

УДК 621.313

Войтенко В.П., к.т.н. Хоменко М.А., АСПІРАНТ

МЕТОДИ ІДЕНТИФІКАЦІЇ ПАРАМЕТРІВ ДВИГУНА ПОСТІЙНОГО СТРУМУ

Вступ

Параметри реальної промислової електромеханічної системи, складовою частиною, якою є двигун постійного струму, змінюються в процесі функціонування внаслідок різноманітних зовнішніх та внутрішніх факторів. У таких випадках класичний регулятор з постійними коефіцієнтами не може забезпечити задану якість функціонування системи. Це призводить до необхідності застосування більш складного адаптивного регулятора, коефіцієнти якого не постійні, а нелінійно залежать від параметрів об'єкту керування. Визначення цих параметрів і є задачею ідентифікації, яка застосовується в багатьох алгоритмах адаптивного керування.

У даній статті наведений аналіз використання відомих методів ідентифікації – частотного і регресійного – з метою з'ясування найбільш прийняттого метода для вирішення задачі ідентифікації параметрів двигуна постійного струму.

Частотні методи

Перші реалізовані методи ідентифікації були засновані на використанні частотних, ступінчастих та імпульсних сигналів. Дані методи можуть бути застосовані для лінійних або лінеаризованих процесів, для яких співвідношення вхід-вихід, одержані для одного типу вхідних сигналів, зберігаються для всіх інших [1]. Метою всіх частотних методів ідентифікації є отримання частотної передаточної функції ($G(j\omega)$). Як приклад розглянемо частотний метод, заснований на перетворенні Фур'є (на практиці – швидкого перетворення Фур'є).

Припустимо, досліджуваний об'єкт можна апроксимувати передаточною функцією:

$$W(p) = \frac{K}{p^{\text{int}}(a_n p^n + \dots + a_1 p + 1)}, \quad (1)$$

де K – коефіцієнт передачі;

int – порядок інтегратора ($\text{int}=0, 1, 2$);

n – порядок системи (з практичних міркувань $n \leq 5$).

Розглянемо інверсну передаточною функцію, припустивши $\text{int}=0$

$$W^{-1}(p) = b_n p^n + \dots + b_1 p + b_0; \quad (2)$$

де $b_0 = \frac{1}{K}$, $b_i = \frac{a_i}{K}$ ($i=1, 2, \dots, n$).

Реальна $u(\omega)$ і уявна $v(\omega)$ частини інверсної передаточної функції (з урахуванням $n \leq 5$) мають вигляд:

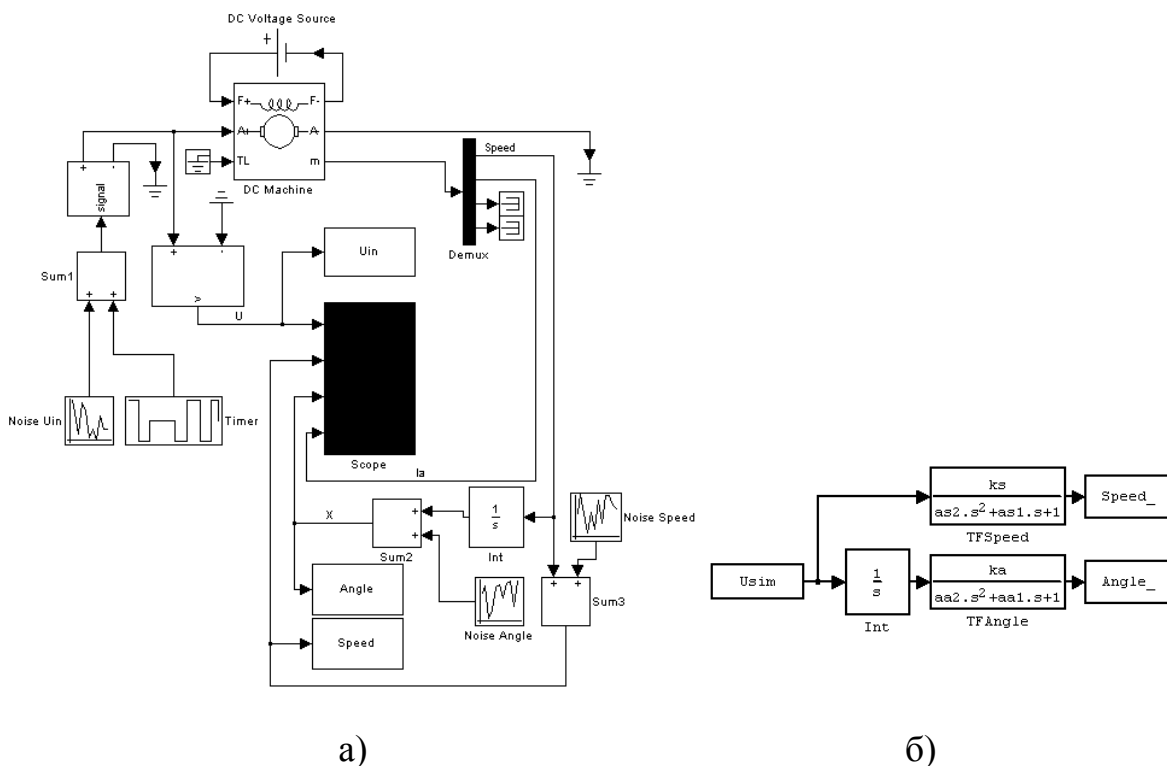
$$\begin{cases} u(\omega) = b_0 - b_2\omega^2 + b_4\omega^4, \\ v(\omega)/\omega = b_1 - b_3\omega^2 - b_5\omega^4. \end{cases} \quad (3)$$

Скориставшись методикою розрахунків, наведеною в [2], одержимо:

$$\begin{cases} c_1 m + c_2 \sum_{i=1}^m \omega_i^2 + c_3 \sum_{i=1}^m \omega_i^4 = \sum_{i=1}^m z_i, \\ c_1 \sum_{i=1}^m \omega_i^2 + c_2 \sum_{i=1}^m \omega_i^4 + c_3 \sum_{i=1}^m \omega_i^6 = \sum_{i=1}^m z_i \omega_i^2, \\ c_1 \sum_{i=1}^m \omega_i^4 + c_2 \sum_{i=1}^m \omega_i^6 + c_3 \sum_{i=1}^m \omega_i^8 = \sum_{i=1}^m z_i \omega_i^4. \end{cases} \quad (4)$$

Для знаходження коефіцієнтів $b_0 \dots b_5$ необхідно вирішити дві системи вигляду (4). Для першої системи, $z_i = u_i(\omega_i)$, $b_0 = c_1$, $b_2 = -c_2$, $b_4 = c_3$; для другої, $z_i = v_i(\omega_i)/\omega_i$, $b_1 = c_1$, $b_3 = -c_2$, $b_5 = c_3$. Зменшення порядку передаточної функції призводить до спрощення системи (4).

Тестування можливостей даного методу проводилося за допомогою моделювання в пакеті *Matlab 6.5*. Для збору даних використовувалась система, зображена на рисунку 1(а). Блоки *Timer*, *Noise Uin*, *Sum1*, *signal* моделюють тестову напругу керування двигуном постійного струму (блок –



а) система збору даних для ідентифікації; б) схема перевірки результатів ідентифікації

Рисунок 1 – Схеми моделювання

DC Machine). Блок *Noise Uin* моделює перешкоди, які присутні в напрузі керування у разі, коли двигун живиться від імпульсного джерела живлення. Блоки *Noise Angle* і *Noise Speed* моделюють перешкоди у вихідних сиг-

налах датчиків кута повороту та швидкості, відповідно. Блок *Uin* служить для збору відліків напруги керування, блок *Speed* зберігає інформацію про кутову швидкість ротора двигуна, а блок *Angle* – інформацію про кут повороту ротора. Дані з блоків *Uin*, *Speed*, *Angle* передаються програмі ідентифікації, що реалізує описаний вище частотний метод. Для перевірки результатів ідентифікації використовується модель, зображена на рисунку 1(б). Блок *Usim* є джерелом керуючого сигналу. Блоки *TFSpeed* та *Int*, *TFAngle* моделюють передаточні функції по швидкості і куту повороту, відповідно. Блоки *Speed_*, *Angle_* необхідні для передачі результатів перевірки програмі, що обчислює помилки ідентифікації та будує діаграми, зображені на рисунку 2.

Діаграми експерименту ідентифікації приведені на рисунку 2, де крива 1 – сигнал з виходу датчиків швидкості і кута повороту, 2 – вихідний сигнал, відновлений за результатами ідентифікації. Зліва від пунктирної лінії знаходяться дані, які використовувалися для ідентифікації, а справа –

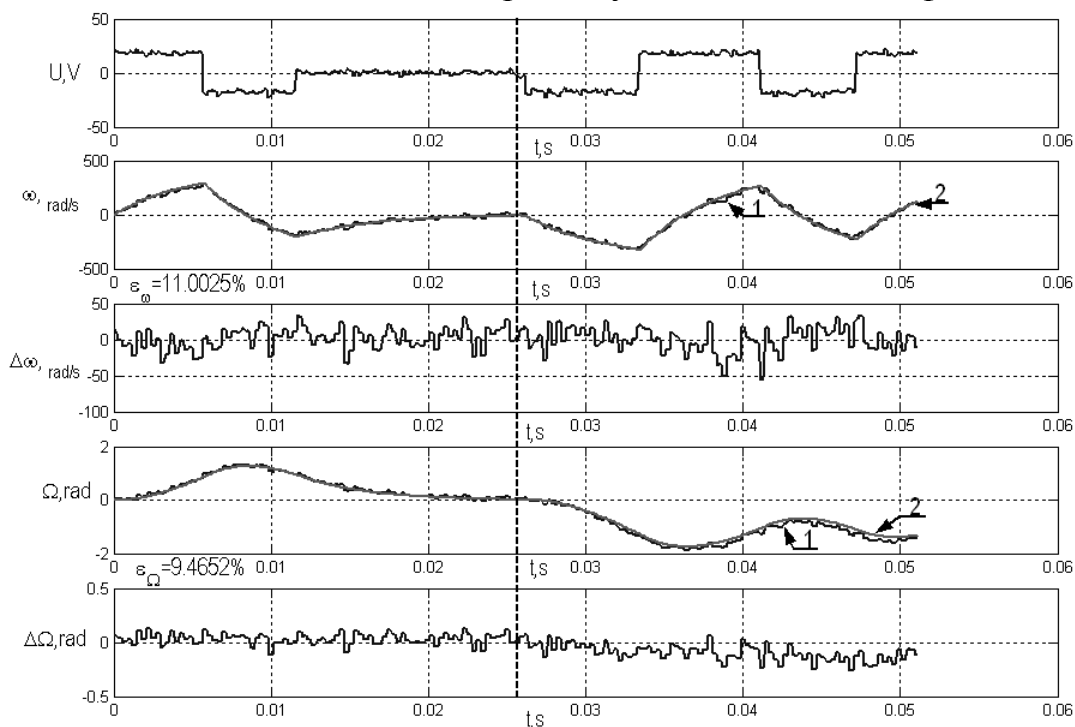


Рисунок 2 – Діаграми ідентифікації в умовах зашумленості вихідних сигналів

контрольні дані. Вони необхідні для перевірки результатів ідентифікації за межами тестової вибірки. Графічно помилки ідентифікації представлені на діаграмі (графіки $\Delta\omega$ і $\Delta\Omega$) а чисельне уявлення про помилку можна одержати, розрахувавши середню помилку (для кутової швидкості $\varepsilon_\omega = 11,0025\%$, для кута повороту $\varepsilon_\Omega = 9,4652\%$) за формулою:

$$\varepsilon_x = \frac{\sum_{i=1}^N |X - \tilde{X}|}{\sum_{i=1}^N |X|} \cdot 100\%; \quad (5)$$

де X - вихідна величина, отримана під час експерименту;

\tilde{X} - вихідна величина, розрахована за результатами ідентифікації;

N -кількість відліків.

Як видно з рисунка 2, спотворення вихідного сигналу слабо вплинули на ідентифікацію (криві 1 і 2 майже співпадають). Це можна пояснити тим, що шум більшою мірою спотворює високочастотну частину спектру сигналу і слабо впливає на низькочастотну ділянку. Оскільки для ідентифікації використовувався не весь спектр частотної передавальної функції, а лише його найбільш інформативна низькочастотна частина, то перешкоди не призвели до істотного впливу на точність ідентифікації.

Для даного метода визначення частотної передаточної функції при-
таманні наступні недоліки:

– наявність двох перетворень Фур'є (для вхідного і вихідного сигналів), що робить процедуру обчислень тривалою. Виключенням є випадок, коли вхідний сигнал заздалегідь відомий (тобто, відоме його частотне відображення), і для нього не потрібно обчислювати перетворення Фур'є;

– даний метод вимагає ділення двох комплексних величин для кожної частоти, що ускладнює процес обчислень.

Для коректного обчислення дискретного перетворення Фур'є необхідно, щоб кінцеві і початкові відліки сигналів не дуже відрізнялись, що не завжди можливо. Істотна відмінність кінцевих і початкових відліків призводить до розтікання спектру і спотворення результатів ідентифікації.

Регресійні методи

На відміну від частотних регресійні методи дозволяють проводити параметричне оцінювання системи в часовій області.

В якості вихідної інформації про систему використовуватимемо дискретні значення вхідного і вихідного сигналів системи. Прийmemo припущення, що система лінійна або може бути лінеаризована. Основна форма запису рівняння лінійної системи [3]:

$$x(n) = G(q)y(n) + H(q)e(n); \quad (6)$$

де q – оператор зсуву вперед, наприклад $qy(n) = y(n+1)$;

q^{-1} – оператор зсуву назад, наприклад $q^{-1}x(n) = x(n-1)$;

$y(n), x(n)$ – вхідний та вихідний сигнали системи;

$G(q)$ – передавальна функція лінійної системи;

$H(q)e(n)$ – перешкоди і шуми у вихідному сигналі;

$e(n)$ – послідовність взаємо незалежних випадкових величин з нульовим середнім (білий шум);

$H(q)$ – функція передачі фільтру.

Залежно від того, яким чином представлена передаточна функція системи і фільтру, розрізняють безліч моделей передаточних функцій [3]. У даному прикладі зупинимось на структурі моделі вихідної помилки (рисунок 3), оскільки вона найдостовірніше з фізичної точки зору описує походження шумової складової у вихідному сигналі досліджуваного об'єкту.

Різницеве рівняння для даної моделі за умови, що перешкоди – це бі-

лий шум, має вигляд [3]:

$$w(n) + f_1 w(n-1) + \dots + f_{n_f} w(n-n_f) = b_1 y(n-1) + \dots + b_{n_b} y(n-n_b), \quad (7)$$

$$x(n) = w(n) + e(n). \quad (8)$$

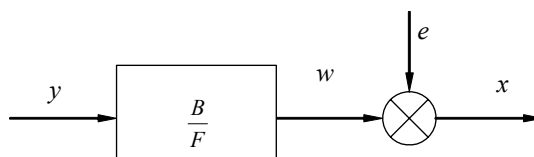


Рисунок 3 – Структура моделі вихідної помилки

Введемо позначення:

$$F(q) = 1 + f_1 q^{-1} + \dots + f_{m_f} q^{-m_f},$$

тоді модель має вигляд:

$$x(n) = \frac{B(q)}{F(q)} y(n) + e(n). \quad (9)$$

Для даної моделі вектор параметрів має вигляд:

$$\Theta = [b_1, b_2, \dots, b_{n_b}, f_1, f_2, \dots, f_{m_f}]^T. \quad (10)$$

Регресійний вектор має вигляд:

$$\phi(n) = [y(n-1), \dots, y(n-n_b), -w(n-1), \dots, -w(n-n_f)]^T. \quad (11)$$

Провісник має вигляд:

$$\tilde{x}(n, \Theta) = \frac{B(q)}{F(q)} y(n) = \phi^T(n) \Theta. \quad (12)$$

В даному випадку $H(q)=1$, а помилка прогнозу має вигляд:

$$\varepsilon(n, \Theta) = x(n) - \phi^T(n) \Theta. \quad (13)$$

Критеріальна функція для методу найменших квадратів [3]:

$$V_N(\Theta) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \frac{1}{2} [x(n) - \phi^T(n) \Theta]^2. \quad (14)$$

Мінімум даної функції може бути знайдено аналітично за умови, що існує вказана обернена матриця [3]:

$$\tilde{\Theta}_N = \arg \min V_N(\Theta) = \left[\frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \phi(n) \phi^T(n) \right]^{-1} \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \phi(n) x(n). \quad (15)$$

Для дослідження даного методу ідентифікації були використані ті ж моделі, що і для частотної ідентифікації (рисунок 1). Програма ідентифікації в даному випадку обчислює параметри моделі відповідно до рівняння (15). Слід зазначити, що зашумлені дані були заздалегідь пропущені через ФНЧ, що дозволило в результаті ідентифікації одержати не зміщені оцінки параметрів [3]. Результати тестування даного методу приведені на рисунках 4 та 5, де 1 – сигнали з виходу датчиків швидкості і кута повороту, 2 – сигнали швидкості і кута, відновлені за результатами ідентифікації.

Як видно з діаграм, даний метод дозволяє точніше, ніж частотний, оцінити параметри системи, оскільки при однаковому вхідному сигналі і параметрах моделі середня помилка ідентифікації по швидкості склала 10,0165% (рисунок 4), а по куту повороту помилка ідентифікації склала

6,5561% (рисунок 4).

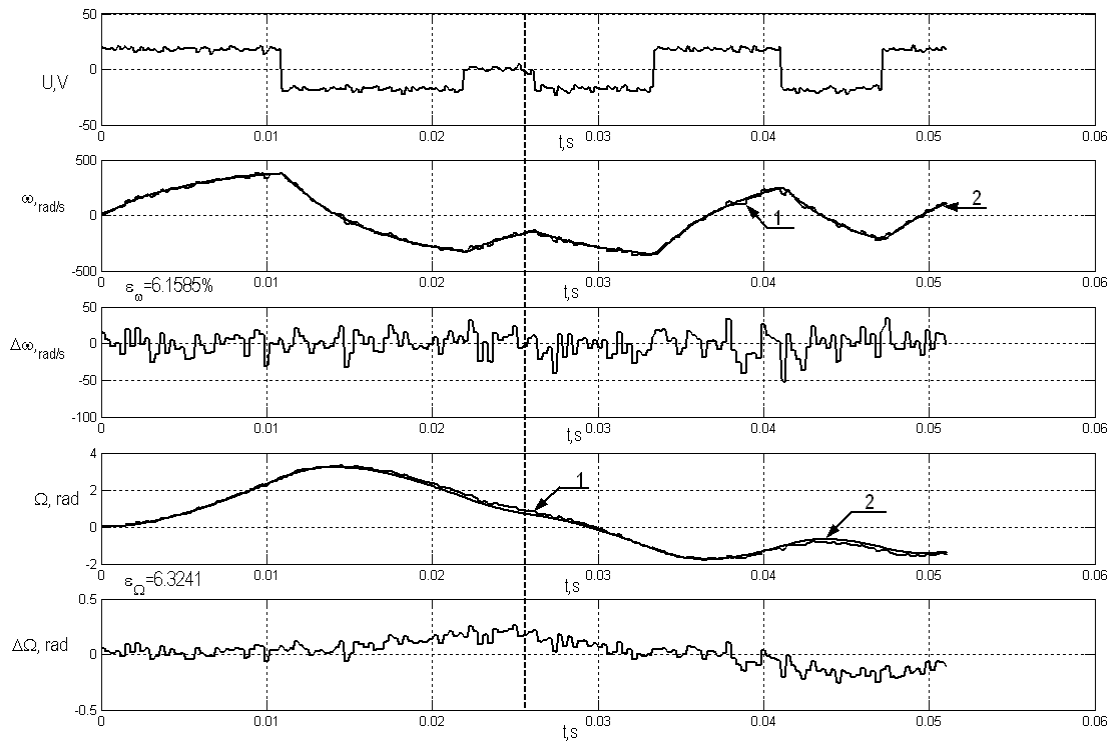


Рисунок 4 – Діаграми ідентифікації системи методом найменших квадратів

На рисунку 5 представлені діаграми ідентифікації для випадку, коли кінцеві і початкові відліки сигналів істотно відрізняються (початкові відлі-

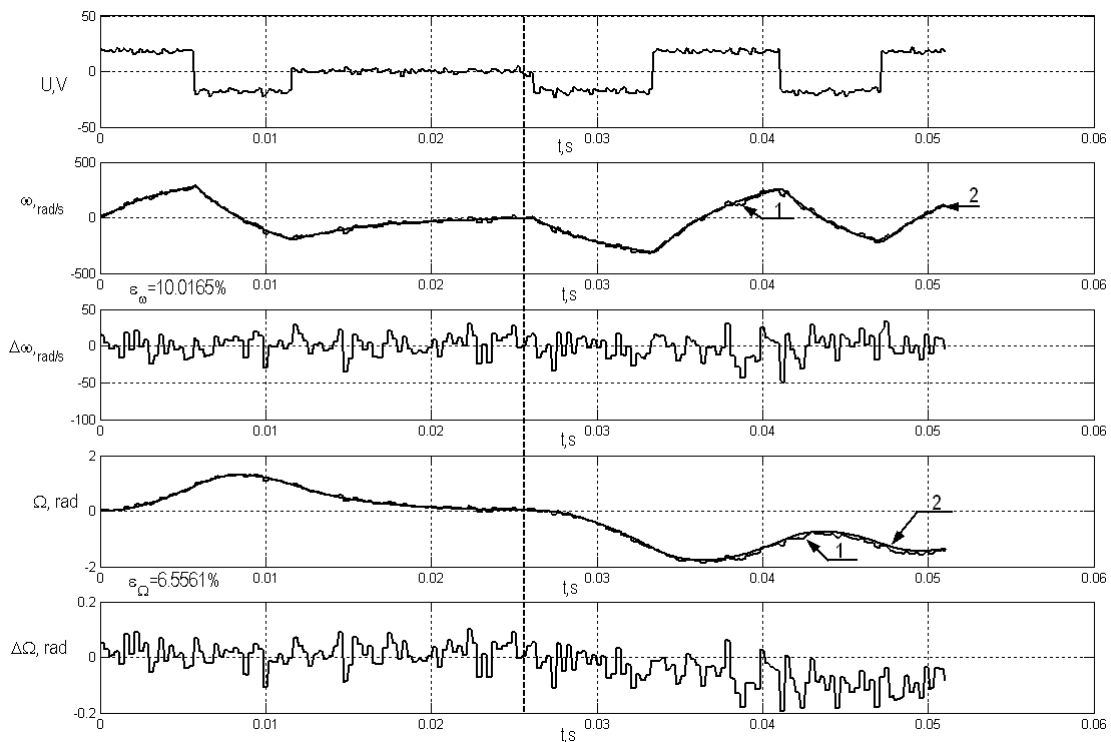


Рисунок 5 – Діаграми ідентифікації системи методом найменших квадратів у разі довільного вхідного сигналу

ки – в точці 0; кінцеві відліки – в точці перетину діаграм з пунктирною лінією). Очевидно, дана умова не є критичною для ідентифікації, як у разі частотного методу. Деяке зменшення середньої помилки (рисунок 5) в порівнянні з діаграмами на рисунку 4 пов'язане зі збільшенням співвідношення сигнал/шум.

Висновки

Перевагою частотного методу є нечутливість до перешкод, що полегшує його застосування в системах з аналоговими датчиками.

Недоліки частотного методу:

– вхідний і вихідний сигнали повинні бути затухаючими до країв на періоді дискретизації для запобігання розтікання спектру. Даний недолік утрудняє використання цього методу в системах з інтегратором і в системах з однополярним керуванням;

– необхідність застосування великої кількості таких операцій, як комплексне ділення, синус, косинус, множення. Даний недолік ускладнює застосування частотного методу в швидкодіючих системах.

Перевагою параметричного оцінювання за допомогою регресії є можливість працювати з різними видами вхідних і вихідних сигналів та застосовувати в системах з інтегратором і однополярним керуванням.

Недоліком розглянутого регресійного методу є необхідність попередньої фільтрації вхідних і вихідних даних, що збільшує об'єм необхідних обчислень.

Спираючись на дані моделювання, можна зробити висновок, що обидва методи підходять для ідентифікації параметрів двигуна постійного струму. Проте перевагу слід віддати регресійному методу найменших квадратів, оскільки він дозволяє працювати з вхідними і вихідними сигналами довільної форми.

ЛІТЕРАТУРА

1. Грон Д. Методы идентификации систем. Перевод с англ. В.А.Васильева, В.И.Лопатина. – М.: Мир, 1979.
2. Белова Д.А., Кузин Р.Е. Применение ЭВМ для анализа и синтеза автоматических систем управления. – М.: Энергия, 1979. – 264 с.
3. Льюнг Л. Идентификация систем. Теория для пользователя: Пер. с англ./ Под ред. Я. З. Цыпкина. – М.: Наука, 1991. – 432 с.