

УДК 629.3.025.2(045)

О.А. Сущенко, канд. техн. наук, доц.

## МЕТОДИКА СИНТЕЗУ РОБАСТНОЇ СИСТЕМИ СТАБІЛІЗАЦІЇ РУХОМОГО НАЗЕМНОГО ОБ'ЄКТА

*Створено модель системи стабілізації рухомого наземного об'єкта у просторі станів. Визначено принципи врахування збурення рухомого наземного об'єкта, зумовленого нерівностями дороги. Подано блок-схему алгоритму синтезу робастної системи стабілізації рухомого наземного об'єкта.*

*The model of the ground moving object stabilizing system in the state space is created. The principles of taking into consideration of the ground moving object disturbance due to road irregularities are defined. The chart of algorithm for the ground moving object robust stabilizing system synthesis is represented.*

### Постановка проблеми

Останнім часом зростає актуальність створення нових перспективних систем стабілізації наземних рухомих об'єктів. Створення таких систем потребує використання методів аналізу та синтезу, які б дозволяли успішну розробку нових зразків систем досліджуваного класу, однією з особливостей яких є призначення для експлуатації в умовах бездоріжжя та стійкість до дії збурень. З огляду на це синтез таких систем доцільно здійснювати з одночасним урахуванням їх якості та робастності. Для цього потрібно створити модель системи стабілізації рухомого наземного об'єкта у просторі станів, що дозволить використовувати як інструмент синтезу пакет прикладних програм Control System Toolbox, який характеризується великим набором процедур проектування сучасних, у т. ч. робастних, систем. Дослідження потребують також можливість урахування випадкових збурень, характерних для таких об'єктів.

### Аналіз останніх досліджень та публікацій

Створенню нових перспективних систем рухомих наземних об'єктів різного призначення тепер приділяється значна увага.

Загальні проблеми навігації рухомих об'єктів та конкретну навігаційну систему описано в роботі [1], в якій робиться акцент на використанні автономної навігації.

Способи підвищення точності систем навігації наземних рухомих об'єктів розглянуто в роботі [2], де йдеться про поліпшення алгоритмів оброблення навігаційної інформації.

Загальні принципи створення моделей приводів систем стабілізації розглянуто в роботах [3; 4].

Детальну модель нелінійної системи з урахуванням усіх нелінійностей подано в роботах [5; 6]. Але для пропонованої методики синтезу треба мати модель у просторі станів.

### Математична модель системи стабілізації рухомого наземного об'єкта

Синтез робастної системи стабілізації доцільно виконувати засобами пакета Control System Toolbox, що передбачає подання моделі системи стабілізації у ЛТІ-формі.

До основних компонентів системи стабілізації належать:

- блок керування, який виконує функції обробки сигналів та формування законів керування;
- широтно-імпульсний модулятор;
- підсилювач напруги та такий виконавчий механізм, як двигун.

Зазвичай до складу блока керування входять фільтри високих та низьких частот та смуговий фільтр.

З перерахованих блоків суто нелінійним блоком є широтно-імпульсний модулятор, який треба замінити лінійною моделлю. До складу інших моделей також входять нелінійні елементи, які потребують заміни.

Особливістю досліджуваної системи є наявність так званого комбінованого керування, коли разом із керуванням за похибкою використовується керування за діючим збуренням [7]. З цією метою використовуються сигнали, пропорційні струму та напрузі якоря двигуна.

Такий підхід дозволяє уникнути використання додаткових приладів, наприклад тахогенератора, але призводить до ускладнення блока керування.

Особливістю досліджуваної системи є також наявність пружного взаємозв'язку між виконавчим механізмом (двигуном) та об'єктом керування, у зв'язку з чим доцільно використовувати єдину модель об'єкта керування та двигуна, подану у просторі станів, оскільки більшість методів пакета Control System Toolbox передбачає використання саме цього типу ЛТІ-моделей як основного.

Моделі електронних пристроїв можуть бути подані у вигляді передавальних функцій, які також належать до ЛТІ-моделей, оскільки перехід від електричних принципових схем до передавальних функцій може здійснюватись за певними правилами.

Як вимірювальний засіб в досліджуваній системі стабілізації використовується гіротахометр, який також може бути поданий у вигляді лінійної моделі. Тоді модель системи стабілізації в цілому може бути створена на підставі окремих моделей засобами пакета Control System Toolbox.

Модель досліджуваної системи складається з моделей вертикального та горизонтального каналів, які є повністю незалежними один від одного. Подальші матеріали будуть відноситись до горизонтального каналу, який є простішим, але і наочнішим.

Отже, об'єднана модель двигуна та об'єкта керування може бути подана в такому вигляді:

$$J_{\text{рм}} \ddot{\varphi}_{\text{рм}} = -M_{\text{тр}} \text{sign} \dot{\varphi}_{\text{рм}} - M_{\text{нр}} \cos \varphi_{\text{рм}} + \frac{c_{\text{р}}}{n_{\text{р}}} \varphi_{\text{рм}} - c_{\text{р}} \varphi_{\text{рм}};$$

$$J_{\text{дв}} \ddot{\varphi}_{\text{дв}} = -M_{\text{оп}} \text{sign} \dot{\varphi}_{\text{дв}} + \frac{c_{\text{м}}}{R_{\text{об}}} U + \frac{c_{\text{р}}}{n_{\text{р}}^2} \varphi_{\text{дв}} - c_{\text{р}} \varphi_{\text{дв}};$$

$$\dot{U} T_{\text{я}} + U = U_{\text{шім}} - c_{\text{е}} \dot{\varphi}_{\text{дв}},$$

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

$\varphi_{\text{рм}}$  – кут повороту робочого модуля;

$M_{\text{тр}}$  – номінальний момент тертя в опорах робочого модуля;

$M_{\text{нр}}$  – момент невідношення;

$c_{\text{р}}$  – жорсткість редуктора;

$n_{\text{р}}$  – передавальне число редуктора;

$J_{\text{дв}}$  – момент інерції двигуна;

$\varphi_{\text{дв}}$  – кут повороту двигуна;

$M_{\text{оп}}$  – номінальний момент опору;

$c_{\text{м}}$  – стала моменту навантаження на валу двигуна;

$R_{\text{об}}$  – опір обмоток якоря двигуна;

$U$  – напруга якоря двигуна;

$U_{\text{шім}}$  – напруга широтно-імпульсного модулятора;

$c_{\text{е}}$  – стала ЕРС.

Відповідно лінеаризована модель має вигляд:

$$J_{\text{рм}} \ddot{\varphi}_{\text{рм}} = -f_{\text{рм}} \dot{\varphi}_{\text{рм}} - M_{\text{нр}} + \frac{c_{\text{р}}}{n_{\text{р}}} \varphi_{\text{рм}} - c_{\text{р}} \varphi_{\text{рм}};$$

$$J_{\text{дв}} \ddot{\varphi}_{\text{дв}} = -f_{\text{дв}} \dot{\varphi}_{\text{дв}} + \frac{c_{\text{м}}}{R_{\text{об}}} U + \frac{c_{\text{р}}}{n_{\text{р}}^2} \varphi_{\text{дв}} - c_{\text{р}} \varphi_{\text{дв}};$$

$$\dot{U} T_{\text{я}} + U = U_{\text{шім}} - c_{\text{е}} \dot{\varphi}_{\text{дв}},$$

де  $f_{\text{рм}}, f_{\text{дв}}$  – коефіцієнти моментів тертя робочого модуля та двигуна відповідно.

У цій моделі найсуттєвішою є заміна нелінійних моментів тертя лінійними залежностями.

Подана модель може бути трансформована до моделі у просторі станів загального вигляду:

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{A}\mathbf{x} + \mathbf{B}\mathbf{u};$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{C}\mathbf{x} + \mathbf{D}\mathbf{u},$$

де  $\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{C}, \mathbf{D}$  – матриці, що характеризують властивості системи та керувань;

$\mathbf{x}, \mathbf{u}, \mathbf{y}$  – вектори змінних стану, керувань, спостережень.

Для досліджуваної моделі вектор змінних стану, керувань та відповідні матриці мають вигляд:

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{\text{рм}} \\ \dot{\varphi}_{\text{рм}} \\ \varphi_{\text{дв}} \\ \dot{\varphi}_{\text{дв}} \\ U \end{bmatrix}; \quad \mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{M_{\text{нр}}}{J_{\text{рм}}} \\ 0 \\ 0 \\ \frac{U_{\text{шім}}}{T_{\text{я}}} \\ 0 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ -\frac{c_{\text{р}}}{J_{\text{рм}}} & -f_{\text{рм}} & \frac{c_{\text{р}}}{n_{\text{р}} J_{\text{рм}}} & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ -\frac{c_{\text{р}}}{n_{\text{р}} J_{\text{дв}}} & 0 & -\frac{c_{\text{р}}}{n_{\text{р}}^2 J_{\text{дв}}} & -\frac{f_{\text{дв}}}{J_{\text{дв}}} & \frac{c_{\text{м}}}{R_{\text{об}} J_{\text{дв}}} \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{c_{\text{е}}}{T_{\text{я}}} & \frac{-1}{T_{\text{я}}} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{B}^T = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{M_{\text{нр}}}{J_{\text{рм}}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \frac{U_{\text{шім}}}{T_{\text{я}}} \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{C} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}.$$

Інші складові моделі доцільно навести у формі передавальних функцій. Структурну схему моделі показано на рис. 1.

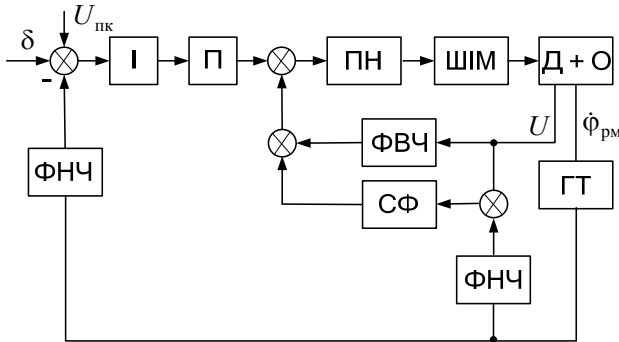


Рис. 1. Структурна схема моделі системи стабілізації рухомого наземного об'єкта:

- I – інтегратор;
- П – підсилювач;
- ПН – підсилювач напруги;
- ШИМ – широтно-імпульсний модулятор;
- Д – двигун;
- О – об'єкт;
- ФВЧ – фільтр високих частот;
- ФНЧ – фільтр низьких частот;
- СФ – смуговий фільтр;
- ГТ – гіротахометр;
- $U_{pk}$  – сигнал пульта керування;
- $\delta$  – випадкове збурення

Перехідний процес за абсолютною швидкістю рухомого наземного об'єкта в режимі відпрацювання заданої кутової швидкості показано на рис. 2.

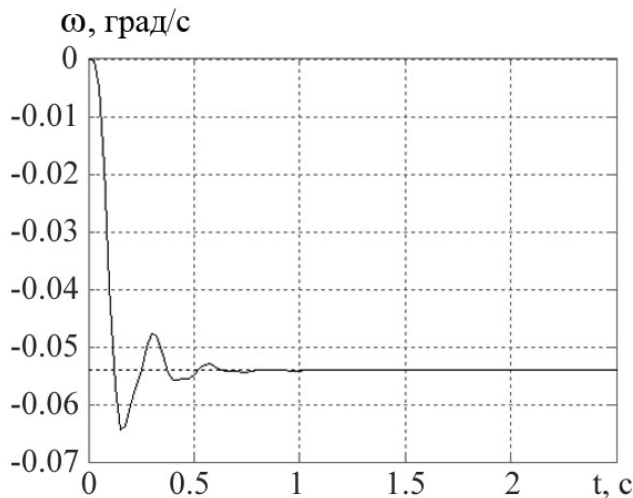


Рис. 2. Перехідний процес за абсолютною кутовою швидкістю рухомого наземного об'єкта

### Аналіз випадкових збурень, зумовлених нерівностями дороги

Для системи досліджуваного класу велике значення має виконання її синтезу з урахуванням діючих збурень. Для наземних об'єктів, на яких призначено використовувати проектовану систему, дія збурень визначається впливом нерівностей доріг. У свою чергу, вплив нерівностей доріг визначається їх рельєфом. Одним із методів його моделювання є використання профілю дороги, тобто перетину рельєфу в напрямку руху транспортного засобу.

Зазвичай профіль нерівностей доріг описується випадковою функцією висот нерівностей дороги. Ця функція може залежати від довжини, тобто пройденої відстані, або часу.

Функції останнього типу можуть використовуватись для завдання збурення.

У багатьох джерелах інформації наводяться саме функції відстані, але це не становить проблеми, оскільки ці функції пов'язані між собою певними співвідношеннями [8].

У багатьох випадках під час визначення збурень замість профілю використовується мікропрофіль, у якого немає низькочастотних складових, що й відрізняє його від профілю.

До основних переваг такої заміни належить те, що мікропрофіль можна вважати стаціонарною випадковою функцією, що забезпечує можливість його використання в задачах синтезу та аналізу систем стабілізації рухомого наземного об'єкта. Перехід від профілю  $h(t)$  до мікропрофілю  $q(t)$  здійснюється за допомогою дробово-раціональної передавальної функції  $H_q$ .

Оскільки характеристики профілю та мікропрофілю є випадковими величинами, то найдоцільніше використовувати таку їх характеристику, як спектральна щільність. При цьому спектральні щільності процесів, що задаються як функції відстані та часу, тобто процесів  $q(l)$  та  $h(l)$ , зв'язані між собою співвідношеннями [8]:

$$K_l(\lambda) = \nu K_t(\lambda \nu);$$

$$K_t(\omega) = \frac{1}{\nu} K_l\left(\frac{\omega}{\nu}\right),$$

де  $\omega$  – кутлова частота процесу  $h(t)$ ;

$\nu$  – швидкість наземного рухомого об'єкта.

Спектральна щільність мікропрофілю може бути подана в такому вигляді:

$$K_q(\omega) = |H_q(j\omega)|^2 K_h(\omega),$$

де  $H_q(j\omega)$  – передавальна функція перетворення мікропрофілю:

$$H_q(j\omega) = \frac{(j\omega)^2}{(j\omega)^2 + \sqrt{2}\omega_n j\omega + \omega_n^2}$$

або у спрощеному вигляді

$$H_q(j\omega) \approx \frac{j\omega}{j\omega + \omega_n}$$

Класифікація спектральних щільностей профілю ґрунтових доріг та місцевості виконується за рівнем коротких нерівностей мікропрофілю. Залежно від довжини хвилі розрізняють три групи спектральних щільностей, які описуються такими формулами [8]:

$$K(\lambda) = \frac{D_m}{\lambda^2};$$

$$K(\lambda) \approx \frac{D_c}{\lambda^n}, \quad (0 \leq n \leq 4);$$

$$K(\lambda) \approx \frac{D_n}{\lambda^2},$$

де  $D_m, D_c, D_n$  – коефіцієнти, які характеризують тип та особливості дороги.

Кожна група нерівностей поділяється на декілька ділянок. При цьому для досліджуваного наземного об'єкта доцільно обрати:

$$D_m = 10^{-1} \text{м},$$

що відповідає четвертій групі, тобто пагорбкуватій та дуже пересіченій місцевості;

$$D_c \approx 10^{-2}, \quad n = 2$$

для поля або луку з високим ступенем нерівностей та з приблизно рівною дією коротких та довгих хвиль;

$$D_n = 3 \cdot 10^{-3},$$

що відповідає місцевості з неоднорідним ґрунтом, пашні, наявності каменистих включень.

Але існує й інша класифікація нерівностей, в якій виділяються чотири види, а саме з більшістю довгих нерівностей, дороги типу «вали», «кучугури» та з однорідними нерівностями. Відповідно спектральна щільність для кожного типу визначається такими формулами:

$$K(\lambda) = \frac{D_2(3,1^2 + \lambda^2)}{\lambda^2(\lambda_2^2 + \lambda^2)}$$

(існує 5 груп, для п'ятої групи, тобто дуже пересіченої місцевості,  $D_2 = 10^{-2}$ ,  $\lambda_2 = 1$ );

$$K(\lambda) = \frac{D_2}{\lambda^2} \frac{(10 + \lambda^2)(\lambda_1^2 + \lambda^2)}{(1 + \lambda^2)(1 + \lambda^2)}$$

(існує 5 груп, для четвертої групи, тобто групи із великими валами,  $D_2 = 3,16 \cdot 10^{-3}$ ,  $\lambda_1 = 0,178$ );

$$K(\lambda) = \frac{D_2}{\lambda^2} \frac{\lambda_1^2 + \lambda^2}{10^2 + \lambda^2}$$

(існує 6 груп, для п'ятої групи, тобто групи із великими кучугурами,  $D_2 = 10^{-1}$ ,  $\lambda_1 = 1$ );

$$K(\lambda) = \frac{D_2}{\lambda^2}$$

(існує 5 груп, для четвертої групи, тобто групи із великим рівнем спектральної щільності,  $D_2 = 10^{-2}$ ).

Отже, для моделювання збурень, зумовлених нерівностями дороги, можна виходити або з першої, або з другої класифікації. На перший погляд, для наземного об'єкта досліджуваного типу найдоцільнішим вважається використання другої класифікації.

Оскільки збурення від мікропрофілю рельєфу – нормальний випадковий процес, то його моделювання можна здійснити перепусканням нормального білого шуму  $\delta(t)$  через матрицю передавальних функцій  $\mathbf{H}_m$ . Спектральні щільності векторного процесу визначають за виразом

$$\mathbf{K}_q(\omega) = \mathbf{H}_m(j\omega)\mathbf{K}_\delta(\omega)\mathbf{H}_m^*(j\omega),$$

де  $\mathbf{K}_\delta(\omega)$  – спектральна щільність шуму  $\delta(t)$ ;

\* – символ операції знаходження комплексно-спряженої матриці.

Оскільки генератор білого шуму характеризується постійною спектральною щільністю  $\mathbf{K}_\delta$ , то можна записати

$$\mathbf{K}_\delta(\omega) = \mathbf{K}_\delta \mathbf{I},$$

де  $\mathbf{I}$  – одинична матриця.

Синтез формувального фільтра виконується методами, наведеними в роботі [8], виходячи з необхідності задовольнити умову

$$\mathbf{H}_m(j\omega)\mathbf{H}_m^*(j\omega) = \mathbf{K}_\delta^{-1}\mathbf{K}_q(\omega).$$

Визначимо формувальні фільтри для моделей збурення від нерівностей доріг відповідно до першої класифікації:

$$K_h(j\omega) = \frac{\sqrt{D_m}v}{j\omega};$$

$$K_h(j\omega) \approx \frac{\sqrt{D_c}v}{j\omega};$$

$$(0 \leq n \leq 4, n = 2);$$

$$K_h(j\omega) = \frac{\sqrt{D_k}v}{j\omega}.$$

Щодо другої класифікації, то для неї формувальні фільтри виглядатимуть так:

$$K_h(j\omega) = \frac{\sqrt{D_2 v} (3,1v + j\omega)}{j\omega (v\lambda_2 + j\omega)};$$

$$K_h(j\omega) = \frac{\sqrt{D_2 v} (10v + j\omega)(v\lambda_1 + j\omega)}{j\omega (v + j\omega)(v + j\omega)};$$

$$K_h(j\omega) = \frac{\sqrt{D_2 v} v\lambda_1 + j\omega}{j\omega 10v + j\omega};$$

$$K_h(j\omega) = \frac{\sqrt{D_2 v}}{j\omega}.$$

Остаточно формувальні фільтри визначатимуться формулою

$$\mathbf{K}_q(j\omega) = \mathbf{K}_h(j\omega)\mathbf{H}_q(j\omega),$$

де  $\mathbf{H}_q(j\omega)$  – матриця передавальних функцій перетворення мікропрофілю.

Зазвичай одним з основних припущень такого руху є прийняття точкового контакту шин з дорогою. Але доцільнішим є використання як моделі збурення згладженого профілю, або профілю осередненого за площадкою контактної по верхні.

Передавальна функція осереднення за контактною площадкою, яка відповідає згладжувальній властивості коліс, може бути приблизно задана у такому вигляді:

$$H_k(j\omega) = \frac{\omega_B^2}{(j\omega)^2 + \sqrt{2}\omega_B j\omega + \omega_B^2}$$

або спрощено

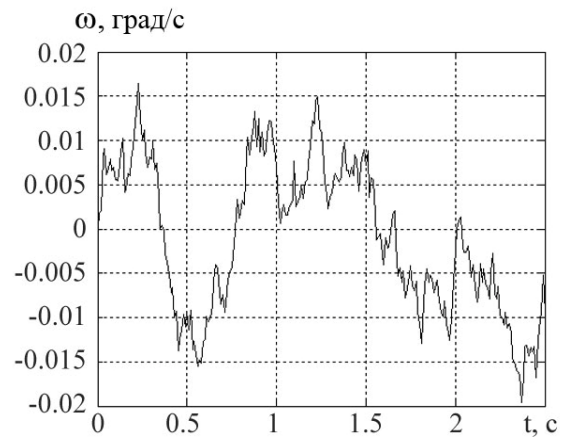
$$H_k(j\omega) \approx \frac{\omega_B}{j\omega + \omega_B},$$

$$\omega_B = (0,9 - 1,3)v/a;$$

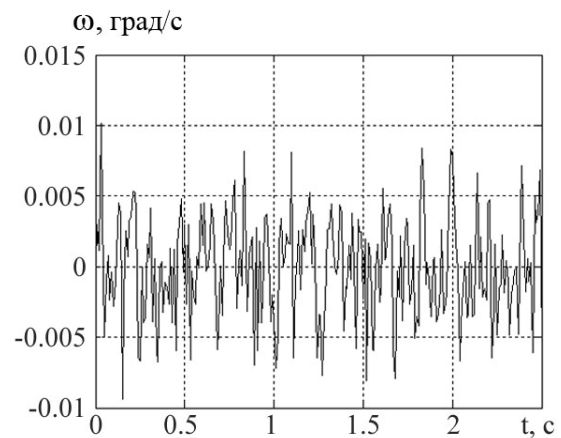
де  $a$  – ширина контактної площадки.

Приклади дії формувальних фільтрів різного типу зображено на рис. 3.

З метою врахування збурень, що діють на систему, треба розглядати послідовне з'єднання моделі системи та формувального фільтра. Характеристики збуреної та незбуреної систем показано на рис. 4.

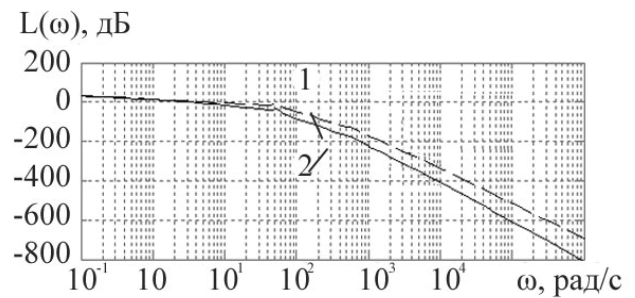


а

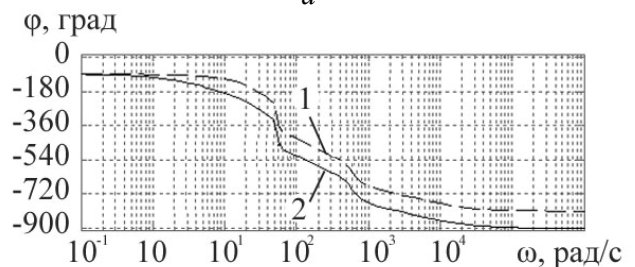


б

Рис. 3. Сигнал на виході формувального фільтра для збурень нерівностей дороги типу «кучугури» (а), «вали» (б)



а



б

Рис. 4. Логарифмічні амплітудні (а) та частотні (б) характеристики збуреної (1) та незбуреної (2) систем

### Методика синтезу робастної системи стабілізації

Для виконання синтезу необхідно обрати критерій оптимізації, який би враховував різні аспекти створюваної системи. Найбільш доцільним є використання комплексного критерію «якість – робастність», який дозволяє враховувати як потрібні показники якості системи, так і стійкість до діючих збурень [9], що дуже важливо для досліджуваних систем. Такий показник може бути визначений на підставі норм  $H_2$ ,  $H_\infty$ .

Норма  $H_2$  являє собою квадратний корінь із середнього значення квадрата імпульсної перехідної функції системи. Її також можна розуміти як потужність вихідного сигналу в усталеному стані під час впливу на систему білого шуму з одиничною інтенсивністю.

Норма  $H_\infty$  дорівнює максимальному значенню частотної характеристики системи. Вплив кожної складової в комплексному показнику якості регулюється за допомогою вагових коефіцієнтів, які залежать від особливостей системи.

Однією з прямих оцінок процесів стабілізації є якість перехідної характеристики системи відносно задаваного впливу. Для систем досліджуваного класу особливо важливими є такі характеристики, як перерегулювання  $\sigma$  та час регулювання  $t_p$ .

Перерегулювання характеризує відмінність між максимальним значенням перехідної характеристики та її усталеним значенням.

Час регулювання дозволяє оцінити тривалість перехідного процесу.

Перехідна характеристика залежить від розподілу нулів та полюсів. Якість стабілізації залежить також від взаємного розміщення нулів та полюсів зображення зовнішнього збурення.

Розміщення полюсів визначається параметрами  $\eta$ ,  $\xi$ , та  $\mu$  [10].

Параметр  $\eta$  в деяких джерелах називають ступенем стійкості. Він являє собою відстань від уявної осі до найближчого кореня, тобто величина його реальної частини.

Параметр  $\xi$  – це відстань від уявної осі до найбільш віддаленого кореня, тобто величина його реальної частини.

Параметр  $\mu$  називається коливальністю. Він являє собою відношення мінімальної частини  $\beta$  найближчого комплексного кореня до його реальної частини:

$$\mu = \frac{\beta}{\alpha} = \operatorname{tg} \psi.$$

Параметри  $\eta$ ,  $\xi$ ,  $\mu$  доцільно використовувати для синтезу системи стабілізації виходячи з їх заданих значень.

Для системи досліджуваного класу є доцільним використовувати показники перехідних процесів як обмеження, які підлягають безумовному виконанню.

Власне оптимізація може бути здійснена за допомогою методу Нелдера – Міда.

Блок-схему алгоритму синтезу робастної системи стабілізації показано на рис. 5.

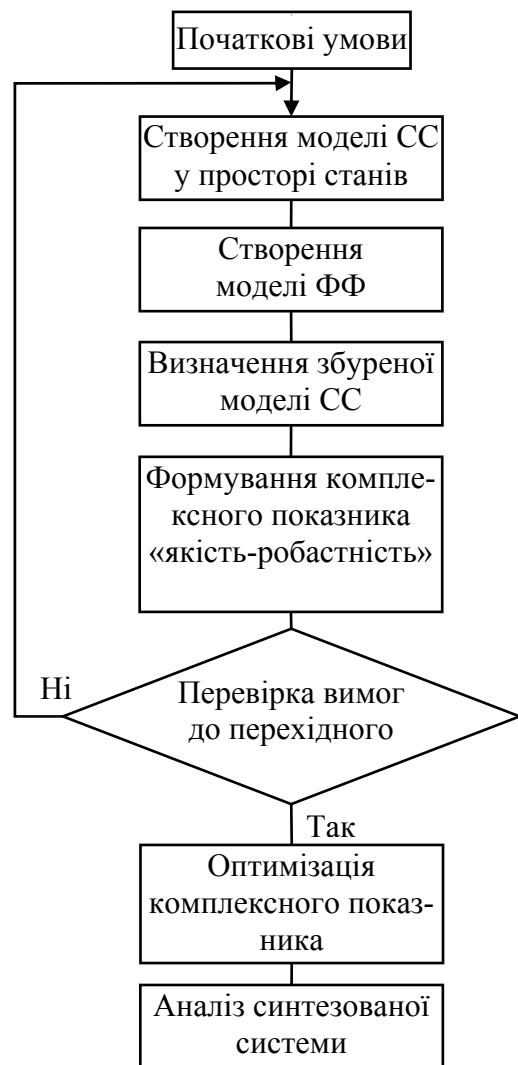


Рис. 5. Блок-схема алгоритму методики синтезу робастної системи стабілізації рухомого наземного об'єкта:

СС – система стабілізації;  
ФФ – формуючий фільтр

## Висновки

Створено модель у просторі станів системи стабілізації рухомого наземного об'єкта. Розглянуто підходи до моделювання збурень, зумовлених нерівностями дороги, за допомогою формувальних фільтрів. Подано блок-схему алгоритму методики синтезу робастної системи стабілізації рухомого наземного об'єкта.

## Література

1. Збруцький О.В., Гогун Ю.В. Інтегрована навігаційна система рухомого наземного об'єкта // III Міжнарод. науч.-техн. конф. «Гиротехнологии, навигация и управление движением»: сб. докл. – К.: НТУУ «КПІ», 2005. – С. 168–173.
2. Корольов В.М. Шляхи підвищення точності систем навігації наземних рухомих об'єктів // V Міжнарод. науч.-техн. конф. «Гиротехнологии, навигация и управление движением»: Сб. докл., 2005. – С. 124–129.
3. Следящие приводы. Кн. 1 / под ред. Б.К. Чемоданова. – М.: Энергия, 1976. – 480 с.
4. Кочергин В.В. Следящие системы с двигателем постоянного тока. – Л.: Энергоатомиздат, 1988. – 168 с.
5. Сущенко О.А., Сайфетдінов Р.А. Математична модель системи стабілізації рухомого наземного об'єкта // Електроніка та системи управління. – К.: НАУ, 2007. – № 3 (13). – С. 146–151.
6. Сущенко О.А., Сайфетдінов Р.А. Математична модель рухомого наземного об'єкта в контурах вертикального та горизонтального наведення // Вісн. НАУ. – 2007. – № 2. – С. 146–151.
7. Бесекерский В.А., Попов Е.П. Теория систем автоматического регулирования. – М.: Наука, 1975. – 768 с.
8. Динамика системы «дорога–шина–автомобиль–водитель» // Под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.
9. Tunik A.A., Abramovich E.A. Parametric robust optimization of the digital flight control systems // Proc. of the NAU. – 2003. – № 2. – С. 31–37.
10. Макаров И.Н., Менский В.М. Линейные автоматические системы. – М.: Наука, 1977. – 460 с.

Стаття надійшла до редакції 20.12.07.