

УДК 629.705: 531.383

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771482024317876>

О. В. Збруцький¹, *д.т.н., професор*, **В. С. Осокін²**, *PhD студент*

ОПТИМІЗАЦІЯ ІНВАРІАНТНОЇ ДО ЗБУРЕНЬ СИСТЕМИ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Уа

Показана можливість оптимізації інваріантної до збурень системи автоматичного керування шляхом розширення структури коефіцієнту регулювання впливу збурень. Проаналізоване використання алгебро--інтегрально-диференціальної структури та окремих їх складових та встановлений переважачий вплив кожної з них на швидкодію, характер поведінки системи та її усталену похибку. Числове моделювання підтвердило ефективність викорис-

¹ КПІ ім. Ігоря Сікорського

² КПІ ім. Ігоря Сікорського

тання такої структури регулятора впливу збурень для забезпечення швидкодії та якості керування при довільних зовнішніх збуреннях.

En The possibility of optimizing the automatic control system invariant to perturbations by expanding the structure of the perturbation control coefficient is shown. The use of the algebraic-integral-differential structure and their individual components is analyzed, and the prevailing influence of each of them on the speed of operation, the nature of the system's behavior, and its fixed error is established. Numerical modeling confirmed the effectiveness of using such a structure of the controller for the impact of disturbances to ensure speed and quality of control under arbitrary external disturbances.

Вступ

Одним із простих та ефективних методів підвищення точності систем автоматичного керування є використання принципу інваріантності, відомого також як керування за збуренням. Для аналізу динаміки нелінійних дискретних систем, схильних до обмежених збурень, застосовується метод різницевих включень [1]. Інваріантність може досягатись шляхом оцінки зовнішніх збурень [2]. Важливою перевагою є можливість збільшення коефіцієнта посилення робастного регулятора без втрати стійкості, що дозволяє зводити вплив збурень до мінімуму [3]. Основним завданням тому залишається забезпечення інваріантності щодо збурень зі збереженням оптимальності.

Метод інваріантних еліпсоїдів спрощує проектування оптимальних регуляторів, зводячи задачу до пошуку найменшого інваріантного еліпсоїда для замкнутої динамічної системи [4]. Продуктивність перехідних процесів можна покращити завдяки адаптивному зворотному зв'язку із застосуванням модульної конструкції регулятора високого порядку [5]. Використання підходу зворотних динамічних моделей передбачає створення структури регулятора, яка включає спостерігач і компенсатор для оцінки та компенсації збурень [6]. Проте більшість цих підходів застосовуються лише для окремих типів збурень, потребують додаткових вимірювань і не завжди забезпечують оптимальність за швидкістю та точністю системи керування.

Постановка задачі

Метою даного дослідження є оптимізація інваріантної до зовнішніх збурень системи керування за швидкістю та похибками стабілізації

Структура системи керування

Розглянемо замкнену систему керування по збуренню [7] зі зворотним зв'язком, що включає ланку із передатною функцією, яка є оберненою динамічною моделлю об'єкта керування з коефіцієнтом регулювання для забезпечення заданої гарантованої точності (рис. 1).

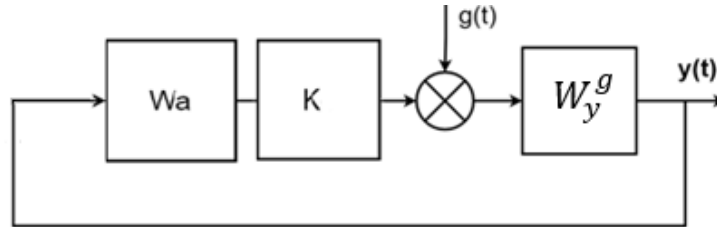


Рис. 1. Структура системи керування інваріантної до збурень

На рис. 1 $y(t)$ – контрольована величина, $g(t)$ – збурення, W_y^g – передатна функція об'єкта керування по збуренню, K – коефіцієнт регулювання, W_a – обернена динамічна модель системи: $W_a(s) = [W_y^g(s)]^{-1}$.

Передатна функція системи керування (рис.1) для забезпечення інваріантності до збурень [8] має вигляд

$$\Phi(y) = \frac{y}{g} = \frac{W_y^g(y)}{1 + K(y)}, \quad (1)$$

в якому коефіцієнт регулювання $K(y)$ формується як функція змінної стану y .

Коефіцієнт регулювання K у разі його додатної визначеності забезпечує інваріантність системи автоматичного керування до збурень [7], [8], [9] як не перевищення змінними стану системи допустимого значення

$$|y| \leq y_{ad}. \quad (2)$$

Структура цього коефіцієнту як алгебраїчної функції змінної стану забезпечує виконання умов гарантованої точності керування (2) під час дії збурення та визначає швидкодію системи [9]. Тому якість перехідних процесів системи не регулюється.

Розглянемо ефективність розширення структури коефіцієнта регулювання K до структури, подібної ПІД – регулятору, який у системах автоматичного керування дозволяє досягати оптимальності за певними критеріями [10]. Коефіцієнт регулювання має загальний вигляд

$$K(y) = \frac{K_{II}}{y_{ad} - |y(t)|} + K_I \cdot \int y(t) + K_D \cdot \frac{dy(t)}{dt}. \quad (3)$$

Формування коефіцієнта регулювання ПІД-регулятор (алгебраїчна функція змінної стану) сформуємо у вигляді

$$K = \frac{1}{y_{ad} - |y|}, \quad (4)$$

$$K = \frac{1}{e^{y_{ad} - |y|}}. \quad (5)$$

Результати моделювання реакції системи керування (1) у разі дії випадкового зовнішнього збурення для $y_{ad} = 0,4$ показані на рис. 2.

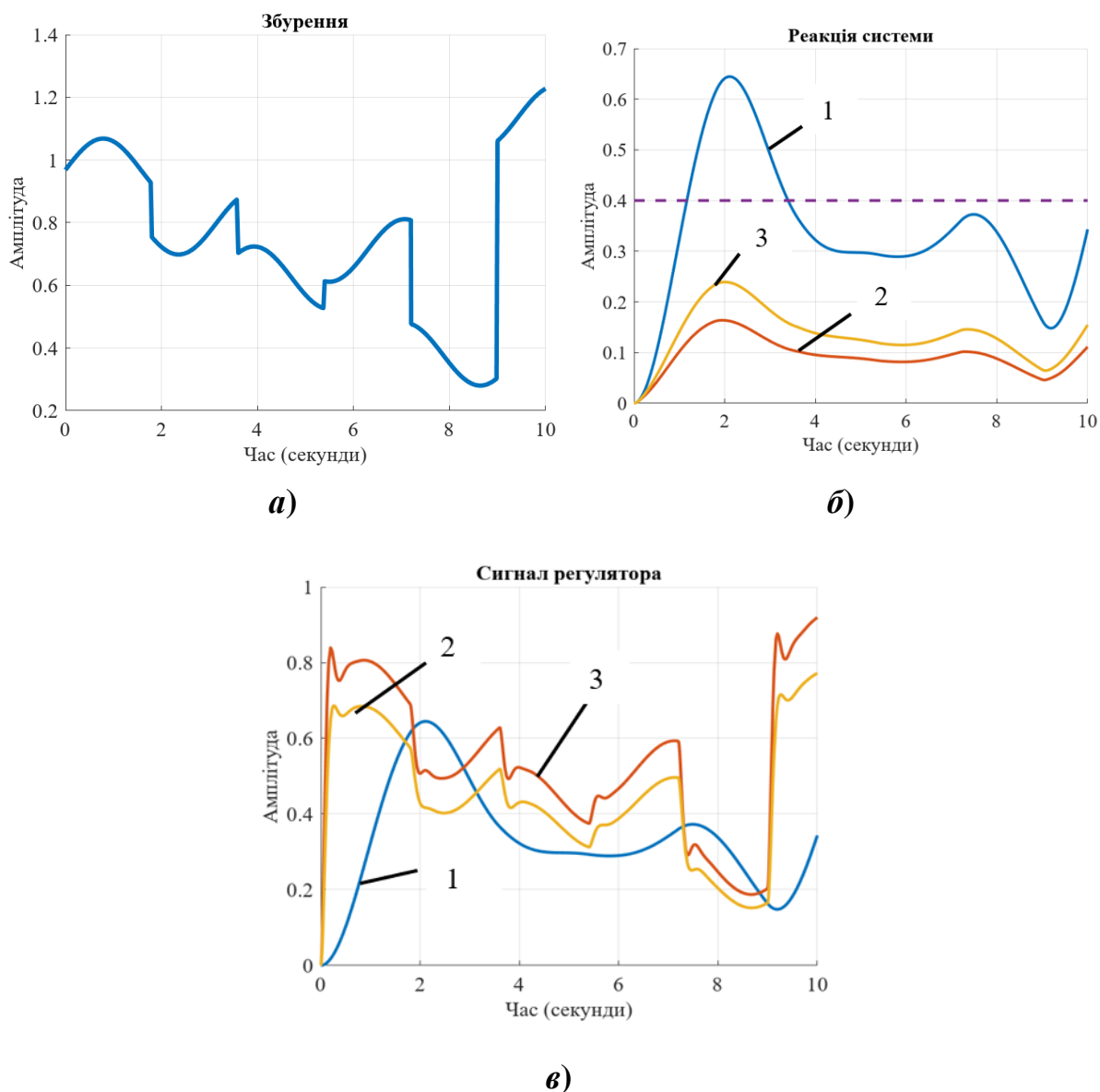


Рис. 2. Випадкове збурення (а); реакція системи (б): без регулятора (б, лінія 1), із П-регулятором (4) (б, лінія 2), із П-регулятором (5) (б, лінія 3); сигнал стабілізації без регулятора (в, лінія 1), сигнали регулятора (4), (5) (в, лінії 2, 3)

Аналіз результатів моделювання (рис. 2, б) показує, що П-регулятор забезпечує виконання умови гарантованої (заданої) точності (2), а сформо-

ваний сигнал П- регулятора (рис. 2, в) значно збільшує швидкодію системи.

ПД – регулятор (алгебраїчно - диференціальний) має структуру

$$K(y) = \frac{K_{\text{П}}}{y_{\text{ад}} - |y(t)|} + K_{\text{Д}} \cdot \frac{dy(t)}{dt}, \quad (6)$$

Результати моделювання реакції системи керування (1) у разі дії випадкового зовнішнього збурення для $y_{\text{ад}} = 0,4$ показані на рис. 3.

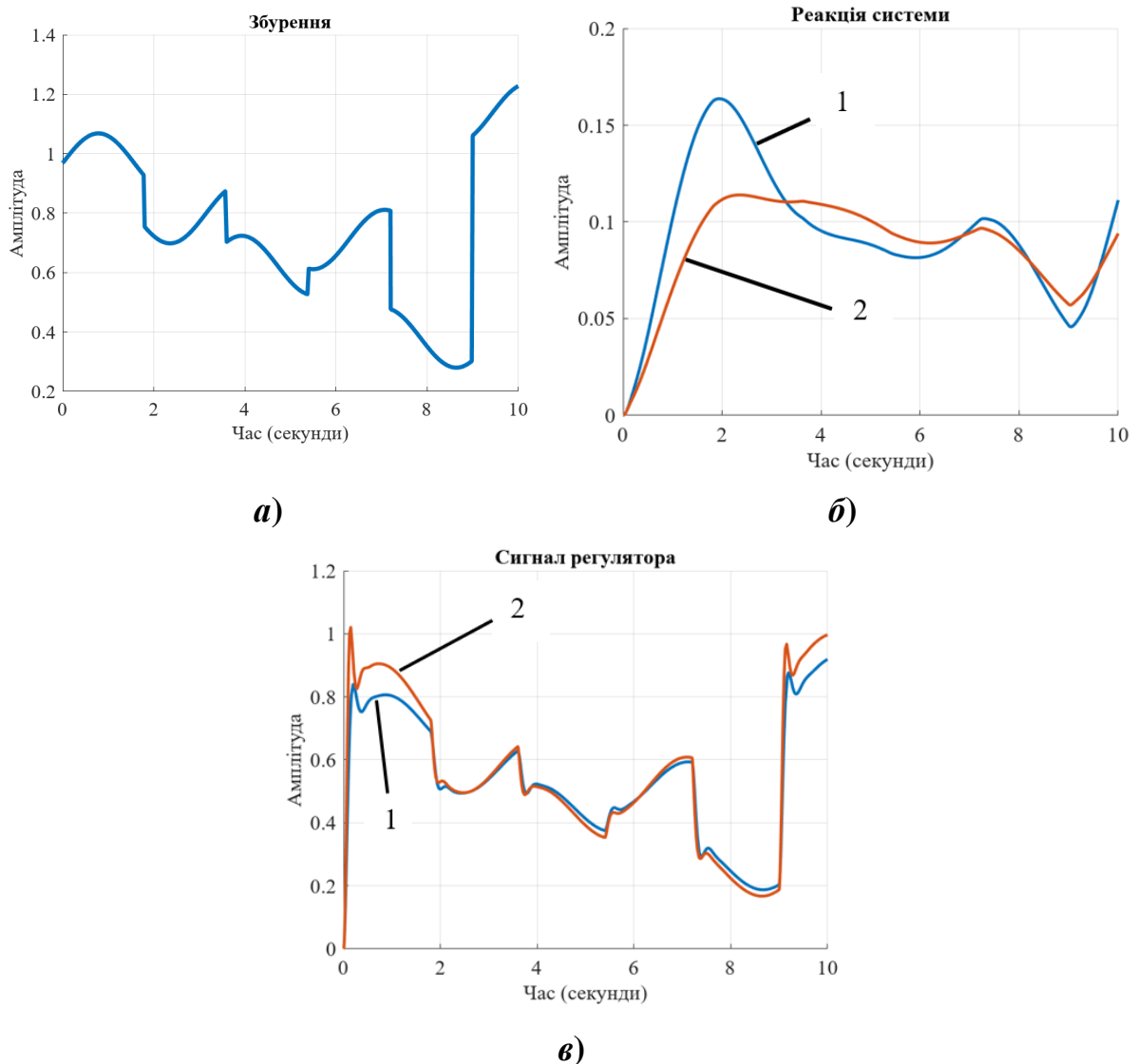


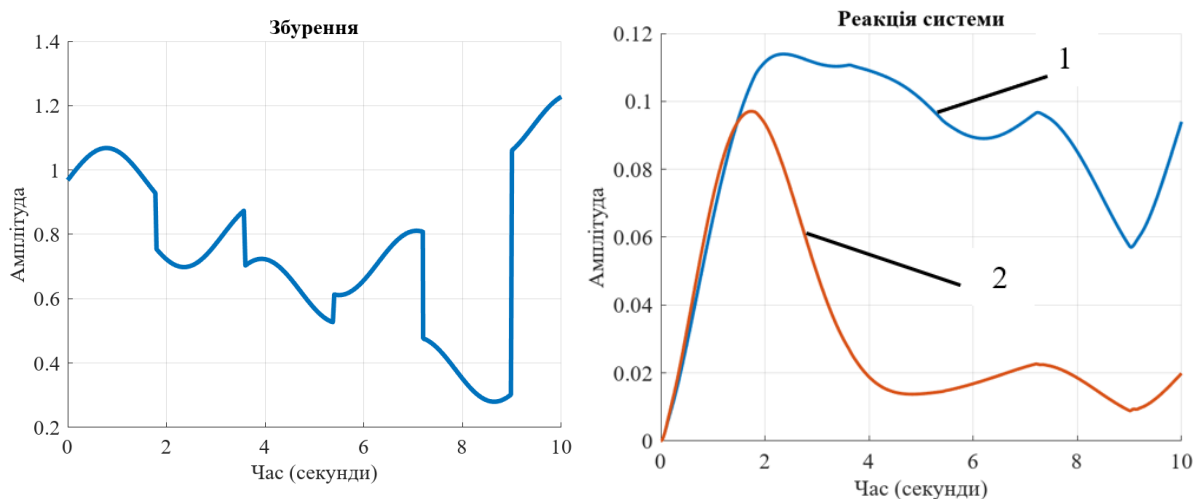
Рис. 3. Випадкове збурення (а), реакція системи із П-регулятором (4) (б, лінія 1) та ПД-регулятором (6) (б, лінія 2) (б), сигнал П-регулятора (4) (в, лінія 1) та ПД-регулятора (6) (в, лінія 2)

Результати моделювання реакції системи (1) на збурення (рис. 3, а) із ПД-регулятором (6) показує зменшення (рис. 3, б, лінія 2) амплітуди реакції (амплітуди похибки) введенням у регулятор диференціальної складової. Тому досягнуті П-регулятором (4) швидкодія (рис. 3, б, лінія 1) та сигнал

Системи та процеси керування

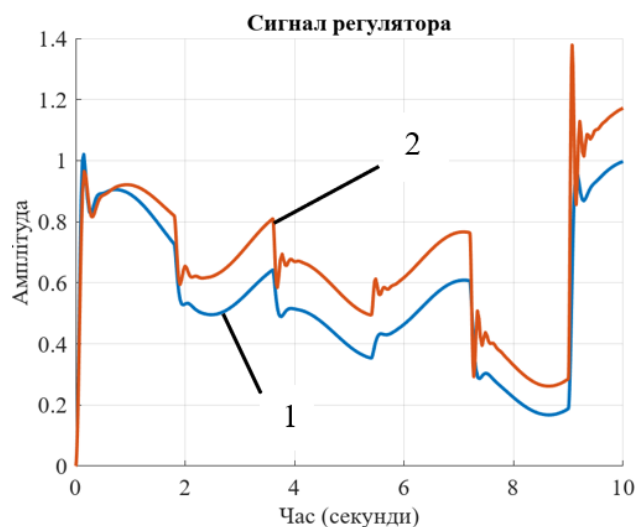
регулятора (рис. 3, в, лінія 1) у ПД – регуляторі змінюються незначно (відповідні лінії 2 на рис. 3, б, рис. 3, в).

ПІД-регулятор (алгебро -інтегрально-диференціальний) має структуру (3). Результат моделювання реакції системи керування (1) під час дії випадкового зовнішнього збурення для $y_{ad} = 0,4$ показаний на рис. 4.



а)

б)



в)

Рис. 4. Випадкове збурення (а); реакція системи на збурення: із ПД - регулятором (б) (б, лінія 1) та із ПІД - регулятором (3) (б, лінія 2); сигнал керування ПІ-регулятора (в, лінія 1) та ПІД – регулятора (в, лінія 2)

Результати моделювання показують, що інтегральний доданок ПІД - регулятора (3), що вводить астатизм у систему, забезпечує компенсацію накопиченої похибки (рис. 4, б, лінія 2). Сигнал регулятора (3)

(рис. 4, в, лінія 2) змінюється несуттєво у порівнянні із сигналами регуляторів (4), (5) та (6) (рис. 4, в, лінія 1).

Висновки

Проведені дослідження та числове моделювання системи керування гарантованої точності з різною структурою коефіцієнта зворотного зв'язку показали наступне:

1. Алгебраїчна складова регулятора забезпечує підвищення швидкодії системи, а його структура визначає обмеження величини похибки системи під час дії збурень.
2. Диференціальна складова регулятора забезпечує плавність поведінки змінної стану системи, зменшуючи швидкість реакції на збурення та піки.
3. Інтегральний складова регулятора вводить астатизм у систему, забезпечуючи компенсацію накопиченої похибки. Це дозволяє зменшити статичну похибку, особливо за тривалих або повторюваних збуреннях.
4. Встановлено, що оптимізація за швидкодією та величиною реакції інваріантної до збурень системи керування із зворотною динамічною моделлю забезпечуються формуванням структури коефіцієнта зворотного зв'язку як ПД-регулятора.

Список використаної літератури

1. *Kunzevich V. M.* Invariant sets for families of linear and nonlinear discrete systems with bounded disturbances // Automation and Remote Control. – 2012, Вип. 73 №1, с. 83-96/ DOI:10.1134/s0005117912010067.
2. *Rustamov G. A.* Invariant control systems of second order // IV International Conference «Problems of Cybernetics and Informatics (PCI'2012')». – Azerbaijan, 2012. – Vol. 4. – P. 22–24. DOI: 10.1109/icpci.2012.6486428.
3. *Рустамов Г. А.* Построение следящих инвариантных систем на основе эквивалентного робастного управления // Східно-Європейський журнал передових технологій. – 2015. – Вип. 73. – С. 50–55. DOI: 10.15587/1729-4061.2015.37177.
4. *Polyak B. T., Kuntsevich V. M.* Optimization of Linear Systems Subject to Bounded Exogenous Disturbances: The Invariant Ellipsoid Technique // Automation and Remote Control - 2011, Вип. 72, №. 11, с. 2227-2275. DOI:10.1134/s0005117911110026.
5. *Nikiforov V., Gerasimov D., Pashenko A.* Modular Adaptive Backstepping Design with a High-Order Tuner // IEEE Transactions on Automatic Control. – 2022, – № 5, – p. 2663-2668. DOI: 10.1109/tac.2021.3091442.

6. *Lyubchuk, L.* Inverse model approach to disturbance rejection problem // *Advanced Control Systems: Theory and Applications*, 2024, pp. 129–166. ISBN: 9781003337010.
7. *Zbrutskyi O. V., Osokin V. S., Zheng Min* Mathematical model of the automatic control system in the problem of guaranteed accuracy // *Механіка гіроскопічних систем.* – 2021. – №42. – С. 32–38. DOI: 10.20535/0203-3771422021268462.
8. *Збруцький О., Осокін В.* Інваріантна до характеру збурень система керування оптичною віссю // *Механіка гіроскопічних систем.* – 2023. – № 45. – С. 27–35. DOI: 10.20535/0203-3771452023296666.
9. *Zbrutskyi O., Kizytskyi O., Korniienko A.* The multicopter automatic control system with the guaranteed accuracy // *Інформаційні системи, механіка та управління.* – 2018. – Вип. 18. – С. 84–90. DOI: 10.20535/2219-3804192018169621.
10. *Кузовков Н. Т.* Системи стабілізації літальних апаратів // *Вища школа.* – 1976. – 304 с.