

**АЛГОРИТМІЧНА МОДЕЛЬ ВИПАДКОВОГО ПОШУКУ ЗАДАЧ ІДЕНТИФІКАЦІЇ
БАГАТОСТАДІЙНОГО ТЕХНОЛОГІЧНОГО ПРОЦЕСУ**

Запропонована і реалізована алгоритмічна модель випадкового пошуку в задачах ідентифікації БСТП, яка відрізняється від відомих [1, 2] двома різновидами: взаємодії упорядкованого набору структурних одиниць, взаємодії усієї системи на чолі автоматизованої підтримки рішень, з частково упорядкованими критеріями якості функціонування системи.

Предложена и реализована алгоритмическая модель случайного поиска в задачах идентификации МСТП, которая отличается от известных [1] двумя разновидностями: взаимодействия упорядоченного набора структурных единиц, взаимодействия всей системы, во главе автоматизированной поддержки решений, с частично упорядоченными критериями качества функционирования системы.

Offered and realized algorithmic model of random search in the tasks of authentication of STP, which differs from known [1] two varieties: co-operations of well-organized set of morphons, cooperations of all system, at the head of the automated support of decisions, with the partly well-organized criteria of quality of functioning of the system.

Обґрунтування напрямків досліджень. На сьогоднішній день широке розповсюдження отримали сучасні інформаційні технології розв'язання задач ідентифікації складних об'єктів. Розроблені математичні моделі ідентифікації складних технічних, технологічних, економічних систем.

Проте, принципово не розроблені математичні моделі ідентифікації багатадійних технологічних процесів (БСТП), які широко розповсюджені у різних галузях народного господарства та чекають свого повного чи часткового розв'язання. Складність задач ідентифікації заключається в невизначених умовах міжстадійних стиків, які відомими методами не розв'язані.

Підсумовуючи сказане, задача створення алгоритмічної моделі випадкового пошуку задач ідентифікації БСТП є актуальною.

Аналіз останніх досліджень [1, 2] є першим у світовій літературі досвідом наскрізного викладення сучасних принципів, підходів, методів моделювання функцій управління складних формалізуючих об'єктів різної фізичної природи – технічних, технологічних, економічних. В [3] викладені принципи розробки алгоритмів таким чином, що вони можуть бути використані як універсальні підходи для широкого діапазону задач теорії і практики взагалі. В кінці розроблені алгоритми з використанням нового підходу щодо класифікації методів ідентифікації системи.

Мета. Розробити алгоритмічну модель випадкового пошуку в задачах ідентифікації БСТП, яка відрізняється від відомих [1, 2] двома різновидами: взаємодії упорядкованого набору структурних одиниць, взаємодії усієї системи на чолі автоматизованої підтримки рішень, з частково упорядкованими критеріями якості функціонування системи.

Основний результат.

Задачі ідентифікації БСТП являються пріоритетними в розробці алгоритмічних моделей цього класу об'єктів.

Задача ідентифікації нелінійних динамічних систем до яких відносяться БСТП звичайно формулюється як задача синтезу оператора $F(\cdot)$, що найкращим чином зв'яже спостереження входу та виходу об'єкта:

$$I = \langle x(t), y(t) \rangle \quad (0 \leq t \leq T) \quad (1)$$

Критерій ефективності $Q(F)$ оператора $F(\cdot)$ передбачається заданим, наприклад: у вигляді середньоквадратичного відхилення:

$$Q(F) = \int_0^T F[x(t) - y(t)]^2 h(t) dt \quad (2)$$

або максимальної похибки:

$$Q(F) = \max_{0 \leq t \leq T} F[x(t) - y(t)]h(t), \quad (3)$$

де $h(t) > 0$ – вагова функція задачі, враховуючи інформативність вимірювально вибірки (1) в окремі моменти часу. При відсутності інформації про інформативність I природно вважати, що $h(t) = 1$.

Таким чином, задача ідентифікації оператора $F(\cdot)$ зводиться до задачі мінімізації критерію ефективності шляхом вибору відповідного оператора

$$Q(F) \rightarrow \min_{F \in \Omega} F^*(\cdot), \quad (4)$$

де Ω – задана множина допустимих операторів, а F^* – оптимальний оператор, що вирішує задачу ідентифікації.

Але в такому загальному вигляді задачу ідентифікації вирішувати дуже незручно. Її потрібно деком

позувати на задачу структурної та параметричної оцінки ідентифікації. Для цього представимо оператор $F(\cdot)$ у вигляді упорядкованої пари:

$$F = \langle S, C \rangle, \quad (5)$$

де S – структура, а $c = (c_1, \dots, c_{k_s})$ – параметри цього оператора, K_S – число параметрів. Тепер задачу ідентифікації (4) можна представити у вигляді:

$$Q(S, C) \rightarrow \min_{S \in \Phi} \min_{C \in \Theta_S} \Rightarrow \langle S^*, C_S^* \rangle = F^*(\cdot), \quad (6)$$

де Φ – множина допустимих структур ідентифікує мого оператора $F(\cdot)$, Θ_S – множина допустимих значень параметрів структури S , S^* – оптимальна структура, C_S^* – оптимальні параметри цієї структури, що утворюють ідентифікований оператор $F^*(\cdot)$. Як видно, задача оцінки та ідентифікації зводиться до організації пошуку оптимальної структури та оптимальних значень параметрів.

Цей пошук в складних випадках доречно виконувати рекурентно, тобто:

$$F_{N+1}(\cdot) = F_N(\cdot) + \Delta F_{N+1}(\cdot), \quad (7)$$

де F_N – оператор на N -му кроці пошуку, а ΔF_{N+1} – зміна цього оператора. Процес організації такої покрокової зміни, в результаті якого вирішується задача (4), відбувається в відповідності з алгоритмом пошуку

$$\Delta F_{N+1} = A(F_N, I). \quad (8)$$

Таким чином, задача ефективної ідентифікації зводиться до вибору раціонального алгоритму $A(\cdot)$, який би вирішував задачу (4), тобто

$$\lim_{N \rightarrow \infty} F_N = \tilde{F}^*(\cdot), \quad (9)$$

де $\tilde{F}^*(\cdot)$ – раціональний оператор, досить близький до $F^*(\cdot)$, але отриманий при розумних затратах засобів оптимізації.

Будемо розглядати ті алгоритми $A(\cdot)$, в яких спеціально введений елемент випадковості, тобто алгоритми випадкового пошуку. Вибір алгоритмів випадкового пошуку для ідентифікації пов'язаний з його окремими перевагами в порівнянні з регулярними алгоритмами розв'язання задач ідентифікації. Визначимо область задач, де доцільно застосовувати алгоритми випадкового пошуку. Ця область пов'язана, по-перше з багатоекстремальністю функції нев'язки, так як тільки випадковий пошук є надійним та ефективним методом рекурентного рішення багатоекстремальних задач. З іншого боку, доцільність застосування випадкового пошуку пов'язана з високою варіабельністю $\Delta F(\cdot)$ (в приватному випадку, з його розмірністю). Доведено, що при високій варіабельності приросту випадковий пошук перевершує детерміновані за швидкодією.

Розглянемо з початку параметричний пошук, коли структура визначена. В цьому випадку задача ідентифікації зводиться до стандартної задачі багато параметричної оптимізації:

$$Q(c) \rightarrow \min_{c \in \Theta_S} \Rightarrow C^* \quad (10)$$

та ідентифікований оператор представляється у вигляді

$$F^*(x) = F_S(x, C^*), \quad (11)$$

де F_S – оператор заданої структури S , параметри якого C винесені в змінні. В цьому випадку мінімізуєма функція $Q(c)$, як правило, має багатоекстремальний характер та її мінімізація повинна виконуватися методами випадкового глобального пошуку.

Наведемо приклад. Нехай оператор $F(\cdot)$ лінійний відносно ідентифікованих параметрів C :

$$S: \frac{dy}{dt} = \dot{Y} = \sum_{i=1}^k C_i \varphi_i(Y, X), \quad (12)$$

де

$$Y = (y^{(p-1)}, \dots, \dot{y}, y) = (y_1, \dots, y_p), \quad x = (x^{(l)}, \dots, \dot{x}, x) \quad (13)$$

- вектор похідних, $\{\varphi_i(Y, X)\}$ – множина обраної системи векторних функцій двох векторних аргументів Y та X . Синтез такої системи відбувається на етапі визначення структури S , оператора $F(\cdot)$ та звичайно представляє серйозні труднощі. В розглядуваному лінійному випадку задача (7) може бути зведена до розв'язання системи лінійних алгебраїчних рівнянь, якщо в якості мінімізованої функції $Q(c)$ взяти не (2), а

$$Q(c) = \int_0^T (\dot{Y}(t) - \sum_{i=1}^K C_i \varphi_i(Y(t), X(t)))^2 h(t) dt \rightarrow \min_c, \quad (14)$$

де використані вимірювання значень входу та виходу об'єкта:

$$X = (x^{(l)}, \dots, \dot{x}, x), \quad Y = (y^{(p-1)}, \dots, \dot{y}, y) = (y_1, \dots, y_p), \quad (15)$$

отримані підстановкою (1) в (12) та (13). Для розв'язання задачі (14) необхідно p -кратне чисельне диференціювання. (При використанні критерію (2) достатньо $p-1$ – кратного диференціювання).

Однак, навіть для лінійного випадку (11) функція нев'язки (2) нелінійна відносно ідентифікованих параметрів, та має багатоекстремальний характер, особливо при:

- істотного обмеження вибірки (2);
- неспівпадіння структури (наприклад, порядку) об'єкту та моделі;
- наявності транспортного запізнення.

У випадку, якщо оператор $F(\cdot)$ нелінійний відносно ідентифікованих параметрів, тобто

$$\dot{Y} = \psi(Y, X, C), \quad (16)$$

де ψ – задана нелінійна вектор-функція, то задача параметричної ідентифікації зводиться до мінімізації багато екстремальної функції (7), що практично можливо здійснити лише методами випадкового пошуку. Нелінійність оператора $F(\cdot)$ відносно ідентифікованих параметрів додає ще більшу багато екстремальність.

Таким чином, процес визначення параметрів при фіксованій структурі S оператора $F(\cdot)$ призводить до необхідності застосування випадкового пошуку. Ще більша необхідність у випадковому пошуку виникає в задачах структурної ідентифікації.

Процес ідентифікації структури пов'язаний з варіацією оператора $F(\cdot)$, зі зміною системи функцій розкладу множини $\{\varphi_{ui}(Y, X)\}$, тобто з вибором такої системи, яка б найкращим чином відповідала б ідентифікованому об'єкту. Але такий підхід вимагає наступної параметричної ідентифікації параметрів C . Ці процедури можна поєднати, якщо уявити праву частину рівняння об'єкта в вигляді вектор-функції $\psi(Y, X)$, що однозначно визначається опорною послідовністю

$$C = \langle Y^0, X_i^0, \psi_i^0 \rangle \quad (i = 1, \dots, q), \quad (17)$$

де ψ_i^0 – векторне значення цієї функції при $X = X_i^0$ та $Y = Y_i^0$. Задача, таким чином, зводиться до побудови такої опорної послідовності (17) та правила визначення ψ для будь-яких значень пар (Y, X) (17).

Почнемо з останньої задачі – визначення функції ψ по опорній послідовності (17). це будемо робити двояким чином. Метод зважування передбачає обчислення $\psi(\cdot)$, як зваженої нормованої суми:

$$\psi(Y, X, C) = \frac{\sum_{i=1}^q \psi_i^0 \nu(|Z_i^0 - Z|)}{\sum_{i=1}^q \nu(|Z_i^0 - Z|)}, \quad (18)$$

де $Z = (Y, X)_{\bar{p}+l+1}$ – мірний вектор; $Z_i^0 = (Y_i^0, X_i^0)$; $\nu(\cdot)$ – скалярна вагова функція скалярного аргументу, яка володіє наступними властивостями: вона невід'ємна, максимальна з початку координат, монотонно вбиває та прямує до нуля. З цього слідує, завдання вагової функції $\nu(\cdot)$ та опорної послідовності (17) однозначно ідентифікує структуру та параметри моделі (16).

Метод багатомірної лінійної екстраполяції дозволяє визначити ψ інакше:

$$\psi(Y, X, C) = \sum_{i=1}^K \lambda_i \psi_{ji}^0, \quad (19)$$

де коефіцієнти $\lambda_i (i = 1, \dots, K \leq p + 1)$ є рішенням наступної мінімізації задачі

$$Q(Z - \sum_{i=1}^k \lambda_i Z_{ji}^0) \rightarrow \min, \quad \sum_{i=1}^k \lambda_i = 1, \quad (20)$$

де $Q(\cdot)$ – скалярна функція векторного аргументу, яка володіє властивостями відстані, наприклад, $Q(Z) = |Z|^2$. Вибір числа точок $Z_{ji}^0 (i = 1, \dots, k)$ опорної послідовності (17), та використаних для (20), може виконуватися різним чином, наприклад, це можуть бути k найближчих до Z точок за критерієм мінімуму відстані Q і так далі. Як видно, завдання функції $Q(\cdot)$ та опорної послідовності (17) однозначно визначають функцію (19), а з цього виходить, що ідентифікують структуру та параметри моделі.

Тепер задача ідентифікації зведена до синтезу опорної послідовності (17), що здійснюється шляхом мінімізації функції нев'язки виду (2) або

$$Q(C) = \int_0^T [\dot{Y}(t) - \psi(Y(t), X(t), C)]^2 h(t) dt \rightarrow \min_{C \in R^{q(2p+l+1)}}, \quad (21)$$

де $q(2p+l+1)$ – розмірність вектора ідентифікуємих параметрів C . Замітимо, що число ідентифікуємих параметрів C можна значно скоротити, якщо фіксувати визначені значення опорної послідовності (17), наприклад беручи їх з початкових відстежувань (1).

Висновки. Запропонована і реалізована алгоритмічна модель випадкового пошуку в задачах ідентифікації БСТП, яка відрізняється від відомих [1, 2] двома різновидами: взаємодії упорядкованого набору структурних одиниць, взаємодії усієї системи на чолі автоматизованої підтримки рішень, з частково упорядкованими критеріями якості функціонування системи.

Література

1. Растрьгин Л.А. Стохастические методы поиска. – М.: Наука, 1968. – 376 с.
2. Растрьгин Л.А. Системы экстремального управления. – М.: Наука. – 630 с.
3. Левитин А.В. Алгоритмы: введение в разработку и анализ: Пер. с англ. С.Г. Тригуб, И.В. Красикова. – М.: Изд. дом «Вильямс», 2006. – 576 с. – ISBN 5-8459-0987-2 (русск.)

Надійшла 7.12.2008 р.