

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
Тернопільський національний технічний
університет імені Івана Пулюя**

*Кафедра автоматизації
технологічних процесів
та виробництв*



**МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ
до практичних занять
з курсу “Автоматизація виробничих
процесів”**

*для студентів спеціальності
181 «Харчові технології»*

**Тернопіль
2018**

Методичні вказівки до практичних занять з курсу “Автоматизація виробничих процесів” для студентів спеціальності 181 «Харчові технології» / В.Б.Савків, Р.І.Михайлишин. – Тернопіль: ТНТУ, 2018. – 47 с.

Рецензент: д.т.н., професор Стухляк П.Д.

Методичні вказівки розглянуто і схвалено на засіданні кафедри автоматизації технологічних процесів та виробництв (протокол № 1 від 29 серпня 2018 р.).

Схвалено і рекомендовано до друку Вченою Радою факультету прикладних інформаційних технологій та електроінженерії (протокол № 1 від 30 серпня 2018 р.).

Зміст

Вступ	4
Тема №1. Дослідження автоматичної системи на стійкість	6
1.1. Динамічні ланки САК	6
1.2. Передавальна функція САК	9
1.3. З'єднання динамічних ланок	9
1.4. Перетворення структурних схем САК	12
1.5. Аналіз стійкості САК	12
1.6. Приклад розв'язування завдання	15
Тема №2. Вибір автоматичного регулятора й розрахунок оптимальних параметрів його налагодження	26
2.1. Прилади для вимірювання витрати	26
2.2. Прилади контролю складу і стану речовини	31
2.3. Визначення оптимальних параметрів налагодження регуляторів	34
Література	46

Вступ

Сучасний розвиток галузей харчової промисловості направлено на впровадження прогресивних технологій і гнучких виробництв з автоматизацією управління на базі використання швидкодіючих програмованих технічних засобів підвищеної надійності.

Високі темпи розвитку галузей харчової промисловості потребують удосконалення методів контролю та управління технологічними процесами на базі впровадження сучасних засобів автоматизації, що дозволяють оптимізувати технологічні процеси.

Об'єктами управління є технологічні процеси, які відносяться до нерухомих (стаціонарних) об'єктів і умовно можуть бути поділені на такі види:

а) неперервні технологічні процеси, які характеризуються безперервною подачею сировини і вивантаженням готового продукту, для яких властиві тривалі періоди роботи об'єкта в статичному режимі. Такі об'єкти управління в максимальній степені відповідають вимогам до автоматизації технологічних процесів;

б) неперервно-циклічні технологічні процеси, в яких на різних стадіях процесу і в різних апаратах використовуються неперервні та циклічні (періодичні) режими роботи;

в) циклічні (періодичні) процеси, що характеризуються періодичним режимом роботи об'єкта і певною послідовністю виконання операцій.

Технологічний процес з точки зору розробки систем управління є елементарним виробничим підрозділом підприємства і може являти собою ділянку технологічної лінії, відділення або цех.

До технологічного процесу при його автоматизації висуваються такі вимоги: нерозривність технологічної лінії і раціональне розташування обладнання у відповідності з напрямком матеріальних і енергетичних потоків в межах виробничих ділянок. Бажаною є безперервність технологічного процесу і компактність використовуваного обладнання. Обладнання повинне мати високі характеристики надійності в експлуатації і незначну інерційність.

Автоматизація виробничих процесів - це комплекс заходів по розробці нових, прогресивних технологічних процесів і створення на їх основі нових високопродуктивних машин і систем машин, які виконують весь виробничий процес без безпосередньої участі людини. Головний напрямок автоматизації - не тільки звільнення людини від обслуговування машин, які знаходяться на високому технологічному рівні, але і створення високопродуктивних технологічних процесів.

Сьогодні можна з впевненістю стверджувати, що напрямок переобладнання виробництва на основі гнучких автоматизацій всіх його процесів отримав визнання в машинобудуванні. Комплексно автоматизоване машинобудівне виробництво створює умови для одночасного досягнення високої продуктивності і технологічної гнучкості, яка раніше забезпечувалась лише безпосередньою участю людини у виробничому процесі.

Таким чином, автоматизовані виробничі модулі і роботизовані технологічні комплекси спільно з іншими автоматизованими засобами забезпечення функціонування є основними виконавчими структурними одиницями сучасного гнучкого автоматизованого виробництва.

Тема №1. Дослідження автоматичної системи на стійкість

При аналізі динамічних властивостей САК вводять поняття типових ланок як деяких найпростіших частин динамічного елемента.

Різноманітні елементи систем регулювання, які мають різне конструктивне виконання й функціональне призначення, описуються однаковими диференційними рівняннями і, відповідно, мають однакові передавальні функції. Коефіцієнти, які входять до виразу для передавальної функції, безпосередньо пов'язані з конструктивними параметрами елементів систем регулювання.

У зв'язку з тим, що ланки мають різні передавальні функції, вони розрізняються за видом перехідного процесу, який виникає при зміні вхідної величини.

1.1. Динамічні ланки САК

Аперіодична (інерційна) ланка.

$$W(p) = \frac{x_{eux}}{x_{ex}};$$

$$T \frac{dx_{eux}}{dt} + x_{eux} = k \cdot x_{ex};$$

$$\frac{dx}{dt} = p; \quad Tpx_{eux} + x_{eux} = k \cdot x_{ex};$$

$$\frac{d^2}{dt^2} = p^2; \quad x_{eux} \cdot (Tp + 1) = k \cdot x_{ex};$$

$$\frac{x_{eux}}{x_{ex}} = \frac{k}{Tp + 1} = W(p).$$

Приклади пристроїв, які можна розглядати як аперіодичну ланку:

$$U = U_C + U_R;$$

$$U_R = I \cdot R = C \frac{dU_C}{dt} \cdot R = CR \frac{dU_C}{dt};$$

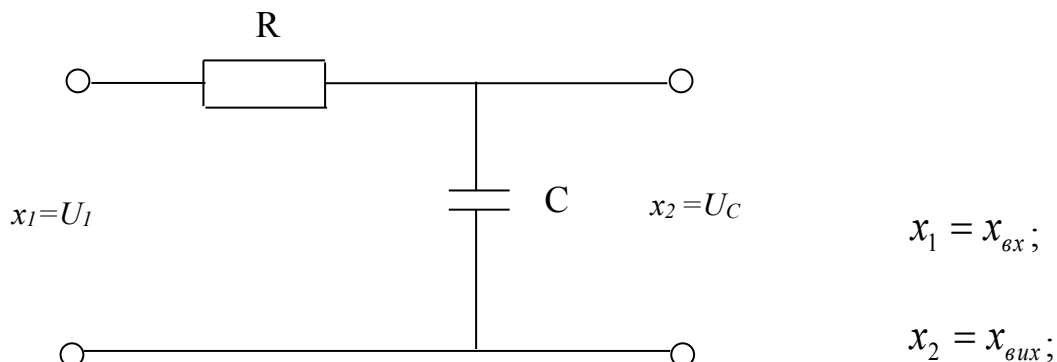


Рис.1. Аперіодична ланка

$$\begin{aligned}
 T &= C \cdot R; \\
 U_c + CR \frac{dU_c}{dt} &= U; \\
 U_c &= x_{\text{вх}}, U = x_{\text{вх}}, K = 1 \\
 x_{\text{вх}} + T \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} &= K \cdot x_{\text{вх}}; \\
 W(p) &= \frac{1}{RCp + 1}.
 \end{aligned}$$

Коливальна ланка:

$$\begin{aligned}
 T_0^2 \frac{d^2 x_{\text{вх}}}{dt^2} + T_1 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + x_{\text{вх}} &= K \cdot x_{\text{вх}}; \\
 T_0 p^2 x_{\text{вх}} + T_1 p x_{\text{вх}} + x_{\text{вх}} &= K \cdot x_{\text{вх}}; \\
 x_{\text{вх}} (T_0 p^2 + T_1 p + 1) &= K \cdot x_{\text{вх}}; \\
 W(p) = \frac{x_{\text{вх}}}{x_{\text{вх}}} &= \frac{K}{T_0 p^2 + T_1 p + 1}.
 \end{aligned}$$

Приклад:

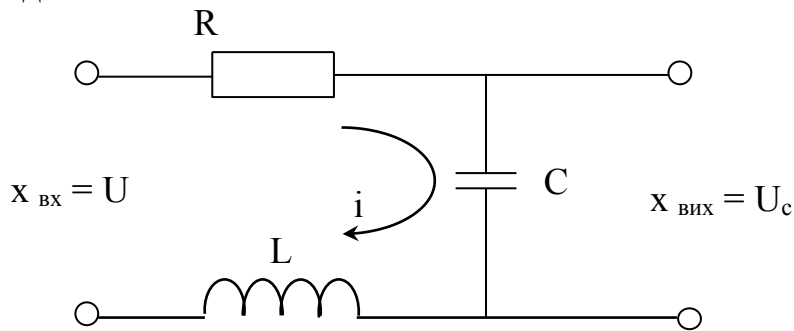


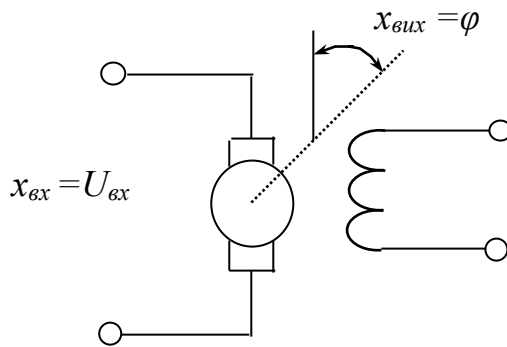
Рис.2. Коливальна ланка

$$\begin{aligned}
 U &= CR \frac{dU_c}{dt} + U_c + LC \frac{d^2 U_c}{dt^2}; \\
 U_{\text{вх}} &= T_1 \frac{dU_{\text{вх}}}{dt} + T_0 \frac{d^2 U_{\text{вх}}}{dt^2} + U_{\text{вх}}.
 \end{aligned}$$

Інтегруюча ланка:

$$\begin{aligned}
 T \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} &= K \cdot x_{\text{вх}}; \\
 T p x_{\text{вх}} &= K \cdot x_{\text{вх}}; \\
 T p \frac{x_{\text{вх}}}{x_{\text{вх}}} &= K; \\
 W(p) &= \frac{K}{Tp}.
 \end{aligned}$$

Прикладом інтегруючої ланки є електродвигун постійного струму, в якому входною величиною є керуюча напруга, а вихідною – кут повороту якоря.



$$\frac{d\varphi}{dt} = U_{vx};$$

$$\frac{x_{vix}}{x_{vx}} = \frac{1}{p};$$

$$\frac{x_{vix}^2}{x_{vx}} = W_2(p).$$

Рис.3. Інтегруюча ланка САК

Підсилювальна ланка:

$$x_{vix} = K \cdot x_{vx};$$

$$p \cdot x_{vix} = x_{vix};$$

$$W(p) = K.$$

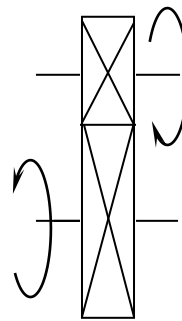


Рис.4. Підсилювальна ланка САК

При дослідженні та розрахунку САК починають з опису фізичних процесів, які в них відбуваються. Зазвичай цей опис має вигляд системи диференціальних рівнянь, які передають зв'язки між змінними величинами та їх похідними. Підхід, коли рівняння описують поведінку досліджуваної системи в цілому, є найбільш загальним у математичному плані та може застосовуватися в усіх випадках. Поряд з цим для великого класу систем автоматичного керування (лінійних систем) застосовують інший спосіб, пов'язаний із використанням операторного методу.

У відповідності до цього способу досліджувану систему розділяють на частини – ланки направленої дії, які мають властивість передавати сигнал тільки в одному напрямі, від входу до виходу. Сукупність цих ланок разом із лініями зв'язку між ними, що характеризують їх взаємодію, утворюють структурну схему системи керування. Виходячи зі структури системи і виду функціональних елементів, які входять до неї, можна поділити систему на ланки направленої дії. Отже, необхідно, щоб для кожної ланки можна було найпростіше визначити передавальну функцію як відношення операторних зображень вихідної величини ланки до входної і з'єднати окремі ланки лініями зв'язку.

1.2. Передавальна функція САК

Передавальна функція кожної ланки напрямленої дії є записаним в операторній формі й розв'язаним відносно зображення вихідної величини диференціальним рівнянням певної ланки. Таким чином, задача складання диференціальних рівнянь САК зводиться до складання рівнянь окремих ланок.

Функція виду $W(p) = \frac{M(p)}{N(p)}$, яка характеризує динамічні властивості

САК, не залежить від керуючого сигналу й повністю визначається параметрами системи. Її називають передавальною функцією.

$$M(p) = x_{\text{вих}}(p), \quad N(p) = x_{\text{вх}}(p).$$

Після того, як складено структурну схему САК й визначено передавальні функції ланок, які входять до неї, необхідно визначити передавальну функцію всієї системи.

Розглянемо розімкнену систему напрямленої дії

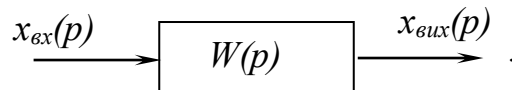


Рис. 5. Структурна схема САК

$$W(p) = \frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)}$$

За визначенням передавальної функції, впливає основна властивість напрямленої системи:

$$x_{\text{вих}}(p) = W(p) \cdot x_{\text{вх}}(p).$$

Операторне зображення вихідної величини дорівнює передавальній функції системи, помноженій на зображення вхідної величини. Розглянемо основні випадки з'єднання ланок напрямленої дії.

1.3. З'єднання динамічних ланок

Послідовне з'єднання

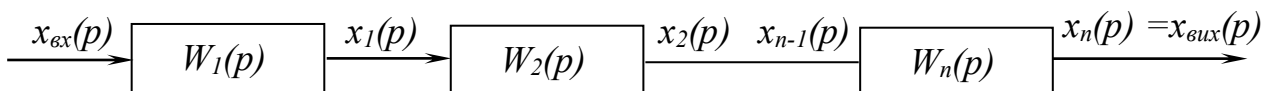


Рис. 6. Послідовне з'єднання ланок

$$x_1(p) = W_1(p) \cdot x_{\text{вх}}(p);$$

$$x_2(p) = W_2(p) \cdot x_1(p);$$

$$x_n(p) = W_n(p) \cdot x_{n-1}(p).$$

Скорочуючи всі проміжні величини та підставляючи попередні в рівняння передавальної функції, отримаємо:

$$x_{\text{вих}}(p) = W_n(p) \cdot x_{n-1}(p) = W_n(p) \cdot W_{n-1}(p) \cdot x_{n-2}(p) = W_n(p) \cdot W_{n-1}(p) \cdot W_2(p) \cdot W_1(p) \cdot x_{\text{вх}}(p).$$

$$\frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)}$$

Враховуючи, що відношення $\frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)}$ за означенням є передавальною функцією всієї системи $W(p)$, матимемо:

$$\frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = W(p) = \prod_{i=1}^n W_i(p).$$

Паралельне узгоджене з'єднання

Паралельним узгодженим з'єднанням ланки направленої дії вважають таке, при якому вхідна величина системи подається паралельно на входи всіх ланок, а їх вихідні величини алгебраїчно підсумовуються на виході системи.

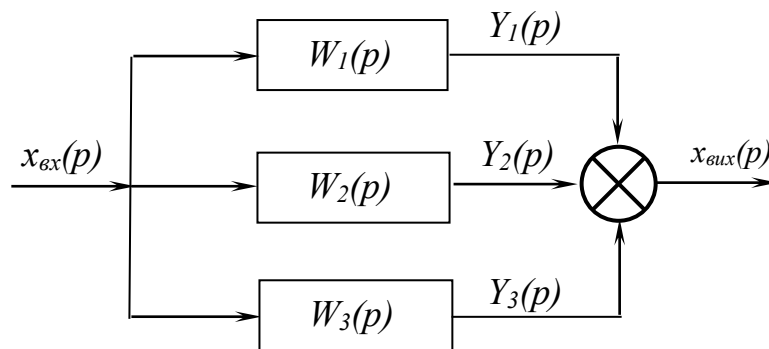


Рис. 7. Паралельне узгоджене з'єднання ланок

$$Y_1(p) = W_1(p) x_{\text{вх}}(p);$$

$$Y_2(p) = W_2(p) x_{\text{вх}}(p);$$

$$Y_n(p) = W_n(p) x_{\text{вх}}(p).$$

Підсумовуючи написані рівності й беручи до уваги, що за означенням паралельного з'єднання ланок направленої дії сума лівих частин є вихідною величиною системи, отримаємо:

$$x_{\text{вих}}(p) = Y_1(p) + Y_2(p) + \dots + Y_n(p) = [W_1(p) + \dots + W_n(p)] \cdot x_{\text{вх}}(p).$$

Згідно з означенням передавальної функції, отримаємо:

$$\frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = W(p) = \sum_{i=1}^n W_i(p).$$

Таким чином, передавальна функція паралельних узгоджень увімкнених ланок направленої дії дорівнює алгебраїчній сумі передавальних функцій окремих ланок.

Паралельне зустрічне з'єднання

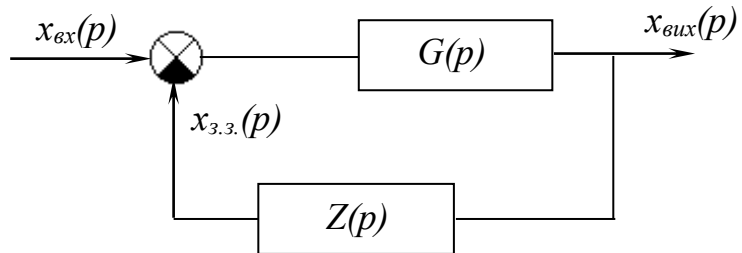


Рис.8. Паралельне зустрічне з'єднання

де $G(p)$, $Z(p)$ – передавальні функції прямого кола системи і кола зворотного зв'язку.

Сигнал зворотного зв'язку $x_{3.3.}(p)$ віднімається від вхідного сигналу $x_{\text{вх}}(p)$ (у випадку додатного зворотного зв'язку додається).

Передавальні функції $G(p)$ і $Z(p)$ можуть відповідати як простим ланкам напрямленої дії, так і їх будь-яким комбінаціям:

$$x_{\text{вих}}(p) = G(p) \cdot [x_{\text{вх}}(p) - x_{3.3.}(p)];$$

$$x_{3.3.}(p) = Z(p) \cdot x_{\text{вих}}(p).$$

Виключивши проміжну величину $x_{3.3.}(p)$, отримаємо передавальну функцію замкненої системи:

$$\frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \Phi(p) = \frac{G(p)}{1 + W(p)},$$

де $W(p) = G(p) \cdot Z(p)$ – передавальна функція розімкненої системи.

$$x_{\text{вих}}(p) = G(p) \cdot [x_{\text{вх}}(p) - x_{3.3.}(p)];$$

$$x_{3.3.}(p) = Z(p) \cdot x_{\text{вих}}(p);$$

$$x_{\text{вих}}(p) = G(p) \cdot [x_{\text{вх}}(p) - Z(p) \cdot x_{\text{вих}}(p)];$$

$$x_{\text{вих}}(p) = G(p) \cdot x_{\text{вх}}(p) - G(p) \cdot Z(p) \cdot x_{\text{вих}}(p);$$

$$x_{\text{вих}}(p) \cdot (1 + G(p) \cdot Z(p)) = G(p) \cdot x_{\text{вх}}(p);$$

$$\frac{x_{\text{вих}}(p)}{x_{\text{вх}}(p)} = \frac{G(p)}{1 + G(p) \cdot Z(p)}.$$

1.4. Перетворення структурних схем САК

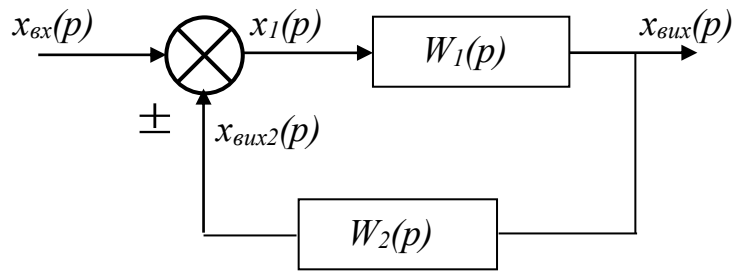


Рис. 9. Місцевий зворотний зв'язок

$$x_{вих}(p) = W_1(p) \cdot x_1 = W_1(p) \cdot (x_{вх} + x_{вих2}) = W_1(p) \cdot [x_{вх} \pm W_2(p) \cdot x_{вих}] = W_1(p) \cdot x_{вх} \pm W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot x_{вих};$$

$$x_{вих} = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p) \cdot W_2(p)} \cdot x_{вх}; \quad Wp = \frac{W_1(p)}{1 \mp W_1(p) \cdot W_2(p)}.$$

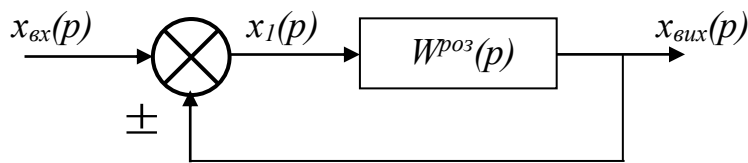


Рис.10. САК із головним зворотним зв'язком

$$x_{вих} = W(p)^{pоз} \cdot x_1 = W(p)^{pоз} \cdot (x_{вх} \pm x_{вих});$$

$$x_{вих} = W(p)^{pоз} \cdot x_{вх} \pm W(p)^{pоз} \cdot x_{вих};$$

$$x_{вих} \mp W(p)^{pоз} \cdot x_{вих} = W(p)^{pоз} \cdot x_{вх};$$

$$x_{вих} \cdot (1 \mp W(p)^{pоз}) = W(p)^{pоз} \cdot x_{вх};$$

$$W(p)^{зам} = \frac{x_{вих}}{x_{вх}} = \frac{W(p)^p}{1 \mp Wp^{pоз}} = \frac{M(p)}{N(p)},$$

де $N(p) = 0$ – характеристичне рівняння, яке визначається знаменником передавальної функції замкненої системи.

1.5. Аналіз стійкості САК

Для того, щоб система автоматичного керування могла нормально функціонувати, вона повинна задовольняти умову стійкості.

Система є стійкою, якщо вона повертається до усталеного стану після припинення дії збурення, яке вивело її з нього.

Загальний розв'язок $x(t)$ диференційного рівняння лінійної системи регулювання можна зобразити у вигляді суми двох функцій часу

$$x(t) = x_s(t) + x_d(t),$$

з яких $x_s(t)$ характеризує так званий вимушений рух системи і залежить від зовнішньої дії, а $x_d(t)$ – динаміку системи при необмеженому зростанні часу з моменту початку перехідного процесу, тобто

$$\lim_{t \rightarrow \infty} x_d(t) = 0.$$

Функція $x_d(t)$, яка є загальним розв'язком відповідного диференційного рівняння для лінійної системи n -го порядку має вигляд:

$$x_d(t) = C_1 e^{\lambda_1 t} + C_2 e^{\lambda_2 t} + \dots + C_n e^{\lambda_n t},$$

де $C_1, \dots, C_n$ – сталі інтегрування, λ_1, λ_n – нерівні корені характеристичного рівняння системи регулювання. З виразу бачимо, при $t \rightarrow \infty$, $x_d(t)$ прямуватиме до нуля тільки в тому випадку, коли всі n коренів характеристичного рівняння мають від'ємні дійсні частини. Отже, для висновку про стійкість системи регулювання немає потреби визначати значення коренів характеристичного рівняння, яке пов'язане з трудомісткістю обчислень. У ньому досить мати ознаки відсутності коренів із невід'ємною дійсною частиною. Такі ознаки називають критеріями стійкості.

Вибравши свій варіант і виписавши вихідні дані, необхідно визначити перехідні функції заданих ланок за їх диференціальним рівнянням. Наприклад, згідно із заданим диференціальним рівнянням маємо передавальні функції:

$$W_1(p) = k_1; \quad W_2(p) = \frac{k_2}{T_1 p}; \quad W_3(p) = \frac{k_3 T_1 p}{T_2 p + 1}; \quad W_4(p) = \frac{k(T_1 p + 1)}{T_2 p + 1}; \quad W_5(p) = k_{36.36}.$$

Розміщуючи ланки за їх порядковим номером, складають структурну алгоритмічну схему САК, вписавши у відповідний прямокутник раніше обчислені значення передавальних функцій заданих ланок.

Для того, щоб провести аналіз САК на стійкість за критерієм Найквіста, необхідно знати передавальну функцію розімкненої системи. Вона при послідовному з'єднанні ланок дорівнює добутку передавальних функцій окремих ланок.

Одна чи кілька ланок заданої САК охоплені місцевим зворотним зв'язком. Тому спочатку необхідно знайти загальну передавальну функцію ділянки, охопленої місцевим зворотним зв'язком. Якщо ланка із передавальною функцією $W_1(p)$ охоплена ланкою (зворотним зв'язком) з передаточною функцією $W_{36.36}(p)$, то загальна передавальна функція такого з'єднання визначається формулою

$$W_{заг}(p) = \frac{W_1(p)}{1 \pm W_1(p) \cdot W_{36.36}(p)}.$$

Знак “-” у знаменнику цього виразу беруть тоді, коли ланка $W_1(p)$ охоплена додатним зворотним зв'язком, знак “+” – від'ємним. Наприклад, якщо

ланки III і IV охоплені додатним зворотним зв'язком із передавальною функцією $W_5(p)$ (рис. 11), то передавальну функцію цієї ділянки визначаємо виразом

$$W_{345}(p) = \frac{W_3(p) \cdot W_4(p)}{1 - W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p)}.$$

Результуючу передавальну функцію розімкненої САК для даного прикладу визначаємо виразом

$$W_{pez}(p) = \frac{W_1(p) \cdot W_2(p) \cdot W_3(p) \cdot W_4(p)}{1 - W_3(p) \cdot W_4(p) \cdot W_5(p)}.$$

Якщо дана САК є системою з одиничним зворотним зв'язком (від'ємний головний зворотний зв'язок, $K_{z33} = -1$), то передавальну функцію замкненої системи можна знайти за передавальною функцією розімкненої системи згідно з виразом

$$W_3(p) = \frac{W_{pez}(p)}{1 + W_{pez}(p)}.$$

Характеристичне рівняння САК визначаємо знаменником виразу передавальної функції замкненої системи, тобто за формулою

$$W_{pez}(p) + 1 = 0.$$

Розв'язок завдання варто розпочинати лише після вивчення загальних властивостей, принципів дії, динаміки й математичного описування автоматичних систем, а також критеріїв дослідження стійкості лінійних САК.

Визначаючи стійкість САК за одним із критеріїв стійкості, варто дати повне його визначення, навести конкретний і детальний хід розв'язування з представленням відповідних малюнків: структурної схеми САК і графіків, які відображають критерій Михайлова або Найквіста. Графіки слід будувати в масштабі.

При розрахунках координатних точок графіків потрібно детально пояснити хід розрахунку хоча б для однієї точки. Результати слід записати в таблицю, складену довільно, але так, щоб у ній були всі залежні співвідношення між змінними й аргументом. Кількість розраховуваних точок годографа (його координат) має бути такою, щоб за його характером було чітко видно, стійка чи нестійка досліджувана САК.

При визначенні координат точок годографа рекомендується вибирати такі точки:

- а) при $\omega \rightarrow 0$;
- б) при $\omega \rightarrow \infty$;
- в) при $\omega = 1$;

г) коли уявна координата точки комплексного числа дорівнює нулю ($I(\omega) = 0$ чи $Y(\omega) = 0$), знайти значення ω , а за ними визначити величину дійсної частини комплексного числа $R(\omega)$ чи $X(\omega)$, або точки перетину годографом осі абсцис;

д) коли дійсна координата точки комплексного числа дорівнює нулю ($R(\omega) = 0$ чи $X(\omega) = 0$), знайти значення ω , а за ним визначити величину уявної частини комплексного числа $I(\omega)$ чи $Y(\omega)$, тобто точки перетину годографом осі ординат;

е) визначити дві-три точки за вибором (залежно від раніше знайдених точок). При цьому рекомендується брати значення частоти ω , кратної 10 (для полегшення розрахунку), тобто $\omega=10; 10^2; 10^3$ або $\omega=0,1; 0,01; \dots$;

є) знайти екстремуми за відомими принципами аналізу в математиці.

Зазвичай запропонована кількість точок дає можливість для побудови годографа, на основі якого можна оцінити стійкість системи за вибраним частотним критерієм. Може бути прийнято інший план розв'язування.

Завершувати розв'язування задач потрібно загальними висновками про стійкість системи, обґрунтовуючи отримані результати за обома критеріями стійкості.

1.6. Приклад розв'язування завдання

Задана САР, структурна схема якої складається з чотирьох ланок: I – інтегруючої, II – коливальної (інерційної 2-го порядку), III – інтегрально-диференціюючої і IV – аперіодичної (інерційної 1-го порядку). Нехай за умовою завдання III і IV – ланки, охоплені жорстким зворотним зв'язком із передаточним коефіцієнтом $K_{\text{зз}}=1$ (рис. 11). Враховуючи, що для кожної ланки коефіцієнт k і постійна часу T мають різні значення, кожному з цих параметрів доцільно присвоїти окремий порядковий індекс.

I ланка – інтегруюча:

$$T \frac{dx_{\text{eux}}}{dt} = kx_{\text{ex}}, \text{ де } k=6 \text{ і } T=1,0 \text{ с.}$$

Передавальна функція цієї ланки:

$$W_1(p) = \frac{x_{1\text{eux}}(p)}{x_{1\text{ex}}(p)} = \frac{k_1}{T_1 p}.$$

II ланка – коливальна:

$$T_0^2 \frac{d^2 x_{\text{eux}}}{dt^2} + T_1 \frac{dx_{\text{eux}}}{dt} + x_{\text{eux}} = kx_{\text{ex}}; \text{ де } k=4, T_0=2\text{с}, T_1=3\text{с}.$$

Передавальна функція II ланки:

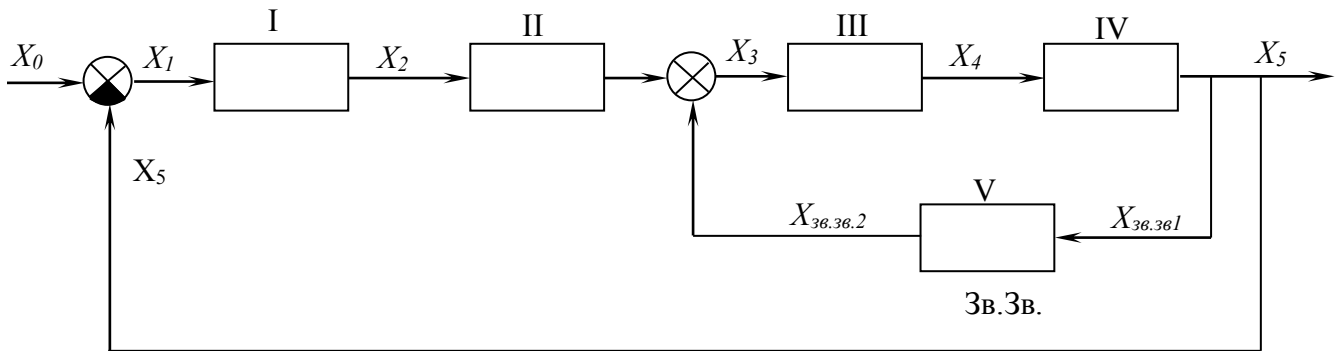


Рис. 11. Структурна схема САР

$$W_2(p) = \frac{x_{2_{\text{вих}}}(p)}{x_{2_{\text{вх}}}(p)} = \frac{k_2}{T_2^2 p^2 + T_3 p + 1}.$$

III ланка – інтегрально-диференціююча:

$$T_2 \frac{dx_{\text{вих}}}{dt} + x_{\text{вих}} = k T_1 \frac{dx_{\text{вх}}}{dt} + k x_{\text{вх}}, \text{ де } k=4, T_1=0,25\text{с}, T_2=2\text{с}.$$

Передавальна функція III ланки:

$$W_3(p) = \frac{x_{3_{\text{вих}}}(p)}{x_{3_{\text{вх}}}(p)} = \frac{k_3(T_5 p + 1)}{T_4 p + 1}.$$

IV ланка – періодична:

$$T \frac{dx_{\text{вих}}}{dt} + x_{\text{вих}} = k x_{\text{вх}}, \text{ де } k=2, T=0,5\text{с}.$$

Передавальна функція IV ланки:

$$W_4(p) = \frac{x_{4_{\text{вих}}}(p)}{x_{4_{\text{вх}}}(p)} = \frac{k_4}{T_6 p + 1}.$$

Для зворотного зв'язку:

$$W_5(p) = \frac{x_{0_{\text{вих}}}(p)}{x_{0_{\text{вх}}}(p)} = -k_{36.36}.$$

Тепер складемо структурну алгоритмічну схему системи автоматичного регулювання, зображену на рис. 12.

Розіркнемо САР по ланці дії від виходу ланки IV до входу ланки I і складемо результуючу передавальну функцію для цієї системи:

$$W_{\text{рез}}(p) = W_1(p)W_2(p) \frac{W_3(p)W_4(p)}{1 + W_3(p)W_4(p)W_5(p)}.$$

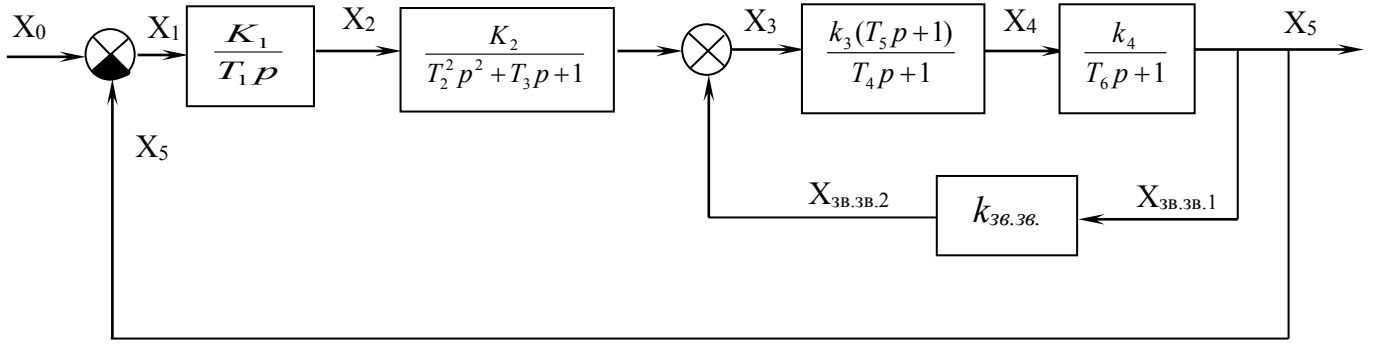


Рис. 12. Структурна алгоритмічна схема САР

Підставимо значення передавальних функцій ланок і зведемо чисельник і знаменник $W_{рез}(p)$ до сум, складові яких розміщуються по степенях p .

$$W_{рез}(p) = \frac{k_1 k_2 k_3 k_4 (T_5 p + 1)}{T_1 p (T_2^2 p^2 + T_3 p + 1) [(T_4 p + 1)(T_6 p + 1) + k_3 k_4 (T_5 p + 1)]} = \frac{A + Bp}{a_0 p^6 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p},$$

де

$$A = k_1 k_2 k_3 k_4 = 6 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 = 192;$$

$$B = k_1 k_2 k_3 k_4 T_5 = 6 \cdot 4 \cdot 4 \cdot 2 \cdot 2 = 384;$$

$$a_0 = T_1 T_2^2 T_4 T_6 = 1 \cdot 2^2 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} = 0,5;$$

$$a_1 = T_1 T_2^2 T_4 + T_1 T_2^2 T_6 + k_3 k_1 T_2^2 T_5 + T_1 T_3 T_4 T_6 = 1 \cdot 2^2 \cdot \frac{1}{4} + 1 \cdot 2^2 \cdot \frac{1}{2} + 4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2^2 \cdot 2 + 1 \cdot 3 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} = 67,4;$$

$$a_2 = T_1 T_2^2 + k_3 k_4 T_1 T_2^2 + T_1 T_3 T_4 + T_1 T_3 T_6 + k_3 k_4 T_1 T_3 T_5 + T_1 T_4 T_6 = 1 \cdot 2^2 + 4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 3 \cdot \frac{1}{4} + 1 \cdot 3 \cdot \frac{1}{2} + 4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3 \cdot 2 + 1 \cdot \frac{1}{4} \cdot \frac{1}{2} = 86,4;$$

$$a_3 = T_1 T_3 + k_3 k_4 T_1 T_3 + T_1 T_4 + T_1 T_6 + k_3 k_4 T_1 T_5 = 1 \cdot 3 + 4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 3 + 1 \cdot \frac{1}{4} + 1 \cdot \frac{1}{2} + 4 \cdot 2 \cdot 1 \cdot 1 \cdot 2 = 43,8;$$

$$a_4 = T_1 + k_3 k_4 T_1 = 1 + 4 \cdot 2 \cdot 1 = 9.$$

Таким чином, результуюча передавальна функція розімкненої автоматичної системи відповідатиме такому виразу:

$$W_{рез}(p) = \frac{192 + 384p}{0,5p^5 + 67,4p^4 + 86,4p^3 + 43,8p^2 + 9p}.$$

Характеристичне рівняння замкненої САР отримаємо відповідно до виразу

$$W_{рез}(p) + 1 = 0$$

або

$$\frac{192 + 384p}{0,5p^5 + 67,4p^4 + 86,4p^3 + 43,8p^2 + 9p} + 1 = 0.$$

Тоді остаточно знаходимо характеристичне рівняння:

$$0,5p^5 + 67,4p^4 + 86,4p^3 + 43,8p^2 + 393p + 192 = 0.$$

Маючи характеристичне рівняння замкненої САР і передавальну функцію розімкненої системи, можна застосовувати різні критерії для визначення стійкості системи.

Застосування критерію Гурвіца

Для того, щоб система з характеристичним рівнянням $a_0p^n + a_1p^{n-1} + \dots + a_{n-1}p + a_n = 0$ була стійкою, необхідно і достатньо, щоб при $a > 0$ всі визначники Гурвіца, складені з коефіцієнтів характеристичного рівняння замкненої системи, були додатними: $\Delta_1 > 0$; $\Delta_2 > 0$; $\Delta_{n-1} > 0$; $\Delta_n > 0$.

Для обчислення визначників Гурвіца необхідно скласти квадратну матрицю (таблицю) коефіцієнтів, що містить n стовпців і n рядків.

Ця матриця складається з коефіцієнтів характеристичного рівняння так: по головній діагоналі (від лівого верхнього кута до правого нижнього) розташовують всі коефіцієнти характеристичного рівняння, починаючи з другого (від a_1 до a_n). Потім матрицю заповнюють за стовпцями: вище діагональних коефіцієнтів записують коефіцієнти зі зростаючими індексами, нижче – зі спадаючими

$$\Delta_n = \begin{bmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & \dots & 0 & 0 \\ a_0 & a_2 & a_4 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_1 & a_3 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & a_0 & a_2 & \dots & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-1} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \dots & a_{n-2} & a_n \end{bmatrix}.$$

При досягненні нульового чи n -го індексу ставлять нулі. В побудованій таким чином матриці стрічки з парними й непарними індексами чергуються.

Кожен діагональний визначник отримують від попереднього, викреслюючи нижню стрічку й правий стовпець. Визначник Δ_{n-1} отримують із матриці Гурвіца за загальним правилом, тобто шляхом викреслювання з Δ_n нижньої стрічки і правого стовпця. Визначник нижчого порядку Гурвіца $\Delta_1 = a_1$. Визначник вищого порядку Δ_n містить у собі всю матрицю. За матрицею Гурвіца знаходять діагональні визначники:

$$\Delta_1 = a_1;$$

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 \\ a_0 & a_2 \end{vmatrix} = a_1 a_2 - a_0 a_3;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 \\ a_0 & a_2 & a_4 \\ 0 & a_1 & a_3 \end{vmatrix} = a_1 a_2 a_3 + a_0 a_1 a_5 - a_1^2 a_4 - a_3^2 a_1;$$

$$\Delta_4 = \begin{vmatrix} a_1 & a_3 & a_5 & a_7 \\ a_0 & a_2 & a_4 & a_6 \\ 0 & a_1 & a_3 & a_5 \\ 0 & a_0 & a_2 & a_4 \end{vmatrix} = a_1 a_3 (a_2 a_4 - a_0 a_6) + a_1 a_2 (a_1 a_6 - a_2 a_3) - a_0 a_3 (a_3 a_4 - a_2 a_1) -$$

$$- a_0 a_4 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - (a_0 a_5 - a_1 a_4)^2, \text{ і т.д.}$$

Останній визначник Гурвіца виражається через передостанній так:

$$\Delta_n = a_n \Delta_{n-1} > 0.$$

Проте в стійкій системі передостанній визначник також повинен бути додатним. Тому умова додатного значення останнього визначника зводиться до умови $a_n > 0$, тобто до додатного значення вільного члена характеристичного рівняння.

Таким чином, умова стійкості Гурвіца полягає у тому, що при додатному значенні першого коефіцієнта $a_0 > 0$ усі знайдені даним методом визначники повинні бути додатними. Якщо хоча б один із них буде від'ємним, система буде нестійкою.

Для визначення стійкості САР можна використовувати наслідок критерію Гурвіца у формі критерію Ляпунова-Шипара. Він полягає у тому, що для стійкості системи необхідно і достатньо, щоб були додатними всі коефіцієнти і визначники матриці Гурвіца з парними або непарними індексами. Запишемо умову стійкості Ляпунова-Шипара для характеристичних рівнянь першого–шостого порядків.

1. Для системи першого порядку $a_0 p + a_1 = 0$, умова стійкості $a_0 > 0$; $a_1 > 0$.

2. Для системи другого порядку $a_0 p^2 + a_1 p + a_2 = 0$, умова стійкості $a_0 > 0$, $\Delta_1 = a_1 > 0$, $a_2 > 0$. Для рівняння другого порядку (як і для рівняння першого порядку) необхідною і достатньою умовою стійкості є додатність усіх коефіцієнтів характеристичного рівняння.

3. Для системи третього порядку $a_0 p^3 + a_1 p^2 + a_2 p + a_3 = 0$, умова стійкості $a_0 > 0$; $a_1 > 0$, $a_2 > 0$, $a_3 > 0$; $\Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0$.

4. Для системи четвертого порядку $a_0 p^4 + a_1 p^3 + a_2 p^2 + a_3 p + a_4 = 0$, умова стійкості $a_0 > 0$, $a_1 > 0$, $a_2 > 0$, $a_3 > 0$, $a_4 > 0$, $\Delta_3 = a_3 (a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1^2 a_4 > 0$.

5. Для системи п'ятого порядку $a_0 p^5 + a_1 p^4 + a_2 p^3 + a_3 p^2 + a_4 p + a_5 = 0$, умова стійкості $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0, a_5 > 0, \Delta_2 = a_1 a_2 - a_0 a_3 > 0, \Delta_3 = a_3(a_1 a_2 - a_0 a_3)(a_3 a_4 - a_2 a_5) - (a_1 a_4 - a_0 a_5)^2 > 0$.

6. Для системи шостого порядку $a_0 p^6 + a_1 p^5 + a_2 p^4 + a_3 p^3 + a_4 p^2 + a_5 p + a_6 = 0$, умова стійкості $a_0 > 0, a_1 > 0, a_2 > 0, a_3 > 0, a_4 > 0, a_5 > 0, a_6 > 0, \Delta_3 = a_3(a_1 a_2 - a_0 a_3) - a_1(a_1 a_4 - a_0 a_5) > 0, \Delta_5 = (a_1 a_2 - a_0 a_3)[a_5(a_3 a_4 - a_2 a_5) + a_6(2a_1 a_5 - a_3^2)] + (a_1 a_4 - a_0 a_5)[a_1 a_2 a_6 - a_5(a_1 a_4 - a_0 a_5)] - a_1^3 a_6^2 > 0$.

Для САР, яка має характеристичне рівняння,

$$0,5p^5 + 67,4p^4 + 86,4p^3 + 43,8p^2 + 393p + 192 = 0.$$

Матриця Гурвіца має вигляд:

$$\Delta_5 = \begin{vmatrix} 67,4 & 43,8 & 192 & 0 & 0 \\ 0,5 & 86,4 & 393 & 0 & 0 \\ 0 & 67,4 & 43,8 & 192 & 0 \\ 0 & 0,5 & 86,4 & 393 & 0 \\ 0 & 0 & 67,4 & 43,8 & 192 \end{vmatrix}.$$

Випишемо й визначимо діагональні визначники $\Delta_1, 67,4 > 0$;

$$\Delta_2 = \begin{vmatrix} 67,4 & 43,8 \\ 0,5 & 86,4 \end{vmatrix} = 67,4 \cdot 86,4 - 0,5 \cdot 43,8 = 5806 > 0;$$

$$\Delta_3 = \begin{vmatrix} 67,4 & 43,8 & 192 \\ 0,5 & 86,4 & 393 \\ 0 & 67,4 & 43,8 \end{vmatrix} = 67,4 \cdot 86,4 \cdot 43,8 + 0,5 \cdot 67,4 \cdot 192 - 67,4^2 \cdot 393 - 0,5 \cdot 43,8^2 = -1 \cdot 518 \cdot 460 < 0.$$

Висновок: у зв'язку з тим, що визначник Δ_3 від'ємний, то немає необхідності продовжувати подальші обчислення. САР, яку ми розглядали згідно з критерієм Гурвіца, – нестійка.

Застосування критерію Михайлова

Частотний критерій стійкості Михайлова дозволяє оцінити стійкість САР за виглядом годографа Михайлова (годографа характеристичного вектора), зображеного на комплексній площині, використовуючи характеристичне рівняння системи.

Лінійна система n-го порядку стійка, якщо при зміні частоти ω від 0 до ∞ годограф Михайлова послідовно обходить n квадратів комплексної площини проти годинникової стрілки, починаючись у точці додатної півосі й ніде не проходячи через початок координат.

Послідовність аналізу стійкості САР за критерієм Михайлова:

1. Визначення характеристичного рівняння за диференціальним рівнянням чи передавальними функціями системи.
2. Складання многочлена Михайлова. Для цього в характеристичному рівнянні оператор p замінюється на $(j\omega)$.
3. Поділ многочлена Михайлова на дійсну й уявну частини. Для цього необхідно $(j\omega)$ піднести до відповідного степеня й провести групування дійсних і уявних членів рівняння.
4. Отримання координатних точок годографа Михайлова для різних значень частоти (ω даються значення від 0 до ∞).
5. Побудова годографа Михайлова, за видом якого встановлюють стійкість аналізованої системи.

В даному прикладі САР має характеристичне рівняння п'ятого порядку

$$0,5p^5 + 67,4p^4 + 86,4p^3 + 43,8p^2 + 393p + 192 = 0.$$

Підставляємо в це рівняння замість оператора p комплексну величину $(j\omega)$ й отримуємо многочлен Михайлова

$$M(j\omega) = 0,5(j\omega)^5 + 67,4(j\omega)^4 + 86,4(j\omega)^3 + 43,8(j\omega)^2 + 393(j\omega) + 192$$

або

$$M(j\omega) = 67,4\omega^4 - 43,8\omega^2 + 192 + j(0,5\omega^5 - 86,4\omega^3 + 393\omega) = X(\omega) + jY(\omega),$$

так як $j = \sqrt{-1}$, $j^2 = -1$, $j^3 = -j$, $j^4 = +1$, $j^5 = j$.

Присвоюючи різні значення частоті ω , шукаємо координати $X(\omega)$ та $Y(\omega)$ точок годографа Михайлова. Знаходимо значення ω , при яких годограф пересікає вісь абсцис, при цьому допускаючи, що $Y(\omega) = 0$,

$$Y(\omega) = 0,5\omega^5 - 86,4\omega^3 + 393\omega = 0.$$

Розв'язок цього рівняння дає корені $\omega_1 = 0$; $\omega_2 = 2,17$; $\omega_3 = 13,0$.

Підставляючи знайдені значення ω в $X(\omega)$, визначаємо відповідні координати. Знаходимо, при яких значеннях годограф має екстремуми. Для цього прирівнюємо до нуля першу похідну від $Y(\omega)$:

$$Y'(\omega) = 0,5 \cdot 5\omega^4 - 86,4 \cdot 3\omega^2 + 393 = 0.$$

Розв'язок цього рівняння дає додатні корені: $\omega_1 = 1,26$ та $\omega_2 = 10,2$.

Таблиця 1. Координати точок годографа Михайлова

ω	0	1	1,26	2,17	3,2	10,2	13	∞
$X(\omega)$	192	215,6	294	1466	6816	$7,24 \cdot 10^5$	$1,93 \cdot 10^6$	∞
$Y(\omega)$	0	307	323	0	-1410	$-3,25 \cdot 10^4$	0	∞

Підставляючи знайдені значення ω у вирази $X(\omega)$ та $Y(\omega)$, визначаємо відповідні координати. Дані розрахунків наведено в таблиці 1. На рис.13 зображено годограф Михайлова аналізованої САР.

Висновок: годограф Михайлова не обходить послідовно 5 квадрантів комплексної площини в додатному напрямі. САР, яку ми розглядали – нестійка.

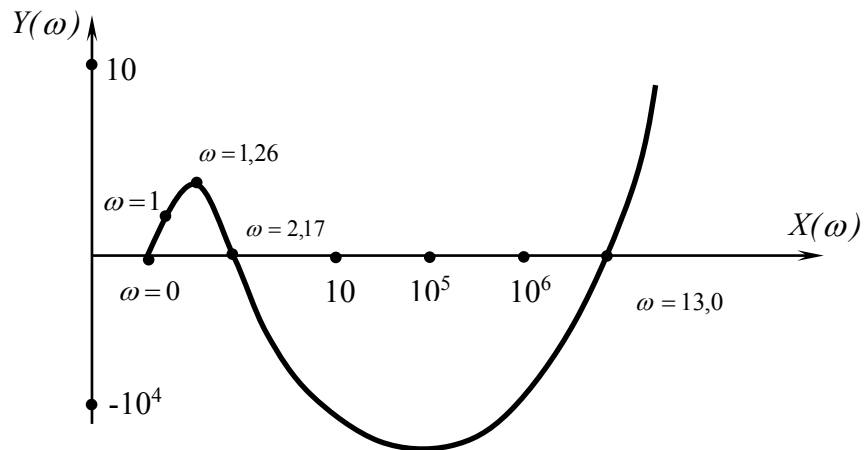


Рис. 13. Годограф Михайлова аналізованої САР

Застосування критерію Найквіста

Частотний критерій стійкості Найквіста дозволяє оцінити стійкість замкненої системи за виглядом амплітудно-фазової частотної характеристики (АФХ) розімкненої системи.

Важливо зауважити, що формулювання критерію Найквіста залежить від властивостей розімкнених систем – стійкі вони чи ні. Якщо система складається тільки зі стійких ланок, то вона буде стійкою і в розімкненому стані. За наявності хоча б одного нестійкого елемента вона буде нестійкою. За наявності однієї інтегруючої ланки розімкнена система знаходиться на межі стійкості.

Якщо розімкнена система стійка або знаходиться на межі стійкості, то для того, щоб замкнена система була стійкою, необхідно і достатньо, аби АФХ розімкненої системи при зміні частоти ω від 0 до ∞ не охоплювала точку з координатами $[-1; -j0]$.

Нестійка розімкнена система з характеристичним рівнянням, що має k коренів у правій півплощині, буде стійкою в замкненому стані, якщо АФХ розімкненої системи, що описується вектором $1+W(j\omega)$, при зміні частоти ω від 0 до $+\infty$ охоплює точку з координатами $[-1; -j0]$ в додатному напрямку $k/2$ разів.

Послідовність дослідження САР за критерієм Найквіста:

1. У формулі результуючої передавальної функції розімкненої системи $W_{рез}(p)$ замінюють оператор p на $(j\omega)$.

2. У частотній передавальній функції $W_{\text{рез}}(p)$ підносять $(j\omega)$ до відповідного степеня і розділяють на дійсну та уявну частини $W_{\text{рез}}(p) = R(\omega) + jI(\omega)$.
3. Задаючись різними значеннями частоти ω (від 0 до ∞), отримують координати АФХ розімкненої системи.
4. За отриманими координатами будують АФХ і за її виглядом роблять висновок про стійкість системи.

Розглянемо основні властивості АФХ розімкненої системи. Якщо вона не має інтегруючих ланок, то при $\omega=0$ її АФХ починається на осі в точці $R(\omega)=K$, де K – передавальний коефіцієнт розімкненої системи. Закінчується АФХ при $\omega=\infty$ на початку координат.

Якщо розімкнена система має інтегруючу ланку, то її АФХ починається при $\omega=0$ в нескінченності на від'ємній уявній півосі й закінчується на початку координат.

Критерій Найквіста дозволяє легко оцінити стійкість САР, що містить ланки з чистим запізненням. Уплив запізнюючої ланки спостерігається тільки за рахунок впливу додаткового фазового зсуву, який призводить до «закручування» АФХ за годинниковою стрілкою.

В нашому прикладі, підставляючи в рівняння результуючої передавальної функції розімкненої САР замість p значення $(j\omega)$, знаходимо комплексний передавальний коефіцієнт системи:

$$W(j\omega) = \frac{A + jB\omega}{a_0(j\omega)^5 + a_1(j\omega)^4 + a_2(j\omega)^3 + a_3(j\omega)^2 + ja_4\omega} = \frac{A + jB\omega}{ja_0\omega^5 + a_1\omega^4 - ja_2\omega^3 + ja_4\omega}$$

так як $j = \sqrt{-1}$, $j^2 = -1$, $j^3 = -j$, $j^4 = +1$, $j^5 = j$.

Чисельник і знаменник записуємо у вигляді комплексних чисел із дійсною та уявною частинами:

$$W(j\omega) = \frac{A + jB\omega}{a_1\omega^4 - a_3\omega^2 + j(a_0\omega^5 - a_2\omega^3 + a_4\omega)} = \frac{A + jB'}{C + jD'}$$

де $B' = B\omega$, $C = (a_1\omega^4 - a_3\omega^2)$, $D = (a_0\omega^5 - a_2\omega^3 + a_4\omega)$.

Для того, щоб записати комплексну передавальну функцію $W(j\omega)$ у вигляді комплексного числа, яке містить дійсну $R(\omega)$ та уявну $I(\omega)$ частини, помножимо знаменник і чисельник на спряжене комплексне число $C - jD$ й отримаємо:

$$W(j\omega) = \frac{(A + jB')(C - jD)}{C^2 + D^2} = \frac{AC - jAD + jB'C + B'D}{C^2 + D^2} = \frac{AC + B'D}{C^2 + D^2} + j \frac{B'C - AD}{C^2 + D^2} = R(\omega) + jI(\omega).$$

Для зручності перетворень знайдемо значення таких величин:

$$AC = A(a_1\omega^4 - a_3\omega^2);$$

$$B'D = B\omega(a_0\omega^5 - a_2\omega^3 + a_4\omega);$$

$$AC + B'D = Aa_1\omega^4 - Aa_3\omega^2 + Ba_0\omega^5 - Ba_2\omega^4 + Ba_4\omega^2 = Ba_0\omega^6 + (Aa_1 - Ba_2)\omega^4 + (Ba_4 - Aa_3)\omega^2;$$

$$B'C = B\omega(a_1\omega^4 - a_3\omega^2) = Ba_1\omega^5 - Ba_3\omega^3;$$

$$AD = A(a_0\omega^5 - a_2\omega^3 + a_4\omega) = Aa_0\omega^5 - Aa_2\omega^3 + Aa_4\omega;$$

$$B'C - AD = Ba_1\omega^5 - Ba_3\omega^3 - Aa_0\omega^5 + Aa_2\omega^3 - Aa_4\omega = (Ba_1 - Aa_0)\omega^5 - Aa_4\omega;$$

$$C^2 = (a_1\omega^4 - a_3\omega^2)^2 = a_1^2\omega^8 - 2a_1a_3\omega^6 + a_3^2\omega^4;$$

$$D^2 = (a_0\omega^5 - a_2\omega^3 + a_4\omega)^2 = a_0^2\omega^{10} - 2a_0a_2\omega^8 + (2a_0a_4 + a_2^2)\omega^6 - 2a_2a_4\omega^4 + a_4^2\omega^2;$$

$$C^2 + D^2 = a_0^2\omega^{10} + (a_1^2 - 2a_0a_2)\omega^8 + (2a_0a_4 + a_2^2 - 2a_1a_3)\omega^6 + (a_3^2 - 2a_2a_4)\omega^4 + a_4^2\omega^2.$$

Знайдемо вираз для дійсної частини комплексної передавальної функції:

$$R(\omega) = \frac{Ba_0\omega^4 + (Aa_1 - Ba_2)\omega^2 + (Ba_4 - Aa_3)}{a_0^2\omega^8 + (a_1^2 - 2a_0a_2)\omega^6 + (2a_0a_4 + a_2^2 - 2a_1a_3)\omega^4 + (a_3^2 - 2a_2a_4)\omega^2 + a_4^2}.$$

Знаходимо величини коефіцієнтів:

$$Ba_0 = 384 \cdot \frac{1}{2} = 192;$$

$$Aa_1 - Ba_2 = 192 \cdot 67.4 - 384 \cdot 86.4 = -20300;$$

$$Ba_4 - Aa_3 = 384 \cdot 9 - 192 \cdot 43.8 = -4940;$$

$$a_0^2 = 0.5^2 = 0.25;$$

$$a_1^2 - 2a_0a_2 = 67.4^2 - 2 \cdot 0.5 \cdot 86.4 = 4440;$$

$$2a_0a_4 - a_2^2 - 2a_1a_3 = 2 \cdot 0.5 \cdot 9 + 86.4^2 - 2 \cdot 67.4 \cdot 43.8 = 1570;$$

$$a_3^2 - 2a_2a_4 = 43.8^2 - 2 \cdot 86.4 \cdot 9 = 360;$$

$$a_4^2 = 9^2 = 81;$$

$$R(\omega) = \frac{192\omega^4 - 20300\omega^2 - 4940}{0.25\omega^8 + 4440\omega^6 + 7150\omega^4 + 380\omega^2 + 81}.$$

Знаходимо вираз для уявної частини комплексної передавальної функції:

$$I(\omega) = j \frac{(Ba_1 - Aa_0)\omega^4 + (Aa_2 - Ba_3)\omega^2 - Aa_4}{0.25\omega^9 + 1160\omega^7 + 7150\omega^5 + 360\omega^3 + 81\omega}.$$

Визначаємо величини коефіцієнтів:

$$Ba_1 - Aa_0 = 384 \cdot 67.4 - 192 \cdot 0.5 = 25800;$$

$$Aa_2 - Ba_3 = 192 \cdot 86.4 - 384 \cdot 43.8 = 200;$$

$$Aa_4 = 192 \cdot 9 = 1730.$$

$$I(\omega) = j \frac{25800\omega^4 - 230\omega^2 - 1730}{0.25\omega^9 + 4440\omega^7 + 1570\omega^5 + 360\omega^3 + 81\omega}.$$

Отже

$$W(j\omega) = R(\omega) + jI(\omega) = \frac{192\omega^4 - 20300\omega^2 - 4440}{0.25\omega^8 + 4440\omega^6 + 1570\omega^4 + 360\omega^2 + 81} + \\ + j \frac{25800\omega^4 - 230\omega^2 - 1730}{0.25\omega^9 + 4440\omega^7 + 1570\omega^5 + 360\omega^3 + 81\omega}.$$

Присвоюючи різні значення частоті ω , знаходимо координати $R(\omega)$ та $I(\omega)$ точок амплітудно-фазової характеристики розімкненої системи. Легко знайти точки при $\omega \rightarrow 0$ та $\omega \rightarrow \infty$. Знаходимо значення ω за умови $I(\omega)=0$, коли чисельник дорівнює нулю. Розв'язок цього рівняння $\omega=0,51$. Тепер знаходимо $R(\omega)$ при $\omega=0,51$; $R(\omega)=-28,0$. Дані розрахунків наведено в таблиці 2.

Таблиця 2. Параметри годографа Найквіста

ω	0	0.2	0.4	0.5	0.6	0.7	1	∞
$R(\omega)$	∞	-60	-40	-30	-25	-15	-5	0
$I(\omega)$	∞	-90	-18	0	5	10	5	0

Тема №2. Вибір автоматичного регулятора й розрахунок оптимальних параметрів його налагодження

2.1. Прилади для вимірювання витрати

Вимірювання витрати маси або об'єму харчових продуктів найчастіше є обліково-звітними. За ними здійснюють приймання та здавання вихідної сировини або готового продукту. Дуже важливими є точність і надійність вимірювання, які багато в чому залежать від якості монтажних робіт.

Найширшу галузь використання в харчовій промисловості знайшли витратоміри перемінного перепаду, постійного перепаду (ротометри) й індукційні витратоміри.

Витратомір змінного перепаду тиску містить звужувальний пристрій, який монтується у трубопроводі, диференційний манометр (дифманометр) для вимірювання перепаду тиску в звужувальному пристрої та трубки, які з'єднують звужувальний пристрій із дифманометром. Крім того, залежно від характеру стану вимірюваного середовища, схеми вимірювання і взаємного розміщення звужувального пристрою і дифманометра до комплексу витратоміра можуть входити конденсаційні та роз'єднуючі ємності, відстійники та повітрозбирачі. При дистанційному передаванні описаний комплект містить також вторинні пристрої, призначені для показів, реєстрації та сумування витрати.

Звужувальні пристрої (діафрагми, сопла та трубки Вентурі) слід встановлювати співвісно з трубопроводом, а площа торця має бути перпендикулярною до осі трубопроводу. Циліндричну розточку звужувального пристрою направляють назустріч потоку. Внутрішній діаметр камер звужувальних пристроїв повинен дорівнювати внутрішньому діаметру трубопроводу.

Для правильної роботи діафрагми потрібно вибирати пряму ділянку, де потік буде рівномірним, без завихрювань, а швидкість його – повільнішою. Пряма ділянка може бути горизонтальною, вертикальною або нахиленою. На всій її відстані не допустимі виступаючі прокладки, напливи зварки, шорсткості.

У трубопроводах із внутрішнім діаметром $D < 80$ мм звужувальний пристрій повинен розміщуватися між двома патрубками, розточеними до розміру, прийнятого при розрахунку, але не менше $6D$ перед звужувальним пристроєм і не менше $3D$ після звужувального пристрою. Засувки і вентиля можна встановлювати перед звужувальним пристроєм на відстані не менше $100D$.

Звужувальні пристрої слід монтувати у заздалегідь встановлених фланцях після продування й очищення технологічних трубопроводів. Відстань між звужувальним пристроєм і фланцями доповняють прокладками, матеріал яких підбирають залежно від властивостей середовища. На рис. 14 зображено установку камерної діаграми на вертикальній ділянці трубопроводу для

вимірювання витрати рідини. Звужувальні пристрої встановлюють так, щоб у робочому стані позначення на їх корпусі було видно.

Відбір тиску при вимірюванні витрати рідини в горизонтальному трубопроводі рекомендується виконувати по осі або нижче осі трубопроводу. Не можна місця відбору встановлювати у верхній точці трубопроводу, так як в імпульсні трубки, що під'єднані до пристрою, можуть потрапляти бульбашки повітря й покази його не будуть точними. Також не слід виконувати відбір тиску і в нижній точці трубопроводу, тому що він може бути забруднений осадами. При вимірюванні витрат в паро- і повітропроводах для уникнення потрапляння конденсату в імпульсні трубки відбір тиску здійснюють у верхній половині трубопроводу. Отвори для відбору тиску свердлять ближче до торця звужувального пристрою і діаметр отвору повинен бути не більше $0.03D$.

Схема під'єднання дифманометрів до звужувальних пристроїв залежить від виду вимірювального середовища, його властивостей і характеристик.

Для вимірювання витрат рідини дифманометр краще встановлювати нижче звужувального пристрою (рис. 15а). В такому положенні повітря або газ, які містяться в потоці рідини, не будуть потрапляти в трубні лінії дифманометра. Якщо з вимірюваної рідини випадають осади, то перед дифманометром слід встановити відстійники (рис. 15б).

Якщо дифманометр встановлено вище звужувального пристрою, схему трубних сполучень виконують з обов'язковою установкою у вищих точках трубної проводки газозбірників з вентилями для продування (рис. 16а). У нижніх точках трубної проводки рекомендується поставити відстійники (рис. 16б).

Вимірюючи витрату газу, дифманометр монтують вище звужувального пристрою (рис. 17). У цьому випадку конденсат, який є в трубках, стікає в трубопровід. При установці дифманометра нижче звужувального пристрою конденсат, який накопичується в з'єднувальних пристроях, буде викривляти результати вимірювань. Щоб цього не сталося, в низьких точках з'єднувальних ліній, як і в попередньому випадку, встановлюють відстійники.

У схемах трубних проводок для вимірювання витрат гарячих рідин із температурою понад 120 градусів і в усіх випадках вимірювань витрат водяної пари встановлюють вирівнюючі місткості (рис. 18). У першому випадку вони необхідні для забезпечення рівності густини рідини в трубах, які з'єднують звужувальний пристрій з дифманометром, у другому – для забезпечення постійної рівності рівнів конденсату в них.

Конденсаційні місткості монтують у безпосередній близькості від звужувального пристрою. Усі місткості розміщують на однаковому рівні. Місткості й трубки, які сполучають їх з дифманометром, заповнюють конденсатом.

Вимірюючи витрати агресивних рідин, парів і газів, використовують розділяючі пристрої, які розміщують ближче до звужувального пристрою.

Ротаметри встановлюють на вертикальних трубопроводах при русі вимірюваного середовища знизу вгору. При цьому необхідно передбачити

обхідний трубопровід і вентиль для перемикання трубопроводу у випадку ремонту чи заміни пристрою.

Індукційні витратоміри монтують у такій послідовності: спочатку встановлюють первинний перетворювач трубопроводів, потім вимірювальний блок на щиті. Первинні перетворювачі можна монтувати при будь-якому розміщенні трубопроводу – вертикальному, горизонтальному або похилому. Під час роботи пристрою об'єм труби первинного перетворювача повинен бути заповнений середовищем, яке контролюється. Вертикальне положення витратоміра в частині труби, де рідина подається вгору, найкраще забезпечує заповнення усього січення трубопроводу первинного перетворювача навіть при малій витраті, і, крім того, зменшує нерівномірність зносу його футерівки. У випадку горизонтальної установки найкраще розташовувати витратомір у найнижчій ділянці трубопроводу, де січення первинного перетворювача також буде заповнене середовищем.

При горизонтальному або нахиленому монтажі первинного перетворювача його слід встановлювати так, щоб електроди лежали в горизонтальній площині. Таким чином буде виключена можливість ізоляції одного електрода повітрям, який може міститись у контролюючому середовищі. Для перетворювача слід передбачити обвідну трубку з запірними вентилями (рис.19).

Якщо вимірюване середовище містить жир або в'язкі речовини, то крім запірних вентилів витратомір додатково оснащують трійником для очищення.

Вимірювальний блок індукційного витратоміра монтують на щитку. Поблизу встановлення блоків пристрою і ліній зв'язку між блоками не повинні бути силові кабелі й пристрої, які створюють електромагнітні поля частотою 50 Гц.

Об'ємні лічильники необхідно встановлювати так, щоб напрямок потоку рідини через лічильник відповідав напрямкові руху стрілки, нанесеної на корпус пристрою, і щоб осі оберту овальних шестерень були розміщені горизонтально, а кругова шкала – вертикально. Нульова позначка шкали повинна знаходитися зверху. На трубопроводі перед механічним фільтром пристрою, який затримує тверді частинки вимірюваної рідини, необхідно встановити віддільник повітря для видалення з рідини газів і пари, що містяться в ній.

Швидкісні лічильники володіють меншою точністю, ніж об'ємні. Тому їх в основному використовують як водоміри. Швидкісні лічильники випускають двох типів: з крильчастою вертикальною вертушкою і спіральною вертикальною вертушкою.

Водоміри з крильчастою вертикальною вертушкою розміщують тільки на горизонтальних ділянках трубопроводу; з крильчастою горизонтальною вертушкою – на горизонтальних, вертикальних, похилих.

При встановленні лічильників з горизонтальною вертушкою необхідно забезпечити прямолінійність ділянки трубопроводу перед лічильником довжиною, що дорівнює 8–10 діаметрам трубопроводу, після лічильника – довжиною, не менше 5 діаметрів трубопроводу. Випрямляч струму водоміра

повинен бути направлений назустріч потоку. Напрямок стрілки, нанесеної на корпус приладу, і напрямок потоку вимірюваної рідини повинні співпадати.

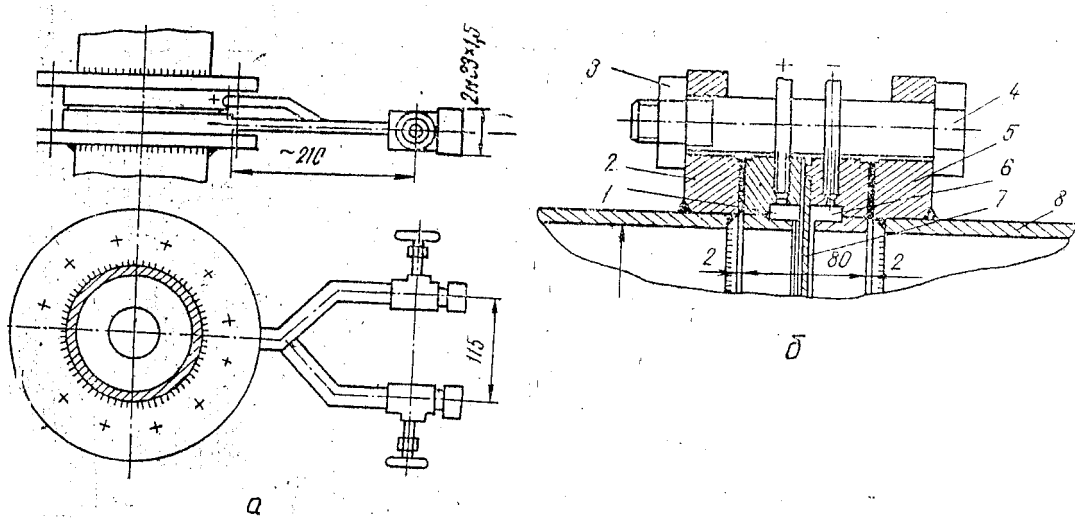


Рис. 14. Установка стандартної камерної діафрагми на вертикальній ділянці трубопроводу для вимірювання витрат рідини під тиском до 2,5 МПа: а – загальний вигляд установки; б – установка діафрагми; 1 – кільцева камера плюсового тиску; 2 – фланець; 3 – гайка; 4 – гвинт; 5 – прокладка; 6 – кільцева камера від'ємного тиску; 7 – диск діафрагми; 8 – трубопровід

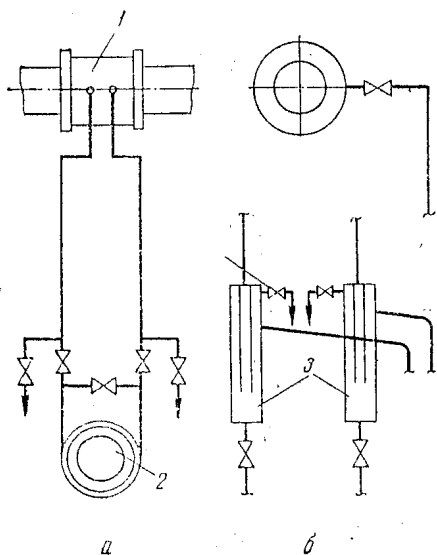


Рис. 15. Трубна проводка від звужувального пристрою до дифманометра, який розміщений нижче пристрою при зміні витрати неагресивної рідини: а – для чистої рідини; б – для рідини, яка містить частинки; 1 – звужувальний пристрій; 2 – дифманометр; 3 – відстійні місткості

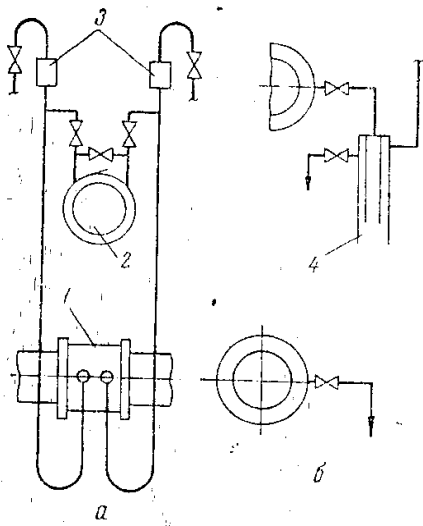


Рис. 16. Трубна проводка від звужувального пристрою до дифманометра при зміні витрат неагресивної рідини. Монтаж дифманометра вище звужувального пристрою: а – для чистої рідини; б – для рідини, яка містить частинки; 1 – звужувальний пристрій; 2 – дифманометр; 3 – збірник; 4 – відстійні місткості

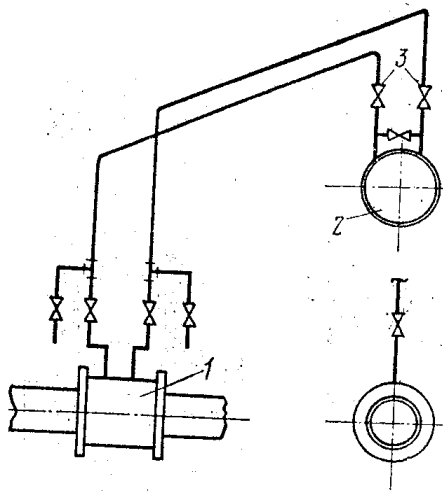


Рис. 17. Трубна проводка від звужувального пристрою до дифманометра при зміні витрат неагресивного газу. Монтаж дифманометра вище звужувального пристрою: 1 – звужувальний пристрій; 2 – дифманометр; 3 – вентилі

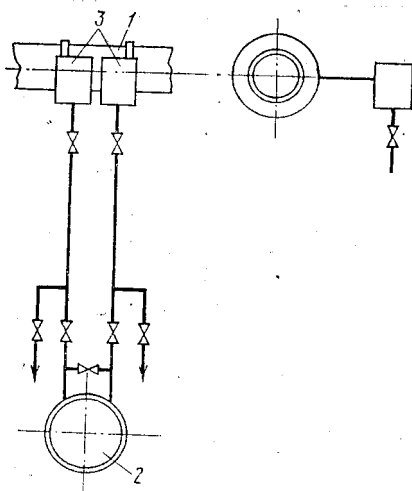


Рис. 18. Трубна проводка від звужувального пристрою до дифманометра при зміні витрат пари: 1 – звужувальний пристрій; 2 – дифманометр; 3 – конденсаційні місткості

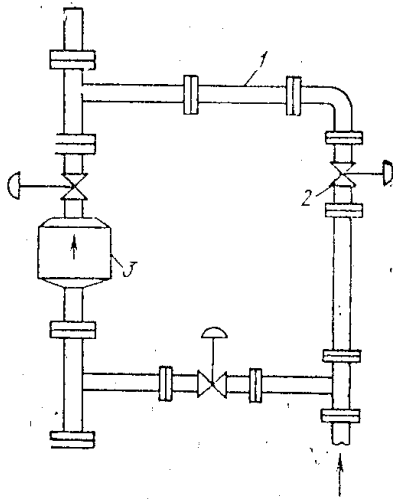


Рис. 19. Установка первинного перетворювача індукційного витратоміра: 1 – обвідна труба; 2 – запірні вентиля; 3 – первинний перетворювач

2.2. Прилади контролю складу і стану речовини

Контроль складу і стану речовин – густини і концентрації рідин, вологості газів і сипучих матеріалів, умісту солі в рідині або парі, величини pH має особливо важливе значення на підприємствах харчової промисловості. Це висуває високі вимоги до якості монтажу пристроїв, які вимірюють названі показники.

Із густиномірів, які використовують у цукровій, спиртовій, кондитерській, пивоварній та інших галузях харчової промисловості найбільше поширення отримали поплавкові, гідростатичні та вагові. Менше розповсюдження отримали ультразвукові й радіоізотопні.

На рис. 20, 21 наведено приклади монтажу рідинного, сифонного густиноміра ПЖС. Густиномір можна встановити для вимірювання густини як у місткостях, так у потоці. Прилади слід монтувати у місцях, які не піддаються вібраціям і трясці, та зручних для швидкого монтажу приладу. Монтуючи трубопровід, необхідно врахувати, що заповнення приладу робочим середовищем повинно проходити знизу, а її переливання – зверху. Для підведення повітря до приладу і для відведення вихідного сигналу рекомендується використовувати труби з внутрішнім діаметром 6–8 мм.

При монтажі поплавкових, гідростатичних і мембранних густиномірів для уникнення впливу на поплавки і мембрани руху потоку, температури й осідання частинок встановлюють спеціальні відбійні щитки, струмовипрямлячі, дренажі для видалення осаду, виливні й переливні пристрої. Вагові густиноміри повинні бути змонтовані так, аби їх швидко можна було розібрати для періодичного чищення та промивання.

Для вимірювання вмісту сухих речовин у томатній пасті широко використовують рефрактометр RFR, який зображено на рис. 22. Установка приладу повинна проводитися з особливою ретельністю, щоб не пошкодити кріпильний фланець і призму. Водночас необхідно звернути увагу, аби пристрій на місці установки не був підданий значним вібраціям. У випадку монтажу вимірювального пристрою на трубопроводі, він повинен мати фланець, аналогічний фланцю вимірювального пристрою. Між фланцями кладуть гумову прокладку й стягують болтами. Регулюючий пристрій монтують на відстані, не більше 30 м від вимірного.

Контролюючи різні технологічні процеси виробництва, наприклад, отримання соку I і II сатурації в цукровій промисловості, безперервне бродіння в спиртовій промисловості, важливо знати величину концентрації водневих іонів (pH), яка характеризує реакцію розчинів. Первинні перетворювачі величини pH у пропорційну напругу дозволяють контролювати даний процес.

Проточні первинні перетворювачі pH -метрів установлюють у вибраному місці, прикріплюючи до стіни на кронштейні двома болтами через отвори в задній стінці корпусу. Над перетворювачем на висоті 1,5 метра повинна знаходитися місткість із насиченим розчином хлориду калію або корпус порівнюваного електрода залежно від типу первинного перетворювача. До місця установки підводять імпульсну і дренажну лінії.

Для установки занурювальних перетворювачів pH -метрів на кришці апарата приварюють патрубок 1 (рис. 23) з двома відкидними прогоничами на фланці 2, який містить гумову прокладку. На трубі 4 перетворювача кріплять фланець 3. Через фланець 2 в апарат вводять занурену частину перетворювача, фланці 2 і 3 з'єднують прогоничами. З'єднувальну коробку 7 кріплять на скобі за допомогою прогоничів на відстані не більше 5 метрів від перетворювача, який з'єднують з головкою 5 коаксіальним кабелем, захищеним гнучким металевим рукавом 6. Від з'єднувальної коробки до потенціометра в захисній трубі разом із коаксіальним кабелем прокладають ізолюваний провід для заземлення вимірювальної схеми приладу на місці встановлення первинного перетворювача.

Існує багато приладів для вимірювання вологості харчових продуктів. Однак більшість із них випускають невеликими партіями. Правила монтажу цих приладів мають свої специфічні особливості, які описані в заводських інструкціях.

При встановленні промислових вологомірів повинна бути забезпечена легкість доступу до них обслуговуючого персоналу, простота їх заміни і чищення.

В харчовій промисловості газоаналізатори використовують для аналізу топкових газів при спалюванні палива, газового середовища в пекарнях і сушильних камерах, контроль граничних значень у пожежо- та вибухонебезпечних виробництвах і т.п. Для відбору проби з технологічного обладнання або трубопроводу газовідбірний пристрій необхідно встановлювати

під кутом 20-25 градусів у бік газоаналізатора для кращого стікання конденсату. Кінець газовідбірного пристрою слід розміщувати на $1/3$ діаметра крутого газоходу, щоб забезпечити середню за складом пробу. Для очищення проби від пилу використовують керамічні фільтри. Якщо температура аналізованих газів перевищує 600 градусів за Цельсієм, то відбірний пристрій слід виконувати з водяним охолодженням. У місці відбору газу повинна бути виключена можливість підсосу повітря ззовні.

Відстань від місця відбору від первинного перетворювача повинна бути по можливості меншою для вимкнення запізнення показів. Газопідвідні лінії виконують зі сталевих нержавіючих мідних або латунних труб діаметром 8-10мм. При монтажі з'єднувальних електричних ліній для охорони проводів від механічних пошкоджень і для захисту від інших завад електричні проводки прокладають у гнучких металічних шлангах або трубах, які заземлюють. Проводи живлення пристроїв і з'єднувальні проводи вимірювального ланцюга прокладають окремо.

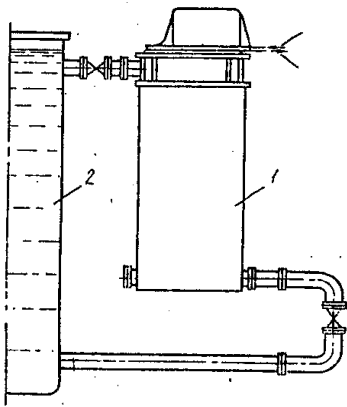


Рис. 20. Схема установки рідинних сифонних пневматичних густиномірів ПЖС для вимірювання густини в місткостях:

1 – густиномір ПЖС; 2 – місткість

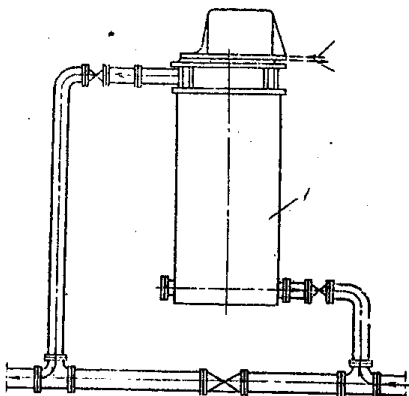


Рис. 21. Схема установки рідинних сифонних пневматичних густиномірів ПЖС для вимірювання густини в потоці

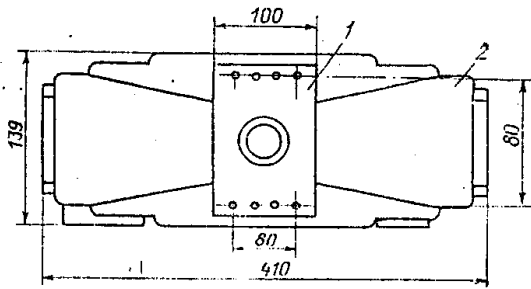


Рис. 22. Вимірювальний пристрій автоматичного рефрактометра RFR:

1 – оптичний блок із закріплювальним фланцем; 2 – литий корпус

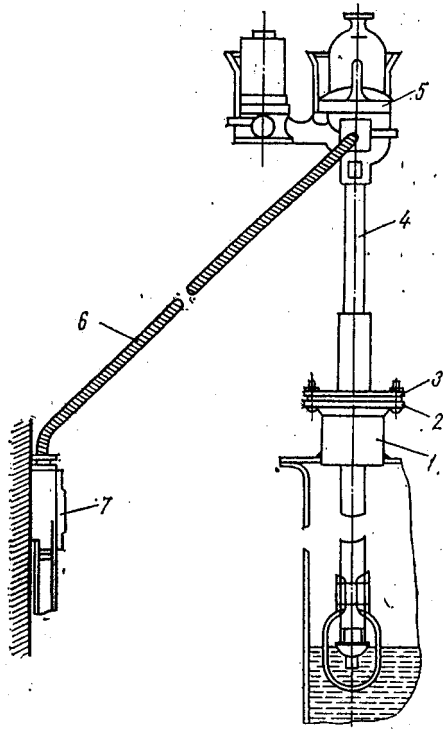


Рис. 23. Установка занурюючого первинного перетворювача ДПг-5274 рН-метра

2.3. Визначення оптимальних параметрів налагодження регуляторів

Сукупність об'єктів регулювання і регулятора, які взаємодіють між собою, називають системою автоматичного регулювання (САР). Структурну схему САР зображено на рис. 24. На відміну від систем автоматичного контролю і сигналізації САР являє собою замкнений ланцюг (об'єкт – регулююче обладнання – об'єкт), унаслідок чого недостатньо налагодити кожен елемент системи окремо. В процесі налагодження системи необхідно досягти відповідності її характеристик характеристикам регульованого об'єкта. Змінюючи властивості елементів САР у потрібний бік, можна отримати систему з потрібними характеристиками. Тобто, якість регулювання залежить від властивостей об'єкта й регулюючого обладнання (регулятора). Властивості об'єкта, як правило, бувають задані в технологічному обладнанні й змінити їх неможливо. Характеристику дії регулятора можна змінювати в широких межах за допомогою параметрів його налаштування – коефіцієнта посилення K_p , часу ізодрома T_i і часу випередження T_e . Параметри налаштування регуляторів визначають на основі динамічних характеристик об'єкта. Звідси налагодження

САР пов'язано з роботами, які характерні системам контролю (аналіз проектної документації, стендова перевірка і ін.) включає ще й визначення динамічних характеристик об'єкта і розрахунків за отриманими даними настроювань регуляторів.

Динамічні характеристики об'єкта визначають розрахунками або експериментально. Через складність розрахунковий метод широкого розповсюдження не набув. Його звичайно використовують при проектуванні, коли ще існує можливість впливати на характеристики створюваного об'єкта. У практиці налагоджувальних робіт користуються різними експериментальними методами, які легкодоступні та найбільш достовірні, так як дозволяють урахувати всі відхилення конструкції апаратів і самих процесів від ідеальних, взятих за основу у розрахунковому методі.

Експериментальне визначення динамічних характеристик об'єкта спочатку проводять під час випробовування окремих технологічних апаратів після монтажу обладнання. Це дозволяє ще до запуску усього технологічного процесу орієнтовно визначити параметри налагодження основних регуляторів. Після запуску процесу і виведення його на оптимальний режим параметри налагодження регуляторів уточнюють, так як різноманітні контури регулювання взаємно пов'язані. При цьому для деяких регульованих величин визначають динамічні характеристики на діючому обладнанні.

Залежно від характеру об'єкта відносно вхідного сигналу (збуджуючої дії) отримують розгінну, імпульсну або частотну характеристику.

Для отримання розгінної характеристики об'єкта – кривої зміни в часі регульовального параметра (вихідної величини φ) у перехідному процесі, викликаному ступінчастим збуренням (вхідна величина μ), складають схему, зображену на рис. 25. Регулятор, якщо він встановлений, вимикають, а для реєстрації вхідної і вихідної величин встановлюють відповідно первинні перетворювачі ПП1 і ПП2, вихідні сигнали яких подаються на один реєструючий пристрій.

З початку експерименту, стабілізуючи вхідну величину, продуктивність і всі інші існуючі збурення, домагаються усталеного стану об'єкта. При вимірах повільнозмінюючих величин (температура, вологість і т.п.) режим, що встановився, до внесення збурення підтримують протягом 2 – 2,5 хвилини, а при вимірах швидкозмінюючих величин (витрата, тиск і т.п.) – 0,3 – 0,5 хвилини.

Далі на вхід об'єкта вручну наносять ступінчастий вплив – різка зміна подавання речовини або енергії, яка досягається різким відкриванням чи закриванням регульованого органу. Величину ступінчастого впливу приймають такою, що дорівнює 5-15%, максимально можливу при даному режимі значення вхідної величини X_{ex} . Подальше збільшення величини збурення недоцільне, так як це призводить до помітного порушення технологічного процесу. Зменшення ж її перешкоджає чіткому отриманню розгінної характеристики через випадкові завади. Процес зняття характеристики продовжують на статичних об'єктах до того моменту, поки вихідна величина не досягне нового значення, коли

встановиться. На статичних об'єктах процес закінчують після досягнення значення, яке встановилось, швидкості зміни вихідної величини.

В результаті проведеного експерименту отримують розгінні характеристики. На рис. 26 наведено типову характеристику, яку отримують при проведенні експериментів на багатомісних статичних об'єктах. Експерименти зі знімання розгінної характеристики повторюють кілька разів (не менше трьох).

За розгінними характеристиками (кривими розгону) визначають такі динамічні параметри об'єкта: запізнення $\tau_{об}$, постійну часу $T_{об}$ і коефіцієнт передавання $K_{об}$.

Для цього до кривої розгону в точці А (точка перетину кривої), яка відповідає максимальній швидкості зміни вихідної величини $X_{вих}=\varphi$, проводять дотичну до перетину її з лініями початкового (лінія 1) і нового (лінія 2) встановлених значень вихідної величини. У відрізок часу від моменту внесення збурення – t_0 до моменту t_1 (точка перетину дотичної з лінією попереднього значення, встановленого регульованою величиною) визначають повне запізнення об'єкта $\tau_{об}$. Відрізок часу, замкнений між моментами перетину дотичної з лініями попереднього (початкового) і нового встановленого значення регульованої величини являє собою постійну часу $T_{об}$.

Коефіцієнт передавання об'єкта – відношення максимального відхилення регульованої величини $\Delta\varphi$ до величини збурення $\Delta\mu$, яке викликало це відхилення, визначають за формулою:

$$K_{об} = \frac{\Delta\varphi}{\Delta\mu}.$$

Отримані значення $\tau_{об}$, $T_{об}$, $K_{об}$, аналізують. Явно невірні виключають, а інші усереднюють за формулами:

$$\tau_{об.ср} = \frac{\tau_{об1} + \tau_{об2} + \dots + \tau_{обn}}{n}, \quad T_{об.ср} = \frac{T_{об1} + T_{об2} + \dots + T_{обn}}{n}, \quad K_{об.ср} = \frac{K_{об1} + K_{об2} + \dots + K_{обn}}{n},$$

де n – кількість експериментів, здійснених для усереднення.

Інколи через більшу тривалість часу переміщення регулюючого органу або виконавчого механізму не вдається внести ступінчасте збурення дії. В таких випадках, коли час t_8 переміщення регульованого органу співвимірний з величиною $\tau_{об}$, момент внесення збурення переносять із початкового положення t_0 в нове t_0' рис. 27. Момент нового положення t_0' вибирають так, щоб площі S_1 та S_2 були рівні.

В деяких об'єктах регулювання після ступінчастого збурення регульована величина досягає нового встановленого значення через досить тривалий час. Із технологічних міркувань це не завжди допустимо, особливо при знятті характеристик на діючому обладнанні. Тому в технологічних процесах, в яких не допускається тривале відхилення регульованого параметра від допустимого значення, знімають імпульсну характеристику – реакцію системи на імпульсне збурення. Форма імпульсного збурення може бути різною – прямокутною, трикутною, трапецеїдальною.

Для отримання динамічних параметрів об'єкта імпульсну характеристику 1 перетворюють у звичайну криву розгону 2. Імпульсну характеристику (рис.

28) розбивають за часом на кілька рівних проміжків Δt , кожен із яких дорівнює тривалості імпульсу t_u . Ділянки $\Delta t_1, \Delta t_2, \Delta t_3 \dots$ у свою чергу розбивають на рівні, але менші проміжки. Підсумовуючи відповідні ординати першої Δt_1 , і другої Δt_2 ділянок, отримують ординати звичайної кривої розгону для ділянки Δt_2 і для всіх наступних ділянок до того часу, поки не буде відзначено нове значення, яке встановиться, величини φ . Якщо ординати імпульсної характеристики на ділянці Δt_1 позначити послідовно буквами $a, b, v, z, d \dots$, а на ділянці $\Delta t_3 - a'', b'', v'', z'', d''$, то ординати кривої розгону будуть на ділянці $\Delta t_2 - a+a', b+b', v+v', z+z', d+d'$ і т.д., а на ділянці $\Delta t_3 - a+a'+a'', b+b'+b'', v+v'+v'', z+z'+z''$ і т.д.

За кривою розгону, отриманою раніше описаним способом, визначають параметри об'єкта $\tau_{об}, T_{об}, K_{об}$.

Вибрані параметри настроювання регулятора повинні забезпечувати такий характер процесу регулювання, який найповніше відповідає технологічним умовам роботи регульованого об'єкта. Кількість регулювань визначають не тільки вибраним законом – пропорційним (П), пропорційно-інтегральним (ПІ), пропорційно-інтегрально-диференціальним (ПІД), але й параметрами налагодження регулятора. При різному настроюванні одного й того ж регулятора можна отримати різні види процесів регулювання (перехідних процесів).

При налагодженні регулятора прагнуть отримати оптимальний перехідний процес. Оцінювання оптимальності процесу регулювання може бути дана на основі аналізу як окремих показників якості перехідного процесу – динамічного коефіцієнта регулювання, часу регулювання, значень перерегулювання й залишкового відхилення, – так і загальних (інтегральна оцінювання).

У результаті дослідів і теоретичних узагальнень встановлено три типи оптимальних перехідних процесів регулювання, які відповідають більшості технологічних умов роботи:

- аперіодичний, який використовують у тому випадку, коли потрібно виключити вплив регульованої дії даної системи на інші регульовані машини;
- з мінімальною квадратичною площею відхилення регульованої величини, який використовують у тому випадку, коли за технологічними вимогами не допускається велике відхилення регульованої величини.

Приблизні значення оптимальних настроювань регуляторів отримують шляхом аналітичних розрахунків на основі динамічних властивостей об'єкта й прийнятого оптимального процесу регулювання. Формули визначення настроювань регуляторів для статичних об'єктів наведено у таблиці 3, для астатичних – у таблиці 4. Параметри настроювань можуть бути також визначені за спеціальними графіками.

Таблиця 3. Параметри налагодження регулятора для статичних об'єктів

Регулятор	Тип процесу регулювання на статичних об'єктах		
	Аперіодичний	З 20%-ним перерегулюванням	З мінімальною квадратичною площею відхилення регульованої величини
П	$K_p = \frac{0,3}{K_{об}\tau_{об}/T_{об}}$	$K_p = \frac{0,7}{K_{об}\tau_{об}/T_{об}}$	$K_p = \frac{0,9^*}{K_{об}\tau_{об}/T_{об}}$
I	$K_p = \frac{1}{4,5 \cdot K_{об}T_{об}}$	$K_p = \frac{1}{1,7 \cdot K_{об}T_{об}}$	$K_p = \frac{1}{1,7 \cdot K_{об}\tau_{об}}$
ПІ	$K_p = \frac{0,6}{K_{об}\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 0,5T_{об} + 0,8\tau_{об}$	$K_p = \frac{0,7}{K_{об}\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 0,3T_{об} + \tau_{об}$	$K_p = \frac{1}{K_{об}\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 0,35T_{об} + \tau_{об}$
ПІД	$K_p = \frac{0,3}{K_{об}\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 2,4\tau_{об}$ $T_s = 0,4\tau_{об}$	$K_p = \frac{1,2}{K_{об}\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 2\tau_{об}$ $T_s = 0,4\tau_{об}$	$K_p = \frac{1,4}{K_{об}\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 1,3\tau_{об}$ $T_s = 0,5\tau_{об}$

Таблиця 4. Параметри налагодження регулятора для астатичних об'єктів

Регулятор	Тип процесу регулювання на астатичних об'єктах		
	Аперіодичний	З 20%-ним перерегулюванням	З мінімальною квадратичною площею відхилення регульованої величини
П	$K_p = \frac{0,4}{\tau_{об}/T_{об}}$	$K_p = \frac{0,7}{\tau_{об}/T_{об}}$	—
ПІ	$K_p = \frac{0,4}{\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 6\tau_{об}$	$K_p = \frac{0,7}{\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 3\tau_{об}$	$K_p = \frac{1}{\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 4\tau_{об}$
ПІД	$K_p = \frac{0,6}{\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 5\tau_{об}$ $T_s = 0,2\tau_{об}$	$K_p = \frac{1,1}{\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 2\tau_{об}$ $T_s = 0,4\tau_{об}$	$K_p = \frac{1,4}{\tau_{об}/T_{об}}$ $T_i = 1,6\tau_{об}$ $T_s = 0,5\tau_{об}$

На практиці потрібні налагоджувальні параметри встановлюють спеціальними пристроями, якими оснащено кожен серійно випущений регулятор. У деяких регуляторах такі пристрої не мають шкали або вона не проградуйована. Тому при стендовій перевірці регулятора поряд із зовнішнім оглядом, оцінюванням працездатності й визначенням похибки проводять градування пристрою, за допомогою якого його налагоджують. При градуванні перевіряють відповідність дійсних значень K_p , T_i і T_e нанесеним на шкалу або наносять відповідні позначки на шкалу, яка не проградуйована.

Процес градування зводиться до визначення відповідних характеристик регулятора при різних положеннях пристроїв, за допомогою яких проводять налагоджування.

Характеристики, як правило, отримують у лабораторних умовах, імітуючи регульовану величину відповідним електричним або пневматичним обладнанням. Подаючи на вхід регулятора ступінчасте збурення, реєструють зміни під час його вихідної величини. Розгінну характеристику визначають 2 – 3 рази для кожного положення пристрою, який налагоджують, потім результати усереднюють. Вигляд розгінних характеристик для регуляторів зображено на рис. 28.

При градуванні П-регуляторів величину коефіцієнта посилення K_p визначають за розгінною характеристикою (рис. 29а) як відношення зміни вихідної величини $\Delta \mu$ (в % ходу регульованого органу) до зміни регульованої величини $\Delta \varphi$ (одиниці її виміру):

$$K_p = \frac{\Delta \varphi}{\Delta \mu}.$$

Приступаючи до градування ПІ-регуляторів, інтегральну частину від'єднують і градують пристрій для налагодження K_p . Потім, увімкнувши інтегральну і пропорційну частини, градують пристрій для налагодження T_i при одному значенні K_p . Як бачимо з розгінної характеристики (рис. 29б), вихідний сигнал регулятора спочатку змінюється на величину $\Delta \mu = K_p \Delta \varphi$ за рахунок дії пропорційної частини, а потім починає збільшуватися під дією інтегральної частини. Час, протягом якого відбувається подвоєння вихідного сигналу пропорційної частини, і є часом ізодрома T_i .

ПІД-регулятори градують спочатку при від'єднаних інтегральній і диференціальній частинах, тобто градують пристрій для настроювання K_p . Потім умикають пропорційну й інтегральну частини і, аналогічно ПІ-регуляторам, градують пристрій для настроювання T_e . Щоб проградувати пристрій для налагодження T_e вмикають пропорційну і диференціальну частини регулятора (інтегральна частина вимкнена) і встановлюють деякі значення K_p із раніше визначених. На вхід регулятора подають безперервно зростаюче збурення, швидкість зміни якого постійна (рис. 29в) і реєструють зміни вихідної величини. Вона спочатку змінюється (здійснюючи стрибок) за рахунок дій диференціальної частини, а потім збільшується під дією пропорційної частини. Час випередження T_e визначають як різницю між одним і тим самим значенням вихідної величини регулятора μ при ввімкненій і повністю вимкненій диференціальній частині. При вимкнених інтегральній і

диференціальній частині ПД-регулятор перетворюється в П-регулятор, характеристику якого наведено на рис. 29 пунктирною лінією 2. Для знаходження T_e проводять пряму, паралельну осі часу, вище точки А так, щоб вона перетинала криві 1 і 2. Відрізок ВС визначає час випередження при даному положенні пристрою.

За необхідності градування пристрою можна провести безпосередньо на місці установки регулятора, роз'єднавши попередньо виконавчий механізм і регулюючий орган. Якщо виконавчий механізм не має вказівника положення, то його оснащують шкалою, градуваною в % ходу.

При індивідуальному випробовуванні встановлюють середнє значення задавального впливу на регулятор. Потім за допомогою імітуючого пристрою змінюють значення регульованої величини в наближенні до заданого. При переході наближеного значення регульованої величини через задане, керуючі сигнали регулятора повинні перемістити регулюючий орган у бік, що компенсує цю зміну. Якщо регулюючий орган переміщується в протилежний бік – змінюють фазування системи регулювання.

На заключному етапі роботи з налагодження САР вибирають оптимальні параметри налагодження, тобто уточнюють отримані раніше значення. Роботи проводять за умов досягнення технологічним обладнанням проектної потужності при сумісній роботі всіх елементів САР.

Існує кілька методів оптимального вибору параметрів налагодження: організований пошук на об'єкті, розрахунковий (за часовими і частотними характеристиками об'єкта), алгоритмічний і з допомогою моделювання на ЕОМ.

Розглянемо найдоступніший, який не потребує додаткової апаратури, метод організованого пошуку. Пошук зазвичай здійснюють за загальним критерієм оптимальності – мінімумом площі, обмеженої кривою перехідного процесу і віссю ординат (заштрихована ділянка кривої розгону на рис. 30). Оптимальний перехідний процес потребує найменшого часу регулювання й мінімум динамічного відхилення регульованої величини. Ці вимоги заперечують одна однієї: зменшення часу регулювання призводить, у більшості випадків, до збільшення динамічного відхилення і, навпаки, намагання зменшити динамічне відхилення призводить до збільшення часу регулювання. Критерій мінімуму площі, обмеженої кривою перехідного процесу і віссю ординат, дозволяє об'єднати ці два показники якості регулювання в один. Для визначення площі використовують планіметри або методи математичного розрахунку.

Організований пошук оптимальних параметрів настроювання регулятора, що встановлений на об'єкті, здійснюють послідовним змінням K_p і T_i . Пошук проводять у такій послідовності:

1. На регуляторі встановлюють максимальне значення T_i і в кілька прийомів збільшують коефіцієнт посилення регулятора K_p , починаючи з його малих значень і закінчуючи максимально можливими з технічних міркувань. При кожному новому значенні K_p реєструють перехідний процес і визначають його площу. Потім знаходять

значення K_p , при якому площа, обмежена кривою перехідного процесу і віссю ординат, мінімальна.

2. При значенні K_p , яке відповідає мінімальній площі, також у кілька прийомів починають зменшувати значення часу ізодрома T_i , яке відповідає мінімальній площі.
3. При отриманому значенні T_i знову змінюють K_p . Пошук продовжують доти, поки збільшення або зменшення K_p і T_i не буде призводити до збільшення площі.

Розглянемо процес організованого пошуку оптимальних параметрів налагодження на прикладі. При максимальному значенні часу ізодрома $T_i=10$ хвилин (рис. 31) встановлюють значення коефіцієнта підсилення $K_p=0,5$ і при цьому значенні реєструють перехідний процес, визначають його площу. Аналогічну операцію проводять для значень $K_p=1; 3; 5; 6; 8$. До значення $K_p=3$ площа зменшується, потім починає збільшуватися. Звідси, зменшувати значення T_i потрібно при $K_p=3$, так як відповідна цьому значенню площа перехідного процесу мінімальна ($S=52$). Далі, по черзі, зменшують значення часу ізодрома, визначають, що найменша площа буде відповідати $T_i=4,5$. При цьому значенні T_i знову починають змінювати величину K_p , з'ясовуючи, що зміна K_p в будь-який бік призводить до збільшення площі. Таким чином, значення $K_p=3$ і $T_i=4,5$ є оптимальними. Послідовність пошуку на рис. 31 позначено стрілками.

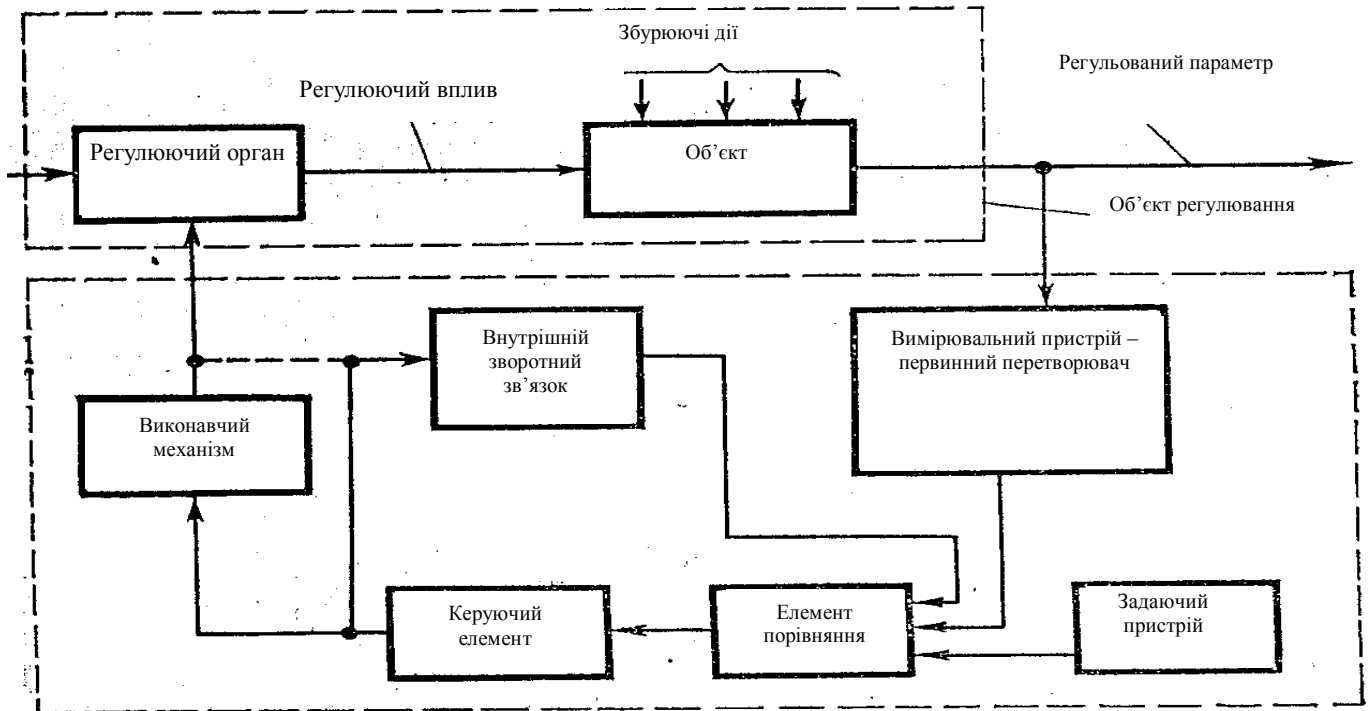


Рис. 24. Структурна схема системи автоматичного регулювання

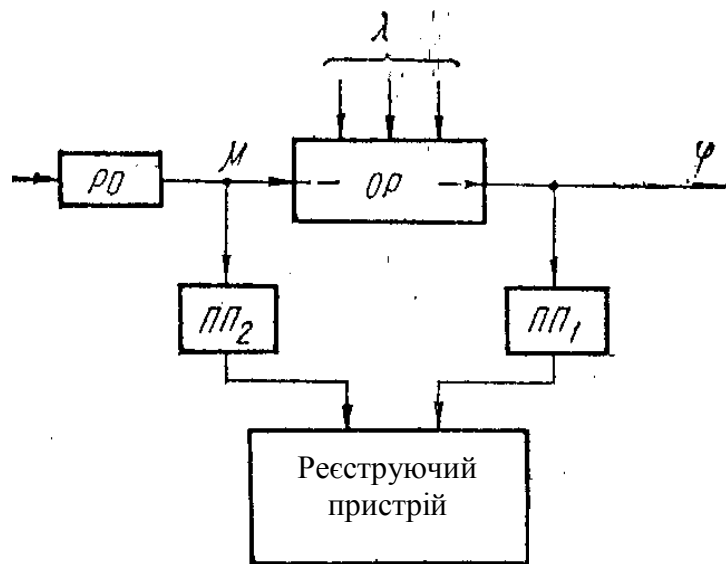


Рис. 25. Схема для визначення розгінної характеристики об'єкта

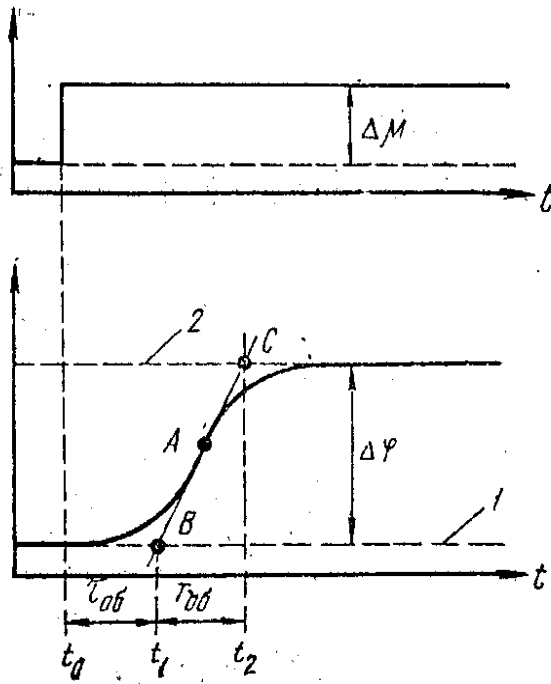


Рис. 26. Типова розгінна характеристика багатоемнісного статичного об'єкта

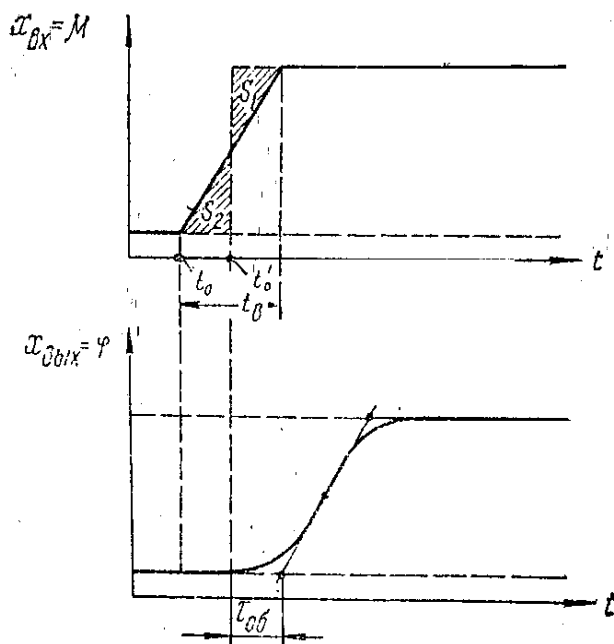


Рис 27. Визначення запізнення з урахуванням часу внесення збурення

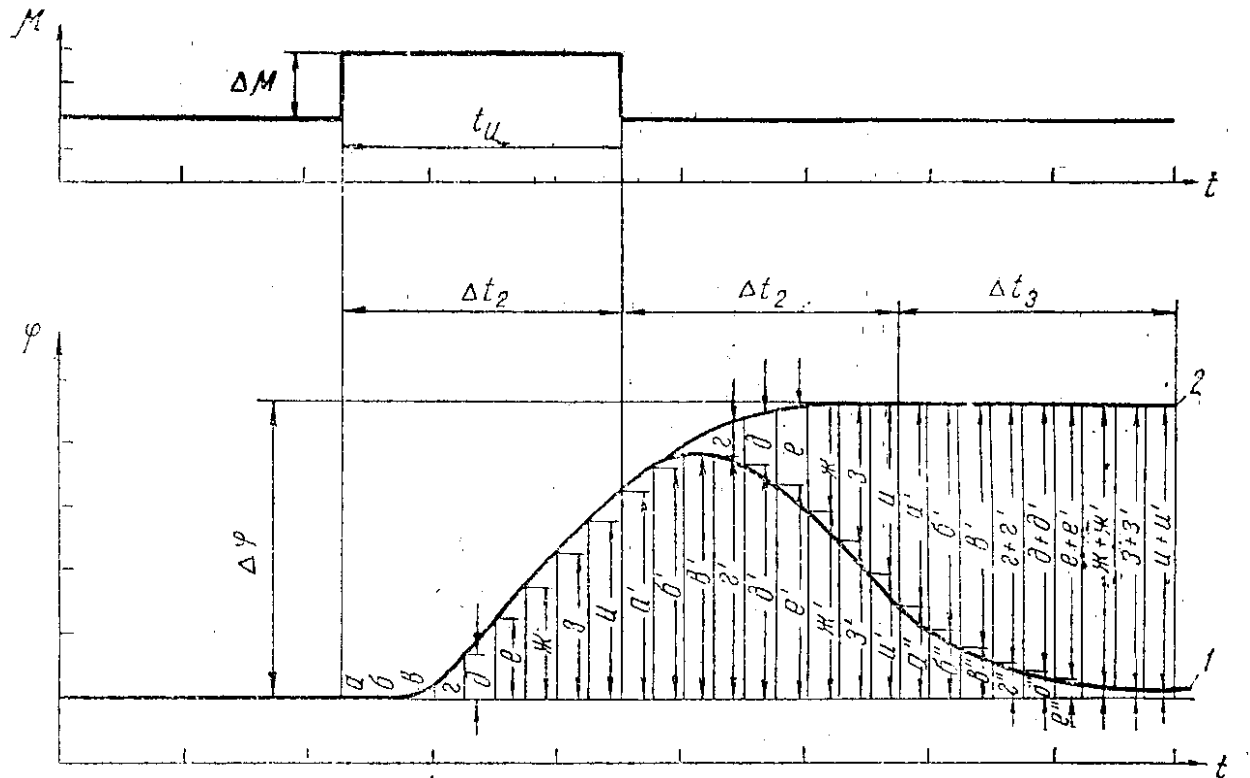


Рис. 28. Побудова розгінної характеристики за імпульсним збуренням

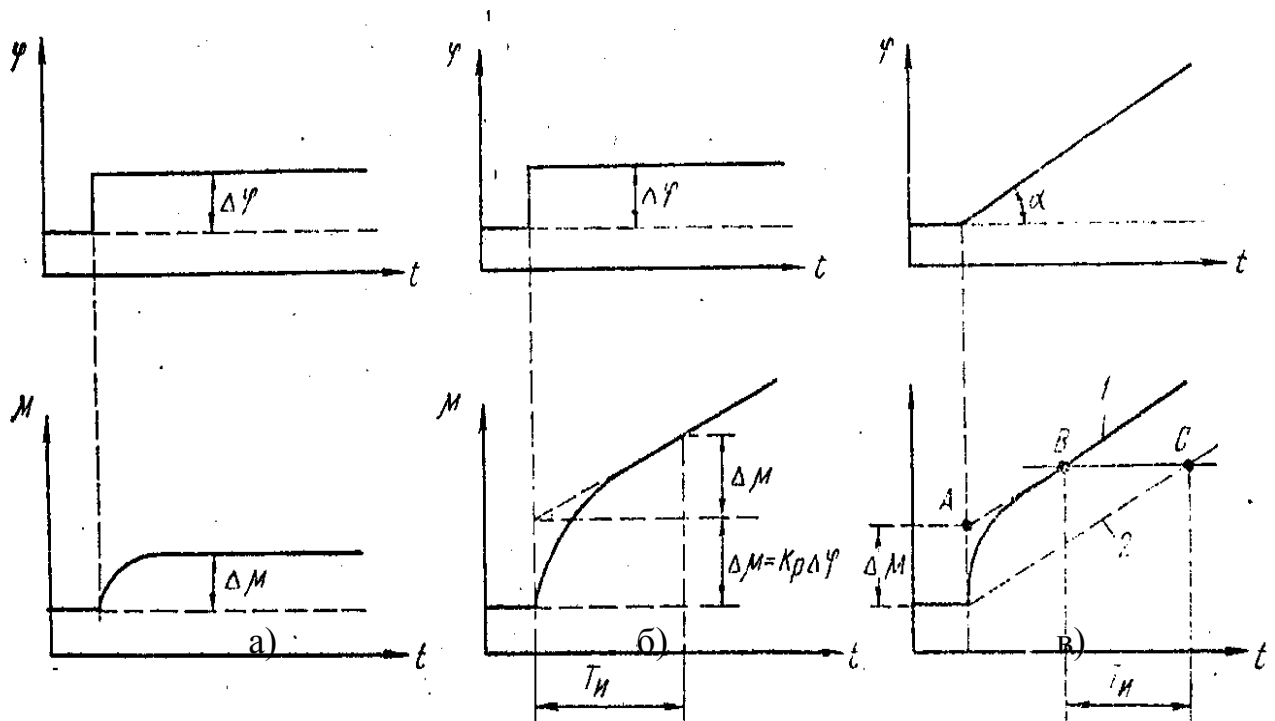


Рис. 29. Розгінні характеристики: а – П-регулятора; б – ПІ-регулятора; в – ПІД-регулятора

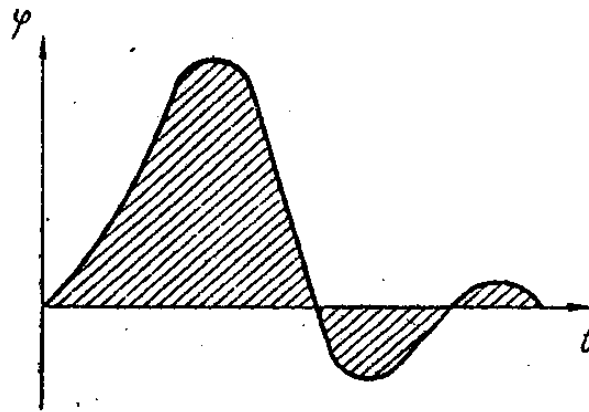
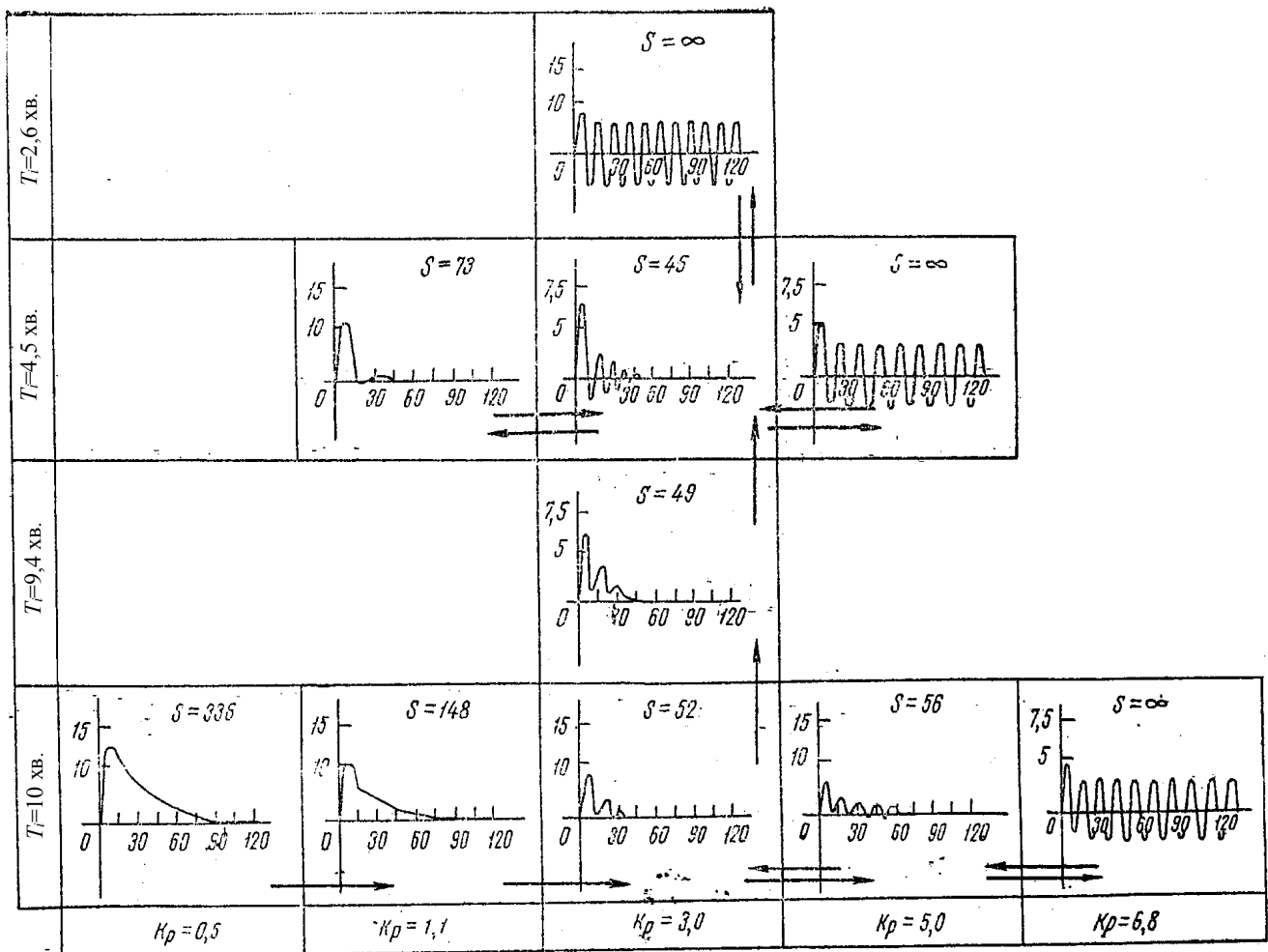


Рис. 30. Оцінювання якості перехідного процесу по площі

Рис. 31. Вимірювання перехідного процесу при різних параметрах налагодження K_p і T_i

Література

1. Галыбин Н.С. Гидравлический привод систем управления – М.: Машиностроение, 1972. – 376 с.
2. Герц Е.В., Крейнин г.В. Расчет пневмоприводов – М. .: Машиностроение, 1975. – 272 с.
3. Дмитриев В.Н., Радецкий В.Г. Основы пневмоавтоматики – М.: Машиностроение, 1973. – 360 с.
4. Погорелов В.Н., Тюшев В.С. Гидропневмопривод и автоматика – Л.: Издательство СЗПИ, 1968. – 431 с.
5. Автоматические линии в машиностроении: Справочник / Под ред. Волчкевича – М.: Машиностроение, 1984. – Т 1, 2, 3.
6. Волчкевич Л.И. Надёжность автоматических линий. – М.: Машиностроение, 1969. – 309 с.
7. Сальников Р.И. и Орл. Орловского ОЯ Проектирования гибких производственных систем. – Л. : Машиностроение, 1990. – 333 с.
8. Автоматизированные системы управления предприятиями и объединениями. Под ред. Соломина М. А. М.: Экономика. 1985. –248с.
9. Спыну Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение – К.: Вища школа, 1991. – 311 с.
10. Гибкое автоматизированное производство / Под ред. С.А. Майорова, Г.В. Орловского. – Л.: Машиностроение, 1985. – 454с.
11. Юревич Е.И. Основы робототехники. -Ленинград: Машиностроение, 1985. - 271 с.
12. Асфаль Р. Роботы и автоматизация производства. - М.: Машиностроение, 1989. - 448 с.
13. Белянин П.Н. Промышленные роботы и их применение: Робототехника для машиностроения. - Второе издание, переработанное и дополненное. - М.: Машиностроение, 1983. - 311 с.
14. Гавриш А.П., Ямпольский Л.С. Гибкие робототехнические системы: Учебник .-К.: Высшая школа, 1989 .-407 с.
15. Гибкие автоматизированные производственные системы/Под общ. ред. Л.С. Ямпольского .-К.: Техніка, 1985 .-280 с.
16. Гибкие производственные системы, промышленные роботы, робототехнические комплексы: В 14 кн.. Кн. 5: Промышленные роботы/Под ред. Черпакова Б.И.-М.: Высшая школа, 1990 .-94 с.
17. Гибкие производственные системы, промышленные роботы, робототехнические комплексы: В 14 кн.. Кн. 6: Робототехнические комплексы/Под ред. к.т.н. Б.И. Черпакова .-М.: Высшая школа, 1989 .-95 с.
18. Козырев Ю.Г. Промышленные роботы: Справочник .- М.: Машиностроение, 1983 .-376 с.

19. Промышленные роботы: Конструирование, управление, эксплуатация. Учебное пособие для втузов/Костюк В.И., Гавриш А.П., Ямпольский Л.С., Карлов А.Г.-К.: Вища школа, 1985 .-359 с.
20. Робототехнические системы и комплексы: Учебное пособие для вузов/ И.И.Мачульский, В.П.Запятой, Ю.П.Майоров и др. Под ред. И.И.Мачульского. М.: Транспорт, 1999, 446 с.
21. Спыну Г.А. Промышленные роботы. Конструирование и применение: Учебное пособие .-2-е изд., перераб. и доп.-К.: Вища школа, 1991 .-312 с.
22. Технологические основы ГПС: Учебник для студентов машиностр. спец. вузов/Под. ред. Ю.М.Соломенцева .-Москва: Машиностроение, 1991 .-240 с.
23. Хартли Дж. ГПС в действии .-Производственное издание .- М.: Машиностроение, 1987 .-328 с.
13. Чижов А. А., Федоровский Л. М. Автоматическое регулирование и регуляторы в пищевой промышленности. М.: Пищевая промышленность. 1974. -264с.
14. Цейтинин Г. Е., Хархота А. Г. Применение роботов в пищевой промышленности. К.: Урожай. 1988. –179с.
15. Проць Я., Данилюк О., Савків В. Автоматизація виробничих процесів ТДТУ. 2005. – 264 с.