

# ПЕРСИСТНІСТЬ ЗБУДЖЕННЯ В СИСТЕМАХ АДАПТИВНОГО КЕРУВАННЯ ЕЛЕКТРОМЕХАНІЧНИМИ ОБ'ЄКТАМИ: ЧАСТИНА 1 – ТЕОРЕТИЧНІ ПОЛОЖЕННЯ

Пересада С.М., проф., д.т.н., Решетник В. С., магістрант  
НТУУ «КПІ», кафедра автоматизації електромеханічних систем та електроприводу

**Вступ.** Адаптивне керування в електромеханічних системах (ЕМС) з різними типами електричних двигунів застосовується для підвищення показників якості керування координатами в умовах параметричних та координатних збурень. Актуальність цього напрямку досліджень визначається переходом до використання в ЕМС електричних машин змінного струму, які є нелінійними багатовимірними об'єктами керування, що знаходяться під дією параметричних збурень і тому набагато складніші в керуванні у порівнянні з машинами постійного струму. Незважаючи на значні досягнення у цій галузі, методи ефективного адаптивного керування механічними і електричними координатами ЕМС з метою забезпечення високих динамічних і енергетичних показників знаходяться у стадії розвитку.

Одним із недостатньо вивчених питань у галузі адаптивного керування є вплив надлишкової параметризації (overparametrization) на асимптотичність оцінювання невідомих параметрів та визначення умов, за яких ця властивість забезпечується. Прикладами адаптивного керування, в яких для досягнення глобальної асимптотичної стійкості системи використано надлишкову параметризацію, є: адаптивне керування синхронним двигуном в умовах повної параметричної невизначеності [1], оцінювання параметрів асинхронного двигуна (АД) при ініціалізації системи [2], адаптивна ідентифікація активних опорів статора и ротора асинхронного двигуна [3] та багатьох інших.

**Метою роботи** є дослідження впливу надлишкової параметризації на асимптотичність оцінювання алгоритмів ідентифікації параметрів асинхронного двигуна.

**Матеріали дослідження.** Загальною теоретичною основою для доведення асимптотичної стійкості адаптивних систем є лема про персистентність збудження [4], [5], яка базується на використанні леми Барбалат. Нехай адаптивна система описується наступною системою диференціальних рівнянь:

$$\begin{aligned}\dot{x} &= Ax + W(t)z, \\ \dot{z} &= -\lambda W^T(t)Px;\end{aligned}\tag{1}$$

де  $x$  – вектор похибок оцінювання та регулювання,  $z$  – вектор похибок ідентифікації параметрів.

Якщо  $A$  матриця Гурвіца, що задовольняє рішенням рівняння Ляпунова  $A^T P + PA = -Q$ ,  $P = P^T > 0$ ,  $Q = Q^T > 0$ ;  $\lambda > 0$ ; матриця регресії  $W(t)$  обмежена з обмеженою першою похідною, а також

$$\int_t^{t+T} \mathbf{W}(\tau) \mathbf{W}(\tau)^T d\tau \geq k\mathbf{I} > 0, \quad (2)$$

тоді положення рівноваги  $(\mathbf{x}, \mathbf{z}) = 0$  є експоненційно стійким.

Вираз (2) визначає, так звану умову персистентності збудження (persistence of excitation [4], [5] – постійності збудження), при виконанні якої забезпечується асимптотичність ідентифікації параметрів  $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{z} = 0$ . Якщо умова (2) не виконується, то маємо  $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{x} = 0$  та  $\lim_{t \rightarrow \infty} \mathbf{W}(t)\mathbf{z} = 0$ .

Зазвичай, математичне визначення (2) малопродуктивне, якщо  $\mathbf{W}(t)$  не є скалярною величиною. З фізичної точки зору (2) визначає умови функціонування адаптивної системи, за яких вектор невідомих параметрів  $\mathbf{z}$  може бути ідентифікованим. Зазвичай ці умови базуються на фізичних властивостях електромеханічного об'єкта, коли параметр, що ідентифікується, впливає на поведінку вимірюваних змінних. Наприклад, момент інерції двигуна може бути ідентифікованим лише за умови прискорення ротора, при постійній швидкості це неможливо. Активний опір статора АД ідентифікується при наявності струму в обмотках статора, а активний опір ротора вимагає наявності змінного струму в роторі. Спостережуваність кутової швидкості на основі інформації про струми статора досягається в усіх режимах роботи АД за виключенням збудження постійним струмом.

Надлишкова параметризація – це, в більшості випадків, технологічний крок в математичній процедурі синтезу адаптивного алгоритму для доведення властивості глобальної асимптотичної стійкості. Це означає, наприклад, що для оцінки  $\mathbf{z} \in \mathbf{R}^q$  невідомих параметрів використовується кількість оцінок  $\hat{\mathbf{z}} \in \mathbf{R}^r$  з  $r > q$ . Синтез на основі надлишкової параметризації з метою досягнення властивості глобальності збільшує порядок адаптивної системи на  $(r-q)$ , що відповідним чином збільшує розмірність матриці регресії  $\mathbf{W}(t)$  та підвищує складність визначення умови персистентності збудження (2). Як результат, визначення умов ідентифікованості на основі аналізу фізичних властивостей електромеханічного об'єкту може не бути дійсним, тобто при надлишковій параметризації можлива втрата взаємозв'язку між фізичним розумінням ідентифікованості та його математичним формулюванням (2). Збільшення кількості оцінюваних параметрів для досягнення властивості глобальної асимптотичної стійкості додатково збільшує кількість коефіцієнтів налаштування алгоритму, а оскільки конструктивних процедур налаштування для нелінійних систем високого порядку не існує, то це ускладнює налаштування системи при її дослідженнях та впровадженні.

Рішення, які є глобально стійкими, дозволяють не приділяти суттєвої уваги визначенню початкових умов для параметрів ідентифікації, в той час, як локальна стійкість передбачає, що відхилення початкових значень від реальних мають бути «малими». З практичної точки зору важливо розуміти, чи отримуються переваги при спрощенні адаптивного алгоритму з досягненням лише локальної стійкості за рахунок відмови від надлишкової параметризації. Очевидно, що загальної відповіді на це питання не існує, а висновок можливо

отримати на основі дослідження конкретного алгоритму для фізично існуючих умов функціонування ЕМС. Наприклад, перший теоретично доведений алгоритм ідентифікації активного опору ротора асинхронного двигуна з властивістю глобальної асимптотичної стійкості отримано в [6]. Він представляє собою динамічну систему 11-го порядку з матрицею регресії  $W(t) \in \mathbf{R}^{2 \times 5}$  і має чотири коефіцієнта налаштування. Пізніше в [7] синтезовано адаптивний до варіацій активного опору ротора спостерігач поточкозчеплення 5-го порядку, який є локально стійким, має  $W(t) \in \mathbf{R}^{2 \times 3}$  і два коефіцієнта налаштування. Експериментальні дослідження спостерігачів підтверджують, що локально стійкий спостерігач [7] забезпечує більшу швидкодію і простий в налагодженні.

**Висновки.** Конструктивне використання аналітичної умови персистентності збудження, що визначає режими функціонування ЕМС, в яких невідомі параметри можуть бути ідентифікованими неможливе при оцінці декількох параметрів і особливо при використанні надлишкової параметризації. Для визначення доцільності відмови від додаткового оцінювання параметрів актуальним є дослідження алгоритмів ідентифікації з властивостями локальної асимптотичної стійкості без використання надлишкової параметризації.

#### Перелік посилань

1. Marino R., Peresada S. and Tomei P. Nonlinear adaptive control of permanent magnet step motors // Automatica. –1995. –Vol. 31, No. 11. –P. 1595–1604.
2. Peresada, S.; Kovbasa, S.; Prystupa, D.; Lyshevski, S.E. Identification of induction motor parameters adaptively controlling stator currents // Industrial Electronics Society, IECON 2013 - 39th Annual Conference of the IEEE, vol., no., pp.8476-8481, 10-13 Nov. 2013
3. Marino R., Peresada S. and Tomei P. On-line stator and rotor resistance identification in induction motor // IEEE Trans. on Control Systems Technology. –2000. –Vol. 8. –P. 570–579.
4. Marino R., Tomei P. Nonlinear control design: Geometric, adaptive and robust. – New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1995. – 390 p.
5. Narendra K.S., Annaswamy A.M. Stable adaptive systems. – New Jersey, Englewood Cliffs: Prentice Hall, 1989. – 496 p.
6. Marino R., Peresada S., Tomei P. Exponentially convergent rotor resistance estimation for induction motors // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 42, no. 5, pp. 508–515, Oct. 1995.
7. Пересада С.М. Адаптивний спостерігач Матсусе: новий синтез, який гарантує асимптотичність оцінювання вектора поточкозчеплення і активного опору ротора асинхронного двигуна / С.М. Пересада, С.М. Ковбаса, В.С. Бовкунович // Технічна електродинаміка. –2010. –№ 3. –С. 28-32.