

УДК 629.705: 531.383

DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771452023296666>О. В. Збруцький<sup>1</sup>, д.т.н., професор, В. С. Осокін<sup>2</sup>, PhD студент

## ІНВАРІАНТНА ДО ХАРАКТЕРУ ЗБУРЕНЬ СИСТЕМА КЕРУВАННЯ ОПТИЧНОЮ ВІССЮ

**Ua**

Розглядається задача синтезу оптимальної системи автоматичного керування оптичною віссю камери гарантованої точності, яка інваріантна до характеру збурень. Збурення в цьому контексті можуть бути різними та не обмеженими. Показаний процес створення математичної моделі системи керування та розв'язання математичної задачі синтезу, використовуючи підхід оберненої динамічної моделі. Результати дослідження демонструють механізм забезпечення якості системи автоматичного керування при компенсації збурень, а також вказують на особливості структури системи. Спеціальний метод для створення коригуючого впливу, необхідного для компенсації збурень, обговорюється в контексті наближення змінної стану системи автоматичного керування до границі допустимих значень. Важливим результатом є виявлення нової математичної структури - алгебро-диференціального рівняння (для системи з одним ступенем свободи) або системи таких рівнянь (для системи з декількома ступенями свободи), яка відповідає цій структурі системи автоматичного керування.

**En**

The task of synthesizing an optimal system of automatic control of the optical axis of a camera with guaranteed accuracy, which is invariant to the nature of disturbances, is considered. Disturbances in this context can be different and not limited. The process of creating a mathematical model of the control system and solving the mathematical synthesis problem using the inverse dynamic model approach is shown. The results of the study demonstrate the mechanism of ensuring the quality of the automatic control system during the compensation of disturbances, and also indicate the features of the system structure. A special method for creating the corrective effect necessary to compensate for disturbances is discussed in the context of the approach of the state variable of the automatic control system to the limit of permissible values. An important result is the discovery of a new mathematical structure - an algebraic-differential equation (for a system with one degree of freedom) or a system of such equations (for a system with several degrees of freedom), which corresponds to this structure of the automatic control system.

### Вступ

У світі сучасних технологій точність систем автоматичного керування (САК) стає ключовим фактором для забезпечення якісних та надійних систем стабілізації та наведення.

<sup>1</sup> КПП ім. Ігоря Сікорського

<sup>2</sup> КПП ім. Ігоря Сікорського

Системи керування зазвичай розробляються з урахуванням конкретних умов і збурень, проте навіть при ретельному проектуванні реальні умови можуть змінюватися [1 – 4].

Використання адаптивних систем може призводити до усталених помилок у контурі адаптації, особливо в умовах суттєвих змін [5 – 6].

Робастні системи, хоча і призначені для компенсації невизначеностей, вимагають точної моделі об'єкта управління та особливої уваги до параметричної робастності [7 – 8].

Використання нейронних мереж може вносити непередбачуваність, а збурення в системах автоматичного керування можуть виникати із різних джерел, створюючи невизначеності у системі.

Для формування коефіцієнта регулювання САК гарантованої точності запропоновані різні підходи [9, 10], але вони досліджені за деяких окремих видах збурень.

Розуміння цих аспектів важливе для подальшого розвитку стратегій керування, що забезпечують точність та надійність в умовах збурень та невизначеностей.

### **Постановка задачі**

Використаємо для компенсації дії збурень на систему функцію наближення змінної стану САК до границі допустимого значення, яка показала кращі результати для даної [11] системи:

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

де  $y$  – змінна стану об'єкта керування (вихідний сигнал),  $y_{ad}$  – допустиме значення змінної стану об'єкта у разі дії збурення.

Визначимо математичну структуру задачі синтезу системи автоматичного керування гарантованої точності [12] та математичну структуру задачі формування коригуючого впливу для компенсації дії збурень для виконання умови не перевищення допустимого значення:

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

Використовуючи структуру системи керування для забезпечення гарантованої точності [11]:

$$\Phi(y) = \frac{W(y)}{1 + K(y)} g , \quad (3)$$

де  $\Phi(y)$  – передатна функція системи керування по збуренню;

$W(y)$  – передатна функція об'єкта керування;

$K(y)$  – коефіцієнт коригуючого впливу, залежний від вихідної величини,  
 $g$  – збурення.

Відповідно до (3) можна зменшувати вихідний сигнал системи від дії збурення у  $(1 + K)$  разів, не змінюючи при цьому властивості попередньо синтезованої системи керування.

Якщо сформувати коефіцієнт регулювання  $K$  як певну функцію змінної стану системи за її спостережуваності (вихідного сигналу), можна регулювати значення змінної стану у разі дії збурення та забезпечити не перевищення його наперед заданій величині.

Метою цього дослідження є використання математичної моделі [13] та методології [11 - 12] для оцінки ефективності інваріантності системи автоматичного керування на прикладі різних невизначених за характером збурень.

### Алгоритм формування структури системи керування

Розглянемо замкнену систему керування [11] із об'єктом керування  $W_o$  [13] та контуром зворотнього зв'язку  $W_c$  (рис. 1), де  $y(t)$  – змінна стану об'єкта (регульована величина),  $g(t)$  – збурення,  $y_c$  – керування.

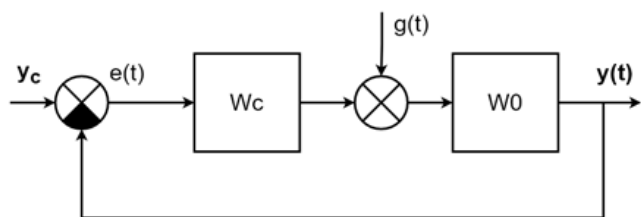


Рис. 1. Система керування

Вводимо у систему керування додаткову ланку із передатною функцією, яка є оберненою динамічною моделлю об'єкта керування та коефіцієнт регулювання:

$$W_a(s) = [W_y^g(s)]^{-1}.$$

Відповідно (7) та рис. 1 отримаємо структурну схему системи керування по збуренню для забезпечення заданої гарантованої точності (рис. 2), де  $y(t)$  – контрольована величина,  $g(t)$  – збурення,  $W_y^g$  – оптимізована передатна функція об'єкта керування (рис. 1) по збуренню,  $K$  – коефіцієнт регулювання.

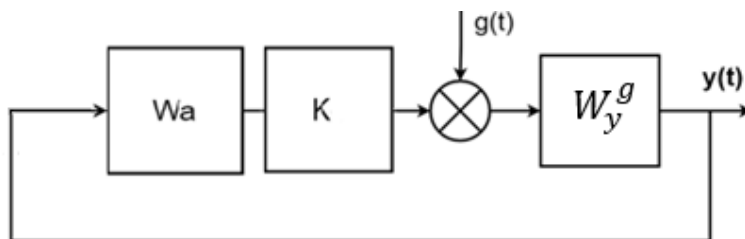


Рис. 2. Система керування для забезпечення гарантованої точності

## Математичне моделювання

Використовуючи математичну модель системи керування [4] відповідно до рис. 2 отримуємо модель (рис. 3) для перевірки ефективності запропонованого алгоритму.

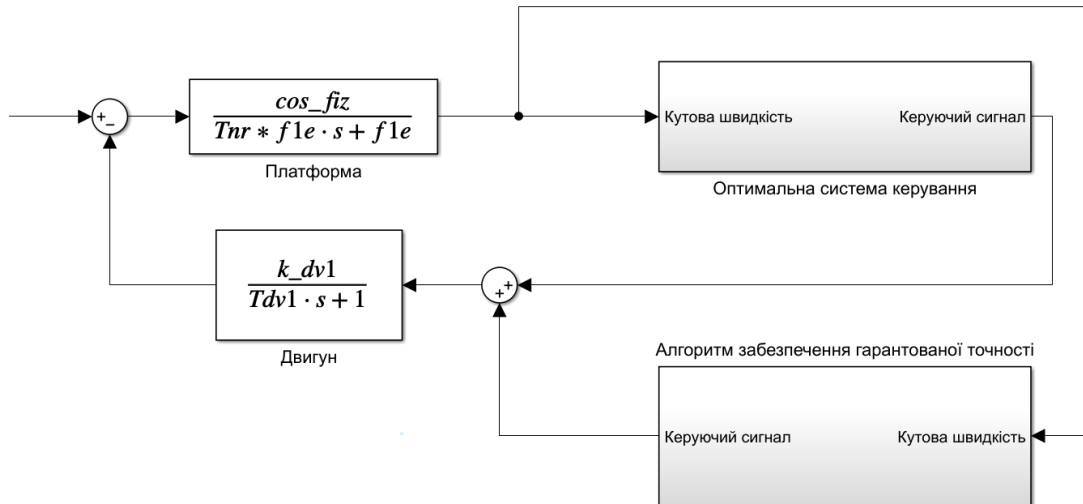


Рис. 3. Система керування sz використанням алгоритму забезпечення гарантованої точності у *Matlab Simulink*

Для перевірки працездатності та ефективності запропонованого алгоритму формування САК та алгоритму забезпечення гарантованої точності проведемо моделювання впливів різного характеру на синтезовану систему. Допустиме значення контрольованої величини (змінна стану об'єкта) приймемо рівною 0,2.

Аналіз результату моделювання (рис. 4, *a*) показує виконання умов забезпечення гарантованої точності із не перевищенням допустимої межі відхилення під час збурення. Бачимо (рис. 4, *б*), як відбуваються зміни коефіцієнту керування у системі. Рис. 4, *в* показує зміну моменту виконавчого двигуна, можна зробити висновок, що алгоритм забезпечення гарантованої точності прискорює керування при цьому майже не змінюючи момент двигуна. Із рис. 4, *г* моделювання демонструє зменшення похибки стабілізації у 1,6 разів.

Моделювання (рис. 5, *a*) показує виконання умов забезпечення гарантованої точності із не перевищенням допустимої межі відхилення у разі збурення. Аналіз результату моделювання (рис. 5, *б*) показує як відбуваються зміни коефіцієнту керування у системі. Рис. 5, *в* показує зміну моменту виконавчого двигуна, звідки випливає, що алгоритм забезпечення гарантованої точності під час дії періодичного збурення спочатку прискорює керування, а потім зменшує момент двигуна зі збереженням швидкодії. Із рис. 5, *г* моделювання демонструє зменшення похибки стабілізації.

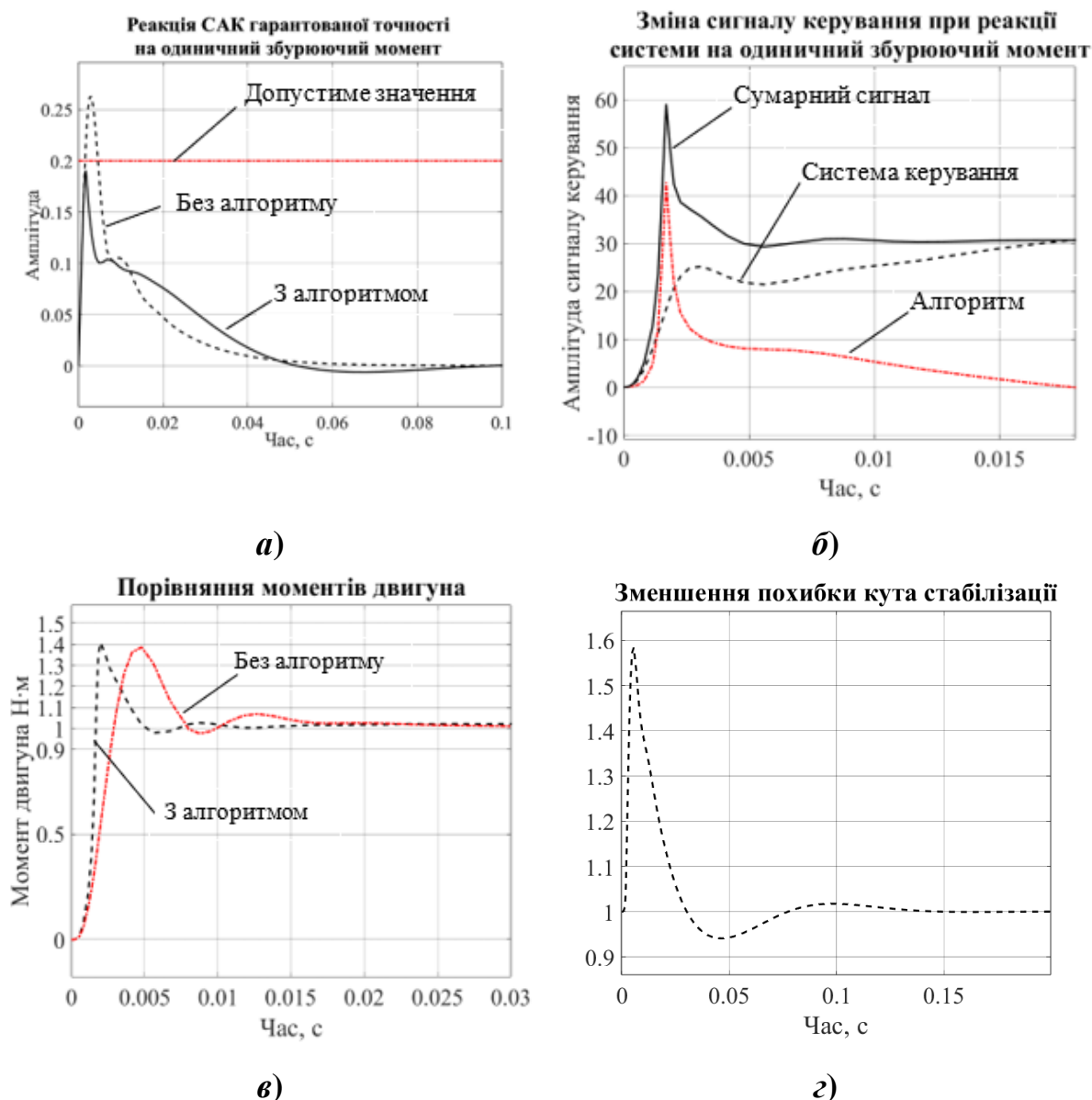
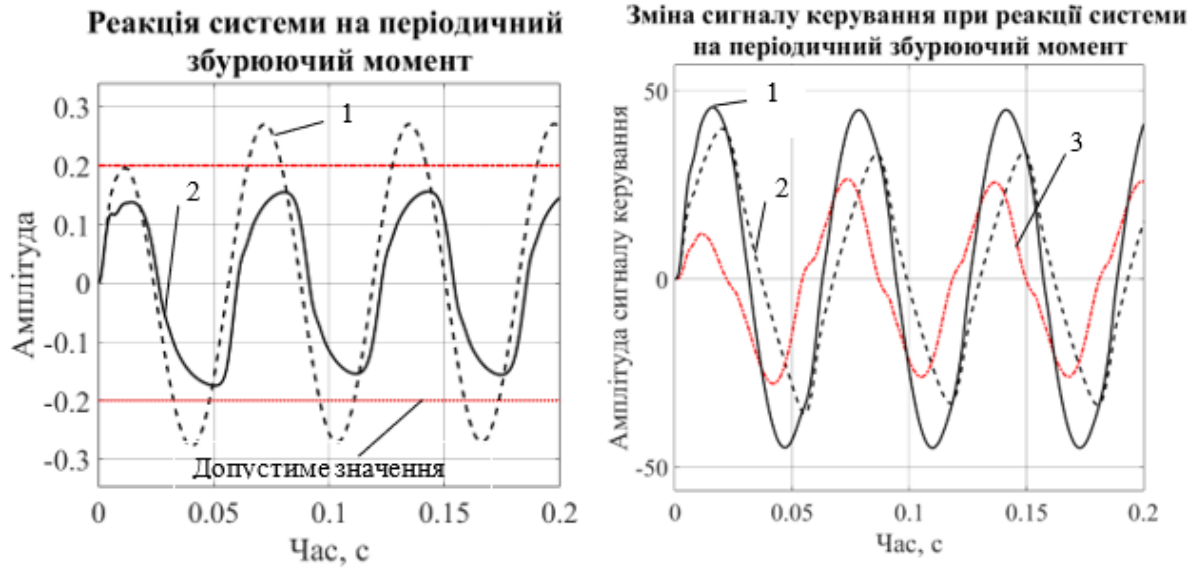


Рис. 4. Реакція САК гарантованої точності на одиничний збурюючий момент у порівнянні із оптимальною системою (а), зміна сигналу керування (б), порівняння моментів двигуна із алгоритмом гарантованої точності та без алгоритму(в), відношення похибок стабілізації САК гарантованої точності та оптимальної (г)

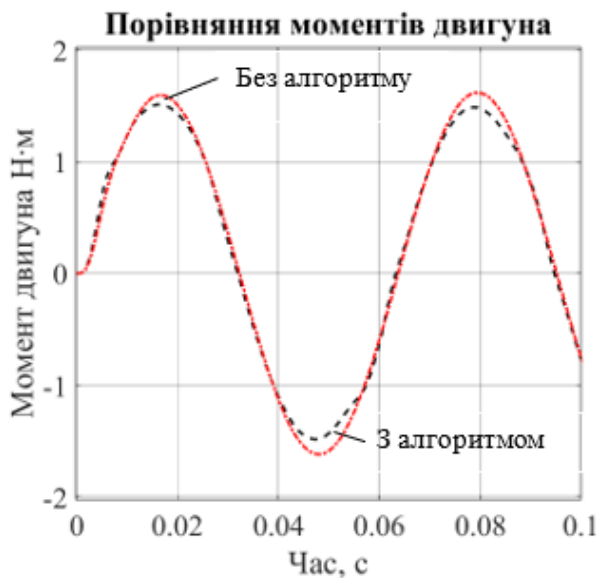
Перевіримо алгоритм забезпечення гарантовано точності за умов дії випадкової ширококугової вібрації (ВШВ), що моделюється шляхом пропускання білого шуму одиничної інтенсивності через фільтр, що формує на виході випадковий процес із заданою спектральною щільністю.

При цьому задана асимптотами спектральна щільність ВШВ описується наступною функцією:

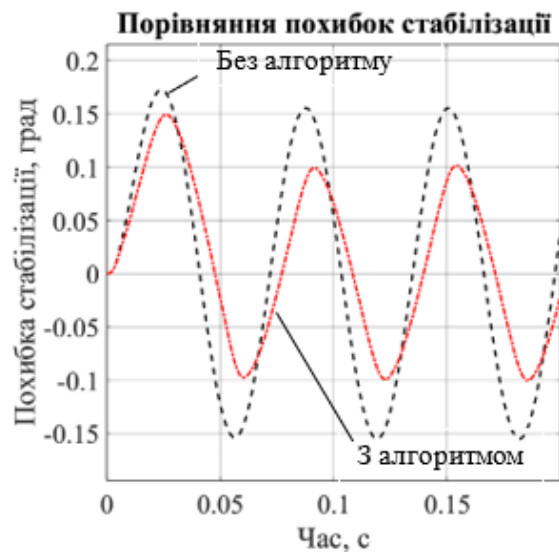


**а)** 1 - без алгоритму,  
2 - із алгоритмом

**б)** 1 - сумарний сигнал,  
2 - система керування,  
3 - алгоритм



**в)**



**г)**

Рис. 5. Реакція САК гарантованої точності на періодичний збурюючий момент із амплітудою 1,5 Н·м та частотою 100 Гц у порівнянні із оптимальною системою (**а**), зміна сигналу керування (**б**), порівняння моментів двигуна із алгоритмом гарантованої точності та без алгоритму (**в**), порівняння похибок стабілізації САК гарантованої точності та оптимальної (**г**)

$$S_{ei}(\omega) = \frac{k_{ei}^2 \omega^4 (T_{ei2}^2 \omega^2 + 1)}{(T_{ei1}^4 \omega^4 + 1)(T_{ei3}^2 \omega^2 + 1)(T_{ei4}^2 \omega^2 + 1)(T_{ei5}^2 \omega^2 + 1)}, \quad (3)$$

де  $i = 1$  означає параметри спектральної щільності для спільного польоту,  $i = 2$  – для автономного польоту:

$$\begin{aligned} k_{e1} &= 4,5 \cdot 10^{-6} \text{ g/c}^2; & T_{e11} &= 8 \cdot 10^{-3} \text{ с}; & T_{e12} &= 7 \cdot 10^{-4} \text{ с}; \\ T_{e13} &= 4 \cdot 10^{-4} \text{ с}; & T_{e14} &= 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}; & T_{e15} &= 4 \cdot 10^{-5} \text{ с}; \\ k_{e2} &= 6,4 \cdot 10^{-6} \text{ g/c}^2; & T_{e21} &= 8 \cdot 10^{-3} \text{ с}; & T_{e22} &= 1,8 \cdot 10^{-3} \text{ с}; \\ T_{e23} &= 5,5 \cdot 10^{-4} \text{ с}; & T_{e24} &= 5 \cdot 10^{-5} \text{ с}; & T_{e25} &= 4 \cdot 10^{-5} \end{aligned}$$

Параметри ВШВ для спільного польоту використовуються під час моделювання роботи САК у режимі електричного аретування. Параметри ВШВ для автономного польоту використовуються під час моделювання роботи САК у режимах стабілізації, цілевказівки та автосупроводу цілі [4].

Аналіз результату моделювання рис. 6, *a* показує виконання умов забезпечення гарантованої точності із не перевищенням допустимої межі відхилення у разі збурення під час дії ВШВ. При цьому із рис. 6, *б* бачимо як відбуваються зміни коефіцієнту керування у системі. Рис. 6, *в* показує зміну моменту виконавчого двигуна, можна зробити висновок, що алгоритм забезпечення гарантованої точності прискорює керування при цьому майже не змінюючи момент двигуна. Із рис. 6, *г* моделювання демонструє зменшення похибки стабілізації майже у 1,55 разів. Узагальнюючи вплив ВШВ на САК гарантованої точності можна сказати, що алгоритм показує свою працездатність за умовах вібрації, але при цьому втрачаючи точність.

## Висновки

Розглянутий алгоритм забезпечення інваріантності системи до збурень демонструє свою ефективність у різних умовах і дозволяє покращити точність і стабільність системи керування. Алгоритм забезпечує гарантовану точність у разі збурення, не перевищуючи допустиму межу відхилення оптичної осі.

Результати аналізу коефіцієнта керування показують, що алгоритм здатний ефективно реагувати на зміни у системі і підлаштовувати керування для досягнення заданої точності.

Аналіз зміни моменту виконавчого двигуна свідчить про здатність алгоритму забезпечення гарантованої точності прискорювати процес керування без значного збільшення моменту. При цьому алгоритм включається лише за необхідності, що дає позитивний результат у енергоефективності системи в цілому.

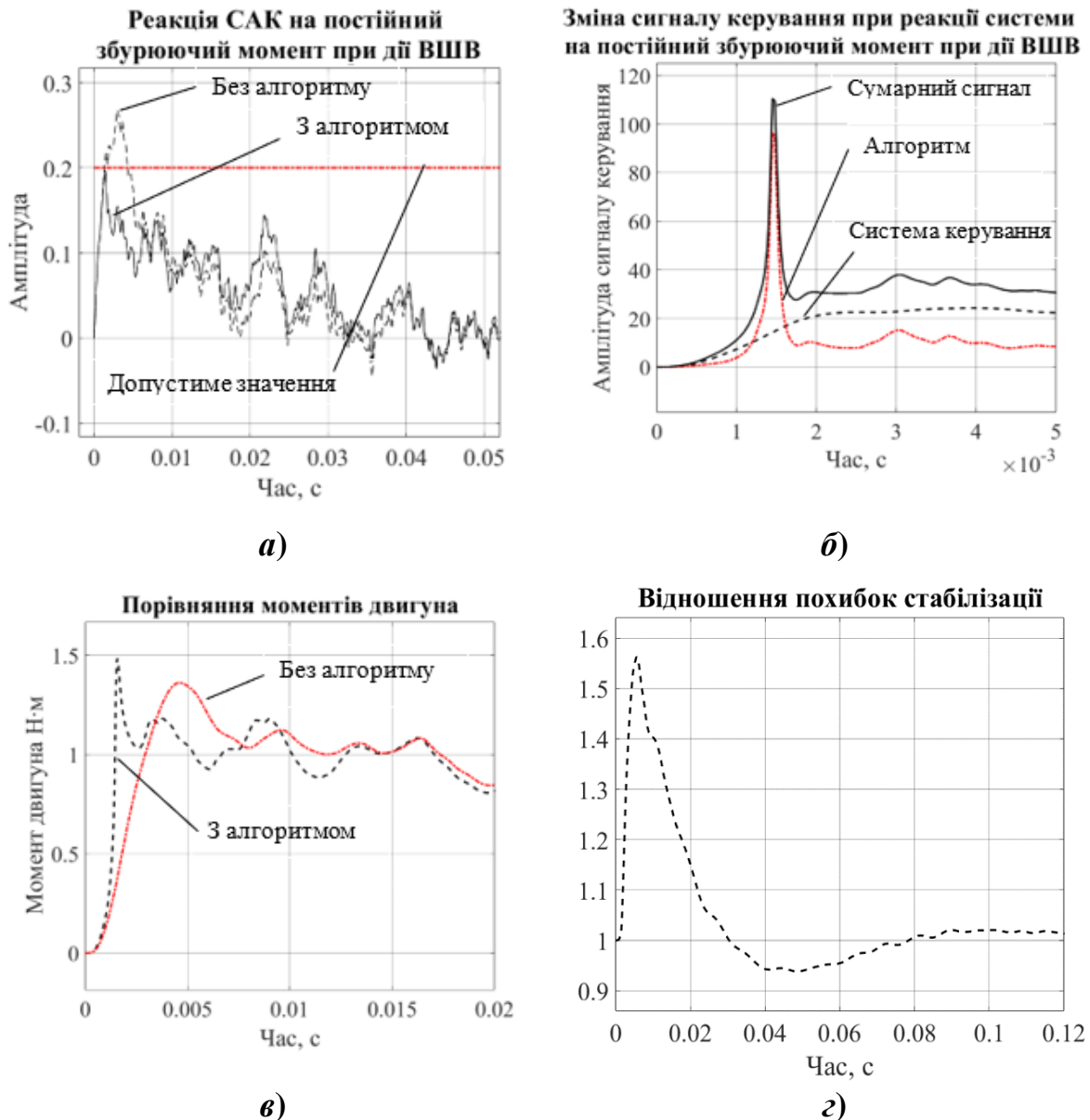


Рис. 6. Реакція САК гарантованої точності на постійний збурюючий момент амплітудою 1 Н·м у разі дії ВШВ у порівнянні із оптимальною системою (а), зміна сигналу керування (б), порівняння моментів двигуна із алгоритмом гарантованої точності та без алгоритму (в), відношення похибок стабілізації САК гарантованої точності та оптимальної (г)

Моделювання динаміки системи показує зменшення похибки стабілізації та підтверджує ефективність запропонованого алгоритму.

Алгоритм добре функціонує також в умовах випадкової широкосмугової вібрації за незначної зменшенні точності.



## Список використаної літератури

1. *Shin Yung, C.* Intelligent Systems: Modeling, Optimization, and Control (Automation and Control Engineering) /C. Yung, Shin, Chengying Xu. // Automation and Control Engineering. 30. – CRC Press, 2008. – 456 p.
2. *Нестеренко О. І.* Розрахунок і проектування гіростабілізаторів/ О. І. Нестеренко, А. В. Шевчук. – Київ: Політехніка, 2003. – 76 с.
3. *Сущенко О. А.* Математична модель системи стабілізації рухомого наземного об'єкта / О. А. Сущенко, Р. А. Са'фетдінов // Електроніка та системи управління. – 2007. – №3. – С. 146-151.
4. *Ryzhkov L. M., Hrekova V. S.* (2015) «Synthesis Of Stabilization System», Electronics and Control Systems. N 3(45): 90-95.
5. *Gao F, Yuan F.* Adaptive finite-time stabilization for a class of uncertain high order nonholonomic systems. ISA Trans. 2015; 54: 75–82.
6. *Hou M, Deng Z, Duan G.* Adaptive control of uncertain pure-feedback nonlinear systems. Int J Syst Sci. 2017; 48(10): 2137-2145.
7. *O. A. Sushchenko and A. A. Tunik*, “Robust stabilization of UAV observation equipment,” in Proceedings of the IEEE 2nd International Conference on Actual Problems of Unmanned Air Vehicles Developments (APUAVD '13), pp. 176–180, IEEE, Kiyv, Ukraine, October 2013.
8. *O. A. Sushchenko*, “Approach to design of robust systems for stabilization of unmanned aerial vehicles equipment,” in Proceedings of the 6th World Congress ‘Aviation in XX-st Century’ ‘Safety in Aviation and Space Technologies’, vol. 2, pp. 3.5.1–3.5.15, Kyiv, Ukraine, September 2014.
9. *O. Zbrutsky, O. Kizitsky, A. Kornienko* The multicopter automatic control system with the guaranteed accuracy / Інформаційні системи, механіка та управління. – 2018. – Випуск 18. –с. 84-90  
DOI: <https://doi.org/10.20535/2219-3804192018169621>.
10. *Збруцький О. В., Міщук О. С.* Адаптивний алгоритм управління із заданою точністю при невизначених зовнішніх збуреннях // Інформаційні системи, механіка та управління. -2014.-Випуск 10.-с. 170-177.
11. *O. V. Zbrutsky, V. Osokin, Zheng Min* Mathematical model of the automatic control system in the problem of guaranteed accuracy, Механіка гіроскопічних систем № 42(2021) DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771422021268462>.
12. *O. V. Zbrutsky, V. Osokin* Stabilization and control system with guaranteed accuracy for optical axis, Механіка гіроскопічних систем № 43(2022) DOI: <https://doi.org/10.20535/0203-3771432022275275>.
13. *О. І. Нестеренко, Л. М. Рижков, В. С. Осокін* Математичні моделі гіростабілізатора за різних режимів його роботи, Механіка гіроскопічних систем № 40 (2020) <https://doi.org/10.20535/0203-3771402020248656>.