

Лекція

Автоматичні системи регулювання

- 1 Загальні положення.
- 2 Основні принципи регулювання.
- 3 Стабілізувальне, програмне та слідкувальне регулювання.
- 4 Стійкість і якість процесів регулювання.
- 5 Основні властивості об'єктів регулювання.
- 6 Автоматичні регулятори.

1. Загальні положення

Автоматика – технічна наука, що вивчає процеси, які відбуваються в автоматичних та автоматизованих системах управління, з метою їх аналізу та розроблення (синтезу) нових систем.

Автоматизація – процес упровадження технічних засобів, що замінюють працю людини з управління.

В автоматичній системі процес управління відбувається без участі людини. В автоматизованій системі, поряд з технічними засобами, в управлінні бере участь людина.

Однією з найбільших розповсюджених систем управління є **автоматичні системи регулювання (АСР)**, призначенням яких є підтримання технологічних параметрів об'єкта на заданому рівні.

Будь-яку систему управління, узагальнюючи, можна розглядати як сукупність двох основних взаємодіючих елементів: **об'єкта управління** та управляючого пристрою, в якості якого в АСР використовується **автоматичний регулятор**.

Об'єкт управління досить повно можна характеризувати за допомогою параметричних схем (рис. 3.1).



В об'єкті управління виділяють три типи змінних: регульовані, управляючі та збурення.

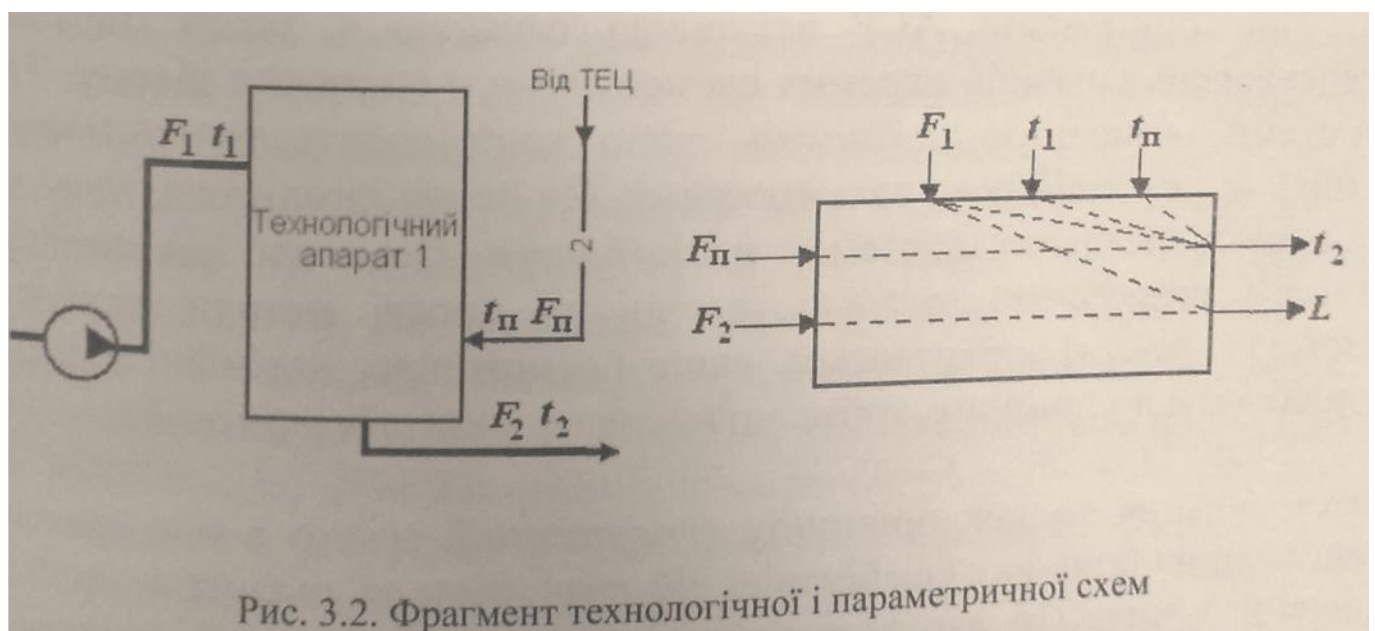
Регульовані (керовані, вихідні) змінні (X) – це змінні, значення яких треба підтримувати на заданому значенні (X^*) або замінювати за відповідними алгоритмами.

Збурення (Z) – це зовнішні дії, які призводять до небажаних змін в об'єкті регулювання, тобто сприяють відхиленню регульованих змінних від значень.

Управляючі (регульовальні, керувальні) змінні (U) виробляються регулюючим пристроєм і подаються на об'єкт управління з метою компенсації впливу збурень і ліквідації відхилення регульованої змінної від заданого значення.

На рис. 3.2 показано фрагмент технологічної схеми і варіант параметричної схеми як завдання для розроблення схеми автоматизації.

З наведеної технологічної схеми виходить, що у цьому апараті необхідно підтримувати рівень L і температуру t_2 на виході апарата. Температуру пропонується підтримувати шляхом зміни витрати пари F_{Π} з ТЕЦ, а рівень в апараті – шляхом зміни витрати середовища на виході з апарата F_2 . При цьому показано, що в цьому варіанті збурювальними факторами, які впливають на температуру t_2 , є температура t_1 і витрата F_1 рідини на виході, а також температура пари t_{Π} . В якості збурення, що впливає на рівень L , показане значення витрати продукту на виході - F_1 . Хоча можливі і інші варіанти, наприклад, температуру на виході t_2 можна регулювати шляхом зміни витрати F_1 .



До складання параметричних схем, які можуть бути використані для розроблення системи автоматизації, доцільно широко залучати технологів і обслуговуючий персонал.

Для загальної характеристики автоматичних систем регулювання і управління використовують ряд ознак, які дають змогу виділити один клас складених систем. Так, можна виділити **одно-** та **багатовимірні** системи відповідно з однією або багатьма вихідними (регульованими) величинами. Зрозуміло, що системи автоматичного чи автоматизованого управління складними об'єктами є багатовимірними. У свою чергу, останні можуть бути системами **непов'язаного** і **пов'язаного** управління. У першому випадку кілька технологічних параметрів не

пов'язані між собою і для кожного з них використовується окремий регулятор, який працює незалежно від інших (автономно). У другому випадку регульовані параметри пов'язані між собою спільними матеріальними та енергетичними потоками, процесами, що відбуваються в об'єкті, і незалежне регулювання їх неефективне, а то й просто неможливе. Тому в системах зв'язаного управління вводяться додаткові зв'язки для забезпечення (за необхідності) незалежності одного регульованого параметра від іншого – **автономні системи**. У рамках багатовимірних систем реалізуються також **інваріантні системи** на основі компенсації основних зрубень. Слід зазначити, що реальні об'єкти, як правило, багатовимірні, але при технічній реалізації АСР у кожному конкретному випадку потрібно вставити доцільність створення багатовимірних систем на підставі оцінки щільності зв'язку між параметрами та інтенсивністю зрубень.

При оцінюванні АСР важливою ознакою є також характер перетворень сигналів окремих елементів чи в системі в цілому. Так, системи називають **лінійними**, якщо вони досить точно можуть описуватися лінійними залежностями. Це певна ідеалізація, тому що більшість реальних систем є **нелінійними**. Оскільки для лінійних систем розроблено загальні, наочні та прості методи аналізу і синтезу, тому й намагаються, якщо це можливо, нелінійні системи приводити до лінійних, тобто здійснювати їхню **лінеаризацію**.

Визначальною ознакою лінійних систем є можливість застосування до них принципу **суперпозиції**, згідно з якими реакція системи на будь-яку комбінацію дій визначається як сума реакцій на кожну з них. Це дає змогу застосовувати ефективний прийом у процесі аналізу та синтезу АСР: вивчати поведінку системи при кожній дії окремо, нехтуючи іншими, а потім одержати загальний результат як суму частинних.

При тривалій роботі системи управління відбуваються певні зміни її характеристик, передусім об'єкта управління. Тому в загальному випадку всі системи умовно поділяють на **стаціонарні** та **нестаціонарні**. Для перших приймаються припущення, що параметри системи не змінюються протягом певного проміжку часу або ними можна знехтувати. Для інших – зміни параметрів набувають суттєвого значення і їх необхідно враховувати. Це зумовлює створення **адаптивних** систем, призначенням яких є забезпечення можливості урахування змінюваних у часі характеристик і умов роботи системи управління. Системи в такому разі ускладнюються, але при суттєвій нестаціонарності об'єкта забезпечують високі техніко-економічні показники роботи.

За характеристиками сигналів усі системи поділяють на **неперервні** (в літературі вживається термін «аналогові») та **дискретні**. У неперервних системах усі сигнали – це неперервні функції часу. В дискретних системах є елементи, вихідні сигнали яких змінюються стрибкоподібно при плавній зміні вхідних і являють собою імпульси певної величини й тривалості. До дискретних систем належать позиційні (релейні),

імпульсні та цифрові. Останні мають найбільше значення у зв'язку із використанням у системах управління мікропроцесорних пристроїв та ЕОМ.

Використання в системах управління мікропроцесорних засобів та ЕОМ дають можливість реалізувати складні, досконалі методи та алгоритми. Зокрема, створюються **екстремальні** й **оптимальні** системи. Перші дають змогу підтримувати роботу об'єкта навколо точки, яка відповідає екстремуму його статичної характеристики. Наприклад у теплогенераторах це точка з максимальним тепловиділенням, що відповідає певному співвідношенню палива й повітря. Оптимальні системи передбачають формування деякого узагальненого показника (критерію оптимальності), за яким можна оцінити процес функціонування в існуючих умовах (обмеженнях) та при наявних ресурсах. У цих системах критерій оптимальності завжди набуває екстремального характеру (min чи max), Наприклад, максимальний випуск продукції чи мінімальні витрати ресурсів при існуючих обмеженнях якості існуючої продукції, значення технологічних параметрів та ін. Останнім часом широкого розповсюдження набувають інтелектуальні системи управління з використанням методів підтримки прийняття рішень.

2. Основні принципи регулювання

Автоматичні системи виконують різні функції, але практикою автоматизації вироблено деякі загальні методи їх побудови. За допомогою останніх вибирається структура системи, процес формування управління, точки одержання та шляхи передачі інформації. Це **принципи регулювання** (управління).

Практично всі АСР галузі побудовані на базі використання двох основних принципів регулювання: **за відхиленням** та **за збуренням**, причому АСР за відхиленням є найбільш поширеною.

В АСР за відхиленням (рис. 3.3) на автоматичний регулятор (АР) надходить сигнал регульованої змінної від об'єкта регулювання (X) і задане її значення (X*). Тобто на вхід регулятора поступає "відхилення (розузгодження)" ($\Delta X = X - X^*$) регульованої змінної від заданого значення. Автоматичний регулятор (АР) виробляє управляючу дію (U), яка поступає на вхід об'єкта регулювання (ОР) з метою ліквідації цього відхилення.



Рис. 3.3. АСР за відхиленням

Перевага такої АСР у тому, що для регулювання не потрібно вимірювати жодного збурення, бо відхилення є наслідком дії їх усіх. Ця система також має назву замкненої АСР, або АСР із зворотним зв'язком.

Недоліком системи є те, що процес регулювання починається лише після виникнення розузгодження ΔX . Для інерційних об'єктів це може призвести до неприпустимих по технології відхилень.

В АСР за збуренням (рис. 3.4) на АР передається інформація про збурення, що виникло на вході в ОР.

Для більшості систем інерційністю автоматичного регулятора можна знехтувати порівняно з інерційністю автоматичного регулятора можна знехтувати порівняно з інерційністю об'єкта. В такому випадку сигнал U з'являється практично в той самий момент, що й вимірне Z_3 , тому управління може встигнути компенсувати дію збурення, тобто відхилення ΔX внаслідок дії такого збурення може дорівнювати нулю. Це, безумовно, є перевагою цієї системи. Але суттєвим недоліком такої АСР є те, що вона реагує лише на те збурення, сигнал якого подається на АР. На ОР в умовах виробництва діє значна кількість збурень, деякі з них неможливо контролювати. Під дією цих збурень вихідна змінна X відхиляється від заданого значення, а система не реагує на ці відхилення.

У галузі найбільш поширені АСР за відхиленням. Заважаючи на основний недолік, АСР за збуренням застосовується лише в тих випадках, коли відсутні автоматичні датчики регульованих змінних X або якщо ці датчики мають дуже велику інерційність, а з численних збурень на ОР можна виділити основне, дія якого буде компенсуватися АР. Наприклад, за такою схемою відбувається регулювання вмісту сухих речовин в дифузійному соці цукрового виробництва. Основним збуренням на об'єкт є змінна витрат бурякової стружки в дифузійній апарат. Цей сигнал надходить на

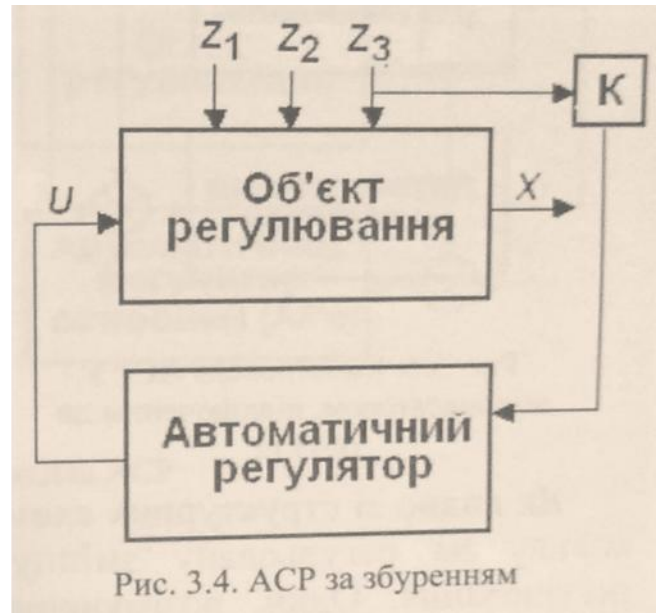


Рис. 3.4. АСР за збуренням

регулятор змінює приток води в апарат таким чином, щоб співвідношення двох витрат, а тим самим і концентрація сухих речовин, лишалися незмінними. Але ця система не реагує на інші збурення: зміну якості бурякової стружки, або температури екстракції, дія яких також впливає на концентрацію. Сигнал за збуренням обробляється спеціальним пристроєм – компенсатором (K), а система в цілому є розімкненою.

У разі, якщо застосування розглянутих принципів регулювання не забезпечує отримання бажаних результатів, застосовується більш складна багатоконтурна АСР, наприклад, **комбінована система**, яка поєднує принципи побудови АСР за збуренням і відхиленням.

Комбіновані АСР використовуються для автоматизації об'єктів, у яких можна виділити збурення, які найбільш впливають на регульовану змінну. Існують два типи комбінованих АСР:

- системи з компенсатором, підключеним до об'єкта (рис. 3.5);
- системи з компенсатором, підключеним на вхід регулятора (рис. 3.6).



Рис. 3.5. Комбінована АСР з компенсатором, підключеним до об'єкта

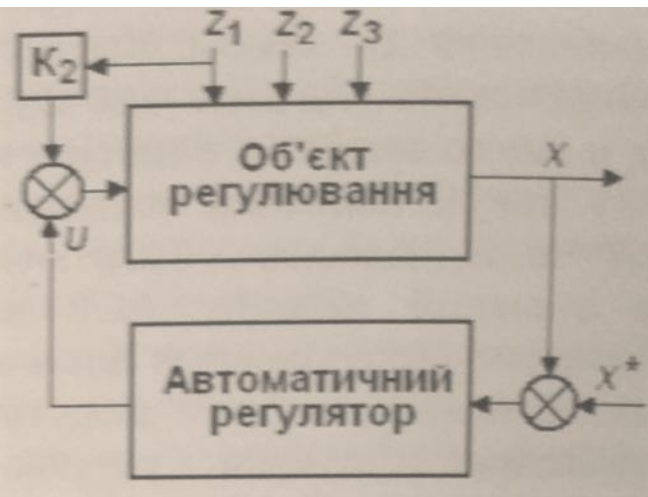


Рис. 3.6. Комбінована АСР з компенсатором, підключеним на вхід регулятора

Як видно зі структурних схем, обидві системи мають два канали впливу на регульовану змінну і використовують два контури регулювання. Один, розімкнений і менш інерційний, забезпечує реакцію системи на найбільш впливове збурення, а другий, замкнутий, забезпечує, ліквідацію відхилення регульованої змінної від заданого значення, викликаного дією всіх інших збурень.

У випадках, коли одноконтурні системи автоматизації не дають змоги досягти високої якості регулювання, використовують більш складні АСР, наприклад **каскадні АСР**.

В каскадних системах виділяють основну і допоміжну регульовану змінну, для кожної з яких створюється свій «основний» і «допоміжний» контур регулювання. На рис.3.7 наведено структуру схему каскадної системи стабілізації температури рідини на виході з теплообмінника, в якій допоміжним контуром є АСР витрати грючої пари F . При зміні збурення по тиску пари цей регулятор AP_d змінює ступінь відкриття регулюючого клапана, щоб підтримати задану витрату пари. Але при порушенні теплового балансу за рахунок зміни температури на виході $t_{вх}$ у теплообмінник або витрати рідини F_p вихідна температура t починає змінюватись. Починає працювати основний регулятор AP_0 , який коригує задане значення регулятора витрати F^* .

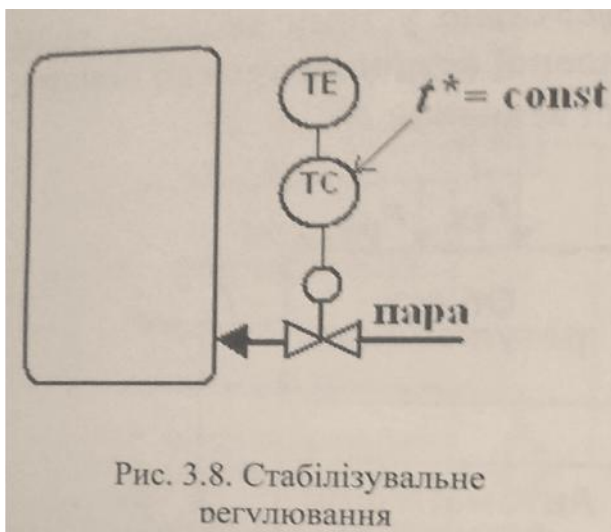
Використання каскадних схем ефективно у тому випадку, коли запізнення у контурі регулювання основної величини суттєво більше, ніж у контурі регулювання допоміжної величини.



3. Стабілізувальне, програмне та слідкувальне регулювання

АСР мають різні види алгоритмів функціонування, але визначальною ознакою є характер зміни заданого значення. За законом зміни завдання, під час регулювання розрізняють стабілізувальне, програмне та слідкувальне регулювання.

Для більшості апаратів безперервної дії потрібно підтримувати на постійному рівні значення регульованих змінних – вирішувати завдання стабілізації. З цією метою при *стабілізувальному регулюванні* потрібно підтримувати постійне значення $X^* = const$. Це, наприклад, системи стабілізації рівня по корпусах випарної установки, стабілізації тиску та температури в спиртовій колоні та ін. Задане значення у цьому випадку може змінювати тільки оператор. На рис. 3.8 показано регулятор температури ТС, на який подається сигнал від датчика температури ТЕ і задане значення t^* . Регулятор керує регулюючим органом, змінюючи подачу пари, щоб підтримати температуру на заданому значенні.



У багатьох апаратах періодичної дії потрібно змінювати регульовану величину за деякою відомою наперед відомою залежністю (наприклад, температуру в

сушварочному котлі або подачу субстрату в ферментер періодичної дії). Ця залежність і є програмою зміни завдання з плином часу $X^* = f(t)$. Такі системи називаються **системами програмного регулювання**.

У наведеному прикладі функція зміни температури задана у вигляді графіка, який повинен реалізувати програматор (рис. 3.9).

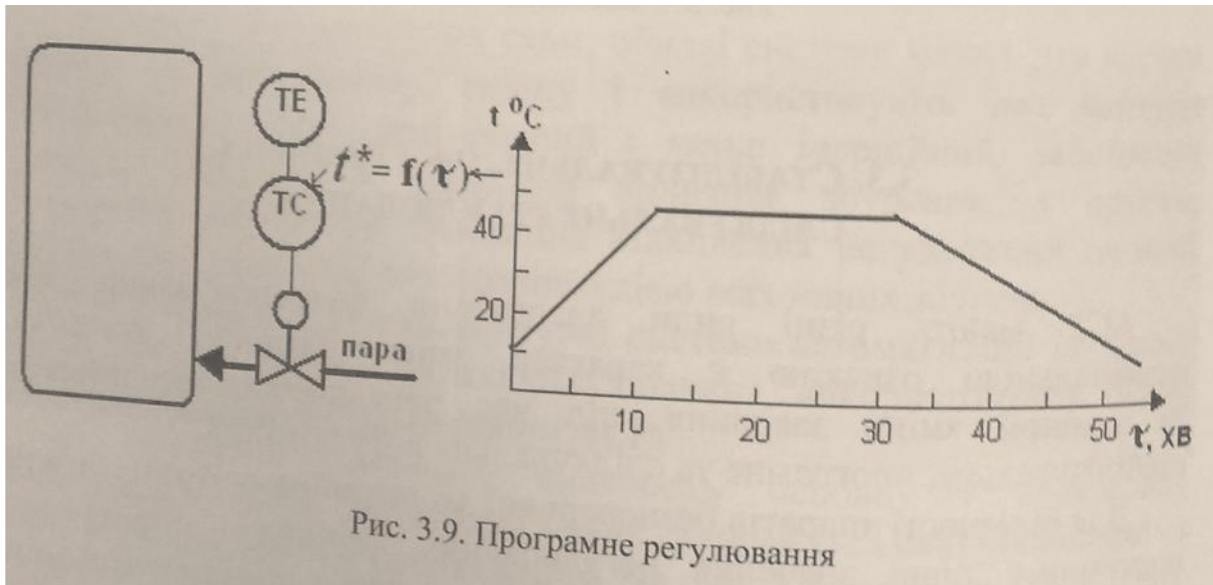


Рис. 3.9. Програмне регулювання

У системах **слідкувального регулювання** завдання також є змінним і залежить від зміни іншої змінної, тобто $X^* = f(X_1)$ (рис. 3.10). До таких систем, наприклад, відносяться всі системи регулювання співвідношення двох витрат, коли при зміні значення однієї витрати повинна змінитись витрати іншого параметра, зберігаючи задане співвідношення між ними.

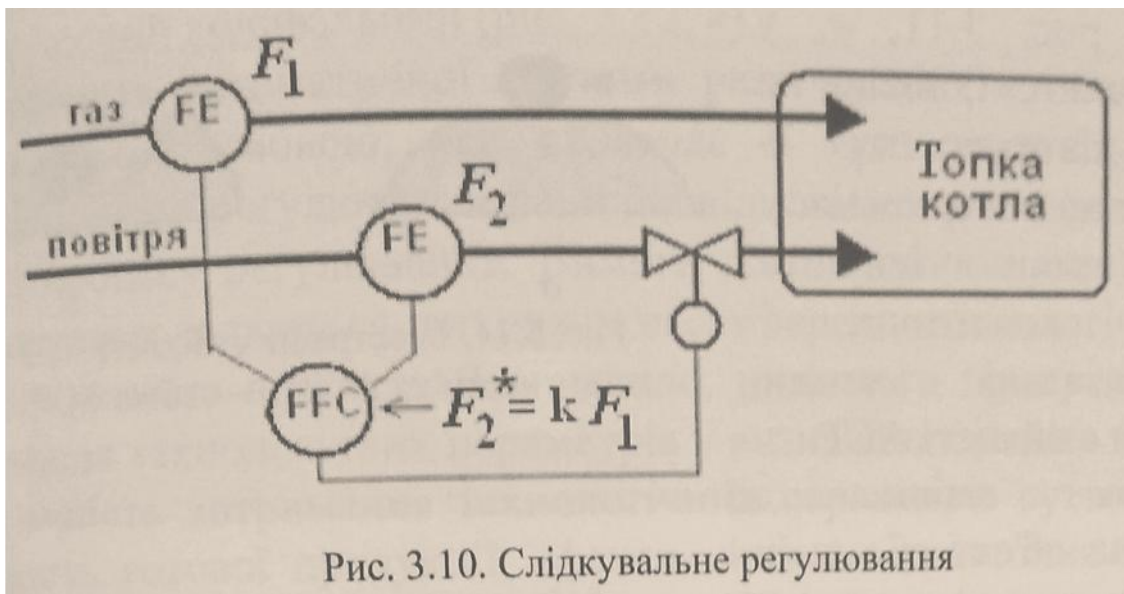


Рис. 3.10. Слідкувальне регулювання

4. Стійкість і якість процесів регулювання

Технологічні процеси, які відбуваються в об'єктах регулювання, перебувають під дією різного роду збурень. Збурення порушують нормальний перебіг технологічного процесу, тому основним призначенням АСР є або підтримання заданого постійного значення регульованого параметра, або підтримання заданого постійного значення регульованого параметра, або зміна його за визначеним законом.

На автоматичну систему регулювання можуть діяти два види збурень – за навантаженням і за зміною завдання. Збурення за навантаженням - це зміна кількості речовини або енергії, які витрачаються при виконанні технологічного процесу і діє на об'єкт. Збурення за завданням – це зміна заданого значення регульованої змінної, яке діє на регулятор. Обидва види збурень призводять до виникнення перехідного процесу.

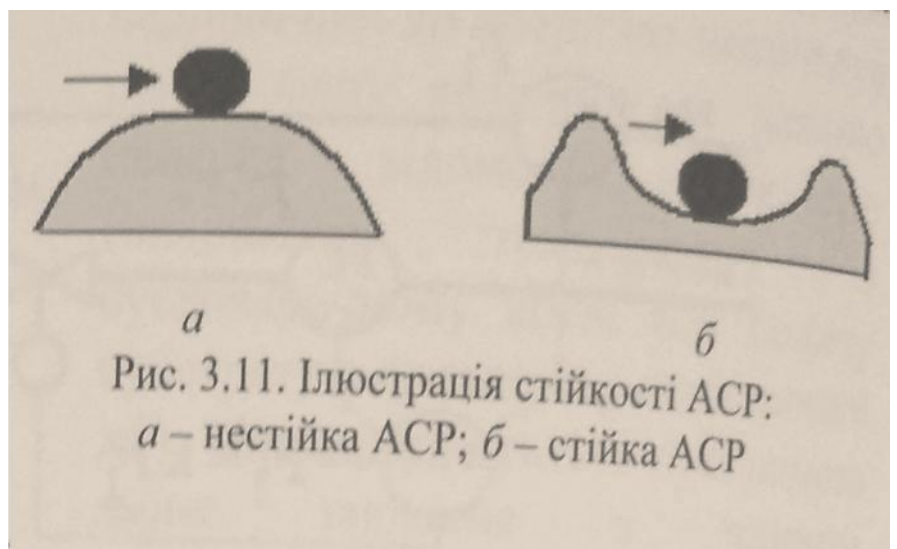
Властивість автоматичної системи регулювання відновлювати стан рівноваги, з якого вона була виведена під впливом тих чи інших впливів, називається **стійкістю**. Стійкість – найважливіша умова працездатності автоматичної системи регулювання. Якщо система не має стійкості, то вона не може мати практичного використання.

На рис. 3.11 проілюстровано поняття стійкості. На рис. 3.11, б пояснює функціонування стійкої АСР. Тобто, якщо штовхнути кульку з відповідними зусиллям, то кулька повернеться у вихідний стан. Але якщо зусилля буде значним, то кулька може вийти за відповідні межі (межі стійкості) і не повернеться у вихідний стан. Як видно на рис. 3.11, а, у нестійкій системі, якщо на кульку діятиме сила – кулька діятиме сила – кулька вже не повернеться у вихідний стан. Існують спеціальні аналітичні і експериментальні методи визначення стійкості АСР.

Внаслідок зміни дії збурення на об'єкт або зміни завдання на регулятор, в АСР виникає **перехідний процес** – перехід під попереднього до наступного станів рівноваги.

Якщо система регулювання після нанесення збурення

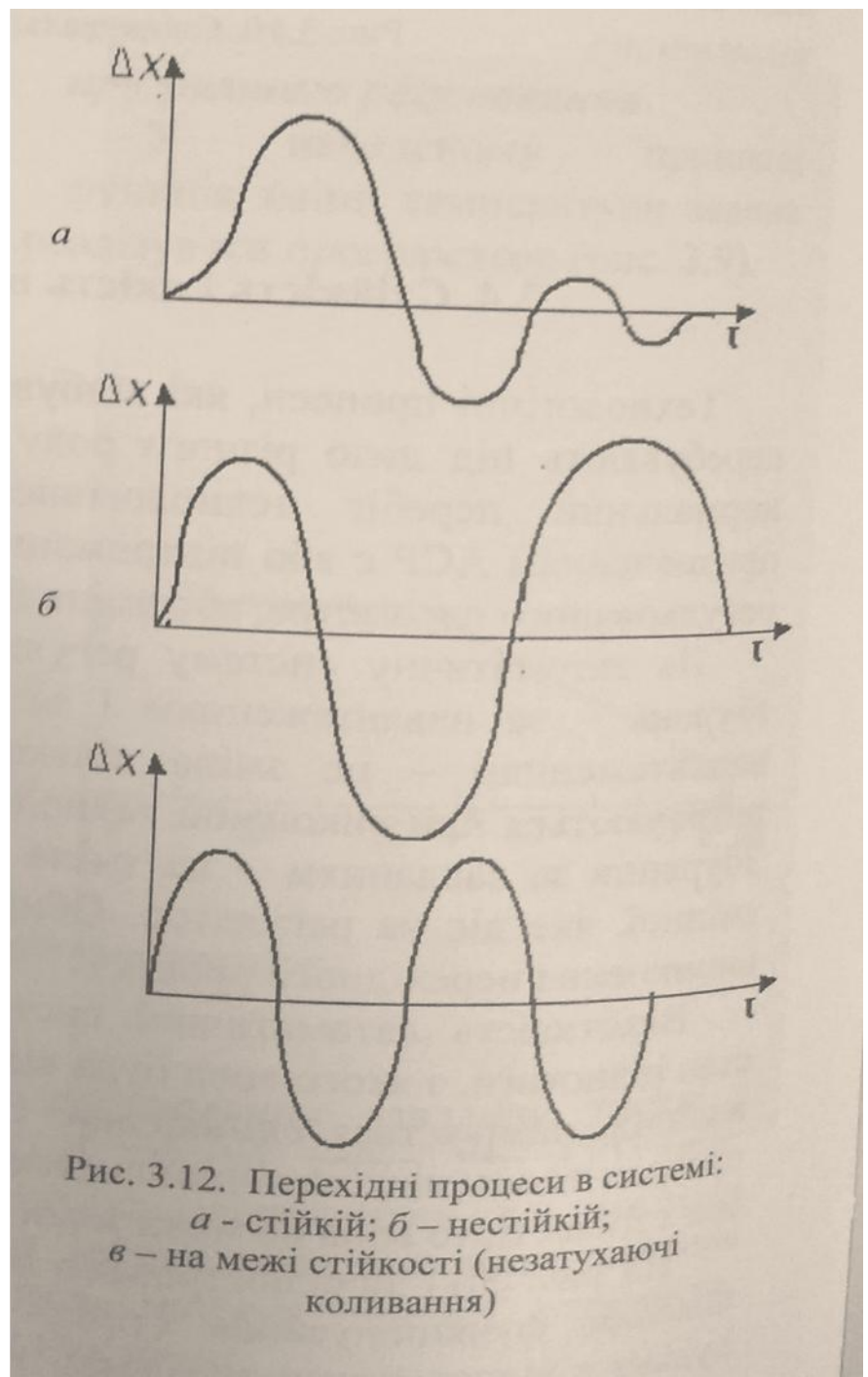
повертається в заданий стан рівноваги (коли $\Delta X = 0$), то



така АСР називається процес переходу від одного стану рівноваги до іншого має збіжний характер (рис.3.112,а).

Якщо система регулювання після порушення рівноваги, викликаного збуренням, з часом віддаляється від стану рівноваги (коли $\Delta X > 0$), то така система називається нестійкою, а перехідний процес в ній – розбіжним (рис. 3.12,б).

Якщо система регулювання після порушення рівноваги, викликаного збуренням, здійснює періодичні коливання, що не затухають, то така АСР знаходиться на межі стійкості, а її перехідний процес – незатухаючий коливальний (рис. 3.12,в).



Стійкість автоматичної системи регулювання є основною, але недостатньою умовою, яка визначає її працездатність. Система автоматичного регулювання повинна відповідати певним показникам якості процесу регулювання. Вимоги до показників якості процесів регулювання задаються, виходячи насамперед з технологічних вимог до конкретного процесу. Як правило, ці вимоги припускають деякі коливання технологічних параметрів у визначених межах.

Точність дотримання технологічних параметрів суттєво впливає на якість готової продукції, ефективність використання сировини і матеріальних ресурсів, тобто на якість і собівартість продукції. Але необґрунтоване завищення вимог до якісних показників АСР не завжди виправдовується, оскільки потребує використання більш

складних схем автоматизації, відповідних високоточних приладів, тобто потребує більших витрат.

Для оцінювання якості регулювання використовують прямі та непрямі показники.

До прямих належать ті, які можна одержати безпосередньо на графіку перехідного процесу (рис. 3.13). На рисунку зображено коливальний 1 та аперіодичний 2 збіжні перехідні процеси. Максимальне відхилення X_1 (перша амплітуда) називають **динамічною похибкою**, а відхилення по закінченні перехідного процесу $\Delta X_{ст}$ – **статичною**.



Важливим показником є **час регулювання t_p** . Його визначають до моменту, коли можна чітко встановити, що $\Delta X = const$ (або $\Delta X_{ст} = 0$ в астатичній системі), чи коли $X(t)$ не перевищує значення $0,05X_1$. На основі вимірів амплітуд коливань X_1, X_2, X_3 відносно нового усталеного значення X розраховуються показники, які характеризують стійкість АСР і є показниками якості перехідного процесу. Такими показниками є **перерегулювання** $\frac{X_2}{X_1} \cdot 100\%$ та **ступінь затухання**: $\Psi = \frac{X_1 - X_3}{X_1}$. (3.1)

Наприклад, у більш стійкій АСР виникає аперіодичний (без коливань) процес, тобто $\Psi = 1$. Якщо в системі виникли автоколивання ($X_3 = X_1$), то $\Psi = 0$. Такий перехідний процес характерний лише для систем з позиційними регуляторами і неприпустимими для інших. Якщо кожна наступна амплітуда коливань перевищує попередню ($|\Psi| > 1$), система є нестійкою. Що неприпустимо. Таким чином, стійкою є АСР, що приходить до нового стану рівноваги. Перехідні процеси в ній бажано мати $0,75 < \Psi \leq 1,0$.

Виникає запитання: яким значенням показників якості повинна відповідати система? Це розв'язується в кожному конкретному випадку і визначається технологічними вимогами до системи – особливостями технологічного режиму та регламенту. Так, за технологічним регламентом завжди встановлюються допустимі відхилення від заданого режиму, тобто повинно бути $X_1 \leq X_{доп}$ (допустиме значення). Часто в процесі роботи необхідно, щоб регульований параметр не

змінював знаку відносно $X_{зд}$, і тоді в системі потрібно забезпечити аперіодичні процеси. Слід відзначити, що технологічні вимоги до АСР, які працюють зі складними об'єктами, досить жорсткі.

Якщо треба одержати узагальнену оцінку процесу регулювання, то використовують непрямі показники – критерії якості, наприклад, лінійний **інтегральний**:

$$I_1 = \int_0^{t_p} \Delta X dt. \quad (3.2)$$

Цей критерій має чіткий фізичний зміст: необхідно забезпечити мінімум площі під кривою перехідного процесу ($I_1 \rightarrow \min$), що відповідало б зменшенню відхилення X_1 та скороченню t_p . Для оцінювання якості аперіодичних перехідних процесів зручно використовувати інтегральний критерій, а для коливальних – **квадратичний інтегральний**:

$$I_2 = \int_0^{t_p} \Delta X^2 dt. \quad (3.3)$$

Оскільки система автоматизації складається з об'єкта регулювання та регулятора, то на її властивості і показники якості перехідних процесів впливають як властивості об'єкта регулювання, так і властивості регулятора.

5. Основні властивості об'єктів регулювання

Об'єкт регулювання є основною складовою частиною автоматичної системи і визначає її характер. Деякі властивості об'єкта сприяють якісному процесу регулювання, інші заважають, тому визначення характеристик і властивостей об'єкта регулювання є дуже важливим завданням.

Незважаючи на широку різноманітність об'єктів регулювання, всі вони мають ряд загальних властивостей: самовирівнювання, ємність, інерційність і запізнення.

Самовирівнювання – здатність об'єкта самостійно надходити до нового стану рівноваги після нанесення на нього збурення. Розглянемо цю властивість на прикладі резервуара, вхідними діями на який є зміна притоку та стоку рідини в ємність, а вихідною величиною, яка характеризує стан об'єкта, є зміна рівня в ньому (рис.3.14).

Якщо, наприклад, збільшився приток в об'єкт (рис.3.14, а), то це приводить до збільшення рівня рідини. Внаслідок цього зростає гідростатичний тиск, що призводить до збільшення стоку. Різниця між притоком і стоком зменшується, тобто зменшується швидкість рівня, при достатній зміні рівня приток і сток зрівнюються й настає новий стан рівноваги.

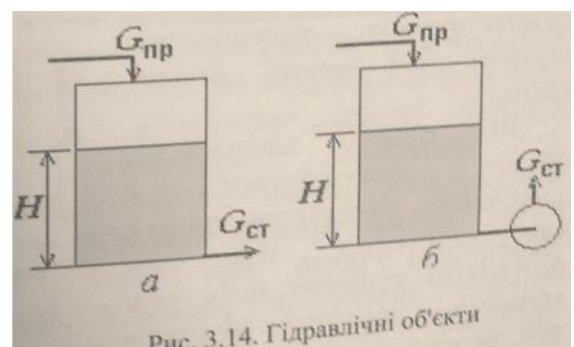


Рис. 3.14. Гідравлічні об'єкти

Збільшення притоку в об'єкті (рис.3.14,б)також спричинює зростання рівня та гідростатичного тиску. Але збільшення останнього не призводить до збільшення стоку і досягнення нового стану рівноваги, оскільки на стоці встановлено насос, який має певну продуктивність. Тому різниця між притоком і стоком залишається незмінною і рівень зростає з постійною швидкістю. Отже наявність, самовирівнювання існує, коли зміна вихідної величини певним чином впливає на зміну вхідної дії, що дає змогу об'єкту самостійно переходити до нового стану рівноваги.

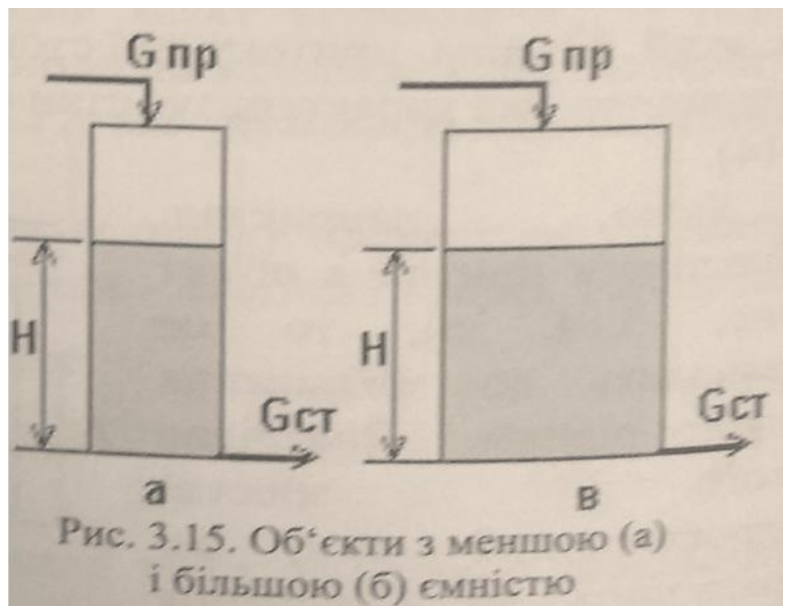
Об'єкти, які мають властивість самовирівнювання, називаються статичними, а без самовирівнювання – астатичними.

Наявність самовирівнювання полегшує автоматичне регулювання, збільшує стійкість АСР у цілому, Більше 95% об'єктів галузі мають цю властивість.

Ємність об'єкта показує кількість речовини або енергії, що акумулюється в об'єкті при даному значенні вихідної величини. Наприклад, при однаковій температурі в різних об'єктах міститься різна кількість теплової енергії. Що залежить від їх теплоємності. Вплив ємності на якість регулювання розглянемо також на прикладі гідравлічних об'єктів (рис. 3.15).

Очевидно, що при дії однакового збурення рівень буде змінюватися з більшою швидкістю в тому об'єкті, ємність якого менша. Але краще піддаються процесу автоматичного регулювання об'єкти, які мають більшу ємність.

Ще однією властивістю об'єкта регулювання є **запізнення**, показником якого є час запізнення. Під ним розуміють різницю часу між моментами нанесення збурення або зміною вхідної величини та початком зміни вхідної змінної. Розрізняють запізнення перехідне і транспортне. **Перехідне (ємнісне) запізнення**, яке також називається інерційністю, характерне для багатоемнісних об'єктів. Величина цього запізнення зростає зі збільшенням кількості ємностей і виникає під час подолання потоком речовини або енергії опору, які розділяють гідравлічні, теплові та інші ємності об'єкта.



Транспортне (чисте) запізнення – час, необхідний для того, щоб потік речовини або енергії, який має певну швидкість, пройшов відстань від місця внесення збурення до місця, де вимірюється значення регульованого параметра.

Загальне запізнення складається з суми окремих запізнень. Запізнення завжди негативно впливає на якість регулювання, тому необхідно намагатися його зменшити.

Властивості об'єкта регулювання впливають на показники якості процесу регулювання.

Розглядають статичні і динамічні характеристики об'єкта управління.

Статичною характеристикою об'єкта називають залежність його вихідної величини від вхідної в усталеному режимі. Статичні характеристики об'єкта показують його властивості тільки в рівноважному стані і визначаються експериментальним або аналітичним шляхом. Більшість реальних об'єктів нелінійні. Розрахунок таких систем дуже складний, тому використовуються методи лінеаризації. Для характеристики об'єкта в інших станах необхідно знайти його динамічні властивості.

Динамічною характеристикою об'єкта називається зміна вихідної (регульованої) величини в часі у перехідному режимі. Найбільш розповсюдженим експериментальним методом визначення динамічних характеристик є побудова кривої розгону, яка визначає зміну регульованої величини при нанесенні на вхід об'єкта миттєвого стрибкоподібного збурення. За допомогою кривої розгону визначають такі динамічні характеристики: **запізнення (τ)**, **постійну частоту (T)** і **коефіцієнт передачі ($K_{об}$)**. На рис.3.16 показано криву розгону, яка отримана для об'єкта, наведеного на рис. 3.14, і властивості якого розглянуті вище при описі властивості самовирівнювання. На рисунку показано, що клапан притоку знаходиться на певній відстані від об'єкта. Це створює транспортне запізнення, оскільки повинен пройти деякий час після того, як клапан відкривається і рідина

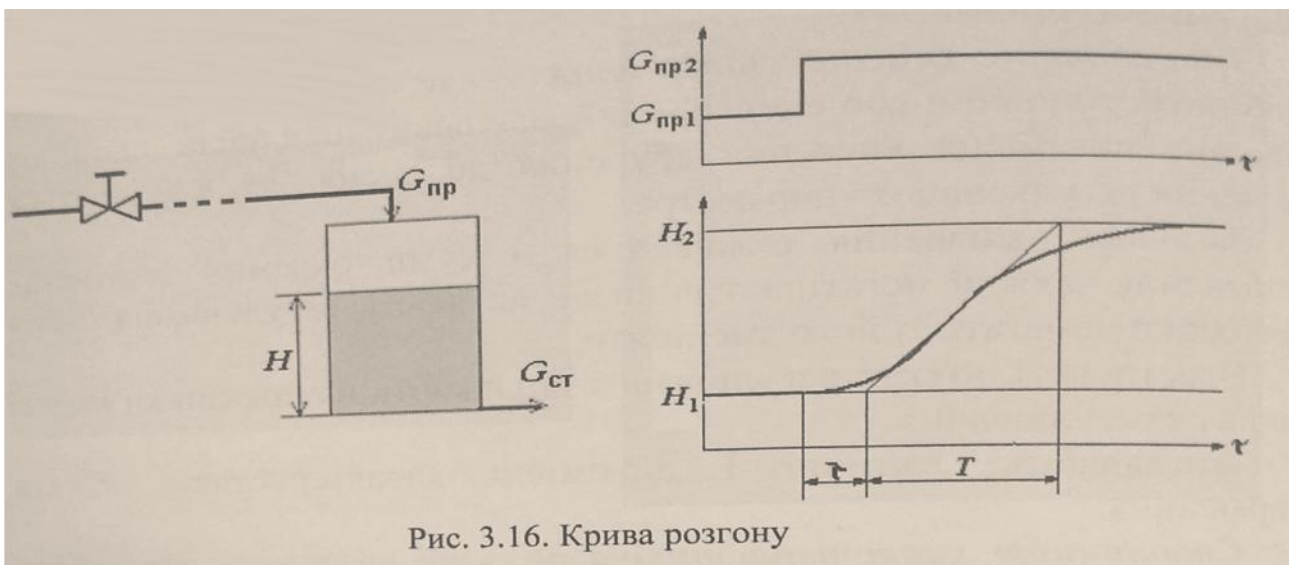


Рис. 3.16. Крива розгону

потрапить у збірник.

В усталеному режимі стік $G_{ст}$ дорівнював притоку $G_{пр1}$ і рівень в ємності був постійним зі значенням H_1 . В деякий момент часу при відкриванні клапана

стрибокподібно збільшився приток і став дорівнювати $G_{пр2}$. Оскільки $G_{пр2} > G_{ст1}$, то рівень в ємності починає

збільшуватись. Однак внаслідок збільшення гідростатичного тиску поступово починає збільшуватися стік до моменту, поки нове значення $G_{ст2}$ не стане дорівнювати притоку $G_{пр2}$. Виникне новий зрівноважений стан, при якому в об'єкті встановиться новий зрівноважений стан, при якому в об'єкті встановиться новий рівень H_2 . По кривій розгону можна визначити динамічні характеристики об'єкта. Для визначення часу запізнення τ і постійної часу T показано на рис.3.16. коефіцієнт передачі $K_{об}$ визначається як відношення зміни вихідної величини H між двома станами рівноваги до величини стрибкоподібного збурення, яке викликало цю зміну:

$$K_{об} = (H_2 - H_1) / (G_{пр2} - G_{пр1}). \quad (3.4)$$

Динамічні характеристики та параметри об'єктів регулювання використовують для вибору регуляторів та їх настанування.

6. Автоматичні регулятори

Як вже було показано раніше, основним елементом АСР є автоматичний регулятор – керувальний пристрій для вироблення управляючого сигналу на об'єкт управління з метою підтримання технологічних змінних на заданому рівні. На вхід автоматичного регулятора поступає розузгодження ΔX , яке являє собою різницю між поточним значенням регульованої змінної X і його заданим значенням X^* , тобто $\Delta X = X - X^*$. Регулятор повинен виробити управляючу дію U_p , яка повинна ліквідувати розузгодження.

За способом дії автоматичні регулятори розподіляються на регулятори прямої та не прямої дії.

У регуляторах рівня (рис.3.17,а) при зміні рівня змінюється положення поплавка 1,

який через важіль 2 впливає на ступінь відкриття регулюючого органу (клапана) 3. Тобто коли рівень збільшується, клапан прикривається і зменшує надходження рідини у збірник. Задане значення рівня залежить від довжини штока 4.

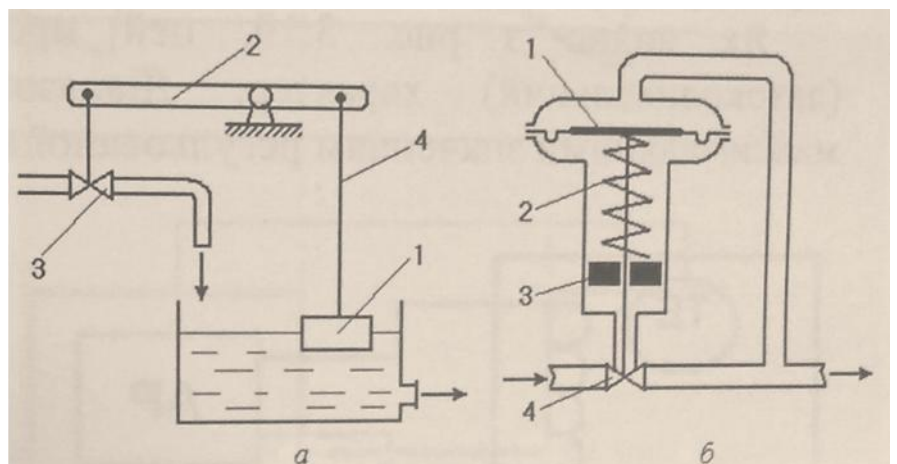


Рис. 3.17. Регулятори прямої дії:
а – рівня; б – тиску

У регуляторі тиску (рис.3.17.б) при зміні тиску

змінюється положення мембрани 1, яка через шток впливає на положення регулюючого органу (клапана) 4. При збільшенні тиску клапан прикривається. Завдання регулятора змінюється гайкою 3, переміщення якої змінює ступінь стиснення пружини 2.

У регуляторах непрямої дії енергія до їхніх елементів, насамперед до підсилювача потужності, подається від зовнішнього джерела живлення, завдяки чому можна розвивати досить великі динамічні зусилля при переміщенні регулюючих органів та забезпечувати можливість територіального розподілення автоматичного регулятора й виконавчого механізму з регулюючим органом. Крім того, регулятори непрямої дії мають більш високу швидкість й точність.

При реалізації законів керування технічними засобами автоматичні регулятори можуть бути неперервними (аналоговими) та дискретними. В неперервних регуляторах вхідні та вихідні сигнали є неперервними функціями часу, в дискретних, до яких належать релейні (позиційні), імпульсні та цифрові, вихідний сигнал має стрибкоподібну форму або є послідовністю імпульсів.

У двопозиційних регуляторах регулюючий орган може займати одне з двох крайніх положень, наприклад, «Відкрито» або «Закрито». Зокрема, при регулюванні температури в теплообміннику (рис.3.18) позиційний регулятор переключає регулюючий орган при досягненні температури заданого максимального або мінімального значення (вмикає або вимикає теплоелектронагрівач). На рис. 3.19 показано характер процесу двопозиційного регулювання.

Як видно на рис. 3.19, цей процес має незатухальний (автоколивальний) характер. Діапазон між мінімальним і максимальним значенням регульованої величини

називається зоною нечутливості позиційного регулятора, тому що коли значення

регульованої величини знаходиться всередині цієї зони, регулятор не реагує на її зміну. Переключення регулюючого органу відбувається лише тоді, коли регульована величина досягне однієї меж зони

нечутливості. Амплітуда автоколивань залежить насамперед від величини зони нечутливості. Але її зменшення викликає збільшення частоти перемикань регулюючого органу, що призводить до зменшення терміну роботи АСР. Частота переключень залежить також від сталої часу T об'єкта регулювання. В об'єктах з малими значеннями T регульована величина змінюється швидко, тому при регулюванні будуть відбуватися часті переключення, і система швидко виробить

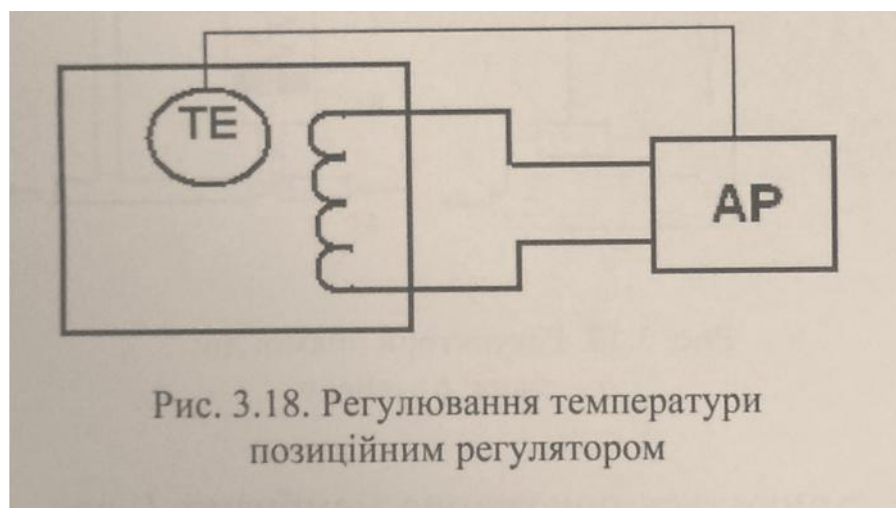


Рис. 3.18. Регулювання температури позиційним регулятором

свій ресурс. Таким чином, двопозиційні регулятори використовують для тих процесів. Які відбуваються в достатньо інерційних об'єктах, які мають велике значення ємності, а технологічні вимоги допускають досить значні коливання регульованої змінної.

У **регуляторів неперервної дії** при неперервній зміні сигналу на вході регулятора регулюючий орган також переміщується неперервно. Залежність, яка показує, як змінюється регульовальна дія регулятора (вихідний сигнал U_p) від величини розузгодження (вхідний сигнал ΔX) $U_p = f(\Delta X)$, називається законом регулювання.

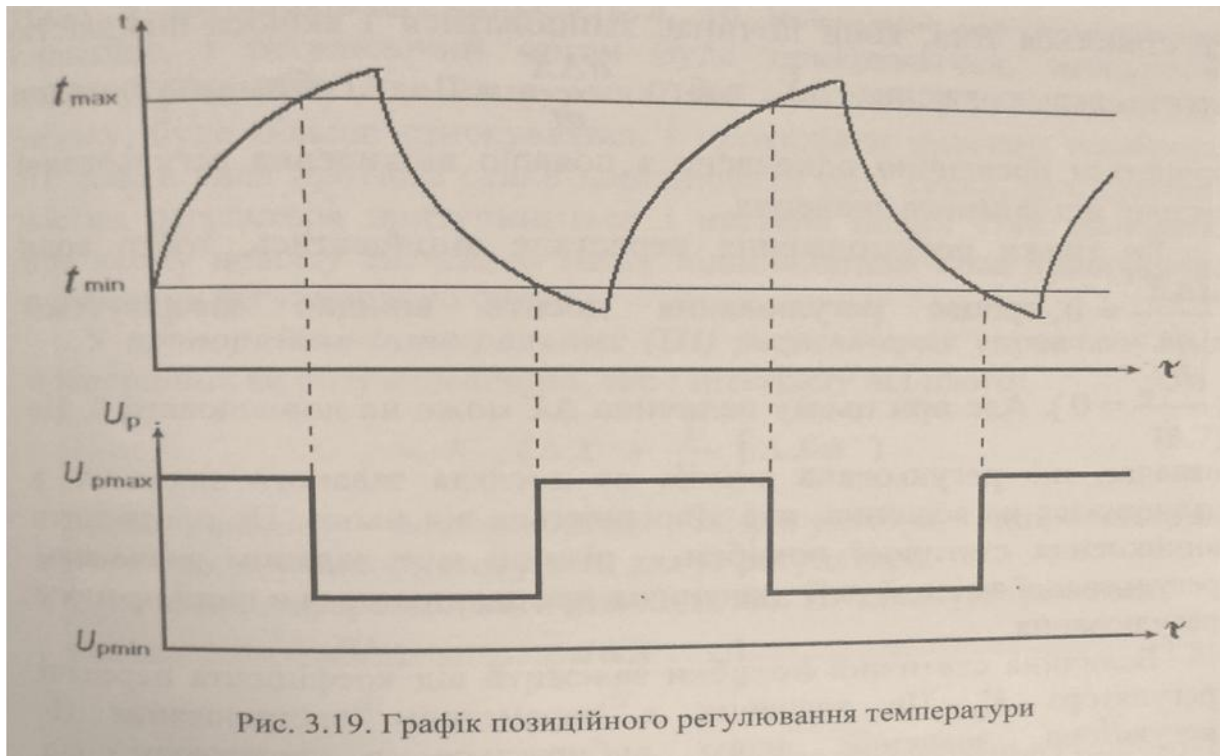


Рис. 3.19. Графік позиційного регулювання температури

У регуляторах неперервної дії можуть використовуватися такі закони регулювання: пропорційні (П-регулятори); інтегральні (І-регулятори); пропорційно-інтегральні (ПІ-регулятори); пропорційно-диференціальні (ПД-регулятори).

Розглянемо властивості деяких з них.

У **пропорційних (П) регуляторах** управляюча дія пропорційна сигналу розузгодження:

$$U_p = K_p \cdot \Delta X. \quad (3.5)$$

Для аналізу особливостей П-регулятора продиференціюємо рівняння 3.5:

$$dU_p/dt = K_p d(\Delta X)/dt \quad (3.6)$$

З (3.6) виходить, що процес регулювання почнеться, коли управляючий сигнал U_p почне змінюватись, тобто $\frac{dU_p}{dt} \neq 0$. Це станеться тоді, коли починає змінюватись з якоюсь швидкістю сигнал розузгодження ΔX , тобто $\frac{d\Delta X}{dt} \neq 0$. Тобто регулювання

почнеться практично одночасно з появою відхилення регульованої змінної від заданого значення.

Як тільки розузгодження перестане змінюватись, тобто коли $\frac{d\Delta X}{dt} = 0$, процес регулювання досить швидко завершується ($\frac{dU_p}{dt} = 0$). Але при цьому величина ΔX може не дорівнювати 0. Це означає, що регульована змінна не досягла заданого значення, а залишилася на величині, яке відрізняється від нього. Це призводить виникнення статичної похибки – різниця між заданим значенням регульованої змінної та її значенням, яке залишається в кінці процесу регулювання.

Величина статичної похибки залежить від коефіцієнта передачі регулятора K_p . це значення є параметром настроювання П-регулятора, значення якого вибирається в залежності від властивостей об'єкта регулювання і показників якості процесу регулювання,

Що встановлюється для даної АСР. Чим більший коефіцієнт передачі, тим менша статична похибка. Але збільшення коефіцієнта передачі обмежене вимогами стійкості системи регулювання. При великих значеннях K_p незначне розузгодження ΔX може привести до значних змін U_p і процес регулювання буде наближатися до меж стійкості, а характер перехідного процесу наближатиметься до автоколивального, тобто до позиційного закону регулювання.

Таким чином, П-регулятори мають добрі динамічні характеристики, тобто процес регулювання характеризується малим часом регулювання і погані статичні характеристики, тому що в кінці регулювання виникає статична похибка. Тому П-регулятори використовуються у випадках, коли час регулювання має бути невеликим, а технологічний процес припускає наявність статичної похибки.

Наведені на рис. 3.17 регулятори прямої дії працюють за пропорційним законом регулювання. Наприклад, якщо значення тиску в трубопроводі збільшиться, то мембрана прогинатиметься сильніше, і регулюючий орган буде прикриватися, зменшуючи витрату речовини. Але й пружина, яка виступає у ролі зворотного зв'язку, буде більше стискуватись і протидіяти прогину мембрани. Як тільки сила протидії стане дорівнювати силі тиску, рух рухомих частин регулятора призупиниться і настане новий стан рівноваги, при якому новому значенню тиску відповідатиме нове пропорційне положення регулюючого органу.

У *пропорційно-інтегральних (ПІ) регуляторах* управляюча дія пропорційна як розузгодженню, так і інтеграла від нього:

$$U_p = K_p(\Delta X + \frac{1}{T_i} \int_0^{t_p} \Delta X dt) \quad (3.7)$$

Для аналізу рівняння (3.8) видно, що процес регулювання ($\frac{dU_p}{dt} \neq 0$) починається, як і в системі з П-регулятором, коли почнеться змінюватись розузгодження

$\left(\frac{d\Delta X}{dt} \neq 0\right)$. Але закінчиться процес регулювання $\left(\frac{dU_p}{dt} = 0\right)$ лише тоді, коли регульована величина стане дорівнювати заданій, тобто коли $\Delta X=0$. За рахунок цього ІІІ-регулятор ліквідує статичну похибку, але має час регулювання приблизно вдвічі більший, ніж у ІІ-регулятора.

Крім коефіцієнта пропорційності K_p , регулятор має також настройку часу інтегрування T_i , яка визначає «вагу» інтегральної складової. Збільшення часу інтегрування приводить до збільшення інерційності роботи інтегральної складової, тобто до збільшення часу регулювання.

У випадках, коли необхідно поліпшити динамічні характеристики ІІ- та ІІІ-регуляторів, а саме збільшити швидкість реагування регулятора на виникнення розузгодження, використовуються **пропорційно-диференціальні ІІД- та пропорційно-інтегрально-диференціальні ІІІД-регулятори**, в які додатково введено диференціальну складову. Наприклад, для ІІІД-регулятора:

$$U_p = K_p \left(\Delta X + \frac{1}{T_i} \int_0^{t_p} \Delta X dt + T_d \frac{d(\Delta X)}{dt} \right). \quad (3.9)$$

Аналіз цього рівняння після його диференціювання показує, що в цьому регуляторі процес регулювання починається вже при появі сигналу по прискоренню зміни розузгодження $\frac{d^2(\Delta X)}{dt^2}$, тобто значно швидше, ніж у ІІІ-регуляторів. Форсування початку регулювання призводить до того, що системи з цими регуляторами мають маленьку динамічну похибку. Але, незважаючи на ці переваги, ІІІД-регулятори використовують рідко, тому що вони складніші як за конструкцію, так і в настроюванні. Диференціальні складова налаштовується часом диференціювання T_d або коефіцієнтом диференціювання $K_d = K_p \cdot T_d$.

У виразах для законів регулювання показані настройки регуляторів, змінюючи які, можна в досить широкому діапазоні змінювати дію регулятора, пристосовуючи його до конкретних умов роботи. При технічній реалізації законів регулювання настройки регулятора виставляються на конкретних технічних засобах або програмним шляхом. Ті настройки, що забезпечують найкращі результати роботи АСР, називаються оптимальним.

Імпульсні регулятори використовуються в поєднанні з інтегруючими виконавчими механізмами, в якості яких використовуються електричні виконавчі механізми з постійної швидкістю обертання вихідного елемента. Регулятори на виході формують послідовність імпульсів напруги постійного струму, які керують виконавчим механізмом за принципом «включено-відключено». Тривалість імпульсів, а відповідно – і час спрацьовування виконавчого механізму, пропорційні розузгодженню. Імпульсні регулятори у поєднанні з виконавчими механізмами постійної швидкості дозволяють, з деякими наближенням, сформулювати традиційні закони регулювання (ІІ, ІІІ, ІІІД).

