

5. Куценко Ю. Н. Применение электрических токов низкого напряжения для борьбы с многолетними карантинными сорняками на Юге Украины [Текст] : дис... канд. техн. наук: 05.20.02 / Куценко Юрий Николаевич ; Национальный аграрный ун-т. – К., 1997. – 159 с.
6. Іванько І. П. Енергія геоелектромагнітного поля і її раціональне використання у землеробстві [Текст] : автореф. дис... канд. техн. наук: 01.09.16 / Іванько Іван Павлович ; Національний аграрний ун-т. – К., 2001. – 19 с.
7. Пат. 20258А Україна, МПК А01В 79/00. Спосіб обробітку ґрунту [Текст] / Іванько І.П., Шмат С.І., Радзівський Л.Л., Черячукін М.І., Гершкул І.П., Рогатинський В.І.; заявник і патентотримач Кіровоградський інститут сільськогосподарського машинобудування. – №95083620; заявл. 01.08.1995; опубл. 27.02.1998, Бюл. № 1.
8. Пат. 24422А Україна, МПК(2006.01) А01В 49/04. Спосіб обробітку ґрунту і посіву насіння просапних культур [Текст] / Шмат С.І., Іванько І.П., Сало Л.В., Шило В.С., Дунаєвський О.В. ; заявник і патентотримач Кіровоградський інститут сільськогосподарського машинобудування. – №97041852; заявл. 17.07.1998; опубл. 30.10.1998, Бюл. № 5.

Mykola Sviren, Prof., DSc., Vladymyr Amosov, Assoc. Prof., PhD tech. sci., Serhiy Shmat, Prof., PhD tech. sci., Ivan Ivanko, PhD tech. sci.

Kirovohrad National Technical University, Kropyvnickiy, Ukraine

The impact of energy of the geoelectromagnetic field is on the increase of the productivity of agricultural crops

Field experiments for research of the influence of energy of the electromagnetic field of Earth on the productivity of agricultural crops were conducted.

Placement of steel wires on the bottom of the ditch in the direction north-south allowed getting increase in productivity of grain-crops from 3 to 8% comparing to the mouldboard and subsurface methods of soil cultivation. Four years of experience showed that for the increase of productivity of wheat, corn, soy on 12–15% it is necessary to conduct subsurface tillage of soil with simultaneous ditching at the depth of 40 cm in direction north-south.

In order to decrease energy losses it is recommended to combine sowing of the cultivated cultures with ditching.

the energy of the electromagnetic field, ditching, drill, monitoring energy status of soil and crops

Одержано 07.11.16

УДК 629.3.025

О.А. Сущенко, доц., д-р техн. наук

Національний авіаційний університет, м.Київ, Україна, E-mail: sushoa@ukr.net

Структурно-параметричний синтез дискретної робастної системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі

Запропоновано алгоритм структурно-параметричного синтезу дискретної робастної системи стабілізації та керування орієнтацією вимірювальних осей пристроїв, що функціонують на рухомій основі в складних умовах реальної експлуатації. Проаналізовано особливості процедури структурно-параметричного синтезу системи досліджуваного типу. Виконано моделювання та представлено його результати.

робастна система стабілізації, структурно-параметричний синтез, інформаційно-вимірювальні пристрої, дискретний регулятор

О.А. Сущенко, 2016

О.А. Сущенко, доц., д-р техн. наук

Национальный авиационный университет, г.Киев, Украина

Структурно-параметрический синтез дискретной робастной системы стабилизации информационно-измерительных устройств на подвижном основании

Предложен алгоритм структурно-параметрического синтеза дискретной системы стабилизации и управления ориентацией измерительных осей устройств, функционирующих на подвижном основании в сложных условиях реальной эксплуатации. Проанализированы особенности процедуры структурно-параметрического синтеза системы исследуемого типа. Выполнено моделирование и представлены его результаты.

робастная система стабилизации, структурно-параметрический синтез, информационно-измерительные устройства, дискретный регулятор

Постановка проблеми. Успішна експлуатація інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомих об'єктах неможлива без автоматизації процесів їх стабілізації. Конкурентоздатність систем автоматичного керування кутовим рухом платформ з корисним навантаженням визначається можливістю функціонувати в складних умовах реальної експлуатації, що супроводжується дією інтенсивних параметричних і різноманітних координатних збурень. Дія цих збурень може призвести не лише до погіршення точності, а і до втрати стійкості. Застосування робастного керування дозволяє перевести системи досліджуваного типу до класу систем з постійними параметрами. Важливою перевагою робастних систем є здатність задовольняти технічним вимогам під час змінювання параметрів системи у певних межах і дії зовнішніх збурень без застосування засобів адаптації. Такий підхід забезпечує простоту керування, зменшення вартості, підвищення надійності та своєчасну реакцію на змінювання параметрів систем, що підвищує їх конкурентоздатність.

Одним із поширених напрямів створення сучасних систем керування є структурно-параметричний синтез робастних систем, малочутливих як до варіацій параметрів реальної системи, так і до можливих відхилень параметрів моделі системи від її реальних значень. Синтез таких систем ґрунтується на мінімізації H_∞ -норми матричної функції комплементарної чутливості замкненої системи. Відомий також підхід до синтезу систем, який ґрунтується на мінімізації H_2 -норми матричної функції чутливості замкненої системи, яка характеризує її точність. З точки зору організації обчислювальних алгоритмів H_∞ -оптимізація значно складніша за H_2 -оптимізацію. 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 дає змогу забезпечити стійкість системи до зовнішніх збурень за умови її параметричної невизначеності. Оптимізація за змішаним H_2/H_∞ критерієм дає можливість поєднувати ці переваги. Тоді синтезована система може характеризуватись оптимальною якістю за умови можливості її функціонування за наявності збурень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Процедури параметричної оптимізації робастних систем керування літальних апаратів широкого класу на підставі змішаного H_2/H_∞ -підходу представлено у працях [1,2]. Розроблення відповідних процедур для систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв залишається актуальною проблемою. Особливості вдосконаленої процедури робастної H_2/H_∞ -оптимізації системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі на підставі векторного критерію якості та двох груп обмежень, зумовлених технічними вимогами та умовами стійкості, надано у праці [3]. Використання параметричної оптимізації найбільш доцільно в задачах модернізації існуючих систем.

Розробка процедур структурно-параметричного синтезу дозволить вдосконалити обчислювальні процедури розв'язання цих задач.

Постановка завдання. Таким чином, метою дослідження є розробка алгоритму структурно-параметричного синтезу дискретної робастної системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі.

Виклад основного матеріалу. Для системи досліджуваного класу об'єкт керування, включаючи виконавчий механізм та вимірювальну систему, описується рівняннями [4]:

$$\begin{aligned}\dot{\mathbf{x}} &= \mathbf{Ax} + \mathbf{Bu} + \mathbf{Gw}; \\ \mathbf{y} &= \mathbf{Cx} + \mathbf{Du} + \mathbf{Hw} + \mathbf{v},\end{aligned}\quad (1)$$

де \mathbf{x} – змінні стану;

\mathbf{u} – вхідні впливи;

\mathbf{y} – сигнали спостережень;

$\mathbf{A}, \mathbf{B}, \mathbf{G}, \mathbf{C}, \mathbf{D}, \mathbf{H}$ – матриці стану, керування, збурення стану системи, спостереження, прямої передачі керування, збурення сигналів спостереження відповідно;

\mathbf{w} – збурення за входом;

\mathbf{v} – похибки вимірювань, при цьому збурення та похибки вимірювань є випадкові процеси, які являють собою білі шуми із такими математичними сподіваннями та коваріаційними матрицями:

$$\begin{aligned}M[\mathbf{w}] = M[\mathbf{v}] = 0; \quad M[\mathbf{w}(t)\mathbf{w}(t)^T] &= \mathbf{Q}\delta(t - \tau); \\ M[\mathbf{v}(t)\mathbf{v}(t)^T] &= \mathbf{R}\delta(t - \tau); \quad M[\mathbf{v}(t)\mathbf{w}(t)^T] = \mathbf{N}\delta(t - \tau),\end{aligned}\quad (2)$$

де M – символ математичного сподівання;

$\mathbf{Q}, \mathbf{N}, \mathbf{R}$ – вагові матриці, що визначають кількісну міру якості регулювання для критерію оптимізації [4]

$$J(\mathbf{u}) = \int_0^{\infty} (\mathbf{x}^T \mathbf{Q} \mathbf{y} + \mathbf{u}^T \mathbf{R} \mathbf{u} + 2\mathbf{x}^T \mathbf{N} \mathbf{u}) dt. \quad (3)$$

Для розв'язання поставленої задачі необхідно також визначити модель збуреної (розширеної системи), тобто включити до її складу формувальний фільтр, на вхід якого поступає білий шум, а на виході формується кольоровий шум із спектральною щільністю, яка описує збурення, типові для динамічного об'єкту досліджуваного типу, наприклад збурення, зумовлені нерівностями доріг, для систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, що функціонують на наземних рухомих об'єктах. Тому для синтезу досліджуваної системи необхідно використовувати розширену модель у просторі станів, яка містить у своєму складі формувальний фільтр та характеризується матрицями $\mathbf{A}_p, \mathbf{B}_p, \mathbf{C}_p, \mathbf{D}_p$.

Алгоритм структурно-параметричного синтезу. Підходи до організації процедур структурно-параметричного синтезу систем керування літальними апаратами викладено у праці [5]. Основні положення організації складних зворотних зв'язків наведено у праці [6]. Запропонований алгоритм структурно-параметричного синтезу систем стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі складається з декількох етапів.

На першому етапі здійснюється робастна параметрична оптимізація системи на підставі комплексного критерію якості, що містить H_2, H_∞ -норми номінальної та

збуреної систем з ваговими коефіцієнтами і має за мету забезпечення компромісу між якістю та робастністю керування, а також штрафну функцію [3].

На другому етапі здійснюється аналіз синтезованої системи, у тому числі H_2 -норм, H_∞ -норм номінальної та збуреної системи; запасів стійкості на підставі аналізу логарифмічних амплітудно-частотних характеристик, показників якості перехідних процесів та перевірка деяких специфічних характеристик досліджуваної системи, наприклад, кутової жорсткості системи за моментом, якщо йдеться про проектування систем стабілізації, експлуатованих на наземних рухомих об'єктах. На підставі отриманих результатів вноситься висновок о прийнятності отриманих результатів або прийняття рішення про поновлення процедури оптимізації після заміни початкових умов або вагових коефіцієнтів комплексного критерію якості.

На третьому етапі на підставі теореми розділення здійснюється синтез оптимальної структури регулятора системи, який складається з оптимального детермінованого регулятора та спостерігача стану системи. Показник якості цього етапу визначається виразом (3). Синтез спостерігача та регулятора відбувається за допомогою розв'язання класичних рівнянь Ріккати у стандартній лінійно-квадратично-гауссовій формі [4].

На четвертому етапі здійснюється аналіз синтезованої системи. На підставі отриманих результатів вноситься висновок о прийнятності отриманих результатів або прийняття рішення про поновлення процедури оптимізації після заміни початкових умов або матриць вагових коефіцієнтів.

На п'ятому етапі здійснюється параметрична робастна оптимізація основних параметрів синтезованого регулятора, включаючи параметри стохастичного спостерігача та коефіцієнти відповідних зворотних зв'язків.

В свою чергу третій етап складається з кількох кроків.

На першому кроці виконується синтез стохастичного спостерігача, тобто фільтру Калмана, який дозволяє визначити оцінки усіх змінних стану системи.

На другому кроці виконується розрахунок коефіцієнтів зворотних зв'язків за спостережуваними змінними стану з метою мінімізації критерію якості та формування оптимального детермінованого регулятора.

На третьому кроці здійснюється об'єднання фільтру Калмана та оптимального детермінованого регулятора в єдиний регулятор.

Під час структурно-параметричного синтезу системи досліджуваного типу необхідно визначити мінімальну та збалансовану реалізацію моделей. Після побудування збалансованої реалізації діагональ результуючого граміана може бути використана для зниження порядку моделі. Цей вектор характеризує ступінь керованості та спостережуваності мод збалансованої моделі. Якщо знехтувати малими модами, динамічні властивості моделі можуть бути збережені. Зниження порядку моделі може бути виконано шляхом дорівнювання похідних видаляємих змінних нулю та рішення системи рівнянь для визначення їх усталених значень [7]. Зниження порядку моделі можливе за умови збереження коефіцієнта передачі або за умови прийнятної точності апроксимації перехідних процесів.

Під час синтезу дискретної системи здійснюється перетворення неперервної моделі об'єкта керування (1) з характеристиками (2) у дискретну із заданим періодом дискретності та з використанням білінійного перетворення Тастина [4]

$$\begin{aligned} \mathbf{x}[n+1] &= \mathbf{A}\mathbf{x}[n] + \mathbf{B}\mathbf{u}[n] + \mathbf{G}\mathbf{w}[n]; \\ \mathbf{y}[n] &= \mathbf{C}\mathbf{x}[n] + \mathbf{D}\mathbf{u}[n] + \mathbf{H}\mathbf{w}[n] + \mathbf{v}[n]. \end{aligned} \quad (4)$$

Вибір методу дискретизації зумовлений вимогами за точністю, надаваними до системи.

Дискретний регулятор системи являє собою поєднання фільтру Калмана та оптимального детермінованого регулятора. Дискретний фільтр Калмана описується рівняннями [4]

$$\mathbf{x}[n+1|n] = \mathbf{A}\mathbf{x}[n|n-1] + \mathbf{B}\mathbf{u}[n] + \mathbf{L}(\mathbf{y} - \mathbf{C}\mathbf{x}[n|n-1] - \mathbf{D}\mathbf{u}[n]);$$

$$\begin{bmatrix} \mathbf{y}[n|n] \\ \hat{\mathbf{x}}[n|n] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathbf{C}(\mathbf{I} - \mathbf{M}\mathbf{C}) \\ \mathbf{I} - \mathbf{M}\mathbf{C} \end{bmatrix} \hat{\mathbf{x}}[n|n-1] + \begin{bmatrix} (\mathbf{I} - \mathbf{C}\mathbf{M})\mathbf{D} & \mathbf{C}\mathbf{M} \\ -\mathbf{M}\mathbf{D} & \mathbf{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{u}[n] \\ \mathbf{y}_n[n] \end{bmatrix},$$

де \mathbf{L} , \mathbf{M} – вихідна та обчислена матриці коефіцієнтів зворотних зв'язків, при цьому остання визначається на підставі рішення рівняння Ріккати.

Матриця коефіцієнтів зворотних зв'язків \mathbf{M} використовується для уточнення прогнозу $\mathbf{x}[n|n-1]$ на підставі вимірювання $\mathbf{y}[n]$ [4]

$$\hat{\mathbf{x}}[n|n] = \hat{\mathbf{x}}[n|n-1] + \mathbf{M}(\mathbf{y}_v[n] - \mathbf{C}\hat{\mathbf{x}}[n|n-1] - \mathbf{D}\mathbf{u}[n]).$$

Для подальшого формування об'єднаного регулятора можна використовувати два підходи [4, 7]. При першому підході оцінка вектора стану $\hat{\mathbf{x}}[n|n-1]$ формується на основі попереднього вимірювання $\mathbf{y}[n-1]$. При другому підході оцінка вектора стану $\hat{\mathbf{x}}[n|n]$ формується на підставі поточного вимірювання $\mathbf{y}[n]$. Перший підхід є більш прийнятним, оскільки регулятор на підставі попереднього вимірювання $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\hat{\mathbf{x}}[n|n-1]$ може бути реалізований у реальному масштабі часу.

В результаті синтезу оптимального дискретного детермінованого регулятора визначається матриця коефіцієнтів \mathbf{K} така, що закон керування $\mathbf{u} = -\mathbf{K}\mathbf{x}$ мінімізує квадратичний критерій якості [4, 7]:

$$J(\mathbf{u}) = \sum_{n=1}^{\infty} \mathbf{x}[n]^T \mathbf{Q}\mathbf{x}[n] + \mathbf{u}[n]^T \mathbf{R}\mathbf{u}[n] + 2\mathbf{x}[n]^T \mathbf{N}\mathbf{u}[n]$$

для дискретної моделі (4).

Матриця \mathbf{K} визначається виразом $\mathbf{K} = (\mathbf{B}^T \mathbf{S} \mathbf{B} + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{S} \mathbf{A} + \mathbf{N}^T)$, де \mathbf{S} являє собою рішення дискретного рівняння Ріккати [4]

$$\mathbf{A}^T \mathbf{S} \mathbf{A} - \mathbf{S} - (\mathbf{A}^T \mathbf{S} \mathbf{B} + \mathbf{N}^T (\mathbf{B}^T \mathbf{S} \mathbf{B} + \mathbf{R})^{-1} (\mathbf{B}^T \mathbf{S} \mathbf{A} + \mathbf{N}^T)) + \mathbf{Q} = \mathbf{0}.$$

Особливістю синтезу дискретного регулятора є те, що процедуру збалансованої реалізації, яка у системі MATLAB реалізована лише для неперервної системи, слід замінити масштабуванням [5]. Процедура мінімальної реалізації не викликає додаткових труднощів у разі її застосування для дискретної системи. Масштабування моделі у просторі станів виконується із використанням перетворення подібності з діагональною матрицею \mathbf{T} і скалярним коефіцієнтом α такими, що матриця

$$\begin{bmatrix} \mathbf{T}\mathbf{A}\mathbf{T}^{-1} & \mathbf{T}\mathbf{B}/\alpha \\ \alpha\mathbf{C}\mathbf{T}^{-1} & 0 \end{bmatrix}$$

має малі числа зумовленості [7].

Блок-схема відповідної процедури представлена на рис. 1. Результати моделювання синтезованої системи стабілізації за допомогою моделі реальної системи, створеної засобами системи Simulink [8, 9], представлені на рис. 2.

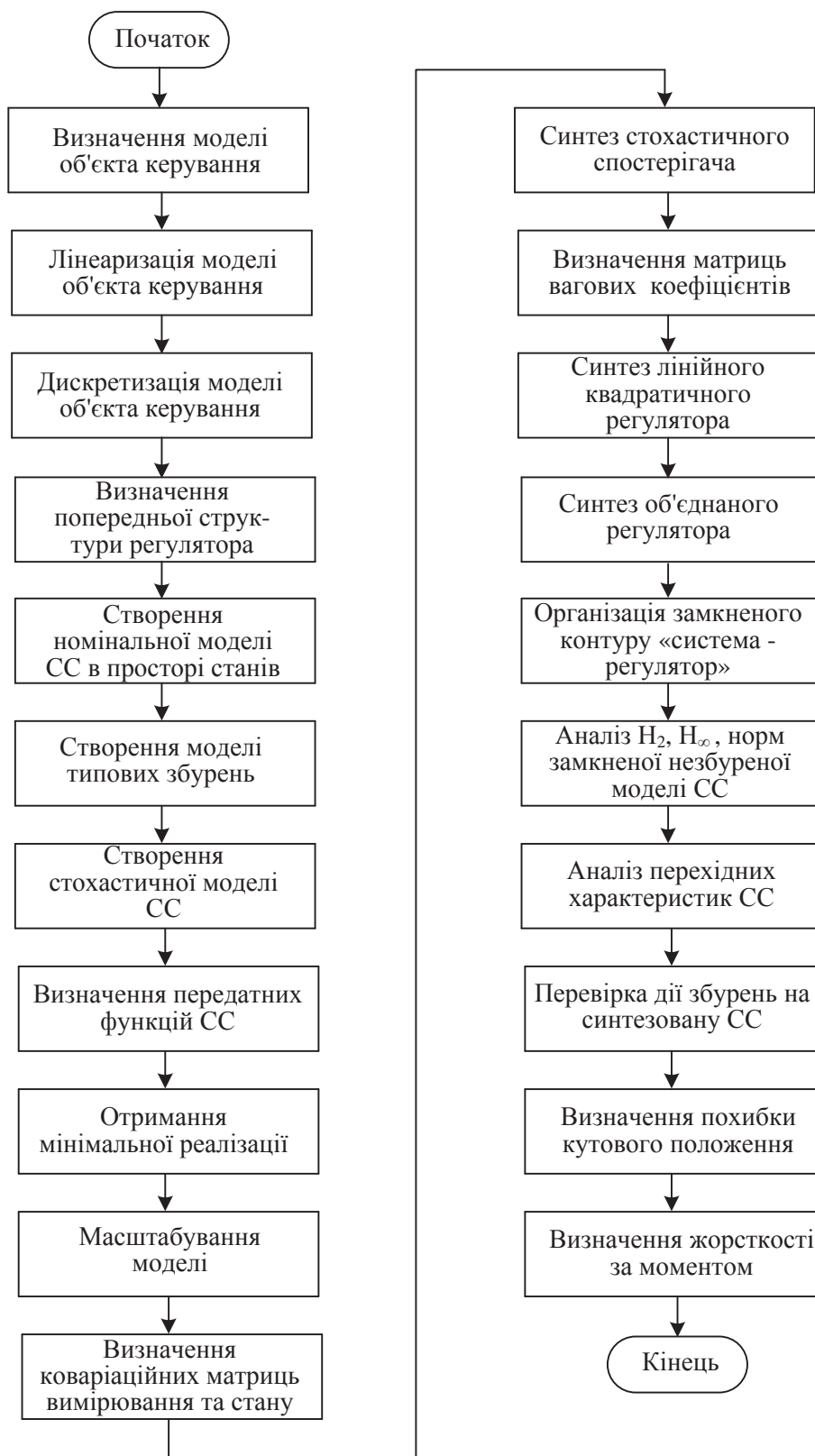
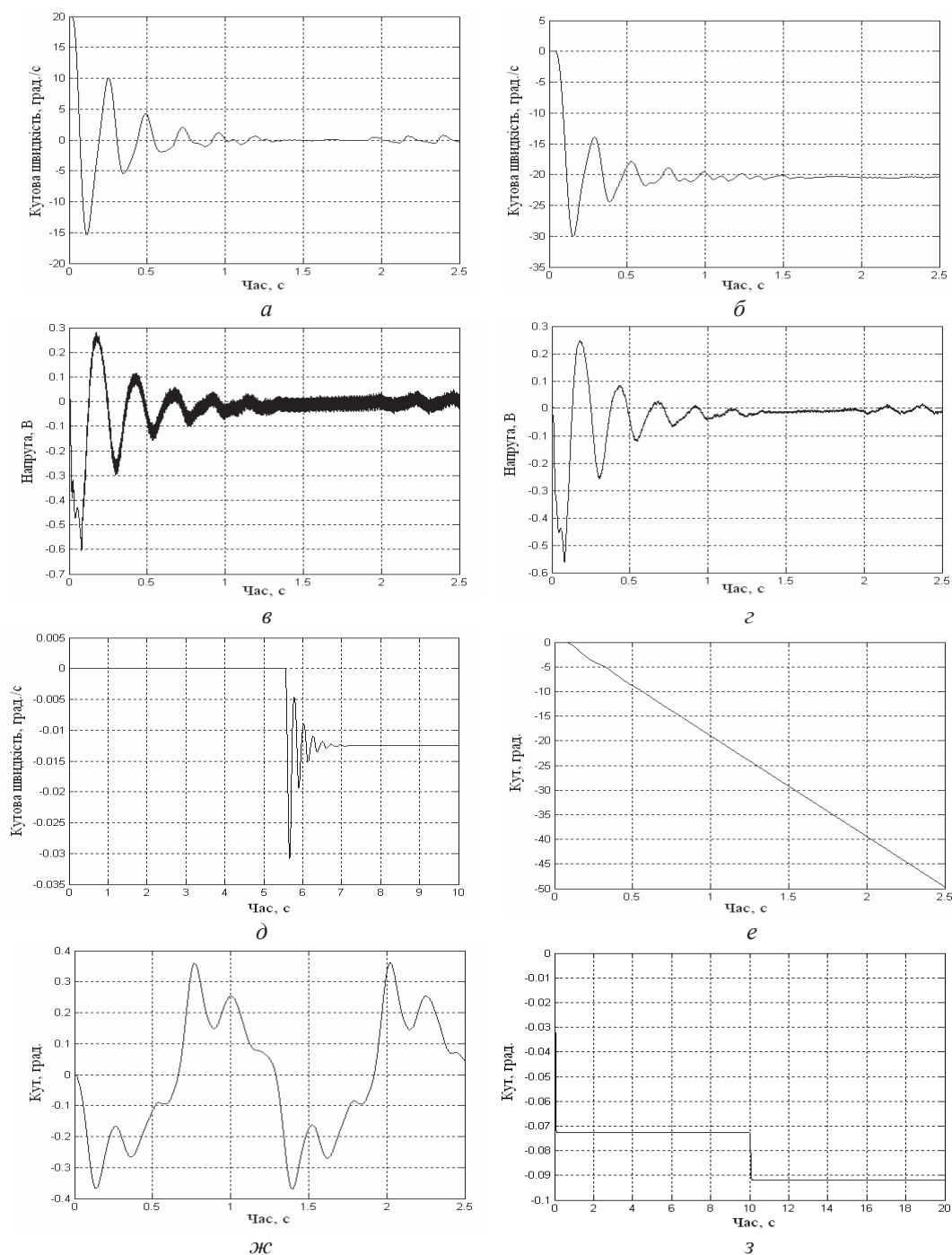


Рисунок 1 – Блок-схема процедури структурно-параметричного синтезу дискретної системи стабілізації: СС – система стабілізації



а, б – перехідні процеси абсолютної швидкості в режимах стабілізації та наведення; в, г – вихідні сигнали місцевих зворотних зв'язків; д, е – мала швидкість наведення та відповідний кут положення платформи; ж – реакція на випробувальний синусоїдальний сигнал; з – визначення жорсткості системи за моментом

Рисунок 2 – Результати моделювання процесів стабілізації

Забезпечення точності процесів стабілізації та наведення підтверджується рис. 2а та 2б. Аналіз рис. 2в, 2г вказує на можливість використання АЦП з дискретністю перетворення сигналів 2,5 мс, що є оптимальним з точки зору досягнення компромісу між точністю та зручністю апаратної реалізації. Синтезована система забезпечує досить малу швидкість наведення на рівні 0,01 град/с та лінійний характер змінювання абсолютного кута повороту стабілізованої платформи (рис. 2д, 2е). Реакцію системи на

тестовий синусоїдальний сигнал показано на рис. 2ж. Рис. 2з підтверджує, що жорсткість системи за моментом забезпечується у межах заданих вимог: після дії основного та додаткового збурень кутове прирощення складає $|\Delta\phi|=0,02$ град.

Висновки. Запропоновано алгоритм структурно-параметричного синтезу системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв на рухомій основі. Ефективність алгоритму підтверджено результатами моделювання на прикладі системи стабілізації інформаційно-вимірювальних пристроїв, призначених для експлуатації на наземних рухомих об'єктах.

Список літератури

1. 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. – No.2. – P. 95 – 107.
2. Tunik A.A. Parametric Optimization Procedure for Robust Flight Control System Design [Text]/ A.A. Tunik, R. Hyu, I.K. Ahn, C.H. Lim // Proceedings of KSAS Fall Annual Meeting, Daejeon, Korea. – 2000. – P. 293-300.
3. Tunik, A.A. Usage of vector parametric optimization for robust stabilization of ground vehicles information-measuring devices [Text]/ A. A. Tunik, O. A. Sushchenko // Proceedings of the National Aviation University. – 2013. – № 4. – P. 23–32.
4. Квакернаак. Х. Линейные оптимальные системы управления [Текст]/ Х. Квакернаак, Р. Сиван. – М.: Мир, 1977. – 464 с.
5. Азарсков, В.М. Структурно-параметричний синтез робастної системи керування при стохастичних збуреннях і неповних вимірюваннях вектору стану системи [Текст]/ В.М.Азарсков, Т.А.Галагуз, А.А.Тунік //Проблеми інформатизації та керування. – 2004. – №10. – С.83-91.
6. Skogestad, S. Multivariable Feedback Control [Text]/S. Skogestad, I. Postlethwaite – New York.: John Wiley, 1997. – 559 p.
7. Медведев, М.С. Control System Toolbox [Текст]/ М.С. Медведев, В.Г. Потемкин. – М.: Диалог-МИФИ, 1999. – 287 с.
8. Сущенко, О.А. Математична модель системи стабілізації рухомого наземного об'єкта [Текст]/ О.А. Сущенко, Р.А. Сайфетдінов // Електроніка та системи керування. – К.: 2007. – №3(13). – С.146-151.
9. Сущенко, О.А. Засоби моделювання стабілізатора наземного неперервного об'єкта із неперервним та дискретним регуляторами [Текст]/ О.А.Сущенко, С.П. Маляров, Г.С. Янкелевич, Р.А. Сайфетдінов // Вісник Північного наукового центру ТАУ. – 2008. – № 11. – С. 131–134.

Olha Sushchenko, Assoc. Prof., DSc.

National Aviation University, Kyiv, Ukraine

Structural-parametric synthesis of discrete robust system for stabilization of information-measuring devices on moving base

The goal of the paper is creation of the algorithm for the structural-parametric synthesis of the system ensuring stabilization of the information-measuring devices functioned at vehicles in difficult conditions of real operation, accompanied by action of the parametrical and coordinate disturbances.

The paper includes description of the algorithm basic stages such as parametric optimization, synthesis of the deterministic controller and stochastic observer and integration of the controller and observer. The most important stage of the algorithm is represented in the form of a block scheme. The features of the synthesis procedure for the studied system are considered including the necessity to carry out minimal realization and scaling. The suggested approach is convenient for modernization of the operated systems.

The algorithm of the structural-parametric synthesis of the discrete robust system for stabilization of information-measuring devices operated at the vehicles was suggested. The developed procedure was checked by means of Simulink-model including non-linearities inherent to the real systems. The results obtained on the example of the stabilization system for ground vehicles prove efficiency of the suggested algorithm.

robust stabilization system, structural-parametric synthesis, information-measuring devices, discrete controller

Одержано 17.05.16