

5. АВТОМАТИЧНІ РЕГУЛЯТОРИ І ПЕРЕХІДНІ ПРОЦЕСИ

Поняття регулятора. Класифікація. Уявлення про закони регулювання. Динамічні характеристики регуляторів і їх аналітичне та графічне подання. Структурні схеми регуляторів. Формування законів регулювання. Поняття перехідного процесу в САР. Показники якості перехідного процесу – динамічне і залишкове відхилення, квадратичний критерій якості, час регулювання. Типові перехідні процеси. Динамічний коефіцієнт регулювання. Вибір закону регулювання.

5.1. Класифікація регуляторів. Закони регулювання

Одним з основних елементів, які входять до системи регулювання, є автоматичний регулятор – пристрій, що змінює або стабілізує вихідну величину об'єкта регулювання за заданим алгоритмом шляхом впливу на його вхідну величину.

Класифікація регуляторів може здійснюватися за різними ознаками. За способом дії розрізняють регулятори *прямої і непрямой дії*. До регуляторів прямої дії відносять такі регулятори, у яких зусилля, необхідне для переміщення регулюючого органу, виникає за рахунок зміни вихідного параметра без підведення додаткової енергії. Зрозуміло, що в цьому випадку датчик (чутливий елемент) є одночасно і виконавчим механізмом.

На практиці ширшого застосування набули регулятори непрямої дії. Ці регулятори класифікуються за видом джерела енергії, що використовується для переміщення виконавчого механізму: *електричні, гідравлічні, пневматичні і комбіновані*.

Крім того, регулятори класифікуються на *релейні, безперервні та імпульсні*. Релейні регулятори називають ще позиційними. Вони не забезпечують якісного регулювання і застосовуються рідко, в основному на простих об'єктах, коли виконується умова $\tau_{об}/T_{об} < 0.2$.

Регулятори поділяють також на *екстремальні і стабілізаційні*. Екстремальні регулятори можуть використовуватися на

об'єктах, що характеризуються екстремальною статичною характеристикою, положення якої в координатному просторі в залежності від зовнішніх впливів дрейфує у часі.

Найбільше поширення отримали стабілізуючі регулятори (рис. 5.1).

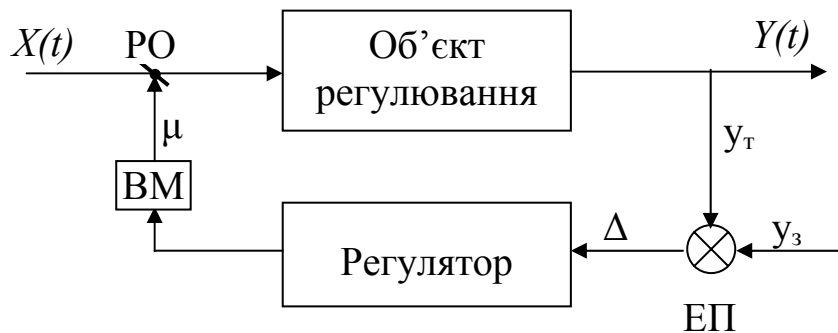


Рис. 5.1. Структурна схема стабілізуючої САР.

На схемі визначено: μ – вплив регулятора на регулюючий орган (РО) за допомогою виконавчого механізму (ВМ); Δ – сигнал розузгодження, виділений на елементі порівняння (ЕП) і рівний векторній різниці між поточним (y_t) і заданим (y_z) значеннями регульованої величини.

Залежність керуючого сигналу, що виробляється регулятором, від сигналу розузгодження у часі визначається *законом регулювання*, в загальному вигляді ця залежність може бути подана:

$$\mu = k\varphi(\Delta, t) \quad (5.1)$$

У залежності від виду функції (5.1) стабілізуючі регулятори класифікуються на *інтегральні (І)*, *пропорційні (П)*, *пропорційно-інтегральні (ПІ)*, *пропорційно-диференціальні (ПД)* і *пропорційно-інтегрально-диференціальні (ПІД)*. Закон регулювання формується за допомогою зворотних зв'язків. З урахуванням динамічних властивостей об'єкта керування він визначає вид і якість перехідного процесу в САР.

Розглянемо детальніше закони регулювання і динамічні характеристики відповідних регуляторів.

Інтегральний (І) закон регулювання. Регулятори, що реалізують даний закон, часто називають астатичними, або

регуляторами без зворотного зв'язку. У динамічному відношенні І-закон регулювання подібний інтегрувальній ланці, рівняння регулятора і передавальна функція мають вигляд:

$$\mu = \frac{k_p}{T_i} \int_0^t \Delta dt ,$$

або в диференціальній формі:

$$T_i \frac{d\mu}{dt} = k_p \Delta , \quad (5.2)$$

де k_p – статичний коефіцієнт передачі регулятора; T_i – час інтегрування.

Із (5.2) випливає, що швидкість руху регулюючого органа для даного закону пропорційна величині розузгодження. На рис. 5.2 а показана перехідна функція І-регулятора. Ці регулятори характеризуються відсутністю в стані рівноваги однозначної залежності між значенням регульованого параметра і положенням регулюючого органу, що обумовлено відсутністю зворотного зв'язку.

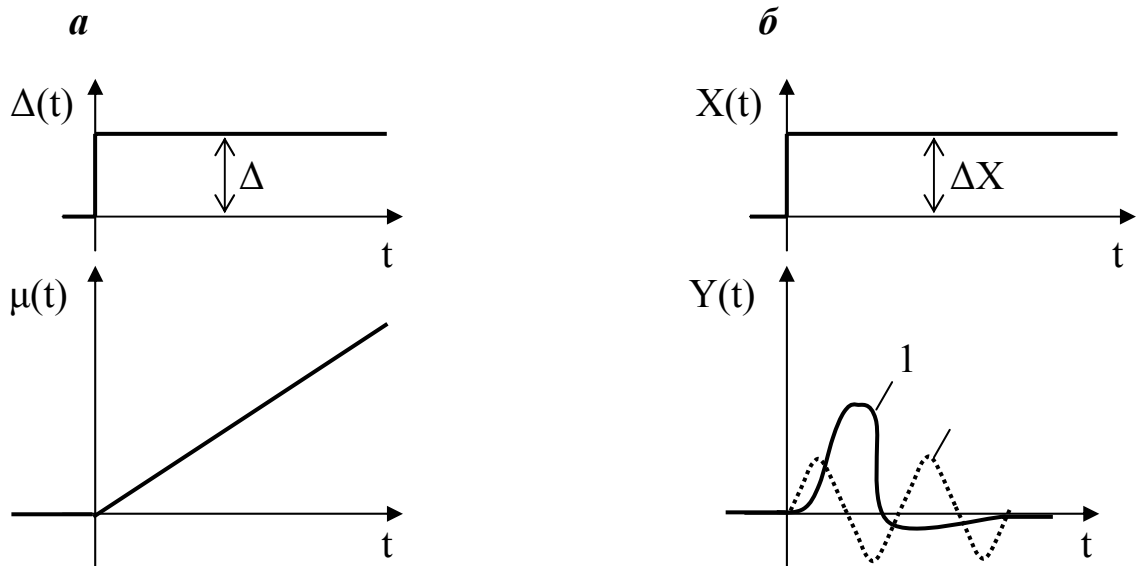


Рис. 5.2. Перехідна функція І-регулятора (а) і перехідні процеси САР з різними об'єктами (б).

Регулятори, які працюють за даним законом, завжди приводять регульований параметр до заданого значення, якщо об'єкт володіє властивістю самовирівнювання (рис. 5.2 б, крива 1). Однак тривалість перехідного процесу досить значна.

Застосування даного закону регулювання при керуванні астатичним об'єктом, що не володіє властивістю самовирівнювання, приводить до перехідного процесу у вигляді незатухаючих коливань вихідного параметра (крива 2, рис. 5.2), причому амплітуда коливань тим більша, чим більше збурення на об'єкт з боку навантаження. Таким чином, застосування регуляторів без зворотного зв'язку в системах з астатичним об'єктом не рекомендується.

Пропорційний (П) закон регулювання. Регулятори, що реалізують даний закон, ще називають регуляторами з жорстким зворотним зв'язком, або статичними.

Рівняння П-регулятора і передавальна функція мають вигляд:

$$\mu = k_p \Delta, \quad W(p) = k_p \quad (5.3)$$

Коефіцієнт передачі регулятора (k_p) чисельно рівний переміщенню регулюючого органу, яке здійснює регулятор при відхиленні вихідної величини на одиницю її вимірювання.

Перехідна функція П-регулятора і типовий перехідний процес показані на рис. 5.3.

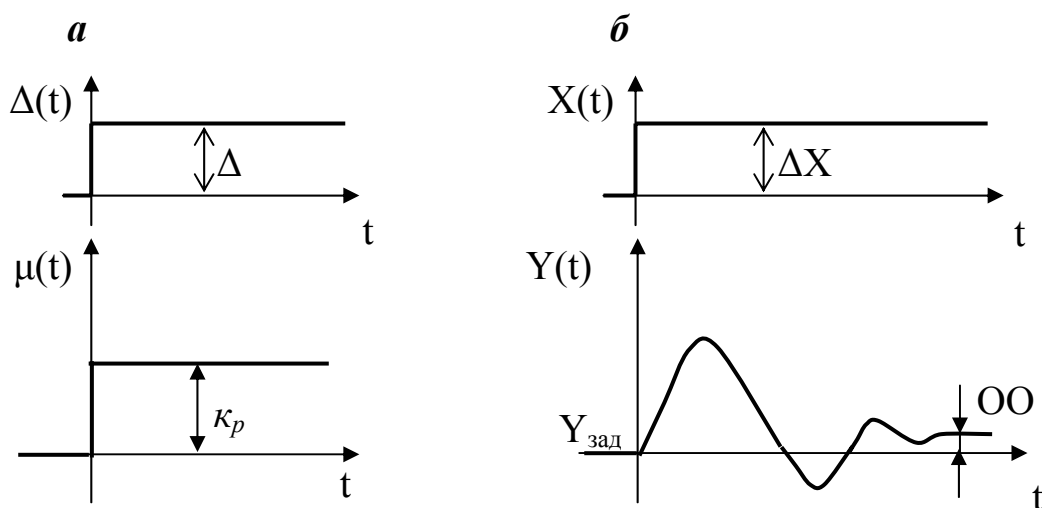


Рис. 5.3. Перехідна функція П-регулятора (а) і вид перехідного процесу в системі регулювання (б).

Це забезпечує жорсткий зворотний зв'язок. Регулюючий орган рухається тільки при відхиленні вихідного параметра від заданого значення. Регулятори, що реалізують П-закон, харак-

теризуються тим, що в сталому режимі існує певна залежність між положенням регулюючого органу і значенням регульованого параметра.

Внаслідок жорсткого зворотного зв'язку П-регулятор не має можливості привести до заданого значення регульований параметр при зміні навантаження на об'єкт. Це пояснюється тим, що переміщення регулюючого органу в нове положення, відповідне новому навантаженню, може бути зроблене тільки за рахунок відхилення регульованої величини. Перехідний процес в цьому випадку (рис. 5.3 б) характеризується залишковим відхиленням (відрізок ОО).

Це явище отримало назву *залишкової нерівномірності* регулювання, вона оцінюється *мірою нерівномірності* (δ), що дорівнює $\delta = 1/k_p = \Delta/\mu$. Таким чином, міра нерівномірності характеризується величиною відхилення регульованого параметра на одиницю переміщення регулюючого органу.

Пропорційні регулятори забезпечують стійку роботу практично всіх промислових об'єктів.

Пропорційно-інтегральний (ПІ) закон регулювання. Регулятори, які працюють за даним законом, виконують переміщення регулюючого органу пропорційно сумі відхилення та інтеграла від відхилення регульованої величини, тобто здійснюють П- та І- вплив:

$$\mu = k_p \left(\Delta + \frac{1}{T_u} \int_0^t \Delta dt \right), \quad (5.4)$$

або в диференціальній формі:

$$\frac{d\mu}{dt} = k_p \left(\frac{d\Delta}{dt} + \frac{1}{T_u} \Delta \right). \quad (5.5)$$

Із виразу (5.5) випливає, що швидкість переміщення регулюючого органу пропорційна величині відхилення і швидкості зміни регульованої величини. У динамічному відношенні ПІ-регулятор подібний системі з двох паралельно включених регуляторів: пропорційного з коефіцієнтом передачі k_p та інтегрального з коефіцієнтом передачі $k_{p2} = k_p/T_i$.

Тут час інтегрування (T_i) іноді називають часом подвоєння – це час, за який інтегральна частина регулятора подвоює ефект пропорційної частини (k_p , рис. 5.4 а).

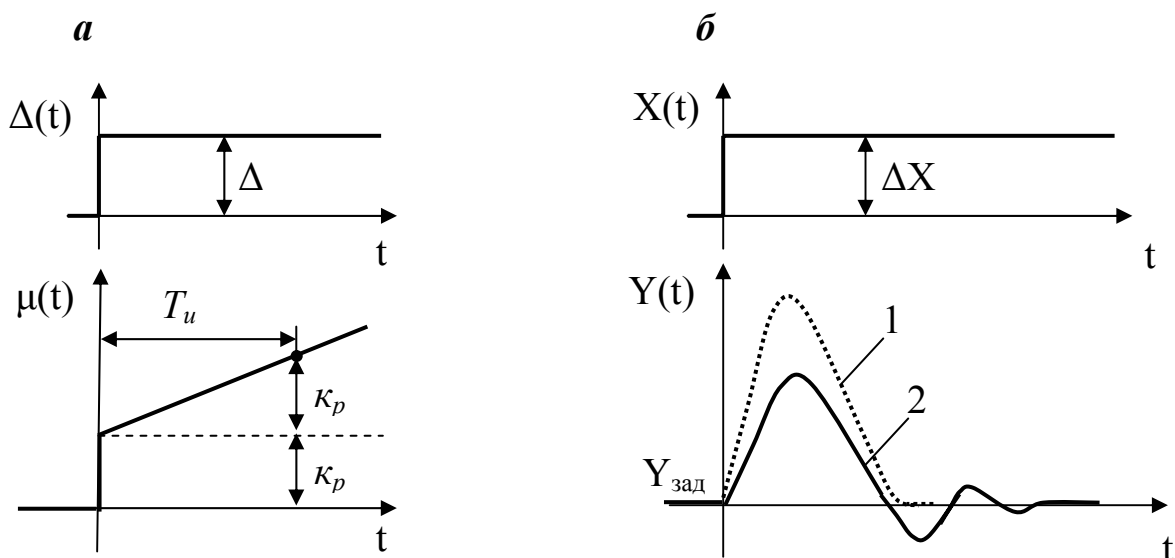


Рис. 5.4. Перехідна функція ПІ-регулятора (а) і вид перехідних процесів у системах регулювання (б).

При безмежному збільшенні часу подвоєння ПІ-регулятор перетворюється в П-регулятор.

Якщо спрямувати k_p і T_i до нуля так, щоб їх відношення було постійним, отримаємо І-регулятор з коефіцієнтом передачі k_{p2} .

Реалізовується ПІ-закон за допомогою гнучкого зворотного зв'язку.

Передавальна функція закону має вигляд:

$$W(p) = k_p + \frac{k_p}{T_u p} = k_p \frac{T_u p + 1}{T_u p} \quad (5.6)$$

Наявність гнучкого зворотного зв'язку виключає залишкову нерівномірність у перехідному процесі (рис. 5.4 б).

У залежності від динамічних властивостей об'єкта регулювання і налаштувань параметрів регулятора перехідний процес може бути аперіодичним (крива 1) або затухаючим коливальним (крива 2). У першому випадку зростає амплітуда перерегулювання, але скорочується тривалість перехідного процесу, у другому – картина зворотна.

Пропорційно-диференціальний (ПД) закон регулювання. Регулятор, що реалізує даний закон регулювання, можна зобразити у вигляді системи, що містить два паралельно працюючих типових ланки: пропорційної та ідеальної диференціюючої. Тоді рівняння ПД-закону має вигляд:

$$\mu = k_p \Delta + T_n \frac{d\Delta}{dt}, \quad (5.7)$$

де T_n - час передування.

Позитивною особливістю даного закону є те, що регулювання ведеться з урахуванням як величини відхилення регульованого параметра, так і швидкості його зміни. Чим крутіший фронт відхилення вихідної величини, тим на більшу величину переміщається робочий орган (рис. 5.5 а). Як тільки припиняється зміна регульованої величини, регулятор починає відпрацьовувати пропорційну частину. Ефект передування значно підвищує якість перехідного процесу.

Передавальна функція ПД-закону регулювання має вигляд:

$$W(p) = k_p + k_p T_n p = k_p (1 + T_n p) \quad (5.8)$$

З виразів (5.7 і 5.8) випливає, що при $T_n = 0$ регулятор перетворюється в П-регулятор. Підкреслимо, що регулятор, який враховує тільки першу похідну величини відхилення регульованого параметра, неприйнятний, оскільки при швидкості зміни параметра, що дорівнює нулю, він може мати будь-яке стає значення, значно відмінне від заданого. Тому Д-регулятор "в чистому вигляді" не існує.

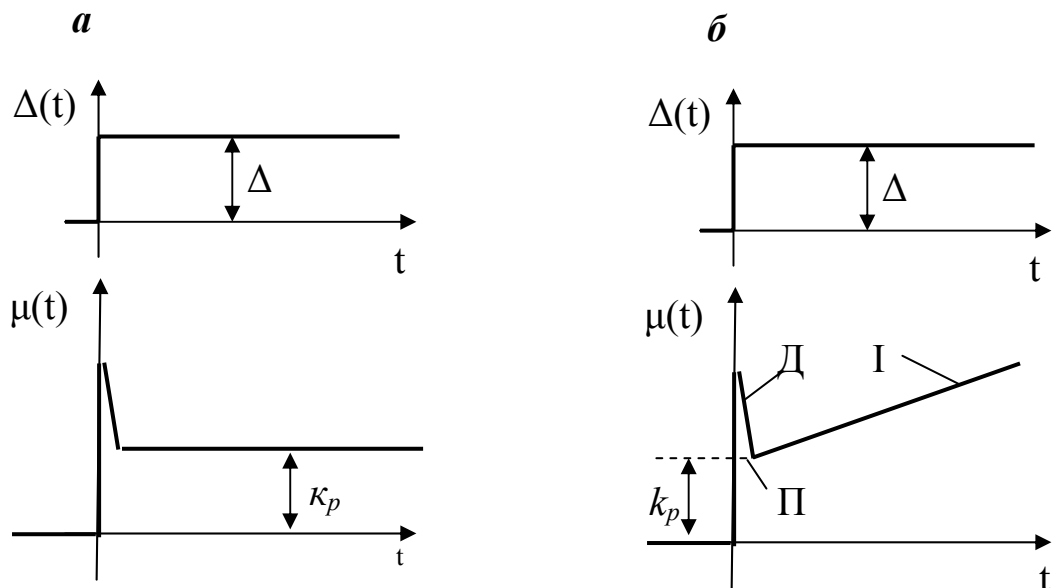


Рис. 5.5. Перехідна функція ПД (а) та ПІД- регулятора (б).

Пропорційно-інтегрально-диференціальний (ПІД) закон регулювання. Найбільш складний алгоритм, що включає вплив усіх розглянутих вище законів. Очевидно, що рівняння ПІД-закону мають вигляд:

$$\mu = k_p \left(\Delta + \frac{1}{T_u} \int_0^t \frac{d\Delta}{dt} dt + T_n \frac{d\Delta}{dt} \right) \quad (5.9)$$

Перейшовши до операторної форми, отримаємо передавальну функцію:

$$W(p) = k_p + \frac{k_p}{T_u p} + k_p T_n p = k_p \left(1 + \frac{1}{T_u p} + T_n p \right) \quad (5.9a)$$

Реалізація цього закону пов'язана із застосуванням пружного зворотного зв'язку.

На рис. 5.5 б подана перехідна функція ПІД-закону, де виділено області впливу складовими П, І і Д закону.

Регулятори з передуванням значно поліпшують якість регулювання, особливо якщо об'єкт володіє великим запізненням та інерційністю. Вид перехідного процесу відповідає кривим, показаним на рис. 5.4 б.

На закінчення потрібно зазначити, що настроювальні параметри k_p , T_i і T_n регуляторів зумовлюють вид і якість перехідного процесу системи регулювання, як і динамічні властивості об'єкта. Тому їх вибір є важливим завданням проектування і налагодження САР.

5.2. Формування законів регулювання

Раніше зазначалося, що закон регулювання визначається видом зворотного зв'язку або його відсутністю. Розглянемо це питання детальніше.

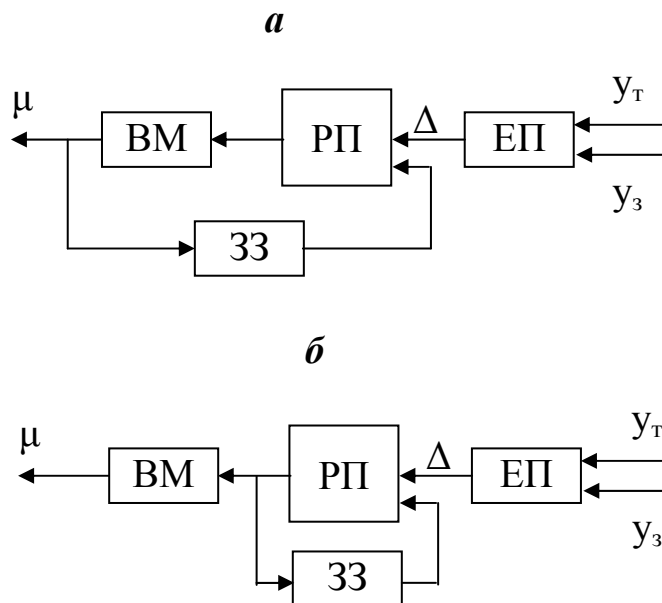


Рис. 5.6. Структурні схеми регуляторів.

На рис. 5.6 показано варіанти структурних схем регуляторів, які відрізняються за способом формування сигналу зворотного зв'язку.

Тут позначено елементи: ВМ – виконавчий механізм, РП – регулюючий пристрій, ЕП – елемент порівняння, ЗЗ – ланка зворотного зв'язку.

Зі схеми (а), що являє собою зустрічно-паралельне включення ланок, у відповідності з (3.25) маємо:

$$W(p)_p = \frac{W(p)_{pn} \cdot W(p)_{\text{вм}}}{1 + W(p)_{pn} \cdot W(p)_{\text{вм}} \cdot W(p)_{\text{зз}}} = \frac{1}{\frac{1}{W(p)_{pn} \cdot W(p)_{\text{вм}}} + W(p)_{\text{зз}}}, \quad (5.10)$$

тут $W(p)_p$ – передавальна функція регулятора.

Враховуючи, що як регулюючий пристрій використовується підсилювач з великим коефіцієнтом посилення, першим доданком знаменника у виразі (5.10) можна знехтувати. Тоді:

$$W(p)_p \approx \frac{1}{W(p)_{\text{зз}}} \quad (5.11)$$

З виразу (5.11) можна отримати передавальну функцію зворотного зв'язку, включеного за схемою (а), який забезпечує необхідний закон регулювання. Припустимо, що необхідний ПІ-закон регулювання, тоді, враховуючи передавальну функцію цього закону (5.3), отримуємо передавальну функцію ланки зворотного зв'язку:

$$W(p)_{\text{зз}} \approx \frac{1}{W(p)_p} = \frac{T_i p}{k_p (T_i p + 1)} \quad (5.12)$$

Вираз (5.12) відповідає реальній диференціюючій ланці (3.22), в якій потрібно прийняти сталу часу, що дорівнює часу інтегрування регулятора, а коефіцієнт передачі ланки – зворотному коефіцієнту передачі регулятора. Цей зворотний зв'язок реалізується за допомогою РС-елементів. Такий зв'язок іноді називають гнучким зворотним зв'язком.

Розглянемо другу структурну схему регулятора (рис. 5.6 б).

Передавальна функція регулятора:

$$W(p)_p = W(p)_{\text{вм}} \cdot \frac{1}{W(p)_{\text{зз}}} \quad (5.13)$$

Розглядаючи виконавчий механізм як інтегрувальну ланку з передавальною функцією $W(p)=k_{\text{вм}}/p$ і з урахуванням передавальної функції ПІ-закону регулювання, отримуємо передавальну функцію зворотного зв'язку:

$$W(p)_{\text{зз}} = \frac{W(p)_{\text{вм}}}{W(p)_p} = \frac{k_{\text{вм}} T_i}{k_p (T_i p + 1)} \quad (5.14)$$

Останній вираз приводиться до передавальної функції інерційної ланки першого порядку (3.19), якщо прийняти його коефіцієнт передачі ($k_{\text{зз}}$), рівним $k_{\text{зз}}=k_{\text{вм}}T_i/k_p$, а сталу часу ланки рівною часу інтегрування регулятора. Таким чином, ПІ-закон регулятора для другої структурної схеми формується зворотним зв'язком у вигляді аперіодичної ланки першого порядку.

5.3. Якість регулювання. Вибір закону регулювання

Вид перехідного процесу при регулюванні, тобто характер повернення регульованої величини до заданого значення після деякого збурення (з боку навантаження або завдання), визначає *якість регулювання*. Основними показниками якості регулювання є наступні.

Максимальне динамічне відхилення. Це найважливіший показник якості перехідного процесу, являє собою максимальну амплітуду відхилення вихідного параметра (y_l , рис. 5.7). Найбільшим відхиленням у збіжному перехідному процесі буде перше відхилення, яке безпосередньо іде за збуренням.

Залишкове відхилення. Цей показник називають ще залишковою нерівномірністю. Характеризує величину відхилення регульованої величини від заданого значення по закінченні перехідного процесу. Даний показник оцінюється мірою нерівномірності (δ), він розглядався в лекції 5, рис. 5.3 б. Залишкове відхилення характерне при застосуванні ПІ-регулятора. Залежить від навантаження на об'єкт, його динамічних властивостей і налаштувань параметрів регулятора.

Час регулювання. Це проміжок часу t_p (рис. 5.7) від моменту надходження на вхід ступінчастого впливу (завдання, збурення) до моменту, коли відхилення регульованої величини від заданого значення стає меншим деякого відносно малого числа δ (зона нечутливості регулятора).

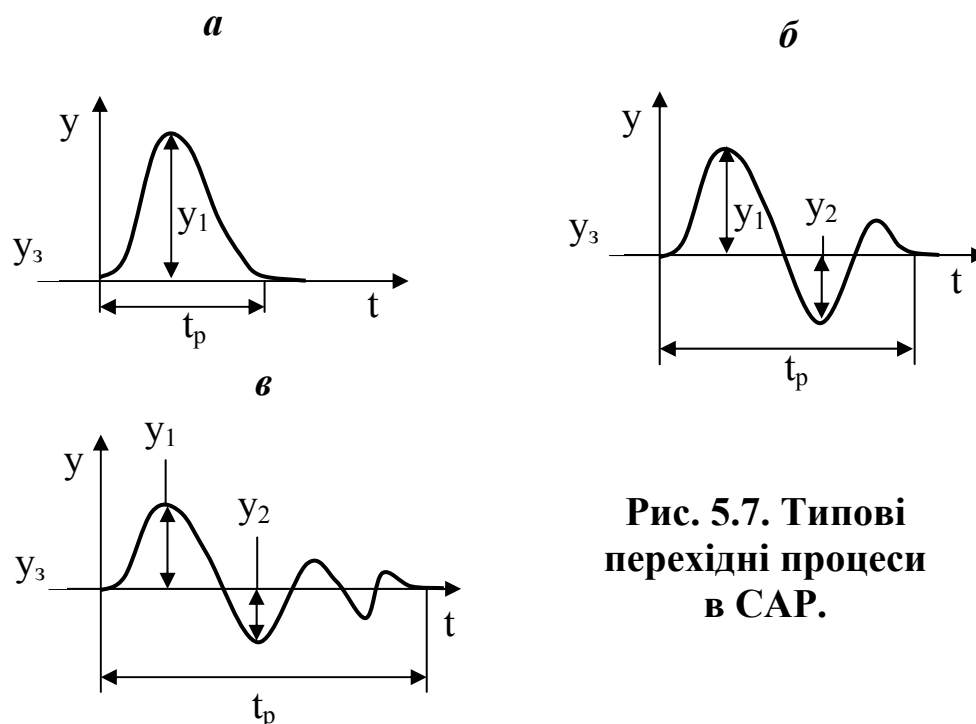


Рис. 5.7. Типові перехідні процеси в САР.

Прийнято вважати, що перехідний процес закінчиться в той момент часу, починаючи з якого, відхилення регульованої величини відрізняється від сталого значення не більш ніж на 5 %.

Квадратичний інтегральний критерій якості. Характеризує сумарну площу, обмежену кривою перехідного процесу:

$$I^2 = \int_0^{\infty} y^2 dt \quad (5.15)$$

Типові перехідні процеси. Характер перехідного процесу, а отже, і якість регулювання визначаються динамічними властивостями об'єкта керування, вибраним законом регулювання і настроювальними параметрами регулятора. Рациональний характер перехідного процесу поняття відносне. Необхідний вид перехідного процесу багато в чому зумовлюється вимогами технології керованого об'єкта. У одних випадках важливою вимогою є мінімальний час регулювання, в інших - мінімально можливе

динамічне відхилення. Однак при рівнозначних збуреннях зменшення тривалості регулювання неодмінно приведе до більшого динамічного відхилення.

Для вибору конкретного виду перехідного процесу (в залежності від технологічних вимог) запропоновано три їх типи: аперіодичний з мінімальним часом регулювання (рис. 5.7 а), процес з 20 % перерегулюванням (рис. 5.7 б) і процес з мінімальною квадратичною площею відхилення (рис. 5.7 в).

При виборі типу перехідного процесу треба керуватися наступними рекомендаціями:

1. Аперіодичний процес приймають у тих випадках, коли перерегулювання не допускається, потрібний мінімальний час регулювання, а динамічне відхилення може бути досить великим.
2. Процес з 20 % перерегулюванням доцільний, коли перерегулювання допускається, але висуваються більш жорсткі вимоги до динамічного відхилення регульованої величини. Тут потрібно врахувати, що мінімальний час першого напівперіоду є перевагою, якщо інша частина перехідного процесу, для якої відхилення від заданого значення невеликі, менш істотна.
3. Процес з мінімальною квадратичною площею відхилення потрібно приймати у випадку, якщо об'єкт регулювання вимагає мінімальної величини динамічного відхилення. Однак у цьому випадку має місце найбільше перерегулювання.

Виконаємо аналіз перехідних процесів в САР з І- і П-регулятором та астатичним об'єктом як найбільш складним.

На рис. 5.8 показана спрощена система регулювання рівня (Н) в технологічному апараті, де надходження рідкого продукту – Q_1 (керуючий параметр), Q_2 – споживання продукту (збурення по навантаженню). Наведений на схемі об'єкт буде астатичним, якщо забезпечити незалежність витрати (Q_2) від рівня в апараті (Н). При цьому споживання продукту може здійснюватися, наприклад, через шестерінчастий насос. Якщо ж допустити вільне витікання рідини, об'єкт буде статичним.

Як датчик рівня, наприклад, прийнятий поплавков з індуктивним датчиком (ІД1), включеним у мостову схему.

Регулюючий пристрій містить схему порівняння сигналів, побудовану на двох мостах змінного струму з індуктивними

датчиками і трансформаторами, підсилювач і виконавчий механізм (ВМ) з регулюючим органом (РО).

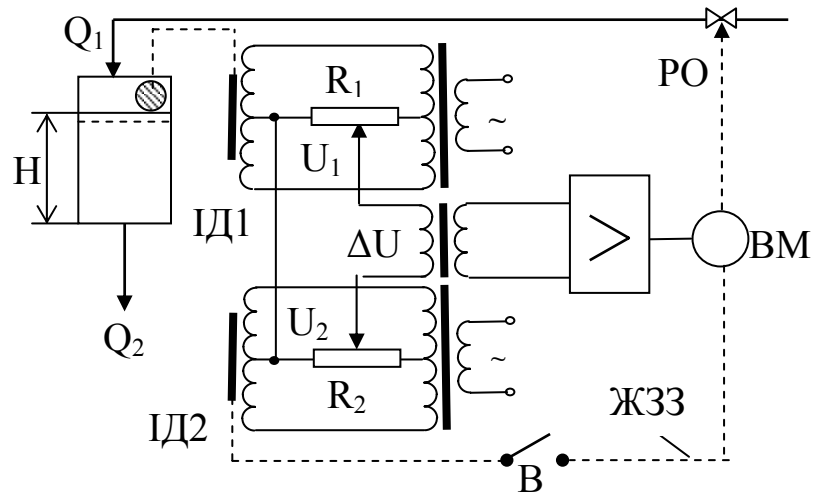


Рис. 5.8. Система регулювання рівня.

Виконавчий механізм забезпечений індуктивним датчиком положення (ІД2), який виконує роль жорсткого зворотного зв'язку (ЖЗЗ). На схемі умовно передбачене відключення зворотного зв'язку за допомогою переривника (В). Таким чином, при відключеному зворотному зв'язку регулюючий пристрій реалізує І-закон регулювання, при включеному – П-закон.

Розглянемо роботу САР з інтегральним регулятором і проаналізуємо перехідний процес (рис. 5.9 а).

Для спрощення припустимо, що існує лінійна залежність між:

- зміною рівня рідини і напругою U_T ;
- зміною положення РО і витратою рідини Q_1 ;
- зміною положення РО і напругою зворотного зв'язку $U_{ЗЗ}$.

Крім того, нехтуємо зоною нечутливості регулятора.

Припустимо, що до певного моменту часу (t_0) система регулювання перебувала в стані рівноваги, тобто надходження рідини в апарат дорівнювало споживанню ($Q_1=Q_2$), а рівень рідини в об'єкті відповідав заданому значенню (H_3).

У цей час $U_1=U_2$, на вхід підсилювача надходить сигнал розузгодження $\Delta U=0$. Для варіанта, який розглядається (І-регулятор), напруга U_1 відповідає поточному значенню рівня U_T , ($U_1=U_T$) а U_2 – заданому значенню U_3 ($U_2=U_3$). Тут резистор R_2 виконує роль задатчика.

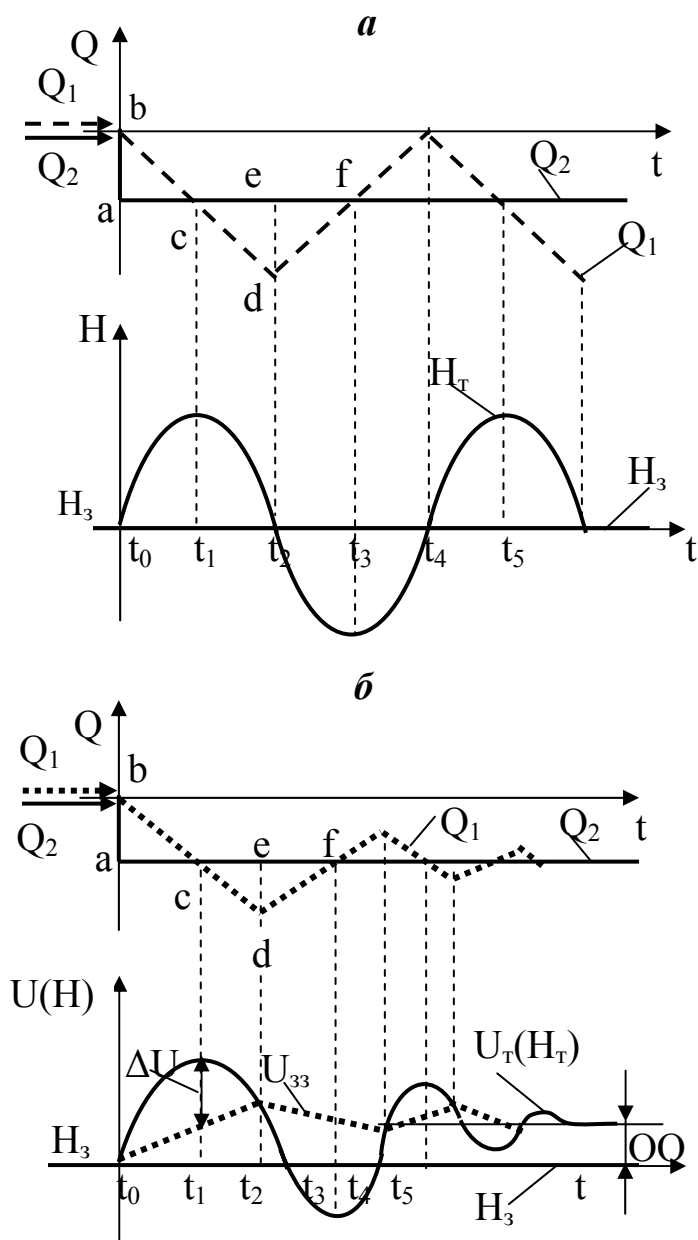


Рис. 5.9. Перехідний процес в САР з астатичним об'єктом і різними законами регулювання:
а – І-регулятор; б – П-регулятор.

Щення H меншає в міру усунення регулятором різниці між Q_1 і Q_2 . У певний момент часу t_1 настає матеріальний баланс $Q_1 = Q_2$, зростання рівня припиняється. Однак у цей момент (t_1) рівень рідини в апараті не відповідає заданому значенню ($H_T > H_3$), отже, регулятор буде продовжувати зменшувати надходження рідини. З моменту часу t_1 матеріальний баланс порушується ($Q_1 < Q_2$), рівень рідини починає знижуватися, причому швидкість

У момент t_0 стрибкоподібно введемо збурення шляхом зменшення споживання рідини (Q_2 , суцільна лінія на рис. 5.9 а). У результаті рівень рідини почне підвищуватися ($Q_2 < Q_1$).

З підвищенням рівня переміщується плунжер індуктивного датчика ($ІД_1$), що спричиняє зміну напруги $U_1(U_T)$, яка знімається в діагоналі моста з резистора R_1 , і з'являється сигнал розузгодження ΔU на вході підсилювача. Включається виконавчий механізм, який з постійною швидкістю з допомогою РО зменшує надходження рідини в об'єкт (пунктирна лінія на рис. 5.9а). До моменту часу t_1 , поки надходження продукту більше його споживання, рівень рідини (H) в ємкості безперервно підвищується. Швидкість підвищення

зниження рівня підвищується, оскільки регулятор збільшує різницю між надходженням і споживанням рідини. У момент t_2 поточне значення рівня стає рівним заданому, що відповідає $\Delta U=0$, регулятор на мить вимикається, однак у цей момент $Q_1 < Q_2$ і рівень продовжує знижуватися. Відхилення рівня в протилежному напрямі змінить фазу сигналу розузгодження (ΔU), отже, виконавчий механізм почне обертатися в іншу сторону, збільшуючи подачу рідини. У момент часу t_3 знову $Q_1 = Q_2$, але оскільки рівень рідини у ємкості нижчий від заданого значення, регулятор продовжує збільшувати надходження рідини, і це буде продовжуватися до моменту часу t_4 . Подальший процес регулювання є повторенням описаного вище, в системі регулювання виникають незатухаючі коливання рівня відносно заданого значення.

Наявність незатухаючих коливань доводиться рівністю трикутників abc , cde і def , отже, рівністю додатної і від'ємної амплітуд коливань рівня за перший період, так само як і в подальшому.

Таким чином, використання І-регулятора з об'єктом, що не володіє властивістю самовирівнювання (астатичні об'єкти), не рекомендується.

Розглянемо другий випадок, де той же об'єкт працює з П-регулятором. Для цього підключимо жорсткий зворотний зв'язок, а напругу, що знімається з резистора R_2 , назовемо напругою зворотного зв'язку $U_2=U_{oc}$.

Графік процесу регулювання показано на рис. 5.9 б. Тут перехідний процес подано у вигляді кривої напруги (U_T), яка відповідає поточному значенню рівня. Для аналізу процесу прийемо ті ж умови, що і для першого варіанта.

Після введення збурення Q_2 на першому етапі відбуваються ті ж процеси, що і в першому випадку, тобто рівень рідини починає підніматися. Тут потрібно враховувати, що в момент включення виконавчого механізму переміщується плунжер індуктивного датчика ID_2 , змінюється U_{oc} і в схему порівняння регулятора надходить напруга зворотного зв'язку, що лінійно змінюється і знімається з резистора R_2 . У момент часу t_2 настає рівність $U_T = U_{oc}$, $\Delta U=0$. Виконавчий механізм відключається, але в цей час $Q_1 < Q_2$, отже, рівень продовжує знижуватися, оскільки $U_T < U_{oc}$ виникає сигнал розузгодження (ΔU), але з протилежною фазою. Двигун ВМ реверсує, збільшуючи надходження рідини в

ємкість і зменшуючи одночасно U_{oc} . У момент t_3 наступає матеріальний баланс, але оскільки ще виконується умова $U_T < U_{oc}$, регулятор продовжує збільшувати подачу рідини до моменту t_4 , в який двигун знову реверсує. Далі повторюється циклічність дії регулятора, але процес поступово затухає. Аналітично це доводиться тим, що площа трикутника abc менша площі трикутника cde , отже, $ab > de$. Така тенденція буде продовжуватися і в подальші напівперіоди коливань.

З графіка перехідного процесу видно, що регульована величина не приводиться до заданого значення на величину залишкового відхилення – відрізок OO . Пояснимо причину цього явища. Після закінчення перехідного процесу надходження рідини в апарат поменшало (для даного прикладу) до нового значення її споживання. Але новому значенню витрати Q_1 відповідає інше положення регулюючого органу, а через жорсткий зворотний зв'язок U_{oc} також приймає інше значення. Для того щоб система регулювання прийшла до рівноважного стану, необхідна умова $\Delta U = 0$, ($U_T = U_{oc}$), що можливо тільки при новому значенні U_T , тобто новому рівні у ємкості.

Наявність залишкового відхилення є істотним недоліком регуляторів з жорстким зворотним зв'язком (П-закон регулювання).

Вибір регулятора. Під вибором регулятора потрібно розуміти вибір закону регулювання.

Для вибору закону регулювання необхідно знати:

1. Приведені параметри об'єкта регулювання $\kappa_{об}$, $T_{об}$ і $\tau_{об}$, що визначаються за кривою розгону.
2. Максимально допустиме значення динамічного відхилення регульованої величини ($y_{вих1}$).
3. Прийнятий типовий перехідний процес.
4. Максимально можливе значення збурення на об'єкт, виражене в % ходу регулюючого органу ($\Delta x_{вх}$).
5. Допустиме залишкове відхилення.
6. Допустимий час регулювання t_p .

Максимальні (допустимі) значення параметрів визначаються вимогами технологічного процесу. Певну складність може викликати визначення максимально можливого збурення, приведенного до переміщення регулюючого органу. При відсутності

достовірної інформації з цього питання допускається прийняти $\Delta x_{\text{вх}}$ в межах 30 - 40 %.

Для вибору закону регулювання необхідно розрахувати динамічний коефіцієнт регулювання для статичних об'єктів:

$$R_o = \frac{y_1}{k_{об} \Delta x_{вх}}; \text{ для астатичних об'єктів } \bar{R}_o = \frac{y_1 \cdot T_{об}}{\tau_{об} \Delta x_{вх}}. \quad (5.16)$$

При визначенні параметрів кривої розгону об'єкта доцільно використати обробку кривої, показану на рис. 4.3 б для статичних і 4.5 б для астатичних об'єктів. Знайти для об'єкта відношення τ/T .

За графіками (рис. 5.10) для статичних об'єктів або з табл. 5.1 для астатичних об'єктів вибирають найпростіший регулятор.

Наприклад, є статичний об'єкт регулювання з відношенням $\tau/T=0,5$. Розрахунковий динамічний коефіцієнт регулювання $R_d=0,95$. У відповідності з рис. 5.10 а цим координатам відповідає точка "А". Криві регуляторів, розташовані нижче знайденої точки на номограмі, забезпечують прийняті умови.

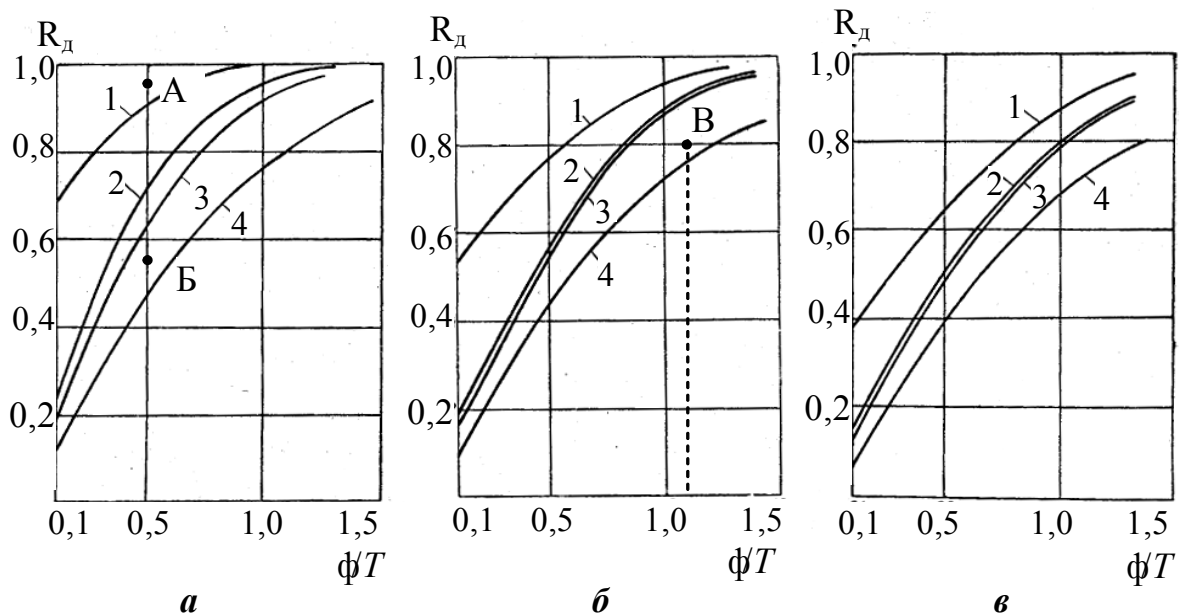


Рис. 5.10. Динамічні коефіцієнти регулювання на статичних об'єктах: а – аперіодичний перехідний процес; б – процес з 20% перерегулюванням; в – процес з мінімальною квадратичною площею; 1 – І-регулятор; 2 – ІІ-регулятор; 3 – ІІІ-регулятор; 4 – ІІД-регулятор.

Отже, для даного об'єкта можна приймати різні закони регулювання. Якщо залишкове відхилення неприпустиме, то потрібно перейти до інших законів. Якщо, наприклад, $R_d = 0,55$, що відповідає точці "Б", – допускається застосовувати тільки ПД-закон регулювання.

Далі потрібно оцінити час регулювання при застосуванні прийнятого закону. Для цього використовують графіки, наведені на рис. 5.11, де визначають відношення t_p/τ_{33} (відносний час регулювання), звідки знаходять t_p .

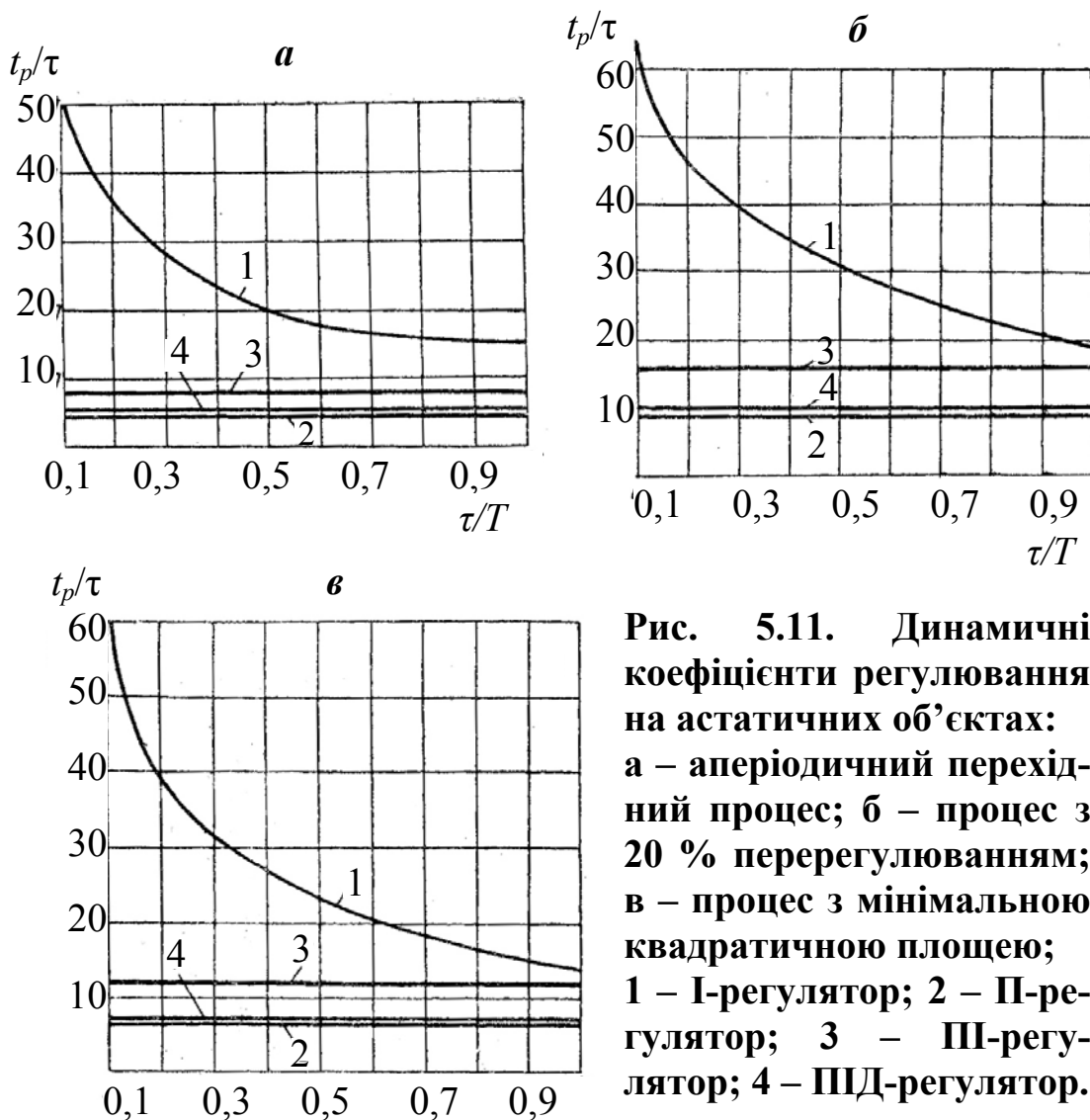


Рис. 5.11. Динамічні коефіцієнти регулювання на астатичних об'єктах:
а – аперіодичний перехідний процес; **б** – процес з 20 % перерегулюванням; **в** – процес з мінімальною квадратичною площею;
1 – І-регулятор; **2** – П-регулятор; **3** – ПІ-регулятор; **4** – ПІД-регулятор.

У випадку, якщо знайдений час регулювання перевищує допустиме значення, переходять до більш складного закону регулювання.

При розгляді астатичного об'єкта регулювання можна використати таблиці 5.1 і 5.2.

Таблиця 5.1
Динамічний коефіцієнт
регулювання для
астатичних об'єктів

Закон регулювання	Типовий процес		
	аперіодичний	20% перерегулювання	з мінімальною квадратичною площею
П	2,9	1,4	-
ПІ	1,4	1,3	0,9
ПІД	1,3	1,1	0,8

Таблиця 5.2
Відносний час
регулювання t_r/τ для
астатичних об'єктів

Закон регулювання	Типовий процес		
	аперіодичний	20% перерегулювання	з мінімальною квадратичною площею
П	6	8	-
ПІ	14	16	18
ПІД	9	12	13

В даному випадку потрібно мати на увазі, що для даних об'єктів інтегральний закон регулювання застосовувати не рекомендується, оскільки така система структурно нестійка.

Контрольні запитання:

1. Наведіть класифікацію регуляторів за способом дії і за призначенням.
2. Охарактеризуйте динамічні властивості стабілізуючих інтегральних і пропорційних регуляторів.
3. Роз'ясніть поняття залишкової нерівномірності в перехідних процесах САР.
4. Наведіть динамічні показники ПІ- і ПІД-регулятора.
5. Перерахуйте показники якості регулювання і дайте їх характеристики.
6. Побудуйте перехідний процес в САР з астатичним об'єктом і ПІ-регулятором.
7. Виконайте аналіз перехідного процесу в системі з І-регулятором і астатичним об'єктом.
8. Доведіть обов'язкову наявність залишкового відхилення при використанні ПІ-регулятора.