зняття перехідних характеристик встановлюють вхідний сигнал $x_{\text{вх}} = 0,5 \cdot 1(t)$ (50 поділок шкали вольтметра), задані для аперіодичного процесу коефіцієнти k_0 , T_{01} і T_{02} і знімають характеристику $0,5h(t)$. Дані експерименту заносять до таблиці. Після встановлюють коефіцієнти k_0 , T_{01} і T_{02} , що відповідають затухаючим коливанням і знімають характеристику.

За даними досліджень будують характеристики $h(t)$, збільшивши масштаб по вісі ординат у два рази.

Визначити безпосередньо із графіка $h(t)$ для коливально-затухаючого процесу ω_0 і η неможливо. Для їх обчислення використовують те, що дійсна частина коренів характеристичного рівняння $\eta\omega_0 = \alpha = \frac{1}{T} \ln \frac{A_1}{A_2}$, а уявна $\omega_0 \sqrt{1 - \eta^2} = \omega = \frac{2\pi}{T}$,

де T - період коливань, який знаходимо з графіка (рис. 6.7),



A_1 і A_2 - додатні значення відповідних амплітуд.

Із наведених співвідношень знаходимо, що

$$\eta = a\sqrt{(\omega^2 - a^2)^{-1}} \text{ і } \omega_0 = \frac{a}{\eta}. \quad /6.26/$$

Порівнюючи дані, одержаними за формулами /6.25/ і /6.26/, оцінюють похибку експерименту.

Таблиця 6.1

Пропорційна ланка $k_i =$

$U1, B$											
$t, \text{сек}$											

Таблиця 6.2

Інтегруюча ланка $k_i =$

$U1, B$											
$t, \text{сек}$											

Таблиця 6.3

Диференціююча ланка $k_i =$

$U1, B$											
$t, \text{сек}$											



Таблиця 6.4

Інерційна ланка $k_i =$

U_1, B										
$t, сек$										

Таблиця 6.5

Коливна ланка $k_i =$

U_2, B										
$t, сек$										

6.6. Контрольні запитання

1. Яке перетворення здійснює елементарна ланка?
2. Чим визначається назва ланки?
3. Що представляє собою перехідна характеристика ланки?
4. Яка ланка називається пропорційною?
5. Що представляє собою перехідна характеристика диференціюючої ланки?
6. Яка ланка називається інтегруючою?
7. Яка ланка називається інерційною?
8. До якої ланки відноситься електричний коливний контур?
9. Які перехідні процеси можуть виникнути в ланці другого порядку?
10. Чим відрізняється вихідний сигнал від вхідного в ланці зі сталим запізненням?



6.7. Література

1. Баховець Б. А. Основи автоматики і автоматизація виробничих процесів в гідромеліорації: [Лабораторний практикум] / Б. А. Баховець. – Рівне: УДАВГ, 1997. – 167 с.
2. Баховець Б. А. Основы автоматики и автоматизация производственных процессов в гидромелиорации: [учеб. пособ.] / Б. А. Баховець, Я. В. Ткачук. – Л. : Выща шк. Изд-во при Львов. ун-те, 1989. – 336 с.
3. Бочаров С. Ю. Автоматизация водорегулирующих комплексов: [монография] / С. Ю. Бочаров. – Ровно. : РДТУ, 2000. – 110 с.
4. Попов Е. П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления / Е. П. Попов. – М. : Наука, 1989. – 304 с.
5. Попович М. Г. Теорія автоматичного керування: [Підручник] / М. Г. Попович, О. В. Ковальчук. – Київ: Либідь, 1997. – 525с.

