

КИЇВСЬКИЙ МІЖНАРОДНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ЦИВІЛЬНОЇ АВІАЦІЇ

На правах рукопису

ТВЕРІТІНОВ Віктор Володимирович

ЛІНІЙНЕ ПЕРЕДБАЧЕННЯ В РЕАЛЬНОМУ ЧАСІ
СТАЦІОНАРНИХ ВИПАДКОВИХ ПРОЦЕСІВ В СИСТЕМАХ
ІДЕНТИФІКАЦІЇ ТА КЕРУВАННЯ

Спеціальність 05.І3.01 - керування в технічних системах

А в т о р е ф е р а т
дисертації на здобуття вченого ступеня
кандидата технічних наук

Київ « 1994

Робота виконана в Київському міжнародному університеті цивільної авіації на кафедрі автоматизованих систем керування та пілотажно-навігаційних комплексів.

Науковий керівник - доктор технічних наук,
професор А.А.Тунік.

Офіційні опоненти - доктор технічних наук,
професор В.А.Касьянов;
канд. технічних наук,
доцент В.Л.Зіатдінов.

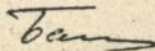
Провідна організація - КБ "Луч", м.Київ

Захист відбудеться "21" вересня 1994 року о 14.30 на засіданні спеціалізованої Ради К 072.04.02 у Київському міжнародному університеті цивільної авіації за адресою: 252058, Київ-68, проспект Космонавта Комарова, 1.

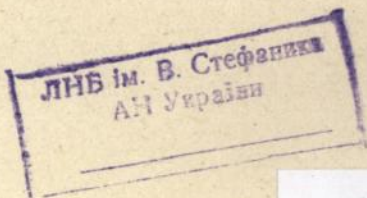
С дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці інституту.

Автореферат розосланий "21" червня 1994г.

Вчений секретар
спеціалізованої Ради,
кандидат технічних наук



А.Г.Баскакова



ЛННБ України ім.В.Стефаника



00756590 (W)

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний стан та розвиток систем керування польотом літальних апаратів (ЛА): великі дистанції керування, значна точність, малі габарити апаратури та значна ефективність у різноманітних обставинах використання, високий рівень маневровості характеризують повну автоматизацію усіх ділянок польота ЛА при різних умовах та завадах на основі використання кібернетичних пристроїв. Це призводить до залучення у системи керування бортових обчислювальних машин, забезпечивши значну ефективність і надійність керування, зокрема за допомогою удосконалення алгоритмів обробки інформації, які вирішують у реальному часі задачі фільтрації, оптимального керування, тощо. Так наприклад, у деяких високоманеврених ЛА, виникає зближення частот коливань літака як жорсткого тіла з частотами пружних коливань. Через це завади від пружних деформацій конструкції можуть сприятися і оброблятися каналами системи автоматичного керування (САК) у відхилення органів керування з можливими змінами характеристик літака по стійкості, навантаженості та інше. Таким чином, у об'єктах зі значним рівнем вібрації (особливо: вертольоти, ракети) САК (цифровий автопілот) повинна виконувати функції як керування польотом, так і фільтрації гармонійних компонент вхідного сигналу, викликаних пружними коливаннями конструкції. Оцінка ефективності керування ЛА, працюючих в складних динамічних умовах, на етапах виготовлення та проектування бортової апаратури потребує складного устаткування для проведення іспитів, оцінки стану, діагностики та налаштування бортових систем навігації і керування в обставинах, найбільше наближених до експлуатаційних. Найбільш типовими елементами такого устаткування є багатоступеневі динамічні стенди, які в свою чергу потребують застосування методів ідентифікації та оптимального керування.

Мета роботи. Метою дисертаційної роботи є розробка ефективних методів опису динамічних характеристик дискретних сигналів та систем у спектральній області та створення на їх основі алгоритмів оцінювання, ідентифікації і керування для підвищення ефективності бортових систем ЛА на прикладах розв'язання наступних практичних задач:

- 1) оцінювання коливань незалежних каналів стенда-імітатора кутових коливань ЛА та ідентифікація його характеристик,
- 2) обробки записів флаттеру, отриманих в наземному експерименті

на вібростенді, повторюючим експлуатаційні навантаження, з метою знаходження частоти флаттеру та його амплітуди при іспитах конструкції крила, а також при обробці телеметричної інформації.

3) знаходження закону та алгоритму керування регулятора безплатформеної системи наведення ракети, у якій акселерометри і датчики кутових швидкостей жорстко зв'язані з рухливим об'єктом.

Методи дослідження. Теоретичні результати засновані на:

- методах спектрального оцінювання: алгоритмі швидкого перетворювання Фур'є, рівняннях Пла-Уокера, методі стохастичної апроксимації, абсолютно-оптимальних алгоритмах Ципкіна, теорії робастності у трактовці Хампеля;

- ітераційних методах обчислювальної математики: рішення системи лінійних рівнянь (релаксаційному - методі Якобі) та знаходження коренів рівнянь (метод Ньютона-Рафсона), пошуку псевдозворотньої матриці Мура-Пенроуза (сінгулярного - SVD - розкладу);

- стійкості по Ляпунову.

Практичні результати засновані на методах обробки експериментальних даних, отриманих в ході динамічних іспитів гіропристроїв, вібраційних іспитів конструкцій ЛА та цифровому моделюванні польота ракети за відсутності вібрзахисту датчиків.

Наукова новизна даної роботи містить наступне:

1. запропонована нова форма рівнянь Пла-Уокера, яка дозволила розробити процедури вибору початкових значень рекурентних алгоритмів та розробити нижчезазначені модифікації абсолютно-оптимальних алгоритмів Ципкіна;

2. розроблені модифікації абсолютно-оптимального алгоритму, які оцінюють сукупність моделей складного динамічного об'єкта в режимі нормальної роботи;

3. абсолютно-оптимальні алгоритми Ципкіна поширені на випадок оцінювання багатоканального виміру стаціонарних стохастичних процесів;

4. запропонований адаптивний метод асимптотично стійкого в цілому параметричного оцінювання на засаді збереження міри ймовірності вимірів та нев'язки, а також на засаді нелінійної моделі, яка з часом (асимптотично) стає лінійною;

5. запропонований адаптивний метод визначення закону керування регу-

лятора у слідуючій системі, виходячи з передбачення сигналу керування у ланцюгу зворотнього зв'язку замкненої слідуючої системи.

Практична цінність полягає в тому, що отримані результати можуть бути з успіхом перенесені на обробку сигналів у радіотехніці, радіофізиці, оптиці, обробці зображень, фізиці плазми, економетриці, робототехніці, проектуванні та експлуатації транспортних засобів; різних приводів, точних приладів і т.і. Зокрема, ці результати були успішно застосовані для рішення задач оцінювання коливань незалежних каналів стенда-імітатора кутових коливань ЛА та ідентифікації його характеристик; обробки записів флеттеру, отриманих у наземному експерименті на вібростенді, з метою знаходження частоти флеттеру та його амплітуди при іспитах конструкції крила; знаходження закону та алгоритму керування регулятора безплатформеної системи наведення ракети, у якій акселерометри і датчики кутових швидкостей жорстко зв'язані з рухливим об'єктом.

Реалізація результатів. Результати роботи впроваджені в КБ "Луч" м.Києва і Таганрогському авіаційному науково-технічному комплексі ім.Берієва, впроваджені в учбовий процес КМУЦА.

Апробація роботи. Головні положення роботи викладені на:

- Всесоюзній науково-технічній конференції "Ідентифікація, виміри характеристик та імітація випадкових сигналів", Новосибірськ: НЕТІ, 1991р.;

- Всесоюзній науково-технічній конференції "Методи керування системно-ефективність функціонування електрофікованих та пілотажно-навігаційних комплексів", Київ: КІЩА, 1991р.;

- XXXII військово-науковій конференції КВВАІУ, Київ, 1990р.;

- Міжнародній науково-технічній конференції "Статистичні методи у теорії передачі та перетворення інформаційних сигналів", Київ: КІЩА, 1992р.

- Звітній науково-технічній конференції з держбюджетної тематики, проведеної інститутом у 1993 році, Київ: КІЩА, 1994р.

Публікації. Головні результати надруковані у 7 наукових роботах.

Склад та об'єм роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, чотирьох розділів, заключення, списку літератури та доповнення. Робота містить 96 сторінок головного тексту, 9 сторінок списку літератури з 106 найменувань, 6 сторінок ілюстрацій та 19 сторінок доповнення.

КОРОТКИЙ ВИКЛАД РОБОТИ

Короткий зміст параметричних методів, прийнятих основою представленої роботи, викладений в розділі першому. У другому розділі викладені питання оцінювання абсолютно-оптимальним алгоритмом та його модифікаціями. Проблема стійкості оцінювання, дуже важлива у адаптивних системах, досліджена та вирішена автором у третьому розділі. Четвертий розділ рішенням практичних задач стверджує теоретичні висновки дисертаційної роботи.

Вступ. У вступі окреслюється проблемна область дослідження, сформульовані цілі та коротко окреслено зміст дисертації.

Перший розділ. Нехай оброблюваний масив даних складається з результатів послідовних вимірів миттєвих значень $y(k)$ випадкового процесу, які виконуються через однакові проміжки часу.

Опишемо спектральну щільність виборки дрібно-раціональної функцією (раціональної моделлю)

$$S_y(\omega) = \frac{\sigma_\xi^2 \cdot |1 + b_1 e^{-j\omega} + \dots + b_{N_1} e^{-j\omega N_1}|^2}{|1 + a_1 e^{-j\omega} + \dots + a_N e^{-j\omega N}|^2} \quad (1)$$

з нею співвідноситься лінійне різницеве рівняння формуючого фільтру загального вигляду (авторегресії-рухомого середнього - ARPC):

$$y(k) = - \sum_{i=1}^N a_i \cdot y(k-1) + \sum_{i=0}^{N_1} b_i \cdot \xi(k-1), \quad b_0=1, \quad (2)$$

де $\xi(k)$ - вхідний, недоступний виміру білий шум, a_i, b_i - дійсні коефіцієнти. Якщо часовий ряд являє собою вектор $y(k)$ розміру m , то по аналогії з (2) m -канальна ARPC-модель визначається як векторна рекурсія.

Нехай часовий ряд являє собою сукупність синусоїдальних гармонік у білому шумі. Така ситуація має місце на практиці при фільтрації пружних коливань. Тоді часовий ряд має розривну спектральну щільність, так що раціональна модель для нього не підходить принципово. Для визначення частот гармонік доцільно використати тригонометричну тотожність

$$\sin(k \cdot x) = 2 \cdot \cos(x) \cdot \sin((k-1) \cdot x) - \sin((k-2) \cdot x) \quad (3)$$

де $x=2\pi f \cdot \Delta t$, f - частота гармоніки, Δt - інтервал відліку; яку Юл (1927р.) записав у вигляді "рівняння гармонійної кривої":

$$u(k) = a \cdot u(k-1) - u(k-2) + \varepsilon(k), \quad (4)$$

$\varepsilon(k)$ - мале "збудження", α - належний до визначення параметр, співвідносний гармоніці.

Таким чином, рівняння (2) і (4) дають можливість описати, визначати параметри, широкополосні та вузькополосні сигнали. Успішне застосування до цих полярно-протилежних класів стаціонарних випадкових процесів результатів дисертаційної роботи дозволяє прогнозувати їх працездатність і в усіх проміжних ситуаціях.

Значення кореляційної функції пов'язані з параметрами моделі. Але, якщо значення кореляційної функції не визначені безумовно, доцільно використати адаптивні методи для отримання оцінок коефіцієнтів моделі відразу з вимірів.

На засаді інформаційного критерія якості, Ципкін Я.З. запропонував абсолютно-оптимальні рекурентні алгоритми ідентифікації та оцінювання спектральної щільності, які мають найбільш значну швидкість збіжності, а через це й точність.

Нехай відповідність моделі об'єкту оцінюється критерієм якості $J(c) = M(F(\varepsilon(z(k), c)))$, где $F(\xi)$ - функція втрат, $F(\xi) = -\ln p_0(\xi)$, $p_0(\xi) = p_0(-\xi)$ - неперервна щільність розподілу вхідного білого шуму (лінійні алгоритми є оптимальними при будь-якій $p_0(\xi)$), c - вектор параметрів, $c = (a_1, \dots, a_N, b_1, \dots, b_{N_1})^T$, $z(k)$ - вектор усіх вимірів до миті часу k , $\varepsilon(z(k), c)$ - нев'язка, $\varepsilon(z(k), c) = y(k) - c^T(k) \cdot x(k)$, яка співпадає з білим шумом $\xi(k)$, $x(k)$ - вектор вимірів,

$x(k) = (-y(k-1), \dots, -y(k-N), \varepsilon(k-1), \dots, \varepsilon(k-N_1))^T$

Умова оптимальності $\nabla_c J(c) = M(F'(\varepsilon(z(k), c)) \cdot v(k)) = 0$, де $v(k) = \nabla_c \varepsilon(z(k), c)$ - вектор чутливості, породжує алгоритм адаптації у співвідношенні з формулою

$$c(k) = c(k-1) + \Gamma(k) \cdot F'(\varepsilon(z(k), c)) \cdot v(k) \quad (5)$$

застосуванням методу Ньютона-Рафсона, де $\Gamma(k)$ - матриця підсилення.

Алгоритм адаптації може бути також зроблений виходячи з спрощеної умови оптимальності, яка для лінійного алгоритму приймає вигляд: $M(\varepsilon(z(k), c) \cdot x(k)) = 0$.

Для більш ефективного застосування на практиці вищезгаданих алгоритмів, необхідно вирішити ряд задач. Часто матриця підсилення погано обумовлена, тому виникає задача зменшення обумовленості матриці підсилення. Дуже часто при застосуванні алгоритма адаптації виникає проблема забезпечення стійкості обчислень функції чутливості

$v(k)$ для покращення збіжності та підвищення її швидкості. Необхідно доповнити рекурентний алгоритм процедурами визначення початкових умов на засаді кількох вимірів, щоб знайти вигляд моделі, нульове наближення параметрів та матриці підсилення. Безсумнівно, що спосіб формування оцінки кореляційної послідовності впливає на обчислення параметрів. Тому не можна викреслити той випадок, коли порядки N , N_1 параметрів моделі будуть визначені з помилкою. Через це доцільно вибирати модель з деякої сукупності, щоб визначити оптимальну.

Другий розділ. У сукупності моделей можуть бути знайдені класи і у кожному класі обрана модель – представник класу (оптимальна модель, якщо це можливо). Похибки вибору початкового наближення вибору, моделі призводять до зниження якості оцінювання $\omega_k = M(J(c(k))) - J(c)$, пропорційного розміру l вектора параметрів: $\omega_k = \frac{l}{2k}$. Можливе незначне відхилення критерію якості оптимальної моделі $J(c) \leq J(c^*) + \omega_k$ можливо прийняти як визначення класу моделей. Зашумлення призводить до збільшення критерію якості, але не впливає на визначення класу. Зашумлення впливає на вибір оптимальної моделі у класі – треба прийняти до уваги обумовленість матриці підсилення $\Gamma(k)$.

Тому, якщо AP-модель і APFC-модель мають близькі значення критерія якості та розміру вектора параметрів, то доцільно обрати оптимальною APFC-модель.

Однак пряме застосування абсолютно-оптимального алгоритму до вирішення деяких практичних задач (наприклад, ідентифікації динамічних характеристик стелу) не призвело до позитивного результату для моделі APFC, у якій було $N=N_1=1$. Тому була виконана зміна матриці підсилення, тобто модифікація абсолютно-оптимального алгоритму Ципкіна:

$\Gamma(k) = \begin{pmatrix} \Gamma_y(k) & 0 \\ 0 & \Gamma_\varepsilon(k) \end{pmatrix}$. В адаптивному алгоритмі нев'язка стає

білим шумом лише асимптотично, і тому корелює з попередніми у часі вимірами процесу. Перевага цієї модифікації викликана наближенням матриці підсилення до вигляду, очікуваному при співпаданні нев'язки та білого шуму.

Нарешті, для того щоб вибрати оптимальну модель необхідно мати сукупність моделей складного об'єкта. Прикладом алгоритму, який дає сукупність AP-моделей починаючи з моделей низького порядку, є алгоритм Левінсона-Дурбіна і який опирається на визначеність

кореляційних оцінок. Але адаптивний алгоритм потребує знання помилки передбачення і вектора вимірів (або вектора чутливості). Більш того, якщо процес спробувати відобразити АР-моделлю більш низького порядку, ніж треба, тоді нев'язка вже не буде білим шумом. А тому на неї можливо, і необхідно, дивитися як на часовий ряд і застосувати до цього ряду алгоритм оцінювання, як до вихідного ряду. Процес кінчається, коли в результуючій моделі стає N коефіцієнтів авторегресії і N_1 коефіцієнтів рухомого середнього.

Запишемо рівняння Пла-Уокера у такій формі:

$$M(\varepsilon(k, c) \cdot x(k-N_1)) = 0. \quad (6)$$

Тоді, з каузальності $M(\varepsilon(k, c) \cdot y(k-j)) = 0, j > 1$ випливає

$$M(v(k) \cdot x(k-N_1)) = 0, \quad v(k) = \sum_{i=0}^q b_i' \cdot \varepsilon(k-1, c), \quad q < N_1.$$

Через спрощену умову оптимальності та рівняння Пла-Уокера (6) $x(k)$ і $x(k-N_1)$ можуть бути взємозамінені. Тому

$$M(v(k) \cdot x_m(k)) = 0, \quad M(\varepsilon(k) \cdot v_p(k)) = 0, \quad x_m(k) \subset x(k),$$

де $v_p(k)$ - вектор чутливості, $m + p = N$.

$$y(k) + \sum_{i=1}^m a_i' \cdot y(k-1) = v(k), \quad v(k) + \sum_{i=1}^n a_i'' \cdot v(k-1) = \xi(k) + \sum_{i=1}^{N_1} b_i \cdot \xi(k-1).$$

Запропонований адаптивний алгоритм дозволяє знаходити параметри моделі, якщо звісна модель більш низького порядку - тобто, отримати сукупність моделей складного об'єкта або сигналу.

При дослідженні багатозв'язних моделей складних об'єктів виникає проблема перевірки незалежності каналів. Нехай формуючі шуми у каналах незалежні - тоді легко прийти до адитивного критерію якості та, скориставшись спрощеними умовами оптимальності, отримати сукупність алгоритмів вигляду (5). Перевагою такого алгоритму адаптації є легкість переносу методів оцінювання сигналу у однім каналі на багатоканальні виміри.

Звернемося до визначення початкових значень для абсолютно-оптимального алгоритму. Кількість вимірів, використаних для обчислення початкових значень, як правило, невелика, їх доцільно використати багаторазово, зробивши циклічний часовий ряд.

Початкове значення матриці підсилення $\Gamma(0)$ отримаємо з апріорного значення αE , ($\alpha \gg 1$, E - одинична матриця) застосуванням обраного рекурентного алгоритму до кількох 'рив. Обчислення почат-

кових значень AP- та PC-параметрів для абсолютно-оптимального алгоритму опираються на запис рівнянь Кля-Уокера (6). Для AP-параметрів зміст цих обчислень складається з вирішення системи лінійних рівнянь, як завжди. А для PC-параметрів необхідно скласти декотру симетричну матрицю та добути її квадратний корень. Нехай

$$x = \{\varepsilon(-1), \varepsilon(-N_1), \varepsilon(-N_1+1), \dots, \varepsilon(-2)\}^T, \quad K = \begin{pmatrix} b_{N_1}^a + 1 & b_1^a & \dots & b_{N_1-1}^a \\ b_1^a & b_2^a & \dots & b_{N_1}^a + 1 \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ b_{N_1-1}^a & b_{N_1}^a + 1 & \dots & b_{N_1-2}^a \end{pmatrix}.$$

$$y = \{y(-1), y(-N_1), y(-N_1+1), \dots, y(-2)\}^T,$$

Тому: $y = K \cdot x$, $M(y \cdot y^T) = \{\sigma_\xi^a\}^2 \cdot K \cdot K^T$, $\sigma_\xi^a \cdot K = [M(y \cdot y^T)]^{0.5}$.
 Нехай $b_{N_1}^a + 1 \neq 0$. Бачимо, що згідно визначення вектора чутливості справедливе відношення $-x(0) = -b_{N_1}^a \cdot v(-N_1)$, у якому завдяки вільному вибору нульової точки стаціонарного часового ряду, умови оптимальності та її спрощення можливо замінити $v(-N_1)$ на $x(-N_1)$. Тоді $M(x(0) \cdot x^T(0)) = \{b_{N_1}^a\}^2 \cdot M(x(-N_1) \cdot x^T(-N_1)) = 1$, слідує, $\{b_{N_1}^a\}^2 = 1$. Тому $b_{N_1}^a = 1$, $b_{N_1}^a + 1 = 2$, і легко знайти дисперсію та вектор параметрів.

Для визначення кількості N , N_1 та значень AP- і PC-параметрів доцільно застосувати наближення Фробеніуса відповідних матриць, залишаючи немалі сингулярні числа.

Наведені результати були застосовані для побудови аналітичної лінеаризованої моделі динаміки стенда-імітатора на базі трьохступеневого карданова підвісу при збудженні його білим шумом. Моделі демонструють працездатність запропонованих алгоритмів.

Канал крену: $y(k) - 0.91 \cdot y(k-1) = \xi(k) + 0.19 \cdot \xi(k-1)$, $\sigma_\xi^2 = 0.0734$.

Канал тангажу: $y(k) - 0.97 \cdot y(k-1) = \xi(k) + 0.49 \cdot \xi(k-1)$, $\sigma_\xi^2 = 0.0346$.

Багатозв'язна модель:

$$\begin{cases} y_1(k) - 0.94y_1(k-1) + 0.0147y_2(k-1) = \xi_1(k) + 0.540\xi_1(k-1), & \sigma_1^2 = 0.0352; \\ y_2(k) + 0.0027y_1(k-1) - 0.906y_2(k-1) = \xi_2(k) + 0.178\xi_2(k-1), & \sigma_2^2 = 0.0756, \end{cases}$$

де $y_1(k)$ - виміри у каналі тангажу, $y_2(k)$ - виміри у каналі крену. Бачимо, що взаємний вплив каналів практично відсутній, що збігається з попередніми даними, які отримані експериментальним шляхом.

Як виявилось, збільшити точність неможливо без вирішення питання

стійкості оцінювання. До цього ж висновку приводить і негативний результат застосування абсолютно-оптимального алгоритму до оцінювання частоти синусоїдального сигналу в шумі.

Третій розділ. Нехай вихід динамічного об'єкту являє собою випадковий процес $y(k) = \varepsilon(k, c)$, c - вектор параметрів; $\varepsilon(k, c)$ - функція параметрів. Представимо його рядом Тейлора-Маклорена відносно параметрів c :

$$y(k) = \varepsilon(0) + x^T c + c^T U c = \varepsilon(0) + h, \quad (7)$$

де $\varepsilon(0) = \varepsilon(k, 0)$, $x = x(k)$ - вектор вимірів, $U = -F'[\varepsilon(0)] \cdot t \cdot x x^T$.

Процес $y(k)$ охарактеризуємо функціоналом $J(y)$,

$$J(y) = J(\varepsilon(0) + h) = M\{F[\varepsilon(0)]\} + M\{F'[\varepsilon(0) + t \cdot h] \cdot h\}, \quad 0 \leq t \leq 1,$$

де $F(\cdot)$ - парна функція: $F(\varepsilon) = F(-\varepsilon)$, t - скаляр.

$M\{F[\varepsilon(0)]\}$ може бути ентропією (невизначеністю).

Потрібно відшукати такий вектор параметрів c , щоб

$$M\{F'[\varepsilon(0) + t \cdot h] \cdot h\} = 0. \quad (8)$$

$$\text{Далі, } M\{F'[\varepsilon(0) + t \cdot h] \cdot h\} = M\{F'[\varepsilon(0)] \cdot h + F''[\varepsilon(0)] \cdot t \cdot h^2 + o(t^2)\}$$

Підставимо $h = x^T c + c^T U c$, $U = -F'[\varepsilon(0)] \cdot t \cdot x x^T$.

$$M\{[F'[\varepsilon(0)] \cdot x^T + c^T \cdot t \cdot x x^T \cdot (F'[\varepsilon(0)] - F''[\varepsilon(0)])] \cdot c + o(t^2)\} = 0. \quad (9)$$

Тому, нехтуючи членами другого ступеня малості, для визначення параметрів c отримуємо систему лінійних рівнянь:

$$M\{t \cdot x x^T \cdot (F'[\varepsilon(0)] - F''[\varepsilon(0)]) \cdot c\} = -M\{F'[\varepsilon(0)] \cdot x\} \quad (10)$$

Вачимо, що права частина рівняння (10) завжди св'язується з умовою каузальності $M\{F'[\varepsilon(k, 0)] \cdot x(k)\} = 0$. Нехай нев'язка $\varepsilon(k, 0)$ є білим шумом. Тоді, для всіляких t, k та деякогого $c \neq 0$, (10) виконується, якщо: $M\{F''[\varepsilon(0)] - F''^2[\varepsilon(0)]\} = 0$, звідки $F(\varepsilon) = -\ln p(\varepsilon)$, де $p(\varepsilon)$ - щільність розподілу $\varepsilon(k, 0)$.

Далі, виділимо у (9) функцію $V(c, k) = M\{t \cdot c^T x x^T c\}$, яка при фіксованому c не зростає: $V(c, k+1) - V(c, k) \leq 0$. Більш того: $V(c, k) > 0$ при $c \neq 0$, $V(0, k) = 0$. Властивості $V(c) = V(c, k)$ дійсні при всілякому c . Тому $V(c) = M\{t \cdot c^T x x^T c\}$ не що інше як функція Ляпунова і свідчить про асимптотичну стійкість оцінювання в цілому (глобальну асимптотичну стійкість).

Рівняння (10) легко перетворити до вигляду (II) подальшого

аналізу. Нехай $\Gamma = [M(F'[\varepsilon(0)] \cdot x x^T)]^{-1}$. Тоді

$$\Gamma \cdot M\left\{F'[\varepsilon(0)]x \cdot [1 - F'[\varepsilon(0)]x^T \cdot t c]\right\} + t c = 0 \quad (II)$$

Відшукаючи адаптивне рішення для рівнянь (II), покладемо $t = \frac{1}{k}$. Тоді $\tau_k = 1 - (1/k) \cdot F'[\varepsilon(k)] \cdot x^T(k) \cdot c_{k-1}$ і τ_{k-1} є одним з факторів, що визначають перехідний процес - модель (7) асимптотично лінійна: $y(k) = \varepsilon(0) + x^T \tau_k c$.

Рівняння (II) не що інше як умова обґрунтованості по Фішеру, яка забезпечує те положення, при якому модель асимптотично приводиться до вірного рішення. Як наслідок робастності по Хампелю, метод не чутливий до великої помилки та не чутливий до малих флуктуацій у вимірах. Для (II) характерно реагування на поведінку $x(k)$ біля нуля. Наслідком робастності є свобода вибору вигляду парної $p(\varepsilon)$.

Застосування метода релаксації і метода стохастичної апроксимації для рішення (II) дає:

$$c_k = c_{k-1} + \Gamma(k) \cdot F'[\varepsilon(k)] \cdot x(k) \cdot \tau_k \quad (I2)$$

Треба сказати, що застосування (I2) може носити ітераційний характер релаксації у інтервалі часу: наприклад, якщо у $x(k)$ входять значення детермінованих функцій.

Вибір же початкового наближення може бути вільним через глобальну асимптотичну стійкість.

Методу властива висока точність. Метод дозволяє вирішити задачу знаходження положення спектральних ліній і тому може застосовуватися до аналізу вузькополосих випадкових процесів.

Четвертий розділ.

Для моделювання натурних умов на випробувальному стенді необхідно мати можливість одержання кутових коливань його платформи по тангажу, крену та ристанню з заданою матрицею спектральних щільностей, визначеної в умовах польоту для даного типу повітряних судин. Ця задача вирішується за допомогою трьохступеневого керованого карданова підвісу ККПІ. На данному стенді можуть бути проведені дослідження для гіровертикалей, авігоризонтів, гіроскопів напрямку, датчиків кутових швидкостей, інерційних курсовертикалей та інерціальних систем навігації (з автономною імітацією сигналів акселерометрів). У останньому випадку ці дослідження особливо актуальні для безплатформених інерціальних систем навігації, в яких акселерометри і датчики кутових швидкостей жорстко зв'язані з рухливим об'єктом.

Дослідний стэнд, сам по собі, як складний динамічний об'єкт, також потребує визначення точностних характеристик, оцінки стану і діагностики. Цю задачу можливо представити необхідністю оцінювання коливань незалежних каналів стэнду. Входами системи є напруги на входах блоку керування двигунами, виходами - кути крену, тангажу і курсу, знімаємих у вигляді вихідних напруг синусно-косинусних обертаючихся трансформаторів (СКОТ).

У дисертації представлені моделі спектральної щільності коливань у каналах тангажу та крену, отримані швидким перетворенням Фур'є і згладженням вікном Гудмена, а також модифікаціями оптимальних рекурентних методів. Рациональні моделі з малим розміром вектора коефіцієнтів добре узгоджуються з результатами непараметричних методів.

Для оцінки дисперсії неконтрольованого збудження виконана ідентифікація системи. Укладемо, що у $x(k)$ входять обчислювані $\xi(k)$:

$$x(k) = [-y(k-1), \dots, -y(k-N), \xi(k-1), \dots, \xi(k-N_1), u(k-1), \dots, u(k-N_2)]^T$$

$$c_k = [a_1, \dots, a_{N_1}, d_1, \dots, d_{N_1}, b_1, \dots, b_{N_2}]^T$$

Нехай досліджуваними вимірами є коливання стэнда імітації кутового руху літального апарату у каналі тангажу як формуючого фільтра з виміренням шумом $u(k)$ на вході (вибірка з 2048 точок). Представимо у таблиці декотрі моделі (у колонках) при гаусовій щільності розподілу нев'язки.

Таблиця

σ_ξ^2	1.709988E-02	8.685797E-03	8.563281E-03	8.006720E-03
a(1)	-9.657260E-01	-8.626510E-01	-9.407741E-01	-5.177920E-01
a(2)		-7.956349E-02		-4.150966E-01
a(3)				1.521161E-02
d(1)	1.146441E-02	-1.832521E-01	-2.647820E-01	4.690305E-02
d(2)		-1.028039E-02		-1.283923E-01
d(3)				-2.143612E-02
b(1)	-1.731688E-01	-2.987495E-01	-3.922522E-01	-8.406318E-02
b(2)		-1.437630E-01	-1.039771E-01	-2.799501E-01
b(3)			-1.578417E-02	-8.477957E-02

Приведені у дисертаційній роботі моделі стэнда мають ту перева-

гу, що отримані повністю формалізованим методом і можуть служити засадов для аттестації стенду, контролю та діагностики його технічного стану.

Флаттер (гнучко-крутильні коливання крила) являє собою резонансний процес з порівняно низькою частотою нульової гармоніки (тона) деформації. Регістрація його як правило утруднена через малий час та віддаленість датчиків. Тому викликає інтерес амплітуда і положення спектральної лінії флаттера при низьких відношеннях сигнал/шум.

В зв'язку з цим завданням частини дисертаційної роботи є обробка запису флаттера, отриманого у наземному експерименті на вібростенді, повторючим експлуатаційні навантаження. Очікувана частота флаттеру складає $\sim 2\text{Гц}$, а кругова безрозмірна частота $\bar{\omega} = 2\pi f \cdot \Delta t = 0.3$.

До засади оцінювання покладемо "рівняння гармонійної кривої" (4).

Введення компонент рухомого середнього прискорює розрахунок частоти при малій кількості очікуваних частот та спрощує розрахунок:

$$u(k) = a_1 \cdot u(k-1) - u(k-2) + \varepsilon(k) + b_1 \cdot \varepsilon(k-1) + \dots + b_4 \cdot \varepsilon(k-4).$$

У результаті розрахунків кругова безрозмірна частота склала 0.3024, що близько до очікуваної, дисперсія нев'язки дорівнює 0.1402 $\cdot g^2$. Амплітуда сіносоїдальної складової опинилася рівною 1.01g, де $g \approx 9.81 \text{ м/с}^2$. Коливання флаттеру у експерименті не перевищили ліміту текучості.

Третью практичною задачею, що розв'язана в дисертації, є керування положенням центру маси безпілотного літального апарата (БПЛА). Це керування здійснює автопілот за рахунок необхідних перевантажень, що вимірюються акселерометром. Застосування акселерометра та швидкісного гіроскопу в цьому контурі керування дозволяє змінювати його власну частоту коливань та демпфування (одночасно це і комплексування виміривачів). У безпілотного ЛА одноразового використання практично відсутня система віброзахисту датчиків.

Синтез закону керування легко провести алгоритмом (12).

Таким чином, потрібно знайти керувачий пристрій - регулятор - з законом керування:

$$\Delta_B(k) = u(k) + x_p^T(k) \cdot c + u(k) \cdot c^T \cdot x_p(k) \cdot x_p^T(k) \cdot c / (\sigma_u^2 \cdot k)$$

де c - вектор параметрів регулятора.

Виключення гармонійної складової опирається на тригонометричну тотожність (3).

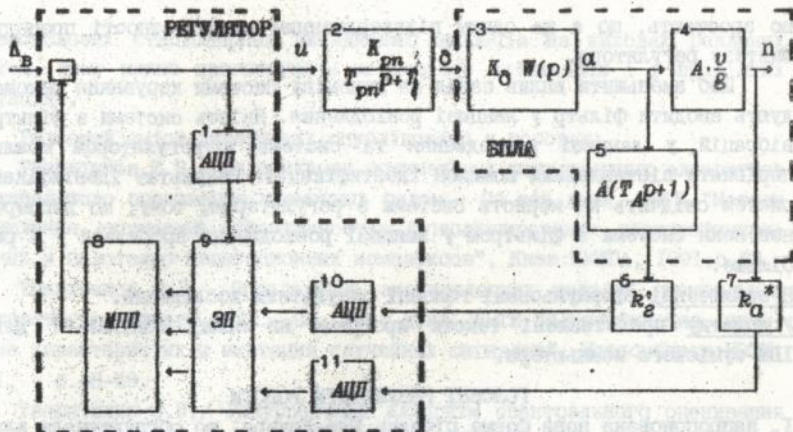


Рис. Структурна схема подовжнього каналу БІЛА з регулятором.

- 1,10,11- аналого-цифрові перетворювачі, 2- привід керма,
 3- об'єкт керування, 4,5- кінематичні ланки,
 6- швидкісний гіроскоп, 7- акселерометр,
 8- мікропроцесорний пристрій, реалізуючий алгоритми адаптації та передбачення сигналу керування, 9- запам'ятовувачий пристрій.

Дослідимо систему з регулятором при відсутності завад, щоб роздивитися вплив складових $x_p(k)$. У вектор $x_p(k)$ введемо компоненту виміру акселерометра $n_n(k)$ з врахуванням тригонометричної тотожності; компоненти виміру швидкісного гіроскопа $\dot{v}(k)$ і розходження $u(k)$:

$$x_p(k) = \left(-n_n(k) + n_n(k-2), -n_n(k-1), -\dot{v}_k, -\dot{v}_{k-1}, -\dot{v}_{k-2}, u_{k-1}, u_{k-2} \right)^T.$$

$$c = \left(c_{1n}, c_{2n}, c_{3v}, c_{4v}, c_{5v}, c_{6u}, c_{7u} \right)^T.$$

Зменшення кількості складових компонент швидкісного гіроскопу $\dot{v}(k)$ і розходження $u(k)$ у вектору вимірів $x_p(k)$ збільшує дисперсію розходження $c_1 = (0.097, -0.595, -5.645, -2.997, 10.243, 0.971, 0.594)^T$, $\sigma_u^2 = 1.601$; $c_2 = (0.283, -0.461, -19.602)^T$, $\sigma_u^2 = 3.455$.
 ження. Такий результат очікуваний і є свідомством працездатності процедури синтезу. В умовах гармонічної завади коефіцієнти автоматич-

но зростаєть, що є ще одним підтвердженням працездатності процедури синтезу регулятора.

Щоб зменшити вплив завад на динаміку системи керування рекомендують вводити фільтр у ланцюзі розходження. Якість системи з фільтром вібрацій у ланцюзі розходження та системи з регулятором можливо порівняти зіставленням помилок ідентифікації. Результат ідентифікації систем свідчить на користь системи з регулятором, тому, що дисперсія нев'язки системи з фільтром у ланцюзі розходження зробилася у 4 рази більше.

В заключенні сформульовані головні результати досліджень.

У додатку представлені тексти програм на язику FORTRAN-77 для IBM-сумісного комп'ютера.

ГОЛОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ

1. запропонована нова форма рівнянь Іла-Уокера, що обґрунтувала алгоритми обчислення початкових значень рекурентних алгоритмів і поширення абсолютно-оптимальних алгоритмів на випадки лаганої обумовленості матриці підсилення та оцінювання сукупності моделей складного динамічного об'єкта;
2. запропоновані алгоритми обчислення початкових значень для абсолютно-оптимального алгоритму, які дозволяють формалізовано одержати інформацію для лінеаризації моделей нелінійного об'єкта;
3. запропоновані модифікації абсолютно-оптимального алгоритму, що оцінюють сукупність моделей складного динамічного об'єкта в режимі нормальної роботи;
4. запропонований алгоритм оцінювання в реальному часі багатовимірних стаціонарних випадкових процесів, що буде багатозв'язні моделі і може перевірити гіпотезу незалежності каналів виміру;
5. запропонований глобально асимптотично-стійкий метод параметричного оцінювання і на його побудовані алгоритм і програма на БЕМ, що дозволяють оцінити складну суміш широкополосих та вузькополосих сигналів;
6. запропонований адаптивний метод визначення регулятора у слідкувчій системі, виходячи з передбачення сигналу керування у ланцюзі зворотнього зв'язку замкненої слідкувчої системи, що дозволило синтезувати закон керування цифрового автопілота БИЛА при відсутності віброзахисту датчиків;
7. працездатність алгоритмів перевірена оцінюванням широкополосих та

вувькополосих стаціонарних випадкових процесів на виходах реальних систем, тому можна прогнозувати можливість оцінювання і у проміжних ситуаціях.

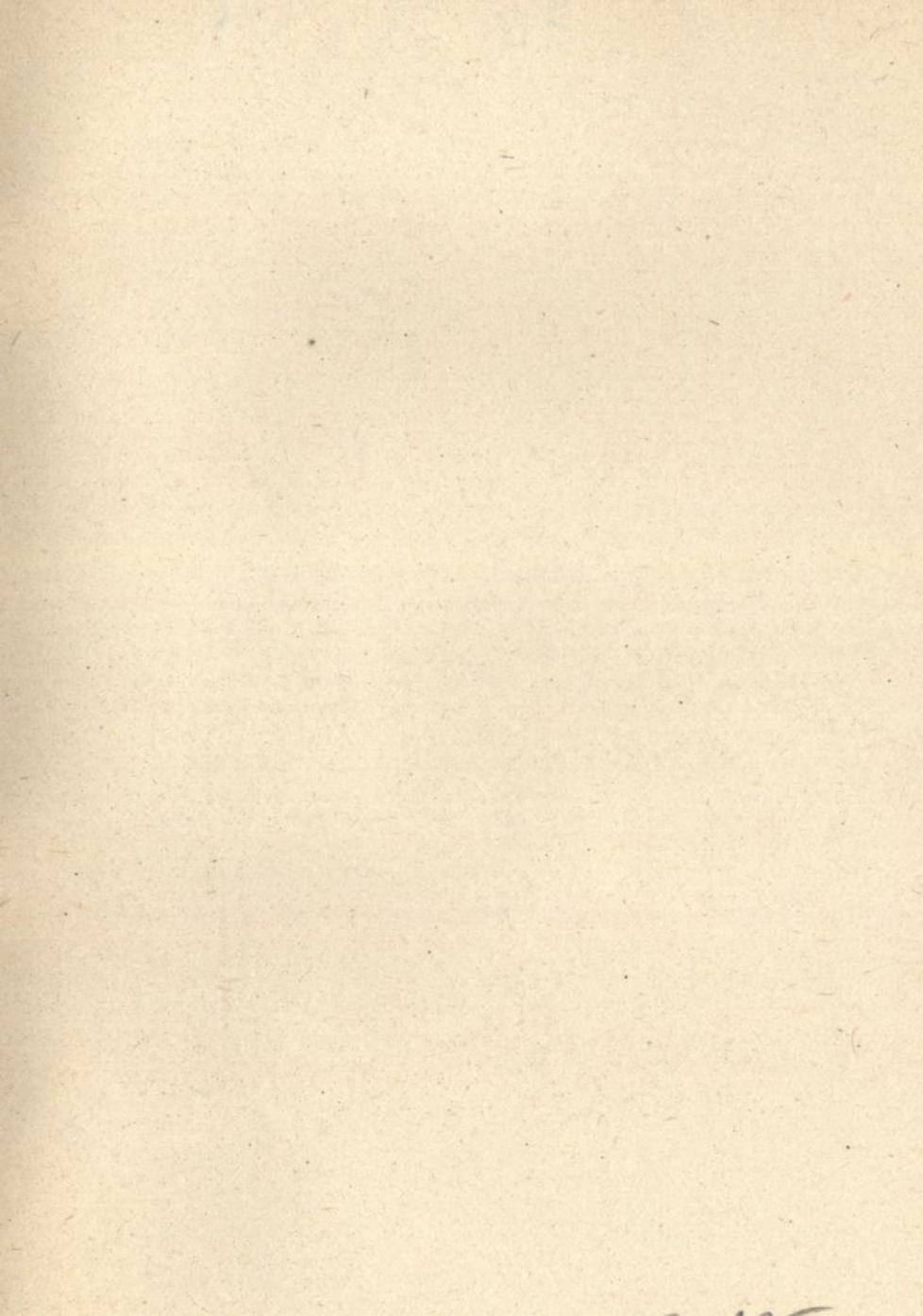
Головний зміст дисертації опубліковано у роботах:

1. Тверитинов В.В. - Модификации оптимальных рекуррентных алгоритмов спектрального оценивания временных рядов. - Сб. тез. докл. ВНТК "Методы управления системой эффективностью функционирования электрофицированных и пилотажно-навигационных комплексов", Киев:КИИГА, 1991, с.63.
2. Тверитинов В.В. - Определение аналитических моделей спектральной плотности временного ряда. - Сб. тез. докл. ВНТК "Идентификация, измерение характеристик и имитация случайных сигналов", Новосибирск:НЭТИ, 1991, - с.48-49.
3. Тверитинов В.В. / Рекуррентный алгоритм спектрального оценивания с блочной матрицей усиления. // Сборник статей XXXII военно-научной конференции училища, ч. III, Киев:изд.КВВАМУ, 1991, - с.77-82.
4. Тверитинов В.В. - Спектральное оценивание короткой выборки в реальном времени. - Сб. тез. докл. МНТК "Статистические методы в теории передачи и преобразования информационных сигналов", Киев:КИИГА, 1992, -с.72-73.
5. Тверитинов В.В., Туник А.А. / Аддитивный рекуррентный алгоритм многоканального спектрального оценивания. // Сборник статей XXXII военно-научной конференции училища, ч. III, Киев:КВВАМУ, 1991, -с.71-77.
6. Тверитинов В.В., Туник А.А. / Последовательный рекуррентный алгоритм спектрального оценивания временных рядов. // Кибернетика и вычислительная техника, 1992, вып.93, - с.46-51.
7. Туник А.А., Тверитинов В.В., Белен В.В. / Оптимальное спектральное оценивание временных рядов. // Кибернетика и вычислительная техника, 1991, вып.89, - с.15-19.



Підписано до друку 16.06.94. Формат 60x84/16. Папір друкарський.
Офсетний друк. Ум. фарбовідб. 5. Ум. друк. арк. 0,93. Обл.-вид. арк. 1,0.
Тираж 100 прим. Замовлення № 127-1. Ціна Вид. № 222/III.

Видавництво КМУЦА.
252058. Київ-58, проспект Космонавта Комарова, 1.



AB 30.504