

МЕТОДИ ОБРОБЛЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ВИМІРЮВАНЬ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПАРАМЕТРІВ У ЗАДАЧАХ ОПТИМАЛЬНОГО КЕРУВАННЯ СИСТЕМОЮ ПРОМИСЛОВИХ ГАЗОПРОВІДІВ

В.А.Коляденко

*УкрНДІгаз, 61010, м. Харків, Красношкільна наб., 20, тел. (057) 7304525,
e-mail: gaz@ukrniigaz.kharkov.ua*

Розглядається можливість застосування рекурсивних процедур типу Калмана-Б'юсі для оцінювання вимірюваних технологічних параметрів, що описують випадкові процеси. Отримані при цьому оцінки рекомендовано використовувати безпосередньо для задач керування режимом роботи систем промислових газопроводів

Ключові слова: система промислових газопроводів, рекурсивні процедури, фільтр Калмана-Б'юсі

Рассматривается возможность применения рекурсивных процедур типа Калмана-Бьюси для оценки измеренных технологических параметров, представляющих случайные процессы. Получаемые при этом оценки рекомендуется использовать непосредственно для задач управления режимом работы систем промысловых газопроводов

Ключевые слова: система промысловых газопроводов, рекурсивные процедуры, фильтр Калмана-Бьюси

Possibility of application of recursive procedures of type of Kalman-B'usy is in-process considered for the estimation of the measured technological parameters, presenting casual processes. It is recommended to utilize the estimations got here directly for the tasks of management the mode of operations of the systems of trade gas pipelines

Keywords: system of trade gas pipelines, recursive procedures, Kalman-B'usy's filter

Постановка проблеми у загальному вигляді та її зв'язок із важливими науковими і практичними завданнями

Системи промислових газопроводів рівня газовидобувного підприємства можуть розглядатися як складні організаційно-технічні, ієрархічні системи. Для їх ефективної роботи застосовують методи керування, що вимагають надійного метрологічного забезпечення, передавання і приймання інформації про вимірювані параметри і отримання оцінок параметрів вимірюваних випадкових величин або процесів. В процесі експлуатації системи промислових газопроводів необхідна об'єктивна характеристика їх роботи і достовірна інформація про значення технологічних параметрів. На підставі цих даних особи, які приймають рішення (ОПР), або системи керування технологічним процесом здійснюють коригування режиму роботи під час вирішення задачі оперативного керування. Існуючі в теперішній час підсистеми вимірювань технологічних параметрів повністю реалізують відомі міри підвищення цієї достовірності, що іноді призводить до помилкових рішень. Через те, що 100%-ої вірогідності на практиці досягнути практично неможливо, необхідно мінімізувати помилки як під час вимірювань та їх оцінювання, так і у процесі прийняття рішень.

Аналіз останніх досліджень і публікацій, в яких започатковано розв'язання даної проблеми

Алгоритми керування режимами роботи систем газопроводів передбачають збір, накопичення, обробку інформації про значення технологічних параметрів, їх аналіз і прийняття рішення про видавання необхідного керуючого впливу. Існують різні процедури, що забезпечують мінімізацію помилок результатів вимірювань та їх оцінювання. Оброблення результатів може здійснюватись методом вибіркової статистики, шляхом виключення аномальних результатів вимірів, що різко виділяються, а також шляхом застосування робастних методів оброблення [1, 2]. Пропонується рекурсивне оброблення результатів вимірювань, яке уможливило отримання результату оцінювання на будь-якому кроці рекурсії. Для оцінювання параметрів випадкових величин існують процедури стохастичної апроксимації, для оцінки випадкових процесів – процедура типу Калмана-Б'юсі. Названі процедури дають оцінку в реальному масштабі часу і не потребують втрат часу на накопичення та обробку інформації.

Виділення невирішених раніше частин загальної проблеми та формулювання цілі статті

Основними технологічними параметрами, що характеризують режим роботи систем промислових газопроводів, є: тиск, температура і витрата газу в контрольних точках (на вході і

виході шлейфів свердловин, на вході і виході кожної лінійної ділянки внутрішньопромислового газозбірного колектора). Решта параметрів, такі як теоретичний коефіцієнт гідравлічного опору ($\lambda_{теор}$), фактичний коефіцієнт гідравлічного опору ($\lambda_{факт}$), коефіцієнт гідравлічної ефективності (E) лінійних ділянок систем газопроводів та інші є похідними і визначаються розрахунковим шляхом, тому достовірність результатів основних параметрів і розрахунок похідних параметрів залежить як від процедур обробки статистики, так і від самої статистики.

Викладення основного матеріалу досліджень

Відмінністю систем газопроводів є те, що параметри вимірювань є випадковими величинами і процесами, тому їх оцінювання необхідно проводити за допомогою методів теорії ймовірностей і математичної статистики [3-10].

Випадкові величини представляють в безперервній ($x(t), t \in (t_0; t_n)$), або дискретній ($x(k), k = \overline{1, N}$) формах. Повною характеристикою випадкової величини є густина розподілу імовірності $P(x)$

$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left\{-\frac{(x - m_x)^2}{2\sigma_x^2}\right\}, \quad (1)$$

де m_x і σ_x^2 – відповідно середнє і дисперсія величини x .

Як m_x , так і σ_x^2 – параметри величини $x(t)$ – постійні, хоча і не відомі величини, що підлягають оцінюванню.

Випадкові процеси є узагальненням випадкових величин в тому сенсі, що кожен перетин процесу є випадковою величиною. Динаміку для гауссівського процесу подають у вигляді рівнянь стану [9, 10]:

$$\frac{dx(t)}{dt} = F(t)x(t) + G(t)n(t), \quad (2)$$

де: $x(t)$ – вимірюваний процес або величина;
 $n(t)$ – білий гаусів шум з нульовим середнім;

$F(t), G(t)$ – коефіцієнти (для векторного випадку: матриці) відповідно стану і збудження.

Рівняння стану (2) відображає марківські властивості процесу $x(t)$. Для квазістаціонарного випадку його коефіцієнти F, G не залежать від часу і пов'язані з коефіцієнтами зношувння і дифузії, що входять до рівняння Фоккера-Планка-Колмогорова. Коефіцієнти F мають фізичний зміст величин, зворотних до інтервалу кореляції $\tau_{кор}$ процесу $x(t)$. Коефіцієнти G визначають масштаб випадкових змін процесу $x(t)$.

$$G = \sqrt{2\alpha\sigma_x^2}, \quad (3)$$

де σ_x^2 – спектральна густина потужності процесу, що породжує

$$\alpha = 1/\tau_{кор}, \quad (4)$$

де $\tau_{кор}$ – інтервал кореляції.

Для стаціонарного процесу $x(t)$ рівняння (2) представляється у вигляді:

$$\frac{dx(t)}{dt} = \exp(-\alpha)x(t) + \sqrt{2\alpha\sigma_x^2} \cdot n(t). \quad (5)$$

Рівняння стану (2) зазвичай доповнюється рівнянням спостереження:

$$y(t) = H(t)x(t) + \xi(t), \quad (6)$$

де: $H(t)$ – коефіцієнт (матриця) спостереження, що враховує величину зміни параметра в процесі спостереження;

$\xi(t)$ – помилки вимірювання або завади в каналі спостереження, які часто апроксимують білим гауссовим шумом, «зашумленість» визначається не стільки наявністю випадкових завад, скільки складністю системи і пов'язаною з цим наявністю різного роду другорядних процесів, з погляду керування.

Для дискретного уявлення рівняння стану має вигляд:

$$x(k+1) = \Phi(k+1, k)x(k) + G(k+1, k)n(k), \quad (7)$$

де: $\Phi(k+1, k) = \exp\{-\alpha\Delta t_k\}$ – коефіцієнт (для векторного випадку – матриця) стану ($\alpha = 1/\tau_{кор}$, $\Delta t_k = k - (k-1)$ – інтервал вимірювань);

$G(k+1, k) = \sqrt{\sigma_x^2(1 - \exp\{-\alpha\Delta t_k\})}$ – коефіцієнт (матриця) збудження.

Структурну схему алгоритму спостереження на основі рівнянь (2) і (6) зображено на рисунку 1.

З метою оцінки вимірюваних параметрів систем газопроводів, представлених у вигляді випадкових величин і процесів, пропонуються рекурсивні методи.

Для оцінки параметрів випадкових величин використовують процедури стохастичної апроксимації [9, 10, 12]: Роббінса-Монро, Кіфера-Вольфовица, Ньютона-Рафсона, Качмажа та ін. Для оцінки випадкових процесів існує достатньо ефективна оптимальна в гауссовому і лінійному наближеннях процедура, що отримала назву «фільтра Калмана-Б'юсі». У основу цієї процедури покладено математичну модель, описану рівняннями стану і спостереження. Сама ж

процедура оцінки $\hat{x}(k)$ має такий вигляд [12]:

$$\hat{x}(k+1) = \Phi(k+1, k)\hat{x}(k) + K(k) \left[y(k) - H(k)\hat{x}(k) \right], \quad (8)$$

де $K(k)$ – коефіцієнт, що забезпечує стійкість і оптимальну швидкість збіжності алгоритму до сталого стану і підлягає рекурсивному обчисленню на кожному кроці згідно з алгоритмом:

$$K(k+1) = P(k+1, k)H^T(k)V^{-1}(k+1), \quad (9)$$

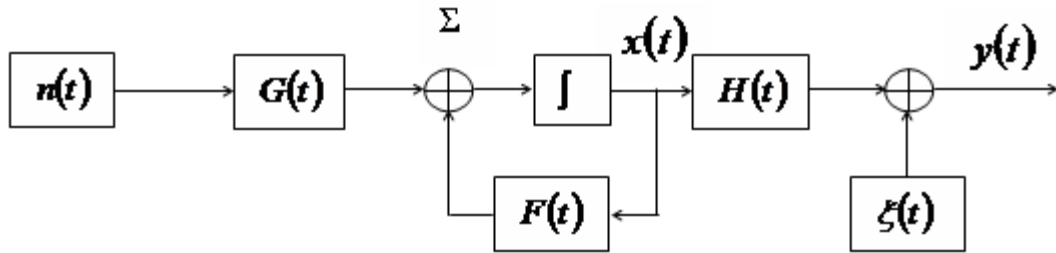


Рисунок 1 – Структурна схема алгоритму спостереження процесу $x(t)$ на фоні шуму $\xi(t)$

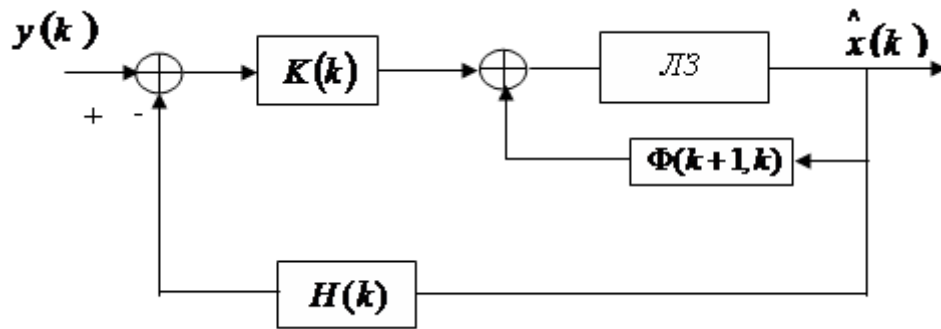


Рисунок 2 – Структурна схема дискретного алгоритму оцінки «фільтра Калмана-Бьюсі»

де:

$$P(k+1, k) = \quad (10)$$

$$\Phi(k+1, k)P(k, k)\Phi^T(k+1, k) + N_n(k);$$

$$V(k+1) = H(k)P(k+1, k)H^T(k) + N_\xi(k), \quad (11)$$

$$P(k, k) = P(k, k-1) - K(k)H(k)P(k, k), \quad (12)$$

$N_n(k), N_\xi(k)$ – відповідно значення спектральної густини потужності породжуваного шуму $n(k)$ і шуму спостереження $\xi(k)$. Значення $P(k+1, k)$ відповідає апостеріорній дисперсії помилки оцінки $\Delta x = (\hat{x} - x)$.

На рисунку 2 зображено структурну схему дискретного алгоритму оцінки (8) типу Калмана-Бьюсі.

Структура алгоритму Калмана-Бьюсі для аналогового варіанту у вигляді рівняння стану виражається в диференціальній формі [12]:

$$dx(t)/dt = F(t)x(t) + G(t)n(t). \quad (13)$$

Відповідне рівняння оцінки набуває вигляду

$$d\hat{x}/dt = F(t)\hat{x}(t) + k(t) \left[y(t) - H(t)\hat{x}(t) \right], \quad (14)$$

де: $K(t) = P(t)H^T(t)N_\xi^{-1}(t)$ – відповідний коефіцієнт, що визначає стійкість і максимальну швидкість збіжності процедури (14);

$P(t)$ – апостеріорна дисперсія помилки оцінки, яка знаходиться із розв'язку диференціального рівняння Ріккати:

$$\frac{dP(t)}{dt} = F(t)P(t) + P(t)F^T(t) - P(t)H^T(t)N_\xi^{-1}(t)H(t)P(t) + G(t)N_n(t)G^T(t). \quad (15)$$

Слід звернути увагу на одну важливу відмінність фільтра Калмана-Бьюсі від процедур оцінки випадкових величин Робінса-Монро і Ньютона-Рафсона [10]: наявність множника $\Phi(k+1, k)$ – матриці стану з елементами $\Phi_{ij} = \exp\{-\Delta t_k / \tau_{кор}\}$, що визначають величину кореляційного зв'язку між сусідніми відліковими значеннями спостережуваного процесу і величиною зв'язку між компонентами i і j при $i \neq j$. Тут доречно зауважити, що чим більш корельованими є відліки спостережуваного процесу $x(k), x(k-1), \dots$, тим вища якість отриманої оцінки [12].

Розглянуті алгоритми Калмана-Бьюсі, що забезпечують оптимальну оцінку вимірюваного випадкового процесу, є лінійними процедурами. На практиці завдання вимірювання і оцінювання не завжди вдається звести до лінійної процедури. Це вимагає також розгляду і нелінійних алгоритмів оцінювання параметрів випадкових процесів. Такі рішення можна знайти, застосовуючи марківську теорію нелінійної фільтрації, розроблену Колмогоровим, Стратоновичем та ін. [12].

Висновки з даного дослідження

1. Серед рекурсивних процедур можна виділити два основні методи, орієнтовані відповідно на отримання оцінки випадкової величини, (наприклад, методи стохастичної апроксимації) і випадкового процесу (наприклад, методи фільтрації, процедури Калмана-Бьюсі, марківської нелінійної фільтрації та ін.). У першому випадку оцінка зводиться до пошуку одного середнього значення на інтервалі часу спостереження, а в другому – під час оцінювання

випадкового процесу формується послідовність оцінюваних значень, які характеризують отримання поточної оцінки на кожному кроці ітерації.

2. Досліджено якість отримуваних оцінок. Спільним для них є те, що точність оцінювання із збільшенням об'єму вибірки зростає. При цьому вибіркові оцінки і оцінки випадкових величин збігаються до дійсного значення, та із збільшенням об'єму вибірки їх апостеріорна дисперсія асимптотично прямує до нуля. Вони є менш чутливими до неточності апріорного значення моделі оцінюваних величин. Ці оцінки можна використовувати в тих процедурах керування, де параметрами керованих об'єктів є випадкові величини або постійні значення.

Література

- 1 Лемешко Б.Ю. Робастные методы оценивания и отбраковка аномальных измерений // Заводская лаборатория. – 1997. – Т.63. – №5. – С. 43-49.
- 2 Довідник інженера диспетчерської служби; за заг. ред. канд. техн. наук, акад. УНГА Ю.В. Пономарьова та М.П. Химка. – К.- Х.: УЦЕБОПнафтогаз, 2007. – 248 с.
- 3 Матвеев В.В. Реализация логистических принципов управления газовой компанией в системе экстремально экономного регулирования и управления крупномасштабными сетями газопроводов (SEER&C): доклад на 1-й Международной научно-технической конференции DISCOM 2002. – Москва: РГУ нефти и газа имени И.М. Губкина. – 13.11.2002.
- 4 Вентцель Е.С. Теория случайных процессов и ее инженерные приложения / Е.С. Вентцель, Л.А. Овчаров. – М.: Наука. Гл. ред. физ. мат. лит., 1991. – 384 с.
- 5 Березина И.В. Оперативное управление системами газоснабжения / И.В. Березина, В.С. Ретинский. – М: Недра, 1985. – 192 с.
- 6 Берман Р.Я. Автоматизация систем управления магистральными газопроводами / Р.Я. Берман, В.С. Панкратов. – Л: Недра, 1978.
- 7 Райбман Н.С. Адаптивные модели в системах управления / Н.С. Райбман. – М.: Сов. радио, 1966. – 155 с.
- 8 Берман Р.Я. Оптимизация режимов работы газотранспортных систем в АСУ (Обзор) / Р.Я. Берман. – М: ВНИИЭгазпром, 1983. – № 3. – 35 с. Сер.: Автоматизация, телемеханизация и связь в газовой промышленности.
- 9 Коляденко В.А. Адаптивные алгоритмы обработки результатов измерений технологических параметров газопроводов для оценки гидравлического состояния и оптимального управления системой газоснабжения / В.А. Коляденко // Проблемы нефтегазовой промышленности. – 2005. – Вып. 2. – С. 253-257.
- 10 Коляденко В.А. Применение адаптивных моделей в задачах оптимизации режимов работы газопровода: материалы первой международной научной конференции [”Глобальные информационные системы. Проблемы и тенденции развития”] (Туапсе, 3-6 октября 2006 г.) / В.А. Коляденко. – Туапсе, 2006. – С. 162-163.
- 11 Мельничук Р.М. Аналіз гідравлічного та технічного стану промислових газопроводів ГПУ ”Полтавагазвидобування” / [Р.М.Мельничук, В.А.Слесарев, В.А.Коляденко та ін.] // Питання розвитку газової промисловості України. – 2004. – вип. XXXI.
- 12 Сейдж Э. Теория оценивания и ее применение в связи и управлении: пер. с англ; под ред. Б.Р. Левина / Э. Сейдж, Дж. Мелс. – М.: Связь, 1976. – 496 с.

Стаття надійшла до редакційної колегії
22.03.10

Рекомендована до друку професором
Мойсишиним В.М.