

УДК 629.3.025.2

DOI: <http://dx.doi.org/10.20535/0203-3771332017102530>Сущенко О. А.<sup>1</sup>, доцент, д. т. н, Єгоров С. Г.<sup>2</sup>, старший викладач

## БАГАТОКРИТЕРІАЛЬНИЙ ПАРАМЕТРИЧНИЙ СИНТЕЗ РОБАСТНИХ СИСТЕМ ГІРОСКОПІЧНОЇ СТАБІЛІЗАЦІЇ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ ПРИСТРОЇВ

**En**

The main purpose of the paper is to present the procedure for synthesis of the robust stabilization system of the definite class by means of the vector parametric optimization. Basic concepts of the multi-criterion parametric synthesis of robust gyroscopic systems for stabilization of information and measuring devices functioning on ground moving vehicles in difficult conditions of real operation are introduced. The optimization criterion taking into consideration such conflict requirements as accuracy and robustness is determined. Features of the mathematical model augmentation by means of the forming filter taking into consideration irregularities of road and terrain relief are given. To solve the above stated problem, methods of the classical theoretical mechanics, gyroscopes theory, and inertial navigation are used. As a result, the models of the horizontal and vertical channels of the stabilization system in the state space are obtained. Simulation of the synthesized system is carried out. Simulation results prove the efficiency of the proposed approach to the robust optimization of the researched systems. The obtained results can be useful for the robust systems design assigned for stabilization of information and measuring devices, which operate on the vehicles of the wide class, including marine vehicles, unmanned aerial vehicles, and special aircraft etc.

**Ru**

Представлены основные положения многокритериального параметрического синтеза робастных гироскопических систем стабилизации информационно-измерительных устройств, функционирующих на подвижных наземных объектах в сложных условиях реальной эксплуатации. Определен критерий оптимизации, который учитывает такие противоречивые требования как точность и робастность. Описан подход к учету координатных возмущений на основе расширения математической модели при помощи формирующего фильтра, который учитывает возмущения, обусловленные неровностями рельефа дорог и местности. Представлены модели горизонтального и вертикального каналов системы стабилизации в пространстве состояний и даны результаты синтеза.

### Вступ

Синтез систем гіроскопічної стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, що функціонують на рухомих об'єктах, здійснюється в умовах невизначеностей, зумовлених як відмінностями матема-

<sup>1</sup>Національний авіаційний університет, Навчально-науковий інститут аеронавігації, кафедра управління літальних апаратів

<sup>2</sup>Національний авіаційний університет, кафедра авіоники

тичного опису від реальних систем, так і впливом внутрішніх і зовнішніх збурень. Сучасним підходом до створення таких систем є використання робастних законів керування, що забезпечують збереження показників якості системи гіроскопічної стабілізації у деяких заданих межах в умовах параметричних та координатних збурень.

Системи, що експлуатуються на наземних рухомих об'єктах, характеризуються зміною таких параметрів як момент інерції об'єкта стабілізації у межах  $\pm 50\%$ ; жорсткість пружного зв'язку між рухомою платформою та виконавчим механізмом у межах  $\pm 50\%$ ; момент інерції двигуна у межах  $\pm 5\%$ ; параметри гіроскопічного вимірювача швидкості, передавальних ланок регулятора та двигуна у межах  $\pm 1\%$ .

Вимоги, що надаються до таких систем є суперечливими, наприклад, необхідність одночасного забезпечення точності та робастності. Тому модернізацію сучасних систем стабілізації досліджуваного типу доцільно здійснювати на підставі процедур багатокритеріального параметричного синтезу.

### **Аналіз останніх досліджень та публікацій**

Основні принципи синтезу систем гіроскопічної стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі викладено у праці [1]. Підходи до  $H_2/H_\infty$  – робастної параметричної оптимізації представлено у багатьох працях, наприклад, [2]. Слід зазначити, що у наш час проектуванню робастних систем керування рухом літальних апаратів приділяється значна увага, то відповідні підходи до створення робастних систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, експлуатованих зокрема на наземних рухомих об'єктах, ще не досягли належного рівня розвитку.

### **Постановка задачі**

Метою статті є визначення основних принципів багатокритеріального параметричного синтезу робастних систем гіроскопічної стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, що функціонують на наземних рухомих об'єктах у складних умовах реальної експлуатації.

### **Багатокритеріальний параметричний синтез**

Структурну схему системи стабілізації, що досліджуємо представлено на рис. 1.

У реальній системі стабілізації ПД-регулятор доповнюється фільтрами, характеристики яких визначаються на підставі експериментальних випробувань. Слід зазначити, що до складу ПД-регулятора зазвичай вво-

дять настроювальні коефіцієнти, які дозволяють регулювати якість процесу управління.

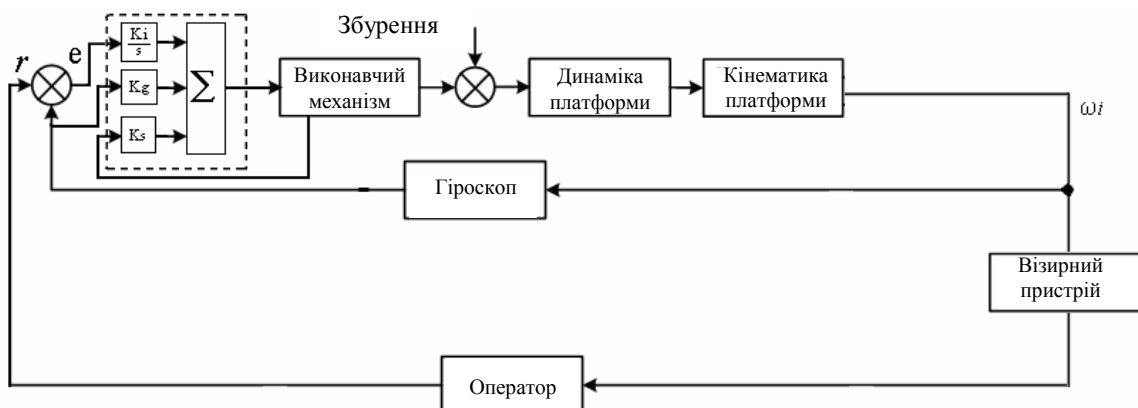


Рис. 1. Структурна схема системи стабілізації

Стабілізація обладнання, що експлуатується на наземних рухомих об'єктах, має забезпечуватись у горизонтальній та вертикальній площині. Для створення математичних моделей об'єктів стабілізації досліджуваного типу необхідно враховувати дію моментів тертя, моментів неврівноваженості та моментів інерції. У математичній моделі вертикального каналу має враховуватись наявність пружної системи балансування. Пружний зв'язок між об'єктами стабілізації та двигуном визначається із урахуванням жорсткості і передавального числа редуктора [3].

Із урахуванням результатів [4] лінеаризована модель горизонтального каналу досліджуваної системи набуває вигляду

$$\begin{aligned} J_{\text{дв}} \ddot{\phi}_{\text{дв}} &= -f_{\text{тдв}} \dot{\phi}_{\text{дв}} + \frac{c_{\text{м}}}{R_{\text{я}}} U + \frac{c_{\text{р}}}{n_{\text{р}}^2} \phi_{\text{дв}} - c_{\text{р}} \frac{\phi_{\text{рм}}}{n_{\text{р}}}; \\ J_{\text{рм}} \ddot{\phi}_{\text{рм}} &= -f_{\text{трм}} \dot{\phi}_{\text{рм}} + \frac{c_{\text{р}}}{n_{\text{р}}} \phi_{\text{дв}} - c_{\text{р}} \phi_{\text{рм}} - M_{\text{нрм}}; \\ \dot{U} T_{\text{я}} + U &= -c_{\epsilon} \dot{\phi}_{\text{дв}} + k_{\text{шм}} U_{\text{рег}}, \end{aligned} \quad (1)$$

де  $J_{\text{дв}}$  – момент інерції двигуна,  $\phi_{\text{дв}}$  – кут повороту двигуна;

$f_{\text{трм}}, f_{\text{тдв}}$  – коефіцієнти лінеаризованих моментів сухого тертя;

$c_{\text{м}}$  – стала моменту навантаження;  $R_{\text{я}}$  – опір кола якоря двигуна,

$U$  – напруга з урахуванням сталої часу кола якоря двигуна;

$c_{\text{р}}$  – жорсткість редуктора;  $n_{\text{р}}$  – передатне число редуктора;

$J_{\text{рм}}$  – момент інерції робочого модуля;

$\phi_{\text{рм}}$  – кут повороту робочого модуля,

$M_{\text{нрм}}$  – момент неврівноваженості;

$T_{\text{я}} = L_{\text{я}} / R_{\text{я}}$  – стала часу кола якоря двигуна;

$c_e$  – стала електрорушійної сили;

$k_{\text{ШМ}}$  – коефіцієнт передачі лінеаризованого ШМ;

$U_{\text{рег}}$  – вихідний сигнал регулятора.

Математична модель (1) може бути перетворена до моделі у просторі станів. У такому разі вектори змінних стану, управління, спостереження та матриці стану, управління, спостереження та збурення набувають вигляду:

$$x^T = [x_1 \ x_2 \ x_3 \ x_4 \ x_5] = [\dot{\phi}_{\text{дв}} \ \dot{\phi}_{\text{рм}} \ \phi_{\text{дв}} \ \phi_{\text{рм}} \ U]; \quad u = \begin{bmatrix} M_{\text{нррм}} \\ U_{\text{рег}} \end{bmatrix}$$

$$; \quad y = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_{\text{рм}} \\ U \end{bmatrix}; \quad A = \begin{bmatrix} \frac{-f_{\text{тдв}}}{J_{\text{дв}}} & 0 & \frac{c_p}{n_p^2 J_{\text{дв}}} & \frac{-c_p}{n_p J_{\text{дв}}} & \frac{c_m}{R_y J_{\text{дв}}} \\ 0 & \frac{-f_{\text{тррм}}}{J_{\text{рм}}} & \frac{c_p}{n_p J_{\text{рм}}} & \frac{-c_p}{J_{\text{рм}}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-c_e}{T_y} & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_y} \end{bmatrix}; \quad (2)$$

$$B^T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{J_{\text{рм}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{\text{ШМ}}}{T_y} \end{bmatrix}; \quad C = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Аналогічним способом можна отримати лінеаризовану модель вертикального каналу зазначеної системи:

$$J_{\text{дв}} \ddot{\phi}_{\text{дв}} = -f_{\text{тдв}} \dot{\phi}_{\text{дв}} + \frac{c_m}{R_y} U + \frac{c_p}{n_p^2} \phi_{\text{дв}} - c_p \frac{\phi_{\text{БА}}}{n_p};$$

$$J_{\text{БА}} \ddot{\phi}_{\text{БА}} = -f_{\text{трБА}} \dot{\phi}_{\text{БА}} + \frac{c_p}{n_p} \phi_{\text{дв}} - c_p \phi_{\text{БА}} - k_{\text{пр}} \phi_{\text{БА}} - M_{\text{нрБА}} + k_{\text{пр}} A; \quad (3)$$

$$\dot{U} T_y + U = -c_e \dot{\phi}_{\text{дв}} + k_{\text{ШМ}} U_{\text{рег}},$$

де  $J_{\text{БА}}$  – момент інерції блоку апаратури;  $\phi_{\text{БА}}$  – кут повороту блоку апаратури;  $k_{\text{пр}}$  – жорсткість пружини системи балансування;  $A$  – кут взведення пружини пристрою балансування;  $f_{\text{трБА}}$  – коефіцієнт лінеаризованого моменту тертя блоку апаратури.

Для моделі (3) вектори змінних, управління, спостереження та четвірка матриць простору стану є такими:

$$\begin{aligned}
 x^T &= [x_1 \quad x_2 \quad x_3 \quad x_4 \quad x_5] = [\dot{\phi}_{\text{дв}} \quad \dot{\phi}_{\text{БА}} \quad \phi_{\text{дв}} \quad \phi_{\text{БА}} \quad U]; \\
 u &= \begin{bmatrix} M_{\text{пр}} + k_{\text{пр}} A \\ U_{\text{рег}} \end{bmatrix}; \quad y = \begin{bmatrix} \dot{\phi}_{\text{БА}} \\ U \end{bmatrix}; \quad B^T = \begin{bmatrix} 0 & \frac{-1}{J_{\text{БА}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{k_{\text{ШИМ}}}{T_{\text{я}}} \end{bmatrix}; \\
 C &= \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \quad D = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}; \\
 A &= \begin{bmatrix} \frac{-f_{\text{ТДВ}}}{J_{\text{ДВ}}} & 0 & \frac{c_p}{n_p^2 J_{\text{ДВ}}} & \frac{-c_p}{n_p J_{\text{ДВ}}} & \frac{c_m}{R_{\text{я}} J_{\text{ДВ}}} \\ 0 & \frac{-f_{\text{ТРБА}}}{J_{\text{БА}}} & \frac{c_p}{n_p J_{\text{БА}}} & \frac{-c_p - k_{\text{пр}}}{J_{\text{БА}}} & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ \frac{-c_e}{T_{\text{я}}} & 0 & 0 & 0 & \frac{-1}{T_{\text{я}}} \end{bmatrix}. \tag{4}
 \end{aligned}$$

Згідно із результатами, представленими у праці [4], та на підставі математичного опису (2) у просторі станів номінальна модель горизонтального каналу системи стабілізації може бути представлена у вигляді:

$$\begin{aligned}
 A_{0g} &= \begin{bmatrix} -1,62 & 0 & -3225,37 & -1,64 \cdot 10^6 & 1602,56 \\ 0 & -0,232 & 0,55 & -281,85 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -41,67 & 0 & 0 & 0 & -666,67 \end{bmatrix}; \\
 B_{0g}^T &= \begin{bmatrix} 0 & -0,28 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 666,67 \end{bmatrix}, \quad C_{0g} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}; \\
 D_{og} &= \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.
 \end{aligned} \tag{5}$$

Аналогічним способом на підставі опису (4) можна отримати модель вертикального каналу (6).

Матриці вимірювань та збурення моделей (5) та (6) співпадають. Збурені моделі визначаються з урахуванням діапазону змінювання параметрів системи.

Структурні схеми детермінованої та стохастичної моделей досліджуваної системи стабілізації представлені на рис. 2.

$$A_{0v} = \begin{bmatrix} -1,62 & 0 & -3225,37 & -1,64 \cdot 10^6 & 1602,56 \\ 0 & -0,763 & 1,81 & -927,29 & 0 \\ 1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -41,67 & 0 & 0 & 0 & -666,67 \end{bmatrix}; \quad (6)$$

$$B_{0v}^T = \begin{bmatrix} 0 & -0,92 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 666,67 \end{bmatrix}.$$

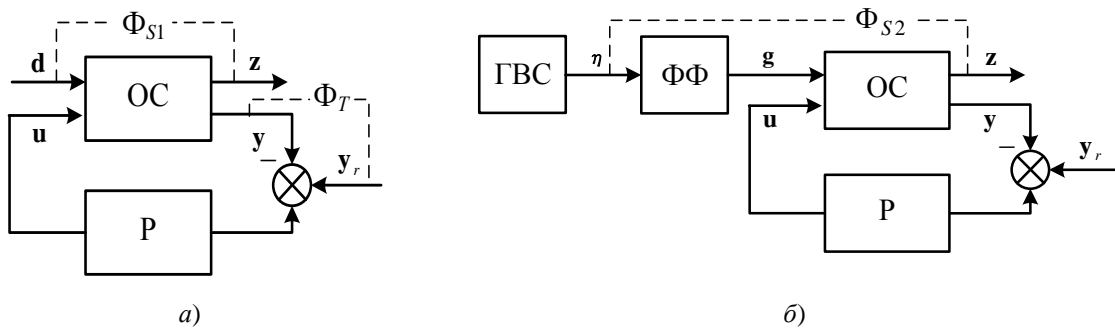


Рис. 2. Детермінована (а) та стохастична (б) моделі:

ОС – об'єкт стабілізації; Р – регулятор; ГВС – генератор випадкових сигналів; ФФ – формувальний фільтр;  $d$  – сигнал входу;  $z$  – сигнал спостереження;  $u$  – сигнал управління;  $y$  – сигнал вимірюваного виходу;  $\eta$  – білий шум;  $g$  – збурення;  $y_r$  – командний сигнал

Рішення, отримані із урахуванням максимально та мінімально можливих параметричних структурованих збурень, справедливі для будь-яких інших значень параметрів, що знаходяться у межах заданої області припустимих значень. Це твердження справедливе, якщо система є детектованою та стабілізованою [5], що має місце у більшості практичних випадків.

Основні зовнішні збурення, що діють на систему яку досліджуємо, можуть бути представлені як стаціонарні випадкові процеси із спектральними щільностями, вигляд яких залежить від типу нерівностей рельєфу дороги або місцевості [6]. Формувальні фільтри для моделювання нерівностей рельєфу доріг або місцевості як збурень системи куткової стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, що функціонують на наземних рухомих об'єктах, відповідно до праці [6] визначатимуться виразом

$$K_q(\omega) = H_k(j\omega)H_q(j\omega)K_h(j\omega), \quad (7)$$

де  $K_h(j\omega)$  – спектральна щільність макропрофілю;  $H_q(j\omega)$  – передавальна функція, яка відповідає перетворенню мікропрофілю,  $H_k(j\omega)$  – передавальна функція осереднення за площею контакту.

## Системи та процеси керування

Остаточний вид формули (7) залежить від типу нерівностей. Так, для доріг із довгими нерівностями формула (7) набуває вигляду [7]

$$K_h(j\omega) = \sqrt{D_2 / v} j\omega \frac{(3,1v + j\omega)}{(\omega_2 + j\omega)} \frac{j\omega}{j\omega + \omega_h} \frac{\omega_b}{j\omega + \omega_b} \frac{\omega_2^2}{(j\omega)^2 + \sqrt{2}\omega_2 j\omega + \omega_2^2}. \quad (8)$$

Як виходить із (8), вираз для формувального фільтру залежить від швидкості наземного рухомого об'єкта. Отже, стохастична модель вносить додаткову невизначеність внаслідок залежності дії збурення від змінюваної під час функціонування об'єкта швидкості.

До критерію оптимізації мають входити показники точності та робастності номінальної та збуреної параметричними структурованими збуреннями системи. Тоді комплексний критерій оптимізації набуває вигляду [4, 8]:

$$\begin{aligned} J_{H_2/H_\infty} = & \lambda_2^{\text{nom d}} \|\Phi(K, x, u, j\omega)\|_2^{\text{nom d}} + \lambda_2^{\text{nom s}} \|\Phi(K, x, u, j\omega)\|_2^{\text{nom s}} + \\ & + \lambda_\infty^{\text{nom}} \|\Phi(K, x, u, j\omega)\|_\infty^{\text{nom}} + \sum_{i=1}^n \lambda_{2_i}^{\text{par d}} \|\Phi(K, x, u, j\omega)\|_{2_i}^{\text{par d}} + \\ & + \sum_{i=1}^n \lambda_{2_i}^{\text{par s}} \|\Phi(K, x, u, j\omega)\|_{2_i}^{\text{par s}} + \sum_{i=1}^n \lambda_{\infty_i}^{\text{par}} \|\Phi(K, x, u, j\omega)\|_{\infty_i}^{\text{par}} + PF, \end{aligned} \quad (9)$$

де  $\|\cdot\|_2^{\text{nom d}}$ ,  $\|\cdot\|_2^{\text{nom s}}$ ,  $\|\cdot\|_{2_i}^{\text{par d}}$ ,  $\|\cdot\|_{2_i}^{\text{par s}}$  –  $H_2$ -норми передавальних функцій системи, номінальної та збуреної параметричними структурованими збуреннями для детермінованого і стохастичного випадків;

$\|\cdot\|_{\infty}^{\text{nom}}$ ,  $\|\cdot\|_{\infty_i}^{\text{par}}$  –  $H_\infty$ -норми передавальних функцій системи, номінальної та збуреної параметричними структурованими збуреннями;

$\lambda_2^{\text{nom d}}$ ,  $\lambda_2^{\text{nom s}}$ ,  $\lambda_\infty^{\text{nom}}$ ,  $\lambda_{2_i}^{\text{par d}}$ ,  $\lambda_{2_i}^{\text{par s}}$ ,  $\lambda_{\infty_i}^{\text{par}}$  – вагові коефіцієнти відповідних норм;

$n$  – кількість моделей системи, збуреної параметричними структурованими збуреннями;

$PF$  – штрафна функція, що забезпечує виконання умов стійкості системи у процесі оптимізації;

$x$  – вектор змінних стану системи;

$u$  – вектор зовнішніх збурень;

$K$  – вектор параметрів регулятора, що підлягають оптимізації;

$n$  – кількість параметрично збурених моделей.

Урахування у показнику оптимізації (9)  $H_\infty$ -норм параметрично збурених моделей гарантує певну нечутливість синтезованої системи до змінювань параметрів у діапазоні допустимих значень. Відомо, що вимоги до точності керування (якості) та робастності є взаємно суперечливими. Тому задача оптимального  $H_2/H_\infty$ -синтезу системи стабілізації полягає у відшукуванні компромісу між точністю та робастністю системи. Цей компроміс

може бути досягнутий за рахунок використання комплексного критерію із змінюваними ваговими коефіцієнтами (9), вираз для якого дозволяє зменшувати або збільшувати міру точності та робастності залежно від аналізу характеристик синтезованої системи.

Процес пошуку рішення є процедура багатократної мінімізації критерію (9) одним із відомих оптимізаційних методів. Таким методом може бути генетичний алгоритм, переваги якого полягають у можливості пошуку глобального мінімуму у кожному конкретному випадку.

Алгоритм багатокритеріального параметричного синтезу системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, що функціонують на наземних рухомих об'єктах, має складатись із таких етапів.

1. Задання обмежень на фазові координати системи, що необхідні для забезпечення нормальної роботи системи.
2. Розробка моделі об'єднаної системи «об'єкт керування – двигун» як єдиного пристрою, поєданого пружним зв'язком із урахуванням жорсткості редуктора.
3. Вибір структури регулятора системи стабілізації на підставі експериментальних досліджень та теоретичних підходів до побудови регуляторів зазначеного типу.
4. Складання математичної моделі системи стабілізації з урахуванням об'єднаної моделі «об'єкт управління - двигун», гіроскопічного приладу, регулятора та необхідних додаткових пристроїв (підсилювач напруги, широтно-імпульсний модулятор тощо).
5. Складання повної математичної моделі зазначеної системи із урахуванням усіх нелінійностей, притаманних реальним системам (обмеження за сигналом, гістерезис, зона нечутливості, люфт приводу).
6. Лінеаризація складеної моделі на підставі аналізу типових нелінійностей.
7. Складання математичного опису у просторі станів із отриманням передавальних функцій розімкнутої та замкнутої систем.
8. Виконання мінімальної реалізації моделі.
9. Масштабування моделі на підставі алгоритму збалансованої реалізації.
10. Завдання початкових значень та виконання генетичного алгоритму оптимізації з циклічним виконанням таких кроків:
  - обчислення  $H_2$  та  $H_\infty$  норм функцій чутливості синтезованої системи;
  - обчислення полюсів, аналіз їх розташування на площині комплексної змінної та визначення відповідної штрафної функції;
  - обчислення комплексного критерію оптимізації із урахуванням штрафної функції.
11. Виконання аналізу синтезованої системи, включаючи такі кроки:



- обчислення  $H_2, H_\infty$  -норм функцій чутливості та побудова логарифмічних амплітудно-частотних характеристик системи із визначенням запасів стійкості за допомогою лінійних моделей;
- аналіз показників перехідного процесу із використанням моделі системи із урахуванням нелінійностей, притаманних реальним системам;
- перевірка знаходження відхилень фазових координат у заданих межах;
- перевірка знаходження середньоквадратичних відхилень фазових координат у заданих межах у випадку стохастичних збурень із використанням моделі системи із урахуванням нелінійностей та моделей збурень, зумовлених нерівностями рельєфу доріг та місцевості;
- перевірка кутової жорсткості системи із використанням повної нелінійної моделі системи.

12. Висновок про завершення процедури параметричної оптимізації або її продовження із новими ваговими коефіцієнтами критерію оптимізації.

Результати моделювання синтезованої системи представлено на рис. 3.

У результаті проведення оптимального синтезу були отримані такі значення настроювальних коефіцієнтів (параметрів оптимізації) системи стабілізації:

$P1 = 0,3016$ ;  $P2 = 0,0737$ ;  $P3 = 0,3144$  – для горизонтального каналу та  $P1 = 0,25$ ;  $P2 = 0,05$ ;  $P3 = 0,05$ ;  $P4 = 0,15$  – для вертикального каналу.

Синтезована система характеризується запасами стійкості за амплітудою 53,3Дб та за фазою 91,2 град., значеннями норм точності та робастності  $H_2 = 0,3736$  та  $H_\infty = 0,1177$  та кутовою жорсткістю за моментом 75 Нм/кут. мин. Характеристики синтезованої системи представлено у табл.

**Таблиця**

Характеристики синтезованої системи

Фазова координата	СКВ вер. кан.	СКВ вер. кан.
Кутова швидкість об'єкта стабілізації	0,035 град/с	0,07 град/с
Кутове положення об'єкта стабілізації	0,02 мін	0,046 мін
Швидкість двигуна	2,1 рад/с	4,1 рад/с
Зворотний зв'язок за струмом	0,17 А	0,37 А
Сигнали блока управління	175 біт(0,035В)	450біт(0,137В)

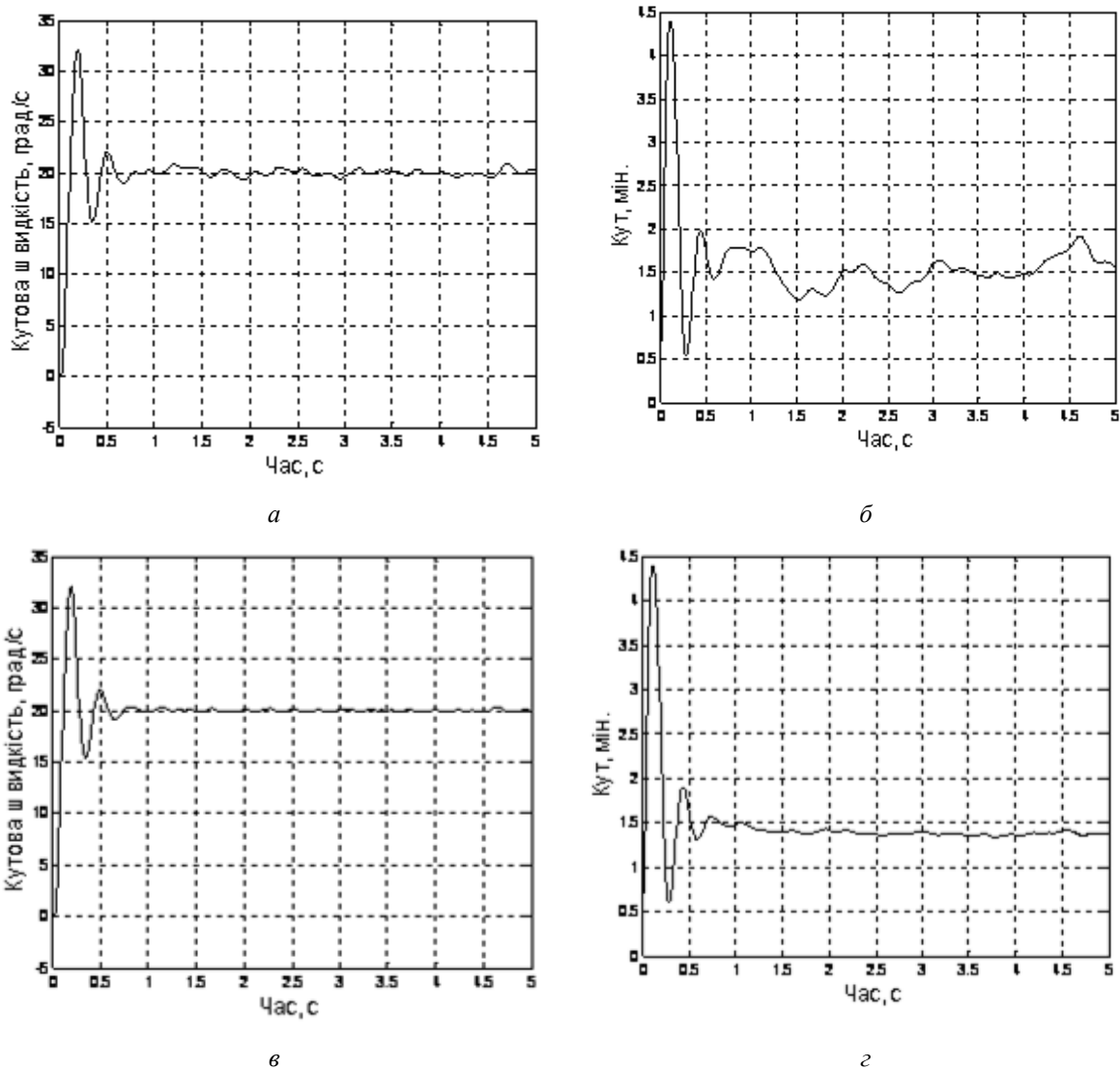


Рис. 3. Результати моделювання синтезованої системи стабілізації (горизонтальний канал) за умови дії збурень (дорога із грудками – *а, б* та дорога із довгими нерівностями – *в, г*): *а, в*) – перехідні процеси кутової швидкості; *б, г*) – перехідні процеси кутового положення

### Висновки

Розроблено математичні моделі об'єкта стабілізації у просторі станів, наведена загальна структура моделі збурень, визначено комплексний показник оптимізації та запропоновано алгоритм процедури оптимізації. Результати моделювання синтезованої системи свідчать про можливість забезпечення високої точності стабілізації кутового положення платформи із корисним навантаженням в складних умовах експлуатації наземних рухомих об'єктів.

**Список використаної літератури**

1. Ривкин С. С. Стабилизация измерительных устройств на качающемся основании [Текст]/ С. С. Ривкин. – М.: Наука, 1978. – 320 с.
2. Skogestad S. Multivariable Feedback Control [Text]/ S. Skogestad, I. Postlethwaite – New York.: John Wiley, 1997. – 559 p.
3. Кочергин В. В. Следящие системы с двигателем постоянного тока [Текст]/ В. В. Кочергин.– Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 168 с.
4. Sushchenko O. A. Usage of vector parametric optimization for robust stabilization of ground vehicles information-measuring devices / O. A. Sushchenko, A. A. Tunik [Text]// Proceedings of the National Aviation University. – 2013. – № 4. – P. 23–32.
5. Schoemig E. Mixed  $H_2/H_\infty$  control of multi-model plants [Text] / E. Schoemig, M. Sznajder // Journal of Guidance, Control and Dynamics. – 1995. – № 3. – P. 523–531.
6. Динамика системы–шина–автомобиль–водитель [Текст]/ Под. ред. А. А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 536 с.
7. Сущенко О. А. Моделювання зовнішніх збурень у системах стабілізації рухомих наземних об'єктів [Текст]/ О. А. Сущенко // Електроніка та системи управління. –2008. – № 2(16). – С. 57–63.
8. Tunik A. A. Parametric Optimization Procedure for Robust Flight Control System Design[Text] / A. A. Tunik, H. Rye, H. C. Lee// KSAS International Journal. – 2001. – Vol. 2. – № 2. – P. 95 – 107.