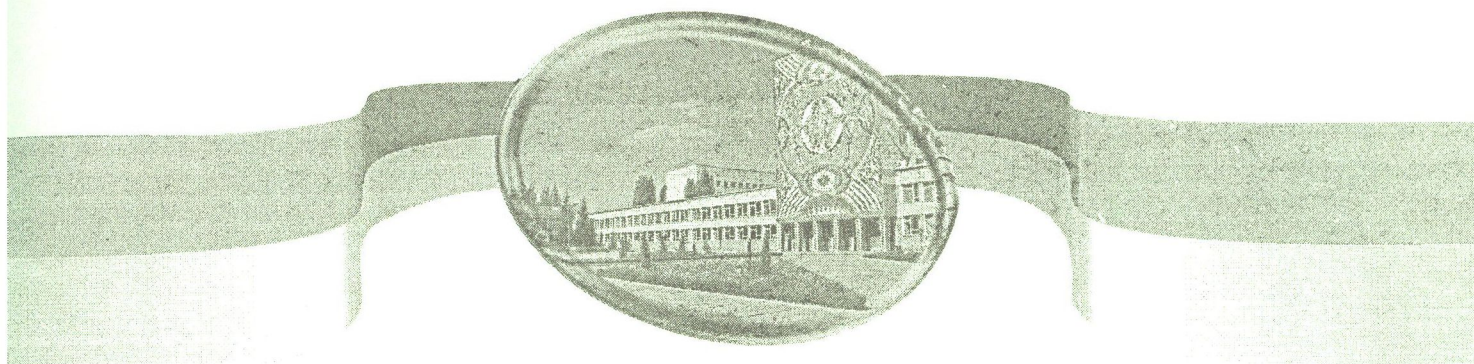


МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
КІРОВОГРАДСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ ТЕХНІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ



**КОНСТРУЮВАННЯ, ВИРОБНИЦТВО
ТА ЕКСПЛУАТАЦІЯ
СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ
МАШИН**

Випуск 43

Частина II

КІРОВОГРАД • 2013

УДК 681.513.5

О.П. Лобок, доц., канд. фіз.-мат. наук, Б.М. Гончаренко, проф., д-р техн. наук,
А.М.Слезенко, магістр
Національний університет харчових технологій

Дослідження мінімаксного керування та спостереження теплових об'єктів сільськогосподарського призначення

Наводяться розв'язки задач мінімаксного керування та спостереження багатовимірного теплового об'єкта керування (напр. сушарна камера) за умов повних і точних, а також неповних і неточних вимірювань параметрів стану. Експериментально досліджені оптимальні керування, спостереження, стан координат та значення критеріїв оптимальності об'єкта за цих умов. Досліджені припустимі збурення для випадку неповних і неточних вимірювань, обчислені значення критеріїв і значення їхніх верхніх меж. Здійснений аналіз перехідних процесів (ПП) елементів матриць зворотного зв'язку для обох випадків вимірювань стану об'єкта. Здійснений аналіз ПП оптимальних керувань, станів системи, спостережень і оптимальних оцінок якості роботи мінімаксного фільтра Калмана-Бюсі. Досліджена оптимальна область припустимих збурень. Доведено, що синтезоване мінімаксне керування має запас стійкості більший від розрахованого.

оптимізаційна задача, лінійна n -вимірний динамічна система, сушарна камера, температурний режим, мінімаксне керування (оцінювання), область припустимих збурень, якість перехідного процесу

А.П. Лобок, Б.М. Гончаренко, А.М.Слезенко
Національний університет пищевых технологий

**Исследования минимаксного управления и наблюдения тепловых объектов
сельскохозяйственного назначения**

Приводятся решения задач минимаксного управления и наблюдения многомерного теплового объекта управления (напр. сушильная камера) в условиях полных и точных, а также неполных и неточных измерений параметров состояния. Экспериментально исследованы оптимальные управления, наблюдения, состояние координат и значения критериев оптимальности объекта в этих условиях.

© О.П. Лобок, Б.М. Гончаренко, А.М.Слезенко, 2013

Исследованы допустимые возмущения для случая неполных и неточных измерений, вычислены значения критериев и значение их верхних пределов. Проведенный анализ переходных процессов (ПП) элементов матриц обратной связи для обоих случаев измерений состояния объекта. Осуществлен анализ ПП оптимальных управлений, состояний системы, наблюдения и оптимальных оценок качества работы минимаксного фильтра Калмана-Бюси. Исследована оптимальная область допустимых возмущений. Доказано, что синтезированное минимаксное управление имеет запас устойчивости, больший от рассчитанного.

оптимизационная задача, линейная n -мерная динамическая система, сушильная камера, температурный режим, минимаксное управление (оценивание), область допустимых возмущений, качество переходного процесса

Вступ. Розв'язок оптимізаційної задачі мінімаксного керування лінійним багатовимірним об'єктом (температурним режимом сушарної камери або пташника) з матмоделлю

$$\begin{cases} \dot{x}(t) = A(t)x(t) + B(t)u(t) + K(t)f(t), \\ x(t_0) = Mx^0, \end{cases} \quad (1)$$

за критерієм оптимальності

$$I(u) = \int_{t_0}^T x^T(t)G(t)x(t)dt + \int_{t_0}^T u^T(t)D(t)u(t)dt + x^T(T)Hx(T), \quad (2)$$

де $A(t), B(t), K(t), M(t), G(t), D(t), H$ – додатно визначені симетричні вагові матриці; відносно початкових умов x_0 і збурювальних чинників f , що належать до області S_λ у вигляді гіпереліпсоїда виду [1], за умови повних вимірювань або спостереження координат його стану дає оптимальне (мінімаксне) керування (ОК) у вигляді зворотного зв'язку від стану ОК

$$u(t) = R(t) \cdot x(t), \quad (3)$$

де $R(t)$ – матриця зворотного зв'язку (керування);

$x(t)$ – вектор стану об'єкта.

Матриця керування (або матриця підсилення) $R(t)$ в оптимальному керуванні (3) визначається за співвідношенням:

$$R(t) = -\lambda^{-2}(t)D^{-1}(t)B^T(t)\psi(t), \quad (4)$$

де $\lambda(t)$ – відома скалярна функція;

$D(t)$ – відома додатно визначена симетрична вагова матриця;

$B(t)$ – матриця коефіцієнтів математичної моделі (1);

$\psi(t)$ – спряжена матриця, яка визначається з функції Гамільтона [2].

За умови неповних і неточних вимірювань вектора стану ОК спостереження описується співвідношенням:

$$y(t) = C(t)x(t) + M(t)f_2(t), \quad (5)$$

де $C(t)$ – матриця, яка визначає елементи вектора стану об'єкта $x(t)$, які вимірюються з похибками (неповно, неточно);

$f_2(t)$ – вектор похибок спостережень;

$M(t)$ – матриця коефіцієнтів при складових вектора $f_2(t)$ похибок спостережень [3].

Оптимальне керування за цих умов визначається як:

$$u(t) = R(t)x(t) + Q(t)y(t), \quad (6)$$

де $R(t)$ – матриця зворотного зв'язку (матриця підсилення);

$Q(t)$ – шукана матриця коефіцієнтів при спостереженнях $y(t)$;

$y(t)$ – спостереження вимірюваних координат стану об'єкта $x(t)$;

$x(t)$ – оцінки координат стану об'єкта $x(t)$ на виході фільтра (Калмана-Бюсі) [4].

Оптимальне керування повинно задовольняти умову мінімізації наступного критерію:

$$J_c(u) = \sup_{(x^0, f_1, f_2) \in S_\lambda} I_c(u), \quad (7)$$

де $I_c(u)$ – критерій (функціонал) якості керування.

Тоді для матриці керування або зворотного зв'язку можна одержати вирази

$$R(t) = -\lambda^{-2}(t)D^{-1}(t)B^T(t)\psi(t), \quad (8)$$

$$G(t) = S(t)C^T(t)P_2(t), \quad (9)$$

де $\lambda(t)$ – відома скалярна функція;

$B(t)$ – матриця коефіцієнтів математичної моделі;

$G(t)$ – одна з шуканих матриць фільтра, яка визначає його структуру;

$P_2(t)$ – додатно визначена симетрична вагова матриця з відомими коефіцієнтами області допустимих збурень;

$S(t)$ – матриця, яка задовільняє певне матричне рівняння;

$\psi(t)$ – спряжена матриця.

Постановка проблеми та аналіз останніх досягнень. Для експериментальних досліджень наведених вище розв'язків в середовищі пакету прикладних програм Matlab було розроблене алгоритмічно-програмне забезпечення для випадків повного і точного та неповного і неточного вимірювань координат стану об'єкта. Лістинги основних програм для цих випадків і всіх допоміжних підпрограм наведені в [1].

Мета статті – виклад експериментальних досліджень та аналіз результатів.

Виклад основного матеріалу. Аналіз перехідних процесів елементів матриці зворотного зв'язку $R(t)$ і елементів матриці $\psi(t)$.

Графіки цих перехідних процесів наведені на рис. 1 і 2.

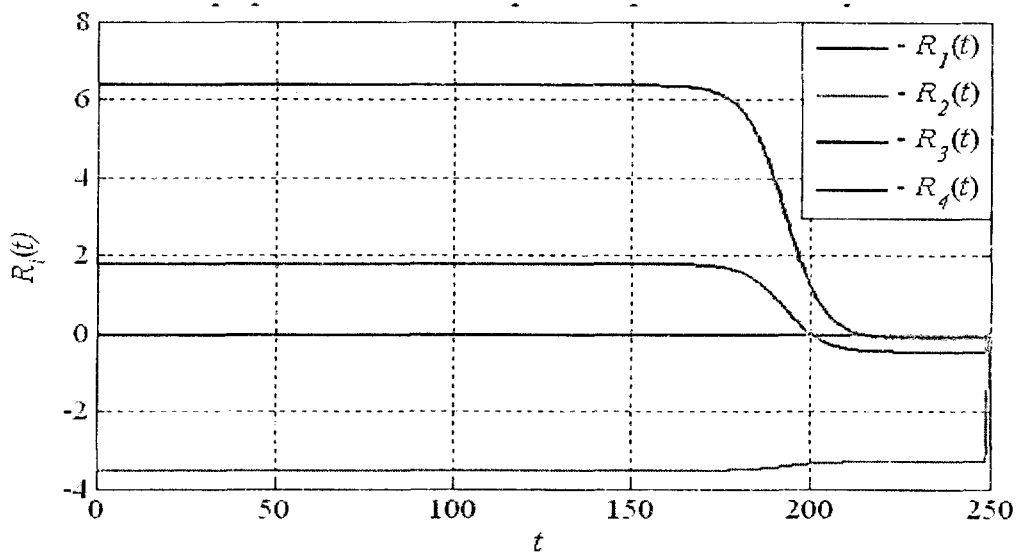


Рисунок 1 – Графіки переходних процесів елементів матриці зворотного зв'язку $R(t)$

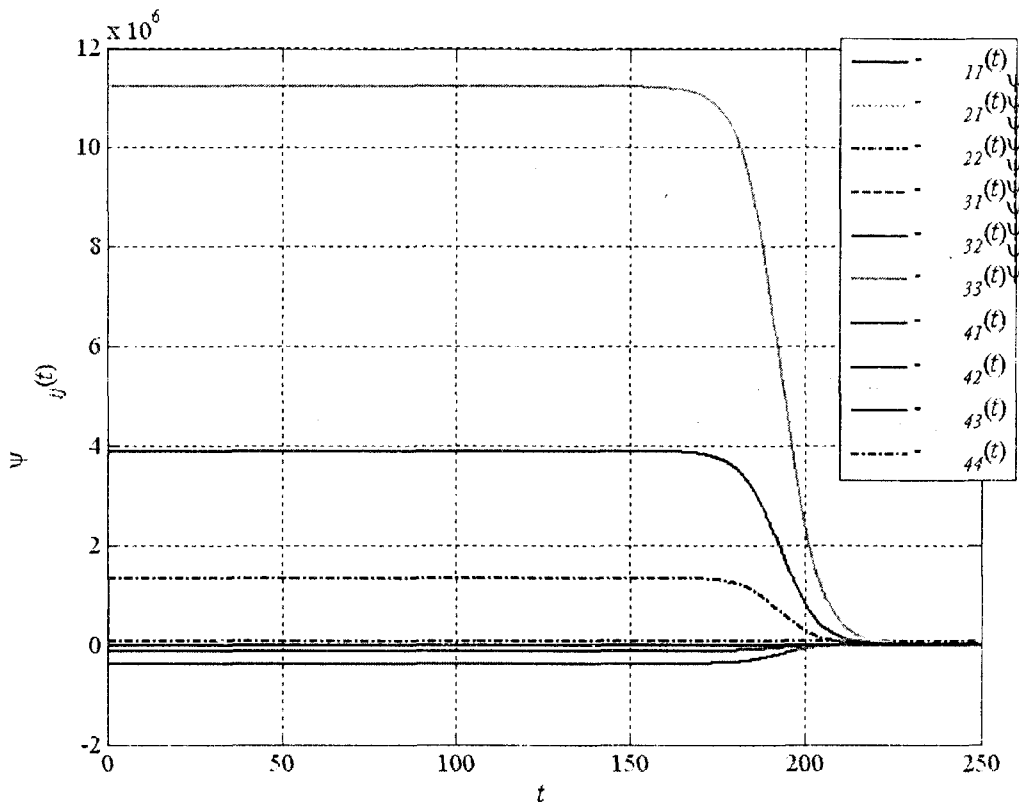


Рисунок 2 – Графіки переходних процесів елементів матриці $\Psi(t)$

Дані графіки слід розглядати справа ліворуч, а не навпаки, як завжди, оскільки інтегрування при розв'язанні диференціальних рівнянь відбувалось в зворотному напрямі. Експерименти показали, що вигляд ПП не змінюється в обох випадках (повного і точного вимірювання координат стану та неповного і неточного) при зміні будь-яких з доступних для зміни параметрів: виду збурень, їх частоти або амплітуди, вагових коефіцієнтів матриць і т.д.

При цьому збільшення вагових коефіцієнтів критерію оптимальності призводить до зменшення масштабів вертикальної осі для ПП елементів матриці зворотного зв'язку $R(t)$ і наближення ліній різних елементів, та збільшення масштабів («розширення») для

ПП елементів матриці $\psi(t)$ і віддалення ліній різних її елементів одна від одної. Має місце і зворотний процес. Відповідна зміна вагових коефіцієнтів області припустимих збурень мало змінює або взагалі не змінює вигляд і масштаб ПП.

Аналіз перехідних процесів спостережень станів системи $y(t)$ і оптимальних оцінок $x(t)$ для випадку неповних та неточних вимірюваннях координат стану об'єкта. Графіки цих перехідних процесів фактично дають змогу наочно оцінити якість роботи мінімаксного фільтра Калмана-Бюсі.

На рисунках 3, 4 наведені графіки ПП відповідно оптимальних спостережень $y(t)$ і оптимальних оцінок (або відфільтрованих значень) $x(t)$.

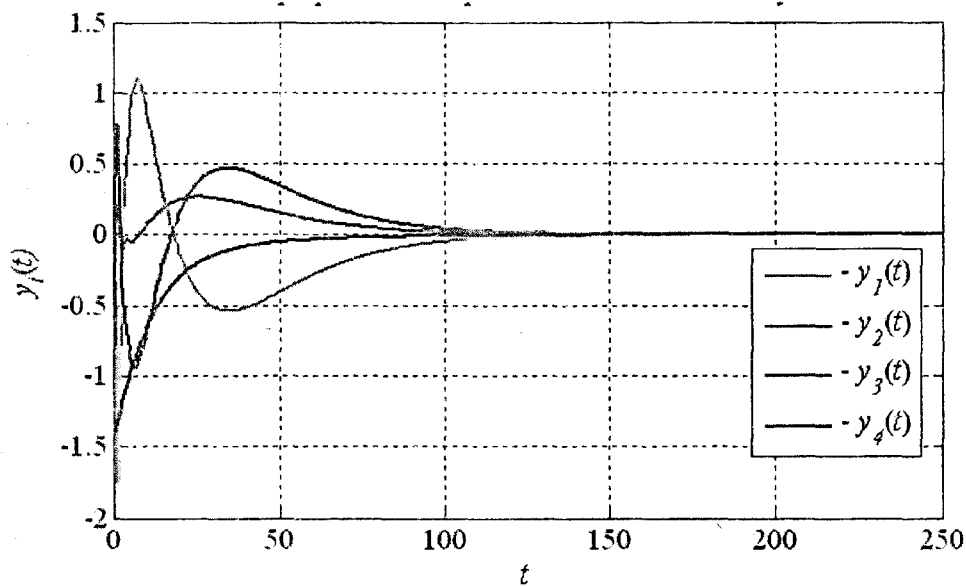


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів спостережень станів системи $y(t)$

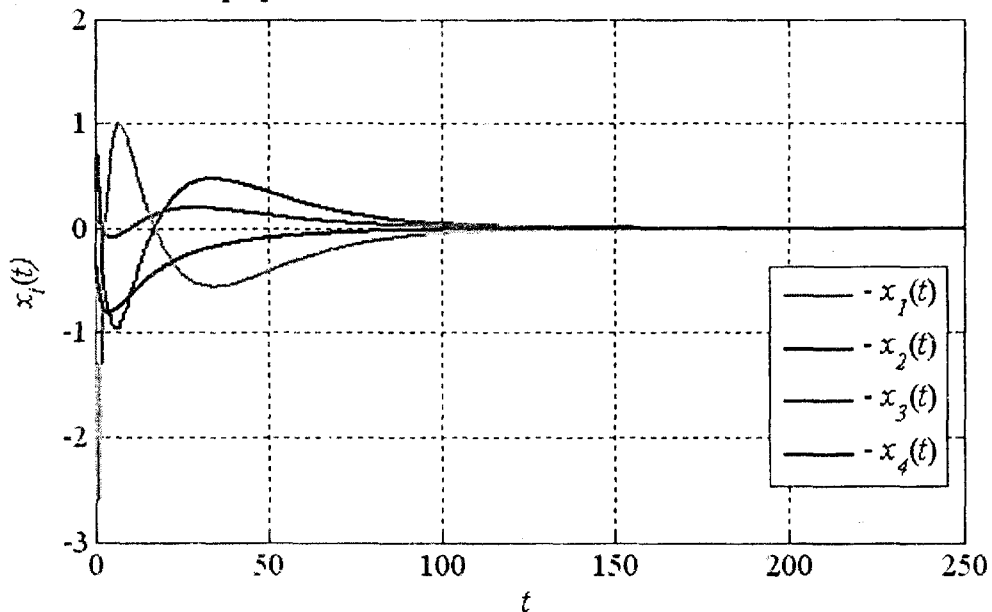


Рисунок 4 – Графіки перехідних процесів оптимальних оцінок станів системи $x(t)$

Порівняння вищенаведених графіків вказує на те, що вони є не просто подібними, а дуже близькими одне до одного як за значеннями, так і за характером перебігу. Зокрема, графіки оптимальних оцінок станів системи найближче відтворюють дійсні стани системи. Можна зробити висновок про задовільну роботу використаного

фільтра і можливість його застосування для побудови оптимального мінімаксного регулятора в умовах неповноти і неточності вимірювання координат стану об'єкта.

Аналіз перехідних процесів оптимальних керувань $u(t)$ і відповідних їм оптимальних станів системи $x(t)$.

Спочатку вибрано певний стандарт, з яким порівнювалися ПП за умови змінювання різних показників. Для обох випадків такими «стандартами» є всі вагові діагональні одиничні матриці і значення збурень в початковий момент часу $f_0 = [-0.2, 0.4, 0.1, -0.5]$. Кінцевий момент керування T в програмі обирається залежно від вигляду ПП та їхнього затухання (найчастіше в межах 60-250). При цьому векторна функція є $\lambda_{станд} = 2$ для випадку повних і точних вимірювань і $\lambda_{станд} = 7$ для випадку неповних і неточних вимірювань.

Графіки ПП оптимальних керувань і станів системи для першого випадку наведені, відповідно, на рис. 5 і 6, а для другого випадку, відповідно, на рис. 7 і 8.

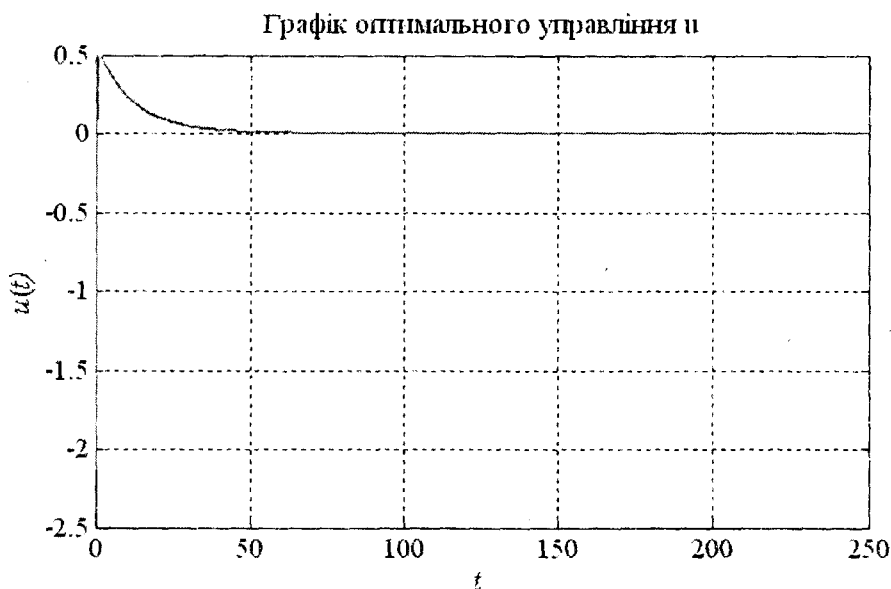


Рисунок 5 – Графік перехідного процесу оптимального керування $u(t)$ для випадку повних і точних вимірювань

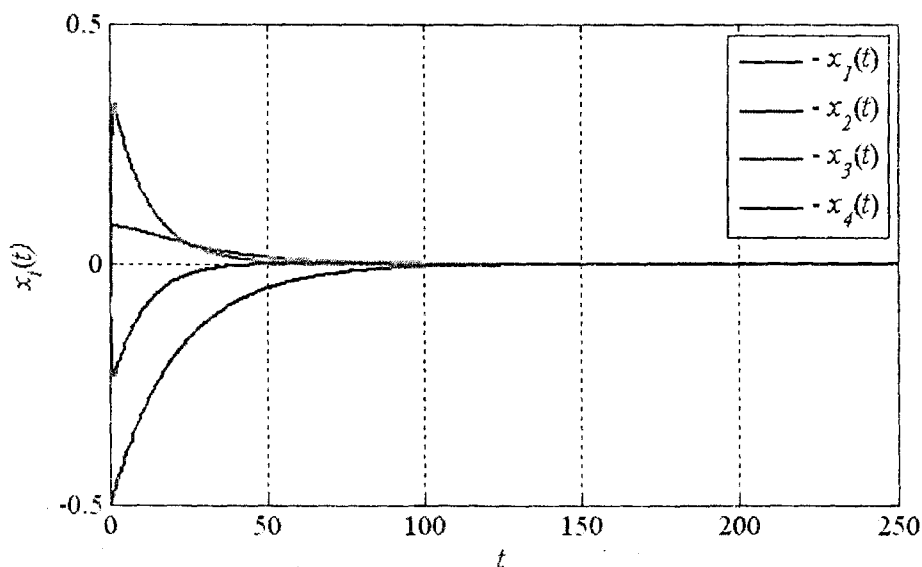


Рисунок 6 – Графіки ПП оптимальних станів $x(t)$ для випадку повних і точних вимірювань

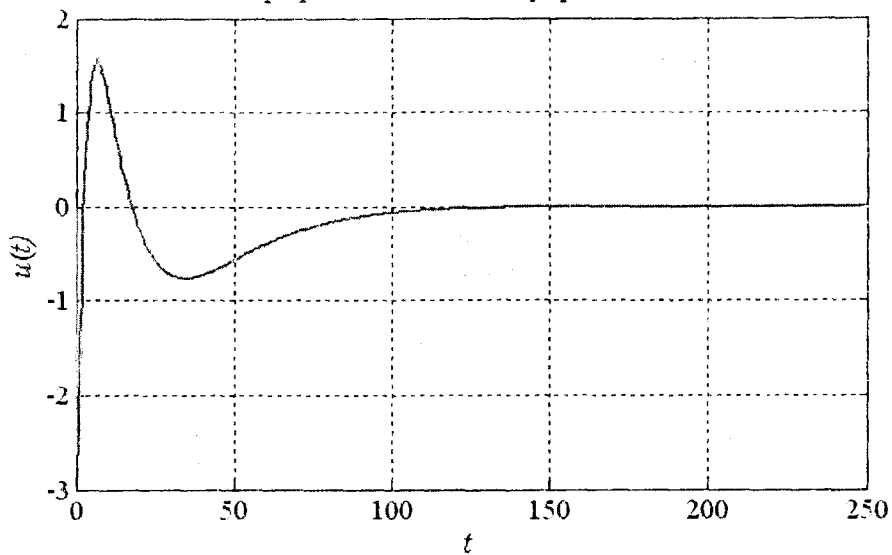


Рисунок 7 – Графік ПП оптимального керування $u(t)$ для випадку неповних і неточних вимірювань

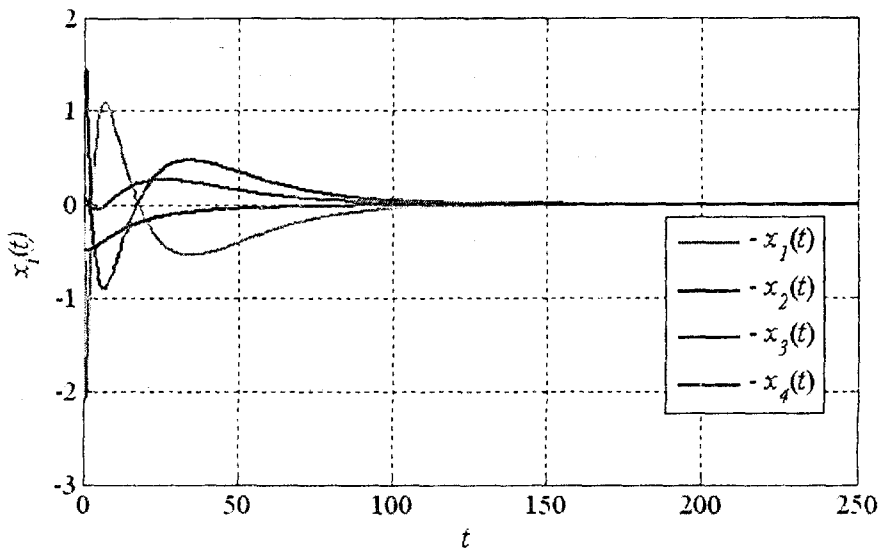


Рисунок 8 – Графіки перехідних процесів оптимальних станів системи $x(t)$ для випадку неповних і неточних вимірювань

Збільшення вагових коефіцієнтів матриці P_0 області припустимих збурень у випадку неповних і неточних вимірювань вже суттєво змінює вигляд і перебіг ПП оптимальних керувань і станів системи. Зокрема, при збільшенні вагових коефіцієнтів матриці P_0 суттєво зростають витрати на керування і в той же час збільшується похибка функціонування системи, що особливо помітно за амплітудами ПП координат $x_1(t)$ і $x_2(t)$. При цьому мінімальне значення критерію при відомих зовнішніх збуреннях $I(u) = 56.3164$, його верхня межа $J(u) = 1853849.5148$, а значення лівої частини обмеження на припустимі збурення $St = 9.7989$, тобто, збурення виходять за припустимі межі, але система не втрачає стійкості і має, як і в попередньому випадку, більший від розрахованого запас.

Для аналізу впливу на оптимальні керування і стани системи (у випадках повного і точного та неповного і неточного вимірювань) періодичних з різними амплітудою і частотою збурень розглядалися два їх види: періодичне загугаюче і

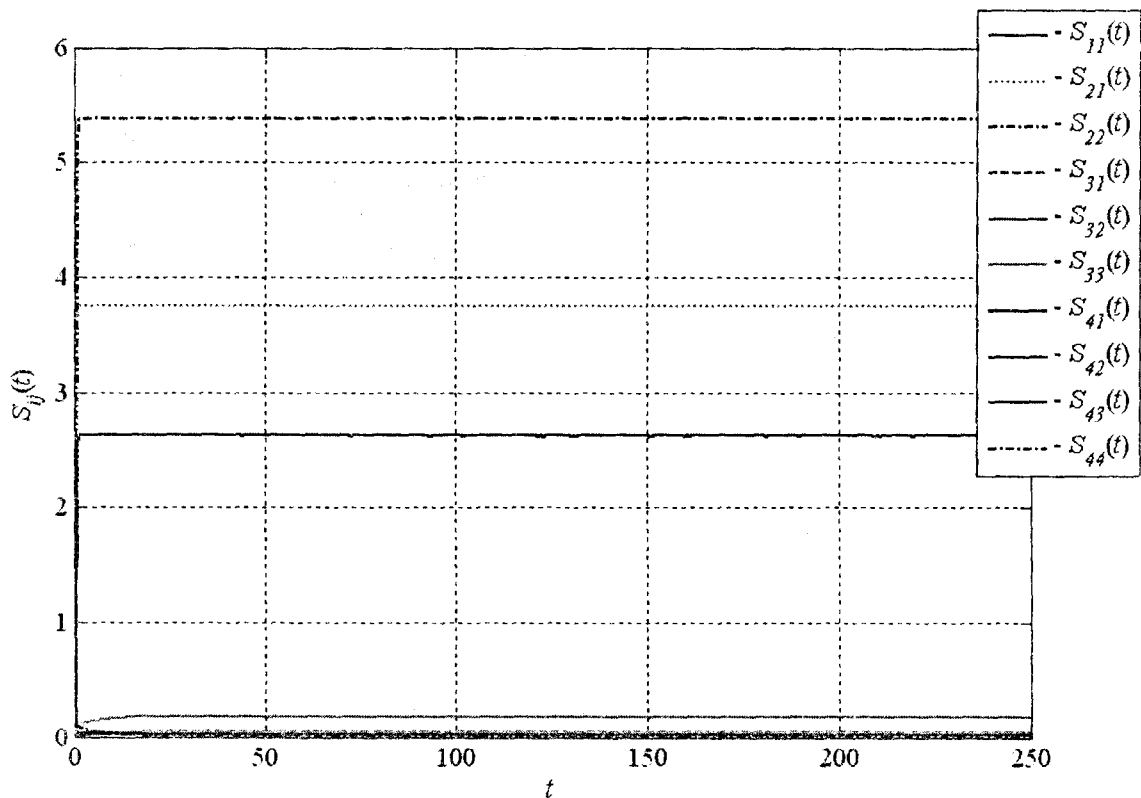
незатухаюче. Передбачено збільшення в 10 разів амплітуди і зменшення в 10 разів частоти при незмінній амплітуді. Встановлено, що збільшення частоти зменшує значення критерію $I(u)$, а амплітуди – навпаки збільшує. При цьому збільшення частоти несуттєво зменшує в першому випадку і збільшує в другому випадку обмеження St , в той час, як збільшення амплітуди в обох випадках суттєво збільшує це значення. Навіть при виході збурень за припустимі межі якість керування (регулювання) погіршується незначно, і через деякий час відбувається вихід на стабілізоване значення (тобто, система має великий запас стійкості, більший від номінально розрахованого).

Видно, що значення верхньої межі критерію оптимальності $J(u)$ залишається незмінним для кожного випадку (повного і точного та неповного і неточного вимірювань) при будь-яких змінах амплітуд і частот збурень та їх видів.

При *періодичних незатухаючих збуреннях* перехідні процеси, що розглядаються, при точних і повних та неточних і неповних вимірюваннях координат стану об'єкту є практично ідентичними (з різницею лише у масштабі).

Аналіз перехідних процесів елементів матриці $S(t)$. Графічне представлення перехідних процесів цієї матриці наведено на рис. 9.

Вигляд даних ПП є практично незмінним при зміні будь-яких інших з розглянутих вище показників, крім матриць P_0, P_1, P_2 області припустимих збурень, що свідчить про стабільність структури мінімаксного фільтра і його залежність лише від зазначених матриць P_0, P_1, P_2 (при постійних значеннях інших матриць, зокрема, матриці $A(t)$ коефіцієнтів математичної моделі і матриці $C(t)$ коефіцієнтів моделі спостережень).



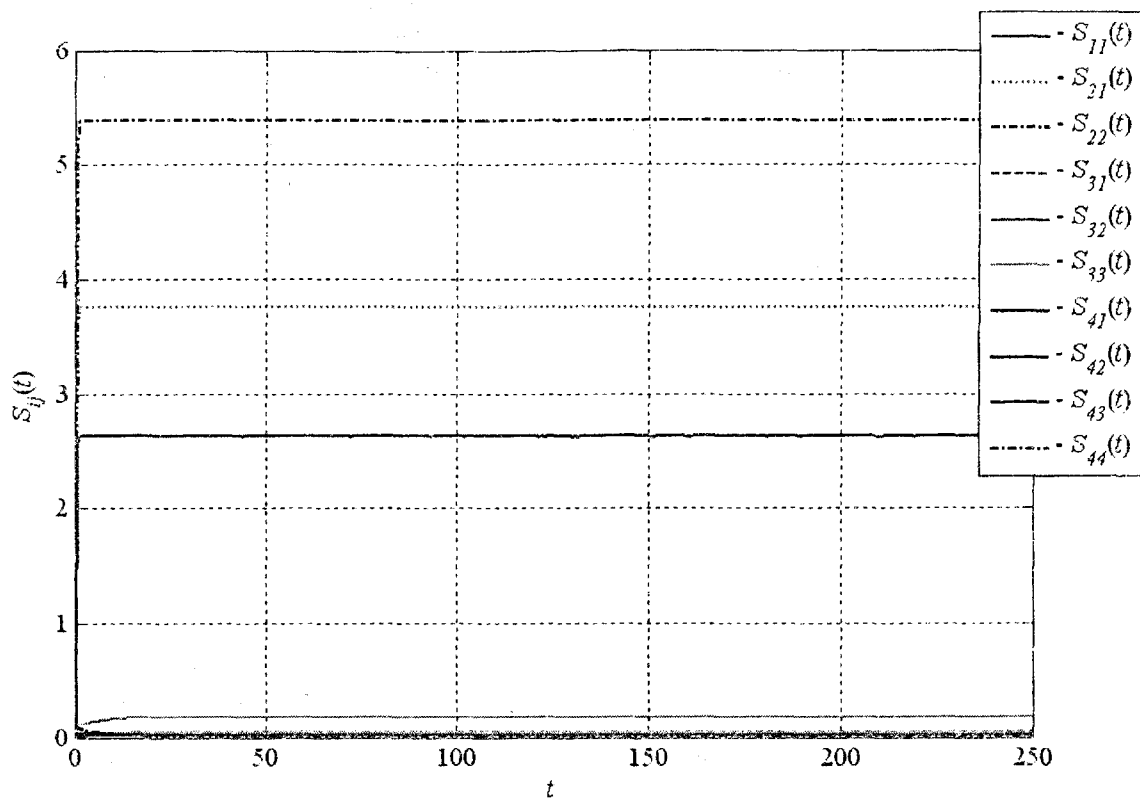


Рисунок 9 – Графіки перехідних процесів елементів матриці $S(t)$

Висновки: Здійснений аналіз перехідних процесів елементів матриць зворотного зв'язку $R(t)$ та $\psi_{ij}(t)$ для обох випадків вимірювання стану об'єкта, а також оптимальних станів системи $x(t)$, спостережень $y(t)$ і оптимальних оцінок $\hat{x}(t)$ якості роботи мінімаксного фільтра Калмана-Бюсі. Досліджені ПП оптимальних керувань $u(t)$ і відповідних їм оптимальних станів системи $x(t)$, а також область припустимих збурень, які суттєво змінюють вигляд і перебіг ПП оптимальних керувань і станів системи. Доведено, що синтезоване оптимальне керування має додатковий запас стійкості, більший від розрахованого.

Список літератури

1. Слезенко А.М. Дослідження оптимального мінімаксного управління лінійними динамічними системами, що функціонують в умовах невизначеності/А.М. Слезенко, О.П. Лобок//Програма і матеріали 78 міжнародної наукової конференції молодих вчених, аспірантів і студентів "Наукові здобутки молоді - вирішенню проблем харчування людства у XXI столітті", 2-3 квітня 2012р.- К.: НУХТ, 2012.- Ч. 2.- 316-317 с.
2. Кириченко Н.Ф. Минимаксный подход к рекуррентному оцениванию состояний линейных динамических систем/Н.Ф. Кириченко, А.Г. Наконечный//Кибернетика.- 1977.- №4.- С.52-55.
3. Бублик Б.Н. Минимаксные оценки и регуляторы в динамических системах/Б.Н. Бублик, Н.Ф. Кириченко, А.Г. Наконечный; Академия Наук Украинской ССР, Ордена Ленина институт кибернетики.- К.: АН УССР Ин-т кибернетики, 1978.- 47 с.
4. Кириченко М.Ф. Аналітичне конструювання мінімаксних регуляторів у лінійних системах/М.Ф. Кириченко//ДАН УРСР, С.А.- 1978.- №1.

O. Lobok, B. Goncharenko, A. Slyezenko
National University of Food Technologies
 Investigations minimax control and observation to the thermal objects agricultural

The solutions to the minimax control and monitor thermal dimensional object control (e.g. drying chamber) in a comprehensive and accurate, as well as incomplete and inaccurate measurements of the state. Experimentally studied the optimal control, monitoring, and the values of the state of origin of the optimality criteria of the object in these conditions. Investigated admissible perturbations in the case of incomplete and inaccurate measurements, calculating the values of the criteria and the value of their upper limits. The analysis of transients matrix elements of feedback for both cases, the measurement object's state. The analysis of the transients optimal controls, system states, observations and assessments of the quality of the optimal minimax Kalman-Bucy filter. The optimal range of admissible perturbations. It is proved that the synthesized minimax control has a margin of stability, the larger of the calculated.

optimization task, linear n -dimensional dynamical system, drying chamber, temperature, minimax control (evaluation), the region of admissible perturbations, the quality of the transition process

Одержано 08.10.13