

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ  
НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ УКРАЇНИ  
«КИЇВСЬКИЙ ПОЛІТЕХНІЧНИЙ ІНСТИТУТ»

# **ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ**

**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ І ЗАВДАННЯ ДО ВИКОНАННЯ  
РОЗРАХУНКОВО-ГРАФІЧНОЇ РОБОТИ ТА САМОСТІЙНОЇ РОБОТИ ДЛЯ  
СТУДЕНТІВ НАПРЯМУ ПІДГОТОВКИ 6.050202  
«АВТОМАТИЗАЦІЯ ТА КОМП'ЮТЕРНО-ІНТЕГРОВАНІ  
ТЕХНОЛОГІЇ»**

Навчальне електронне видання

Затверджено Вченою радою ХТФ НТУУ «КПІ»

Київ 2013

Теорія автоматичного керування: метод. вказівки і завд. до викон. розрахунково-графічної роб. та самостійної роботи для студ. напр. підг. 6.050202 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані технології” / Автори: С.Г. Бондаренко, О.В. Сангінова

*Гриф надано Вченою радою ХТФ НТУУ “КПІ”,*

*протокол № 3 від 28.03.2013 р.*

Навчальне електронне видання

## **ТЕОРІЯ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ**

**методичні вказівки і завдання до виконання розрахунково-графічної роботи та самостійної роботи для студентів  
напряму підготовки 6.050202**

**6.050202 “Автоматизація та комп’ютерно-інтегровані  
технології”**

Автори: Бондаренко Сергій Григорович  
Сангінова Ольга Вікторівна

Відповідальний редактор: С.Г. Бондаренко, к.т.н., доц.

Рецензент: В.І. Супрунчук, к.т.н., доц.

## Зміст

Передмова .....	4
1. Мета і завдання розрахунково-графічної роботи .....	6
2. Структура і зміст РГР .....	8
3. Основні теоретичні відомості .....	12
3.1 Статичні характеристики .....	13
3.2 Лінеаризація статичних характеристик.....	17
3.2.1 Графічна лінеаризація.....	19
3.2.2 Аналітична лінеаризація статичних характеристик .....	20
3.3 Статичні характеристики з'єднання елементів (перетворення статичних характеристик) .....	21
3.3.1 Статична характеристика паралельно з'єднаних елементів.....	22
3.3.2 Статична характеристика послідовно з'єднаних елементів .....	23
3.3.3 Статична характеристика елементів, що охоплені зворотнім зв'язком.....	27
4. Визначення статичних характеристик .....	31
4.1 Аналітичний метод визначення статичних характеристик.....	31
4.2 Експериментальні методи визначення статичних характеристик.....	33
4.2.1 Експериментально-статистичний метод .....	34
4.2.2 Експериментальний детермінований метод .....	35
Контрольні питання .....	41
Література .....	42
Додаток А. Варіанти структурних схем.....	44
Додаток Б. Зразок титульного листа .....	53
Додаток В. Приклад аналітичного визначення статичних характеристик.....	54
Додаток Д. Експериментальні дослідження статички теплового об'єкту .....	59

## Передмова

Розвиток науки і промисловості потребує від сучасного фахівця з автоматизації та комп'ютерно-інтегрованих технологій професійної підготовки з питань теорії автоматичного керування, побудови і розрахунку систем автоматичного регулювання (САР).

Розрахунково-графічна робота (РГР) є важливим елементом, що сприяє засвоєнню студентом практичних навичок дисципліни «Теорія автоматичного керування», та присвячена визначенню параметрів САР. Студент виконує її самостійно і захистом підтверджує свої знання, отримані в ході вивчення важливих розділів професійно-орієнтованої дисципліни «Теорія автоматичного керування».

Виконуючи РГР, студент систематизує і поглиблює свої знання з розділів курсу, присвячених визначенню статичних характеристик складних системи, набуває навичок у застосуванні цих знань і вміння використовувати комп'ютерну техніку, навчається чіткому і ясному викладу результатів роботи у відповідності зі стандартом ЄСКД при оформленні матеріалів РГР.

Методичні вказівки розроблено відповідно до програми підготовки бакалаврів за напрямом «Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології» і є складовою частиною дисципліни «Теорія автоматичного керування». Ця дисципліна є базовою у підготовці бакалаврів вказаного напрямку. У першій частині методичних вказівок детально розглядаються основні вимоги до оформлення роботи, наведені теоретичні відомості, необхідні для визначення статичних характеристик окремих елементів системи і складної системи і цілому. Далі розглядаються методи отримання і обробки експериментальних даних з визначення статичних характеристик, способи лінеаризації статичних характеристик. Представлені матеріали мають за мету закріплення знань та набуття вміння застосовувати знання, що отримані в процесі вивчення дисципліни «Теорія автоматичного керування», при синтезі САР. Надані теоретичні відомості сприятимуть засвоєнню матеріалу курсу.

У методичних вказівках наведені мета та завдання розрахунково-графічної роботи, викладений теоретичний матеріал, необхідний для підготовки до виконання індивідуального завдання та зазначено літературу для поглибленого вивчення розділів, розглянуті приклади розв'язання типових задач та сформульовані контрольні питання для самопідготовки студентів.

Матеріали методичних вказівок можуть бути використані студентами при виконанні розрахунково-графічної роботи, для самостійної роботи, а також при виконанні курсових і дипломних робіт.

# 1. Мета і завдання розрахунково-графічної роботи

Мета роботи: Вивчити загальні поняття про методи визначення статичних характеристик елементів системи автоматичного регулювання. Набути уміння визначати статичні характеристики елементів системи та системи в цілому, виконувати лінеаризацію статичних характеристик в околі робочої точки.

## Завдання на РГР

Завдання на РГР «Визначення статичних характеристик складної системи» складається з двох частин.

### Частина 1.

Перед виконанням завдання, що поставлене в цій частині, необхідно:

- вивчити методи визначення статичних характеристик елементів, що з'єднані послідовно, паралельно, та охоплені зворотнім зв'язком;
- вивчити методи лінеаризації статичних характеристик і особливості їх застосування.

З додатку А згідно зі своїм варіантом вибрати структурну схему системи. Графіки статичних характеристики елементів системи, що позначені на структурних схемах, як P1,..., P16, наведені відповідно на Рис. А.1,..., Рис. А.16 (див. додаток А).

Для заданої структурної схеми системи виконати:

- визначити статичну характеристику складної системи заданої структури, статичні характеристики окремих елементів якої відомі;
- виконати лінеаризацію отриманої статичної характеристики на заданому відрізку ( $X_{ex} \in [4,6]$ ) в околі робочої точки  $X_{ex0}=5$ ;

- отримати рівняння лінеаризованої статичної характеристики за методом обраних точок [13,14];
- оформити результати розрахунків згідно вимог до РГР.

## Частина 2.

Перед виконанням завдання, що поставлене в цій частині, необхідно:

- вивчити експериментальні і аналітичні методи визначення статичних характеристик елементів системи регулювання і системи і цілому.

В рамках частини 2 виконати наступне:

- застосувати експериментальний детермінований метод визначення статичних характеристик і провести експериментальні дослідження по нагріву печі на лабораторній установці, де отримати експериментальну статичну характеристику;
- отримані експериментальні дані занести до таблиць;
- побудувати графік отриманої статичної характеристики і виконати її лінеаризацію в околі робочої точки  $X_{ex} = 100$  ( $X_{ex0} \in [80, 120]$ );
- отримати рівняння лінеаризованої статичної характеристики за методом обраних точок [13,14];
- оформити результати розрахунків згідно вимог до РГР.

## 2. Структура і зміст РГР

РГР «Визначення статичних характеристик складної системи»

складається з пояснювальної записки обсягом в 20-30 сторінок формату А4.

Пояснювальна записка повинна включати:

- титульний лист;
- завдання на розрахунково-графічну роботу;
- зміст;
- вступ;
- основні розділи;
- висновок;
- список літератури;
- додаток (при необхідності).

Титульний лист повинен бути виконаний за наведеним зразком (додаток Б).

У вступі в стислій формі наводяться актуальність і мета роботи, вказуються методи розв'язання та очікувані результати.

В основних розділах роботи розкривається порядок вирішення поставлених завдань, наводяться розв'язки (формули, розрахунки, таблиці, графіки), пояснення, висновки.

У заключній частині слід зробити висновки про результати виконаної роботи, про можливість її практичного застосування.

Список літератури повинен містити тільки цитовані джерела.

У додатку містяться матеріали, які при включенні їх в основну частину тексту пояснювальної записки захирацують її. Посилання на додаток (при його наявності) і на цитовану літературу в основному тексті обов'язкові.

Зміст складається з переліку розділів і підрозділів пояснювальної записки із зазначенням відповідних їх початку номерів сторінок.

Текст пояснювальної записки слід оформляти з дотриманням таких розмірів полів: ліве - 30 мм, праве - 10 мм, верхнє - 20 мм, нижнє - 20 мм. Сторінки пояснювальної записки нумерують арабськими цифрами.



Титульний аркуш включають до загальної нумерації. На титульному аркуші номер не ставлять, на наступних сторінках номер проставляють у правому верхньому куті без виділення рисками і без крапки в кінці.

Ілюстрації (таблиці, креслення, схеми, графіки), роздруківки з ЕОМ, які розташовані на окремих сторінках, включають до загальної нумерації сторінок.

Текст основної частини пояснювальної записки ділять на розділи, підрозділи, пункти.

Заголовки розділів розміщують симетрично тексту. Перенесення слів у заголовках не допускаються. Крапку в кінці заголовка не ставлять. Якщо заголовок складається з двох речень, то їх розділяють крапкою.

Відстань між заголовком і текстом має бути не менше 15 мм. Підкреслювати заголовки не допускається.

Розділи основної частини пояснювальної записки повинні мати порядкову нумерацію в межах всієї записки і позначатися арабськими цифрами з крапкою в кінці. ЗМІСТ, ВСТУП, ВИСНОВКИ, СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ЛІТЕРАТУРНИХ ДЖЕРЕЛ не нумерують. Підрозділи нумерують арабськими цифрами в межах кожного розділу. Номер підрозділу складається з номера розділу і порядкового номера підрозділу, розділених крапкою. В кінці номера підрозділу повинна стояти крапка, наприклад, 2.4. - (четвертий підрозділ другого розділу).

Ілюстрації (крім таблиць) позначають словом «Рис.» і нумерують послідовно арабськими цифрами в межах розділу. Номер ілюстрації повинен складатися з номера розділу і порядкового номера ілюстрації, відокремлених крапкою, наприклад, Рис.1.5. Ілюстрації мають бути розташовані так, щоб їх було зручно розглядати без повороту пояснювальної записки або з поворотом на 90° за годинниковою стрілкою. Ілюстрації розташовують після першого посилання на них.

Ілюстрації повинні мати найменування. При необхідності ілюстрації забезпечують пояснюючими надписами. Найменування розміщують над

ілюстрацією, пояснюючі дані під ілюстрацією, номер рисунка під пояснюючими даними.

Таблиці нумерують послідовно арабськими цифрами в межах розділу і дають їм назву. З вирівнюванням по правому краю над відповідним заголовком таблиці розміщують напис «Таблиця» із зазначенням її номера, який повинен складатися з номера розділу і порядкового номера таблиці, розділених крапкою, наприклад, Таблиця 1.3. Таблиці розташовують після першого посилання на них.

Формули в пояснювальній записці нумерують арабськими цифрами в межах розділу. Номер формули повинен складатися з номера розділу і порядкового номера формули в розділі, розділених крапкою. Номер формули вказують з правої сторони аркуша в круглих дужках, наприклад, (2.7).

Посилання в тексті на літературні джерела слід виконувати із зазначенням порядкового номера джерела за списком джерел, виділеного квадратними дужками, наприклад, [7], [2,5,9].

Додатки оформлюють як продовження роботи на наступних її сторінках або у вигляді окремої частини, розміщуючи їх у порядку появи посилань у тексті роботи.

Кожен додаток необхідно починати з нового аркуша. Додаток повинен мати заголовок, надрукований вгорі малими літерами з першої великої симетрично відносно тексту сторінки. В правому верхньому куті сторінки над заголовком малими літерами з першої великої літери повинно бути надруковано слово Додаток і через пропуск велика літера, що позначає додаток. Додатки слід позначати послідовно великими літерами української абетки, за винятком літер С, З, І, Ї, Й, О, Ч, Ь (наприклад, Додаток Б). Якщо додаток один, то він позначається, як Додаток А. Додатки повинні мати спільну з основним текстом наскрізну нумерацію сторінок.

Ілюстрації, таблиці, що є у тексті додатку, слід нумерувати в межах кожного додатку арабськими цифрами, наприклад, Рис.Д.3 – третій рисунок додатку Д, Таблиця А.3 – третя таблиця додатку А. Якщо в додатку одна

ілюстрація або одна таблиця, то їх нумерують, наприклад, Рис. А.1, Таблиця А.1.

У посиланнях у тексті додатку на ілюстрації, таблиці рекомендується писати: на рис. А.2, у таблиці Д.3.

Всі додатки включають у зміст, вказуючи номер, заголовок і сторінки з яких вони починаються.

### **Літературні джерела для виконання основних розділів РГР**

Матеріали, необхідні для вивчення статички систем керування, наведені в літературних джерелах [1-4,6,8].

Методи перетворення та лінеаризації статичних характеристик наведені в книгах [1-4].

Визначення та побудова статичних характеристик розглядається в роботах [1-4,9,16].

### 3. Основні теоретичні відомості

Система автоматичного регулювання (або об'єкт регулювання чи будь-яка інша ланка системи) може знаходитись у двох станах: статички або динаміки. Статикою називають статичний (сталий) режим роботи системи, коли всі впливи, що діють на систему, і змінні системи мають сталі значення і не змінюються з часом. Статичний режим характеризується узгодженістю матеріальних та енергетичних входів і виходів об'єкту і незмінністю в часі його параметрів. В динамічному режимі всі (або деякі) впливи і всі змінні системи змінюються з часом.

Залежності, що встановлюють зв'язок між досліджуємою величиною (вихідна величина) і впливом на вході елементу (технічний пристрій) системи (або системи в цілому), називають характеристиками елементів (або системи). При вивченні властивостей САР чи її елементів важливе місце займають дослідження, присвячені вивченню статичних і динамічних характеристик. Оцінка якості функціонування систем автоматичного регулювання базується на дослідженні статичних і динамічних характеристик.

Дослідження сталих станів є першим і основним питанням при дослідженні і розрахунках будь-яких САР. Так, дослідження властивостей технологічних процесів як об'єктів регулювання завжди починається з вивчення статичних властивостей процесу. Всі змінні, що характеризують технологічний процес, умовно підрозділяються на три групи (рис. 3.1): регульовані величини – це ті параметри, які характеризують протікання процесу і які необхідно підтримувати на заданому значенні (у загальному випадку їх може бути декілька, а у окремому випадку – це один регульований параметр, наприклад температура, рівень і т. п.); регулюючі впливи (параметри управління) – це ті параметри, зміна яких спричиняє заплановану зміну в ході процесу і які можна змінювати (їх також може бути декілька або один, наприклад витрата пари, реагенту і т. п.); збурюючі впливи – це параметри, зміна яких порушує нормальний хід технологічного процесу і

спричиняє відхилення регульованих параметрів від заданого значення. Після того, як виділені основні параметри, що характеризують технологічний процес, необхідно виявити статичні зв'язки (статичні характеристики) між цими параметрами.

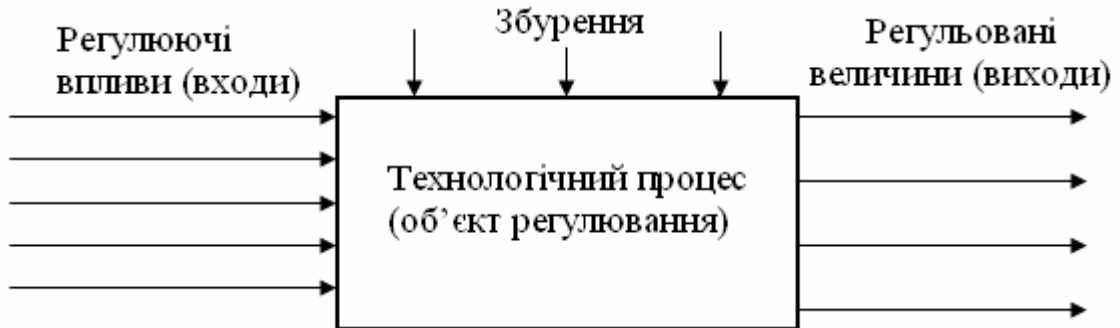


Рис. 3.1 Параметри технологічних процесів

### 3.1 Статичні характеристики

**Статичною характеристикою** елемента системи (системи в цілому) називається залежність вихідної величини (досліджуваної змінної) від вхідного впливу в сталому режимі. Статична характеристика є математичною моделлю каналу впливу об'єкту для його функціонування в сталому режимі.

Для елемента системи (рис. 3.2), що має один вхід і один вихід (стан якого визначається лише однією координатою, що залежить від одного керуючого впливу), існує тільки одна статична характеристика, що являє собою залежність вихідної величини  $\varphi$  від вхідного впливу  $\mu$  в сталому режимі:  $\varphi = f(\mu)$ . (3.1)



Рис. 3.2 Елемент системи

Статична характеристика може бути представлена алгебраїчним рівнянням (наприклад, залежність (3.1)), таблицею (таблична функція) або графіком. Статичні характеристики можуть бути лінійними або нелінійними. Якщо характеристика описується лінійним рівнянням і має вид прямої лінії

(рис. 3.3-1), вона лінійна. Об'єкт (або елемент системи), що має таку характеристику, називають лінійним. Якщо характеристика описується нелінійним рівнянням і характеристика має криволінійний вигляд (рис. 3.3-2) або вигляд ламаної лінії (рис. 3.3-3), то вона нелінійна і об'єкт буде також нелінійним.

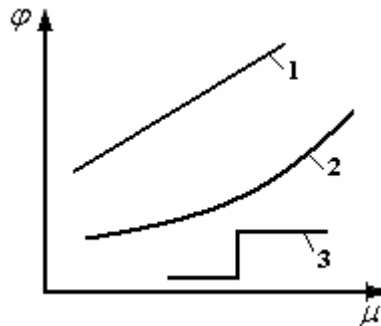


Рис. 3.3 Статичні характеристики

Якщо об'єкт має декілька входів, то він описується за допомогою сімейства або сімейств статичних характеристик. Об'єкт, що наведений на рис. 3.4, має два сімейства статичних характеристик (рис. 3.5).



Рис. 3.4 Об'єкт з двома входами

Перше сімейство характеристик – це криві залежності  $x=F(f_1)$  для ряду фіксованих значень  $f_2$  ( $f_{21}, f_{22}, f_{23}$ ), а друге сімейство характеристик – це криві залежності  $x=F(f_2)$  для ряду фіксованих значень  $f_1$  ( $f_{11}, f_{12}, f_{13}$ ).

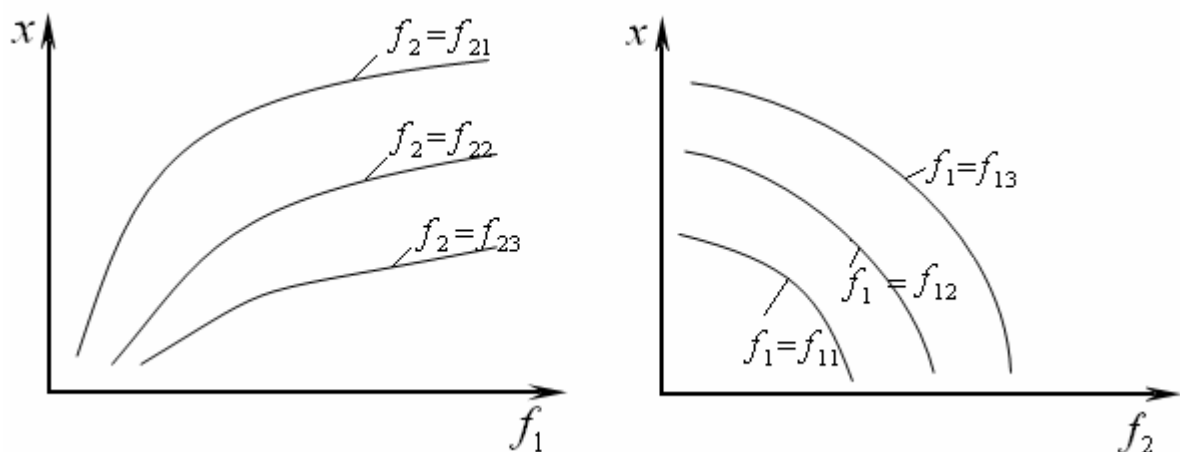


Рис. 3.5 Сімейства статичних характеристик

У загальному випадку система може характеризуватися  $l$  координатами ( $x_{вих1}, x_{вих2}, \dots, x_{вихl}$ ), що залежать від  $m$  впливів на систему ( $x_{вх1}, x_{вх2}, \dots, x_{вхm}$ ), як показано на рис.3.6.

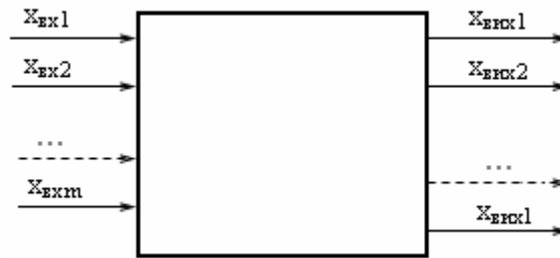


Рис. 3.6 Система регулювання

Сталий стан такої системи можна описати системою рівнянь:

$$\begin{cases} X_{вих1} = f_1(X_{вх1}, X_{вх2}, \dots, X_{вхm}) \\ X_{вих2} = f_2(X_{вх1}, X_{вх2}, \dots, X_{вхm}) \\ \dots \\ X_{вихl} = f_l(X_{вх1}, X_{вх2}, \dots, X_{вхm}) \end{cases}$$

Це і будуть рівняння статички системи.

Рівняння статички системи можна отримати з рівняння динаміки. Для цього потрібно прирівняти до нуля всі похідні від координат і від збурюючих впливів, оскільки і ті й інші в сталому режимі приймають постійні значення. Якщо динаміка системи описується наступним рівнянням:

$$a_n \frac{d^n x_{вих}}{dt^n} + a_{n-1} \frac{d^{n-1} x_{вих}}{dt^{n-1}} + \dots + a_1 \frac{dx_{вих}}{dt} + a_0 x_{вих} = b_m \frac{d^m x_{вх}}{dt^m} + b_{m-1} \frac{d^{m-1} x_{вх}}{dt^{m-1}} + \dots + b_1 \frac{dx_{вх}}{dt} + b_0 x_{вх},$$

де  $x_{вх}$ ,  $x_{вих}$  – вхідний і вихідний сигнали;  $a_0, \dots, a_n$ ;  $b_0, \dots, b_m$  – коефіцієнти, то рівнянням статички системи буде алгебраїчним рівнянням виду:

$$a_0 x_{вих} = b_0 x_{вх}, \text{ що зв'язує вхідний і вихідний параметри системи в статиці.}$$

Тоді  $x_{вих} = \frac{b_0}{a_0} x_{вх} = k x_{вх}$  і статична характеристика матиме вигляд прямої,

що проходить через початок координат (рис. 3.7-а). На рис. 3.7-б показано загальний вигляд лінійної статичної характеристики, рівняння якої матиме вигляд:  $x_{вих} = k_0 + k x_{вх}$ , де  $k_0$ ,  $k$  – постійні коефіцієнти. Коефіцієнт  $k$  називають коефіцієнтом передачі (або коефіцієнтом підсилення).

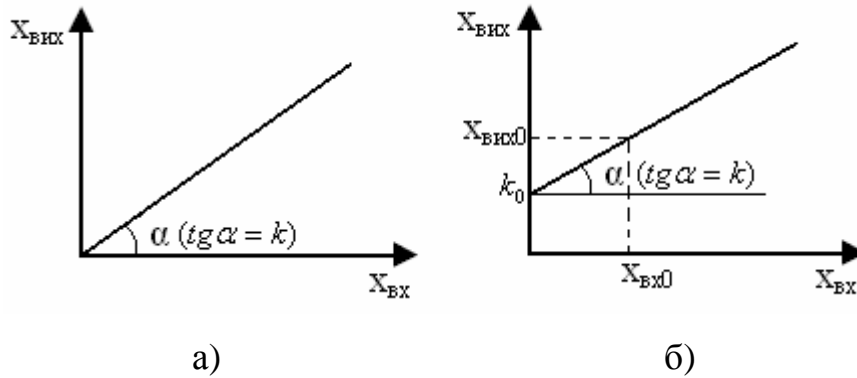


Рис. 3.7 Статичні характеристики лінійної системи

Для лінійних систем коефіцієнт передачі визначається як відношення приростів вихідної і вхідної величин у сталому режимі –  $\frac{\Delta x_{вих}}{\Delta x_{вх}}$ .

$$\text{Тобто } k = \frac{\Delta x_{вих}}{\Delta x_{вх}}, \quad (3.2)$$

де  $\Delta x_{вих} = x_{вих} - x_{вих0}$ ,  $\Delta x_{вх} = x_{вх} - x_{вх0}$  – прирости вихідної і вхідної величин у сталому режимі;  $x_{вх0}$ ,  $x_{вих0}$  – значення вхідної і вихідної величин в робочій точці (точка номінального режиму роботи системи (об'єкту)). Функціонування технологічних об'єктів регулювання зазвичай має деяку допустиму область – нормальний режим роботи технологічного процесу. Для технологічних об'єктів під допустимою областю зміни параметрів розуміють обмеження, що визначаються технологічним регламентом (це мінімальні і максимальні значення параметрів, в межах яких технологічний процес протікає нормально).

Якщо об'єкт має декілька входів, то різні входи впливають на вихідну величину по різному. При оцінюванні сили впливу вхідних параметрів на вихідні оперують поняттям чутливості. За допомогою величини чутливості каналу визначають вибір каналу керування. Чим більша чутливість каналу керування, тим більш ефективним буде керування з використанням цього каналу. А занадто висока чутливість каналу збурення може принести багато неприємностей. Чутливість каналу впливу об'єкту оцінюють відношенням приросту вихідної і вхідної величин –  $\frac{\Delta x_{вих}}{\Delta x_{вх}}$ . Для об'єктів, що мають лінійні



статичні характеристики відношення  $\frac{\Delta x_{вих}}{\Delta x_{вх}}$  стали і дорівнює коефіцієнту передачі об'єкту. Таким чином, канал керування з більшим коефіцієнтом передачі є більш переважним в якості каналу керування вихідною величиною. Для нелінійних об'єктів, що мають нелінійні статичні характеристики, відношення  $\frac{\Delta x_{вих}}{\Delta x_{вх}}$  змінне і можна говорити тільки про функцію чутливості.

### **3.2 Лінеаризація статичних характеристик**

Практично всі статичні характеристики реальних об'єктів і елементів систем регулювання нелінійні. Розрахунок систем регулювання з нелінійними статичними характеристиками є досить складним. У нелінійних об'єктів статична характеристика може носити суттєво нелінійний характер або мати несуттєву нелінійність. Якщо характеристика має несуттєву нелінійність, то з математичної точки зору це означає, що графік статичної характеристики повинен мати гладку форму (наприклад, характеристика 2 на рис. 3.3). Тоді в обмеженому діапазоні зміни вхідної величини така характеристика може бути приблизно замінена (апроксимована) лінійною функцією. Наближена заміна нелінійної функції лінійною називається **лінеаризацією**. Така процедура цілком правомірна, бо в процесі роботи об'єкту його вхідна величина міняється в невеликому діапазоні навколо базового значення і при цьому, відхилення вихідного параметру в реальних умовах роботи об'єктів повинні бути незначними. Якщо розглядати роботу елементів системи (чи системи в цілому) у деякому невеликому околі точки, прийнятої за базову, то в ряді випадків правомірно абстрагуватися від нелінійної статичної характеристики в околі зазначеної точки і нелінійну статичну характеристику замінити наближеною лінійною.

Не всі статичні характеристики піддаються лінеаризації. До характеристик, що не піддаються лінеаризації, відносять статичні характеристики, що мають суттєво нелінійний характер (рис. 3.8 – а), релейні статичні характеристики (рис. 3.8 – б, в), статичні характеристики, що мають зону нечутливості (рис. 3.8 – г, д), характеристики з гістерезисом – неоднозначні статичні характеристики (рис. 3.8 – е), і багато інших.

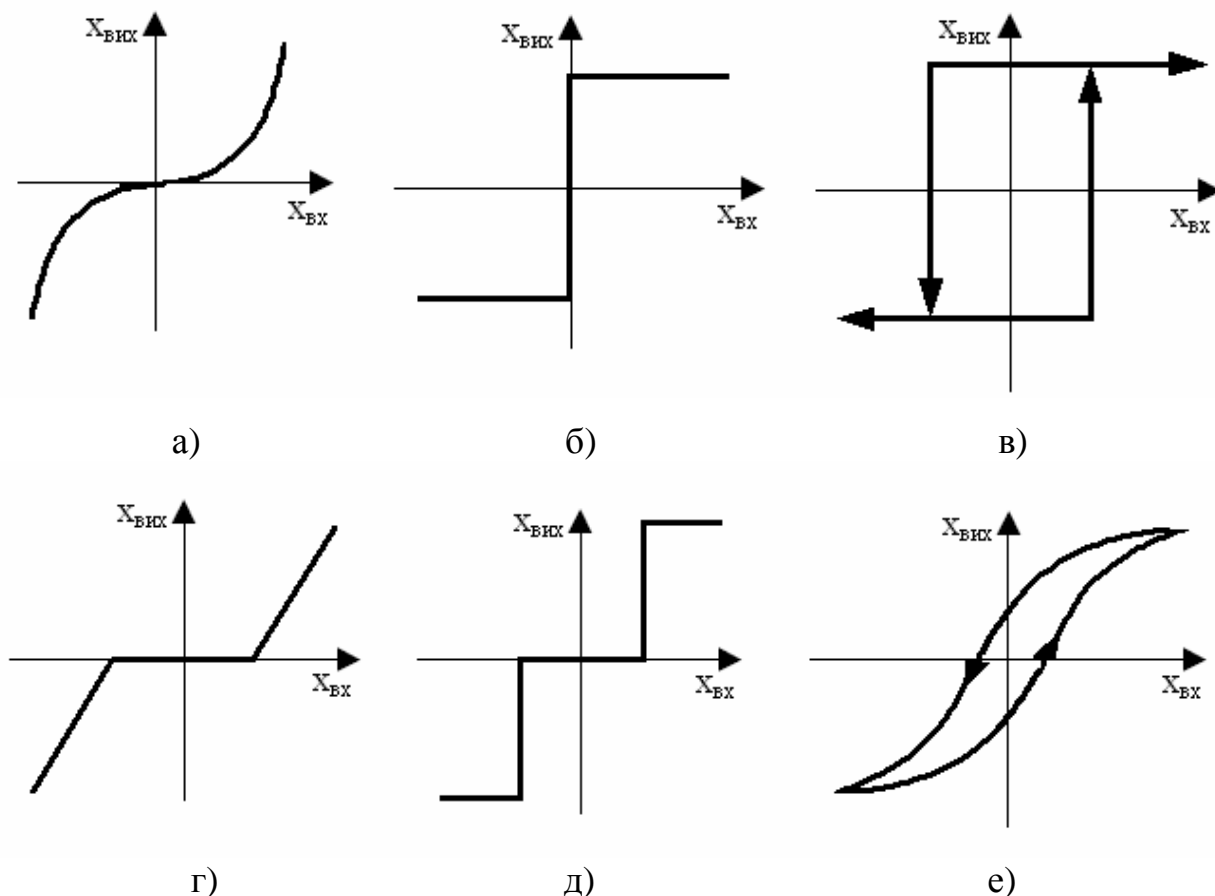


Рис. 3.8 Статичні характеристики нелінійних систем

Основою для лінеаризації слугує припущення про достатньо невеликі відхилення всіх змінних, що входять в рівняння системи, і саме тоді на достатньо малій ділянці криволінійну характеристику можна замінити відрізком прямої.

Лінеаризацію можна виконувати в широкому діапазоні зміни вхідного параметра і в вузькому. При лінеаризації в широкому діапазоні є небезпека отримання неадекватної лінійної характеристики. Тому лінеаризувати в широкому діапазоні можна лише характеристики з несуттєвою нелінійністю,

що дуже близькі до лінійних характеристик. Лінеаризацію в вузькому діапазоні називають лінеаризацією в околі робочої точки і така лінеаризація є найбільш поширеною. Наприклад, більшість систем регулювання відносяться до класу систем автоматичної стабілізації режиму роботи об'єкту відносно його робочої точки (тобто відносно номінального режиму роботи об'єкту). У цьому випадку в процесі роботи об'єкту відхилення змінних відносно робочої точки будуть малі, що дозволяє виконувати лінеаризацію статичної характеристики в околі робочої точки і використовувати лінійні моделі об'єкту керування.

Лінеаризація зазвичай здійснюється двома способами: графічним і аналітичним.

### 3.2.1 Графічна лінеаризація

Графічну лінеаризацію проводять методами: лінеаризація в точці (метод дотичної) або лінеаризація на відрізку (метод січної).

#### Лінеаризація в точці

Якщо статична характеристика задана графічно, що найчастіше буває на практиці, то лінеаризація в точці  $x_{ex0}$  полягає в заміні кривої лінії в околі даної точки дотичною до кривої в точці  $x_{ex0}$ . Якщо інтервал можливої зміни параметрів знаходиться в межах від  $x_{ex1}$  до  $x_{ex2}$ , то дотичну необхідно проводити так, щоб величини  $\Delta x_{вих1}$  і  $\Delta x_{вих2}$  дорівнювали одна одній ( $\Delta x_{вих1} = \Delta x_{вих2}$ ), як це показано на рис. 3.9. При цьому, точність лінеаризації буде визначатись величиною  $\Delta x_{вих} = \Delta x_{вих1} = \Delta x_{вих2}$ .

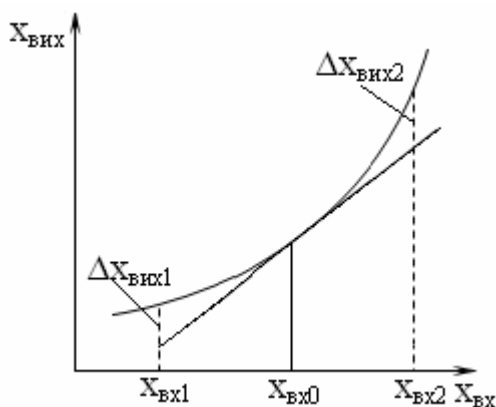


Рис. 3.9 Лінеаризація в точці

## Лінеаризація на відрізку

При збільшенні кривизни нелінійної статичної характеристики лінеаризація в точці буде занадто грубою і похибка лінеаризації буде недопустимою. В цьому випадку проводять лінеаризацію на відрізку. Вона полягає в наступному:

- 1) проводять дотичну (як і при лінеаризації в точці) до кривої в точці  $x_{ex0}$  – пряма  $CD$  на рис. 3.10;
- 2) через точки характеристики при  $x_{ex1}$  і  $x_{ex2}$  проводять пряму  $AB$  (хорда);
- 3) посередині між дотичною і хордою проводять пряму так, щоб виконувалася умова:

$$\frac{\Delta X_{вых1}}{2} = \frac{\Delta X_{вых2}}{2}.$$

Ця пряма апроксимує нелінійну характеристику і буде шуканою лінеаризованою статичною характеристикою. При цьому, точність лінеаризації буде визначатись величиною  $\Delta x_{вых} = \Delta x_{вых1}/2 = \Delta x_{вых2}/2$ . Очевидно, що лінеаризація на відрізку буде удвічі точніше, ніж лінеаризація в точці.

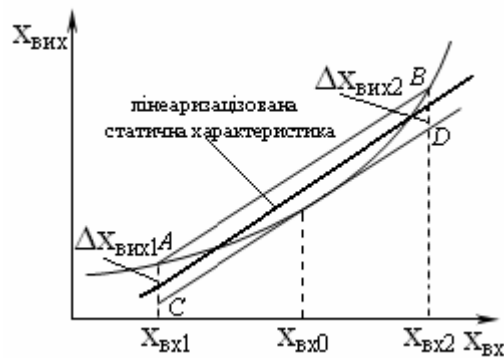


Рис. 3.10 Лінеаризація на відрізку

### 3.2.2 Аналітична лінеаризація статичних характеристик

Якщо статична характеристика задана в аналітичній формі, тобто у виді рівняння  $x_{вых} = f(x_{ex})$ , то лінеаризацію цієї характеристики в околі точки  $x_{ex0}$  можна провести розкладанням даної функції в ряд Тейлора:

$$x_{вых} = f(x_{ex0}) + \frac{f'(x_{ex0})}{1!} (x_{ex} - x_{ex0}) + \frac{f''(x_{ex0})}{2!} (x_{ex} - x_{ex0})^2 + \mathbf{L} + \frac{f^{(n)}(x_{ex0})}{n!} (x_{ex} - x_{ex0})^n.$$

На практиці зазвичай обмежуються першими двома членами, і формула для аналітичної лінеаризації матиме вид:

$$x_{\text{вх}} = f(x_{\text{вх}0}) + f'(x_{\text{вх}0})(x_{\text{вх}} - x_{\text{вх}0}). \quad (3.3)$$

Тут  $x_{\text{вх}0}$  належить відрізьку  $[x_{\text{вх}1}, x_{\text{вх}2}]$ , а коефіцієнт рівняння (3.3), що дорівнює першій похідній, розраховують наступним чином:

обчислюється при підстановці  $x_{\text{вх}} = x_{\text{вх}0}$  в  $f'(x_{\text{вх}0}) = \frac{d[f(x_{\text{вх}})]}{dx_{\text{вх}}}$ .

Вибір способу лінеаризації залежить від кожного конкретного випадку. У правильно функціонуючій САР зазвичай відхилення від заданого режиму невеликі, і тому лінеаризація можлива й не дає значних похибок.

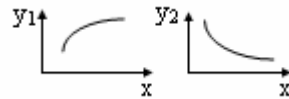
При переведенні процесу в новий режим, відмінний від попереднього, використання отриманих раніше лінеаризованих статичних характеристик не можливе. Необхідно знову виконати лінеаризацію в околі нової робочої точки і отримати нову лінеаризовану статичну характеристику, яку і використати в подальших розрахунках.

### **3.3 Статичні характеристики з'єднання елементів (перетворення статичних характеристик)**

Для побудови статичної характеристики системи регулювання необхідно знати статичні характеристики кожного з елементів, що входять до складу системи. Крім того, об'єкт керування може складатися з декількох пристроїв. Не завжди можливо визначити статичну характеристику об'єкта в цілому, але існує можливість визначити статичні характеристики окремих елементів. Для визначення загальної статичної характеристики необхідно знати правила перетворення статичних характеристик. При цьому, будемо розглядати елементи направленої дії – детектуючі елементи. Вони відрізняються тим, що в них впливи передаються тільки в одному напрямку – зі входу на вихід.

### 3.3.1 Статична характеристика паралельно з'єднаних елементів

Нехай два елемента з'єднані паралельно зустрічно (рис. 3.11) – їх виходи сумують. Позначимо сигнал на вході елементів  $x$ , а на виході –  $y_1$  і  $y_2$ . Статичні цих елементів відомі:  $y_1=f(x)$  і  $y_2=f(x)$ .



Необхідно визначити результуючу статичну характеристику  $y = f(x)$ .

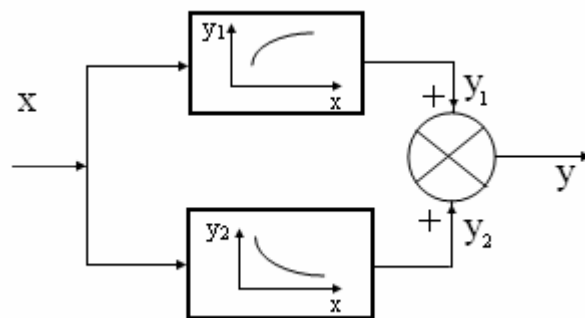


Рис. 3.11 Система з паралельно з'єднаними елементами

При паралельному з'єднанні елементів (рис. 3.11) вхідний сигнал поступає одночасно на обидва елементи, а вихідний сигнал складається із суми вихідних сигналів елементів  $y = y_1 + y_2$ .

Для графічної побудови статичної характеристики системи, що утворена з паралельно з'єднаних елементів, статичні характеристики яких відомі, необхідно побудувати характеристики всіх цих елементів в однаковому масштабі і просумувати їх ординати при відповідних значеннях вхідної величини, як це показано на рис 3.12 (при значенні входу  $x_1$ ).

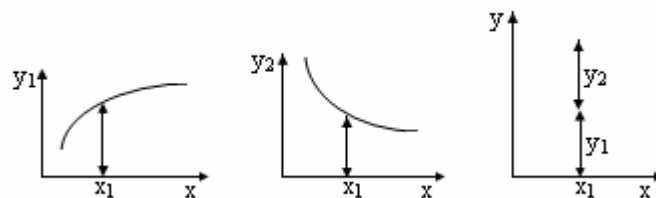


Рис 3.12 Побудова статичної характеристики паралельно з'єднаних двох елементів

Таким чином, отримана результуюча характеристика дорівнюватиме сумі характеристик двох елементів. Аналогічно знаходять результуючу

характеристику при більшій кількості елементів у з'єднанні. При знаходженні результуючої характеристики слід враховувати знак на суматорі. Якщо для деякого елемента вихідний сигнал направляєтся на суматор зі знаком мінус, то відповідну ординату слід віднімати.

Якщо статичні характеристики елементів лінійні (або лінеаризовані), то вони описуються рівняннями вигляду:  $y_i = k_i \cdot x_i$ , де  $x_i$ ,  $y_i$ ,  $k_i$  – відповідно вхід, вихід і коефіцієнт передачі  $i$ -го елемента. Згідно з розглянутим раніше перетворенням, загальний коефіцієнт передачі системи дорівнюватиме сумі коефіцієнтів передачі окремих елементів:

$$k = k_1 + k_2 + \dots + k_n = \sum_1^n k_i, \text{ де } n \text{ – кількість паралельно з'єднаних елементів.}$$

Тоді результуюча статична характеристик паралельно з'єднаних лінійних елементів матиме вид:  $y = k \cdot x$ . (3.4)

### 3.3.2 Статична характеристика послідовно з'єднаних елементів

Нехай три елементи з'єднані послідовно (рис. 3.13). При послідовному з'єднанні елементів в системі вихід попереднього елемента є входом в наступний елемент. Позначимо сигнал на вході системи  $x$ , а на виході –  $y$ .

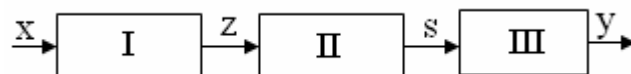


Рис. 3.13 Система з трьома послідовно з'єднаними елементами  
 Статичні цих елементів відомі:  $I$  –го  $z = f(x)$ ;  $II$  –го  $s = f(z)$ ;  $III$  –го  $y = f(s)$ .

Необхідно визначити результуючу статичну характеристику  $y = f(x)$ .

Для графічної побудови статичної характеристики системи, що утворена з послідовно з'єднаних елементів, статичні характеристики яких відомі, необхідно побудувати характеристику першого елемента  $I$  – в четвертому квадранті координатної площини, характеристику другого елемента  $II$  – в третьому квадранті, а третього елемента  $III$  – в другому

квадранті (рис 3.14). При такій побудові результуюча статична характеристика  $y = f(x)$  буде отримана в першому квадранті (якщо побудувати характеристику першого елементу в першому квадранті, другого – в другому, а третього – в третьому, то результуюча статична характеристика  $y = f(x)$  буде отримана в четвертому квадранті).

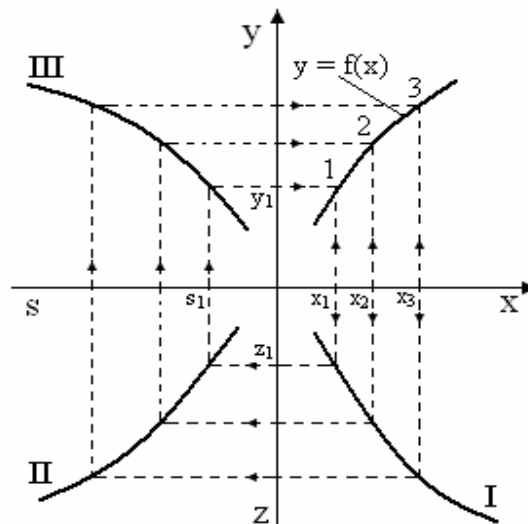


Рис 3.14 Побудова статичної характеристики трьох послідовно з'єднаних елементів

Задамося значенням входу в перший елемент  $x_1$  (вхід в систему). За статичною характеристикою елементу  $I$  знайдемо вихід елементу –  $z_1$ . Для цього відновимо перпендикуляр з точки  $x_1$  до перетину з характеристикою елементу  $I$ , як показано на рис 3.14, а потім проведемо лінію, паралельну вісі  $x$ , до перетину з віссю  $z$ . Таким чином, отримали значення  $z_1$ , яке є виходом елементу  $I$  і в той же час вхідною величиною елементу  $II$ . Аналогічно за значенням  $z_1$  і за статичною характеристикою елементу  $II$  отримаємо його вихід  $s_1$ , який і буде вхідною величиною елементу  $III$ . За значенням  $s_1$  і за статичною характеристикою елементу  $III$  отримаємо його вихід  $y_1$ . Це значення і є виходом загальної системи, що отримане при вході  $x_1$ . Якщо через точки  $x_1$  і  $y_1$  провести лінії паралельні координатним осям, то на їх перетині отримаємо точку 1 (рис 3.14), яка і буде першою точкою результуючої статичної характеристики  $y = f(x)$ . Задамося другим значенням входу в перший елемент  $x_2$  і аналогічним чином отримаємо точку 2 ( $x_2, y_2$ ),



яка буде другою точкою результуючої статичної характеристики, потім значенням входу  $x_3$  і т.д. За отриманими точками 1, 2, 3, ... побудуємо шукану статичну характеристику загальної системи.

При послідовному з'єднанні більше трьох елементів спочатку проводиться їх комбінація по три елементи. Потім знаходяться загальні характеристики груп по три елементи в кожній. А потім вже за отриманими характеристиками груп знаходиться і характеристика всього з'єднання.

При побудові статичної характеристики з'єднання, що складається з двох елементів, характеристику першого елемента слід побудувати в першому квадранті, другого – в другому, а у третьому квадранті проводиться допоміжна лінія з початку координат під кутом  $45^\circ$  до вісі абсцис, що еквівалентно умовному підключенню третьої ланки з коефіцієнтом передачі, рівним одиниці. Побудова виконується аналогічно описаній процедурі і результуюча статична характеристика  $y = f(x)$  буде отримана в четвертому квадранті. Для того, щоб результуюча статична характеристика  $y = f(x)$  була отримана в першому квадранті, що є більш зручним, необхідно:

1) для графічної побудови статичної характеристики системи, що утворена з двох послідовно з'єднаних елементів(рис 3.15),

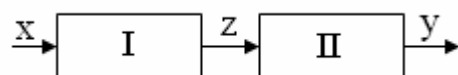


Рис. 3.15 Система з двома послідовно з'єднаними елементами статичні характеристики яких відомі, необхідно побудувати характеристику першого елемента I – в третьому квадранті координатної площини, характеристику другого елемента II – в другому квадранті (рис 3.16);

2) в третьому квадранті на вісі  $x$  задатися значенням входу  $x_1$  в систему (це буде також і входом елемента I);

3) за статичною характеристикою елемента I знайдемо вихід елемента –  $z_1$ , а за допомогою статичної характеристики елемента II отримаємо вихід  $y_1$  (рис. 3.16). Це значення і буде виходом загальної системи, що отримане при вході  $x_1$ ;

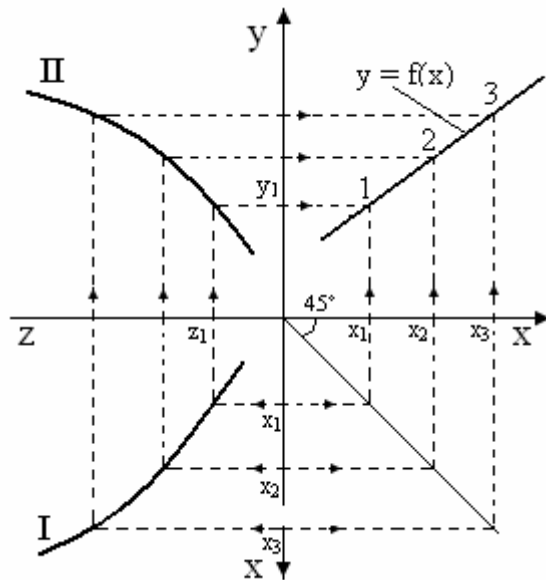


Рис 3.16 Побудова статичної характеристики двох послідовно з'єднаних елементів

4) за допомогою проведеної допоміжної лінії з початку координат під кутом  $45^\circ$  до вісі абсцис у четвертому квадранті перенесемо значення входу  $x_1$  в перший квадрант;

5) через точки  $x_1$  і  $y_1$  проводимо лінії, паралельні координатним осям, і на їх перетині отримаємо точку 1 (рис 3.16), яка і буде першою точкою результуючої статичної характеристики  $y = f(x)$ ;

б) задамося наступними значеннями входу в перший елемент  $x_2, x_3$  і т.д і аналогічним чином отримаємо точку 2 ( $x_2, y_2$ ), точку 3 ( $x_3, y_3$ ) і т.д. і за отриманими точками 1, 2, 3, ... побудуємо шукану статичну характеристику загальної системи  $y = f(x)$ .

Якщо статичні характеристики елементів лінійні (або лінеаризовані), то вони описуються рівняннями вигляду:  $y_i = k_i \cdot x_i$ , де  $x_i, y_i, k_i$  – відповідно вхід, вихід і коефіцієнт передачі  $i$ -го елемента. Згідно з розглянутим раніше перетворенням, загальний коефіцієнт передачі системи дорівнюватиме добутку коефіцієнтів передач окремих елементів:

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot \dots \cdot k_n = \prod_1^n k_i, \text{ де } n - \text{кількість послідовно з'єднаних}$$

елементів.

Тоді результуюча статична характеристик послідовно з'єднаних лінійних елементів буде мати вид:  $y = k \cdot x$ . (3.5)

Примітка. Якщо в системі декілька елементів з'єднані між собою, то більш доцільно лінеаризувати результуючу статичну характеристику, тому що нелінійності окремих елементів можуть у сукупності компенсуватися (як це показано на рис. 3.16, де отримана результуюча статична характеристика майже лінійна).

### **3.3.3 Статична характеристика елементів, що охоплені зворотнім зв'язком**

Зворотним зв'язком називається такий пристрій, за допомогою якого вихідний сигнал (або його частина) передається на вхід даного елемента (або на один з попередніх елементів). Коли передавана зворотним зв'язком дія залежить тільки від вихідної величини і не залежить від часу, зворотний зв'язок називається жорстким. У системах регулювання за відхиленням, які найчастіше зустрічаються, регулятор, що підключений до об'єкту, утворює негативний (від'ємний) зворотний зв'язок, оскільки він прагне протидіяти збурюючій дії. Якщо зворотний зв'язок негативний, то на суматорі ставиться знак “-”, а при позитивному (додатному) зворотному зв'язку – знак “+”.

Нехай елемент II охоплений негативним зворотнім зв'язком (рис. 3.17). В пристрої зворотного зв'язку знаходиться елемент I.

Статичні характеристики цих елементів відомі: I – го  $\mu = f(\varepsilon)$ ; II – го  $\varphi = f(\mu)$ .

На суматор подається завдання  $z$  і вихід елемента II –  $\varphi$ . Оскільки зворотній зв'язок негативний, то  $\varepsilon = z - \varphi$ . Звідси:  $z = \varepsilon + \varphi$ .

Необхідно визначити результуючу статичну характеристику за каналом «завдання-вихід», тобто  $\varphi = f(z)$ .

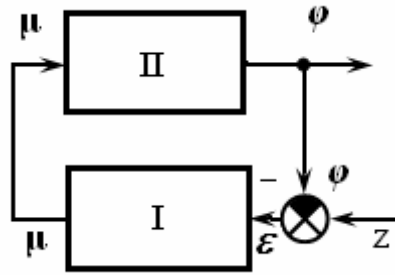


Рис. 3.17 Система з негативним зворотнім зв'язком

Для графічної побудови статичної характеристики системи, яка утворена з елементу, що охоплений негативним зворотнім зв'язком, і елементу, що знаходиться в пристрої зворотного зв'язку, статичні характеристики яких відомі, необхідно побудувати характеристики першого елементу I – в третьому квадранті координатної площини, а характеристику другого елементу II – в другому квадранті (рис 3.18). Далі в третьому квадранті на вісі  $\varepsilon$  слід задатися значенням входу  $\varepsilon_1$  елементу I. За статичною характеристикою елементу I знайдемо вихід елементу –  $\mu_1$ , а потім за допомогою статичною характеристики елементу II отримаємо його вихід  $\varphi_1$  (рис. 3.18). Це значення і буде виходом загальної системи. Тепер необхідно отримати значення вхідної величини  $z_1$ , яке відповідне для виходу  $\varphi_1$ . Це значення дорівнює:  $z_1 = \varepsilon_1 + \varphi_1$ . Для того, щоб на вісі  $z$  відкласти відрізок, довжина якого дорівнює  $\varepsilon_1 + \varphi_1$  необхідно в четвертому квадранті координатної площини провести промінь під кутом  $45^\circ$  до вісі ординат, як показано на рис 3.18. Точка перетину променя і прямої, що паралельна вісі абсцис  $\varphi = \varphi_1$ , і буде шуканою першою точкою (точка D) результуючої статичної характеристики  $\varphi = f(z)$ .

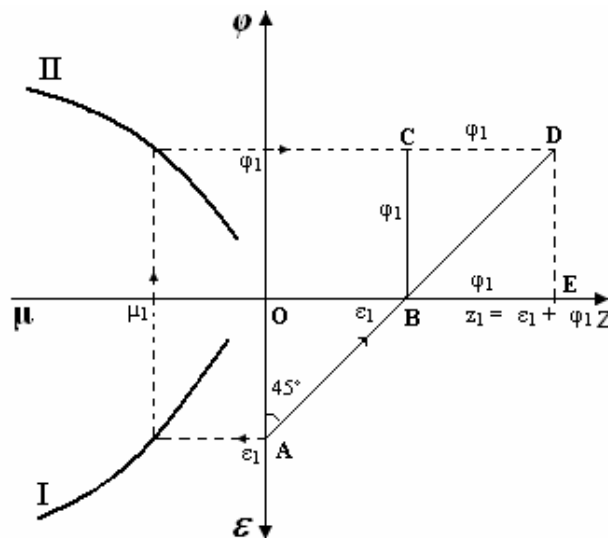


Рис. 3.18 Побудова статичної характеристики елементу, що охоплений негативним зворотнім зв'язком

При цьому, довжина відрізка  $OE = OB + BE$  дорівнюватиме  $\varepsilon_1 + \varphi_1$ . Цей висновок витікає з розгляду трикутників  $AOB$  і  $BCD$ . З трикутника  $AOB$  слідує, що довжини відрізків  $OA$  і  $OB$  дорівнюють  $\varepsilon_1$ , бо цей трикутник рівнобічний. З трикутника  $BCD$  слідує, що довжини відрізків  $BC$  і  $CD$  дорівнюють  $\varphi_1$ , бо цей трикутник рівнобічний. Оскільки відрізок  $BD$  є діагоналлю квадрату  $BCDE$ , то і довжина відрізка  $BE$  буде дорівнювати  $\varphi_1$ .

Таким чином, отримана точка  $D$  з координатами  $(z_1, \varphi_1)$  і є першою точкою шуканої статичної характеристики. Далі отримують інші точки результуючої статичної характеристики при значеннях  $\varepsilon_2, \varepsilon_3$  і т.д. аналогічно.

При такій побудові результуюча статична характеристика  $\varphi = f(z)$  буде отримана в першому квадранті.

Приклад 3.1. Нехай елемент  $I$  охоплений негативним зворотнім зв'язком (рис. 3.19). Статична елементу  $I$  відома:  $\varphi = f(\varepsilon)$ . На суматор подається завдання  $z$  і вихідна величина  $-\varphi$ . Оскільки зворотній зв'язок негативний, то  $\varepsilon = z - \varphi$ . Звідси:  $z = \varepsilon + \varphi$ .

Необхідно визначити результуючу статичну характеристику за каналом «завдання-вихід», тобто  $\varphi = f(z)$ .

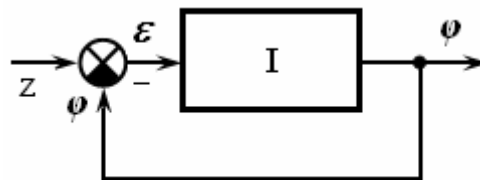


Рис. 3.19 Система з негативним зворотнім зв'язком

Таке завдання можна вирішити за допомогою методу перетворення статичних характеристик зі зворотнім зв'язком, що був розглянутий вище.

При побудові шуканої статичної характеристики з'єднання характеристику першого елементу слід побудувати в другому квадранті, а в третьому квадранті проводиться допоміжна лінія з початку координат під кутом  $45^\circ$  до вісі абсцис, що еквівалентно умовному підключенню в пристрій зворотного зв'язку елементу з коефіцієнтом передачі, рівним одиниці (рис. 3.20). А після цього побудова виконується аналогічно вищеописаної

процедури і результуюча статична характеристика  $\varphi = f(z)$  буде отримана в першому квадранті (точка  $D$  з координатами  $(z_1, \varphi_1)$  – перша точка результуючої характеристики).

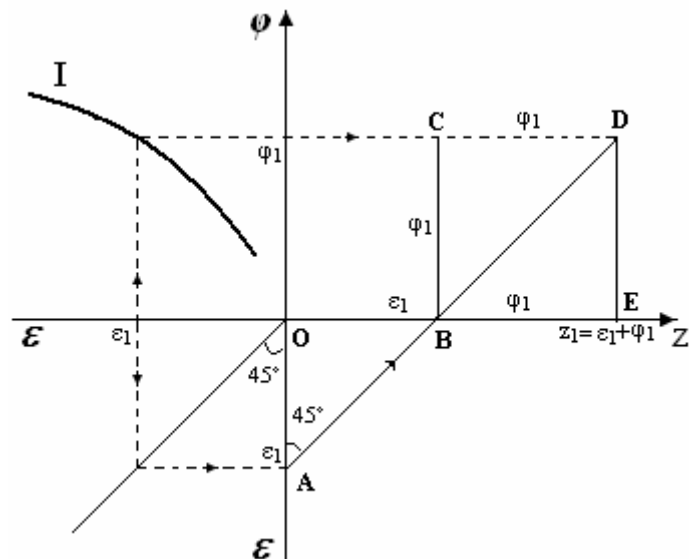


Рис 3.20 Побудова статичної характеристики елемента, що охоплений негативним зворотнім зв'язком

Розглянуті методи побудови статичних характеристик дозволяють проводити розрахунки і більш складних структурних схем, при розкладанні їх на ланцюжки з послідовно або паралельно включеними елементами або на контури із зворотними зв'язками.

Надалі припускаємо, що властивості системи лінійні, а якщо ні, то проведена її лінеаризація. Статичні характеристики замкнених систем дозволяють оцінити точність роботи системи в сталому режимі, тобто визначити статичну точність регулювання.

## **4. Визначення статичних характеристик**

При автоматизації виробничих процесів найбільш правильні рішення можуть бути прийняті на підставі даних про статистичні і динамічні властивості об'єктів керування. Для отримання цих даних визначають відповідно статистичні і динамічні характеристики об'єктів керування.

Вивчення статички процесів, тобто одержання їхніх статичних характеристик, може бути зроблено як аналітичним так і експериментальним шляхом. Також застосовують і комбіновані методи визначення статичних характеристик, які передбачають аналітичне визначення статичних характеристик з подальшим їх уточненням експериментальним шляхом.

Статичні моделі чи характеристики мають широке застосування в науці й техніці. Більшість фундаментальних залежностей є статичними характеристиками, чи рівняннями статички (наприклад, рівняння матеріальних чи енергетичних балансів, закони Ома, Кірхгофа і т.п.). В статичних режимах проводять розрахунки технологічних процесів, узгоджують потоки матерії та енергії, обчислюють рівняння матеріальних та енергетичних балансів тощо. Ці розрахунки, в першу чергу, використовують в системах проектування. Статичні моделі використовуються і під час розробки систем керування. В системах керування статичні моделі застосовуються при розрахунках параметрів системи, для визначення (задавання) початкового статичного режиму в динамічних процесах, визначення характеристик каналів регулюючого впливу і в алгоритмах статичної оптимізації.

### ***4.1 Аналітичний метод визначення статичних характеристик***

Перевагами аналітичного методу є те, що він дає можливість ще на стадії проектування технологічного об'єкту отримати узагальнені характеристики, виражені через конструктивні і технологічні параметри об'єкту керування. Якщо експериментальні дослідження на об'єкті

неможливо провести з тих або інших причин, то також звертаються до аналітичного методу визначення статички.

Аналітичному вивченню статички хіміко-технологічних процесів, що розглядаються як об'єкти керування, присвячені: хімічна технологія, процеси й апарати хімічних виробництв, теплопередача й т.д.

Аналітичні методи математичного моделювання базуються на найбільш загальних законах природи: законах збереження матерії та енергії, фізичних законах Ньютона, залежностях теплопередачі, гідростатички, гідродинаміки та ін. На основі цих законів та залежностей, а також з урахуванням особливостей конкретних об'єктів дослідження та протікаючих у них процесах, складають рівняння їх статичних моделей. Кінцевою ціллю дослідження статички об'єкта є отримання рівнянь статички або статичних характеристик. При дослідженні статички об'єктів керування необхідне отримання статичних характеристик, які характеризують взаємозв'язок між вхідними і вихідними параметрами.

У статичному (сталому) режимі внутрішні параметри об'єкта моделювання в часі не змінюються, тому математичним виразом законів збереження матерії чи енергії для статичного режиму технологічних об'єктів є балансові рівняння – рівняння матеріального чи енергетичного балансів. Для виявлення внутрішніх зв'язків в об'єкті моделювання складають рівняння балансів для окремих елементів об'єкта, чи компонентів технологічних середовищ.

Вигляд рівняння балансу залежить від фізико-хімічної суті визначального параметру (на виході об'єкту). Якщо таким параметром є рівень рідини, тиск газу або концентрація компонента, то складаються рівняння матеріальних балансів. Якщо параметром є температура, то складається рівняння теплового балансу. У ряді випадків виникає потреба в рівняннях як матеріальних, так і енергетичних балансів [1, 9].

Рівняння статички складаються в загальному вигляді з використанням прийнятих позначень технологічних та конструктивних параметрів. Рішення



рівняння статички або системи рівнянь статички щодо вхідного і вихідного впливів дозволяє одержати аналітичний вираз статистичної характеристики об'єкта керування. Далі, в залежності від того, яка ставиться мета статичного моделювання, позначення заміняються їх числовим значенням. Константи підставляються в отримані рівняння в усіх випадках. Щодо змінних – то потрібний аналіз, які з них змінюються в рамках дослідження. Ті змінні, що змінюються у випадку, що розглядається, залишають в загальному вигляді. Інші змінні заміняють відповідними числами. Числові значення для таких змінних відповідають основному статичному режиму (робочій точці). За отриманими рівняннями статички можна побудувати графіки статичних характеристик.

Чисельні значення параметрів матеріального чи теплового балансу визначають лише одну точку на статистичній характеристиці об'єкту. У деяких випадках немає необхідності в побудові статичної характеристики об'єкта, а є лише необхідність у визначенні початкових умов для динамічних змін. У цьому випадку достатньо чисельного рішення статички об'єкта.

Якщо отримані статичні характеристики лінійні (або лінеаризовані), то можна визначити чутливість каналів, яка у випадку лінійної залежності виходу від входу виражається коефіцієнтом передачі каналу. В залежності від величини коефіцієнта передачі або від значення функції чутливості можна оцінити доцільність врахування того або іншого каналу, а також здійснити вибір каналу для регулюючого впливу на вихідну величину.

Застосування аналітичного методу отримання статичних характеристик для змішувача розглянуте в додатку В.

#### ***4.2 Експериментальні методи визначення статичних характеристик***

Експериментальні методи дослідження статички можуть бути застосовані лише до діючих об'єктів керування.

Експериментальні методи дослідження статички об'єктів керування поділяються на детерміновані (регулярні методи) та статистичні.

Детермінований метод використовується за наявності однозначної залежності між вхідними і вихідними параметрами об'єкту (це методи, коли завадами нехтують). Якщо такої однозначності немає внаслідок наявності сильних шумів (завад) або деяких інших причин, то використовуються статистичні методи дослідження.

#### **4.2.1 Експериментально-статистичний метод**

Експериментально-статистичний метод отримання статичних характеристик не заперечує наявності детермінованих зв'язків між параметрами досліджуваного об'єкту, але цей метод не передбачає виявлення цих зв'язків (тобто відомо, що вихідні величини якимось чином залежить від вхідних, але функціональні залежності невідомі). При застосуванні цього методу об'єкт керування розглядають як "чорний ящик" і передбачається, що нічого невідомо про його вміст і внутрішню структуру, а система взаємодіє з оточуючим середовищем через сукупність входів і виходів. У цьому випадку виявляється можливим робити ряд висновків про поведінку системи, спостерігаючи лише реакції вихідних величин на зміну вхідних. Метод тільки виявляє ймовірний зв'язок між параметрами об'єкта. Емпіричні рівняння зазвичай будуються у формі регресійних рівнянь, коефіцієнти яких визначаються за експериментальними даними з використанням добре розробленого апарату математичної статистики.

При експериментально-статистичному методі дослідження розрізняють метод активного експерименту та метод пасивного експерименту. Метод активного експерименту базується на застосуванні спеціальних збурень – білих шумів, псевдовипадкових послідовностей та ін. Метод пасивного експерименту не передбачає подачу спеціальних збурень. Тут проводиться збір даних про значення вхідних та вихідних величин у певні моменти часу під час нормальної експлуатації об'єкта керування.

Статичні характеристики, отримані статистичними методами, мають вигляд рівнянь регресії чи кореляційних функцій.

У зв'язку з недостатньою вивченістю багатьох хімічних виробництв, статистичні методи дослідження дуже корисні і досить широко використовуються.

#### 4.2.2 Експериментальний детермінований метод

Експериментальний детермінований метод є методом активного експерименту, бо передбачає подачу на вхід об'єкту певного збурення в діапазоні зміни вхідної величини.

Експериментальний детермінований метод визначення статичних характеристик полягає в створенні ряду послідовних рівноважних станів об'єкту при відповідних вихідних і вхідних величинах.

Досягнувши нового рівноважного стану об'єкту, записують значення вхідних і вихідних величин за показаннями вимірювальних приладів. За вимірними значеннями вхідних і вихідних величин складають таблицю і будують графік статичної характеристики, з якої можна визначити коефіцієнт підсилення об'єкту. У залежності від плану експериментальних досліджень, дослідження з визначення статичних характеристик проводять за всіма каналами впливу, за деякими з них чи тільки за одним. Запис значень величин може здійснюватися автоматично реєструючими приладами.

Розглянемо отримання статичної характеристики об'єкту з одним входом і одним виходом.



Нехай необхідно експериментальним шляхом визначити статичну характеристику об'єкту керування  $y = f(x)$ .

Перед експериментом об'єкт оснащується вимірювальною апаратурою (бажано реєструючою), що дозволить виміряти (і записати) вхідні і вихідні параметри з достатньою точністю. Для вибору вимірювальної апаратури слід

визначити допустимий діапазон зміни вхідної величини  $x$  й вихідної  $y$  для каналу впливу  $x \rightarrow y$ , для якого визначається статична характеристика.

Варто передбачити можливість зміни вхідного параметру  $x$  на цілком визначену і заздалегідь обрану величину й крок зміни вхідної величини  $h$  (для отримання якісної статичної характеристики слід передбачити розбиття інтервалу зміни вхідної величини на 10–20 частин).

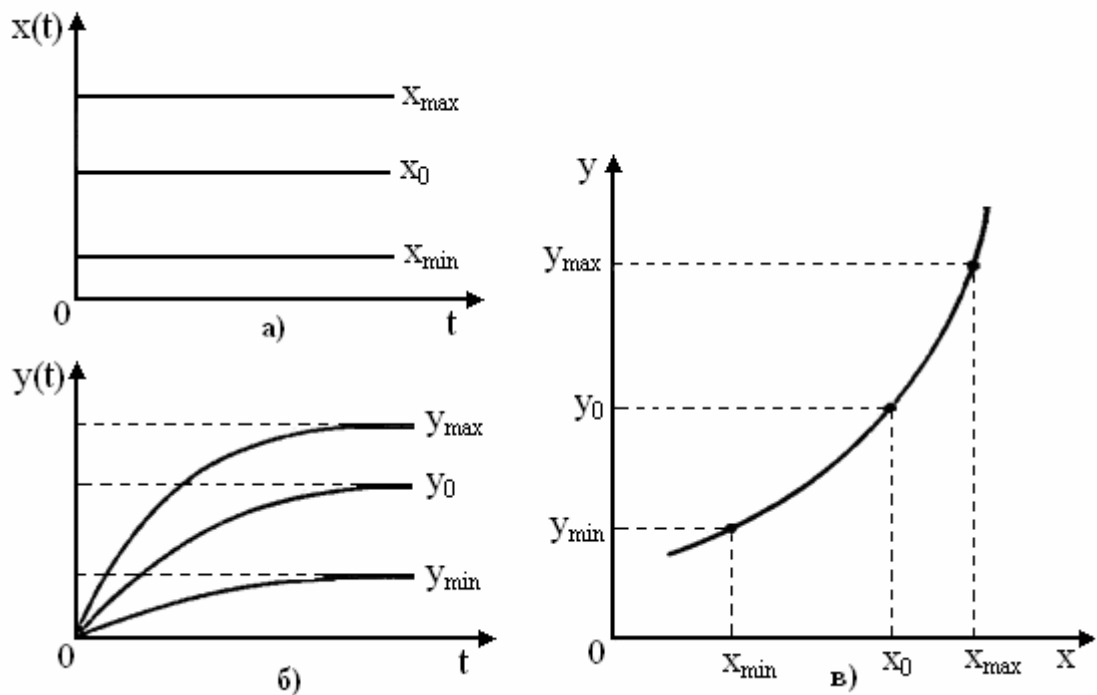
Для одержання статистичних характеристик об'єкт має бути приведений у суворо сталий стан. При цьому шляхом впливу на вхідний параметр домагаються стабільності вихідного параметру на рівні номінального режиму роботи об'єкту.

В цьому основному статичному режимі визначають значення параметрів об'єкта моделювання.

Після вимірювання і реєстрації значення параметрів  $(x_0, y_0)$  в обраному первісному робочому статичному режимі переходять до нових вимірів. Для цього проводять поступово зміну вхідної величини  $x$  на крок  $h$ , об'єкт переводять у новий сталий стан, спостерігаючи за зміною вихідного параметра  $y$ . Коли величина  $y$  досягне сталого значення (перестане змінюватися в часі), значення записують в таблицю  $(x_1, y_1)$ . Тривалість спостереження  $\Delta t$  за вихідною величиною  $y$  під час досліду встановлюють у відповідності з умовою:  $\Delta t > (1,5 \div 2,0)T$ , де  $T$  - тривалість (або її оцінка) перехідного процесу по досліджуваному каналу об'єкта. Потім знову проводять поступово зміну вхідної величини  $x$  на крок  $h$  і при новому сталому режимі значення записують в таблицю  $(x_2, y_2)$  і т.д. Такі записи слід зробити для всіх сталих точок  $(x_i, y_i)$ . Для збільшення точності результатів експерименти повторюють декілька разів і обробляють дані за допомогою методів математичної статистики.

Отримані дані дають можливість побудувати графік статичної характеристики.

На рис. 4.1 показані етапи визначення статичної характеристики системи регулювання.



а) збурення, що подають на вхід системи (ступінчаста зміна вхідної величини); б) перехідні процеси (зміна вихідної величини з часом від нанесення збурення до усталеного значення); в) статична характеристика системи

Рис. 4.1 До визначення статичної характеристики системи регулювання

На вхід системи подають збурення  $x_{min}$  (рис. 4.1 – а). Зміна вихідної величини з часом від нанесення збурення до усталеного значення  $y_{min}$  показана на рис. 4.1 – б. Таким чином, отримана перша точка статичної характеристики  $(x_{min}, y_{min})$ , що показана на рис. 4.1 – в. Аналогічно отримані наступні точки статичної характеристики: при збуренні  $x_0$  – отримана точка  $(x_0, y_0)$ , а при збуренні  $x_{max}$  – отримана точка  $(x_{max}, y_{max})$ . Точка  $(x_0, y_0)$  є робочою точкою статичної характеристики (номінальна).

Для судження про величину нерівномірності у випадку статичного регулювання слугує ступінь чи коефіцієнт нерівномірності, що визначається

відношенням:  $d = \frac{y_{max} - y_{min}}{y_0}$ , де  $y_{max}$ ,  $y_{min}$  і  $y_0$  максимальне, мінімальне і

середнє значення  $(y_0 = \frac{y_{\max} + y_{\min}}{2})$  регульованої величини в зоні регулювання. Іншими словами, – це відношення максимальної статичної похибки до величини завдання (тобто номінального значення регульованої величини). Статична характеристика у випадку астатичного регулювання пройде через точку  $(x_0, y_0)$  паралельно вісі абсцис.

У додатку Д наведено приклад експериментальних досліджень з визначення статичної характеристики теплового об'єкту за каналом впливу «напруга на підігрівачі  $\rightarrow$  температура об'єкту».

Розглянемо отримання статичної характеристик об'єкту з двома входами  $x_1, x_2$  і одним виходом  $y$ . Для такого об'єкту через встановлені інтервали часу  $\Delta t$  даються прирости вхідній величині  $x_1$ . При цьому вхідну величину  $x_2$  підтримують постійною (зазвичай на значенні, що відповідає номінальному режиму роботи об'єкту). При різних значеннях величини  $x_1$  отримують усталені значення вихідної величини  $y$ . Послідовна зміна вхідної величини  $x_1$  здійснюється від її мінімального значення  $x_{1\min}$  до максимального  $x_{1\max}$ . За отриманими даними будують статичну характеристику  $y = f(x_1)$  при сталому значенні  $x_2$ . Якщо аналогічні експерименти провести при різних сталих значеннях величини  $x_2$ , то можна отримати сімейство статичних характеристик. Потім подібну серію дослідів виконують при стабілізації величини  $x_1$  і при зміні значення вхідної величини  $x_2$ .

При дослідженні статички об'єктів з числом входів більше двох методика експерименту принципово не відрізняється від викладеної, тобто визначення статичних характеристик проводять з періодичною зміною однієї вхідної величини і стабілізації інших. Надалі по черзі змінюють інші вхідні параметри.

Експериментальні статичні характеристики, що побудовані за даними таблиці відповідностей, можуть мати ламаний характер. Кінцеві розриви статичної характеристики, що мають місце на її графічному зображенні, є

результатом накладання на корисний сигнал статичної характеристики сигналу завади. Такі завади можуть з'являтися через такі причини: неточність вимірювання вихідної величини або завдання вхідної; незавершеність перехідного процесу за час визначення вихідної величини (вихідна величина не прийняла сталого значення); дією на вихідну величину неврахованих збурень; похибки приладів вимірювання та інші.

Для виділення корисного сигналу із отриманих результатів експерименту необхідно відфільтрувати сигнал завади. Для цього проводять згладжування статичної характеристики. Згладжування експериментально отримуваних сигналів досить широко використовується на практиці. Для згладжування використовується ряд методів:

1. Метод послідовного усереднення.
2. Метод експоненціального згладжування.
3. Метод четвертих різниць.
4. Згладжування розкладанням в ряд Фур'є.

Методи згладжування базуються на передумові гладкості характеристик фізичних об'єктів [1,8,16].

У ряді випадків об'єкт керування складається з декількох послідовно чи паралельно підключених апаратів.

Якщо визначити статичні характеристики такого об'єкту складно, чи зовсім неможливо, але при цьому є можливість визначити статичні характеристики апаратів, що входять в об'єкт керування, то статичні характеристики складних об'єктів визначають у такий спосіб:

- спочатку визначають статичні характеристики окремих елементів;
- а потім визначають статичну характеристику складного об'єкта розрахунковим шляхом (перетворення статичних характеристик при різних варіантах з'єднання елементів розглянуте вище).

При лінійних статичних характеристиках елементів об'єкта кращим є використання аналітичного методу перетворення за формулами (3.4) і (3.5), а при нелінійних – графічного.

Описані дослідження проводять для об'єктів, що мають позитивне (додатне) саморегулювання по досліджуваних каналах впливу. Якщо ж об'єкт без саморегулювання, чи має негативне (від'ємне) саморегулювання по досліджуваних каналах впливу, то зв'язок між вхідними і вихідними величинами порушується і про статистичні характеристики в цих випадках не може бути і мови. Якщо існують рівноважні режими в таких об'єктах, то мова може йти лише про визначення параметрів таких рівноважних режимів.



## Контрольні питання

1. Загальна характеристика усталених режимів роботи САР.
2. Поняття статичної характеристики. Типи статичних характеристик.
3. Зв'язок між рівнянням статики та рівнянням динаміки САР.
4. Методика побудови статичних характеристик при різних видах з'єднання ланок – послідовне і паралельне з'єднання (статичні характеристики розімкнених систем).
5. Методика експериментального визначення статичних характеристик.
7. Статичні характеристики замкнених систем (елемент охоплений зворотнім зв'язком).
8. Статична похибка САР.
9. Аналітичний метод отримання статичної характеристики.
10. Графічні методи лінеаризації статичних характеристик.
11. Аналітичний метод лінеаризації статичних характеристик.
12. Які статичні характеристики не піддаються лінеаризації?
13. Як визначається коефіцієнт передачі за статичною характеристикою?
14. Як впливає крутість статичних характеристик на вибір каналу регулюючого впливу?

## Література

### Основна

1. Остапенко Ю.О. Ідентифікація та моделювання технологічних об'єктів керування: Підручник [Текст] / Ю.О.Остапенко.– К.: Задруга, 1999. – 424с.
2. Воронов А. А. Основы теории автоматического управления. Ч. 1.[Текст] / А. А. Воронов. М. – Л. : Энергия, 1965. – 396 с.
3. Гузенко А. И. Основы теории автоматического регулирования [Текст] / А. И. М. Гузенко. – М.: Высшая школа, 1967. – 408 с.
4. Ладиев Р.Я. Аналитические методы описания объектов управления с сосредоточенными параметрами. Ч. 1.[Текст] / Р.Я. Ладиев, Ю.А. Остапенко, А.И. Кубрак, М.З. Кваско. – К.: ЛФОП КПИ, 1973. – 134 с.
5. Полоцкий Л.М. Автоматизация химических производств. Теория, расчет и проектирование систем автоматизации [Текст] / Л.М. Полоцкий, Г.И. Лапшенков. – М.: Химия, 1982. – 296 с.
6. Перов В.Л. Основы теории автоматического регулирования химико-технологических процессов [Текст] / В.Л. Перов. – М.: Химия, 1970. – 352 с.
7. Экспериментальное определение динамических характеристик объектов управления [Текст] / Балакирев В.С. и др. – М.: Энергия, 1967. – 232 с.
8. Практикум по автоматике и системам управления производственными процессами: Учеб. пособие для вузов [Текст] / под ред. И.М. Масленикова. – М.: Химия, 1986.– 336 с.
9. Дудников Е.Г. Построение математических моделей химико-технологических объектов [Текст] / Е.Г. Дудников, В.С. Балакирев, В.Н. Кривсунов, А.М. Цирлин. – Л.: Химия, 1970.– 312 с.

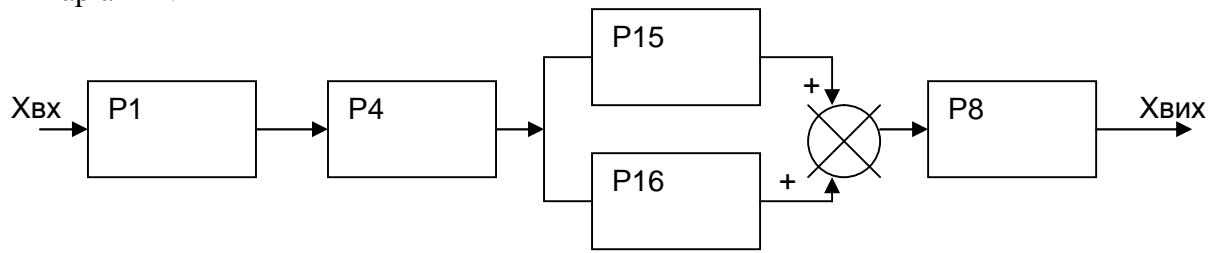
### Додаткова

10. Теория автоматического управления: учеб. для вузов по спец. «Автоматика и телемеханика». В 2-х ч. Ч.1: Теория линейных систем автоматического управления 2-е изд., перераб. и доп. [Текст] / под ред. А.А. Воронова. – М.: Высш. шк., 1986. – 367 с.
11. Автоматическое управление в химической промышленности [Текст] / под ред. Е.Г. Дудникова. – М.: Химия, 1987.– 368 с.
12. Кафаров В. В. Математическое моделирование основных процессов химических производств: Уч. пособие. [Текст] / В. В. Кафаров, М. Б. Глебов – М.: Высшая школа, 1991. – 400 с.
13. Брановицька С.В. Обчислювальна математика та програмування. Обчислювальна математика в хімії і хімічній технології: Підручник. [Текст] / С.В. Брановицька, Р.Б. Медведєв, Ю.Я. Фіалков –К.: ІВЦ”Видавництво Політехніка”, ТОВ “Фірма”Періодіка”, 2004. – 220 с.

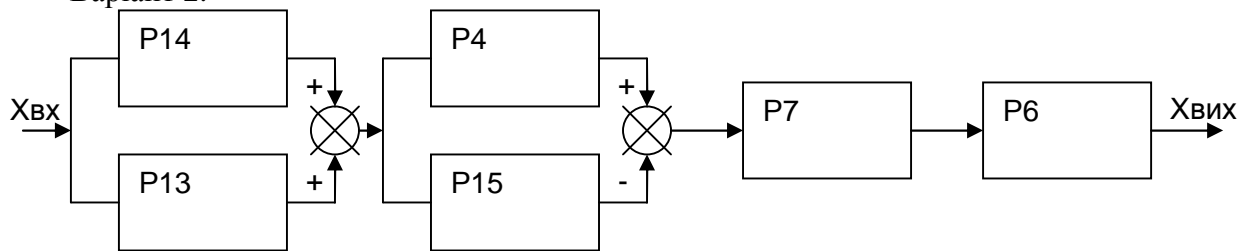
14. Брановицкая С.В. Вычислительная математика в химии и химической технологии. Учебник. [Текст] / С.В. Брановицкая, Р.Б.Медведев, Ю.Я. Фиалков – К.: Вища школа , 1986. – 216 с.
15. Шенк Х. Теория инженерного эксперимента [Текст] / Х. Шенк. –М.: Мир, 1972.– 381 с.
16. Щиголев В.М. Математическая обработка наблюдений [Текст] / В.М. Щиголев.– М.: Наука, 1989.– 272 с.

Варіанти структурних схем

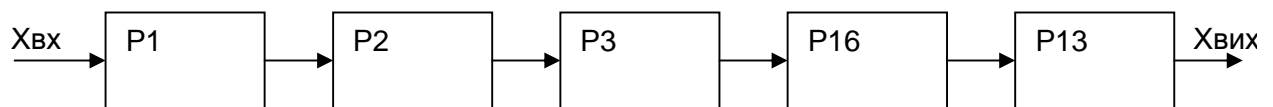
Варіант 1.



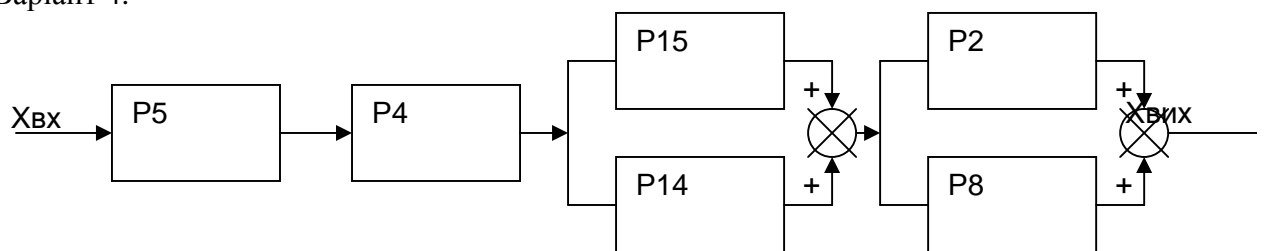
Варіант 2.



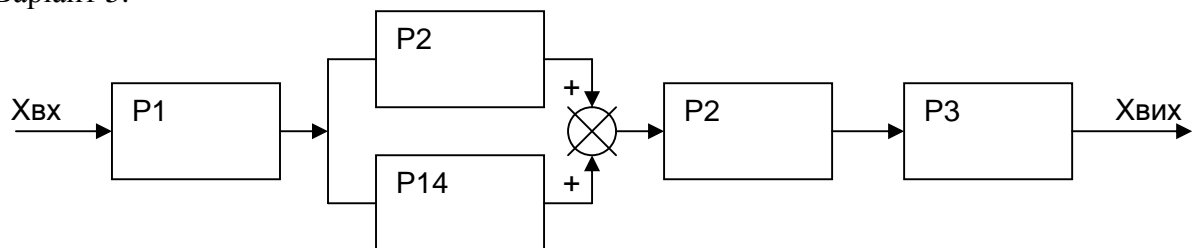
Варіант 3.



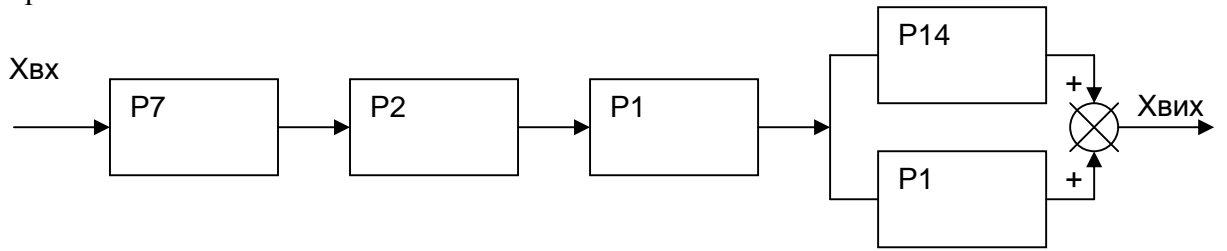
Варіант 4.



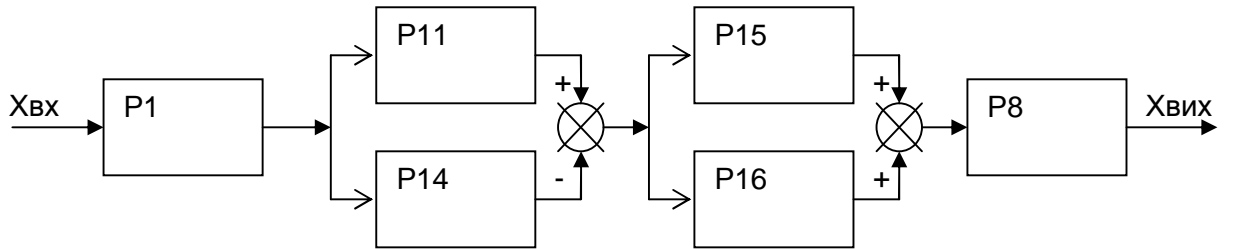
Варіант 5.



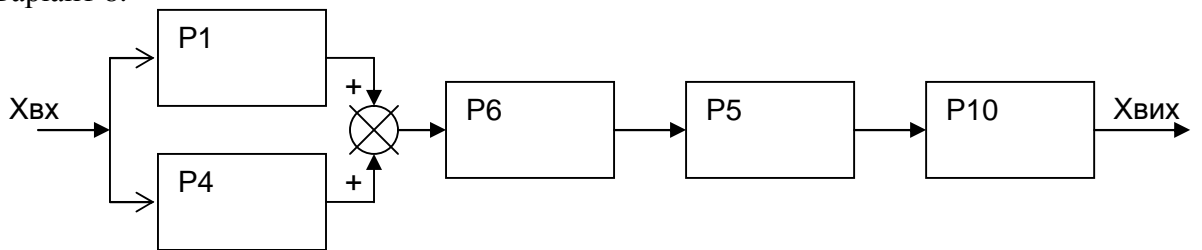
Варіант 6.



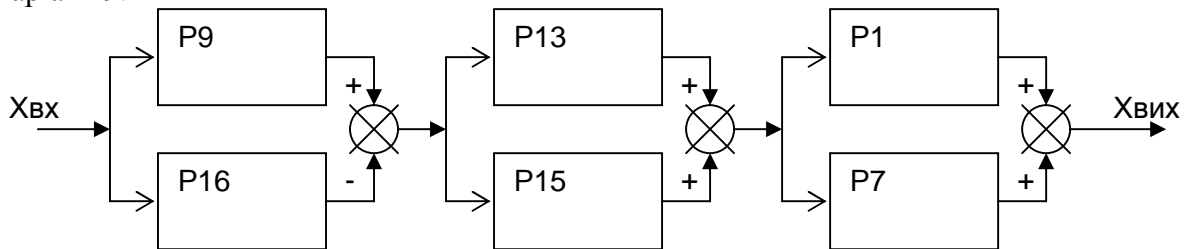
Варіант 7



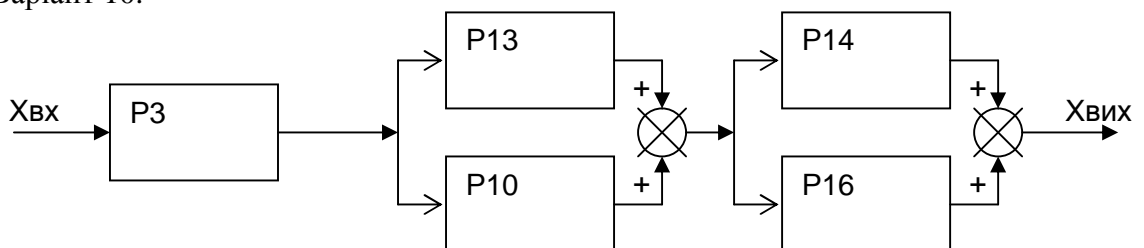
Варіант 8.



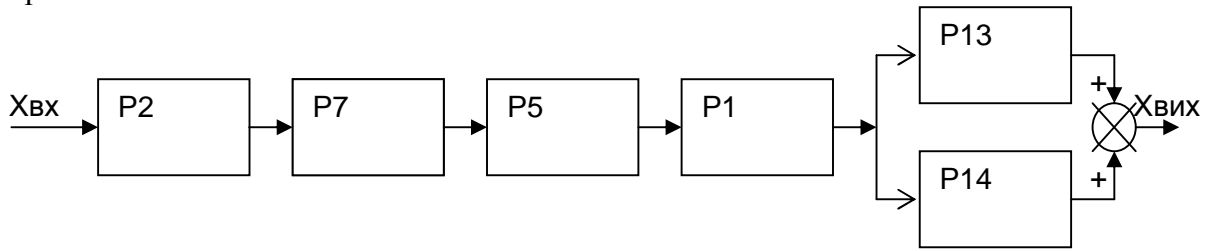
Варіант 9.



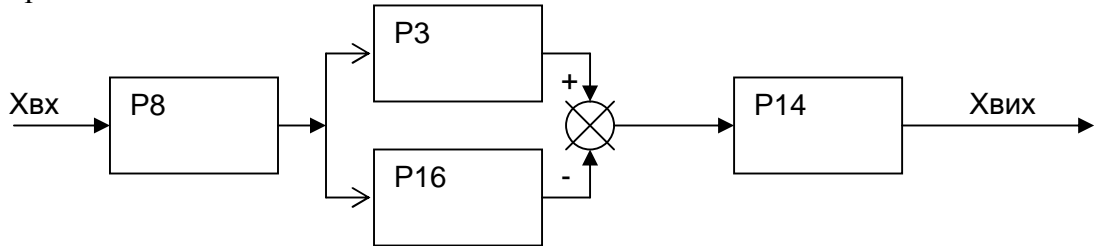
Варіант 10.



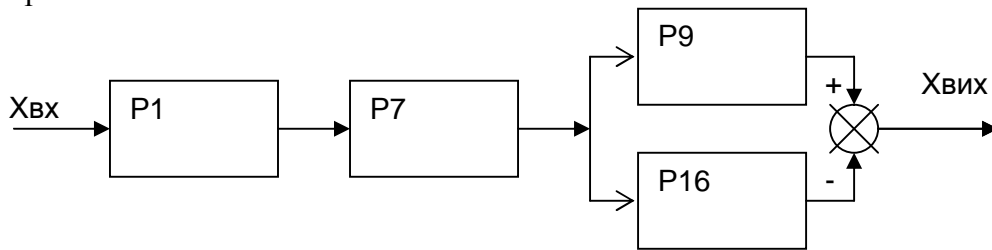
Варіант 11.



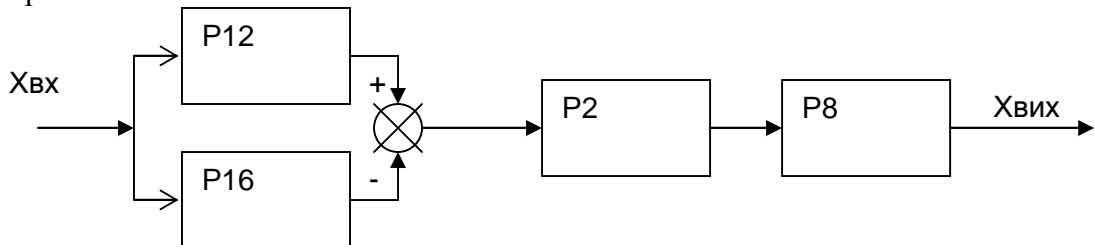
Варіант 12.



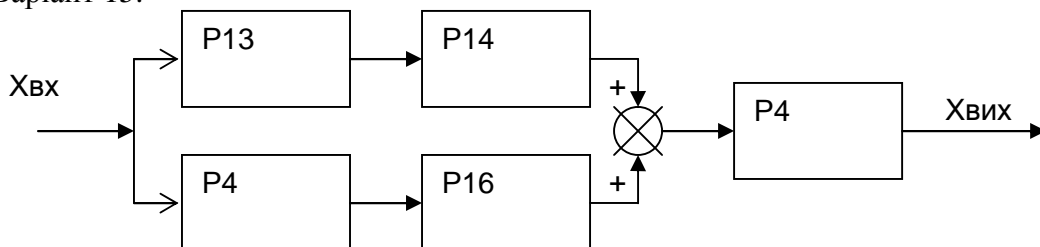
Варіант 13.



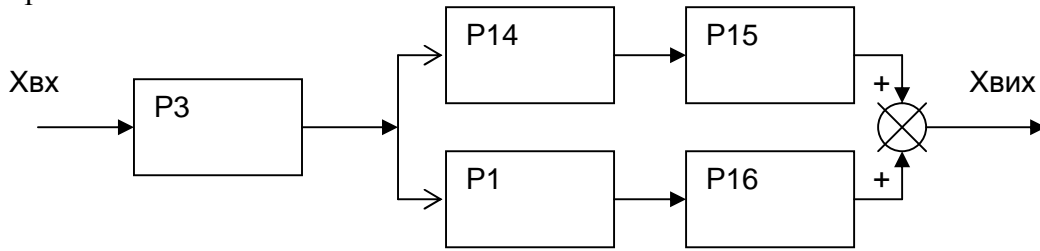
Варіант 14.



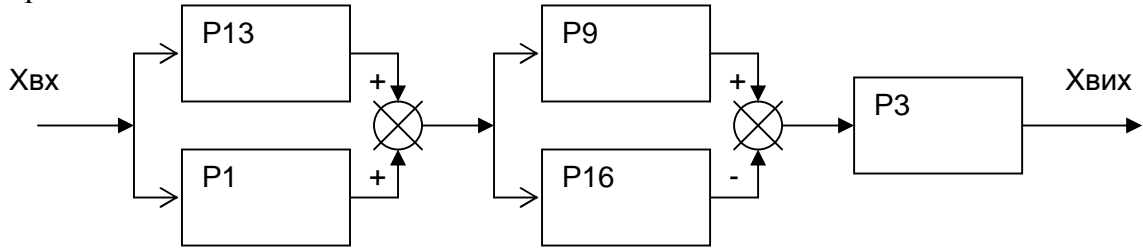
Варіант 15.



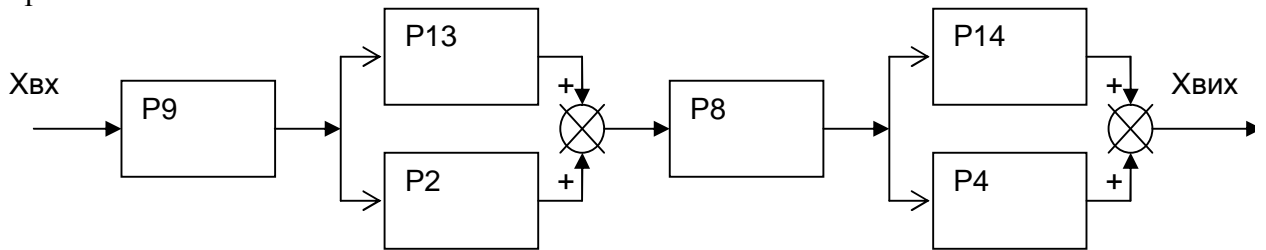
Варіант 16.



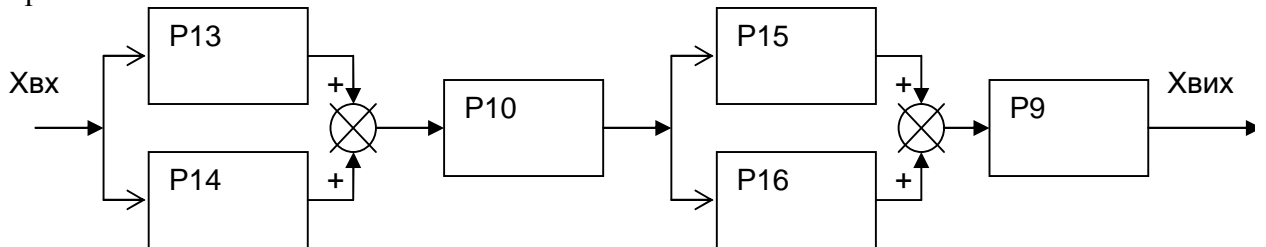
Варіант 17.



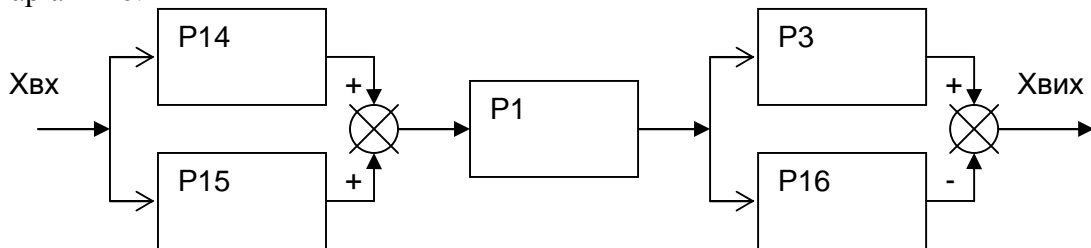
Варіант 18.



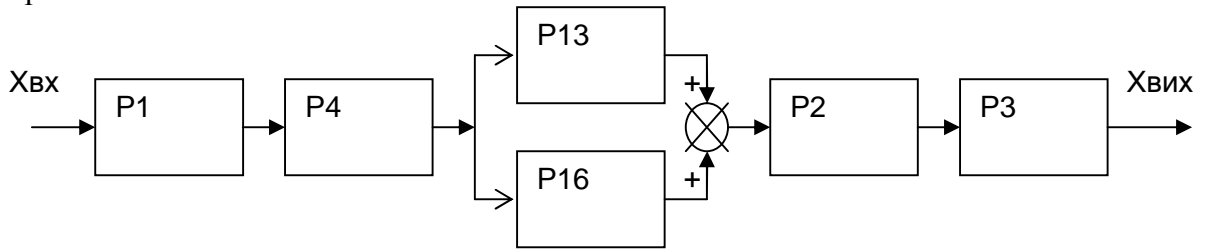
Варіант 19.



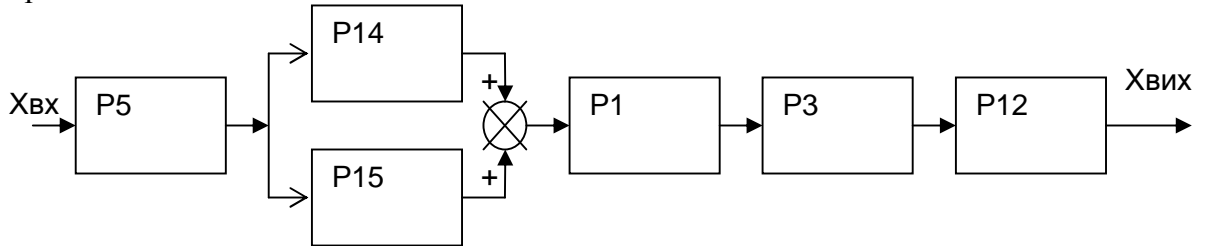
Варіант 20.



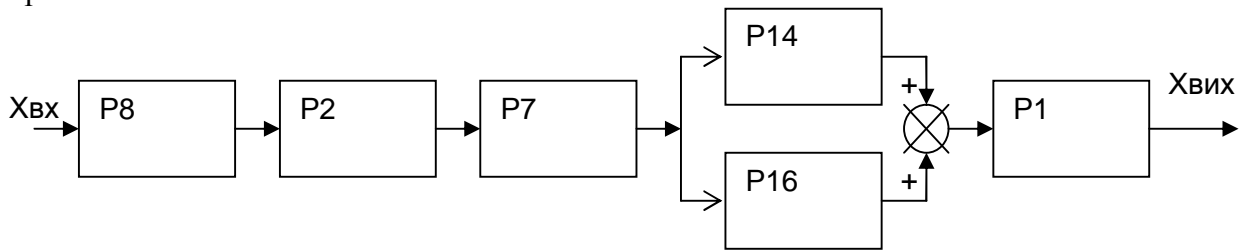
Варіант 21.



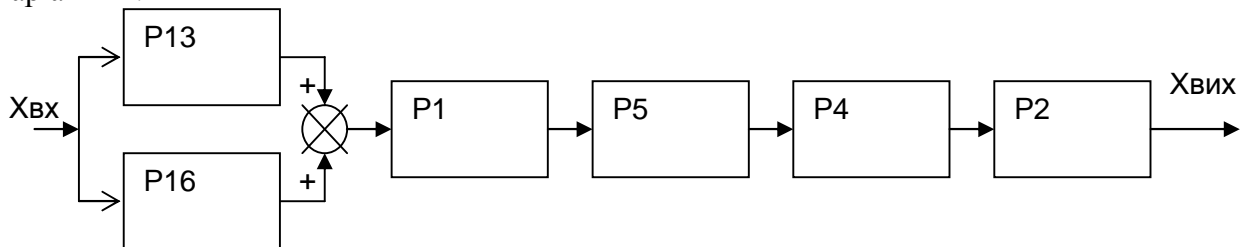
Варіант 22.



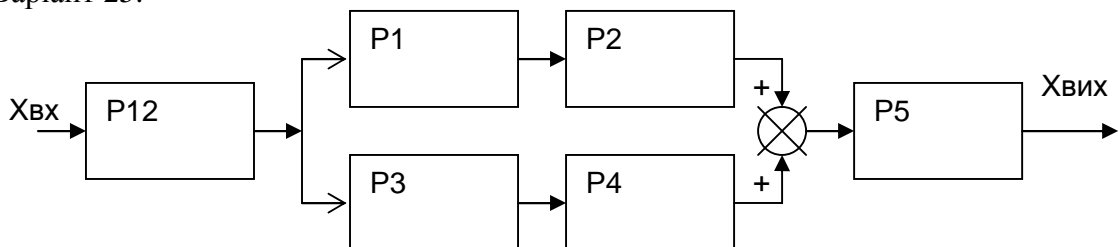
Варіант 23.



Варіант 24.

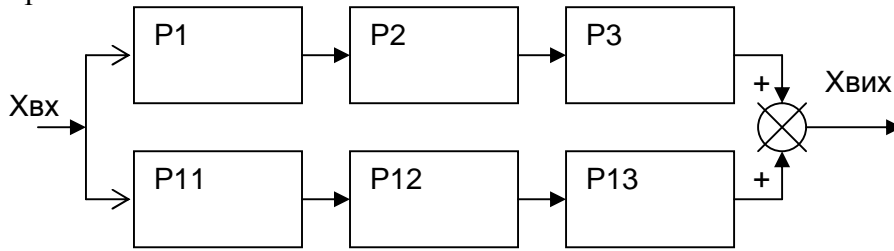


Варіант 25.

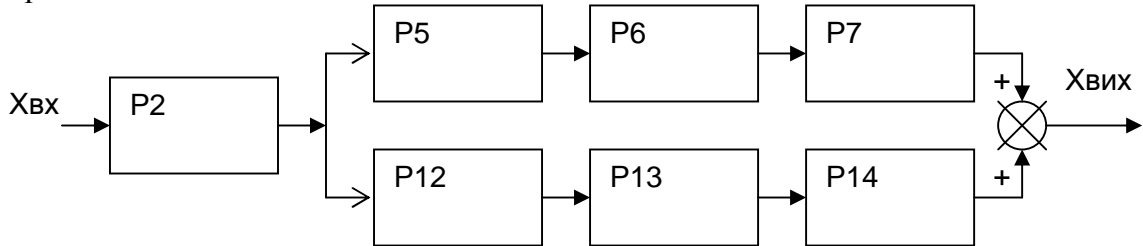




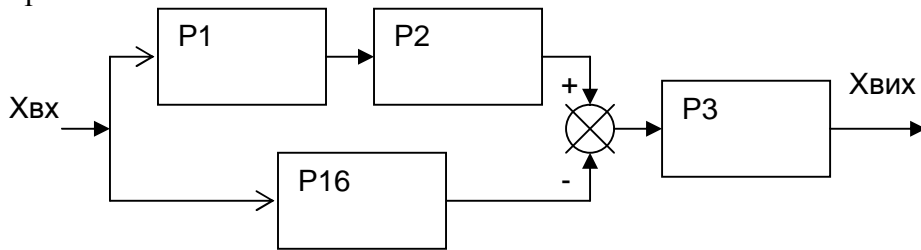
Варіант 26.



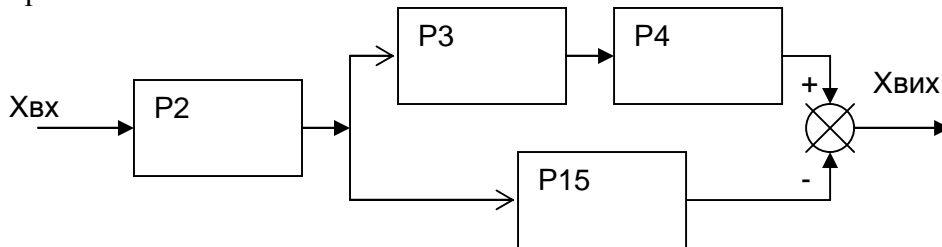
Варіант 27.



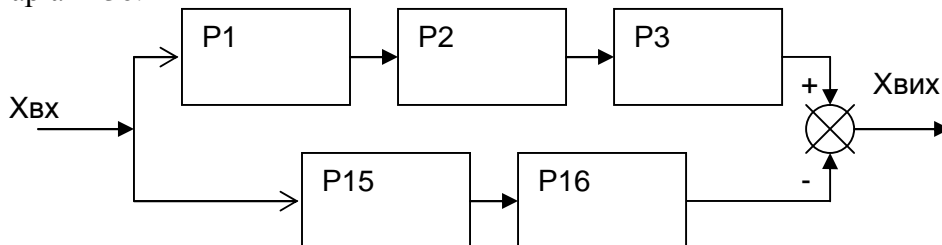
Варіант 28.



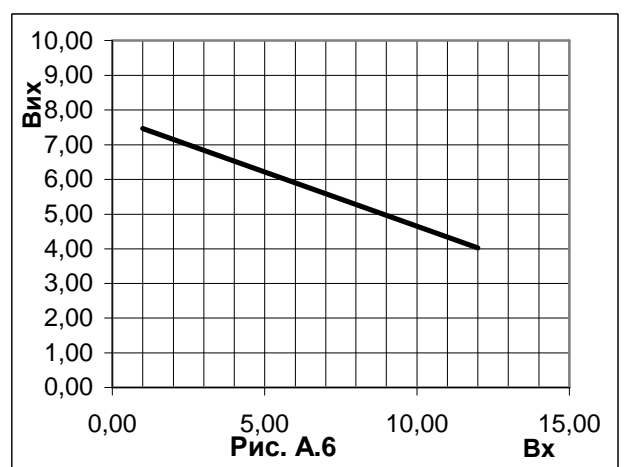
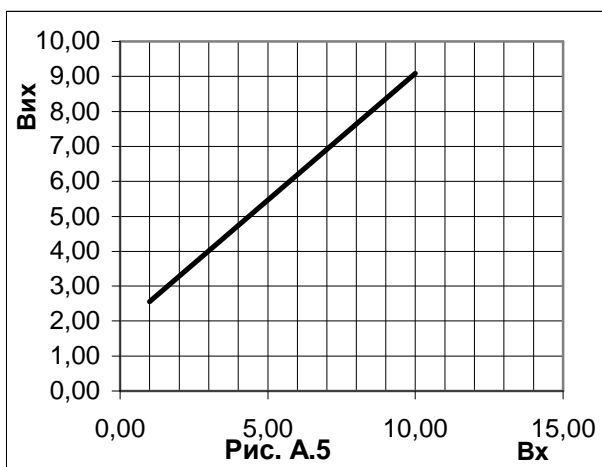
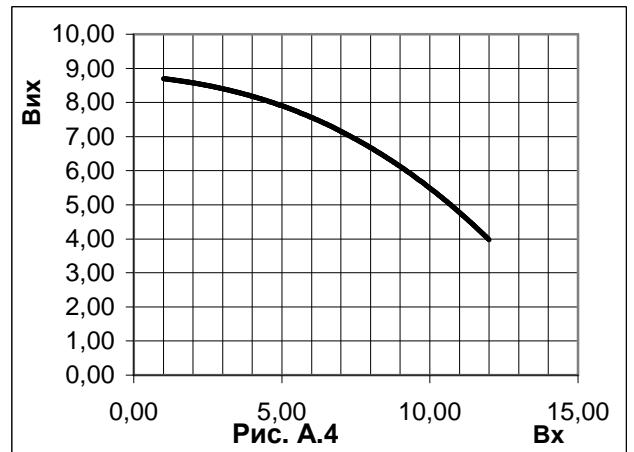
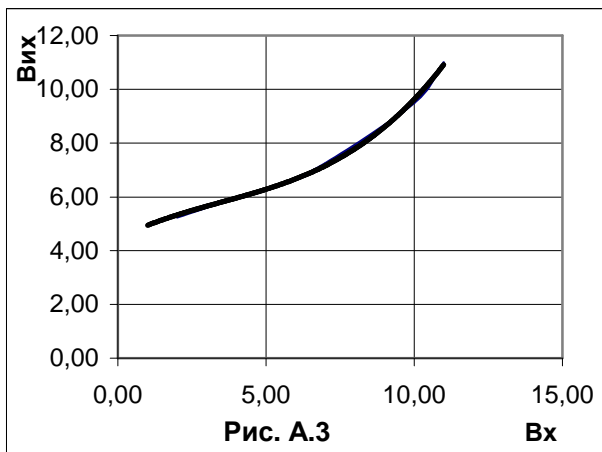
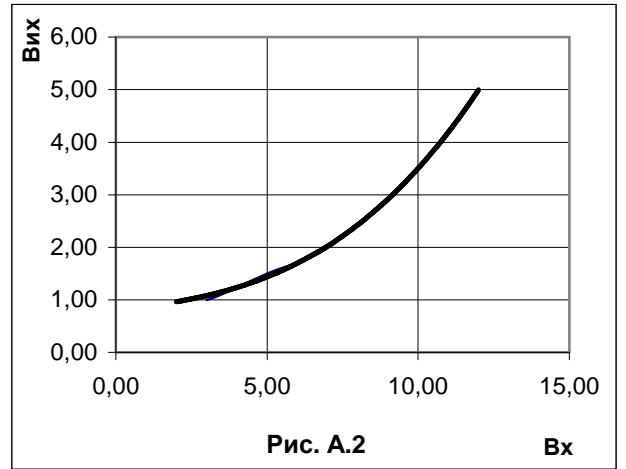
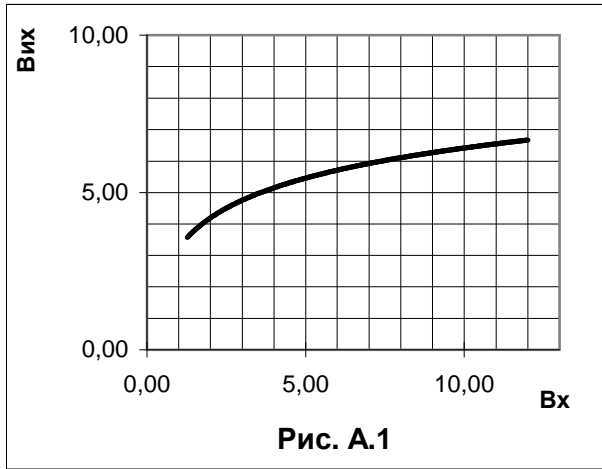
Варіант 29.

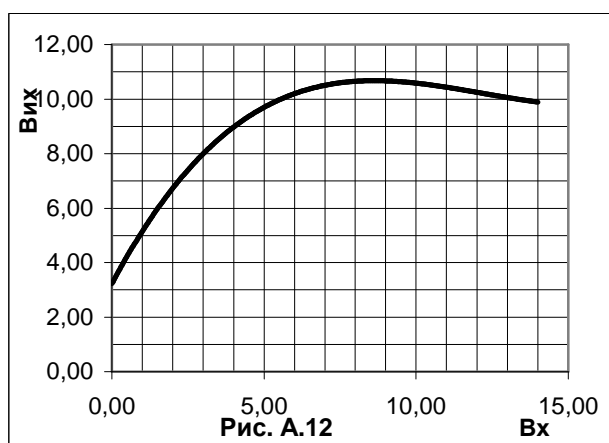
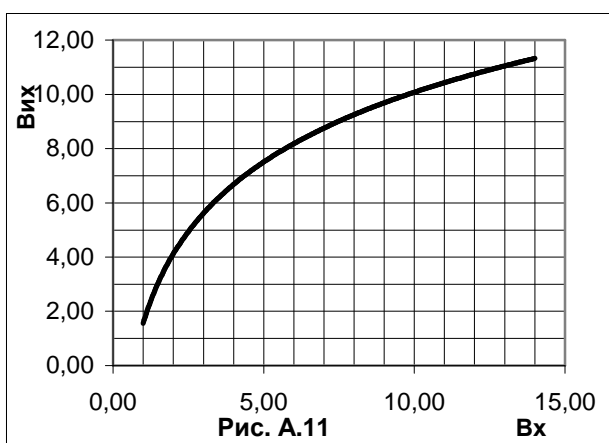
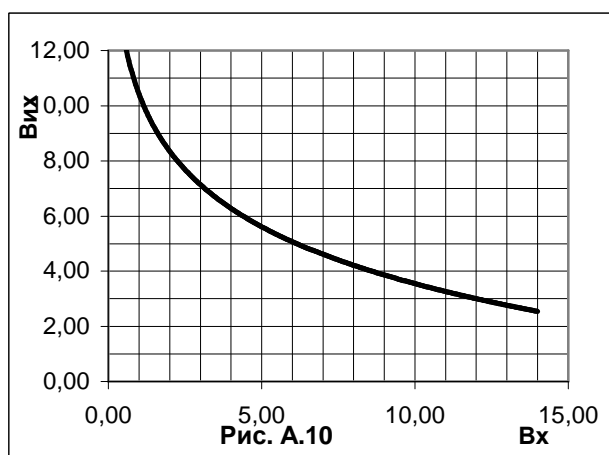
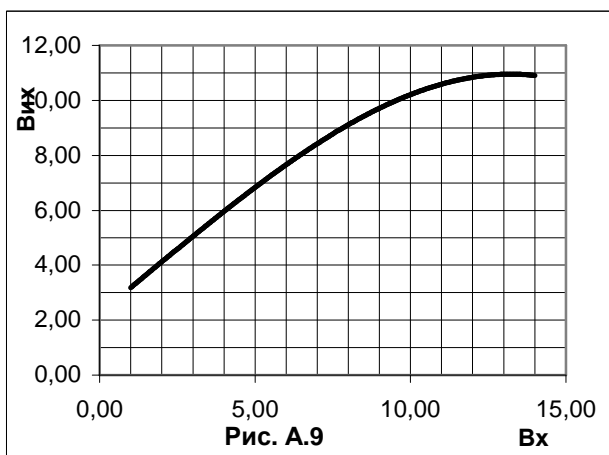
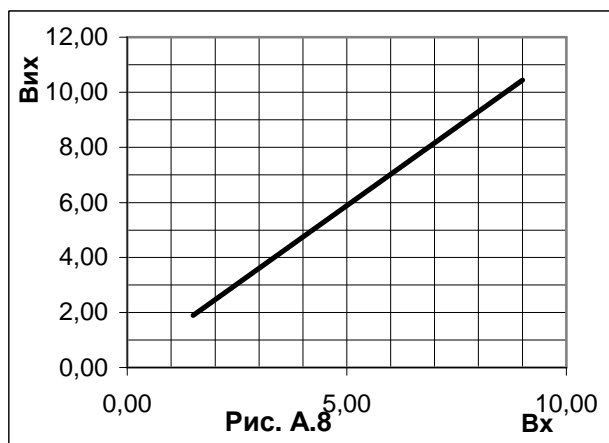
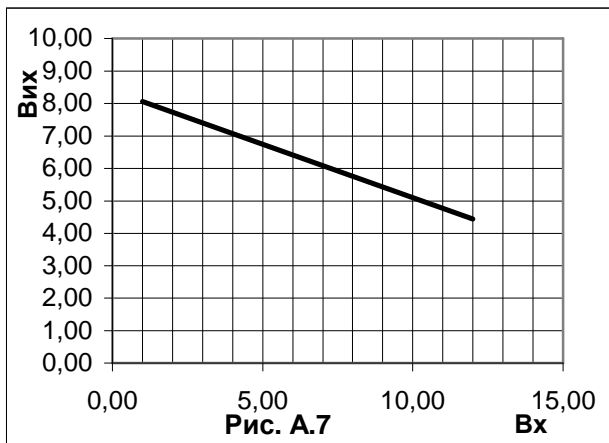


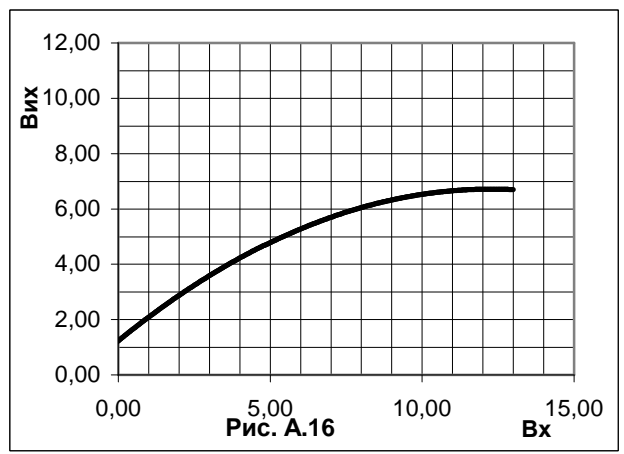
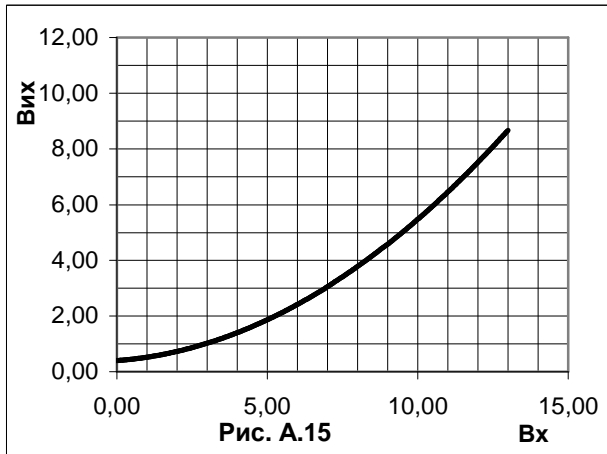
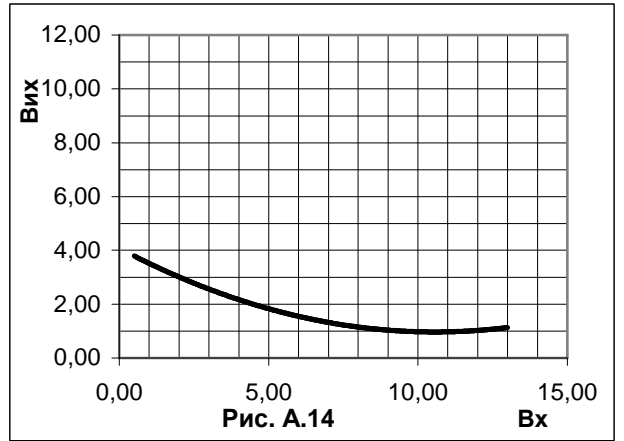
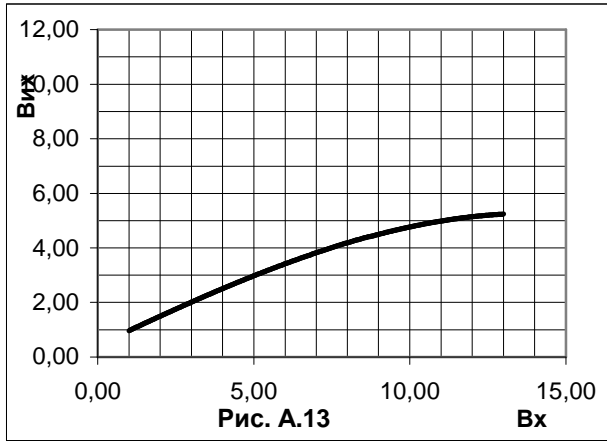
Варіант 30.



Статичні характеристики елементів системи, що позначені на структурних схемах: P1, ..., P16, наведені відповідно на Рис. А.1, ..., Рис. А.16.







**Зразок титульного листа**

Міністерство освіти і науки України  
Національний технічний Університет України  
«Київський політехнічний Інститут»

Кафедра кібернетики ХТП

**Розрахунково-графічна робота**

з дисципліни: **«Теорія автоматичного керування»**

на тему: **«Визначення статичних характеристик складної системи»**

Виконала:  
Студентка III-го курсу  
ХТФ  
Групи гр. ХА-61  
Хоменко А.О.

Перевірив:  
доц. Бондаренко С.Г.

Київ 2013

## Приклад аналітичного визначення статичних характеристик

В якості об'єкту дослідження статички розглянемо об'єкт, наведений в роботі [1]. Об'єкт представляє собою змішувач (рис. В.1), в який подається відпрацьований луг витратою  $G_1$  і концентрацією  $c_1$ , і концентрований (зміцнюючий) луг витратою  $G_2$  і концентрацією  $c_2$ . Зміцнюючий луг призначений для підвищення концентрації вихідного продукту  $c_3$ , який виводиться зі змішувача витратою  $G_3$ .

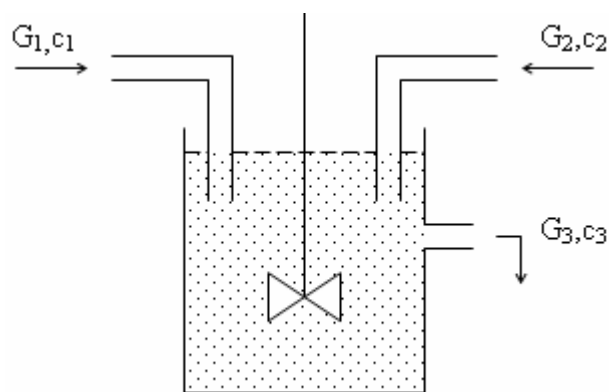


Рис. В.1 Змішувач

При нормальному режимі експлуатації (номінальний статичний режим) сталі параметри об'єкта мають наступні значення:

$$G_1 = 5000 \frac{\text{кг}}{200\text{д}}; \quad c_1 = 20\%;$$

$$G_2 = 1000 \frac{\text{кг}}{200\text{д}}; \quad c_2 = 80\%;$$

$$G_3 = 6000 \frac{\text{кг}}{200\text{д}}; \quad c_3 = 30\%;$$

Даний об'єкт має два входи: витрата відпрацьованого луку –  $G_1$  і витрата зміцнюючого луку –  $G_2$  і один вихід – концентрація вихідного продукту  $c_3$ . Таким чином, об'єкт має два канали впливу на вихідну величину: канал впливу  $G_1 \rightarrow c_3$  і канал впливу  $G_2 \rightarrow c_3$ .

У завданні необхідно для змішувача, що наведений на рис. В.1, отримати статичні характеристики по зазначеним каналам впливу і на основі отриманих статичних характеристик визначити, який із керуючих впливів:

витрата  $G_1$  або витрата  $G_2$  є найбільш ефективним для регулювання концентрації вихідного продукту  $c_3$ .

Розрахуємо статичні характеристики для вказаних каналів впливу:

– для каналу впливу  $G_1 \rightarrow c_3$  характеристику  $c_3 = f_1(G_1)$ ;

– для каналу впливу  $G_2 \rightarrow c_3$  характеристику  $c_3 = f_2(G_2)$ .

Для рішення задачі застосуємо аналітичний метод отримання статичних характеристик. Оскільки вихідною величиною об'єкта є концентрація, то слід скласти матеріальний баланс за речовиною, концентрація якої є параметром, що визначається.

Для цього складемо матеріальний баланс змішувача за речовиною – луг (речовина в даному об'єкті одна):

$$G_1 c_1 + G_2 c_2 = G_3 c_3. \quad (\text{B.1})$$

Але в статичному режимі всі параметри процесу незмінні (а значить і рівень у змішувачі є незмінним). Тому можна записати, що:

$$G_1 + G_2 = G_3. \quad (\text{B.2})$$

З урахуванням рівняння (B.2) рівняння матеріального балансу за речовиною (B.1) прийме вигляд:

$$G_1 c_1 + G_2 c_2 = (G_1 + G_2) c_3. \quad (\text{B.3})$$

Для отримання статичної характеристики  $c_3 = f_1(G_1)$  вирішимо рівняння (B.3) відносно вихідної величини  $c_3$ :

$$c_3 = \frac{G_1 c_1 + G_2 c_2}{G_1 + G_2}$$

і підставимо в нього чисельні значення всіх параметрів в номінальному статичному режимі, крім параметрів  $G_1$  і  $c_3$ , і тоді отримаємо рівняння статичної характеристики  $c_3 = f_1(G_1)$ :

$$c_3 = \frac{0,2 \cdot G_1 + 800}{1000 + G_1}. \quad (\text{B.4})$$

Для отримання статичної характеристики  $c_3 = f_2(G_2)$  вирішимо рівняння (B.3) відносно вихідної величини  $c_3$ :

$$c_3 = \frac{G_1 c_1 + G_2 c_2}{G_1 + G_2}$$

і підставимо в нього чисельні значення всіх параметрів в номінальному статичному режимі, крім параметрів  $G_2$  і  $c_3$ , і тоді отримаємо рівняння статичної характеристики  $c_3 = f_2(G_2)$ :

$$c_3 = \frac{0,8 \cdot G_2 + 1000}{5000 + G_2}. \quad (B.5)$$

Протабулюємо функції (B.4) і (B.5) і дані занесемо в таблицю B.1.

Таблиця B.1

Статичні характеристики  $c_3 = f_1(G_1)$  і  $c_3 = f_2(G_2)$  задані таблично

Статична характеристика $c_3 = f_1(G_1)$			Статична характеристика $c_3 = f_2(G_2)$		
№	$G_1$	$c_3$	№	$G_2$	$c_3$
1	500	0,600	1	100	0,212
2	1000	0,500	2	200	0,223
3	2000	0,400	3	400	0,244
4	3000	0,350	4	600	0,264
5	4000	0,320	5	800	0,283
6	5000	0,300	6	1000	0,300
7	6000	0,286	7	1200	0,316
8	7000	0,275	8	1400	0,331
9	8000	0,267	9	1600	0,345
10	9000	0,260	10	1800	0,359
11	10000	0,255	11	2000	0,371

За даними, що приведені у таблиці B.1, в середовищі Excel побудуємо графіки статичних характеристик  $c_3 = f_1(G_1)$  і  $c_3 = f_2(G_2)$ . Вони наведені відповідно до рис. B.2 і рис. B.3.

Побудова вказаних статичних характеристик необхідна для вибору керуючого впливу для регулювання концентрації вихідного продукту  $c_3$ . Як



зазначено раніше, вибір каналу керування визначають за допомогою величини чутливості каналу, що для лінійних статичних характеристик є сталою величиною і дорівнює коефіцієнту передачі каналу.

Статична характеристика  $c_3=f_1(G_1)$

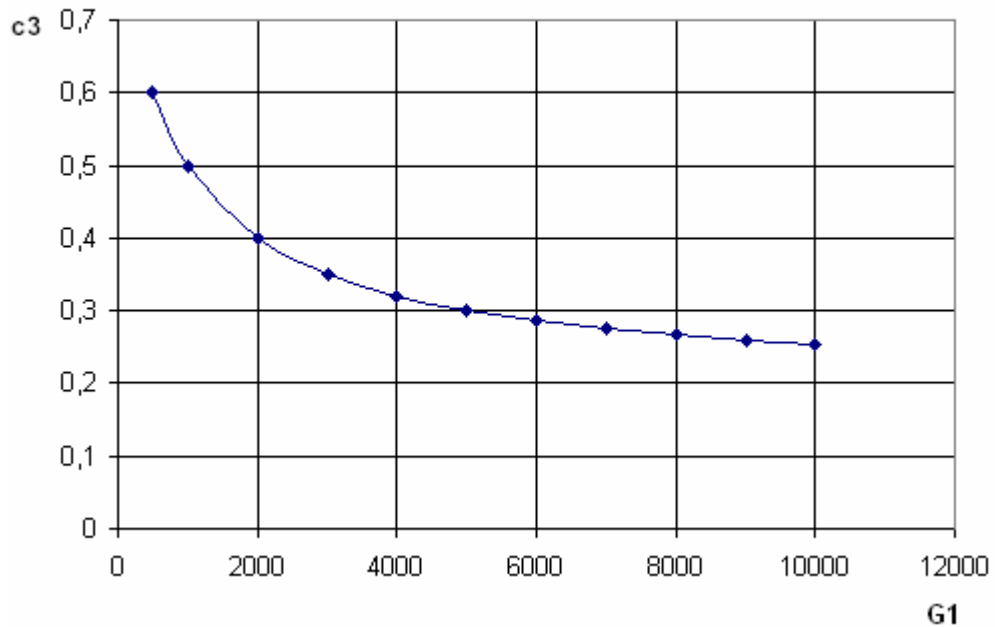


Рис. В.2 Статична характеристика  $c_3 = f_1(G_1)$

Статична характеристика  $c_3=f_2(G_2)$

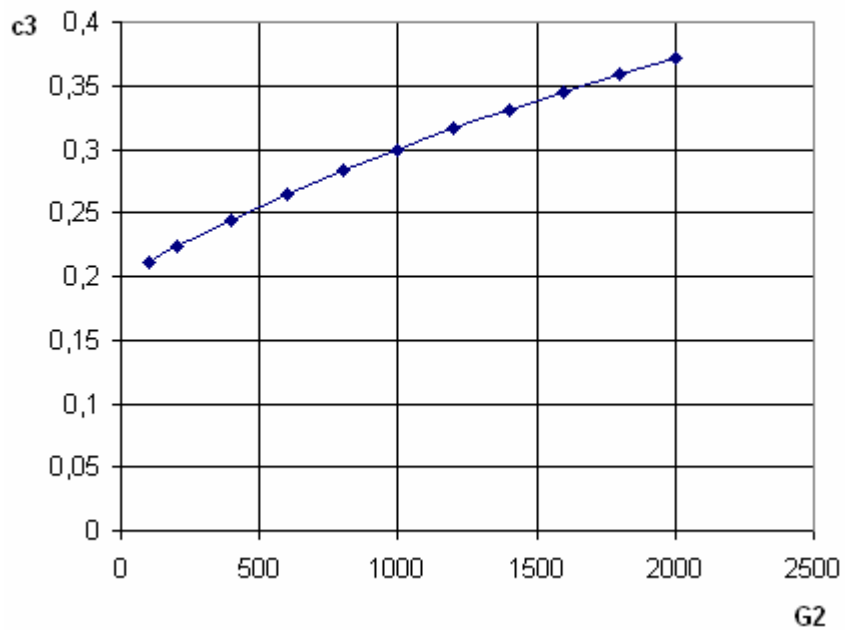


Рис. В.3 Статична характеристика  $c_3 = f_2(G_2)$

Проведемо лінеаризацію отриманих статичних характеристик в околі робочої точки (тобто відносно номінального статичного режиму роботи об'єкту). Статичну характеристику  $c_3 = f_1(G_1)$  лінеаризуємо в околі робочої точки  $G_1 = 5000 \text{ кг}^2 / 200 \text{ д}$ ;  $c_1 = 20\%$ ; на відрізку зміни  $G_1$  [4000, 6000].

Рівняння лінеаризованої статичної характеристики, отримане за методом обраних точок [11], має вигляд:

$$c_3 = -1,715\text{E-}5 \cdot G_1 + 0,3886. \quad (\text{B.6})$$

Статичну характеристику  $c_3 = f_2(G_2)$  лінеаризуємо в околі робочої точки  $G_2 = 1000 \text{ кг}^2 / 200 \text{ д}$ ;  $c_2 = 80\%$ ; на відрізку зміни  $G_2$  [800, 1200]. Рівняння лінеаризованої статичної характеристики, отримане за методом обраних точок [11], має вигляд:

$$c_3 = 8,325\text{E-}5 \cdot G_2 + 0,3886. \quad (\text{B.7})$$

З отриманих рівнянь (B.6), (B.7) видно, що коефіцієнт передачі за каналом  $G_2 \rightarrow c_3$  більший, ніж значення коефіцієнту передачі за каналом  $G_1 \rightarrow c_3$ . І при цьому, статична характеристика  $c_3 = f_1(G_1)$  має значну нелінійність, що є небажаним для каналу керуючого впливу. У зв'язку з цим, в якості керуючого впливу на концентрацію  $c_3$  можна рекомендувати витрату  $G_2$ .

## Додаток Д

### Експериментальні дослідження статички теплового об'єкту

Експериментальні дослідження з визначення статичної характеристики теплового об'єкту за каналом впливу «напруга на підігрівачі → температура об'єкту» проводили наступним чином:

- об'єкт знаходився в початковому сталому стані: напруга на підігрівачі становила 0 В і температура теплового об'єкту 12,5 °С;
- увімкнули живлення печі та подали напругу на підігрівач 50 В;
- коли температура (вихідна величина) досягла сталого значення (перестала змінюватися в часі), як показано на рис. Д.1, записали значення напруги і температури в таблицю Д.1;

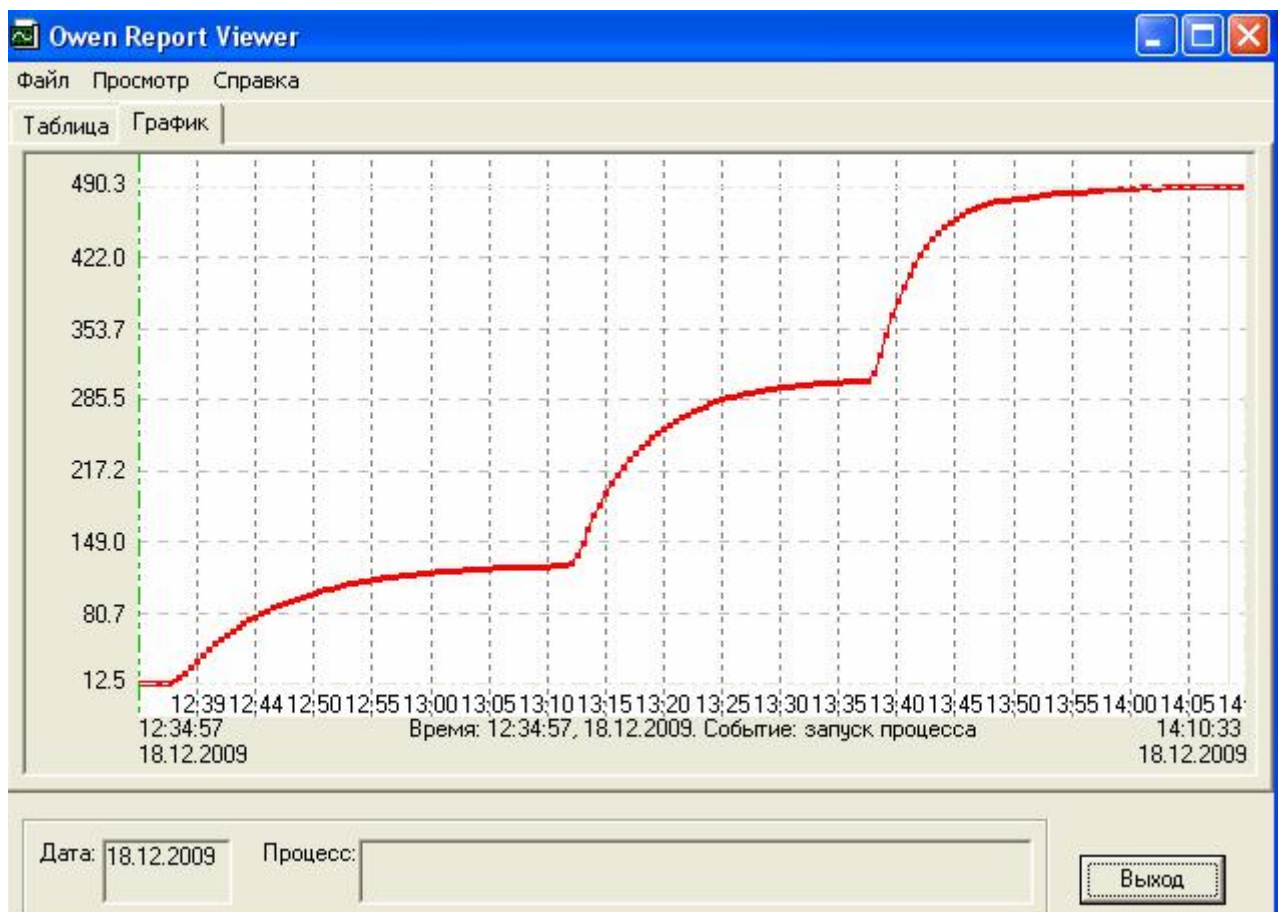


Рис. Д.1 Зміна температури теплового об'єкту з часом:

- змінили живлення печі та подали напругу на підігрівач 100 В і коли температура досягла сталого значення, записали значення напруги і температури в таблицю Д.1;
- змінили живлення печі та подали напругу на підігрівач 150 В і коли температура досягла сталого значення, записали значення напруги і температури в таблицю Д.1.

Точки результатів вимірювання температури через кожні 30 с за допомогою спеціального обладнання російської фірми OWEN архівувались в базі даних комп'ютера. З архіву дані можна експортувати в MS Word, MS Excel або вивести для наочності на графік, як показано на рис. Д.1.

Результати досліджень наведені в таблиці Д.1.

Таблиця Д.1.

Точки усталених режимів роботи теплового об'єкту

Напруга, В	0	50	100	150
Температура, °С	12,5	128,5	302,5	490,3

За даними таблиці Д.1 побудована статична характеристика теплового об'єкту в середовищі MS Excel.

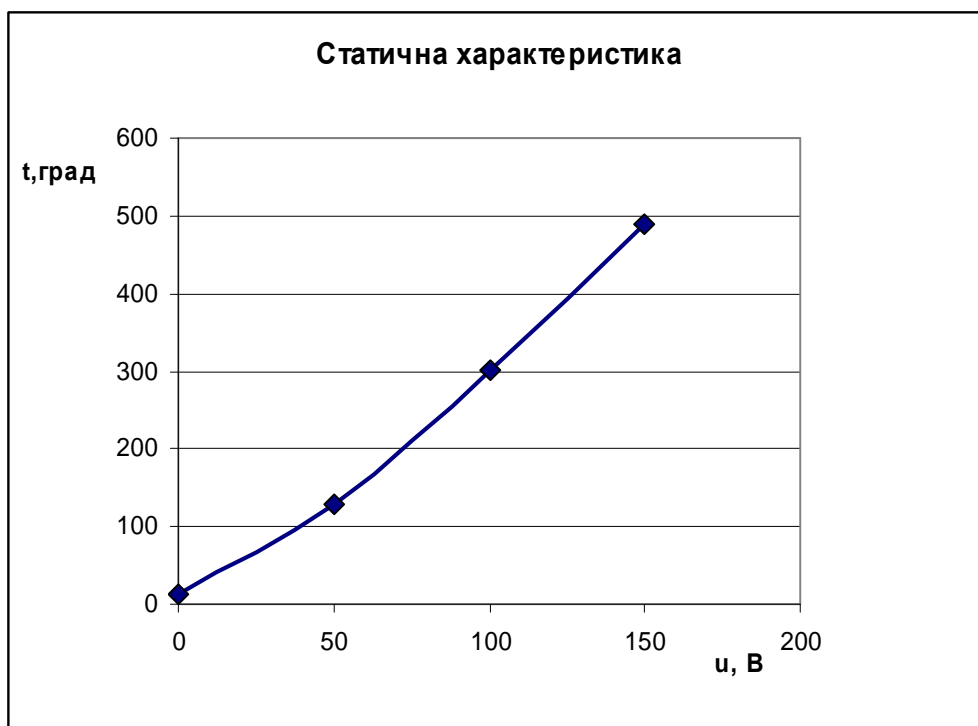


Рис. Д.2 Статична характеристика теплового об'єкту