

**Висновки.** Наведені результати досліджень підтверджують доцільність та ефективність застосування каскадних систем з додатковими від'ємними зворотними зв'язками з огляду на покращання динамічної точності і, особливо, підвищення їх робастності; при цьому також можна забезпечити істотне зменшення максимального значення регулюючої змінної, що запобігає виникненню нелінійних режимів роботи системи.

Незважаючи на ускладнення структури, розрахунок КАСР з послідовно-паралельним корегуванням в аспекті обчислень не складніший, а інколи навіть простіший, ніж звичайних.

Розширення структурних і алгоритмічних можливостей створює умови для пошуку оптимальних рішень при синтезі КАСР.

1. Попов Е.П. Теория линейных систем автоматического регулирования и управления. – М., 1978. 2. Atherton D.P. PID Controller tuning. *COMPUTING & CONTROL ENGINEERING JOURNAL*. Vol. 10, № 2, April 1999, pp. 44-50. 3. Ковела І.М. Автоматичні системи регулювання з цифровими ПД-регуляторами, увімкненими за схемами послідовної та послідовно-паралельної корекції // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Теплоенергетика. Інженерія докілья. Автоматизація". – 2002. – № 460. – С. 3–11. 4. Ковела І.М., Рудяк П.В., Іванюк О.О. Параметричний синтез АСР з неперервним та цифровим ПД-алгоритмом регулювання // Збірник наукових праць Національного гірничого університету України. – Дніпропетровськ. – 2004. – № 19, Т. 2. – С. 148–157. 5. Ротач В.Я. Теория автоматического управления теплоэнергетическими процессами. – М., 1985. 6. Ковела І.М. Параметричний синтез неперервних і цифрових автоматичних систем регулювання з ПД- та ПД-регуляторами // Вісник Національного університету "Львівська політехніка" "Комп'ютерна інженерія та інформаційні технології". – 2002. – № 450. – С. 38–50. 7. Ковела І.М., Іванюк О.О. Синтез цифрових каскадних АСР у просторі параметрів настроювання регуляторів // Вісник Національного університету „Львівська політехніка” „Теплоенергетика. Інженерія докілья. Автоматизація”. – 2004. – №534. – С. 3–16. 8. Микропроцессорные системы автоматического регулирования /Под ред. В.В. Солодовникова. – М., 1991. 9. Шавров А.В. Многокритериальное управление в условиях статистической неопределенности. – М., 1990.

УДК 625.3.001

Е. Жак<sup>1</sup>, В. Яцук<sup>2</sup>

<sup>1</sup> Політехніка любельська, Польща,

<sup>2</sup> Національний університет "Львівська політехніка",  
кафедра метрології, стандартизації і сертифікації

## ДОСЛІДЖЕННЯ АЛГОРИТМІВ МОДЕЛЮВАННЯ В ЛІНІЙНИХ СИСТЕМАХ КЕРУВАННЯ СТАБІЛЬНИМИ ПРОЦЕСАМИ

© Жак Е., Яцук В., 2005

**The quality estimation of IMC algorithm control for high delay and large inertia objects are made in this paper. The IMC algorithm control sensitivity is determined as control signal value function. Mathematical model object chose are made also and defined some transfer function parameters provide control quality reduce.**

**Постановка проблеми.** Мікропроцесорні регулятори, які широко почали використовувати у 70–80-х роках минулого століття, зробили можливим реалізувати різноманітні, інколи дуже

складні алгоритми керування. Серед інших особливе місце зайняв розвиток ідеї Сміта (Smith Predictor Control), який дав широкий клас так званих передбачувальних (предикційних) алгоритмів керування, які мають різні назви залежно від того, які елементи системи управління є найважливішими для реалізації алгоритму

**Аналіз останніх досліджень.** Наявність моделі процесу в алгоритмі керування відображено у назві Internal Model Control (ІМС) [1, 2], використання моделі з безпосередніми вимірюваннями завад – Inferential Control, використання ж моделі процесу для збурень – Model Predictive Control (МРС) [3]. Різноманітні ідеї створення і інтерпретація предикційних алгоритмів управління виникли в різні часи й незалежно одна від одної. Це привело до використання дуже різноманітної термінології, а головне, трактування деяких з них, як абсолютно нових, не пов'язаних з іншими, рішень. Системи регулювання, що використовують головну ідею предикції (МРС), особливо такі, як ІМС [1, 2, 4], DMC (Dynamic Matrix Control) [5, 6], а також MAC (Model Algorithmic Control) [7, 8] використовувались і використовуються в нафтохімічній та хімічній промисловості. Тепер у щораз більшому обсязі вони використовуються і в енергетиці.

**Завдання досліджень.** Робота розглядає питання розвитку методів проектування алгоритмів регуляторів лінійних систем, головним завданням яких є функція забезпечення відповідності вихідного сигналу  $y$ , сигналу управління  $r$ , за умови послаблення збурень, що діють на вихід процесу (рис.1). Припускається, що математична модель процесу відома і це дає можливість передбачити, як вихідні характеристики процесу будуть реагувати на сигнали керування і збурення з використанням класичної структури ІМС [1, 2, 9]. Приймається також, що обмежень на сигнал керування немає. В роботі наведено результати комп'ютерного моделювання системи управління зі структурою ІМС в програмному середовищі Matlab/Simulink (програма ІМСТUNE) [10, 11]. Досліджувався вплив характеристик системи, таких як запізнення, інерційність, чутливість до обмеження керуючого сигналу на якість регулювання [12, 13].

**Виклад основного матеріалу.** Загальна характеристика системи управління зі структурою ІМС. В [4, 8, 12] показано, що більшість систем МРС, можна подати у вигляді структури ІМС (рис. 2), якщо для запобігання дії збурень використовується загальна аналітична модель процесу, записана при нульових початкових умовах, наприклад, за допомогою операторних перетворень. Тоді можна отримати лінійний, незмінний в часі регулятор, який містить функції  $Q(s)$  та  $P_0(s)$ . Перетворення  $P(s)$  являє собою стабільний об'єкт,  $P_0(s)$  – перетворення для моделі об'єкта (так звана внутрішня модель),  $r$  – зовнішній сигнал управління, а  $Q(s)$  – стабільну функцію перетворення.

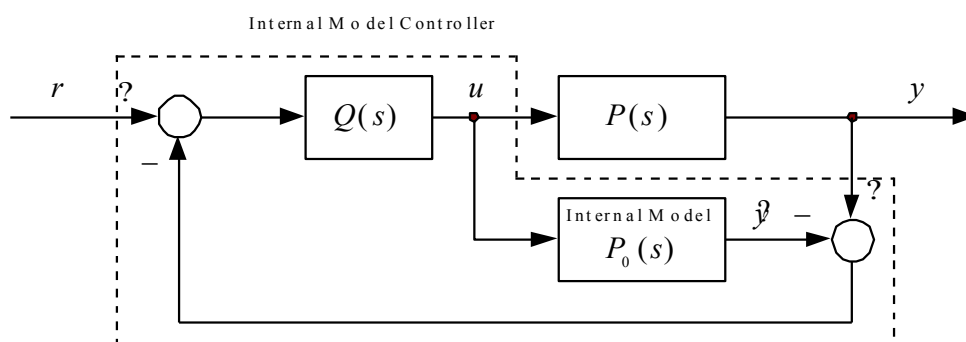


Рис. 1. Структурна схема ІМС

Відомо, якщо  $P(s)$  стабільна і  $P_0(s) = P(s)$ , то система, показана на рис. 1, стабільна тоді і тільки тоді, коли функція перетворення  $Q(s)$ , яка називається параметром ІМС [1], є стабільною [1]. Це дуже важлива і ефективна ознака системи з ІМС порівняно з класичною структурою зі зворотним зв'язком. Її головна перевага полягає в тому, що стабільність замкнутої системи досягається через підбір стабільного параметра ІМС, а якісні характеристики процесу регулювання в замкнутій системі (наприклад, час регулювання, перерегулювання тощо) безпосередньо залежать від цього параметра.

Якщо розглядати стандартну конфігурацію зі зворотним зв'язком, як на рис. 2, де  $P(s)$  і  $C(s)$  є відповідно розмірними функціями перетворення процесу (об'єкта) і компенсатора, то для деякої вибірки стабільних і розмірних  $Q(s)$  вибірка всіх стабілізуючих регуляторів (компенсаторів)  $C(s)$  подається залежністю (1), що графічно показано на блочній схемі (рис. 3)

$$C(s) = Q(s) / [1 - P(s)Q(s)]. \quad (1)$$

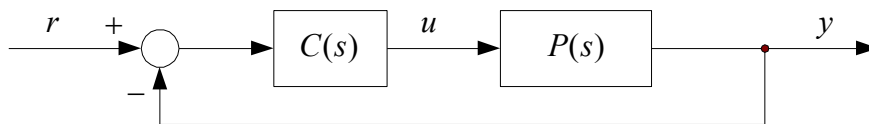


Рис. 2. Структура звичайної системи регулювання зі зворотним зв'язком

З рис. 3 зрозуміло, що керуючий сигнал в структурі ІМС відповідає залежності (закону керування):

$$u = Q(s)[r - (y - \hat{y})]. \quad (2)$$

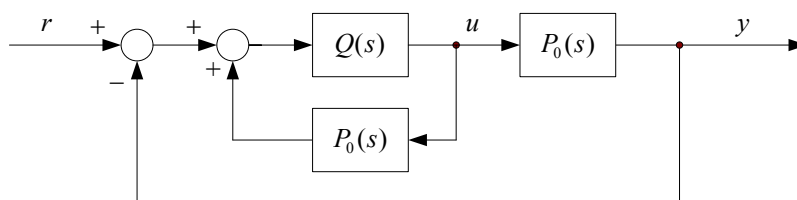


Рис. 3. Система зі зворотним зв'язком, що відповідає формулі (1)

Альтернативний закон керування, який якнайкраще відповідає адаптації коефіцієнтів  $Q(s)$  в реальному часі, може бути поданий у вигляді

$$u = q_d^T \frac{a_{n_d-1}(s)}{\Lambda_1(s)} [u] + q_n^T \frac{a_{n_d}(s)}{\Lambda_1(s)} [r - (y - \hat{y})], \quad (3)$$

де поліноми:  $\Lambda_1(s) - Q_d(s) = q_d^T a_{n_d-1}(s)$ ;  $Q_n(s) = q_n^T a_{n_d}(s)$ ;  $a_{n_d}(s) = [s^{n_d}, s^{n_d-1}, \dots, 1]^T$ ,  $a_{n_d-1}(s) = [s^{n_d-1}, s^{n_d-2}, \dots, 1]^T$ ;  $Q(s) = \frac{Q_n(s)}{Q_d(s)}$ ; а  $\Lambda_1(s)$  – попередньо вибраний поліном Гурвиця порядку  $n_d$  та  $q_d$  і  $q_n$  відповідно вектори коефіцієнтів поліномів  $\Lambda_1(s) - Q_d(s)$  і  $Q(s)$ .

Необхідно зазначити, що використання структури ІМС, яка показана на рис.1 і подана залежністю (3), відповідає тільки об'єктам, які є стабільними в структурі без зворотного зв'язку. Нестабільний об'єкт з розімкнутим зворотним зв'язком в таких конфігураціях буде також нестабільним в структурі із замкнутим зворотним зв'язком, оскільки ідеальна відповідність моделі дійсному об'єкту призведе до того, що не буде сигналу в колі зворотного зв'язку, який можливо було б використати для стабілізації (схема стає відкритою). Оскільки для довільного стабільного параметра ІМС стабільність схеми гарантована, є можливість прогнозувати (забезпечувати) якість, вільно підбираючи  $Q(s)$ . Різноманітний вибір стабільного  $Q(s)$  може приводити до відомих методів синтезу алгоритмів управління, які використовують розміщення полюсів, модель піднесення (Model Reference Control), мінімізацію норми  $L_2$  ( $H_2$  – optimal control) тощо.

Головною метою управління з використанням моделі віднесення є створення регулятора, який не містить у собі дії диференціювання у такий спосіб, щоб вихід у процесу асимптотично наближався до виходу стабільної моделі віднесення  $W_m(s)$ . При цьому необхідне виконання відомих умов: об'єкт  $P(s)$  є мінімальнофазовий і відносно передавальне число моделі віднесення  $W_m(s)$  не менше від  $P(s)$ . Гарантією досягнення мети управління з моделлю взірцевою (для ідеального випадку, без похибок моделювання процесу) дає параметр ІМС у вигляді

$$Q(s) = W_m(s)P^{-1}(s). \quad (4)$$

*Проектування алгоритму ІМС.* Процедура синтезу реалізуючого алгоритму ІМС не закінчується визначенням  $Q(s)$ . Початкова реалізація містить у собі протилежність моделі процесу, яка у загальному випадку може бути неможливою фізично. Останнє може призвести до нестабільності або недопустимо низької якості системи регулювання, наприклад, коли наведені вище процеси описані безвимірними або багатополусовими передавальними функціями. Зазвичай реалізується відповідна  $Q(s)$ , застосовуючи високочастотне гальмування за допомогою так званого фільтра ІМС  $F(s)$ . Конструкція фільтра ІМС добирається у досить довільний спосіб, але так, щоб забезпечити асимптотичні властивості стеження регулятора.

Проектування системи управління з внутрішньою моделлю виконується в два етапи: з досягненням компромісу між якістю регулювання та однорідністю системи недокладності моделювання процесу. На першому етапі проектується стабільний, що задовольняє певним критеріям оптимізації, параметр  $Q(s)$ , який обирається як зворотний до мінімальнофазового чинника моделі процесу. Другий етап полягає в проектуванні фільтра нижніх частот  $F(s)$ , такого, щоб розширений параметр ІМС  $[Q(s)F(s)]$ , маючи вищевказані ознаки, давав можливість фактичної реалізації регулювання.

Найчастіше обирають фільтр ІМС з передавальною функцією такого вигляду:

$$F(s) = \frac{1}{(\tau s + 1)^n}, \tau > 0, \quad (5)$$

де  $n$  – порядок фільтра (велике додатне число).

Стала часу фільтра є підстроювальним параметром, її збільшення зменшує швидкість відповіді системи на збурення, і навпаки. Цей параметр може бути використаний з метою компенсації недокладності моделі процесу. Чим більший цей параметр, тим відпирність системи вища.

Процедура синтезу регулятора ІМС для стабільного процесу, описаного ідеальною лінійною моделлю у вигляді [12]

$$P(s) = \frac{N(s)}{D(s)} e^{-Ts}, \quad (6)$$

де  $N(s)$  і  $D(s)$  – поліноми від змінної  $s$ ;

$T$  – стала запізнення.

Стала запізнення може мати два випадки: у першому відсутні нулі у правій половині коефіцієнтного ряду, процес є стабільним мінімальнофазовим, а в другому – процес немінімальнофазовий, у правій половині ряду коефіцієнтів присутні нулі. Для першого випадку ідеальним регулятором був би такий, що має функцію перетворення

$$Q(s) = \frac{D(s)}{N(s)}, \quad (7)$$

але такий регулятор неможливо створити практично, тому застосовується регулятор з додатковим фільтром:

$$Q(s) = \frac{D(s)}{N(s)(\tau s + 1)^r}, \quad (8)$$

де  $r$  – різниця порядків поліномів  $N(s)$  і  $D(s)$ .

Стала часу фільтра повинна відповідати умові

$$\tau^3 \left( \lim_{s \rightarrow 0} \frac{D(s)N(s)}{20s^r N(s)D(s)} \right)^{1/r}. \quad (9)$$

Гранична, мінімальна вартість, обчислена із залежності (9), є оптимальною вартістю для цього об'єкта з точки зору швидкості та регульовального сигналу. Разом з тим виявляється, що під час застосування алгоритму ІМС найкраще тільки збільшувати сталу часу фільтра. Це призводить до сповільнення регулювання, але разом з тим уможливорює обмежити величину регульовального сигналу.

У другому випадку, для процесів стабільних мінімальнофазових, коли чисельник функції перетворення моделі процесу має складові у вигляді  $(-\sigma s + 1)$  або  $(\sigma^2 s^2 - 2\sigma\zeta s + 1)$ , тому не можна використовувати методи, застосовані у першому випадку. Припустимо, що є стабільний немінімальнофазовий процес

$$P(s) = \frac{N_1(s)}{D(s)} (-\sigma s + 1)(\sigma^2 s^2 - 2\sigma\zeta s + 1), \quad (10)$$

де поліном  $N_1(s)$  має нулі в лівій напівплощині простору  $s$ . Синтез регулятора ІМС у цьому випадку полягає на заміні дійсної частини нулів на величину від'ємну, або дзеркального відбиття положення нулів (перенесення всіх нулів до лівого напівпростору  $s$ ). Маємо тоді стабільний, але ще такий, що його не можна реалізувати, алгоритм ІМС:

$$Q(s) = \frac{D(s)}{N_1(s)(\sigma s + 1)(\sigma^2 s^2 + 2\sigma\zeta s + 1)}. \quad (11)$$

Аналогічно, як і в першому випадку, коли процес був мінімальнофазовим, включаючи послідовний фільтр, можна сконструювати регулятор ІМС з параметром  $Q(s)$  у вигляді

$$Q(s) = \frac{D(s)}{N_1(s)(\sigma s + 1)(\sigma^2 s^2 + 2\sigma\zeta s + 1)(\tau s + 1)^r}. \quad (12)$$

*Моделювання системи регулювання та її дослідження.* Властивості алгоритму ІМС були досліджені на імітаційній моделі, побудованій за допомогою середовища програмування MATLAB/SIMULINK [10] з використанням спеціального інтерфейсу ІМСТУНЕ [11]. Користуючись вищеописаною методикою проектування, були синтезовані параметри ІМС та фільтра. Використовуючи SIMULINK, було створено систему керування об'єктом (рис. 4).

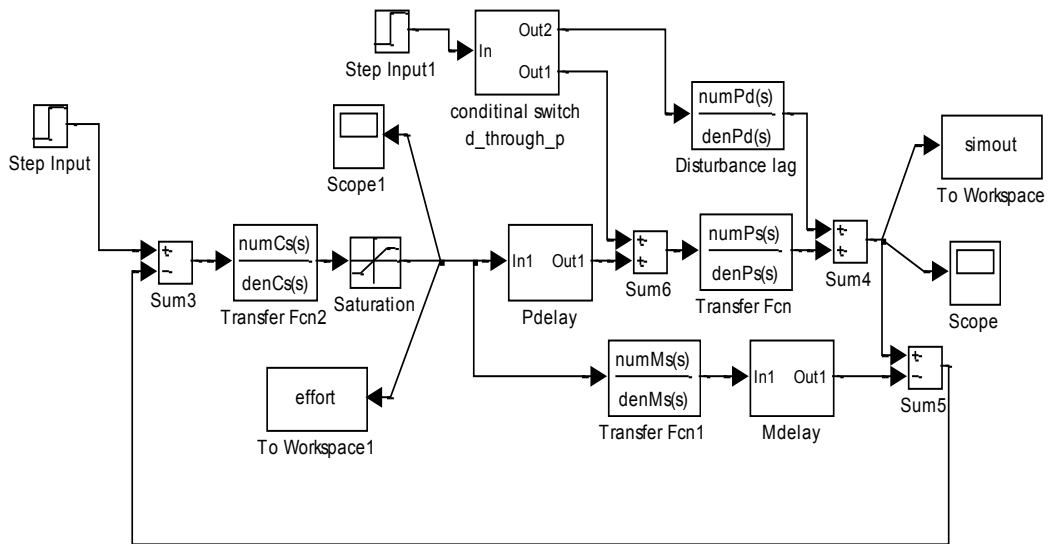


Рис. 4. Схема системи регулювання з регулятором ІМС в програмі Simulink

Дослідження можливостей структури ІМС проводились для стабільного процесу з інерцією першого роду та запізненням у вигляді  $p(s)=e^{-s}/(s+1)$ , в припущенні, що модель ідеально описує процес. Згідно з описаними вище процедурами проектування вибрано регулятор ІМС разом з фільтром  $q(s)=(s+1)/(0.05s+1)$ . Ступінчасті відповіді системи з регулятором ІМС та керуючий сигнал показано на рис. 5. Для порівняння якості регулювання було проведено також імітування системи з регулятором PID зі сталими Зіглера–Нікольсона, коефіцієнтом підсилення  $K_p=1,406$ , сталою інтегрування  $T_i=1,476$  та сталою диференціювання  $T_d=0,3687$ .

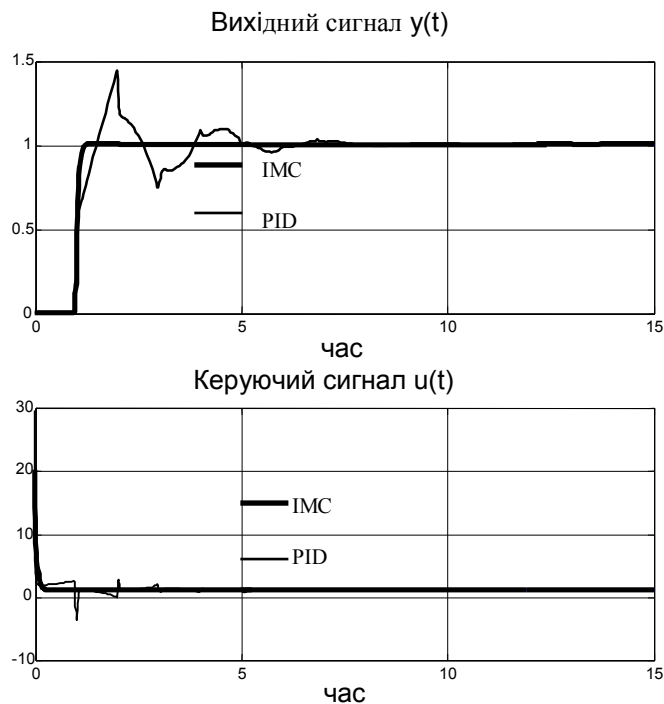


Рис. 5. Відповіді та керуючі сигнали з регуляторами ІМС та PID

Як бачимо з рис. 5, система з регулятором ІМС та оптимальним фільтром значно краще відповідає завданню регулювання, ніж система з регулятором PID. Необхідно відмітити, що це вимагає великого керуючого сигналу. За збільшення сталої часу фільтра властивості відповіді стають майже ідентичними (рис. 6).

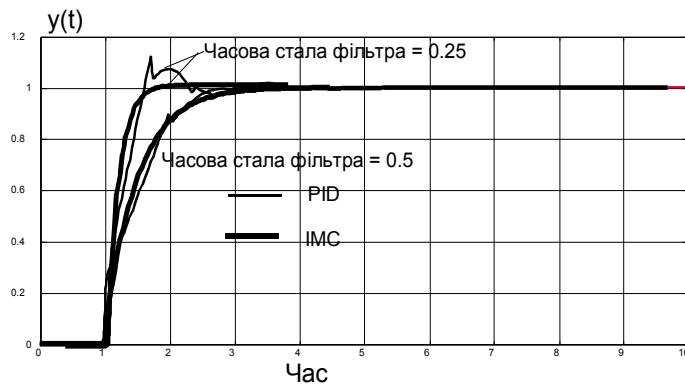


Рис. 6. Вихідні сигнали системи з регуляторами ІМС та PID для збільшених значень сталої часу фільтра

Властивості досліджуваної структури за зміни часової сталої та порядку інерції проводились для процесу та його моделі у вигляді  $p(s)=4e^{-s}/[(5s+1)(6s+1)]$ , при цьому параметр ІМС набирає вигляду  $q(s)=[(5s+1)(6s+1)]/[4(1.225s+1)^2]$ . Результати (рис. 7) показують, що регулятор ІМС (на відміну від PID) дає дуже добру якість регулювання за навіть великих запізнень, що потрібно відзначити, як одну з найважливіших ознак цього регулятора. Очевидно, що самого запізнення не компенсує жоден з алгоритмів.

Як зрозуміло з попередніх досліджень, управляючий сигнал може бути доволі великим, у той час, як в діючих системах це не завжди можливо. Дослідження показують, що обмеження управляючого сигналу значно погіршує якість ІМС-регулювання і не впливає на PID-регулювання.

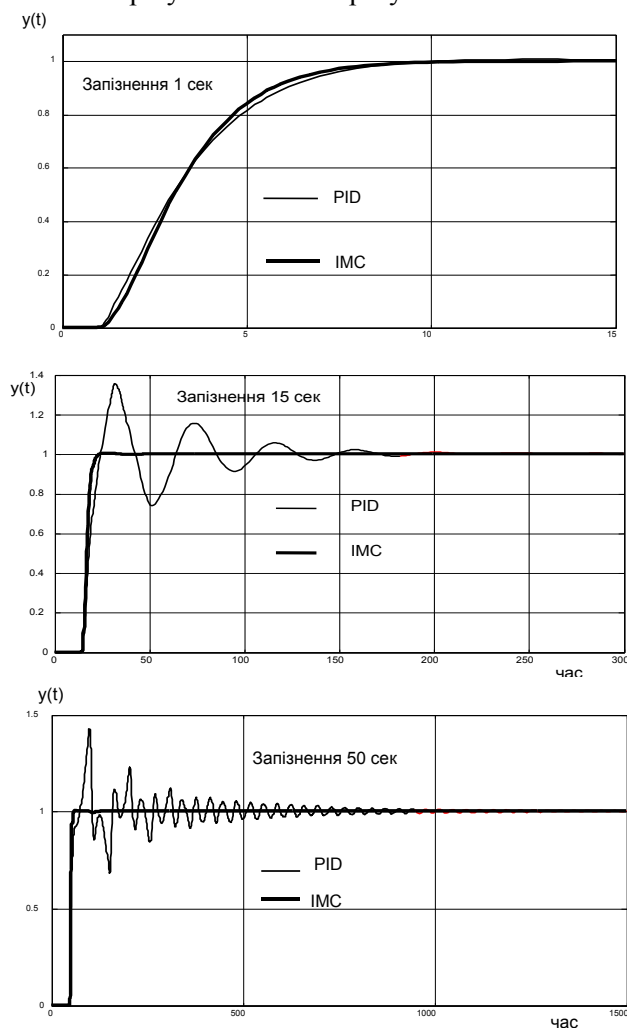


Рис. 7. Вихідні сигнали системи з регуляторами ІМС і PID для різних запізнень

У процесі випробувань регулятор показав добрі властивості при роботі із стабільним немінимальнофазовим об'єктом. Досліджувався процес  $p(s)=(1-s)e^{-10s}/[(s+1)(s+2)(s+0.5)]$ , для якого на рис. 8 показано вихідні сигнали системи.

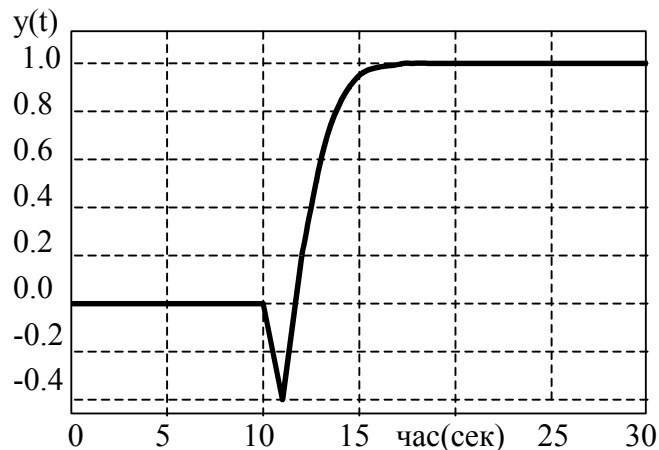


Рис. 8. Вихідні сигнали системи при роботі зі стабільним немінимальнофазовим об'єктом

**Висновки.** Проведений аналіз алгоритму ІМС підтверджує його високу якість регулювання об'єктів з великим запізненням та великою інерцією. Встановлено, що алгоритм є чутливим щодо обмеження величини керуючого сигналу, але обмеження не впливають на характер самого сигналу. Дуже важливим є вибір математичної моделі об'єкта, особливо – відображення його запізнення. Зміна деяких з параметрів функції перетворення призводить до швидкого зменшення якості регулювання.

1. A. Datta *Adaptive Internal Model Control*, Springer, 1998.
2. Garcia C.E., Morari M. *Internal Model Control*, *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.*, 21, 1982, 24, 1985.
3. Pułaczewski J. *Regulacja predykcyjna i jej przydatność dla kompensacji zakłóceń*, *Archiwum Automatyki i Telemekhaniki*, zeszyt 4, 1988.
4. Brosilow C., Joseph B. *Techniques of Model-Based Control*, Prentice Hall, 2002.
5. Cutler C., Ramaker B. *Dynamic Matrix Control – A Computer Control Algorithm*, *Proc. of the IACC, San Francisco*, 1980.
6. Marusak P., Pułaczewski J. *Szczególne zalety algorytmu regulacji Dynamic Matrix Control (DMC)*, *Automation '99, Warszawa*, ss. 98–105, 1999.
7. Joe Qin S., Badgwell T.A. *An Overview of Industrial Model Predictive Control Technology*, <http://www.che.utexas.edu/~jqin/cpcv/cpcv14.html>.
8. Åström K.J., Wittenmark B. *Computer Controlled Systems, Theory and Design*, Prentice Hall, 1984.
9. Parrish J.R., Brosilow C. *Inferential Control Applications*, *Automatica*, 21, No 5, 1985.
10. Mrozek B., Mrozek Z. *MATLAB 5.x SIMULINK 2.x poradnik użytkownika*, PLJ Warszawa, 1998.
11. <http://authors.phptr.com/brosilow/software/imctune.zip>.
12. Watanabe K., Ito M. *A Process – Model Control for Linear Systems with Delay*, *IEEE Transactions on Automatic Control*, Vol. AC-26, No 6, 1981.
13. Morari M., Zafiriou E. *Robust Process Control*, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1989.