УДК 681.5.015:303.092.5.621.311.631.11

**В. М. Лисогор, д-р техн. наук, проф.; О. О. Рубаненко, канд. техн. наук;
М. П. Єленіч**

ГАРАНТОВАНА ОЦІНКА ІДЕНТИФІКАЦІЇ І УПРАВЛІННЯ ЕЛЕКТРИЧНИХ НАВАНТАЖЕНЬ СІЛЬСЬКОГОСПОДАРСЬКИХ ПІДПРИЄМСТВ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕННОСТІ

Запропоновано і розроблено нову прикладну математичну модель отримання гарантованих оцінок ідентифікації та управління електричних навантажень сільськогосподарських підприємств, що функціонують в умовах наявності структурних та параметричних невизначеностей.

Вступ

Опубліковано фундаментальні монографії з досліджуваної тематики, наприклад, [1], у якій розроблена інформаційна теорія ідентифікації. Завдяки врахуванню апріорних розгалужених знань про можливу поведінку об’єкта, його динамічні характеристики, завади, збурення, межі зміни невідомих параметрів, забезпечили можливість визначення оптимальних налаштувань моделей, аналізу оптимальних методів ідентифікації і управління, синтезу оптимальних алгоритмів функціонування цих об’єктів. Монографія [2] фактично є однією з небагатьох на той час робіт, де зроблено спробу закладки фундаменту сучасних інформаційних технологій ідентифікації і управління складних систем. У монографії [3] описано поглиблення рівня досліджень об’єктів ідентифікації та управління, що функціонують в умовах невизначеності, які породжуються відсутністю відомостей щодо точних значень векторів стану та параметрів цих об’єктів. Вказані ситуації привели до необхідності використання гарантованих оцінок аналізу стійкості систем. Задача синтезу звелась до розробки відповідних міні-максних алгоритмів ідентифікації та управління. Насамкінець наведемо посилання на достатньо цікаву публікацію періодичного видання [4], де отриманий суттєвий результат з інтервального оцінювання з використанням напрацювань MATLAB. Аналізуючи викладене, можна констатувати: на теоретичних теренах цього напрямку досліджень досягнуто вагомих результатів, однак фактично відсутні прикладні роботи для багатьох галузей народного господарства, в тому числі важливого для нас сільськогосподарського комплексу. Саме цей актуальний прикладний об’єкт буде розглянуто у пропонованій авторами статті. На заключному етапі досліджень авторам статті знадобились результати системного характеру [5], де викладені різні методи оцінювання фазових координат динамічної системи по результатах спостережень, що суттєво як для виявлення властивостей об’єкта, так і для ідентифікації управління системою.

Мета публікації: запропонувати і розробити підходи та методики гарантованої оцінки дискретно-неперервної ідентифікації і управління електричних навантажень сільськогосподарських підприємств, що функціонують в умовах невизначеностей.

Матеріали основного результату

Методика розгляду досліджень така: на початку задачу визначення гарантованих оцінок стану зробимо в припущенні, що параметри аналізованої динамічної системи відомі точно. Нехай задана динамічна система, що описується різницевим або безперервним рівнянням:

$$X_{n+1} = AX_n + BU_n; \tag{1}$$

$$\frac{dX(t)}{dt} = AX(t) + BU(t). \tag{2}$$

Причому безперервне рівняння отримано за $n \to \infty$. Тут завада f на об’єкт не діє, тому вектор $f \neq 0$. Припускаємо, що замість повного вектора X_{n+1} або $X(t)$ вимірюється вектор Y_n; $Y(t)$ – меншого розміру:

$$Y_n = X_n + Z_n, \tag{3}$$

зауважимо, що з рівняння (3) неважко знайти вектор стану X_n,

де $Z_n \in R^m$ — завади вимірювання, для яких задана їх апріорна множинна оцінка:

$$Z_n \in Z = \left\{ Z : \left| z_i \right| \le \delta_i = const;\ i = \overline{1;m} \right\}. \tag{4}$$

де z_i — i-й елемент вектора Z; δ_i — центрована похибка ідентифікації.

Для початкового стану X_0 задана його апріорна оцінка: $x_0 \in X_0$, де X_0 — обмежена випукла множина. Для рівняння стану (1) визначимо прогнозну оцінку вектора стану $\tilde{X}_{n+1}$, яка випливає з виразу (3) одним кроком вперед:

$$X_{n+1} \in \tilde{X}_{n+1} = Y_{n+1} - Z, \tag{5}$$

вираз (5) визначає гарантовану прогнозну оцінку X_{n+1} вектора X_n у вигляді

$$X_{n+1} \in \tilde{X}_{n+1} = AX_n + BU_{n+1}, \tag{6}$$

оскільки матриці А та вектор В задані точно.

Порівнюючи вирази (1) та (6), бачимо, що в (6) присутня операція лінійного перетворення матриці А у множину X_n.

З двох непротирічних (незаперечних) оцінок (5) та (6) кінцево отримаємо нову апостеріорну оцінку:

$$X_{n+1} = \tilde{X}_{n+1} \cap X_n = \left(Y_{n+1} - Z \right) \cap \left(AX_n + BU_n \right). \tag{7}$$

Розглянемо більш загальний випадок, коли замість рівняння (1) у разі дії неконтрольованих завад рівняння оцінки стану набуде такого вигляду:

$$X_{n+1} = AX_n + BU_n + Rf_n. \tag{8}$$

Для рівняння (8) за наявності дії завад уточнимо рівняння виходу

$$Y_n = L^T U_n, \tag{9}$$

де E — операція транспонування; U_n — m-вимірний вектор керування; L — m-вимірний вектор постійних, але невідомих параметрів, для якого задана лише його апріорна оцінка $L \in L_0$, де L_0 — обмежена множина.

Скалярний вихід об’єкта Y_n вимірюємо з адитивною завадою f_n, а замість точного значення Y_n дослідник має таке рівняння:

$$Z_n = Y_n + f_n. \tag{10}$$

Рівняння (10) схоже на вираз (5). Різниця полягає в одному такті.

Виміряні значення (9) з урахуванням (10) визначають множинну оцінку $\tilde{L}_n$ вектора L у вигляді множини

$$L \in \tilde{L}_n = \left\{ L : \left| U_n^T L - Z_n \right| \le \Delta \right\}, \tag{11}$$

де Δ — нецентрована похибка ідентифікації.

Співвідношення (11) у просторі параметрів визначає гіперполосу шириною

$$\rho_n = \pm 2\Delta \left\| U_n \right\|^{-1}. \tag{12}$$

Якщо на попередньому кроці ми мали оцінку

$$L \in L_{n-1}, \tag{13}$$

а для $n=1$ такою оцінкою є L_0 , то з двох несуперечливих оцінок (11) та (13) отримаємо нову апостеріорну оцінку

$$L \in L_n = \tilde{L} \bigcap L_{n-1} . \tag{14}$$

Якщо апріорна оцінка L_0 є опуклим багатогранником, то враховуючи, що клас опуклих багатогранників замкнений відносно операції перетину множин, вся послідовність L_n — це опуклі багатогранники.

Саме тут доцільно використати результат, що опублікований у періодичному виданні [4]. Він задовольняє всі вимоги нашого прикладного об'єкта — ідентифікації електричних навантажень сільськогосподарських підприємств. У [4] наведено опис пакета прикладних програм Interval-Set Analysis Matlab Toolbox для стандартних комп'ютерів, що реалізують операцію (14). З точністю означень описана вище [3] процедура множинної ідентифікації переноситься на перебудову гарантованих оцінок параметрів лінійних систем виду [8]. До цих пір розглядалося питання послідовної та роздільної оцінки векторів стану та параметрів досліджуваної системи. Зараз розглянемо ще одне питання нашої публікації: одночасне оцінювання векторів стану та параметрів. Для вектора A_m та скаляра b задамо апріорні їх оцінки:

$$A_m \in A_0 ; \;\; b \in b_0 , \tag{15}$$

де A_0 — опукла обмежена множина; b_0 — обмежений інтервал.

Введемо узагальнений вектор параметрів систем (8) та (15), який має апріорну оцінку.

$$L_0 = A_0 \cdot b_0 . \tag{16}$$

Необхідно для входів U_n , виходів Y_n уточнити грубу апріорну оцінку (16).

Для виміряних величин U_n , X_n , X_{n+1} отримаємо поточну оцінку вектора параметрів L у вигляді

$$L \in \tilde{L}_{n+1} = \left\{ L : \left| X_n^T A_m + U_n b - X_{m,n+1} \right| \le \Delta \right\} , \tag{17}$$

де $X_{m,n+1}$ — m–та компонента вектора X_{n+1} , якщо на n-му кроці для вектора L була оцінка

$$L \in L_n , \tag{18}$$

то тоді з цих двох несуперечливих оцінок (17) та (18) отримаємо нову апостеріорну оцінку

$$L \in L_{n+1} = \tilde{L}_{n+1} \cap L_n , \tag{19}$$

що з точністю до означень збігається з вищеописаною процедурою ідентифікації.

Далі будемо дотримуватись загальної схеми одночасних оцінок векторів стану X_n та оцінок параметрів L_n : отримаємо відповідні результати, визначимо прогнозну $\overline{X}_{n+1}$ оцінку вектора стану X_{n+1} у вигляді

$$\overline{X}_{n+1} = \bigcup_{\substack{x_n \in X_n \\ A \in A_n \\ B \in B_n \\ f \in f_n}} \left(AX_n + BU_n + Rf_n \right); \tag{20}$$

$$L_n = A_n \cdot b_n .$$

Після вимірювання вектора Y_{n+1} (5) отримано поточну оцінку $X_{n+1} \in \tilde{X}_{n+1}$. Наявність (5) дозволяє покращити оцінку параметрів вектора L:

$$\tilde{L}_{n+1} = \bigcup_{\substack{Z_{m,\,n+1} \in Z \\ x_n \in X \\ f \in f_n}} \left[A_m^T X_n + bU_n + f - \left(Y_{m,n+1} - Z_{m,n+1} \right) = 0 \right], \tag{22}$$

де $Y_{m,\,n+1}$ та $Z_{m,\,n+1}$ — m-ті компоненти векторів Y_{n+1} та Z_{n+1}.

З двох непротирічних оцінок L_n та $\tilde{L}_{n+1}$ отримаємо апостеріорну оцінку у вигляді

$$L \in \tilde{L}_{n+1} = \tilde{L}_{n+1} \cap L_n, \tag{23}$$

індикатором кінця розрахунків підберемо ε — задану константу, яка характеризує непокращену оцінку, яка має вигляд

$$\frac{D(L_{n\text{-}1}) - D(L_n)}{D(L_n)} \le \varepsilon, \tag{24}$$

де $D(L_n)$ — діаметр множини L_n.

Автори дійшли необхідності синтезу оптимального управління (8). Нехай управління класом систем (8) має здійснюватись на такому достатньо великому інтервалі часу N_1, де можна припустити, що $N \to \infty$. Наявність невизначеності щодо зміни в часі збурень, що діють як на об'єкт управління, так і на його параметри, не дозволяють ставити задачу мінімізації функціонала

$$\gamma_N = \lim_{N \to \infty} \frac{1}{N} \sum_{n=0}^{N} \omega(X_n, U_n), \tag{25}$$

де $\omega(\cdot)$ — позитивно визначена скалярна функція, що обчислюється впродовж траєкторії руху системи (8).

Оскільки в розглянутих умовах синтезована замкнута система управління в кращому випадку може бути дисипативною, тобто гранично обмеженою системою, то тут доцільною є оцінка якості, що має мінімальну інваріантну множину, яка є аналогом дисперсії, що широко використовується в стохастичних динамічних системах [5]. Враховуючи вказані труднощі, для прикладного об'єкта обмежимося розглядом синтезу замкнутого лінійного управління:

$$U_n = C_n X_n, \ m = 0, 1, 2..., \tag{26}$$

де C_n — шукана послідовність m-вимірних векторів.

Враховуючи, що величина управління обмежена, то лінійний закон (26) справедливий лише на обмеженій області Ω фазового простору, тоді для прикладного об'єкта, що розглядається використаємо вираз

$$U_n = \phi\left(C^T X_n\right) = \left\{ \begin{array}{l} C^T X_n, \ \text{якщо} \left|C^T X_n\right| \le \sigma; \\ \sigma \cdot \operatorname{sign} C^T X_n, \ \text{якщо} \left|C^T X_n\right| > \sigma. \end{array} \right\} \tag{27}$$

Зважаючи на (8) та (26), отримаємо замкнуту систему у вигляді рівняння

$$X_{n+1} = H(C_n) X_n + Rf_n, \ \text{де} \ H(\cdot) = A + BC_n. \tag{28}$$

Для того, щоб визначити най песимістичніший варіант з позиції конструктора—прикладника (практика) вибір невідомого вектора L з L_0, тобто отримати гарантований результат, здійснимо послідовність віртуальних експериментів над класом об'єктів (8) та (28). Будемо діяти до тих пір, доки не отримаємо необхідний результат.

Перейдемо до розгляду заключного питання цієї публікації — розгляду синтезу системи управління прикладним об'єктом у безперервному варіанті його функціонування. Виходячи з міркувань (1), (2), З'являється можливість розглянути поведінку об'єкта як у дискретному, так і у безперервному варіанті. На думку авторів, під час проектування замкненої системи управління більш наглядним є її безперервний варіант [5].

Дослідження авторів прикладного об’єкта вказують на відсутність точних та повних знань про об’єкт управління (8), або (1), (2). Якщо тільки *m* вихідних змінних доступні для спостереження

$$Y(t)=C(t)\,X(t)\,, \tag{29}$$

причому для матриці С $m<n$. Початковий фазовий вектор необхідно оцінити. Це можна здійснити за допомогою слідкувального пристрою, алгоритм роботи якого описується математичною моделлю

$$\frac{d\widehat{X}(t)}{dt}=A(t)\widehat{X}(t)+BU(t)+\mathrm{K}(t)\Big[\mathrm{Y}(t)-C(t)\widehat{X}(t)\Big]. \tag{30}$$

Для того, щоб отримати відповідне диференціальне рівняння для похибки слідкування $\tilde{X}(t)=\Big[\mathrm{X}(t)-C(t)\,\tilde{X}(t)\Big]$, віднявши від спостережень (30) рівняння (2), отримаємо:

$$\frac{d\tilde{X}(t)}{dt}=A(t)\,\tilde{X}(t)+K(t)\Big[Y(t)-C(t)\,\tilde{X}(t)\Big]. \tag{31}$$

Використавши (29) та об’єднавши члени з $\tilde{X}(t)$, отримаємо:

$$\frac{d\tilde{X}(t)}{dt}=\Big[A(t)-K(t)C(t)\Big]\tilde{X}(t)\,. \tag{32}$$

Слідкувальний пристрій (30) введений тепер між вимірюваною величиною $Y(t)$ та входом регулятора. Регулятор, у свою чергу, замість зв’язку з вектором стану залежить від його оцінки

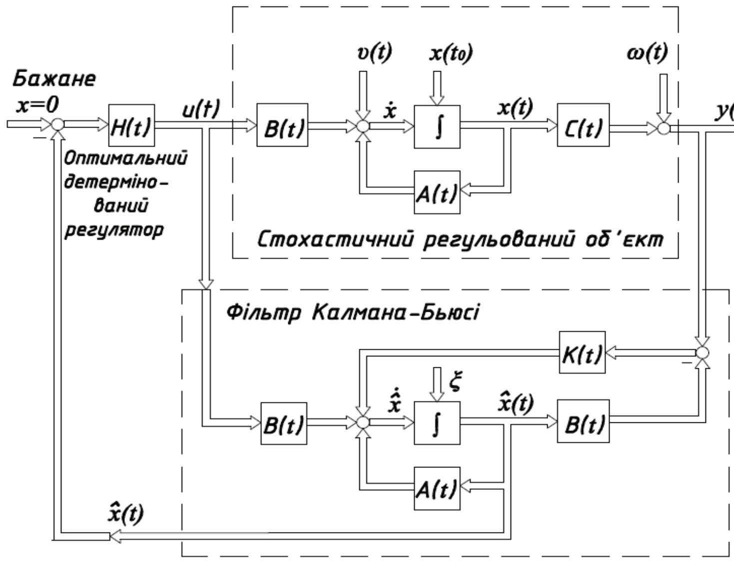
$$U(t)=-H(t)\widehat{X}(t). \tag{33}$$

Таким чином, пропускаючи деякі проміжні перетворення, отримано контур, що складається з об’єкта, слідкувального пристрою та регулятора, показаних на рисунку.

Після перетворень, з урахуванням виразів (30) і (31) отримаємо:

$$\begin{bmatrix} X(t) \\ \tilde{X}(t) \end{bmatrix}\frac{d}{dt}=\begin{bmatrix} A(t)-B(t)H(t) & B(t)H(t) \\ 0 & A(t)-K(t)C(t) \end{bmatrix}\cdot\begin{bmatrix} X(t) \\ \tilde{X}(t) \end{bmatrix}+\begin{bmatrix} I \\ I \end{bmatrix}\upsilon+\begin{bmatrix} 0 \\ -K \end{bmatrix}. \tag{34}$$

На рис. 1 показана лінійна оптимальна стохастична система ідентифікації і управління електричними навантаженнями сільськогосподарських підприємств, яка містить: оптимальний детермінований регулятор, стохастичний регульований об’єкт, фільтр Калмана-Бьюсі.



Лінійна оптимальна стохастична система ідентифікації і управління електричними навантаженнями сільськогосподарських підприємств

Таким чином, розроблено триступеневу задачу отримання гарантованої оцінки дискретно-неперервної ідентифікації та управління електричними навантаженнями.

Висновки

Запропоновано та розроблено триетапну модель отримання гарантованих оцінок ідентифікації та управління електричних навантажень сільськогосподарських підприємств, де на першому етапі розглянуто питання послідовної та роздільної оцінок векторів стану і параметрів досліджуваної системи, на другому етапі розглянуто питання одночасного оцінювання векторів стану та параметрів електричних навантажень. На третьому етапі розглянуто синтез стохастичної системи ідентифікації і управління електричних навантажень сільськогосподарських підприємств у безперервному варіанті їх функціонування. Підкреслимо, що розглянутий синтез третього етапу має свої переваги перед класичними гарантованими оцінками.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. Цыпкин Я. З. Основы информационной теории идентификации / Я. З. Цыпкин. — М. : Наука, 1984. — 320 с.
2. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя / под. ред. Я. З. Цыпкина. ; пер. с англ. — М. : Наука, 1991. — 432 с.
3. Кунцевич В. М. Управление в условия неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации / В. М. Кунцевич. — К. : Наукова думка, 2006. — 264 с.
4. Зелык Я. И. Моделирование и идентификация объектов управления с применением Interval-Set Analysis Matlab Toolbox / Я. И. Зелык, М. М. Лычак, В. Н. Шевченко // Проблемы управления и информатики. — 2003. — № 2. — С. 42—57.
5. Браттер К. Фильтр Калмана-Бьюси / К. Браммер, Г. Зиффлинг ; пер. с нем. — М. : Наука, 1982. — 2000 с.

Рекомендована кафедрою електричних станцій та систем

Стаття надійшла до редакції 12.11.12
Рекомендована до друку 25.11.12

Лисогор Василь Микитович — професор, ***Рубаненко Олена Олександрівна*** — старший викладач, ***Єленіч Микола Павлович*** — старший викладач.

Кафедра тракторів, автомобілів і електротехнічних систем, Вінницький національний аграрний університет, Вінниця