

СИНТЕЗ СИСТЕМ З ПІД-РЕГУЛЯТОРОМ ТА ОБ’ЄКТОМ ДРУГОГО ПОРЯДКУ З ДВОМА РІЗНИМИ СТАЛИМИ ЧАСУ І ЗАПІЗНЕННЯМ

© Іван Ковела, Олег Іванюк

Наведені результати параметричного синтезу автоматичних систем з неперервним ПІД-алгоритмом та об’єктами другого порядку з двома різними сталими часу і запізненням за допомогою методу багатокритеріальної параметричної оптимізації.

Ключові слова - параметричний синтез, промислові об’єкти, ПІД-алгоритм, інженерна методика.

The results of parametric synthesis of automatic control systems with continuous PID-algorithm and objects of the second order with two different time constants and delay by using the method of multi-objective parametric optimization.

Keywords - parametrical synthesis, industrial objects, PID-algorithm, engineering method.

Вступ

Переважна більшість сучасних промислових автоматичних систем регулювання (АСР) будується на основі різних модифікацій ПІД-алгоритмів, що забезпечують необхідні запаси стійкості систем та достатньо високу якість регулювання багатьох промислових об’єктів.

За таких умов задача оптимального синтезу АСР зводиться до їх параметричної оптимізації. Пояснюється це тим, що в рамках вибраної структури системи ПІД-алгоритми є досить близькими до оптимальних, якщо мова йде про виконання регуляторами властивих їм функцій - усунення впливу на технологічний процес неконтрольованих випадкових збурень.

Підвищення ефективності автоматичних систем, що функціонують за ПІД-алгоритмами, можна добитися, наприклад, при використанні методу багатокритеріальної параметричної оптимізації, який має аналітичний характер і відзначається високою універсальністю [1,2]. Він дає змогу легко здійснювати багатоваріантний синтез систем і отримувати узагальнені результати при різних моделях об’єкта та алгоритмах регулювання.

Постановка проблеми та формулювання мети статті

Високоякісну систему керування можна спроектувати лише за наявності достатньо точної математичної моделі об’єкта регулювання (ОР). Основною метою побудови математичної моделі об’єкта є визначення її структури та параметрів. Структура і складність моделі повинні відповідати меті моделювання, тому вибір моделі об’єкта залежить від того, як вона буде використовуватися. Найбільш прийнятною є найпростіша з моделей, яка забезпечує керування, що задовольняє прийнятий критерій якості регулювання.

В практиці автоматизації для об’єктів з самовирівнюванням і запізненням τ широко використовується модель у вигляді передавальної функції аперіодичної ланки з двома різними сталими часу T_1 і T_2 :

$$W_o(s) = \frac{K_o e^{-\tau s}}{(T_1 s + 1)(T_2 s + 1)} \cdot T_2 \leq T_1. \quad (1)$$

Модель виду (1) також застосовується в потужній інтегрованій інформаційній системі для управління промисловим виробництвом TRACE MODE [3].

Особливості апроксимації експериментальних даних з дослідження динамічних об’єктів моделлю виду (1) розглядаються в роботі [4].

Ще точніше модель такого об'єкта можна отримати на основі експериментальних даних за допомогою автоматизованого методу, описаного в [5].

Проте застосування такої моделі призводить до ускладнення процесу синтезу систем, особливо тоді, коли метою є розв'язок задачі синтезу в узагальненій формі.

В роботі [6], описана інженерна методика розрахунку систем із використанням моделі об'єкта з двома різними сталими часу. Однак ця методика має ряд недоліків:

- придатна лише для моделі ОР без запізнення;
- орієнтована на системи з ідеалізованим ПІД-алгоритмом, тоді як на практиці застосовуються, головним чином, ПІД-алгоритми з реальною дифскладовою;
- критерієм оптимальності прийнято максимум модуля АЧХ замкненої системи, тобто передбачається реалізація лише аперіодичних процесів регулювання, що не завжди прийнятно.

З метою усунення зазначених недоліків актуальною є розробка більш досконалої методики синтезу АСР з об'єктами, які описуються математичною моделлю (1).

Для розв'язку задачі синтезу в узагальненій формі передавальну функцію (1) необхідно подати у вигляді

$$W_o(s) = \frac{K_o e^{-\tau s}}{(Ts+1)(\alpha Ts+1)}, \quad (2)$$

де $T_1 = T$, а $T_2 = \alpha T_1 = \alpha T$. При цьому коефіцієнт $\alpha = T_2 / T_1$ може набувати значень $\alpha = 0.1 \dots 1.0$. У частковому випадку сталі часу T_1 і T_2 можуть бути однаковими. Тоді $\alpha = 1.0$ і передавальна функція (2) матиме вигляд

$$W_o(s) = \frac{K_o e^{-\tau s}}{(Ts+1)^2}. \quad (3)$$

Виклад основного матеріалу

Як було показано в роботах [1,2], задача синтезу систем з ПІД-регулятором може бути ефективно розв'язана за методом багатокритеріального оптимуму. Проте дослідження в цих роботах стосуються в основному систем з деяким конкретним об'єктом, тоді як більш актуальним є розв'язок задачі в узагальненому вигляді, результати якого можна було б використати для широкого класу об'єктів, які описуються однаковою математичною моделлю, але з різними параметрами. Саме такий підхід розглядається нижче.

В процесі синтезу за основу приймається автоматична система (рис. 1) з неперервним ПІД-регулятором з реальною дифскладовою:

$$W_{pid}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{(T_d / N)s + 1} \right); \quad N = 10. \quad (4)$$

де K_p – коефіцієнт підсилення, T_i , T_d – сталі часу інтегрування та диференціювання, N – нормуючий коефіцієнт, значення якого переважно фіксуються виробниками контролерів у межах $N = 3 \dots 30$.

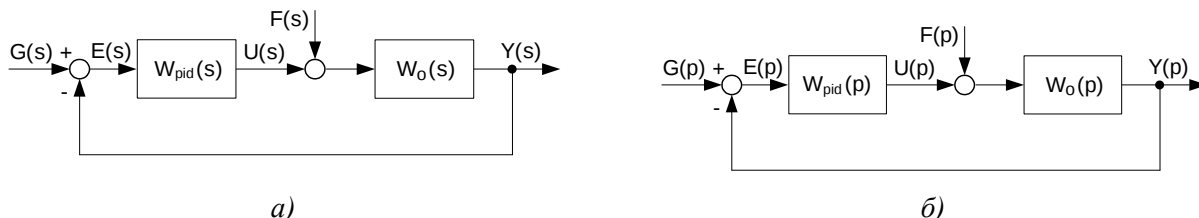


Рис. 1. Структурні схеми неперервної системи з ПІД-регулятором

Схеми на рис. 1.а і 1.б використовуються при синтезі систем з конкретними об'єктами у розмірному вигляді та систем з узагальненими об'єктами у безрозмірній формі відповідно.

Для синтезу та дослідження систем в узагальненій формі необхідно ввести нову комплексну змінну $p = \tau s$. Тоді модель об'єкта (2) та ПІД-алгоритм (4) набувають вигляду:

$$W_o(p) = \frac{K_o e^{-p}}{\left(\frac{T}{\tau} p + 1\right) \left(\alpha \frac{T}{\tau} p + 1\right)}, \quad (5)$$

$$W_{pid}(p) = K_p \left[1 + \frac{1}{(T_i / \tau) p} + \frac{(T_d / \tau) p}{(T_d / \tau N) p + 1} \right]. \quad (6)$$

Алгоритм синтезу систем з неперервними ПІД-регуляторами з умов багатокритеріального оптимуму може бути поданий у вигляді табл. 1.

Таблиця 1

Алгоритм розрахунку систем з неперервними ПІД-регуляторами
з умов багатокритеріального оптимуму

Характеристичне рівняння та його корені	Система рівнянь	Параметри, що визначаються
в розмірній формі		
$\Delta_{pid}(s) = 1 + W_{pid}(s)W_o(s) = 0,$ $s_{1,2} = -m\omega \pm j\omega, \quad s_{3,4} = -m\omega \pm j\omega.$	$\left. \begin{aligned} eq_1 &:= \operatorname{Re} \left[\Delta_{pid}(s) \Big _{s=s_1} \right] = 0, \\ eq_2 &:= \operatorname{Im} \left[\Delta_{pid}(s) \Big _{s=s_1} \right] = 0, \\ eq_3 &:= \operatorname{Re} \left[\frac{d\Delta_{pid}(s)}{ds} \Big _{s=s_1} \right] = 0, \\ eq_4 &:= \operatorname{Im} \left[\frac{d\Delta_{pid}(s)}{ds} \Big _{s=s_1} \right] = 0. \end{aligned} \right\}$	K_p, T_i, T_d, ω
в безрозмірній формі		
$\Delta_{pid}(p) = 1 + W_{pid}(p)W_o(p) = 0,$ $p_{1,2} = -m\Omega \pm j\Omega, \quad p_{3,4} = -m\Omega \pm j\Omega.$	$\left. \begin{aligned} eq_1 &:= \operatorname{Re} \left[\Delta_{pid}(p) \Big _{p=p_1} \right] = 0, \\ eq_2 &:= \operatorname{Im} \left[\Delta_{pid}(p) \Big _{p=p_1} \right] = 0, \\ eq_3 &:= \operatorname{Re} \left[\frac{d\Delta_{pid}(p)}{dp} \Big _{p=p_1} \right] = 0, \\ eq_4 &:= \operatorname{Im} \left[\frac{d\Delta_{pid}(p)}{dp} \Big _{p=p_1} \right] = 0. \end{aligned} \right\}$	$K_p K_o,$ $T_{ib} = T_i / \tau,$ $T_{db} = T_d / \tau,$ $\Omega = \omega \tau$

Алгоритм (табл. 1) був реалізований програмно за допомогою пакету комп'ютерної алгебри *Maple* [7].

Розв'язуючи системи рівнянь (табл. 1) числовим методом при зміні характеристики об'єкта τ/T , у певному діапазоні, знаходимо в табличній формі залежності $K_n = K_p K_o = f(m, \tau/T)$, $T_i / \tau = f(m, \tau/T)$, $T_d / \tau = f(m, \tau/T)$ і $\Omega = f(m, \tau/T)$. Вказані залежності (крім допоміжної

$\Omega = f(m, \tau/T)$ відображені на графіках, наведених нижче. Розрахунки були виконані при значенні $m=0,9$ і $\tau/T = 0,1 \dots 1,0$.

Аналіз систем з ПД-регуляторами був виконаний за допомогою моделювання з використанням пакету *SIMULINK (MATLAB)* [8].

Процеси регулювання в АСР при знайдених параметрах настроювання досліджувалися у відносному часі t/τ . Прямі показники якості перехідних процесів визначалися у відповідності з рис. 2, а відносні інтегральні квадратичні оцінки перехідних процесів по помилці обчислювалися в процесі моделювання за допомогою виразів:

$$J_g / \tau = \int_0^{\infty} [e_g(t/\tau)]^2 d(t/\tau); \quad J_f / \tau = \int_0^{\infty} [e_f(t/\tau)]^2 d(t/\tau), \quad (6)$$

де $e_g(t/\tau)$, $e_f(t/\tau)$ - відносні помилки регулювання перехідних процесів за завданням g та збуренням f відповідно.

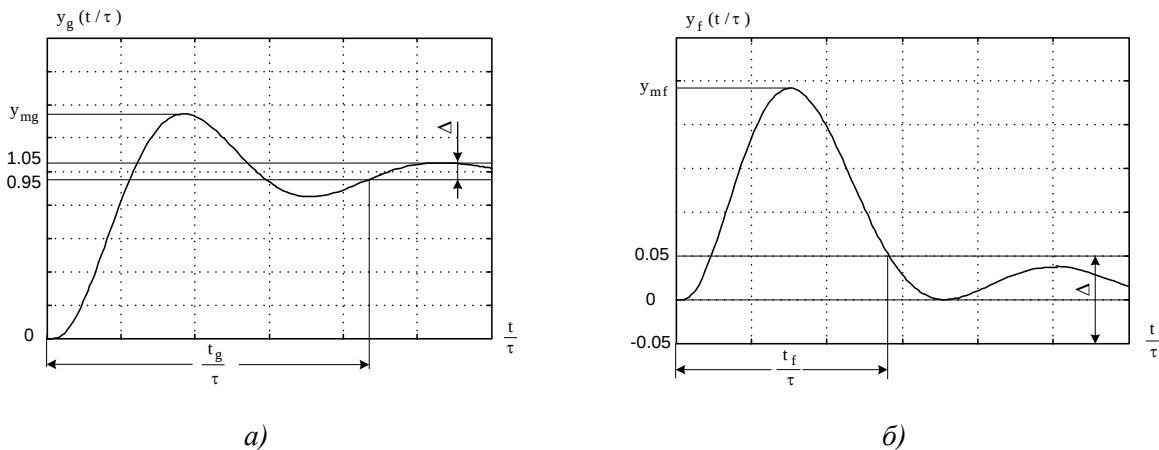
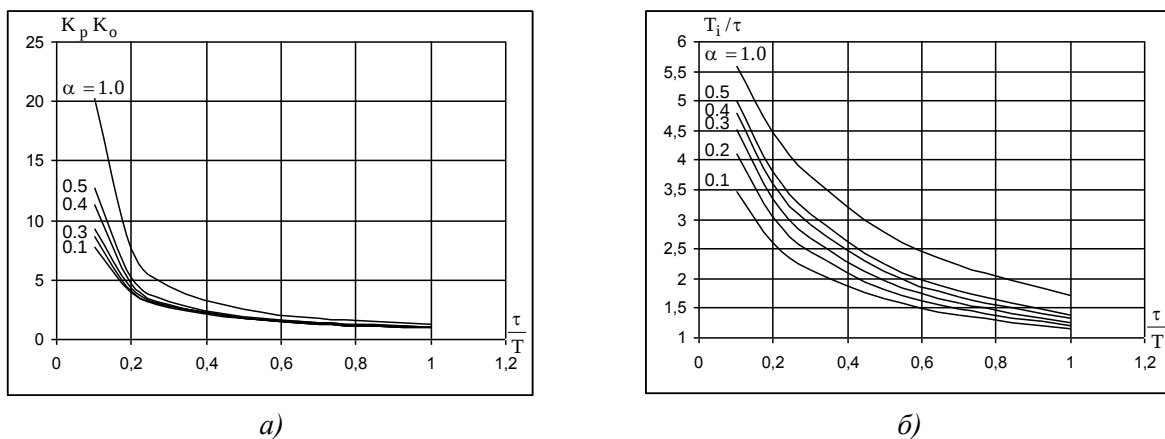
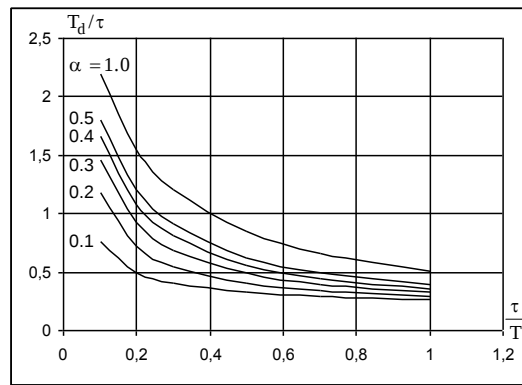


Рис. 2. Процеси відпрацювання завдання (а) та компенсації збурення (б), як функції відносного часу

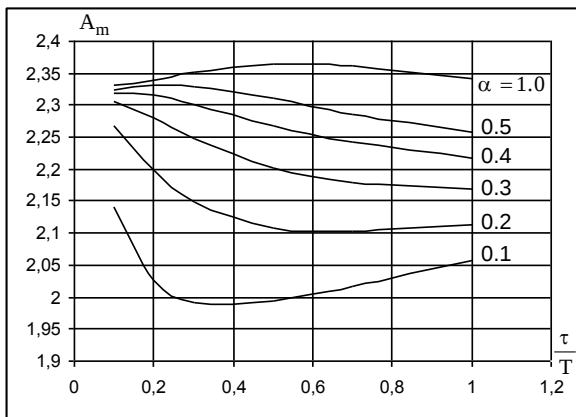
Параметри настроювання регуляторів та показники стійкості систем (A_m , φ_m – запаси стійкості по амплітуді та по фазі розімкненої системи, M – частотний показник коливності замкненої системи), розрахованих запропонованим методом, подаються нижче на рис. 3 і рис. 4 відповідно.



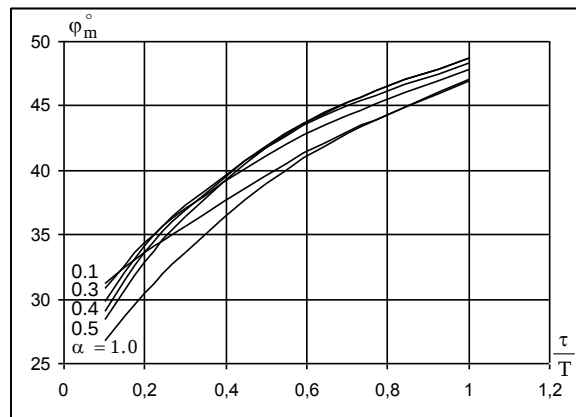


в)

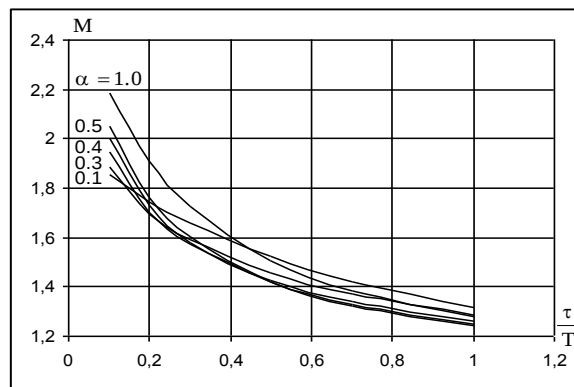
Рис. 3. Параметри настроювання реального ПД-регулятора в АСР з об'єктом $W_o(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)(\alpha Ts + 1)$ при різних значеннях коефіцієнта α



а)



б)



в)

Рис. 4. Показники стійкості АСР з реальним ПД-регулятором та об'єктом $W_o(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)(\alpha Ts + 1)$ при різних значеннях коефіцієнта α

Перехідні процеси відпрацювання завдання і компенсації збурення при різних значеннях коефіцієнта α подаються на рис. 5- рис. 7, а показники їх якості на рис. 8.

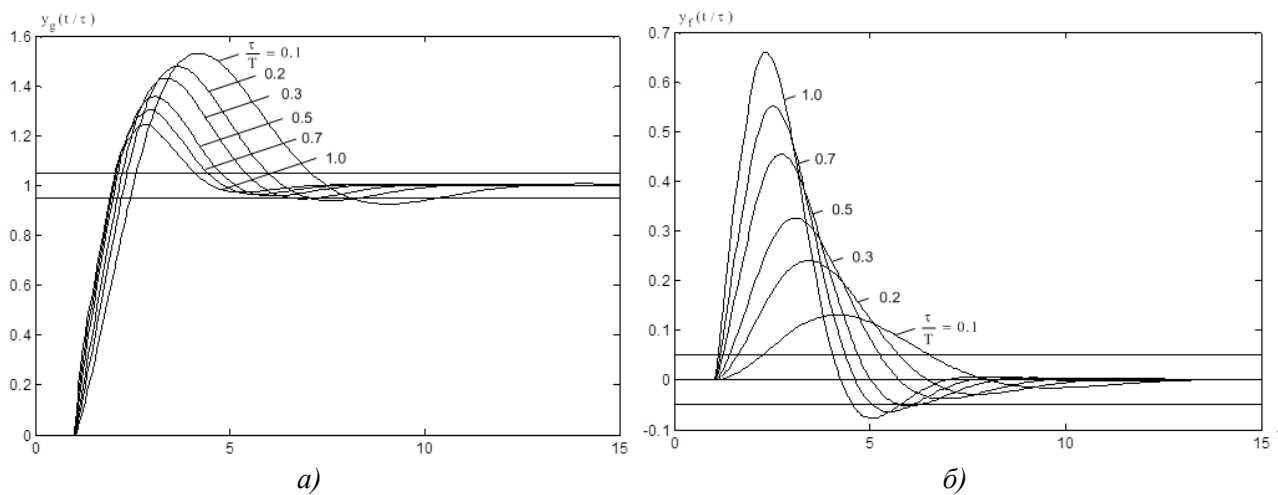


Рис. 5. Процеси відпрацювання завдання (а) та компенсації збурення (б)

в АСР з реальним ПІД-регулятором та об'єктом $W_o(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)(\alpha Ts + 1)$ при $\alpha = 0.1$

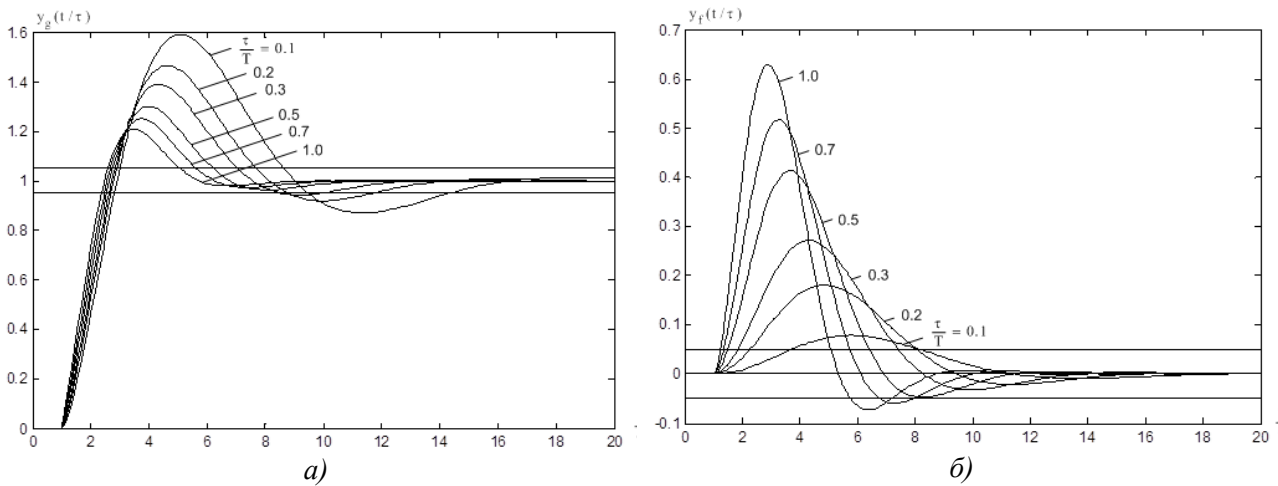


Рис. 6. Процеси відпрацювання завдання (а) та компенсації збурення (б)

в АСР з реальним ПІД-регулятором та об'єктом $W_o(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)(\alpha Ts + 1)$ при $\alpha = 0.5$

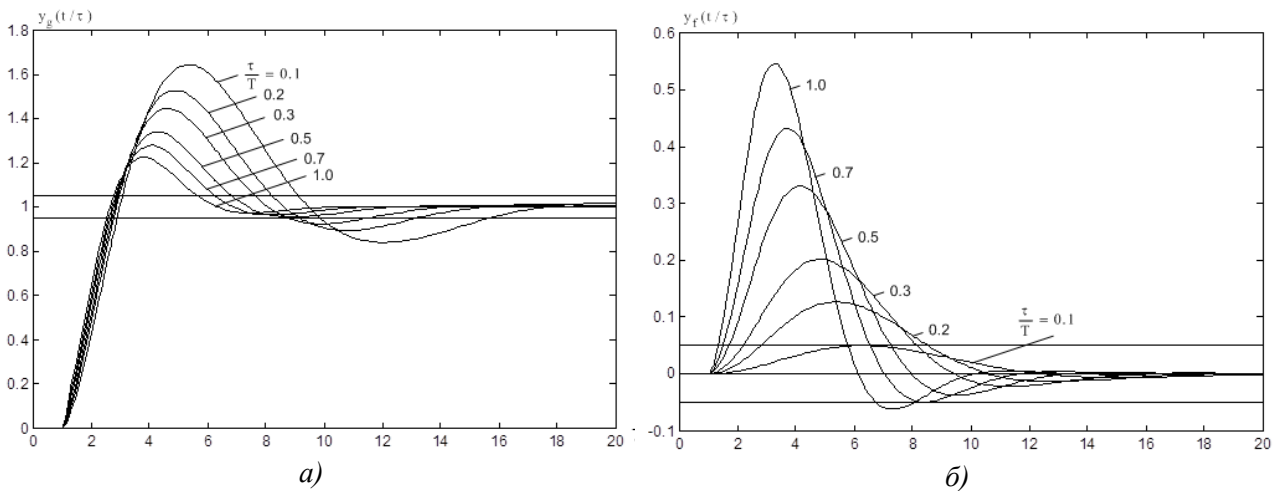
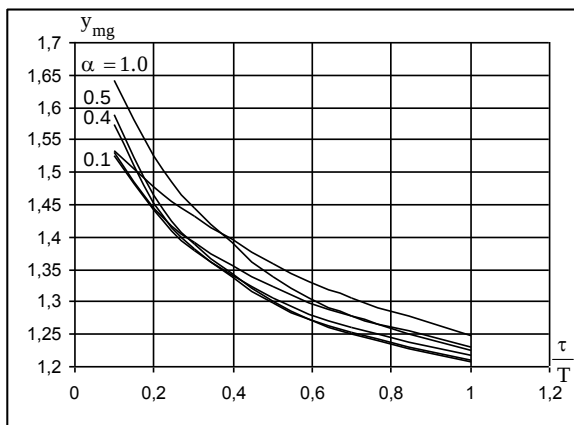
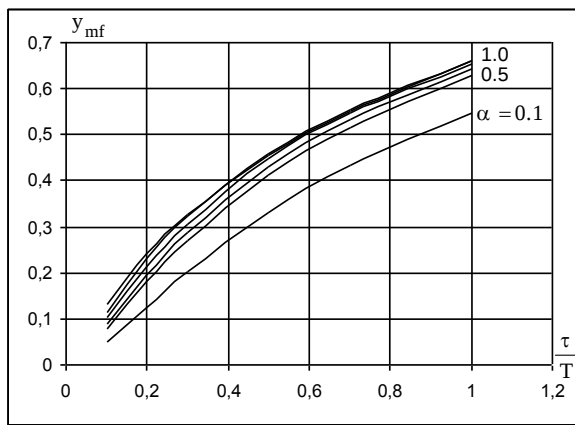


Рис. 7. Процеси відпрацювання завдання (а) та компенсації збурення (б)

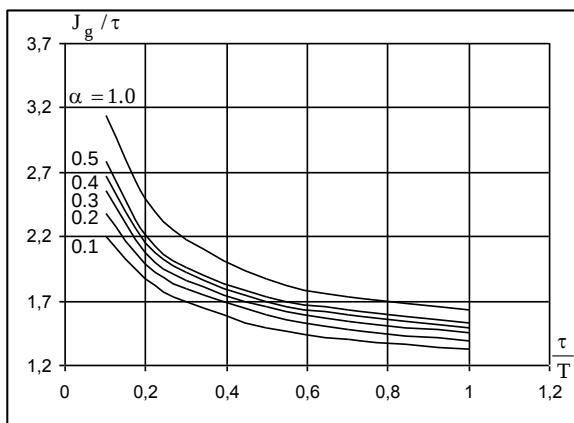
в АСР з реальним ПІД-регулятором та об'єктом $W_o(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)(\alpha Ts + 1)$ при $\alpha = 1.0$



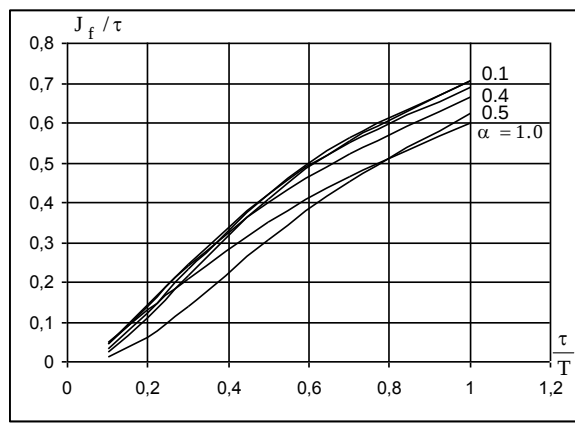
а)



б)



в)



г)

Рис. 8. Показники якості АСР з реальним ПІД-регулятором та об'єктом

$$W_o(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)(\alpha Ts + 1) \text{ при різних значеннях коефіцієнта } \alpha$$

На рис. 8: y_{mg} , y_{mf} - максимальні динамічні відхилення регульованої величини; J_g/τ , J_f/τ - відносні інтегральні квадратичні оцінки перехідних процесів (індекси g і f стосуються відповідно процесів відпрацювання завдання та компенсації збурення, що діє на вхід об'єкта).

Висновки

Отримані результати можуть розглядатися, як нова інженерна методика синтезу і аналізу автоматичних систем з ПІД-регуляторами та об'єктами 2-го порядку з двома різними сталими часу і з самовирівнюванням та запізненням. Вона може бути застосована при розробці автоматичних систем і має наступні переваги порівняно з відомою методикою:

- дає можливість ще на стадії проектування визначати не лише параметри регулятора, але й показники стійкості та якості системи;
- має ширші функціональні можливості і забезпечує вищу якість систем регулювання;
- отримані результати можуть бути використанні при розробці систем з самонастроюванням, які є основним напрямком покращення якості промислових АСР на цей час.

1. Шавров А.В., Солдатов В.В. Многокритериальное управление в условиях статистической неопределённости. – М.: Машиностроение. – 1990. – 160 с. 2. Ковела І.М. Параметричний синтез неперервних і цифрових автоматичних систем регулювання з ПІ- та ПІД-регуляторами // Вісник НУ "Львівська політехніка" "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології".- Львів. 2002 -. № 450 - С. 38-50. 3. <http://www.adastra.ru/news/tm609/>. 4. Ротач В.Я. Теория автоматического

управления.-М.: Издательский дом МЭИ, 2008.-396 с. 5. Ковела І.М., Наконечний А.Й., Яцук Ю.В. Автоматизована ідентифікація об'єктів регулювання за їх експериментальними перехідними характеристиками // Відбір і обробка інформації. – 2013. – Вип. 38(114). – С. 50–60. 6. Гурецкий Х. Анализ и синтез систем управления с запаздыванием. Пер. с польского. М., “Машиностроение”, 1974, 328 с. 7. Дьяконов В.П. Maple 7: учебный курс. - СПб.: Питер, 2002. – 672 с. 8. Черных И.В. SIMULINK: среда создания инженерных приложений.-М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2003.- 496 с.