УДК 629.3.025.2(045)

О.А. Сущенко, к.т.н., доц.

РОБАСТНА ПАРАМЕТРИЧНА ОПТИМІЗАЦІЯ СИСТЕМ СТАБІЛІЗАЦІЇ НАЗЕМНИХ РУХОМИХ ОБ΄ЄКТІВ

Проаналізовано особливості проблеми параметричного синтезу робастних систем стабілізації наземних рухомих об'єктів. Запропоновано підходи до її розв'язання. Подано результати моделювання.

Features of the ground vehicle robust stabilization system parametric synthesis are analysed. Approaches to its solution are suggested. The simulation results are represented.

Постановка проблеми

Один із найпоширеніших напрямів створення сучасних систем стабілізації є параметричний синтез робастних систем, малочутливих як до варіацій параметрів системи, так і до відхилень параметрів моделі системи від її реальних значень. Синтез таких систем ґрунтується на мінімізації H_∞-норми матричної передавальної функції замкненої системи. Відомий також підхід до синтезу сучасних систем, який ґрунтується на мінімізації H_2-норми матричної передавальної функції замкненої системи, яка характеризує точність системи. З точки зору організації обчислювальних алгоритмів H_∞-оптимізація значно складніша від H_2-оптимізації. Оптимізація за кожним із розглянутих підходів має свої переваги.

Методи синтезу на підставі мінімізації H_2-норми забезпечують високу точність синтезованої системи, але при цьому вона залишається чутливою як до зовнішніх збурень, так і до параметричних збурень об'єкта керування.

Застосування H_∞-норми дозволяє забезпечити стійкість системи до зовнішніх збурень за умови її параметричної невизначеності.

Оптимізація за змішаним критерієм дозволяє поєднувати ці переваги. Тоді синтезована система може характеризуватись оптимальною якістю за умови можливості її функціонування за наявності збурень.

Аналіз останніх досліджень та публікацій

Створенню робастних систем присвячено велику кількість наукових робіт. Основним твердженням, яке визначило виникнення теорії робастності, є теорема Харитонова, яку вперше було сформульовано у роботі [1]. Існує три основних напрями розвитку теорії робастності. Перший підхід ґрунтується на понятті багатовимірної границі стійкості. Другий підхід використовує поняття структурованого сингулярного числа. Третій підхід пов'язаний із застосуванням лінійних матричних нерівностей.

Одна із центральних ідей, на яких основані методи аналізу робастної стійкості, виходить з поняття критерію стійкості Найквіста, на якому ґрунтується теорема про малий коефіцієнт підсилення [2].

Загальні проблеми синтезу робастних оптимальних систем керування досліджено в багатьох роботах, наприклад [3].

Особливості проектування робастних систем стабілізації, зокрема характеристики H_2, H_∞ і змішаної H_2/H_∞-оптимізації та їх порівняльний аналіз подано в роботі [4].

Для створення стійкої до збурень системи потрібно використовувати процедуру синтезу стохастичної системи.

Дослідження особливостей збуреного руху автотранспортних засобів наведено в роботі [5], результати досліджень збурень, типових для руху досліджуваних об'єктів, подано в роботі [6].

Процедури параметричного та структурно-параметричного оптимального синтезу робастних систем керування літальними апаратами широкого класу на підставі змішаного H_2/H_∞-підходу подано в низці робіт, наприклад [7]. Розроблення відповідних процедур для систем стабілізації наземних рухомих об'єктів залишається актуальною проблемою.

Мета роботи – дослідити особливості створення процедури робастного параметричного синтезу систем стабілізації наземних рухомих об'єктів.

Параметричний синтез системи стабілізації наземного рухомого об'єкта

Синтез робастних систем стабілізації наземних рухомих об'єктів потребує виконання таких етапів:

– постановка завдання оптимального синтезу;

– створення повного математичного опису системи стабілізації наземного рухомого об'єкта з максимально можливим урахуванням усіх нелінійностей;

– створення лінеаризованої математичної моделі системи у просторі станів;
– формування відповідних цільової та штрафної функцій;
– створення методики завдання зовнішніх збурень з умовою специфіки руху носія, на якому встановлюється досліджувана система;
– вибір методу оптимізації;
– створення алгоритму синтезу робастної системи стабілізації рухомого наземного об’єкта з орієнтацією на сучасні автоматизовані засоби оптимального синтезу систем керування;
– моделювання та аналіз отриманих результатів.

Для створення процедури синтезу робастної системи доцільно використовувати моделі системи у просторі станів. Серед найважливіших переваг таких моделей можна виділити такі [8]:
– передавальні функції, тобто моделі типу “вхід–вихід” передбачають лише нульові початкові умови;
– модель у вигляді передавальної функції не описує поведінку внутрішніх параметрів системи, зокрема неспостережуваних та некерованих мод;
– математичний опис у просторі станів більш зручний для математичного подання багатовимірних та нелінійних систем;
– наявність моделей у просторі станів дозволяє використовувати автоматизовані засоби проектування оптимальних систем;
– математичний опис у просторі станів може бути поширений на випадок нестаціонарних та нелінійних систем.

При цьому слід враховувати специфічні особливості систем досліджуваного типу. Використання комбінованого керування, типового для систем досліджуваного класу, призводить до того, що не всі фазові координати братимуть участь у формуванні вихідного сигналу, тому що вони використовуються для зворотних зв’язків усередині системи. З тієї ж причини керівні впливи не входять до деяких диференціальних рівнянь, що становлять математичний опис системи. У цьому випадку система є неповністю спостережувана та керована.

Такі рівняння характеризуються наявністю розріджених матриць, які містять відносно велику кількість нульових елементів, але процес складання первісних моделей значно спрощується. Ця ситуація не є критичною, оскільки у наш час існує велика кількість алгоритмів, орієнтованих на виконання дій з такими матрицями. Крім того, до спрощення остаточної моделі у просторі станів можна використовувати канонічні форми запису матриць.

Традиційно в теорії автоматичного керування розглядають “класичну” та “сучасну” теорію [9]. Перший підхід ґрунтується на використанні передавальних функцій, перетворення Лапласа, інженерних методів синтезу. Для другого підходу характерні опис систем у просторі станів, матрична алгебра та відповідні числові методи і машинно-орієнтовані процедури синтезу. Але за останній час ці два підходи стали доповнювати один одного. Саме до таких завдань, де, з одного боку, доцільно використовувати опис у просторі станів, а з другого – передавальні функції, належить проблема синтезу системи стабілізації наземного рухомого об’єкта. Машинно-орієнтовані процедури оптимального синтезу зазвичай орієнтовані на моделі у просторі станів, але це не є проблемою, оскільки сучасні обчислювальні засоби дозволяють здійснювати перехід від одного типу моделі (у просторі станів) до іншого (передавальна функція). Одночасне використання моделі у просторі станів та передавальних функцій дозволяє отримати наочний та логічний математичний опис досліджуваної системи.

Модель досліджуваної системи містить об’єкт керування, виконавчий механізм (двигун), вимірювальну систему та регулятор. Структура останнього визначається на підставі традиційних підходів до створення регуляторів систем досліджуваного типу, тобто з організацією комбінованого керування за сигналом збурення.

Отже, можна зробити висновок про доцільність такого підходу до математичного опису системи стабілізації, який буде використаний для створення програмно-алгоритмічного забезпечення процедури параметричного синтезу.

1. Об’єднану модель об’єкта керування та двигуна доцільно подати у просторі станів.
2. Вимірювач досліджуваної системи може бути поданий у вигляді передавальної функції або моделі у просторі станів.
3. Структуру регулятора доцільно подати у вигляді передавальних функцій, оскільки це значно спрощує створення математичного опису.
4. Власне модель системи “збирається” відповідно до структурної схеми із заданими входами та виходами. Елементами структурної схеми можуть бути моделі різного типу, тобто моделі у просторі станів та моделі у вигляді передавальних функцій.

Математичний опис досліджуваної системи наведено в роботі [10]. Наприклад, об'єднана модель об'єкта керування та двигуна у просторі станів має вигляд

$$\dot{\mathbf{x}} = \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu};$$

$$\mathbf{y} = \mathbf{Cx} + \mathbf{Du},$$

де

$\mathbf{x}$ – вектор змінних стану;

$\mathbf{u}$ – вектор керувань;

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

$\mathbf{y}$ – вектор спостережень.

При цьому

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \\ x_5 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \varphi_{\text{дв}} \\ \dot{\varphi}_{\text{дв}} \\ \varphi_{\text{рм}} \\ \dot{\varphi}_{\text{рм}} \\ U \end{bmatrix};$$

$$\mathbf{u} = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ \dfrac{-M_{\text{нр}}}{J_{\text{рм}}} & 0 \\ 0 & \dfrac{U_{\text{шім}}}{T_{\text{я}}} \end{bmatrix};$$

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

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

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

де

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

$\dot{\varphi}_{\text{дв}}$ – кутова швидкість двигуна;

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

$\dot{\varphi}_{\text{рм}}$ – кутова швидкість робочого модуля;

U – напруга якоря двигуна;

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

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

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

$T_{\text{я}}$ – стала часу якоря двигуна;

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

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

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

$f_{\text{дв}}$ – коефіцієнт тертя двигуна;

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

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

$f_{\text{рм}}$ – коефіцієнт тертя робочого модуля;

$c_{\text{е}}$ – стала ЕРС.

Досліджувана система є астатичною системою першого порядку відносно збурювального впливу, що забезпечується наявністю інтегратора у ланцюгу похибки. Такий вибір структури дозволяє підвищити точність процесів стабілізації, а також зменшити коливальність системи, але призводить до певних ускладнень процедури синтезу робастної системи стабілізації.

Крім того, модель містить некеровану та неспостережувану частини. Тому у цьому випадку потрібно визначати її мінімальну реалізацію. Ця процедура забезпечує такі переваги:

– метою мінімальної реалізації є отримання моделі мінімальної розмірності, що значно полегшує її аналіз у процесі синтезу;

– мінімальну реалізацію моделі можна використовувати для побудови спостережувача та проведення синтезу регулятора зворотного зв'язку, що має значення для проведення структурного синтезу системи;

– мінімальна реалізація моделі у просторі станів є зручною для застосування методів автоматизованого синтезу оптимальних систем керування.

Існує два підходи до створення мінімальної реалізації моделі [8].

Перший підхід ґрунтується на використанні немінімальної реалізації моделі у просторі станів, яка формується на підставі математичного опису моделі. Далі отримана модель підлягає мінімальній реалізації з метою отримання моделі спостережуваної та керованої частини системи.

Другий підхід оснований на використанні імпульсних характеристик системи та отримання мінімальної реалізації перетворенням матриці Ганкеля.

Для досліджуваної системи найдоцільніше використовувати перший підхід, при цьому є підстави стверджувати, що найбільш прийнятний алгоритм Розенброка, який зводить вихідну модель у просторі станів до мінімальної реалізації за два етапи.

У разі застосування H_2 / H_∞-оптимізації доцільно синтезувати досліджувану систему з використанням комплексного критерію, який дозволяє враховувати як показники якості системи, так і показники стійкості до діючих збурень [7]. Такий показник може бути визначений на підставі H_2, H_∞-норм. Вплив кожної складової у комплексному показнику якості регулюється за допомогою вагових коефіцієнтів.

H_2-норми являють собою квадратні корені інтегральних квадратичних критеріїв якості. У загальному випадку ці критерії мають вигляд [3]:

– для детермінованих динамічних систем:

$$J_d = \int_0^\infty (\mathbf{x}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\mathbf{x} + 2\mathbf{x}^{\mathrm{T}}\mathbf{N}\mathbf{u} + \mathbf{u}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}\mathbf{u})dt,$$

де

$\mathbf{Q}, \mathbf{R}$ – вагові матриці, які враховують вагу змінних стану та зовнішніх впливів відповідно;

$\mathbf{N}$ – матриця вагових коефіцієнтів при добутках відповідних змінних стану та зовнішніх впливів відповідно;

– для стохастичних динамічних систем:

$$J_s = \mathrm{M}[\mathbf{x}^{\mathrm{T}}\mathbf{Q}\mathbf{x} + 2\mathbf{x}^{\mathrm{T}}\mathbf{N}\mathbf{u} + \mathbf{u}^{\mathrm{T}}\mathbf{R}\mathbf{u}],$$

де

M – символ математичного сподівання.

H_2-норма являє собою квадратний корінь із середнього значення квадрату імпульсної перехідної функції системи.

За критерій робастності може бути прийнята H_∞-норма функції комплементарної чутливості замкненої системи [3] :

$$H_\infty = \|\mathbf{T}\|_\infty = \sup_{0 \le \omega \le \infty} \overline{\sigma}(\mathbf{T}(j\omega)),$$

де

$\overline{\sigma}$ – максимальне сингулярне число матриці $\mathbf{T}(j\omega)$ на частоті ω.

Залежність $\sup \sigma(j\omega)$ називають сингулярною частотною характеристикою багатовимірної системи. Вона визначає запаси стійкості за амплітудою та фазою системи.

Отже, H_∞-норма дорівнює максимальному значенню частотної характеристики системи.

Для досліджуваної системи до комплексного показника якості доцільно включити показники точності та робастності номінальної системи стабілізації, показник точності збуреної системи стабілізації, а також показники якості та робастності параметрично збурених моделей. Тоді комплексний критерій набуває вигляду

$$J = \lambda_2^{\text{ном}} H_2^{\text{ном}} + \lambda_\infty^{\text{ном}} H_\infty^{\text{ном}} + \lambda_2^{\text{збур}} H_2^{\text{збур}} + \\ + \sum_{i=1}^{n} \lambda_{2_i}^{\text{пар}} H_{2_i}^{\text{пар}} + \sum_{i=1}^{n} \lambda_{\infty_i}^{\text{пар}} H_{\infty_i}^{\text{пар}},$$

де

$\lambda_2^{\text{ном}}, \lambda_\infty^{\text{ном}}, \lambda_2^{\text{збур}}, \lambda_{2_i}^{\text{пар}}, \lambda_{\infty_i}^{\text{пар}}$ – вагові коефіцієнти для відповідних норм номінальної, збуреної та n параметрично збурених моделей системи.

Вимоги до точності керування та робастності є взаємно суперечливими. Тому проблема оптимального H_2 / H_∞-синтезу полягає у відшуканні компромісу між точністю та робастністю системи. Цей компроміс може бути досягнутий за рахунок використання комплексного критерію зі змінюваними ваговими коефіцієнтами, що відповідно дозволяє зменшувати або збільшувати міру точності та робастності залежно від аналізу характеристик синтезованої системи.

Використання комплексного критерію якості для проведення параметричного синтезу досліджуваної системи дозволяє знайти рішення, яке забезпечить оптимальний компроміс між вимогами до точності та робастності системи. Такий підхід до розв'язання задачі синтезу багатоцільовий, оскільки він дозволяє винайти компроміс між суперечливими цілями [2; 4].

Головним стохастичним збуренням, що діє на систему досліджуваного типу, є збурення, зумовлені нерівностями рельєфу дороги та пересіченої місцевості, які можуть бути подані як стаціонарні випадкові процеси зі спектральними щільностями, вигляд яких залежить від типу нерівностей покриття, по якому рухається наземний об'єкт.

Для моделювання дії таких збурень на досліджувану систему необхідно отримати передавальну функцію формувального фільтра, тобто фільтра, який перетворює білий шум на його вході у випадковий процес із заданою спектральною щільністю. Формувальні фільтри для моделювання нерівностей рельєфу доріг визначатимуться формулою [5]

$K_q(\omega) = K_h(j\omega) H_q(j\omega) H_к(j\omega)$,

де

$H_q(j\omega)$ – передавальна функція, яка відповідає перетворенню мікропрофілю;

$H_к(j\omega)$ – передавальна функція осереднення за площею контакту.

Аналіз збурень, типових для досліджуваної системи, виконано в роботі [6].

Для проведення оптимізації відповідно до введеного комплексного показника якості потрібно мати параметрично збурені моделі замкненої системи. Створення таких моделей означає прийняття до уваги невизначеностей, якими супроводжується створення математичного опису реальної системи. Зазвичай такі невизначеності розділяються на дві групи: структуровані (параметричні) та неструктуровані (немодельована динаміка системи).

Для процедури параметричної оптимізації доцільно розглянути структуровані, тобто параметричні збурення. Для цього можна використати варіації системної матриці замкненої системи.

Для системи досліджуваного типу вимоги до точності та робастності, тобто до збереження стійкості та якості процесів керування зводяться до необхідності підтримувати задані вимоги у межах заданих змінювань параметрів.

Отже, для створення моделей зі структурованими параметричними збуреннями вважається за доцільне ввести в розгляд матриці об'єднаної моделі з параметрами, що відповідають максимально та мінімально можливим значенням із заданого діапазону.

Відмінності моделей номінальної та параметрично збурених замкнених систем показано на рисунку (*а*, *б*), результати параметричного робастного синтезу системи стабілізації наземного рухомого об'єкта в режимі завдання та відпрацювання швидкості − на рисунку (*в* – *е*).

Під час проведення процедури параметричної оптимізації необхідно слідкувати за тим, щоб у процесі варіацій характеристик об'єкта керування та заданих параметрів регулятора замкнена система залишалась стійкою. З цією метою до показника якості додається штрафна функція, яка забезпечує знаходження полюсів замкненої системи в лівій півплощині комплексного змінного.

Для визначення штрафної функції під час виконання процедури синтезу виконується перевірка знаходження полюсів системи в ділянці, на півплощині комплексної змінної, яка відповідає умовам стійкості системи.

Однією з оцінок процесів стабілізації є якість перехідної характеристики системи. Для систем досліджуваного класу особливо важливими є такі характеристики, як перерегулювання та час регулювання. Перехідна характеристика залежить від розподілу нулів та полюсів. Якість стабілізації залежить також від взаємного розташування нулів та полюсів зображення зовнішнього збурення.

Для системи досліджуваного класу доцільно використовувати показники перехідних процесів як обмеження, які підлягають безумовному виконанню шляхом їх вводу до штрафної функції. Це накладає певні вимоги на розподіл полюсів передавальної функції. До параметрів, які обмежують цю ділянку, належать найменша відстань η до уявної осі, найбільша відстань ξ до уявної осі та кут ψ.

Фактор загасання пов'язаний з мірою коливальності виразом

$f = 1 - \exp(-2\pi/\mu)$,

де $\mu = \mathrm{tg}\psi$.

Таким чином, на площині знаходження полюсів замкненої системи може бути виділена ділянка, яка буде задовольняти як вимоги до коливальності, так і вимоги до швидкодії системи.

Однією з основних характеристик досліджуваної системи є діапазон регулювання швидкості.

Найбільший діапазон регулювання швидкості мають системи зі швидкісним приводом з інтегратором у ланцюгу сигналу похибки системи. Завдяки наявності інтегратора в ланцюгу похибки системи зі швидкісним приводом набувають властивості кутової жорсткості за моментом, яка визначається реакцією на дію моменту навантаження. Для оцінювання кутової жорсткості за моментом потрібно задати закон змінювання моменту навантаження об'єкта керування, наприклад у вигляді стрибка:

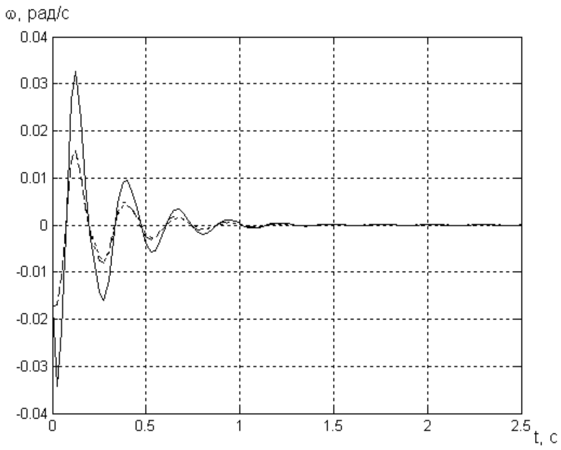
$M_н(t) = M_1[1(t)] - M_2[1(t)]$.

Далі аналізують відповідне змінювання абсолютного кута положення об'єкта керування

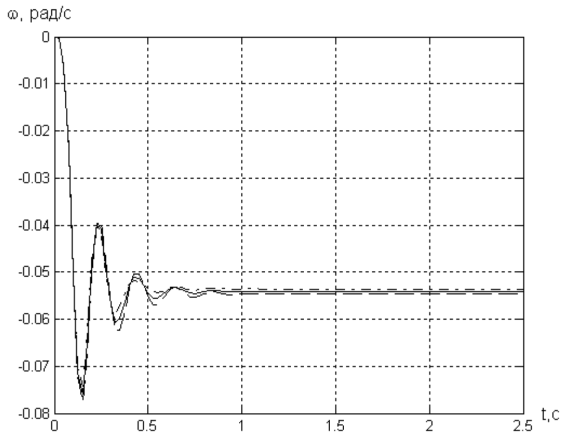
$\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$.

Кутову жорсткість за моментом визначають співвідношенням

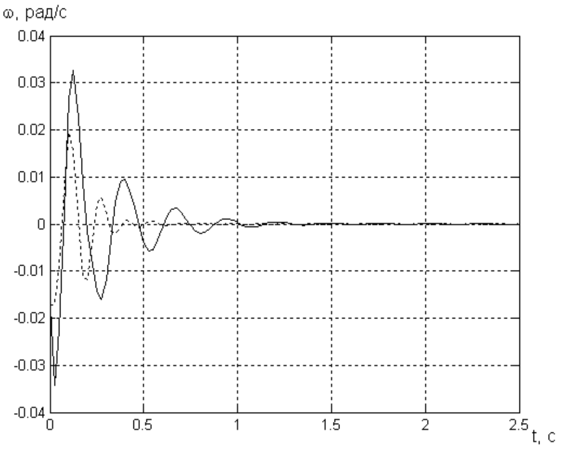
$c_м = (M_1 - M_2)/\Delta\varphi$.



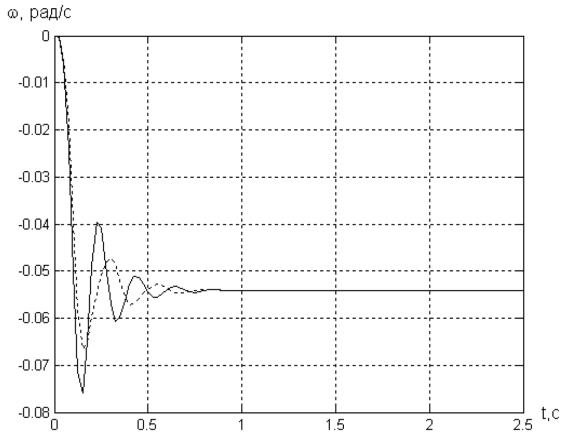
а



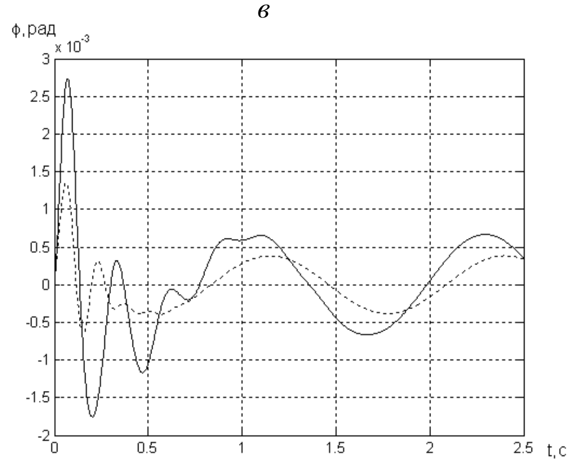
б



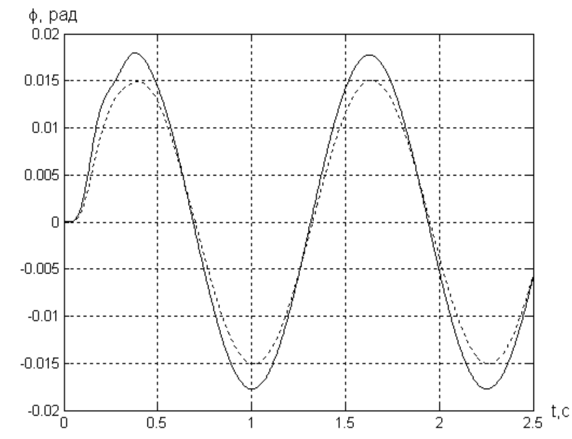
в



г



д



е

Результати параметричного синтезу:

а, *в*, *д* − режимі завдання швидкості;

б, *г*, *е* − режим відпрацювання швидкості;

а, *б*: перехідні характеристики номінальної (суцільна лінія) та параметрично збурених (перервна лінія) моделей;

в, *г*: перехідний процес для вихідної (суцільна лінія) та синтезованої (перервна лінія) систем;

д, *е*: реакція кутового положення об'єкта керування на задану гармонічну кутову швидкість для вихідної (суцільна лінія) та синтезованої (перервна лінія) систем

Існує пропорційна залежність між коефіцієнтом підсилення системи в ланцюгу інтегратора похибки та жорсткістю системи за моментом. Тому у штрафну функцію доцільно включити обмеження за цим коефіцієнтом, тобто його рівень має бути не менший за деяку наперед задану величину.

Для системи досліджуваного типу доцільно також для оцінювання похибки використовувати рух за гармонічним (синусоїдальним) законом. Перевірка за таких умов дозволяє виконати оцінювання динамічних властивостей системи.

Усі зазначені критерії підлягають обов'язковій перевірці після проведення параметричної оптимізації. Після їх аналізу приймають рішення про завершення параметричного синтезу або про повторення процедур оптимізації.

Остаточно успішність параметричної оптимізації оцінюють моделюванням за допомогою повної нелінійної моделі.

У разі незадовільного результату після введення нових початкових умов або нових значень вагових коефіцієнтів процедуру робастної параметричної оптимізації повторюють.

Висновки

Проведені дослідження дають змогу визначити принципи оптимального параметричного синтезу робастної системи наземного рухомого об'єкта з урахуванням дії збурень, особливостей системи досліджуваного типу, перш за все астатизму і неповної керованості та спостережуваності вихідної моделі, й необхідності задовольнити комплексні вимоги "робастність − якість".

Література

1. *Харитонов В.Л.* Асимптотическая устойчивость положения равновесия систем дифференциальных уравнений // Дифференциальные уравнения. – 1978. – № 11. – С. 2086–2088.

2. *Zames G.* On the input-output stability of time-varying nonlinear feedback systems. Part I /IEEE Trans. On Automatic Control.– 1966. – Vol. 11, No. 2. – P. 228–238.

3. *Квакернаак Х., Сиван Р.* Линейные оптимальные системы управления. – М.: Мир, 1977. – 464 с.

4. *Егупов И.П.* Методы робастного, нейронечеткого и адаптивного управления. – М.: МГТУ им. Н.Э. Баумана, 2002. – 744 с.

5. *Динамика* системы «дорог – шина – автомобіль – водитель» / под ред. А.А. Хачатурова. – М.: Машиностроение, 1976. – 535 с.

6. *Сущенко О.А.* Моделювання зовнішніх збурень у системах стабілізації рухомих наземних об'єктів // Електроніка та системи управління. – 2008. – № 2 (16). – С. 57–63.

7. *Tunik A.A., Abramovich E.A.* Parametric robust optimization of the digital flight control systems //Proc. of the NAU. – 2003. – №2. – С.31–37.

8 *.B De Schutter.* Minimal state-space realization in linear system theory: An overview // Journal of Computational and Applied Mathematics.– Vol. 121, No. 1–2. – P. 331–354, Sept. 2000.

9. *Андриевский Б.Р.* Избранные главы теории автоматического управления. – М.: Наука, 2000. – 475 с.

10. *Сущенко О.А., Сайфетдінов Р.А.* Математична модель системи стабілізації рухомого наземного об'єкта //Електроніка та системи управління. – 2007.– №3 (13). – С. 146–151.

Стаття надійшла до редакції 25.09.08.