

УДК 621.396.6, 519.3

А.О. Левченко, к.т.н., доц., с.н.с.

*Науковий центр Сухопутних військ Львівського інституту Сухопутних військ
Національного університету "Львівська політехніка"*

МЕТОД ОЦІНКИ ХАРАКТЕРИСТИК МОДЕЛЕЙ КОНТРОЛЮ В РЕАЛЬНОМУ МАСШТАБІ ЧАСУ

В статті наведено зміст методу оцінки характеристик моделей контролю алгоритмів та програмних продуктів інформаційно-вимірвальних систем в реальному масштабі часу. Метод, що пропонується, дозволяє отримувати незсувну та ефективну оцінку значень моделей динамічних характеристик за одиничною реалізацією за відомим сигналом в реальному масштабі часу.

Постановка проблеми. Основу адаптивних інформаційних систем діагностики з прогнозуванням складають алгоритми ідентифікації характеристик положення і масштабу інформаційних моделей дрейфу параметрів та алгоритми ідентифікації щільності розподілів ймовірностей цих процесів [1, 2, 3]. Алгоритми є математичним засобом, який дозволяє за даними контролю одержати оцінку стану об'єкта контролю в майбутньому. Процедури, що реалізуються програмними продуктами, є складовими інформаційних технологій створення систем підтримки прийняття рішень про стан складних технічних систем.

Отже процедури адаптивних інформаційно-вимірвальних систем діагностики з прогнозуванням можна розцінювати як методики іспитів об'єктів контролю за прогнозованими параметрами [4, 5]. Відповідно до положень чинної правової і нормативно-технічної документації будь-які методики іспитів повинні піддаватися визначенню значень показників точності й достовірності, забезпечуваних у результаті їх застосування.

За останні декілька років спостерігається якісний скачок у питаннях метрологічної атестації алгоритмів та програмних продуктів, що забезпечують обробку первинних вимірвальних значень в інформаційно-вимірвальних системах (ІС). Важливу складову метрологічних характеристик алгоритмів та програмних продуктів мають динамічні характеристики (ДХ). Це обумовлено визнанням факту того, що ІС, які працюють фактично в статичному режимі, виявляють якості, що властиві динамічним системам та аналіз яких можливий лише із застосуванням динамічних моделей. На даний момент відповідна номенклатура ДХ ІС, що дозволяють адекватно описувати процес функціонування ІС не визначена.

Зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями. Визначення оперативно-технічних вимог до алгоритмів обробки даних та програмних продуктів автоматизованих робочих місць передбачено низкою науково-дослідних робіт в інтересах Міністерства оборони України в межах діяльності зі створення Єдиної автоматизованої системи управління Збройними Силами України.

У щорічнику «Біла книга 2005: оборона політика» зазначено, що діяльність щодо створення нових та модернізації існуючих автоматизованих інформаційних систем управління та визначення реального стану складних систем озброєння з обґрунтуванням шляхів їх модернізації є пріоритетними напрямками в діяльності науково-дослідних установ Збройних сил України в галузі розвитку озброєння та військової техніки.

Аналіз останніх досліджень, що стосуються вирішення цієї проблеми. Докладний аналіз вперше опублікований у 1988 році [6] для ДХ ІС, що використовуються дотепер показав, що сукупність цих характеристик не забезпечує можливості оцінки значень динамічної похибки інформаційної системи для випадку вимірювань параметрів з апріорно невідомим розподілом. Саме це обумовлює пошук та нормування саме таких ДХ ІС, відомості про які дозволяють проводити кількісну оцінку величини динамічної складової похибок вимірювань ІС для випадку невідомого закону розподілу вимірюваних параметрів від інформаційно-вимірвальних перетворювачів. Ці ДХ в сукупності з характеристиками вимірюваних параметрів повинні забезпечувати оцінку похибок функціонування ІС у формі, встановленій відповідною нормативно-технічною документацією.

Невирішені частини загальної проблеми. Визначені умови задовольняє клас так званих повних ДХ, до яких належать: передавальна функція, перехідна функція (ПФ), імпульсна перехідна функції (ІПФ), амплітудо- і фазочастотні характеристики (АЧХ, ФЧХ), а також сукупність коефіцієнтів математичної моделі диференціального або різницевого рівняння, що описує функціонування ІС.

Аналіз вказаних повних ДХ показує, що кожна з них має свій власний ступінь адекватності в характеристиці властивостей ІС і має свої переваги і недоліки, що вперше зазначено в [6]. Проте при вирішенні проблеми оцінки і контролю повних ДХ ІС в реальному масштабі часу особливу перевагу слід

віддати сукупності коефіцієнтів моделей контролю у вигляді диференціального або різницевого рівняння, що описує ПС, оскільки така характеристика має низку переваг. Найбільш вагомими з яких є:

- порівняно з іншими характеристиками, сукупність коефіцієнтів моделей контролю у вигляді диференціального або різницевого рівняння не обмежується класом лінійних і стаціонарних систем;
- визначена сукупність піддається нормуванню в аналітичному вигляді, що забезпечує більш простішу реалізацію у вигляді модулів програмних продуктів;
- визначена сукупність забезпечує простоту переходу в разі потреби до динамічних характеристик іншого вигляду і при цьому завдання залишається коректно поставленим за Адамаром-Тіхоновим [2, 3, 5, 6];
- сукупність коефіцієнтів моделей контролю у вигляді диференціального або різницевого рівняння забезпечує порівняльну простоту пошуку прихованих відмов, у першу чергу процедур, алгоритмів та програмних продуктів, що реалізовані в ПС.

Нормування ПДХ здійснюється на етапі розробки ПС і включає вибір типу ПДХ, встановлення розрахунковим шляхом її величини і граничних відхилень від номінального значення. На етапі випробувань (державних або періодичних у процесі експлуатації) здійснюється їх експериментальна оцінка і контроль на відповідність технічному завданню або нормам, вказаним в технічних умовах на ПС. Слід підкреслити: оптимальний розв'язок задачі нормування, оцінки і контролю ПДХ конкретною ПС визначає значною мірою подальшою структурою її метрологічного забезпечення.

Постановка завдання. Оскільки до експлуатованих систем озброєння, що знов розробляються, висуваються все більш високі вимоги щодо боєготовності, то вирішення проблеми оцінки і контролю ДХ ПС в реальному масштабі часу стає особливо актуальним. Як показав аналіз матеріалів друкованих джерел, які безпосередньо присвячені розв'язанню даної проблеми [3, 7, 8], у постановці, що наведена, дана проблема не розв'язана, не зважаючи на проведені спроби. Після загальної постановки проблеми в роботах, що активно публікуються, наводиться такий перелік обмежень та припущень, який зводить нанівець рішення, які пропонуються. В статті передбачається розвиток методів оцінки характеристик моделей контролю в реальному масштабі часу, в основу яких покладено застосування рекурентних співвідношень [8], що визначають зв'язок між елементами обернених матриць, які відрізняються матрицею рангу, що дорівнює одиниці.

Викладення основного матеріалу дослідження. У відомих роботах з визначеної проблематики завдання в основному ставляться і вирішуються в рамках ретроспективного аналізу за допомогою апарату теорії ідентифікації. Найбільш розробленими слід вважати так звані "прямі методи", тобто методи, що не вимагають обчислень [9]. З їх допомогою можна ретроспективно оцінити весь спектр характеристик, що розглядаються. Специфічні особливості, якими володіють "прямі" методи, не дозволяють їх використовувати для оцінки і контролю повних ДХ ПС в реальному масштабі часу, оскільки їм властиві:

- незадовільна оперативність;
- неможливість боротьби з систематичними складовими похибок вимірювання і завад, що впливають на ПС;
- складність нормування в найбільш зручному – аналітичному вигляді.

Незадовільна оперативність обумовлена необхідністю очікування кінця перехідного процесу, а також необхідністю багатократного проведення експерименту з метою боротьби з випадковими складовими похибок відтворення, реєстрації вхідних і вихідних сигналів і неконтрольованих внутрішніх і зовнішніх завад, що впливають на ПС.

Для вирішення завдання оцінки і контролю ПДХ ПС в реальному масштабі часу треба йти шляхом використання "непрямих" методів, тобто методів, що вимагають обробки інформації [3], що призводить до необхідності використання чисельних методів обробки даних за допомогою обчислювальних машин або спеціалізованих пристроїв, які є складовою ПС.

Переваги такого підходу визначені в [6] та полягають в наступному:

- можливість використання як стимулюючий (навчаючий) сигнал найзагальнішого вигляду;
- відсутність необхідності очікування кінця перехідного процесу і можливість використання інформації про динамічні властивості ПС, які найповніше виявляються у перехідних режимах;
- легкий облік в процедурах оцінки і контролю апріорної інформації про стан ПС та середовище її функціонування, що забезпечує можливість застосування статистичних підходів оцінки і контролю за даними одиничного експерименту;
- можливість обчислення і компенсації систематичною складовою похибок відтворення і реєстрації вхідного і вихідного сигналів ПС.

У найзагальнішому вигляді визначення повних ДХ ПС в реальному масштабі часу непрямими методами складається з подачі на вхід ПС стимулюючого сигналу, ресстрації вихідного сигналу, їх введенні в темпі надходження інформації послідовним способом, в ЕОМ для обробки з метою отримання моделі повної ДХ.

В цьому завданні розробка ефективних процедур, алгоритмів та програмних продуктів на їх основі для автоматизованої обробки вимірювальної інформації від вимірювальних перетворювачів ПС стає центральною і на ній слід зосередити основну увагу.

Розглянемо конкретний алгоритм оцінки і контролю в реальному масштабі часу повної ДХ ПС, в якості якої використовується сукупність коефіцієнтів різницевого рівняння. В цьому випадку досліджувана ПС описується різницеvim рівнянням вигляду:

$$g_0 y_i + g_1 y_{i-1} + \dots + g_k y_{i-k} = t_i + g_{k+1} t_{i-1} + \dots + g_{k+p} t_{i-p}, \tag{1}$$

де $y_i = y(i)$; $t_i = t(i)$ – моделі (аналітичні співвідношення) для вихідної та вхідної (нормованої) послідовності сигналів.

Для рівняння (1) визначимо вектор параметрів $G = [g_0, g_1, \dots, g_{k+p}]$, який повністю характеризуватиме досліджувану ПС.

Відомо, що для оцінки вектора G необхідно скласти і вирішити систему лінійних рівнянь, яку можна представити у вигляді:

$$\begin{bmatrix} g_0, g_1, \dots, g_{k+p} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} y_i & y_{i+1} & \dots & y_{i+k+p} \\ y_{i-1} & y_i & \dots & y_{i+k+p-1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ y_{i-k} & y_{i-k+1} & \dots & y_{i+p} \\ -t_{i-1} & -t_i & \dots & -t_{i+k+p-1} \\ -t_{i-2} & -t_{i-1} & \dots & -t_{i+k+p-2} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ -t_{i-p} & -t_{i-p+1} & \dots & -t_{i+k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_i, t_{i+1}, \dots, t_{i+k+p+1} \end{bmatrix} \tag{2}$$

або в компактнішій формі:

$$GS_i = Z_i. \tag{3}$$

Розв'язок цього матричного рівняння при невиродженій матриці S_i є оцінкою ДХ і визначається формулою [6, 8, 9]:

$$G = Z_i S_i^{-1}. \tag{4}$$

Реальні вимірювання завжди супроводжуються випадковим шумом, тобто насправді є вхідна і вихідна послідовності ПС, спотворені випадковими завадами, що можна визначити співвідношеннями:

$$\begin{aligned} \chi_i &= y_i + w_i \\ u_i &= t_i + v_i \end{aligned} \tag{5}$$

де w_i, v_i – некорельовані послідовності шумів вимірювання, вихідна і вхідна відповідно.

Рівняння (4) вже не визначатиме оптимальну оцінку ДХ ПС, оскільки похибки вимірювань і завади цілком увійдуть до розв'язку і приведуть до зсуву шуканої оцінки.

Найбільш простий шлях для подолання цих труднощів полягає в отриманні незалежних один від одного оцінок ДХ G_i і їх використання для визначення оптимальної оцінки за допомогою одного з алгоритмів стохастичної апроксимації [2]. Оскільки завдання полягає в отриманні методів кількісної оцінки і контролю похибок моделі даної ДХ в реальному масштабі часу, а потік даних, що поступають від досліджуваної ПС, утворює часові послідовності, найбільш зручною є послідовна схема обробки в темпі надходження інформації.

Це дає такі переваги:

- дозволяє не запам'ятовувати весь обсяг інформації, що поступає, і отримувати оцінки ПДХ у міру надходження даних;
- значно підвищує оперативність алгоритмів, що синтезуються.

Питання зниження потрібного машинного часу і пам'ять ЕОМ, які досліджувалось в [1], на сучасному рівні розвитку ЕОМ вже можна не розглядати.

Виходячи з цього, модель (2) або (3), а точніше матриці S_i , Z_i , доцільно розглядати як поточні матриці заданих розмірів, що формуються з потоків інформації, що поступають про вхід та вихід ПС за певними законами.

Розглянемо випадок, коли в матриці S_i зміна інформації здійснюється по стовпцях (зліва направо) шляхом відкидання першого стовпця (застарілій інформації) і додаванням до частини, що залишилася, матриці S_i справа нового стовпця (інформації, що знов поступила), а для матриці Z_i — поелементно і теж зліва направо. У цьому випадку з урахуванням співвідношень (5) модель (2) представляється у такому вигляді:

$$\begin{vmatrix} g_0 g_1, \dots, g_{k+p} \\ \chi_i & \chi_{i+1} & \dots & \chi_{i+k+p} \\ \chi_{i-1} & \chi_i & \dots & \chi_{i+k+p-1} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \chi_{i-k} & \chi_{i-k+1} & \dots & \chi_{i+p} \\ -u_{i-1} & -u_i & \dots & -u_{i+k+p-1} \\ -u_{i-2} & -u_{i-1} & \dots & -u_{i+k+p-2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ -u_{i-p} & -u_{i-p+1} & \dots & -u_{i+k} \end{vmatrix} = |u_i | u_{i+1}, \dots, u_{i+k+p-1}| \quad (6)$$

$$\begin{vmatrix} g_0 g_1, \dots, g_{k+p} \\ \chi_{i+1} & \chi_{i+2} & \dots & \chi_{i+k+p+1} \\ \chi_i & \chi_{i+1} & \dots & \chi_{i+k+p} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ \chi_{i-k+1} & \chi_{i-k+2} & \dots & \chi_{i+p+1} \\ -u_i & -u_{i+1} & \dots & -u_{i+k+p-1} \\ -u_{i-1} & -u_i & \dots & -u_{i+k+p-2} \\ \vdots & \vdots & & \vdots \\ -u_{i-p+1} & -u_{i-p+2} & \dots & -u_{i+k+1} \end{vmatrix} = |u_{i+1} u_{i+2}, \dots, u_{i+k+p}| \quad (7)$$

Розв'язок матричних рівнянь (6), (7) дозволяє отримувати оцінки моделей ДХ ПС послідовним способом в темпі надходження інформації. Одним з недоліків підходу, що пропонується, слід вважати необхідність обернення на кожному кроці матриці великої розмірності. У [6, 8] запропонований алгоритм звернення, що не вимагає значних обчислювальних витрат, але припускає невиродженість матриці S_i на кожному кроці оцінки, що зазвичай виконати важко, особливо якщо вхідна послідовність близька до постійної і не порушує всі власні коливання ПС. Більш того, для придушення шуму (зниження похибки вимірювань ПС) прийнято брати число рівнянь значно більше числа невідомих, і для вирішення отримуваної таким чином перевизначеної системи використовувати послідовний метод найменших квадратів (МНК) без необхідності звернення матриці S_i на кожному кроці [8]. У цьому випадку із збільшенням похибок моделей оцінки G_i набувають небажаних зсувів, обумовлених похибками моделей попередніх етапів обчислень [8].

Необхідно розробити процедуру, що виключає висунуте обмеження на невиродженість матриці S_i і узагальнити результат на випадок прямокутної матриці S_i . Для цього доцільно використовувати процедуру псевдозвертання [8]. Відома низка рекурентних алгоритмів псевдозвертання, яким властива якість послідовного МНК, та їх безпосереднє використання виявиться неефективним [2, 3, 4, 6, 8]. Тому використано інший алгоритм псевдозвертання, в якому враховувалося оновлення (зміна) інформації, потрібне мінімальне число обчислювальних операцій [6, 8]. Він складає основу методу оцінки і контролю ПДХ в реальному масштабі часу, що пропонується. Процедура послідовної обробки інформації з метою отримання поточної оцінки ДХ ПС представлена як процедура послідовного оновлення (із зрушенням) по стовпцях матриці заданих розмірів і її псевдозвертання за допомогою формул, представлених в [8], на кожному кроці зміни інформації.

Висновки:

1. Розроблений метод оцінки і контролю ДХ ПС реалізовано у вигляді програмного продукту. Проведенням розрахункових експериментів встановлено, що метод, який пропонується дозволяє ефективно

пригнічувати випадкові компоненти похибок в оброблюваних послідовностях χ_i , u_i та отримувати незміщені і ефективні оцінки моделей ДХ за одиничними реалізаціями при довільних законах розподілу перешкод і шумів.

2. Як і у випадку з [6], обмеженням застосування процедур методу виявляється вимога скінченості їх дисперсій.

3. Використання процедури псевдозвертання дозволило регуляризувати завдання оцінки і контролю похибок моделей ДХ, яке в такій постановці належить до класу зворотних завдань, некоректних за Адамаром-Тіхоновим.

ЛІТЕРАТУРА:

1. *Левченко А.О.* Визначення етапів реалізації прогноуючого контролю – можливої альтернативи існуючій системі ТО і Р складних об'єктів // Збірка наукових праць Одеського інституту сухопутних військ. – 2000. – № 5. – Ч. 2. – С. 34–37.
2. *Левченко А.О.* Засоби атестації систем метрологічного супроводження // Матеріали 3-ї науково-технічної конференції «Стан і розвиток військово-морських сил Збройних сил України на сучасному етапі». – Севастополь, 2003. – С. 158–160.
3. *Левин С.Ф.* Статистический анализ систем обеспечения эксплуатации технических объектов. – М.: Изд. АН СССР, 1989. – 432 с.
4. *Левченко А.О.* Алгоритм прогноуючого контролю для технологічної системи керування параметрами технічних засобів // Труды Одеського національного політехнічного університету. – 2000. – Вип. 2 (11). – С. 133–136.
5. *Левченко А.О.* Структура алгоритму вирішення задачі стійкого індивідуального оперативного прогнозу параметричної надійності: Проміжний звіт з НДР «Розвиток». – Кн. 3. – Одеса: НЦ БЗ СВ при ОІСВ, 2003. – С. 83–92.
6. *Кривоцюк В.И.* Нормирование метрологических характеристик в реальном масштабе времени с помощью ЭВМ // Труды войсковой части 55215: Сб. научн. тр. – Москва, 1995. – С. 18–30.
7. *Бренер М.Д., Солопченко Г.Н., Хрумало В.М.* Методы определения динамических характеристик средств измерения // Измерение, контроль, автоматизация. – 1989. – № 1 (17). – С. 33–36.
8. *Матвеев А.А., Кривоцюк В.И., Попов В.Н.* Алгоритм псевдообращения с помощью вспомогательной матрицы и его использование в процедурах последовательной обработки информации // Прикладные вопросы теории информации и кибернетики. – Рига, 1978.
9. *Кавалеров Г.И., Мандельштам С.М., Солопченко Г.Н., Хрумало В.М.* Основные вопросы оценки динамических погрешностей измерений // Приборостроение и автоматический контроль. – 1978. – № 1. – С. 123–126.

ЛЕВЧЕНКО Андрій Олександрович – кандидат технічних наук, доцент, старший науковий співробітник, заступник начальника Наукового центру Сухопутних військ Львівського інституту Сухопутних військ Національного університету "Львівська політехніка" з наукової роботи.

Наукові інтереси:

- інформаційні моделі систем підтримки прийняття рішень;
- автоматизовані вимірвальні довідково-інформаційні системи;
- моделювання похибок моделей випадкових процесів.

Подано 10.09.2008

Левченко А.О. Метод оцінки характеристик моделей контролю в реальному масштабі часу
Левченко А.А. Метод оценки характеристик моделей контроля в реальном масштабе времени

УДК 621.396.6, 519.3

Метод оценки характеристик моделей контроля в реальном масштабе времени / А.А. Левченко //

В статье предложен метод оценки характеристик моделей контроля алгоритмов и программных продуктов информационно-измерительных систем в реальном масштабе времени. Метод который предлагается, позволяет получать состоятельную, несмещенную и эффективную оценку значений моделей динамических характеристик по единичной реализации с известным пилот сигналом в реальном масштабе времени.

УДК 621.396.6, 519.3