

DOI: <https://doi.org/10.15407/kvt207.01.046>

UDC 681.5      CC BY-NC

**ЖИТЕЦЬКИЙ Л.С.**, канд. техн. наук,  
в.о. зав. відд. інтелектуальних автоматичних систем  
ORCID: 0000-0002-4560-5113, e-mail: leonid\_zhiteckii@i.ua  
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних  
технологій та систем НАН України і МОН України,  
пр. Акад. Глушкова, 40, м. Київ, 03187, Україна

## ПРОБЛЕМИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

---

**Вступ.** Удосконалення систем автоматичного керування шляхом їх інтелектуалізації є важливою проблемою як з теоретичної, так і з практичної точок зору. Наявність процесів адаптації та навчання, властивих природному інтелекту, дає змогу розглядати сучасні адаптивні системи та системи, що навчаються, як деякі інтелектуальні системи керування найпростішого типу.

**Мета** роботи — стисло окреслити результати світового рівня, пов'язані з ефективним адаптивним керуванням і досягнуті у відділі інтелектуальних автоматичних систем Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем за останні 25 років, а також вказати на проблеми майбутніх досліджень у цій науковій галузі.

**Результати.** Нова теорія адаптивного керування, яка нещодавно була завершена, є значним досягненням у роботі з системами керування за наявності як параметричної, так і непараметричної невизначеностей. Основною відмінною рисою цієї теорії є те, що вона не вимагає інформації про обмежений набір невідомих параметрів об'єктів та межі довільних невимірних збурень. Використовуючи її методи, можна забезпечити бажані показники якості систем керування з невизначеними об'єктами, тоді як наявні методи стають абсолютно неприйнятними в тій же ситуації.

**Висновок.** На основі останніх результатів з проблем адаптації та навчання запропоновано зробити наступний крок до створення нових інтелектуальних систем автоматичного керування, що містять складні нелінійні об'єкти. Проте перед впровадженням у практику необхідно розробити нові перспективні методи, які гарантують задовільну поведінку такого класу систем керування, в першу чергу, стійкість цих систем. Ця поки невирішена наукова проблема залишається предметом майбутніх теоретичних досліджень.

**Ключові слова:** адаптивна система керування, інтелектуальна автоматична система, параметрична і непараметрична невизначеності, невимірювані збурення, складний нелінійний об'єкт.

© ЖИТЕЦЬКИЙ Л.С., 2021

## ВСТУП

Так склалося, що 25-річний ювілей Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН України і МОН України практично збігся з завершенням циклу досліджень у напрямі побудови адаптивних систем автоматичного керування, які виконувалися у відділі інтелектуальних автоматичних систем. Здобутком цих наукових досліджень стало створення цілісної теорії адаптивних автоматичних систем, орієнтованих на функціонування в умовах як параметричних, так і непараметричних невизначеностей відносно математичної моделі об'єкта і характеристик зовнішнього середовища, з яким має взаємодіяти система керування. Саме припущення про відсутність достатньої апріорної інформації про структуру керованого об'єкта та межі можливих значень зовнішніх невимірюваних збурень нестохастичної природи суттєво відрізняє отримані результати цієї теорії від відомих фундаментальних результатів класичної теорії адаптивного керування, які можна знайти, зокрема, в [1–3] і в посиланнях там.

Основні теоретичні результати в галузі адаптивного керування за наявності нестохастичних параметричних і непараметричних невизначеностей підсумовано у вітчизняній монографії [4] та в окремих розділах колективних закордонних монографій [5, 6]. Одним з нових таких результатів виступає розроблений метод адаптації параметрів моделі для керування багатозв'язним об'єктом з кількістю регульованих змінних, що перевищує кількість каналів передачі керувальних дій в умовах, коли параметри такого об'єкта та рівні неконтрольованих збурень апріорі є невідомими [6]. В ідейному плані цей метод спирається на методологію псевдообертання, яка вперше в світі порівняно недавно була запропонована та обґрунтована в роботах [7–10] у розв'язанні низки нових наукових задач керування багатозв'язними об'єктами з виродженими квадратними та прямокутними матрицями коефіцієнтів підсилення.

На думку деяких авторитетних вчених в галузі інтелектуальних інформаційних технологій (ІТ), сформульовану, зокрема, в [11, с. 103], наявність принаймні таких властивостей, як здатність до адаптації та навчання, притаманних природньому інтелекту, дає достатні підстави відносити адаптивні системи автоматичного керування та системи, в яких передбачається навчання цілеспрямованим керувальним діям безпосередньо в процесі самого керування, до першого покоління інтелектуальних автоматичних систем [12]. Деякі результати дослідження процесів функціонування цих систем, до якого були залучені аспіранти відділу, опубліковані в роботі [13].

Інтелектуалізація автоматичних систем природним чином вимагає розроблення нових інтелектуальних інформаційних технологій (ІТ) [14]. Загальна концепція побудови таких ІТ була, як відомо, висунута членом-кореспондентом НАН України В.І. Гриценком ще на початку 90-х років минулого сторіччя [15]. Ця концепція безумовно має бути покладена в основу створення інтелектуальних автоматичних систем нового покоління, здатних ефективніше реалізувати функції контролю і керування технологічними процесами і технічними системами.

**Мета роботи** — дати в загальних рисах огляд результатів світового рівня стосовно ефективного адаптивного керування, досягнених у відділі інтелектуальних автоматичних систем протягом останніх 25 років, а також вказати на завдання майбутніх наукових досліджень.

## ПЕРЕДУМОВИ СТВОРЕННЯ ВИСОКОЕФЕКТИВНИХ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ

Одним з пріоритетних напрямів роботи відділу, створеного у свій час у складі Обчислювального центру АН УРСР, було розроблення систем автоматичного керування технологічними процесами та технічними системами, зокрема, автоматичного керування процесами точкового контактного зварювання на базі засобів обчислювальної техніки [16]. Послідовним прихильником побудови цифрових автоматичних систем, а не систем з використанням засобів аналогової обчислювальної техніки, як пропонувалось тоді у фундаментальній монографії [17], був незмінний керівник відділу акад. В.І. Скуріхін. Саме він вперше висунув вельми плідну ідею побудови систем програмного керування на основі обернених математичних моделей.

Ідея методу керування об'єктом за оберненою моделлю [16] у загальних рисах зводиться до такого. Нехай певний динамічний об'єкт має функціонувати у дискретному часі  $t = T_0, 2T_0, \dots, nT_0 \dots$  з інтервалом квантування  $T_0$ . Припускається, що його «пряму» модель можна описати різницеvim рівнянням

$$y_n + a_1 y_{n-1} + \dots + a_m y_{n-m} = b_1 u_{n-1} + \dots + b_m u_{n-m}, \quad (1)$$

де  $y_n, u_n$  — відповідно вихідна змінна та керувальна дія в  $n$ -й дискретний момент часу, а  $a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_m$  — параметри об'єкта. Оскільки ж у разі програмного керування в кожний  $n$ -й момент часу є відомими майбутні бажані значення  $y_{n+1}^0, y_{n+2}^0, \dots$  вихідної змінної  $y_{n+1}, y_{n+2}, \dots$ , то з рівняння (1) випливає, що керувальна дія

$$u_n = b_1^{-1} [y_{n+1}^0 + a_1 y_n + \dots + a_m y_{n-m+1} - b_2 u_{n-1} - \dots - b_m u_{n-m+1}], \quad (2)$$

визначена за рівнянням його оберненої моделі, негайно дає  $y_n \equiv y_n^0$ .

Хоча спершу саму по собі ідею керування за оберненою моделлю не було, на жаль, належним чином сприйнято науковою спільнотою, що займалася проблематикою автоматичного керування, проте вона все ж дала поштовх до розвитку нового напрямку в теорії систем автоматичного керування багатозв'язними об'єктами [18, 19], до якої дещо пізніше і незалежно примкнули й закордонні дослідники [20, сар. 8]. Згодом цей науковий напрям став підґрунтям до створення так званої теорії обернених задач динаміки [21, 22]. Важливо зазначити, що започаткований на евристичному рівні в роботі [18] новий підхід побудови вискоефективних систем автоматичного керування за методом, названим у книзі [19] методом оберненого оператора, лише через півтора десятиріччя на математичному рівні обґрунтували закордонні дослідники [23, 24]. Ще більше, виявилось, що до закону (2) при  $y_n^0 = y^0 \equiv \text{const}$  формально приводить розв'язок поставленої в роботі [23] оптимізаційної задачі стабілізації лінійного дискретного динамічного об'єкта, який описується рівнянням (1) з доданим до його правої частини членом  $v_n$ , що

визначає збурення, обмежене за рівнем  $|v_n| \leq \varepsilon < \infty$ . Саме цей закон дає змогу придушити геть всі можливі обмежені збурення, забезпечивши мінімум верхньої грані модуля похибки системи керування:  $|e_n| := |y^0 - y_n| \leq \varepsilon$ .

На жаль, керування за законом (2) можливе, як відомо, якщо тільки дискретний об'єкт є мінімально-фазовим, тобто коли дискретна передавальна функція приведеної неперервної частини об'єкта  $W_0(z) = B(z) / A(z)$  з поліномами  $A(z) = z^m + a_1 z^{m-1} + \dots + a_m$  і  $B(z) = b_1 z^{m-1} + b_2 z^{m-2} + \dots + b_m$  відносно оператора  $z$  зсуву вперед на один такт має таку властивість:  $B(z) \neq 0$  для всіх  $|z| \geq 1$ .

Свого часу серед деяких науковців, які працювали у галузі теорії дискретних систем автоматичного керування, панувала думка, що так звану немінімальну фазовість принципово не можна усунути. Проте шляхом наполегливих досліджень уперше в роботі [25] вдалося встановити, що за наявності фіксатора в контурі керування немінімальну фазовість можна все ж уникнути, збільшуючи період квантування  $T_0$ , принаймні у випадку, коли неперервна частина має передавальну функцію  $W_0(s) = K / [s(\tau_1 s + 1)(\tau_2 s + 1)]$  з коефіцієнтом підсилення  $K$  та сталими часу  $\tau_1, \tau_2$ . З іншого боку, у дисертації [26] було показано також, що коли  $W_0(s) = K / [s(\tau_1 s + 1)]$ , то відповідна дискретна передавальна функція

$$W_0(z) = \frac{z-1}{z} Z \left\{ \frac{W_0(s)}{s} \right\}, \quad (3)$$

де  $Z\{\cdot\}$  — символ операції  $z$ -перетворення, завжди описує мінімально-фазовий дискретний об'єкт незалежно від вибору періоду квантування  $T_0$ . Ці характерні особливості дискретних систем через 20 років після появи роботи [25] підтвердили проф. K.J. Aström зі своїми колегами [27], аналізуючи нулі передавальної функції (3).

Для ефективного програмного керування за наявності немінімально-фазового об'єкта в роботі [28] уперше в світі було запропоновано і обґрунтовано новий метод, який на відміну від відомого тоді методу підвищення порядку астатизму дає змогу забезпечити як завгодно малу за модулем похибку  $e_n$  не тільки в усталеному, але й у перехідному режимах. В основу цього методу покладено ідею розкладення оберненої дискретної передавальної функції  $(z - z_1)^{-1}$  при  $|z_i| > 1$  у ряд за додатними степенями  $z$ :

$$(z - z_1)^{-1} = \alpha_{10} + \alpha_{11}z + \alpha_{12}z^2 + \dots + \alpha_{1k}z^k + \dots = \sum_{k=0}^{\infty} \alpha_{1k}z^k, \quad (4)$$

де  $\alpha_{1k} = -z_1^{-(k+1)}$ . Коефіцієнти ряду (4) мають, очевидно, властивість  $\alpha_{1k} \rightarrow 0$  при  $k \rightarrow \infty$ . Спираючись на цю властивість і сам ряд (4), можна реалізувати прямий зв'язок за програмним сигналом  $\{y_n^0\}$ , що передбачає використання в кожний  $n$ -й момент часу інформації про  $k$  майбутніх

значень  $y_{n+1}^0, y_{n+2}^0, \dots, y_{n+k}^0$  [28]. При цьому належним вибором числа  $k$  можна досягти бажаного значення  $|e_n|$ .

Цікаво, що значно пізніше до того ж самого методу прийшов відомий вчений в галузі автоматичного керування електромеханічними системами проф. М. Tomizuka (університет м. Берклі, Каліфорнія, США) як один з авторів статті [29].

Одночасно з розробленнями ефективних систем програмного керування у відділі проводилися фундаментальні дослідження методу обернених моделей для стабілізації багатозв'язних статичних об'єктів. Основним здобутком проведених у цьому напрямку досліджень стали встановлені у термінах лінійного перетворення матриць необхідні і достатні умови допустимої неадекватності моделі об'єкта, виконання яких гарантує збіжність ітеративних процедур керування за відсутністю збурень. Ці фундаментальні дослідження було завершено публікацією першої монографії [30], підготовленої науковцями відділу.

## ПРОБЛЕМИ АДАПТАЦІЇ ТА НАВЧАННЯ СИСТЕМ АВТОМАТИЧНОГО КЕРУВАННЯ

Як з'ясувалося [30], можливості керування за фіксованою оберненою моделлю об'єкта суттєво обмежені «розмірами» апріорної невизначеності відносно його параметрів. Тому для побудови автоматичних систем, здатних ефективно функціонувати за наявності не тільки доволі широкої параметричної, але й непараметричної невизначеностей, виникла нагальна потреба у вирішенні деяких досить складних проблем теорії адаптації, яка інтенсивно розвивалася в той час, й навчання таких систем в умовах невизначеностей [1–3, 31]. До них належать: 1) проблема субоптимального та робастного (грубого) адаптивного керування об'єктами (1) з адитивним і, можливо, асиметричним збуренням  $v_n \in [\underline{\varepsilon}, \bar{\varepsilon}]$  ( $\underline{\varepsilon} \neq -\bar{\varepsilon}$ ) в умовах, коли апріорна інформація про множину  $\Omega$  належності вектору  $\theta = [a_1, \dots, a_m, b_1, \dots, b_m]^T$  невідомих параметрів та межі  $\underline{\varepsilon}$ ,  $\bar{\varepsilon}$  є відсутньою; 2) проблеми побудови адаптивних регуляторів для керування об'єктами за його редукованою (простою) лінійною моделлю; 3) проблема навчання автоматів цілеспрямованим діям безпосередньо в процесі керування об'єктом.

В рамках вирішення проблеми 1) в роботі [32] уперше в світі було запропоновано метод адаптивного субоптимального керування мінімально-фазовим об'єктом за наявності параметричних і непараметричних невизначеностей відносно  $\theta$ ,  $\underline{\varepsilon}$ ,  $\bar{\varepsilon}$ , який на відміну від [30] не вимагає апріорних відомостей ні про межі області  $\Omega$ , ні про «середнє» значення  $v^0 = (\underline{\varepsilon} + \bar{\varepsilon}) / 2$  (що особливо важливо). В ідейному плані цей метод зводиться ось до чого. В процесі адаптивного керування за законом

$$u_n = b_1^{-1}(n)[y^0 + a_1(n)y_n + \dots + a_m(n)y_{n-m+1} - b_2(n)u_{n-1} - \dots - b_m(n)u_{n-m+1} - v_n^0],$$

що виступає як деяка модифікація стандартного закону керування [3, гл. 4], здійснюється або адаптація розширеного вектора  $\theta'_n = [\theta_n^T, v_n^0]^T$  до

невідомого  $\theta' = [\theta^T, v^0]^T \in \mathbf{R}^{2m+1}$  за стандартною рекурентною процедурою, розробленою в [3, гл. 3], при  $\varepsilon_n = \varepsilon_{n+1}$ , де  $\varepsilon_n$  – поточна оцінка невідомого  $\varepsilon = (\bar{\varepsilon} - \underline{\varepsilon}) / 2$ , або ж у певний момент  $n = n_k$  ця оцінка уточнюється і реконструюється гіпотетична апостеріорна множина  $\Omega'_{n_k}$ , до якої «потенційно» має належати  $\theta'$ . Остання визначається як

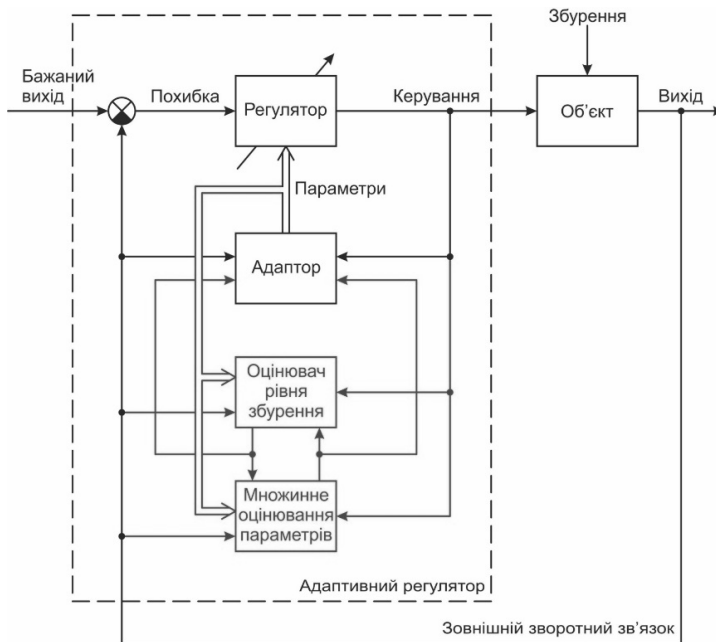
$$\Omega'_{n_k} = \bigcap_{i=n_k}^{n_k+2m+1} S_i, \quad S_i = \{\hat{\theta}': |y_i - \hat{\theta}'^T \varphi'_{n-1}| \leq \varepsilon_i\},$$

де  $S_i$  — смуга у просторі векторів  $\hat{\theta}^T \in \mathbf{R}^{2m+1}$ , побудована в  $i$ -й момент часу, а  $\varphi'_n = [-y_n, \dots, -y_{n-m+1}, u_n, \dots, u_{n-m+1}, 1]^T$  — поточний розширений вектор стану. При цьому приймається  $n = n_k$ ,  $\varepsilon_{n_k} = \varepsilon_{n_k} + \delta$ , коли певним чином вдалося встановити, що  $\theta' \notin \Omega'_{n_k-1}$ ; тут  $\delta > 0$  — достатньо мале число, яке має вибиратися конструктором системи і грає роль показника її субоптимальності, а  $\Omega' := \Omega \times \{v^0\}$ .

Реалізація запропонованого методу передбачає взаємодію між собою блоків точкового оцінювання рівнів збурення та множинного оцінювання невідомих параметрів об'єкта та невідомої величини  $v^0$ , а також передавання сигналів від цих блоків до адаптора для точкового оцінювання вказаних величин. Саме наявність цих двох нових функційних блоків відрізняє показану на рис. 1 структурну схему синтезованої системи від стандартної схеми, що розглядалась у класичній теорії адаптивного керування на базі точкових оцінок  $\theta_n$  [2, 3].

Аби здійснити простіше, а саме робастне адаптивне керування багатозв'язним статичним об'єктом з обмеженими збуреннями невідомих рівнів за алгоритмом на кшталт алгоритму в [33], в рамках методу обернених моделей побудовано новий алгоритм [34], який на відміну від [33] не вимагає знань ні нижніх меж коефіцієнтів підсилення об'єкта, ні знаків цих коефіцієнтів.

Задача адаптивного керування немінімально-фазовим об'єктом типу (1) виявляється значно складнішою. Справа в тому, що відомі умови дисипативності (граничної обмеженості всіх сигналів системи), встановлені в свій час у монографіях [2, Key Technical Lemma] й [3, теорема 4.П.3], тут непридатні. Тим не менш, в роботі [35] вдалося розв'язати задачу адаптивного керування неперервним немінімально-фазовим об'єктом за наявного обмеженого збурення невідомого рівня. Таку ж задачу, але в дискретному часі було послідовно розв'язано автором в рамках концепцій точкового та множинного оцінювання [36, 37].



**Рис. 1.** Конфігурація адаптивної системи керування за наявності параметричної і непараметричної невизначеності

Один з підходів до вирішення проблеми 2) спирається на опис об'єкта рівнянням у формі [38, 39]

$$A^0(E)y_n = B^0(E)u_n + \eta_n + v_n \quad (Ex_n := x_{n-1}). \quad (5)$$

Тут  $A^0(z^{-1})$  і  $B^0(z^{-1})$  — поліноми деякої фіксованої степені, відносно оператора  $z^{-1}$  зсуву назад на один такт, що визначають структуру і параметри редукованої моделі об'єкта;  $\eta_n$  — змінна, яку прийнято тепер називати операторним збуренням;  $v_n$  — координатне обмежене за рівнем збурення. При цьому змінна  $\omega_n = \eta_n + v_n$  виконує роль складника, який описує так звану немодельовану динаміку, що з'являється як результат керування об'єктом за його редукованою моделлю. Використовуючи загальне рівняння (5), в роботі [38] вдалося встановити нові умови робастності адаптивних систем керування з немодельованою динамікою, які на відміну від [39] дали значно менш консервативну оцінку допустимої непараметричної невизначеності.

У рамках проблематики 2) науковці відділу розробили нові методи й алгоритми адаптації дискретних ПД-регуляторів до об'єктів, що описується рівняннями високого порядку [40, 41]. Зокрема, уперше в світі було розв'язано задачу керування нескінченно-вимірним об'єктом з довільним невимірюваним збуренням з використанням адаптивного ПД-регулятора, що важливо з практичної точки зору [40]. Протягом 2000—2001 рр. роботи у цьому напрямі продовжувалися спільно з вченими зі США, Греції та Інституту космічних досліджень НАН України та НКА України за підтримки гранту НАТО на виконання фундаментальних досліджень у галузі теорії

нелінійних адаптивних систем керування. Ці роботи було завершено встановленням умов, виконання яких теоретично гарантує можливість адаптивної стабілізації певного класу нелінійних дискретних динамічних об'єктів на основі простих лінійних регуляторів [42, 43].

Результатом вирішення проблеми 3) стали нові методи навчання регуляторів цілеспрямованим діям безпосередньо у процесі керування [4, гл. 6]. Характерною особливістю цих методів є те, що навчені регулятори мають допускатися до керування об'єктом лише за певних умов, які унеможливають виникнення значних відхилень вихідних змінних об'єкта від бажаних значень на етапі автоматичного керування об'єктом.

Отримані в рамках створеної теорії адаптивних систем керування з параметричними і непараметричними невизначеностями [4] фундаментальні результати проходили ретельну міжнародну експертизу у кількох визнаних наукових центрах світу і неодноразово доповідались на міжнародних конгресах, конференціях, симпозіумах, які протягом останніх 25 років відбувалися в Японії (1997 р.), Республіці Корея (1997 р.), Великій Британії (1998 р.), Китаї (1999 р.), Португалії (2001 р.), Іспанії (2002 р.), Італії (2011 р.), Південноафриканській республіці (2014 р.), Франції (2017 р.), і схвалені зарубіжними вченими.

У практичному плані розроблені у відділі нові методи та алгоритми адаптації і навчання було успішно впроваджено або рекомендовано до впровадження у складі систем автоматичного керування неперервними технологічними процесами [44].

## **ПЕРСПЕКТИВИ ІНТЕЛЕКТУАЛІЗАЦІЇ АВТОМАТИЧНИХ СИСТЕМ**

Наразі ідеї адаптивного керування за математичними моделями в аналітичній формі можна вважати вичерпаними. Водночас нові можливості для підвищення ефективності функціонування систем автоматичного керування відкривають інтелектуальні ІТ [15]. Вони дають змогу формувати керувальні дії не за аналітичною моделлю об'єкта, а за знаннями, накопиченими в процесі спостереження за неформальними діями досвідченої людини-оператора. Інші можливості формування керувальних дій пов'язані з ідеями нейромережної ІТ оброблення сигналів, асоціативної пам'яті [14], а також розпізнавання ситуацій, що можуть спостерігатися безпосередньо у процесі керування. Роботи у цих напрямках мають дати підґрунтя для створення теорії інтелектуальних систем автоматичного керування. Однією з таких нещодавно завершених робіт стало дослідження асимптотичних властивостей процесів навчання нейронної мережі як моделі об'єкта. Результати цього дослідження, проведеного у відділі інтелектуальних автоматичних систем спільно з кафедрою аерокосмічних систем управління Національного авіаційного університету, опубліковано в одному з американських періодичних видань [45].

## **ВИСНОВОК**

На основі останніх результатів з вирішення проблем адаптації та навчання запропоновано зробити наступний крок до створення нових інтелектуальних систем автоматичного керування, які містять складні нелінійні об'єкти. Проте перед впровадженням у практичне застосування



необхідно розробити нові перспективні методи, які гарантують задовільну поведінку замкнених систем керування, в першу чергу, стійкість цих систем. Ця поки невирішена наукова проблема залишається предметом майбутніх теоретичних досліджень.

#### ЛІТЕРАТУРА

1. Кунцевич В.М. *Управление в условиях неопределенности: гарантированные результаты в задачах управления и идентификации*. К.: Наук. думка, 2006. 264 с.
2. Goodwin G.C., Sin K.S. *Adaptive filtering, prediction and control*. Engewood Cliffs, NJ.: Prentice-Hall, 1984. 540 p.
3. Фомин В.Н., Фрадков А.Л., Якубович В.А. *Адаптивное управление динамическими объектами*. Москва: Наука, 1981. 448 с.
4. Житецький Л.С., Скурихин В. И. *Адаптивные системы управления с параметрическими и непараметрическими неопределенностями*. К.: Наук. думка, 2010. 301 с.
5. Zhiteckij L.S. An open problem in adaptive nonlinear control theory. *Unsolved Problems in Mathematical Systems and Control Theory* / V.D. Blondel and A. Megretski, eds. Princeton, USA: Princeton University Press. 2004. P. 229-237.
6. Zhiteckii L.S., Solovchuk K.Yu. Robust Adaptive controls for a class of nonsquare memoryless systems. *Advanced Control Systems: Theory and Applications* / Y.P. Kondratenko, V.M. Kuntsevich, A.A. Chikrii, V.F. Gubarev, eds. Gistrup: River Publishers 2021, P. 203–226.
7. Гриценко В.И., Житецький Л.С., Соловчук К.Ю. Предельные возможности метода псевдообращения для управления линейными многосвязными объектами без памяти: гарантированные результаты. *Доповіді НАН України*. 2019. №8. С. 16–24.
8. Скурихин В.И., Гриценко В.И., Житецький Л.С., Соловчук К.Ю. Метод обобщенного обратного оператора в задаче оптимального управления линейными многосвязными статическими объектами. *Доповіді НАН України*. 2014. №8. С. 57–66.
9. Zhiteckii L.S., Skurikhin V.I., Solovchuk K.Yu. Stabilization of a nonlinear multivariable discrete-time time-invariant plant with uncertainty on a linear pseudoinverse model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017. N 5. P. 12–26.
10. Zhiteckii L.S., Solovchuk K.Yu. Pseudoinversion in the problems of robust stabilizing multivariable discrete-time control systems of linear and nonlinear static objects under bounded disturbances. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017. N 3. P. 57–70.
11. Файнзильберг Л.С. Интеллектуальная информационная технология обработки сигналов с локализованной информацией. *Штучний інтелект*. 2008. №2. С. 100–110.
12. Тимофеев А.В., Юсупов Р.М. Интеллектуальные системы автоматического управления. *Техническая кибернетика*. 1994. № 5. С. 211–223.
13. Zhiteckii L.S., Nikolaienko S.A., Solovchuk K.Yu. Adaptation and learning in some classes of identification and control systems. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2015, № 181. С. 47–65.
14. *Интеллектуальные системы автоматического управления* / под ред. И.М. Макарова и Р.М. Юсупова. Москва: Физматгиз, 1991. 576 с.
15. Гриценко В.И. Интеллектуалізація інформаційних технологій. *Наука і технології*. К.: Інститут кібернетики ім. В.М. Глушкова НАН України, 1992. С. 4–9.
16. Скурихин В.И., Никулин В.Н., Дрымальк Я.П. Вычислительные устройства в схемах контактной сварки. *Вопросы вычислительной техники*. К.: Гос. изд-во технической литературы УССР, 1961. С. 105–113.
17. Фельдбаум А.А. *Вычислительные устройства в автоматических системах*. Москва: Физматгиз, 1959. 798 с.
18. Жук К.Д., Пятенко Т.Г., Скурихин В.И. Вопросы синтеза управляющих моделей в многосвязных автоматических системах. *Методы математического моделирования и теория электрических цепей*: Тр. семинара. К.: Изд-во АН УССР, 1964. С. 3–17.

19. Пухов Г.Е., Жук К.Д. *Синтез многосвязных систем управления по методу обратных операторов*. К. : Наук. думка, 1966. 218 с.
20. Lee T., Adams G., Gaines W. *Computer process control: modeling and optimization*. NY : Wiley, 1968. 312 p.
21. Lyubchik L.M. Inverse model control and subinvariance in linear discrete multivariable systems. *3rd European Control Conf.* Roma, 1995. Vol. 4, part 2. P. 3651–3659.
22. Крутько П.Д. *Обратные задачи динамики управляемых систем: линейные модели*. Москва: Наука, 1987. 304 с.
23. Якубович Е.Д. Решение одной задачи оптимального управления дискретной линейной системой. *Автоматика и телемеханика*. 1975. №9. С. 73–79.
24. Vidyasagar M. Optimal rejection of persistent bounded disturbances. *IEEE Trans. Autom. Control*. 1986. Vol. 31. P. 527–535.
25. Житецкий Л.С. Про одну задачу синтеза системы программного керування, яка містить цифровий обчислювальний пристрій. *Автоматика*. 1964. №5. С. 36–42.
26. Житецкий Л.С. *Вопросы компенсации динамических ошибок цифровых систем программного управления* : дис. канд. тех. наук. К.: 1968. 186 с.
27. Aström K.J., Hagander P., Sternby J. Zeros of sampled systems. *Automatica*. 1984. Vol. 20, N 1. P. 31–38.
28. Житецкий Л.С. Про інваріантність комбінованих імпульсних систем програмного керування. *Автоматика*. 1967. №6. С. 83–85.
29. Gross E., Tomizuka M. Experimental flexible beam tip tracking control with a truncated series approximation in uncancelable inverse dynamics. *IEEE Transactions on Control Systems Technology*. 1994. N 2(4). P. 382–391.
30. Скурихин В. И., Житецкий Л. С., Проценко Н. М. *Итеративно-табличные автоматы*. К.: Наук. думка, 1977. 165 с.
31. Бондарко В.А. Адаптивное субоптимальное управление решениями линейных разностных уравнений. *Доклады АН СССР*. 1983. № 2. С. 301–303.
32. Zhiteckij L.S. Adaptive control of systems subjected to bounded disturbances. *Bounding Approaches to System Identification* / M. Milanese etc., eds. New York, London: Plenum Press, 1996. Chapt. 24. P. 383–407.
33. Feng G. A robust discrete-time direct adaptive control algorithm. *Systems and Control Letters*. 1994. Vol. 22. P. 203–208.
34. Zhitetskij L. S. Adaptive control under conditions of the presence of disturbances: an identification approach. *Problemy Upravleniya i Informatiki*. 1996. N 6, P. 66 – 77.
35. Suarez D.A., Lozano R. Adaptive control of nonminimum phase systems subject to unknown bounded disturbances. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1996. N 12. P. 1830–1836.
36. Zhiteckij L.S. Adaptive control of nonminimum phase systems in the presence of bounded disturbance with unknown bound. *Proc. 3rd European Control Conf.* (Roma, Italy, 5–8 Sept., 1995). 1995. Vol. 3. P. 891–896.
37. Zhiteckij L S. Solution of dissipativity problem for adaptive control system of nonminimum phase plant based on set-membership estimation method. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2001. N 33. P. 59–69.
38. Zhitetskij L.S. Robustness conditions of adaptive control systems with parametric and nonparametric uncertainties. *Journal of Automation and Information Sciences*. 1997. N 3. P. 41–51.
39. Kreisselmeier G., Anderson B.D.O. Robust model reference adaptive control. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1986. AC–31. N 2. P. 127–133.
40. Zhiteckij L.S., Skurikhin V.I., Tyupa O.V., Sapunova N.A. Adaptive discrete-time PID control algorithm for controlling infinite-dimensional systems. *Proc. European Control Conference ECC-2001* (Porto, Portugal, September 4–7, 2001), 2001. P. 184–189.
41. Zhiteckij L.S., Skurikhin V. I., Tyupa O. V Tuning and self-tuning of discrete-time PID controllers based on model reduction approach. *Proc. IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control* (Terrassa, Spain, April 5–7, 2000), 2000. P. 167–172.
42. Zhiteckii L.S. Robust control of some classes of nonlinear discrete-time plants using linear controllers. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016. N 48. P. 383–407.

43. Zhiteckij L.S. Singularity-free stable adaptive control of a class of nonlinear discrete-time systems. *Proc. 15th IFAC World Congress* (Barcelona, Spain, July 21–26, 2002), 2002. P. 475–480.
44. Скурихин В.И., Житецкий Л.С. Управление термо- и массообменными процессами с использованием настраиваемых моделей: практические примеры. *Управляющие системы и машины*. 2002. № 6. С. 77–84.
45. Zhiteckii L.S., Azarskov V.N., Nikolaienko S.A., Solovchuk K.Yu. Some features of neural networks as nonlinearly parameterized models of unknown systems using an online learning algorithm. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. Jan. 2018. N 06(01). P. 247–263.

Отримано 21.03.2022

## REFERENCES

1. Kuntsevich V.M. *Control under uncertainty: guaranteed results in management and identification problems*. Kyiv: Nauk. dumka, 2006, 264 p. (in Russian).
2. Goodwin G.C., Sin K.S. *Adaptive filtering, prediction and control*. Engewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1984, 540 p.
3. Fomin V.N., Fradkov A.L., Yakubovich V.A. *Adaptive control of dynamic plants*. Moscow: Nauka, 1981, 448 p (in Russian).
4. Zhiteckij L.S., Skurikhin V.I. *Adaptive control systems with parametric and nonparametric uncertainties*. Kyiv: Nauk. dumka, 2010, 301 p. (in Russian).
5. Zhiteckij L.S. An open problem in adaptive nonlinear control theory. In *Unsolved Problems in Mathematical Systems and Control Theory*. V.D. Blondel and A. Megretski (Eds). Princeton, USA: Princeton University Press. 2004. P. 229–237.
6. Zhiteckii L.S., Solovchuk K.Yu. Robust Adaptive controls for a class of nonsquare memoryless systems. In *Advanced Control Systems: Theory and Applications*. Y.P. Kondratenko, V.M. Kuntsevich, A.A. Chikrii, V.F. Gubarev (Eds). Gistrup: River Publishers 2021, P. 203–226.
7. Gritsenko V.I., Zhiteckii L.S., Solovchuk K.Yu. Limitations of pseudo inverse method for control of linear interconnected memoryless plants: guaranteed results. *Dopovidi NAN Ukrainy*. 2019, No. 8, pp. 16–24 (in Russian).
8. Skurikhin V.I., Gritsenko V.I., Zhiteckii L.S., Solovchuk K. Yu. Generalized inverse operator method in the problem of optimal controlling linear interconnected static plants. *Dopovidi NAN Ukrainy*. 2014, No. 8, pp. 57–66 (in Russian).
9. Zhitetskii L. S., Skurikhin V. I., Solovchuk K.Yu. Stabilization of a nonlinear multivariable discrete-time time-invariant plant with uncertainty on a linear pseudoinverse model. *Journal of Computer and Systems Sciences International*. 2017, No. 5, pp. 12–26.
10. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Pseudoinversion in the problems of robust stabilizing multivariable discrete-time control systems of linear and nonlinear static objects under bounded disturbances. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2017, No. 3, pp. 57–70.
11. Fainzilberg L.S. Intelligent information technology for processing of signals with localized information. *Shtuchnyi intelekt*. 2008, No. 2, pp. 100–110 (in Russian).
12. Timofeev A.V., Yusupov R.M. Intelligent automatic control systems. *Technicheskaya kibernetika*. 1994, No. 5, pp. 211–223 (in Russian).
13. Zhiteckii L. S., Nikolaienko S. A., Solovchuk K. Yu. Adaptation and learning in some classes of identification and control systems. *Kibernetika i vychislitel'naya tekhnika*. 2015, No. 181, pp. 47–65.
14. *Intelligent automatic control systems* / I.M. Makarov and R.M. Yusupov (Eds). Moscow: State press for physics and mathematical literature, 1991, 576 p. (in Russian).
15. Gritsenko V.I. Intellectualization of information technologies. *Nauka i tehnologiyi*. Kyiv: V.M. Glushkov Institute of Cybernetics of the NAS of Ukraine, 1992, pp. 4–9 (in Ukrainian).
16. Skurikhin V.I., Nikulin V.N., Drymalyk Ya.P. Computing devices in contact welding schemes. *Voprosy vychislitel'noy tekhniki*. Kyiv: State press for technical literature of the Ukrainian SSR, 1961, pp. 105–113 (in Russian).
17. Fel'dbaum A.A. *Computing devices in automatic systems*. Moscow: State press for physics and mathematical literature, 1959, 798 p. (in Russian).

18. Zhuk K.D., Pyatenko T.G., Skurikhin V.I. Problems of the synthesis of control models in interconnected automatic systems. *Methods for mathematical modeling and the theory of electrical chain*. Proc. of the workshop. Kyiv: Press of the AS of Ukrainian SSR, 1964, pp. 3–17 (in Russian).
19. Pukhov G.Ye., Zhuk K.D. *Synthesis of multiconnected control systems by the method of inverse operators*. Kyiv: Nauk. dumka, 1966, 218 p. (in Russian).
20. Lee T., Adams G., Gaines W. *Computer process control: modeling and optimization*. NY: Wiley, 1968, 312 p.
21. Lyubchik L.M. Inverse model control and subinvariance in linear discrete multivariable systems. *3rd European Control Conf.* Roma, 1995, Vol. 4, part 2, pp. 3651–3659.
22. Krut'ko P.D. *Inverse problems of control system dynamics: linear models*. Moscow: Nauka, 1987, 304 p. (in Russian).
23. Yakubovixh Ye.D. Solving one problem of optimal control for a discrete linear system. *Automatika i telemekhanika*. 1975, No. 9, pp. 73–79 (in Russian).
24. Vidyasagar M. Optimal rejection of persistent bounded disturbances. *IEEE Trans. Autom. Control*. 1986, Vol. 31, pp. 527–535.
25. Zhiteckij L.S. On a problem of synthesis of a program control system containing a digital computer. *Avtomatika*. 1964, No. 5, pp. 36–42 (in Ukrainian).
26. Zhiteckij L.S. Problems of dynamic errors compensation in digital program control systems: *PhD Thesis*. Kyiv, 1968, 186 p. (in Russian).
27. Aström K.J., Hagander P., Sternby J. Zeros of sampled systems. *Automatica*. 1984, Vol. 20, No. 1, pp. 31–38.
28. Zhiteckij L.S. On the invariance of sampled combined program systems. *Avtomatika*. 1967, No. 6, pp. 83–85 (in Ukrainian).
29. Gross E., Tomizuka M. Experimental flexible beam tip tracking control with a truncated series approximation in uncancelable inverse dynamics. *IEEE Trans. on Control Systems Technology*. 1994, No. 2(4), pp. 382–391.
30. Skurikhin V.I., Zhiteckij L.S., Protsenko N.M. *Iterative table automata*. Kyiv: Nauk. dumka, 1977, 165 p. (in Russian).
31. Bondarko V.A. Adaptive suboptimal control of solutions of linear difference equations. *Doklady AN SSSR*. 1983, No. 2, pp. 301–303 (in Russian).
32. Zhiteckij L.S. Adaptive control of systems subjected to bounded disturbances. In *Bounding Approaches to System Identification*. M. Milanese etc. (Eds). New York, London: Plenum Press, 1996, Chapt. 24, pp. 383–407.
33. Feng G.A. robust discrete-time direct adaptive control algorithm. *Systems and Control Letters*. 1994, Vol. 22, pp. 203–208.
34. Zhitetskij L. S. Adaptive control under conditions of the presence of disturbances: an identification approach. *Problemy Upravleniya i Informatiki*. 1996. No. 6, pp. 66 – 77.
35. Suarez D.A., Lozano R. Adaptive control of nonminimum phase systems subject to unknown bounded disturbances. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1996, No. 12, pp. 1830–1836.
36. Zhiteckij L.S. Adaptive control of nonminimum phase systems in the presence of bounded disturbance with unknown bound. *Proc. 3rd European Control Conf.* (Roma, Italy, 5–8 Sept., 1995), 1995, Vol. 3, pp. 891–896.
37. Zhiteckij L.S. Solution of dissipativity problem for adaptive control system of nonminimum phase plant based on set-membership estimation method. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2001, No. 33, pp. 59–69.
38. Zhitetskij L.S. Robustness conditions of adaptive control systems with parametric and nonparametric uncertainties. *Journal of Automation and Information Sciences*. 1997, No. 3, pp. 41–51.
39. Kreisselmeier G., Anderson B.D.O. Robust model reference adaptive control. *IEEE Trans. Automat. Control*. 1986, AC–31, No. 2, pp. 127–133.
40. Zhiteckij L.S., Skurikhin V.I., Tyupa O.V., Sapunova N.A. Adaptive discrete-time PID control algorithm for controlling infinite-dimensional systems. *Proc. European Control Conference ECC-2001* (Porto, Portugal, September 4-7, 2001), 2001, pp. 184–189.
41. Zhiteckij L.S., Skurikhin V. I., Tyupa O. V. Tuning and self-tuning of discrete-time PID controllers based on model reduction approach. *Proc. IFAC Workshop on Digital Control: Past, Present and Future of PID Control* (Terrassa, Spain, April 5-7, 2000), 2000, pp. 167–172.

42. Zhiteckii L.S. Robust control of some classes of nonlinear discrete-time plants using linear controllers. *Journal of Automation and Information Sciences*. 2016, No. 48, pp. 383–407.
43. Zhiteckij L.S. Singularity-free stable adaptive control of a class of nonlinear discrete-time systems. *Proc. 15th IFAC World Congress* (Barcelona, Spain, July 21–26, 2002), 2002, pp. 475–480.
44. Skurikhin V.I., Zhitetskij L.S. Control of thermo– and mass exchange processes by using of adjusted models: practical examples. *Upravlyayushie sistemy i mashiny*. 2002, No. 6, pp. 77–84 (in Russian).
45. Zhiteckii L.S., Azarskov V.N., Nikolaienko S.A., Solovchuk K.Yu. Some features of neural networks as nonlinearly parameterized models of unknown systems using an online learning algorithm. *Journal of Applied Mathematics and Physics*. Jan. 2018, No. 6, pp. 247–263.

Received 21.03.2022

Zhiteckii L.S., PhD (Engineering),  
Acting Head of the Department of Intelligent Automatic Systems  
ORCID: 0000-0002-4560-5113, e-mail: leonid\_zhiteckii@i.ua  
International Research and Training Center for Information Technologies  
and Systems of the National Academy of Sciences of Ukraine  
and Ministry of Education and Science of Ukraine,  
40, Acad. Glushkov av., Kyiv, 03187, Ukraine

#### PROBLEMS AND PROSPECTS FOR THE INTELLECTUALIZATION OF AUTOMATIC CONTROL SYSTEMS

**Introduction.** *The improvement of automatic control systems via their intellectualization is the important problem from both theoretical and practical points of view. The presence of adaptation and learning processes intrinsic to the natural intelligence makes it possible to consider the modern adaptive and learning systems as some intelligent control systems of the simplest type.*

**The purpose** of the paper is to outline briefly the world-class results related to the efficient adaptive control and achieved in Intelligent Automatic Systems Department during the last 25 years and also to point out on problems of future research in this scientific area.

**Results.** *A new adaptive control theory which has recently been completed represents the significant achievement to deal with the control systems in the presence of both parameter and nonparameter uncertainties. The main distinguishing feature of this theory is that it requires no information about the constrained membership set of unknown plant parameters and the bounds on arbitrary unmeasurable disturbances. Utilizing its methods, we can ensure the desired performance indices of the control systems with uncertain plants whereas the existing methods become quite unacceptable in the same situation.*

**Conclusion.** *Based on recent results concerning the adaptation and learning problems, we propose to take the next step toward to novel intelligent automatic control systems containing complex nonlinear plants. However, new perspective methods guaranteeing a perfect behavior of the closed-loop control systems, in particular, the stability of these control systems should be devised before implementing them in practical applications. This as yet unsolved scientific problem remains the subject of future theoretical research.*

**Keywords:** *adaptive and learning control system, automatic intelligent control system, parameter and nonparameter uncertainties, unmeasured disturbance, complex nonlinear plant.*