

ПОРІВНЯЛЬНА ОЦІНКА АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ, ЩО ПРАЦЮЮТЬ ЗА ПІ-, ПІД- ТА ПІ-ПІД-АЛГОРИТМАМИ РЕГУЛЮВАННЯ

© Ковела І.М., Іванюк О.О., Вітер О.С., 2009

Наведено порівняльний аналіз характеристик автоматичних систем, що містять статичні та астатичні об’єкти першого порядку із запізненням і ПІ-, ПІД- та ПІ-ПІД-регулятори.

The comparative analysis of descriptions of the automatic systems, which contain the static and astatic objects of the first order with a delay and PI-, PID- and PI-PD-regulators.

Промислові автоматичні системи регулювання (АСР) переважно будуються на основі регуляторів, що реалізують ПІ-, та ПІД- алгоритми регулювання, і в багатьох випадках при відповідному виборі параметрів настроювання регулятора (ПНР) забезпечують прийнятні характеристики систем. Якщо ж якість АСР виявляється недостатньою, доцільно, не шукаючи складнішого алгоритму, переходити до досконалішої інформаційної структури системи [1].

Згідно з таким підходом широко застосовують двоконтурні (каскадні) системи з динамічною корекцією і системи з коректуючим та стабілізуючим регуляторами. Однак такі системи можуть бути реалізовані лише тоді, коли існує технічна можливість виділити допоміжну регульовану величину, яка реагувала б на регулюючу дію значно швидше ніж основна регульована величина. Інший підхід полягає в сумісному використанні принципів регулювання за відхиленням та збуренням, тобто створенні комбінованих систем. Але можливості їхньої реалізації також обмежені певними умовами, зокрема співвідношенням інерційності об’єкта по каналах регулюючої дії та збурення.

Ще одним і найпростішим способом покращання характеристик АСР є одночасне використання принципів послідовної та паралельної (за допомогою місцевого від’ємного зворотного зв’язку) корекції об’єкта. При цьому структура системи змінюється так, що послідовна корекція здійснюється за допомогою одного регулятора, а паралельну корекцію виконує інший регулятор (рис. 1). Це дає змогу реалізувати в одній системі відомі переваги обох згаданих способів корекції. Така стратегія, що отримала назву ПІ-ПІД-регулювання, була запропонована порівняно недавно [2–4] і вже попередні результати дослідження підтвердили її високі потенційні можливості.

Розробляючи промислові АСР, деякі рішення приймають неформально, керуючись лише досвідом та експертними оцінками. Зокрема, це стосується вибору структури системи, алгоритму регулювання та критерію оптимальності. Наприклад, відомі рекомендації щодо вибору алгоритму регулювання залежно від співвідношення запізнення τ і сталої часу T моделі об’єкта. Проте ці рекомендації даються без належного обґрунтування і не цілком однозначні. Об’єктивно вони також не враховують і стратегії ПІ-ПІД-регулювання. Водночас бажаним є формальне і доказове рішення згаданих проблем на основі порівняльного аналізу характеристик АСР, що працюють за різними алгоритмами регулювання. Проте численні відомі методи і методики параметричного синтезу автоматичних систем з типовими регуляторами, наприклад [5–14], через брак даних не дають змоги розв’язати цю науково-практичну задачу. Отже, вона є актуальною.

Мета цієї статті – порівняльна оцінка якості АСР в узагальненому вигляді та вироблення відповідних рекомендацій.

Завдання порівняльного аналізу якості систем є багатограними, оскільки порівняння систем за однакових початкових умов можна здійснювати за багатьма ознаками, наприклад, за алгоритмами регулювання, характером і показниками якості перехідних процесів, комплексними частотними характеристиками, запасами стійкості, регулюючою змінною, чутливістю до змін параметрів об'єкта тощо. Це дуже складна і велика за обсягом задача, яка не може бути докладно висвітлена в одній статті.

У цій роботі, для прикладу, обмежимося лише порівнянням неперервних АСР, які містять статичні та астатичні об'єкти першого порядку із запізненням. За основу прийнята розроблена нами інженерна методика синтезу АСР, що функціонують за ПІ-, ПІД- та ПІ-ПІД – алгоритмами, яка, на відміну від розроблених раніше, крім ПНР та запасів стійкості містить також показники якості перехідних процесів за завданням та збуренням.

Отже, виходимо з того, що структура порівнюваних АСР відповідає рис. 1.

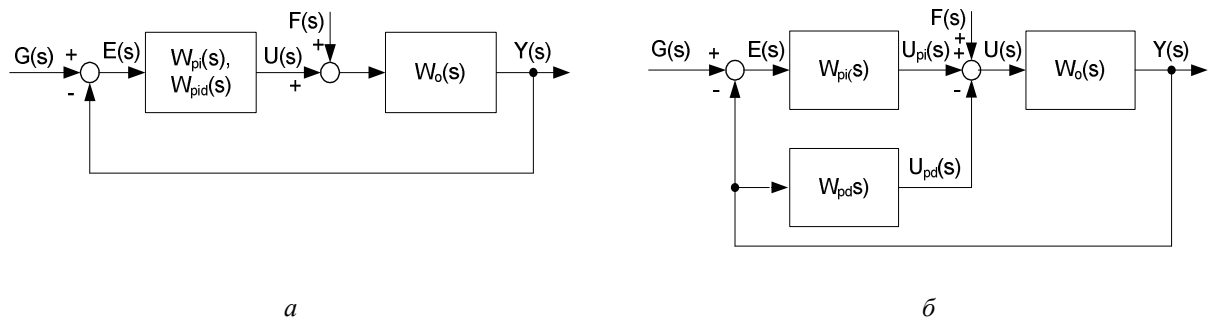


Рис. 1. Структури неперервних автоматичних систем з лінійними регуляторами

На рис. 1: $G(s)$, $E(s)$, $U(s)$, $F(s)$, $Y(s)$ – завдання, помилка регулювання, регулююча змінна, збурення та регульована величина відповідно.

Передавальні функції об'єктів регулювання та регуляторів розглядаємо у тому вигляді, як вони були використані при розробленні згаданої методики, тобто як функції комплексних змінних s і $p = \tau s$ (з метою узагальнення). Статичні об'єкти першого порядку описують виразами (1), а об'єкти без самовирівнювання – виразами (2):

$$W_{oc}(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1); \quad W_o(p) = \frac{K_o}{(1/(\tau/T))p + 1} e^{-p}; \quad (1)$$

$$W_{oa}(s) = \frac{\varepsilon}{s} e^{-\tau s}; \quad W_{oa}(p) = \frac{\varepsilon \tau}{p} e^{-p}, \quad (2)$$

де K_o , ε – коефіцієнт підсилення та швидкість розгону об'єкта.

Алгоритми регулювання аналогічно подають передавальними функціями:

$$W_{pi}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad W_{pi}(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{ib} p} \right); \quad (3)$$

$$W_{pid}(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + \frac{T_d s}{T_d s + 1} \right), \quad W_{pid}(p) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_{ib} p} + \frac{T_{db} p}{T_{db} p + 1} \right) \quad (4)$$

Складові (ПІ-ПД)-алгоритму

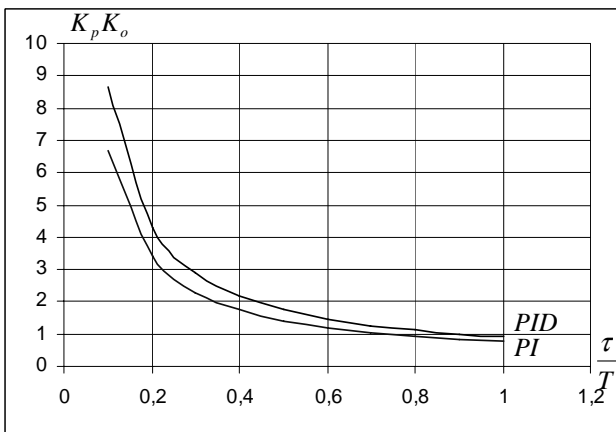
$$W_{pi}(s) = \frac{U_{pi}(s)}{E(s)} = K_{p1} \left(1 + \frac{1}{T_i s} \right), \quad W_{pd}(s) = \frac{U_{pd}(s)}{Y(s)} = K_{p2} \left(1 + \frac{T_d s}{1 + \frac{T_d}{N} s} \right) \quad (5)$$

$$W_{pi}(p) = K_{p1} \left(1 + \frac{1}{T_{ib} p} \right), \quad W_{pd}(p) = K_{p2} \left(1 + \frac{T_{db} p}{\frac{T_{db}}{N} p + 1} \right). \quad (6)$$

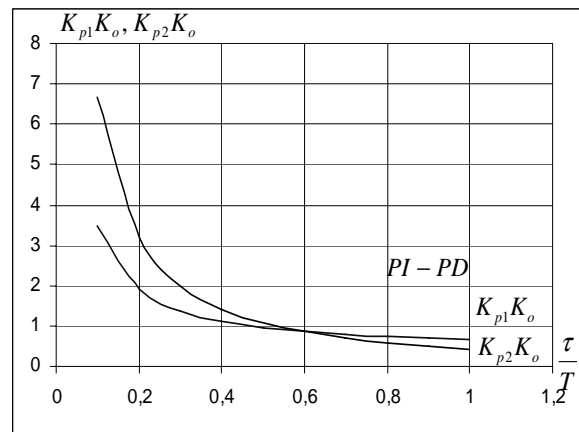
У виразах (3) – (6) – $K_p, K_{p1}, K_{p2}, T_i, T_d$ – коефіцієнти підсилення регуляторів і сталі часу інтегрування та диференціювання; $N=10$ – сталий нормуючий коефіцієнт; $T_{ib} = T_i / \tau$, $T_{db} = T_d / \tau$ – безрозмірні сталі часу інтегрування та диференціювання.

Нижче подано у зручній для порівняння формі ПНР, а також запаси стійкості систем та перехідні процеси відпрацювання завдання і компенсації збурення при декількох значеннях характеристик об'єктів з прийнятого діапазону їхньої зміни.

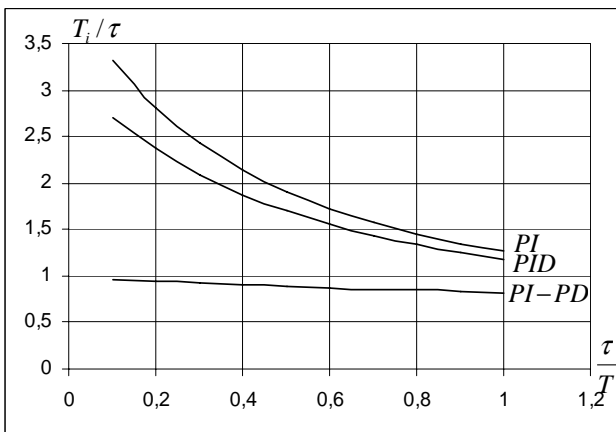
Неперервні системи зі статичними об'єктами



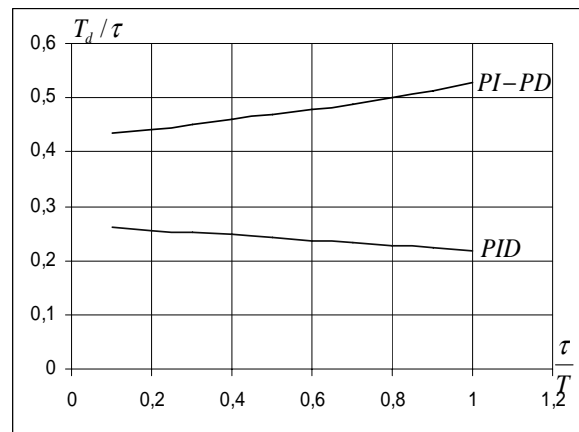
a



б

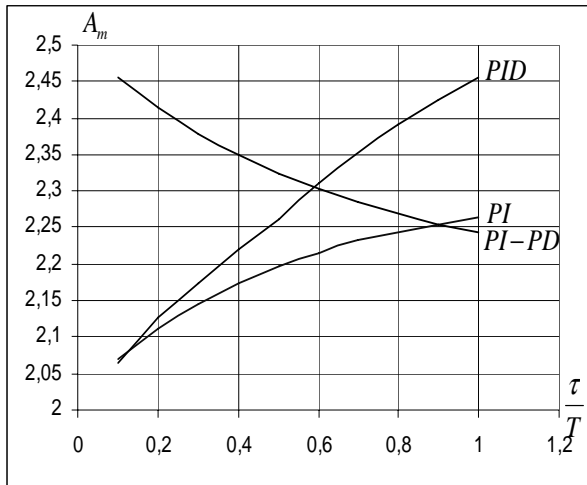


в

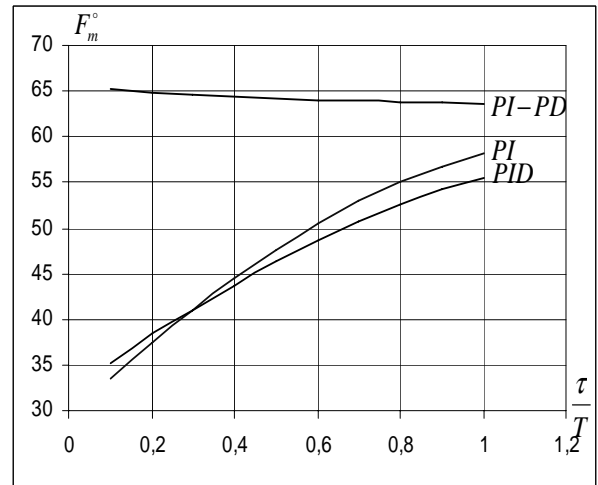


г

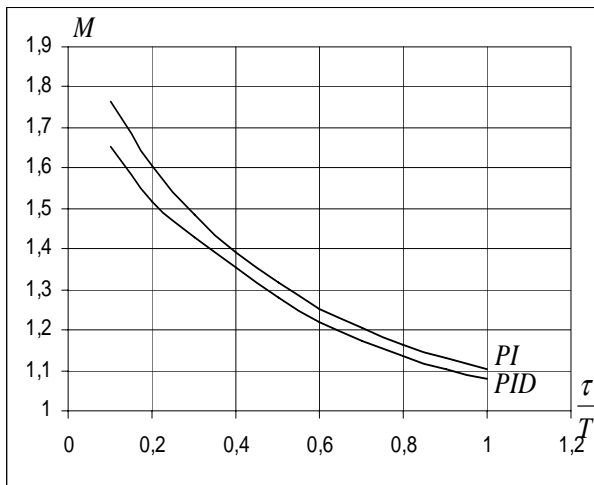
Рис. 2. Параметри настроювання неперервних ПІ-, ПІД- та ПІ_ПД- регуляторів для АСР зі статичним об'єктом $W_{oc}(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)$



а



б



в

Рис. 3. Запаси стійкості АСР з неперервними ПІ-, ПІД- та ПІ-ПД-регуляторами і статичним об'єктом

$$W_{oc}(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)$$

Примітка – запаси стійкості за модулем A_m і фазою F_m^o в АСР з ПІ-ПД – алгоритмом є такими, що резонансний пік на АЧХ замкненої системи зникає, отже, показник M у цьому разі втрачає зміст

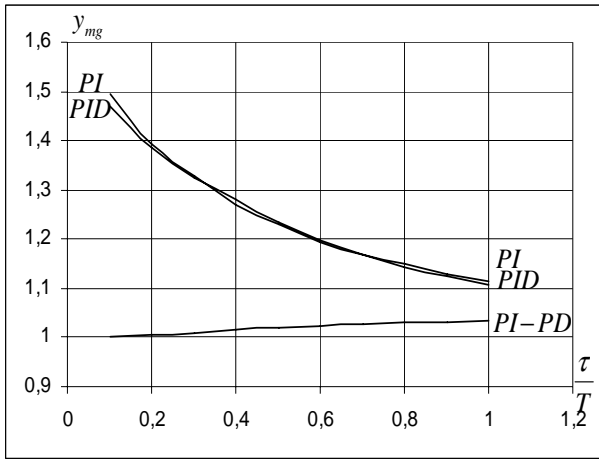
Як видно з рис. 3, найменшими запасами стійкості характеризуються системи з ПІ-регуляторами, а найбільшими – системи з ПІ-ПД-регулятором. За цим показником АСР з ПІ- та ПІД-регуляторами доволі близькі.

Показники якості перехідних процесів відпрацювання завдання та компенсації збурення у порівнюваних системах наведено на рис. 4, де: прямі показники – максимальні динамічні відхилення регульованої величини (y_{mg} , y_{mf}) та відносний час регулювання (t_g/τ , t_f/τ), як час входження в зону п'ятипроцентних відхилень від усталеного значення; J_g/τ , J_f/τ – відносні інтегральні квадратичні оцінки процесів за завданням та збуренням, які обчислювалися за допомогою виразів:

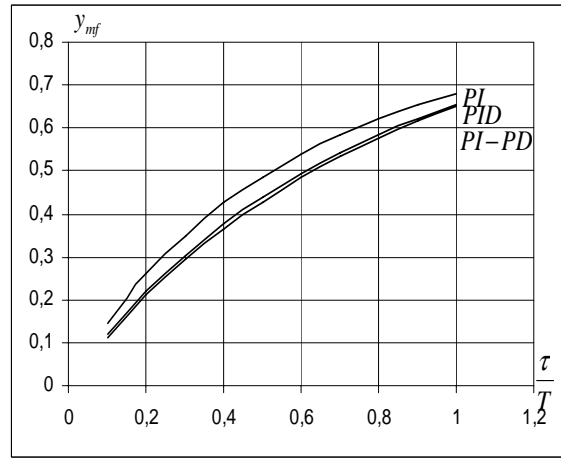
$$J_g/\tau = \int_0^{\infty} [e_g(t/\tau)]^2 d(t/\tau), \quad J_f/\tau = \int_0^{\infty} [e_f(t/\tau)]^2 d(t/\tau). \quad (7)$$

Немонотонний характер залежностей $t_g/\tau = f(\tau/T)$ і $t_f/\tau = f(\tau/T)$ пояснюється нелінійністю рівнянь, за якими визначалися параметри настроювання регуляторів.

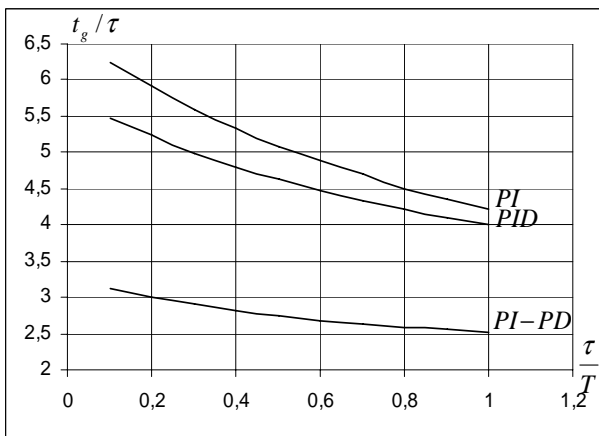
З метою підтвердження характеристик систем (рис. 4) і більшої наочності на рис. 5 наведено перехідні процеси в них за трьох значень τ/T об'єкта.



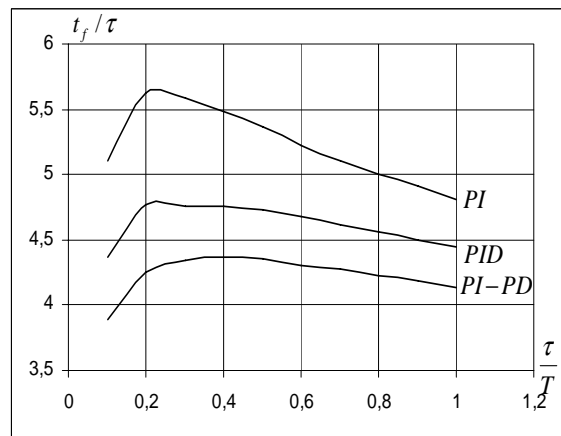
a



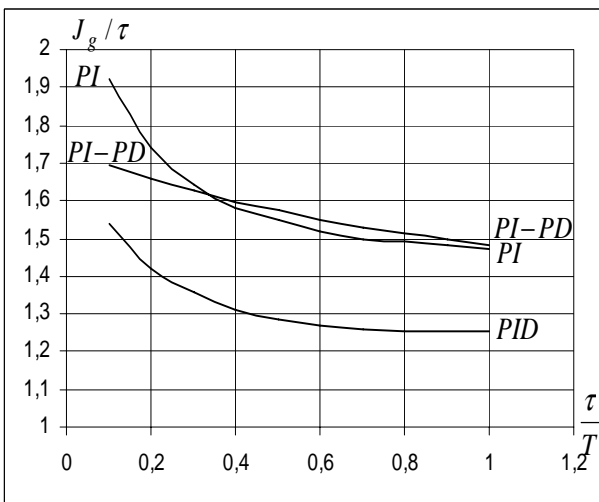
b



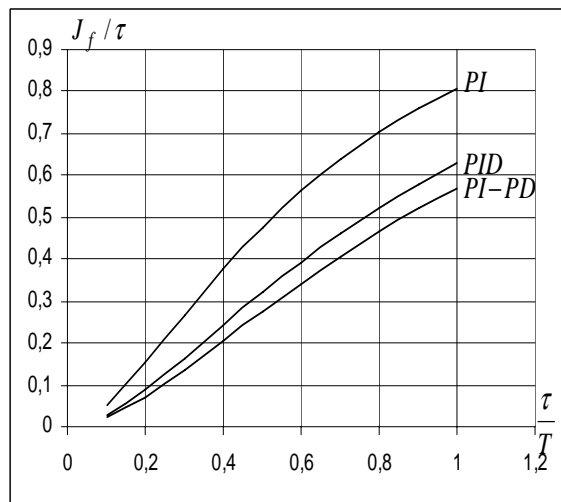
c



d

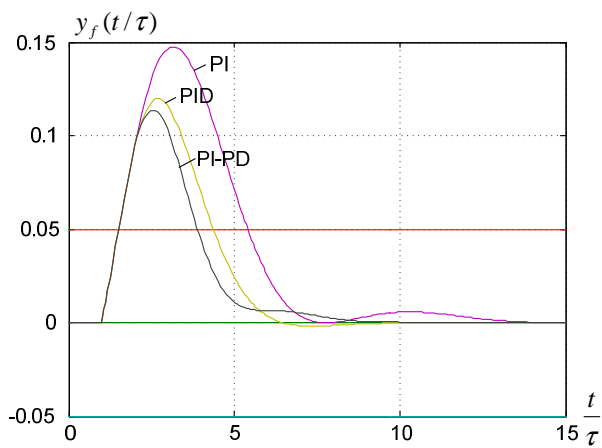


e

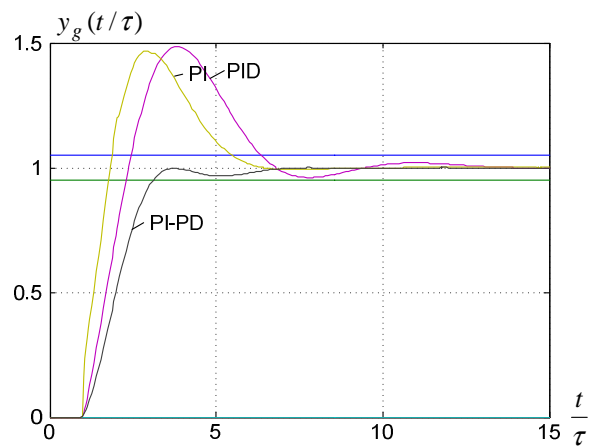


f

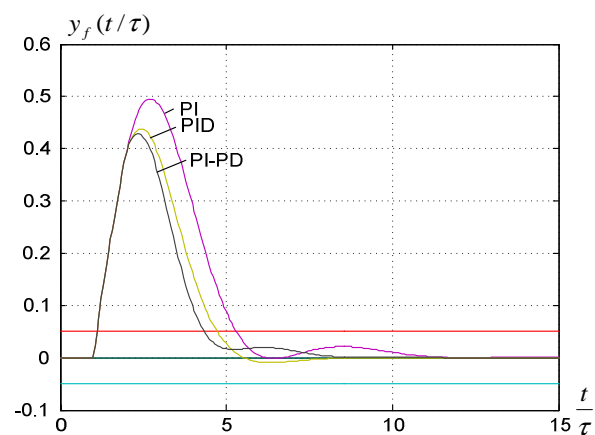
Рис. 4. Показники якості перехідних процесів у неперервній АСР з ПІ-, ПІД- та ПІ-ПІД-регуляторами і статичним об'єктом $W_{oc}(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)$



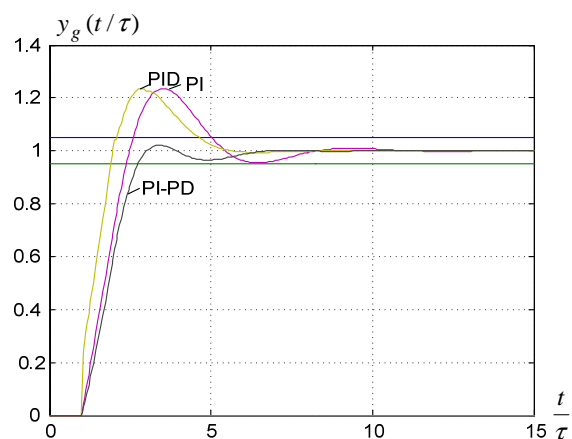
a



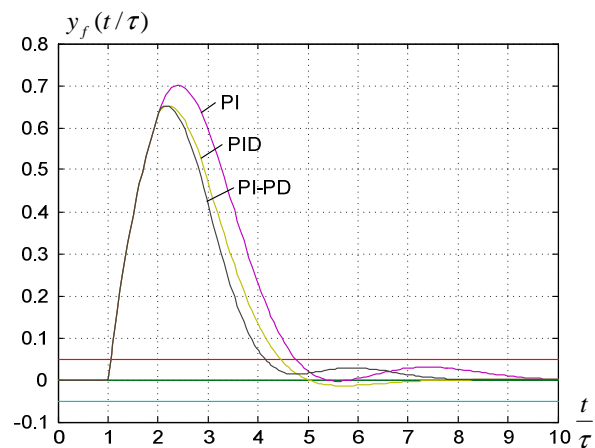
б



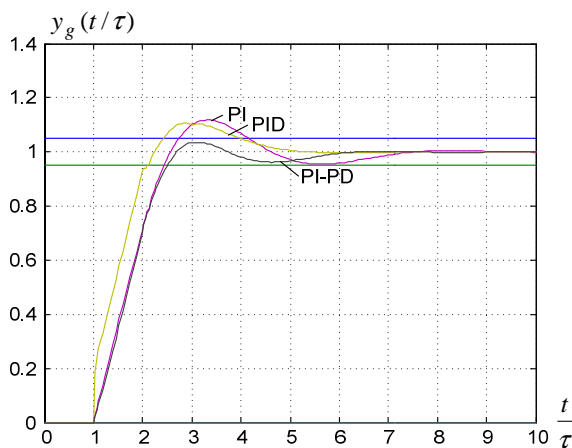
в



г



д



е

Рис. 5. Перехідні процеси в неперервній АСР з об'єктом $W_o(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)$ та різними регуляторами: (а, б) – $\tau/T = 0.1$; (в, г) – $\tau/T = 0.5$; (д, е) – $\tau/T = 1.0$

Навіть візуальна оцінка процесів, зображених на рис. 5, підтверджує значні переваги систем, що функціонують за ПІ-ПД-алгоритмом. Однак для більшої об'єктивності було виконане порівняння систем за методикою, описаною в роботі [15], як це показано в табл. 1.

Порівняльна оцінка неперервних систем з ПІ-, ПІД- та ПІ-ПІД-регуляторами
і статичним об'єктом $W_{oc}(s) = K_o e^{-\tau s} / (Ts + 1)$ за комплексом показників якості

Параметри систем	Система з ПІ-регулятором		Система з ПІД-регулятором		Система з ПІ-ПІД-рег.	
	Абсолютний показник	Відносний показник	Абсолютний показник	Відносний показник	Абсолютний показник	Відносний показник
$\tau/T = 0.1$						
y_{mg}	1.494	1.0	1.468	0.928	1.0	0.669
t_g / τ	6.24	1.0	5.473	0.877	3.126	0.501
J_g / τ	1.923	1.0	1.539	0.80	1.696	0.882
y_{mf}	0.145	-	0.12	-	0.113	-
t_f / τ	5.11	-	4.37	-	3.89	-
J_f / τ	0.051	-	0.0276	-	0.0215	-
M	1.764	1.0	1.652	0.936	1.0	0.567
$\Sigma \delta$		4.0		3.596		2.619
$\tau/T = 0.5$						
y_{mg}	1.23	0.996	1.235	1.0	1.02	0.826
t_g / τ	5.08	1.0	4.627	0.911	2.749	0.539
J_g / τ	1.55	0.985	1.285	0.817	1.573	1.0
y_{mf}	0.486	1.0	0.438	0.901	0.428	0.881
t_f / τ	5.36	1.0	4.725	0.881	4.35	0.811
J_f / τ	0.476	1.0	0.32	0.672	0.274	0.576
M	1.315	1.0	1.28	0.973	1.0	0.76
$\Sigma \delta$		6.981		6.156		5.393
$\tau/T = 1.0$						
y_{mg}	1.115	1.0	1.106	0.992	1.034	0.927
t_g / τ	4.22	1.0	3.997	0.947	2.507	0.594
J_g / τ	1.47	0.992	1.253	0.845	1.482	1.0
y_{mf}	0.68	1.0	0.653	0.96	0.652	0.959
t_f / τ	4.81	1.0	4.446	0.924	4.137	0.86
J_f / τ	0.808	1.0	0.629	0.778	0.571	0.707
M	1.102	1.0	1.077	0.977	1.0	0.907
$\Sigma \delta$		6.992		6.425		5.954

У табл. 1 у стовпці “Абсолютний показник” наведено абсолютні значення відповідних показників. Час регулювання та інтегральні квадратичні оцінки процесів подаються у відносній формі. Відносний показник – це відношення значення показника, отримане його діленням на максимальне абсолютне значення показника цього виду. Для систем з ПІ-ПІД-алгоритмом умовно прийнято, що $M = 1$.

Неперервні системи з астатичними об'єктами

Таблиця 2

**Параметри настроювання неперервних регуляторів для АСР
з астатичними об'єктами першого порядку**

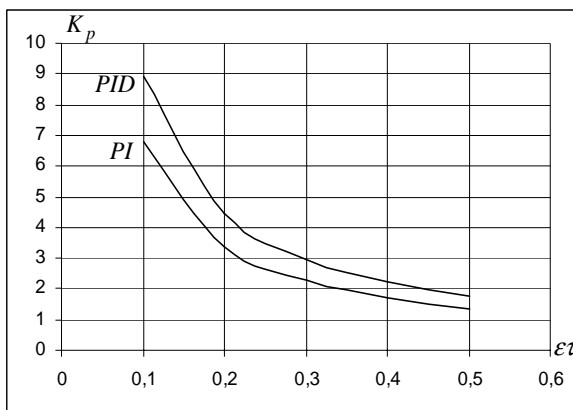
$\varepsilon\tau$	$W_{oa}(s) = \varepsilon e^{-\tau s} / s$			
	П	ПД	ПІ-ПД	
	K_p	K_p	K_{p1}	K_{p2}
0,1	6,78	8,901	3,127	6,925
0,2	3,39	4,451	1,564	3,463
0,3	2,26	2,967	1,042	2,308
0,4	1,69	2,225	0,782	1,731
0,5	1,36	1,78	0,625	1,385
T_i / τ	4,0	3,018	0,969	-
T_d / τ	-	0,27	-	0,383

Таблиця 3

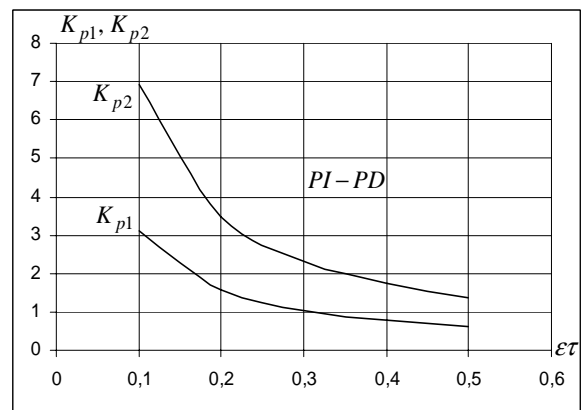
**Показники якості процесів відпрацювання завдання та запаси стійкості
в неперервних системах з астатичними об'єктами першого порядку**

Показник	$W_{oa}(s) = \varepsilon e^{-\tau s} / s$		
	П	ПД	ПІ-ПД
y_{mg}	1,61	1,592	1,018
t_g / τ	6,77	5,56	3,143
J_g / τ	2,238	1,747	1,738
A_m	2,02	1,96	2,42
F_m°	29,66	31,32	64,98
M	1,97	1,85	-

Примітка до табл. 2 і табл. 3: значення сталих часу інтегрування та диференціювання, а також показники якості системи та запаси стійкості не залежать від $\varepsilon\tau$ об'єкта.

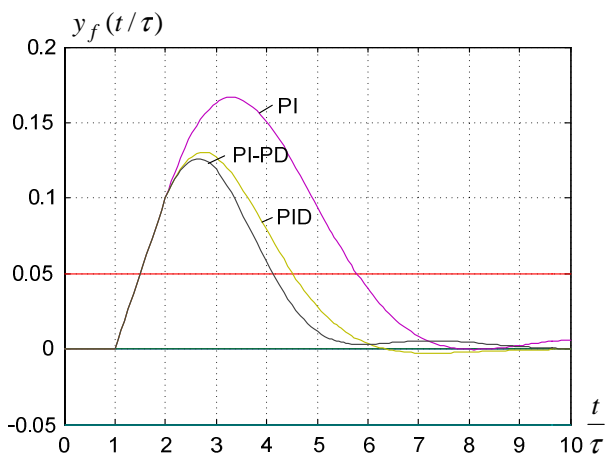


а

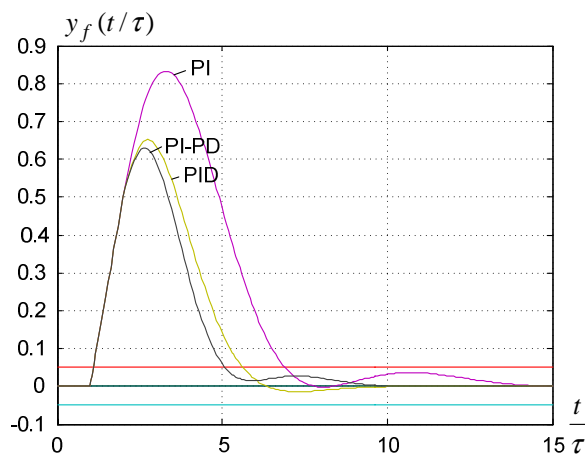


б

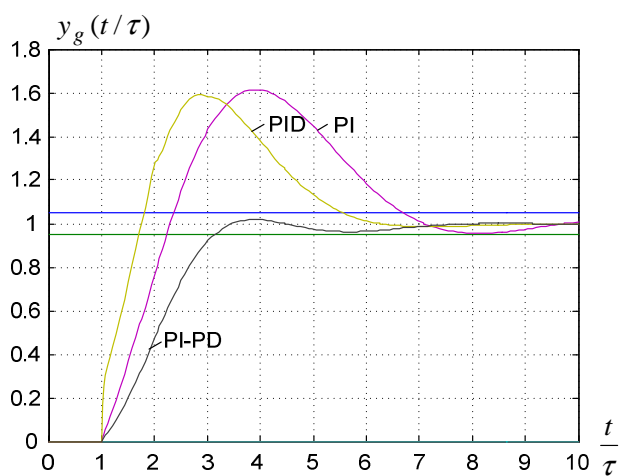
Рис. 6. Коefіцієнти підсилення регуляторів для систем з астатичним об'єктом $W_{oa}(s) = \varepsilon e^{-\tau s} / s$



a



б



в

Рис. 7. Перехідні процеси в системах з астатичним об'єктом $W_{oa}(s) = \varepsilon e^{-\tau s} / s$ та різними регуляторами; (а, в) – при $\varepsilon\tau = 0.1$; (б, в) – при $\varepsilon\tau = 0.5$

Як видно з табл. 3 і рис. 7, системи з ПІ-ПД-алгоритмом забезпечують найвищі показники якості, причому найбільшим виграш є при відпрацюванні завдання. Це підтверджується також кількісною оцінкою якості систем за методикою.

Аналогічні дослідження були виконано і для систем, що містять статичні та астатичні об'єкти другого порядку із запізненням, а також відповідних АСР з цифровими регуляторами при значеннях періоду дискретності $1c \leq T_0 \leq 4c$. Отримані результати подібні до наведених вище. Було також досліджено поведінку регулюючої змінної і чутливість перехідних характеристик систем до варіацій параметрів об'єкта в межах $\pm 30\%$, результати яких за браком місця тут не наводяться.

Висновки

1. Найвищою якістю майже за всіма показниками, особливо процесів відпрацювання завдання, в усьому прийнятному діапазоні зміни динамічних характеристик об'єкта характеризуються системи з ПІ-ПД-алгоритмом; це справедливо і для систем, що містять статичні об'єкти, і для АСР з астатичними об'єктами; не менш важливо, що висока якість досягається при малих значеннях регулюючої змінної, лише незначно більших, ніж в системах з ПІ-регулятором, але набагато менших, ніж в АСР з ПД-регулятором; це забезпечує малі затрати на регулювання і сприятливі

умови роботи виконавчого механізму та регулюючого органа; чутливість перехідних характеристик систем до варіацій параметрів об'єкта у декілька разів нижча порівняно з іншими системами.

2. Завдяки високим якість, а також простоті реалізації, що при застосуванні сучасних технічних засобів фактично не вимагає додаткових затрат, системи з ПІ-ПД-алгоритмом у перспективі можуть замінити традиційні АСР, що будуються на основі ПІ- та ПД-регуляторів, як послідовних коректуючих пристроїв.

3. Стратегію ПІ-ПД-регулювання доцільно застосувати з метою підвищення якості комбінованих систем, а також реалізації каскадних систем з послідовно-паралельною корекцією.

1. Ротач В. Я. Теория автоматического управления. – М.: Изд. МЭИ. – 2004.
2. Atherton D.P. PID Controller tuning. *COMPUTING & CONTROL ENGINEERING JOURNAL*. Vol. 10, № 2, April 1999, pp. 44–50.
3. Atherton D.P., and Majhi, S.: Tuning of optimum PI-PD controllers // 3rd Portuguese Conference on Automatic Control, Control'98', Coimbra, Portugal, 9th-11th September 1998, pp. 549–555.
4. Ковела І.М., Рудяк П.В., Іванюк О.О. Параметричний синтез АСР з неперервним та цифровим ПІ-ПД-алгоритмом регулювання // Збірник наукових праць Національного гірничого університету України. – Дніпропетровськ, 2004. – № 19, Т. 2. – С. 148–157.
5. Baran J. Optimum Phase Margin Tuning for PI Controllers // III Konferencja Naukowo-Techniczna Metody i systemy komputerowe w automatyce i elektronice III MSKAE'99, Częstochowa-Poraj, 1999, str. 293–295.
6. Наладка средств автоматизации и автоматических систем регулирования / Под ред. А.С. Ключева. – М.: Энергоатомиздат, 1989. – 368 с.
7. Давыдов Н.И., Идзон О.М., Симонова О.В. Определение параметров настройки ПИД-регулятора по переходной характеристике объекта регулирования // Теплоэнергетика. – 1995. – № 10. – С. 17–22.
8. Zhuang M. Atherton D.P. Automatic tuning of optimum PID controllers // *IEE Proc. – D*, Vol. 140, №3, pp. 216–224, 1993.
9. Ho W.K., Hang Ch., Cao L.S. Tuning of PID Controllers Based on Gain and Phase Margin Specifications // *Automatica*, Vol. 31, № 3, pp. 497–502, 1995.
10. Ho W. K., Lim K.W., Xu W.: Optimal Gain and Phase Margin Tuning for PID Controllers; *Automatica*, Vol. 34, № 8, pp. 1009–1014, 1998.
11. Справочник по наладке автоматических устройств контроля и регулирования. Ч. 2. / В.А. Дубровный и др. – К.: Наукова думка, 1981. – 940 с.
12. Шавров А. В., Солдатов В.В. Многокритериальное управление в условиях статистической неопределённости. – М.: Машиностроение. – 1990. – 160 с.
13. Ковела І.М. Параметричний синтез неперервних і цифрових автоматичних систем регулювання з ПІ- та ПД-регуляторами // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології”. – 2002. – № 450. – С. 38–50.
14. Kovala I. Multicriteria Parametric Optimization of Automatic Control Systems with a Digital PID-Algorithms, III Konferencja Naukowo-Techniczna Metody i systemy komputerowe w automatyce i elektronice III MSKAE'99, Częstochowa-Poraj, 1999, str. 291–293.
15. Ковела І.М., Рудяк П.В., Іванюк О.О. Оцінка якості одно- та двоконтурних автоматичних систем регулювання // Вісник Національного університету “Львівська політехніка” “Автоматика, вимірювання та керування”. – 2005. – № 530. – С. 3–13.