

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ УКРАЇНИ  
ХАРКІВСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ТЕХНІЧНИЙ  
УНІВЕРСИТЕТ РАДІОЕЛЕКТРОНІКИ

ПАНАСЕНКО ЮРІЙ ОЛЕКСІЙОВИЧ

УДК 681.5.015:519.6

АЛГОРИТМИ ОПЕРАТИВНОЇ ІДЕНТИФІКАЦІЇ  
ЛІНІЙНИХ ОБ'ЄКТІВ ПРИ КОРЕЛЬОВАНИХ ЗАВАДАХ

05.13.03- Системи і процеси керування

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня  
кандидата технічних наук

*Ю.П.Панасенко*

Харків 1997

881.5



Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Харківському державному технічному університеті радіоелектроніки.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор  
Руденко Олег Григорович,  
Харківський державний технічний університет  
радіоелектроніки, зав. кафедрою ЕОМ.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор  
Бодяньський Євген Володимирович,  
Харківський державний технічний університет  
радіоелектроніки, професор кафедри технічної  
кібернетики;

доктор технічних наук, професор  
Любчик Леонід Михайлович,  
Харківський державний політехнічний  
університет, професор кафедри системного  
аналізу та управління

Провідна установа: Національний технічний університет "КПІ"  
Міносвіти України, м.Київ.

Захист відбудеться "29" апреля 1998р. о 14 годині на  
засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.02 при Харківському державному  
технічному університеті радіоелектроніки за адресою: 310726, м. Харків, пр.  
Леніна, 14, fax (0572) 40-91-13.

З дисертацією можна ознайомитися в бібліотеці університету.

Автореферат розісланий 27 марта 1998р.

Вчений секретар  
спеціалізованої вченої ради

Безкорвайний В.В.

## ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Досягнення сучасної обчислювальної техніки та широке впровадження ЕОМ в системи контролю та керування відкривають нові можливості для керування складними процесами в реальному масштабі часу. Разом з тим постають принципові питання створення методів ідентифікації, які в умовах недостатньої апіорної інформації про об'єкт та завади дозволяють відновлювати модель об'єкта, використовуючи надходячу інформацію. Реальним об'єктам притаманні такі особливості, як наявність у вимірах завод та нестационарність характеристик об'єкта, що приводить до неадекватності вибраної моделі на усьому інтервалі керування і, як наслідок, до погіршення якості керування.

В сучасних системах контролю та керування часто виникає необхідність оперативної ідентифікації з метою адаптації системи до умов функціонування, що змінюються. Алгоритми традиційних математичних методів обробки, як правило, передбачають накопичення та сумісну обробку всієї інформації, яка міститься в виборці вимірювань.

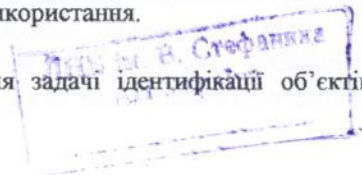
При реалізації оперативної ідентифікації доводиться в першу чергу враховувати вимоги до алгоритмів ідентифікації, ресурсів швидкодії та пам'яті ЕОМ, яка здійснює обробку інформації. В цих умовах вельми зручними з точки зору оперативності обробки є рекурентні алгоритми ідентифікації.

Найчастіше при побудові та дослідженні алгоритмів ідентифікації вважають, що присутні завади не корельовані. Саме при такому припущенні доведено оптимальні властивості оцінки методу найменших квадратів - МНК-оцінки, що найбільш широко використовуються. Наява корельованих завод приводить до того, що процедура оцінювання значно ускладнюється (тому часто корельованість не враховують, тобто одержують явно не оптимальні результати). Так, використання моделей, які одержані за допомогою звичайного МНК без врахування корельованості завод, значно знижує ефективність прогнозування та керування на підставі цих моделей. Зростаюча потреба у підвищенні якості управління визначає актуальність розробки нових методів ідентифікації та досліджень ефективності їх застосування.

Метою роботи є розробка рекурентних алгоритмів оперативної ідентифікації лінійних об'єктів керування при наявності корельованих завод в умовах браку апіорної інформації про об'єкт, дослідження їх властивостей та виявлення областей їх найбільш ефективного використання.

### Задачі дослідження:

-аналіз існуючих підходів до вирішення задачі ідентифікації об'єктів керування при наявності корельованих завод;



-аналіз та синтез рекурентних алгоритмів ідентифікації, що засновані на мінімізації квадратичного функціоналу, в умовах корельованих завод;

-розробка алгоритмів оцінювання нестационарних параметрів об'єктів при наявності корельованих завод;

-розробка рекурентних алгоритмів оцінювання параметрів завод, що використовуються в процедурах оперативної ідентифікації;

-програмна реалізація алгоритмів оперативної ідентифікації та моделювання їх роботи на ЕОМ;

-вироблення рекомендацій по практичному застосуванню алгоритмів.

Методи дослідження. Проведені в роботі дослідження засновані на комплексному застосуванні методів ідентифікації, математичної статистики, теорії керування, лінійного регресійного аналізу, лінійної алгебри та теорії матриць. Працездатність синтезованих алгоритмів підтверджується результатами імітаційного моделювання на ЕОМ.

На захист виносяться:

-обґрунтування вибору методів оцінювання при наявності корельованих завод;

-модифіковані алгоритми методу мінімуму середньоквадратичної похибки (ММСКП), що забезпечують одержання слушних оцінок при наявності корельованих завод;

-модифікації алгоритмів МНК для оцінювання нестационарних параметрів в умовах дії корельованих завод;

-рекурентні алгоритми оцінювання параметрів завод;

-програмна реалізація результатів досліджень.

Наукова новизна дисертаційної роботи полягає в тому, що:

-розроблено алгоритми ММСКП, що забезпечують одержання слушних оцінок при корельованих заводах;

-проведено дослідження властивостей запропонованих модифікацій МСКП для випадку стаціонарної корельованої заводи;

-запропоновано модифікацію рекурентного МНК для оцінювання нестационарних параметрів при наявності корельованих завод;

-розроблено алгоритми оцінювання дисперсії та кореляційної функції завод;

-проведено аналіз обчислювальної стійкості алгоритмів;

-запропоновано методику проведення чисельних досліджень працездатності розроблених алгоритмів оперативної ідентифікації.

Практична цінність роботи полягає в тому, що в результаті проведених досліджень, по-перше, розроблено нові перспективні алгоритми оперативної ідентифікації стаціонарних та нестационарних параметрів об'єктів при наявності

корельованих завод та запропоновано рекурентні алгоритми оцінювання параметрів завод, що мають важливе значення в системах оперативної обробки сигналів, а по-друге, з застосуванням синтезованих алгоритмів вирішено деякі практично важливі задачі.

Реалізація результатів роботи. Робота виконана в рамках держбюджетних та госпдоговірних тем, що виконувались в Харківському державному технічному університеті радіоелектроніки. Наукові положення, висновки та рекомендації, викладені в дисертації, були використані при підготовці курсів "Моделювання систем", "Цифрова обробка інформації" на кафедрі ЕОМ Харківського державного технічного університету радіоелектроніки. Синтезовані і досліджені в дисертації алгоритми були використані під час виконання робіт №97-21-1 "Принципи побудови, структура та методи управління розподіленими об'єктами", №94-33 "Розробка принципів побудови, структури та методів цифрового моделювання процесів системи: інтелектуальна САУ- складний динамічний об'єкт" та в рамках держбюджетної теми "Розробити нові принципи адаптивної ідентифікації багатовимірними технологічними комплексами в умовах дії кольорових завод".

Розроблені та досліджені в дисертації алгоритми були використані для побудови математичних моделей систем водозабезпечення у ТВО Харківкомунпромвод.

Апробація роботи. Основні результати роботи доповідались та обговорювались на конференціях: Міжнародній науково-практичній конференції "Проблеми та перспективи ресурсів збереження у житлово-комунальному господарстві" (Харків 1995), III-й та IV-й Українських конференціях з автоматичного керування "Автоматика-96" (Севастополь, 1996) і "Автоматика-97" (Черкаси, 1997), 1-й, 2-й та 3-й Міжнародних конференціях "Теорія та техніка передачі, прийому та обробки інформації" (Туапсе, 1995, 1996, 1997), 1-му Міжнародному молодіжному форумі "Електроніка і молодь у XXI столітті" (Харків, 1997).

Публікації. Основні положення дисертаційної роботи опубліковано в 13 друкованих роботах.

Структура і обсяг роботи. Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновку, переліку посилань з 78 найменувань, додатку, вміщує 19 рисунків, 1 таблицю. Загальний обсяг дисертації 181 сторінка.

## ЗМІСТ РОБОТИ

У вступі обґрунтовано актуальність проблеми, яка розглядається в роботі, показано загальну структуру дисертації та приведено короткий зміст кожного розділу.

У першому розділі розглянуто загальні особливості функціонування та оперативної ідентифікації нестационарних об'єктів керування в умовах неповної апіорної інформації та проведено аналіз впливу корельованості завад на властивості оцінок параметрів об'єктів. Проведено аналіз існуючих методів параметричної ідентифікації при наявності корельованих завад. Розглянуто методи, що базуються на МНК та стохастичній апроксимації (СА). Здійснено постановку задачі дослідження, обґрунтовано вибір критерію та методів синтезу.

Другий розділ присвячено розробці рекурентних алгоритмів ідентифікації стаціонарних параметрів, що базуються на ММСКП при наявності корельованих завад.

Прийнято, що модель досліджуваного об'єкту має вигляд

$$Y_n = X_n c^* + \Xi_n, \quad (1)$$

де  $Y_n = (y_1, y_2, \dots, y_n)^T$  -  $(n \times 1)$ -вектор вихідних сигналів;

$X_n^T = (x_1, x_2, \dots, x_n)$  -  $(N \times n)$ - матриця вхідних сигналів;

$c^* = (c_1^*, c_2^*, \dots, c_N^*)^T$  -  $(N \times 1)$ - вектор параметрів моделі;

$\Xi_n = (\xi_1, \xi_2, \dots, \xi_n)^T$  -  $(n \times 1)$ -вектор корельованих завад;

$n=0, 1, 2, \dots$  - дискретний час.

Для одержання рекурентної форми оцінки ММСКП

$$c_n = X_n (X_n^T X_n + D_n)^{-1} Y_n, \quad (2)$$

де  $D_n = M\{\Xi_n \Xi_n^T\}$  -  $(n \times n)$ -коваріаційна матриця завад, яка в загальному випадку має вигляд

$$D_n = \begin{pmatrix} d_{n,n} & d_{n,n-1} & \dots & d_{n,1} \\ d_{n-1,n} & d_{n-1,n-1} & \dots & d_{n-1,1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ d_{1,n} & d_{1,n-1} & \dots & d_{1,1} \end{pmatrix}, \quad (3)$$

де  $d_{i,j} = M\{\xi_i \xi_j\}$ ,  $i, j = n, n-1, \dots, 1$ ;

$M\{\}$  - символ математичного сподівання,

використовуються лема про обернення матриць та блочна структура матриць

$$X_n^T = (X_{n-1}^T; x_n), \quad D_n = \begin{pmatrix} d_{n,n} & d_{n-1}^T \\ d_{n-1} & D_{n-1} \end{pmatrix}, \quad d_{n-1} = (d_{n,n-1}, \dots, d_{n,1})^T,$$

і вектора  $Y_n = (Y_{n-1}^T; y_n)^T$ ,  $Y_{n-1}$  -  $((n-1) \times 1)$ -вектор.

Якщо матриця  $D_n$  невинроджена та відома, рекурентна форма оцінки (2) записується таким чином:

$$c_n = c_{n-1} + \frac{P_{n-1} x_n^*}{1 + x_n^{*T} P_{n-1} x_n^*} (y_n^* - x_n^{*T} P_{n-1} \tilde{c}_{n-1}); \quad (4)$$

$$P_n = P_{n-1} - \frac{P_{n-1} x_n^* x_n^{*T} P_{n-1}}{1 + x_n^{*T} P_{n-1} x_n^*}; \quad (5)$$

$$\text{де } \tilde{c}_n = \tilde{c}_{n-1} + x_n^* y_n^*; \quad (6)$$

$$x_n^* = (x_n - X_{n-1} D_{n-1}^{-1} d_{n-1}) \alpha_n^{-0.5}; \quad (7)$$

$$y_n^* = (y_n - d_{n-1}^T D_{n-1}^{-1} Y_{n-1}) \alpha_n^{-0.5}; \quad (8)$$

$$d = d_{n,n} - d_{n-1}^T D_{n-1}^{-1} d_{n-1}. \quad (9)$$

Алгоритм (4)-(9) справедливий для будь-якої довільно заданої коваріаційної матриці  $D_n$ . Однак, така загальність алгоритму потребує певних обчислювальних витрат, пов'язаних, наприклад, з необхідністю запам'ятовувати всі масиви спостережень вхідних та вихідних сигналів. Ці обчислювальні витрати можуть бути значно зменшені, якщо завади  $\xi_n$  є стаціонарними. Крім того, стаціонарність завад дозволяє наочно інтерпретувати одержані результати, що пов'язані з перетворенням вхідних та вихідних сигналів.

Показано, що у випадку, коли корельовані завади є стаціонарними, обчислення оцінок ММСКП (4)-(9) значно спрощується. Так, змінна  $Y_n^*$ , що використовується в алгоритмі, не потребує обчислення оберненої матриці, а може бути розрахована рекурентно згідно з формулами, які одержано в роботі. Показано також, що центрована складова перетвореного процесу  $Y_n^*$ , що визначається виразом (8), являє собою дискретний білий шум, тобто використання в алгоритмі співвідношення (8) відповідає перетворенню

випадкового вектора з корельованими складовими у випадковий вектор з некорельованими складовими.

Запропоновано рекурентну форму алгоритму ММСКП, яка базується на безпосередньому обертанні матриці  $K_n = X_n^T X_n + D_n$  і має вигляд

$$c_n = c_{n-1} + \left( \hat{y}_n^* - \alpha_n^{-0.5} c_{n-1}^T x_n \right) \hat{x}_n^*; \quad (10)$$

$$Q_n = Q_{n-1} - \hat{x}_n^* \hat{x}_n^{*T}; \quad (11)$$

$$\hat{x}_n^* = (Q_{n-1} x_n - X_{n-1} K_{n-1}^{-1} d_{n-1}) \alpha_n^{-0.5}; \quad (12)$$

$$\hat{y}_n^* = \left( y_n - d_{n-1}^T K_{n-1}^{-1} Y_{n-1} \right) \alpha_n^{-0.5}; \quad (13)$$

де  $\alpha_n = \|x_n\|^2 + d_{n,n} - \tilde{x}_n^T K_{n-1}^{-1} \tilde{x}_n$ , (14)

$$\tilde{x}_n = X_{n-1}^T x_n + d_{n-1}. \quad (15)$$

Слід відзначити, що алгоритм (10)-(15) є узагальненням відомих проєкційних алгоритмів на випадок наявності корельованих завод.

Якщо заводи не корельовані, коваріаційна матриця має вигляд  $D_n = \sigma^2 I$ , де  $\sigma^2$  - дисперсія завод,  $I$  -  $(n \times n)$ -одична матриця. Це дозволяє значно спростити алгоритм ідентифікації. Для цього випадку запропоновано два алгоритми, які різняться між собою вимірністю матриць спостережень.

Якщо замість векторів  $x_n, x_{n-1}, \dots, x_1$  вимірності  $N \times 1$  розглянути розширені вектори  $\tilde{x}_n, \tilde{x}_{n-1}, \dots, \tilde{x}_1$  вимірності  $(N+n) \times 1$ , що мають такий вигляд  $\tilde{x}_n^T = (x_n^T, \sigma, 0, \dots, 0)$ ,  $\tilde{x}_{n-1}^T = (x_{n-1}^T, 0, \sigma, \dots, 0)$ , ...,  $\tilde{x}_1^T = (x_1^T, 0, 0, \dots, \sigma)$ , тобто кожний вхідний вектор доповнюється  $(n-1)$  нульовими компонентами та однією ненульовою, то можна одержати рекурентний алгоритм, який має багато спільного з регуляризованим алгоритмом

$$c_n = c_{n-1} + \frac{1}{\alpha_n} (x_n - M_{n-1} \tilde{x}_n) (y_n - \tilde{c}_{n-1}^T \tilde{x}_n), \quad (16)$$

$$\tilde{c}_n = \tilde{c}_{n-1} + \frac{1}{\alpha_n} R_{n-1} \tilde{x}_n (y_n - \tilde{c}_{n-1}^T \tilde{x}_n), \quad (17)$$

$$M_n = M_{n-1} + \frac{1}{\alpha_n} (x_n - M_{n-1} \tilde{x}_n) \tilde{x}_n^T R_{n-1}, \quad (18)$$

$$R_n = R_{n-1} - \frac{1}{\alpha_n} R_{n-1} \tilde{x}_n \tilde{x}_n^T R_{n-1}, \quad (19)$$

$$\alpha_n = \tilde{x}_n^T R_{n-1} \tilde{x}_n, \quad R_0 = I. \quad (20)$$

Коли завади відсутні ( $D_n = 0$ ), алгоритм (16)-(20), як і алгоритм (10)-(15), вироджується у відомий проєкційний алгоритм. Коефіцієнти  $\alpha_n$ , які використовуються в цих алгоритмах, являють собою співвідношення визначника Грама на останніх кроках ідентифікації і при надходженні нових векторів спостережень, лінійно залежних від попередніх, дорівнюють нулю. Отже, залежно від розрядності ЕОМ, ми будемо одержувати різні псевдообернені матриці, які, однак, з точки зору псевдообернення по Муру-Пенроузу, будуть близькими і відображатимуть "різноточність" ітераційного процесу ідентифікації. При цьому слід звертати увагу на те, щоб точність вхідних даних та точність обчислення оберненої матриці були узгоджені. Розглянуто різні критерії перевірки результатів, за допомогою яких для поганообумовлених та вироджених матриць можна визначити момент "зриву" обчислювального процесу і одержувати розв'язок, який відповідає даній точності обчислень.

При наявності завод параметр  $\alpha_n$ , як видно з формул (14), (20), відрізняється від такого ж параметра, що входить в проєкційні алгоритми, додатковим членом, величина якого залежить від статистичних властивостей завод (при некорельованих заводах - від дисперсії, тобто в алгоритмі (16)-(20) величина дисперсії заводи грає регулярируючу роль).

Таким чином, навіть при відсутності завод доцільно використовувати алгоритм з деяким додатковим  $\sigma$ , що дозволяє отримувати більш стійкі оцінки за рахунок зміни величини обумовленості матриці  $X_n^T X_n$ . Проведено моделювання роботи алгоритмів для різної обумовленості матриці спостережень.

При використанні в задачах ідентифікації мікропроцесорів з малою розрядністю центрування та нормування вхідних та вихідних змінних забезпечує їх зміну в інтервалі  $\pm 1$ , що зводить до переповнення при обчисленні

чисел, обернених до даних, наприклад, при обчисленні  $\alpha_n^{-1}$ . Для запобігання переповненню при множенні використовується апроксимація  $\alpha_n^{-1}$ .

В третьому розділі вирішується задача синтезу рекурентних алгоритмів оперативної ідентифікації нестационарних об'єктів при корельованих завадах.

У зв'язку з тим, що ефективність застосування того чи іншого алгоритму для оцінки параметрів, що дрейфують, суттєво залежить від апіорної інформації про характер дрейфу, розглянуто адаптивні алгоритми ідентифікації нестационарних параметрів для випадків відомого та невідомого законів їх зміни.

Якщо дрейф параметрів відомий, або його можна параметризувати, задача оцінювання нестационарних параметрів значно спрощується, однак алгоритми цього класу дуже критичні до порушення вихідних передумов щодо законів зміни параметрів і помилки в завданні цього закону можуть привести до втрати властивостей збіжності алгоритмів.

Алгоритми другого класу не використовують інформацію про дрейф параметрів, усуваючи можливість помилок в завданні закону зміни параметрів. Платою за незнання характеру нестационарності є зростання часу оцінювання. Розглянуто відомі алгоритми оцінювання, що являють собою рекурентні модифікації МНК, в яких новим вимірюванням надаються більші значення у порівнянні з тими, що були одержані раніше. Використання ідеї експоненційного зважування інформації дозволило одержати наступний алгоритм ідентифікації нестационарних об'єктів:

$$c_n = c_{n-1} + P_n(\lambda) \left[ \tilde{x}_n^* (y_n - c_{n-1}^T x_n) - \tilde{x}_n^{**} (y_n^* - c_{n-1}^T d_{n-1}^*) \right], \quad (21)$$

$$P_n(\lambda) = S_n(\lambda) + \frac{S_n(\lambda) \tilde{x}_n^{**} d_{n-1}^{*T} S_n(\lambda)}{1 - d_{n-1}^{*T} S_n(\lambda) \tilde{x}_n^{**}}, \quad (22)$$

$$S_n(\lambda) = \frac{1}{\lambda} \left[ P_{n-1}(\lambda) - \frac{P_{n-1}(\lambda) \tilde{x}_n^* x_n^T P_{n-1}(\lambda)}{\lambda + x_n^T P_{n-1}(\lambda) \tilde{x}_n^*} \right], \quad (23)$$

$$\text{де } \tilde{x}_n^* = (x_n - X_{n-1}^T D_{n-1}^{-1}(\lambda) d_{n-1}) \alpha_n(\lambda)^{-1}; \quad (24)$$

$$\tilde{x}_n^{**} = (x_n - \lambda X_{n-1}^T D_{n-1}^{-1}(\lambda) d_{n-1}) \alpha_n^{-1}(\lambda); \quad (25)$$

$$\tilde{Y}_n^* = d_{n-1}^T D_{n-1}^{-1}(\lambda) Y_{n-1}; \quad (26)$$

$$d_{n-1}^* = X_{n-1}^T D_{n-1}^{-1}(\lambda) d_{n-1}; \quad (27)$$

$$D_{n-1}^{-1}(\lambda) = \begin{pmatrix} \lambda \left( D_{n-1}^{-1}(\lambda) + \frac{D_{n-1}^{-1}(\lambda) d_{n-1} d_{n-1}^T D_{n-1}^{-1}(\lambda)}{\alpha_n(\lambda)} \right) & - \frac{D_{n-1}^{-1}(\lambda) d_{n-1}}{\alpha_n(\lambda)} \\ - \frac{d_{n-1}^T D_{n-1}^{-1}(\lambda)}{\alpha_n(\lambda)} & \frac{1}{\alpha_n(\lambda)} \end{pmatrix}; \quad (28)$$

$$\alpha_n = d_{n,n} - d_{n-1}^T D_{n-1}^{-1}(\lambda) d_{n-1}; \quad (29)$$

$$P_0 = \beta I, \quad S_0 = \gamma I, \quad \beta, \gamma \gg 0,$$

де  $\lambda$  - ваговий множник,  $\lambda \in (0,1]$ .

Якщо завади  $\xi_n$  стаціонарні, то замість матриці  $D_n(\lambda)$  можна використовувати нормовану коваріаційну матрицю  $R_n(\lambda)$ , яка відрізняється від  $D_n(\lambda)$  скалярним множником. Врахування властивості стаціонарності завади дозволяє спростити процедуру обчислення перетворюваних вхідних та вихідних сигналів, які використовуються в алгоритмі ідентифікації (21)- (29). Одержано відповідні рекурентні алгоритми і показано, що і в цьому випадку використання співвідношення (26) аналогічне перетворенню випадкового вектора з корельованими складовими у випадковий вектор з некорельованими складовими.

Четвертий розділ присвячено оцінюванню параметрів завод. У зв'язку з тим, що на практиці статистичні властивості завод часто невідомі, важко робити висновки про якість оцінок параметрів досліджуваного об'єкта. Тому виникає задача оцінювання характеристик завод, які, з одного боку, дозволяють проаналізувати властивості оцінок параметрів об'єкта, а з другого- можуть використовуватися при побудові рекурентних алгоритмів ідентифікації.

Розглянуто різні критерії, які дозволяють встановити наяву автокореляції завод (співвідношення фон Неймана, статистика Дарбина-Уотсона, метод Тейла та інші). У випадку, коли автокореляція завод відсутня, вирішується задача оцінювання дисперсії завод.

Так наприклад, коли для ідентифікації параметрів об'єкту використовується РМНК, рекурентна оцінка дисперсії завод обчислюється так

$$\hat{\sigma}_{\xi,n}^2 = \hat{\sigma}_{\xi,n-1}^2 + \frac{1}{n-N} \left[ \frac{(y_n - c_{n-1}^T x_n)^2}{1 + x_n^T P_{n-1} x_n} - \hat{\sigma}_{\xi,n-1}^2 \right]. \quad (30)$$

Якщо ж автокореляція завод має місце, то здійснюється оцінювання їх кореляційної матриці. Задача оцінювання і сама процедура одержання оцінок залежать від припущень відносно заводи, тобто від прийнятої моделі заводи. Розглянуто дві моделі завод:

$$\xi_n = U_n - \lambda U_{n-1}, \quad 0 < \lambda < 1, \quad U \sim N(0, \sigma_n^2); \quad (31)$$

$$\xi_n = \rho \xi_{n-1} + V_n, \quad |\rho| < 1, \quad V \sim N(0, \sigma_n^2). \quad (32)$$

Перша модель дозволяє одержати простий вид матриці  $D_n$  (3) і звести задачу оцінювання параметрів заводи до оцінки коефіцієнта  $\lambda$ . Однак процедура пошуку  $\lambda$  вимагає громіздких обчислень, які виправдовують себе лише тоді, коли прийнята модель адекватно описує реальну заводу.

Задача оцінювання параметрів заводи значно полегшується, якщо завода задовольняє авторегресійній схемі першого порядку, тобто може бути описана моделлю (32). Приведені різні алгоритми оцінювання коефіцієнта  $\rho$ , в основі яких лежить МНК. Запропоновано алгоритм оцінки матриці  $D_n$  (3), блоки якої обчислюються за формулами

$$\begin{aligned} \hat{D}_{n-1} = E_{n-1}^2 - \frac{E_{n-1} x_n^T P_{n-1} X_{n-1}^T + X_{n-1}^T P_{n-1} x_n E_{n-1}}{1 + x_n^T P_{n-1} x_n} (y_n - c_{n-1}^T x_n) + \\ + \frac{x_{n-1} P_{n-1} x_n x_n^T P_{n-1} x_{n-1}}{(1 + x_n^T P_{n-1} x_n)^2} (y_n - c_{n-1}^T x_n)^2; \end{aligned} \quad (33)$$

$$\hat{d}_{n,n} = \frac{(y_n - c_{n-1}^T x_n)^2}{(1 + x_n^T P_{n-1} x_n)^2}; \quad (34)$$

$$\hat{d}_{n-1} = \frac{y_n - c_{n-1}^T x_n}{1 + x_n^T P_{n-1} x_n} \left[ E_{n-1} - X_{n-1}^T P_{n-1} x_n (y_n - c_{n-1}^T x_n) \right], \quad (35)$$

де  $E_{n-1} = Y_{n-1} - X_{n-1}c_{n-1}$  - відхилення.

Слід відзначити, що алгоритми оцінювання параметрів завад являють собою процедури другого рівня дворівневої схеми ідентифікації, де на першому рівні обчислюється вектор оцінок параметрів об'єкту з застосуванням відомих алгоритмів, а на другому - характеристики завад, які використовуються далі для уточнення оцінок параметрів об'єкту. Таким чином, запропонований алгоритм складається з наступних етапів:

1. Оцінюються коефіцієнти регресії (1) за допомогою звичайного МНК.
2. Обчислюються відхилення  $E_n = Y_n$
3. Згідно з формулами (33), (35) оцінюються елементи матриці  $D_n$ .
4. Одержані оцінки (33)- (35) використовуються в (4)- (9) для уточнення коефіцієнтів моделі.

П'ятий розділ присвячено експериментальним дослідженням синтезованих алгоритмів оперативної ідентифікації. З цією метою розроблено комплекс програм моделювання, який являє собою складову частину програмного забезпечення АРМ "Ідентифікація".

Описано сценарій роботи АРМ "Ідентифікація", який дозволяє:

а). Формувати "портфель задач", тобто реалізувати розроблені модулі (формування вихідних даних, вибору закону зміни параметрів моделі, статистичних розподілів, кореляції, статистичної обробки результатів обчислень, сервісний, модулі з бібліотеки стандартних програм математичного забезпечення та інші) і вимоги до точності обчислень.

б). Вибирати конкретний алгоритм ідентифікації.

в). Переглядати та виводити (наприклад, на екран, принтер або в файл) результати.

На початку роботи на екрані з'являється вікно з написами: "Модель", "Завада", "Алгоритм", "Ключі", "Режим". Описано опції меню та правила користування.

Проведена чисельна реалізація розроблених алгоритмів. Описана їх алгоритмічна форма, яка придатна до реалізації машинною програмою. Приведено результати моделювання у вигляді графіків. Проведено порівняльний аналіз з традиційними алгоритмами, надано рекомендації по практичному використанню запропонованих алгоритмів. Результати моделювання підтвердили працездатність розроблених алгоритмів.

## ОСНОВНІ РЕЗУЛЬТАТИ ТА ВИСНОВКИ

1. Вивчено вплив корельованості завад на властивості оцінок параметрів. Показано, що при наявності цієї корельованості одержувані оцінки будуть незміщеними, але дисперсія їх зростає. Використання для ідентифікації МНК дає занижену оцінку вибіркової дисперсії.

2. Розглянуто існуючі алгоритми оцінювання при наявності корельованих завад, що базуються на МНК та стохастичній апроксимації. Алгоритми, засновані на МНК, потребують точного задання коваріаційної матриці завад, а використання в них вагової матриці, що відрізняється від справжньої, приводить до оцінок, які мають більшу коваріацію. Відзначено незручність використання таких алгоритмів та обгрунтовано перехід до рекурентних процедур, найпростішою з яких є СА. Приведено процедуру, яка крім алгоритму оцінки шуканого коефіцієнта, включає правила настроювання параметрів алгоритму.

3. Розроблено рекурентні алгоритми ММСКП при наявності корельованих завад для довільної матриці коваріації. Однак така загальність не дозволяє інтерпретувати одержані результати, що пов'язані з відповідними перетвореннями вхідних та вихідних сигналів, які приводять до лінійних комбінацій заданих сигналів. В зв'язку з цим досить докладно вивчаються властивості алгоритму для такого практично важливого випадку, як стаціонарність корельованих завад. Показано, що в цьому випадку використання в алгоритмі виведених співвідношень відповідає перетворенню випадкового вектора з корельованими складовими у випадковий вектор з некорельованими складовими.

4. Одержано рекурентну форму ММСКП, яка безпосередньо використовує обернення матриці спостережень, для матриці коваріації завад довільного вигляду. Показано, що відповідний алгоритм являє собою узагальнення відомого багатокрокового проєкційного алгоритму. Побудовано зручні в обчислювальному відношенні рекурентні алгоритми оперативної ідентифікації, подібні до регуляризованих. Показано доцільність використання цих алгоритмів навіть у випадку відсутності завад вимірювань з метою підвищення обчислювальної стійкості процесу ідентифікації.

5. Розглянуто алгоритми ідентифікації нестационарних параметрів при відомому та невідомому законах їх дрейфу. Алгоритми першого типу більш ефективні, тому що використовують всю інформацію про дрейф, однак вони

дуже критичні до порушень вихідних передумов щодо законів дрейфу, і помилки в завданні цих законів можуть привести до втрати властивостей збіжності алгоритмів. Запропоновано модифікацію МНК, яка поєднує оцінку Гауса-Маркова з експоненціальним зважуванням інформації. Одержано співвідношення, які являють собою рекурентну форму запропонованої оцінки. Вивчено властивості цієї оцінки для випадку стаціонарності корельованих завад.

6. Досліджено питання оцінювання статистичних характеристик завади, що включають перевірку існування її автокореляції, оцінювання дисперсії та коваріаційної матриці. Запропоновано зручні рекурентні алгоритми оцінювання характеристик завади, які разом з алгоритмами ідентифікації являють собою замкнуту процедуру ідентифікації лінійних об'єктів при корельованих та некорельованих завадах.

7. Розроблено комплекс програм, який увійшов складовою частиною до програмного забезпечення АРМ "Ідентифікація" і реалізує запропоновані в роботі методи та алгоритми. Проведено моделювання роботи алгоритмів на ЕОМ, результати якого повністю підтверджують працездатність розроблених алгоритмів. Проведено порівняльний аналіз запропонованих алгоритмів з традиційними.

8. Надано практичні рекомендації щодо раціонального вибору параметрів алгоритмів і показано, що з точки зору чисельної стійкості процесу ідентифікації доцільно використовувати регуляризовані модифікації запропонованих алгоритмів.

## ПУБЛІКАЦІЇ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Аксак Н.Г., Панасенко Ю.А., Руденко О.Г. Идентификация нестационарных параметров при коррелированных помехах с помощью рекуррентного метода наименьших квадратов // АСУ и приборы автоматики. Сб.науч.трудов.- Вып.104.-Харьков: ХТУРЭ.- 1997 .-с. 107-112 .

2. Аксак Н.Г., Панасенко Ю.А. Об одном алгоритме оперативной идентификации // АСУ и приборы автоматики. Сб.науч.трудов.- Вып.105.- Харьков: ХТУРЭ.- 1997 .-с. 63-66.

3. Агаджанов С.Г., Панасенко Ю.А. Рекуррентное оценивание статистических характеристик помех в задаче оперативной идентификации // АСУ и приборы автоматики. Сб.науч.трудов.- Вып.105.-Харьков: ХТУРЭ.- 1997 .-с.16-21 .

4. Знаковый алгоритм идентификации статистических объектов / Агаджанов С.Г., Руденко О.Г., Панасенко Ю.А.; ХТУРЭ.- Харьков, 1995.-9 с.- Рус.- Деп. в ГНТБ Украины 17.07.95 №1838-Ук95.

5. Об одной модификации рекуррентного метода наименьших квадратов для оценивания нестационарных параметров при коррелированных помехах / Аксак Н.Г., Панасенко Ю.А., Тимофеев В.А.; ХТУРЭ.- Харьков, 1996.-10 с.- Рус.- Деп. в ГНТБ Украины 21.10.96 №1934-Ук96.

6. Панасенко Ю.А. О применении упрощенных математических моделей при разработке АСУ ТП // Труды Междунар. научно-практической конф. "Проблемы и перспективы ресурсов сбережения в жилищно-коммунальном хозяйстве".- Харьков: ХГАГХ.- 1995.- с. 64.

7. Руденко О.Г., Панасенко Ю.А., Агаджанов С.Г. Рекуррентное оценивание параметров регрессионных моделей при коррелированных помехах //Труды Междунар. конф. "Теория и техника передачи, приема и обработки информации".- Туапсе.- 1995.- с. 138.

8. Аксак Н.Г., Панасенко Ю.А., Тимофеев В.А. Оперативная идентификация линейных объектов при наличии коррелированных помех //Труды 2-ой Междунар. конф. "Теория и техника передачи, приема и обработки информации".-Ч.2.- Туапсе.-1996.- с. 270.

9. Агаджанов С.Г., Панасенко Ю.А., Теренковский И.Д. Идентификация нестационарных параметров с помощью модифицированных алгоритмов МНК // Праці 3-ї укр. конф. з автоматичного керування "Автоматика-96".- Том 1.- Севастополь: СевГТУ.- 1996.- с.130.

10. Агаджанов С.Г., Панасенко Ю.А., Тимофеев В.А. Оперативная идентификация нестационарных объектов при наличии коррелированных возмущений // Праці 3-ї укр. конф. з автоматичного керування "Автоматика-96".- Том 1.-Севастополь: СевГТУ.- 1996.- с.131.

11. Аксак Н.Г., Панасенко Ю.А. Вычислительные особенности некоторых алгоритмов идентификации при наличии коррелированных помех // Праці 4-ї укр. конф. з автоматичного керування "Автоматика-97".- Том 2.- Черкаси: ЧІТІ.- 1997.- с. 67.

12. Аксак Н.Г., Панасенко Ю.А., Теренковский И.Д. О численном построении модифицированных алгоритмов со скользящим окном при наличии коррелированных помех // Труды 3-й Междунар. конф. "Теория и техника передачи, приема и обработки информации".- Туапсе.- 1997.- с. 156.

13. Панасенко Ю.А. Рекуррентные алгоритмы оценивания статистических помех в задаче оперативной идентификации // 1-й междунар. молодежный форум "Электроника и молодежь в XXI веке". - Тез. докл. Харьков. - 1997. - 266 с.

**Особистий внесок.** Основні результати дисертації були одержані особисто автором. В роботах [1,2,4,5,8,9,10,13] автору належить розробка адаптивних алгоритмів ідентифікації, в роботах [6,7,11,12] - розробка методики моделювання, в роботі [3] - розробка алгоритму оцінювання статистичних характеристик завод.

## АНОТАЦІЯ

Панасенко Ю.О. Алгоритми оперативної ідентифікації лінійних об'єктів при корельованих заводах. - Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03- системи та процеси керування. - Харківський державний технічний університет радіоелектроніки, Харків, 1997.

Запропоновано рекурентні алгоритми параметричної ідентифікації стаціонарних та нестаціонарних лінійних об'єктів при наявності корельованих завод. Вивчено властивості алгоритмів для такого практично важливого випадку, як наявність стаціонарних корельованих завод. Розглянуто питання оцінювання статистичних характеристик заводи, що включають перевірку існування її автокореляції, оцінювання дисперсії та коваріаційної матриці. Запропоновано зручні рекурентні алгоритми оцінювання характеристик заводи, які разом з алгоритмами ідентифікації являють собою замкнуту процедуру ідентифікації лінійних об'єктів при корельованих та некорельованих заводах. Розроблено комплекс програм, що реалізує запропоновані методи та алгоритми. Приведено результати аналізу роботи алгоритмів.

Ключові слова: ідентифікація, корельованість, рекурентний алгоритм, нестаціонарність, обчислювальна стійкість, оцінювання.

## АННОТАЦИЯ

Панасенко Ю.А. Алгоритмы оперативной идентификации линейных объектов при коррелированных помехах. - Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03- системы и процессы управления.- Харьковский государственный технический университет радиозлектроники, Харьков, 1997.

Предложены рекуррентные алгоритмы параметрической идентификации стационарных и нестационарных линейных объектов при наличии коррелированных помех. Изучены свойства алгоритмов для такого практически важного случая, как наличие стационарных коррелированных помех. Рассмотрены вопросы оценивания статистических характеристик помехи, включающие проверку существования ее автокорреляции, оценивания дисперсии и ковариационной матрицы. Предложены удобные рекуррентные алгоритмы оценивания параметров помехи, которые вместе с алгоритмами идентификации представляют собой замкнутую процедуру идентификации линейных объектов при наличии коррелированных и некоррелированных помех. Разработан комплекс программ, реализующий полученные методы и алгоритмы. Приведены результаты сравнительного анализа работы алгоритмов.

Ключевые слова: идентификация, коррелированность, рекуррентный алгоритм, нестационарность, вычислительная устойчивость, оценивание.

### ABSTRACT

Panasenko Ju.A. Operative identification algorithms of linear objects at presents correlated disturbances.- Manuscript.

Thesis for a candidate's degree by speciality 05.13.03- control systems and processes.- Kharkov State Technical University of Radioelectronics, Kharkov, 1997.

The parametrical identification recurrent algorithms of stationary and non-stationary linear objects are offered at the presence of the correlated disturbances. The properties of algorithms for such practically important case as presence of the stationary correlated disturbances are investigated. The tasks of statistical characteristics estimation of the disturbance, including a existence check of it autocorrelation, variance estimation and covariance matrix are considered. The convenient recurrent algorithms of disturbance's parameters estimation, that together with algorithms of identification represent a closed procedure of linear objects identification at presence of correlated and an uncorrelated disturbances are offered. Complex of the programs, realizing received methods and algorithms is developed. The results of the comparative analysis of algorithms modelling are brought.

Key words: identification, correlation, recurrent algorithm, non-stationary, computing stability, estimation.

Н.С.Панасенко

Підписано до друку 12. 12. 97 р.

Ум. др. арк. 1.00

Формат 60x80 1/16

Тираж 130 пр.

Папір Business

---

ООО „ДокументСервіс“  
м. Харків, вул. Мироносицька, 25

1 2 3 4 5 6 7 8 9 0

AB 39.786