МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

СОЛОВЧУК Клавдія Юріївна

УДК 681.5(043.3)

МЕТОДИ ТА АЛГОРИТМИ КЕРУВАННЯ БАГАТОЗВ'ЯЗНИМИ ОБ'ЄКТАМИ БЕЗ ПАМ'ЯТІ В УМОВАХ НЕВИЗНАЧЕНОСТІ

05.13.03 – Системи та процеси керування

АВТОРЕФЕРАТ
дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Київ – 2020

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана у відділі інтелектуальних автоматичних систем Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН України та МОН України.

Науковий керівник: кандидат технічних наук, старший науковий співробітник
Житецький Леонід Сергійович,
Міжнародний науково-навчальний центр інформаційних технологій та систем НАН та МОН України,
завідувач відділу інтелектуальних автоматичних систем

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Казак Василь Миколайович,
Національний авіаційний університет,
професор кафедри автоматизації та енергоменеджменту

доктор технічних наук, професор
Бідюк Петро Іванович,
Інститут прикладного системного аналізу Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», професор кафедри математичних методів системного аналізу

Захист відбудеться «11» лютого 2021 р. о 14:00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 26.062.03 при Національному авіаційному університеті за адресою: 03058 Київ, проспект Любомира Гузара, 1, корп. 1, ауд. 1.001.

З дисертацію можна ознайомитися у науково-технічному архіві Національного авіаційного університету МОН України за адресою: 03058 Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий «__» грудня 2020 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради
Д 26.062.03 Н. С. Кузьменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Сучасний етап технічного прогресу характеризується появою нових складних технологічних комплексів. Вимоги до підвищення точності підтримання заданих технологічних режимів за наявності постійно діючих збурень, що, як правило, бувають неконтрольованими (не доступними для безпосереднього вимірювання), невпинно зростають. Виконання цих вимог нерідко потребує одночасної стабілізації кількох взаємопов'язаних вихідних змінних. При цьому сам технологічний процес виступає як багатозв'язний об'єкт керування. Труднощі, які практично виникають у керуванні багатозв'язними (багатовимірними) об'єктами, зумовлені, як відомо, невизначеностями, викликаними неповною апріорною інформацією про об'єкти та збурення.

Суттєвий внесок у розвиток загальної теорії неперервних та дискретних багатозв'язних систем керування, в тому числі у розроблення системних методів збереження живучості та відновлення керованості таких систем, а також у розроблення сучасних методів математичного моделювання складних систем зробили українські вчені П. І. Чинаєв, В. В. Павлов, Л. М. Любчик, В. М. Казак, А. С. Кулік, П. І. Бідюк, Б. І. Кузнєцов. Зокрема, в рамках висунутої у роботах П. Д. Крутька концепції обернених задач динаміки Л. М. Любчиком були розв'язані задачі синтезу певних класів багатовимірних систем керування з оберненими моделями в контурі керування, орієнтованих на функціонування в умовах невизначеності. Адаптивний підхід до побудови систем керування об'єктами за наявності неповної інформації раніше пропонували у своїх роботах G. C. Goodwin, I. D. Landau, В. А. Якубович, Я. З. Ципкін, В. М. Кунцевич, Ф. Г. Гаращенко, Є. В. Бодянський, О. Г. Руденко, В. Д. Романенко та інші дослідники. Натомість задача компенсації неконтрольованих збурень у багатовимірних системах, яку в свій час поставили E. Davison та J. M. Maciejowski, все ще залишається актуальною. На це вказує поява останніх монографій, в яких узагальнено недавні результати, що отримали P. Albertos, A. Sala, T. Glad, L. Ljung, S. Skogestad, I. Postlethwaite, L. Tan та інші науковці з далекого зарубіжжя.

Окремий клас багатозв'язних об'єктів керування складають так звані об'єкти без пам'яті (статичні об'єкти). Задачами побудови систем керування цим класом об'єктів у неадаптивній постановці активно займалися T. Lee, G. Adams, W. Gaines, М. В. Меєров, О. С. Соболєв, А. А. Первозванський, В. Я. Катковник, а також Г. Є. Пухов, К. Д. Жук, В. І. Скуріхін зі своїми колегами. Методи синтезу адаптивних багатовимірних систем керування об'єктами без пам'яті раніш розробляли M.E. Thomas, D.J. Wilde, В.М. Чадеєв, Б.С. Люблинський, О.Л. Фрадков, В.М. Кунцевич, Г.М. Бакан, В.В. Волосов, М.М. Сальников та інші вчені.

Розроблені наразі методи керування багатозв'язними об'єктами без пам'яті з числом вихідних змінних, рівним числу каналів передачі керувальних дій обмежуються вимогою невиродженості матриці коефіцієнтів підсилення об'єкта. Проте на практиці трапляються прикрі випадки, коли ця матриця виявляється погано обумовленою і навіть виродженою. У таких випадках метод оберненого оператора, запропонований в свій час в роботах Г. Є. Пухова і К. Д. Жука, стає неприйнятним. Інші ж відомі підходи до побудови замкнених систем керування багатозв'язними об'єктами, у яких число керувальних дій не перевищує число вихідних змінних, суттєво базуються на припущенні, що у розпорядженні конструктора системи є повна інформація про статичні характеристики об'єкта, а матриця коефіцієнтів підсилення має +овний ранг.

Таким чином, задачі керування в дискретному часі багатозв'язними об'єктами без пам'яті в умовах невизначеності відносно їхніх статичних характеристик видаються вельми актуальними як у теоретичному плані, так і в плані прикладних досліджень.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційну роботу виконано згідно з планами наукових досліджень Міжнародного науково-навчального центру інформаційних технологій та систем НАН і МОН України в межах таких науково-дослідних робіт:

1. «Дослідження та розробка інформаційних технологій інтелектуальної обробки даних та управління розвитком цілеспрямованих систем» (№ держреєстрації 0109U004772, 2010–2014) (автор був виконавцем роботи).

2. «Розробка інтелектуальних інформаційних технологій обробки даних і сигналів в системах діагностики і керування об'єктами в умовах невизначеностей» (№ держреєстрації 0115U003059, 2015–2019) (автор був виконавцем роботи).

Мета і завдання дослідження. *Метою* досліджень, проведених в дисертації, є розроблення ефективних методів і алгоритмів дискретного керування багатозв'язними об'єктами без пам'яті за наявності повної і неповної інформації про матриці коефіцієнтів підсилення, які можуть мати довільний ранг. Для досягнення цієї мети поставлено такі *завдання*:

- провести аналіз наявних методів керування багатозв'язними об'єктами без пам'яті;
- розробити метод та алгоритм оптимізації дискретних систем керування лінійними багатозв'язними об'єктами без пам'яті за наявності повної апріорної інформації про моделі таких об'єктів;
- розробити метод та алгоритм робастного керування лінійними багатозв'язними об'єктами без пам'яті в умовах невизначеності щодо матриці коефіцієнтів підсилення об'єкта;
- розробити методи та алгоритми робастного керування певними класами нелінійних багатозв'язних об'єктів без пам'яті за наявності невизначеності відносно статичних характеристик цих об'єктів;
- розробити методи та алгоритми адаптивного керування лінійними багатозв'язними об'єктами без пам'яті при невідомих матрицях коефіцієнтів підсилення;
- провести експериментальну перевірку отриманих результатів на модельному прикладі і реальному технологічному процесі як об'єкті керування.

Об'єктом дослідження є динамічні процеси, які виникають в дискретних системах керування лінійними і деякими нелінійними багатозв'язними об'єктами без пам'яті за довільних обмежених за рівнем неконтрольованих збурень з повною та неповною апріорною інформацією про статичні характеристики цих об'єктів.

Предметом дослідження є методи оптимального керування лінійними багатозв'язними об'єктами без пам'яті за повної апріорної інформації про матриці коефіцієнтів підсилення таких об'єктів, а також методи і алгоритми робастного та адаптивного керування лінійними та певними класами нелінійних багатозв'язних об'єктів без пам'яті в умовах невизначеності відносно елементів цієї матриці та її рангу.

Методи дослідження. У дослідженнях використано методи матричного числення, методи якісної теорії різницевих рівнянь, методи лінійного програмування, методи робастного та адаптивного керування, методи точкової ідентифікації та методи функцій Ляпунова.

Наукова новизна одержаних результатів.

1. Розроблено і обґрунтовано метод псевдооберненої моделі як деякий універсальний метод стабілізації на заданих рівнях вихідних змінних лінійних багатозв'язних об'єктів без пам'яті при будь-яких матрицях коефіцієнтів підсилення. Показано, що до методу псевдооберненої моделі формально приводить розв'язок задач оптимального керування такими об'єктами за критерієм точної верхньої грані евклідової норми вектора похибок в кожний дискретний момент часу при повній інформації про ці матриці.

2. Вперше встановлено, що коли матриця коефіцієнтів підсилення апріорі відома, то регулятор, синтезований за методом псевдооберненої моделі, незалежно від рангу цієї матриці здатний забезпечити стійкість замкненої системи керування за відсутності зовнішніх збурень та дисипативність (граничну обмеженість всіх сигналів в системі), якщо існують довільні збурення, обмежені за рівнем.

3. Встановлено достатні умови робастності замкнених дискретних систем керування лінійними та деякими класами нелінійних багатозв'язних об'єктів без пам'яті на базі фіксованих лінійних псевдообернених моделей за наявності інтервальних невизначеностей відносно матриці коефіцієнтів підсилення. Ці умови конструктивні: їх можна доволі просто перевірити, застосовуючи класичний метод лінійного програмування.

4. Вперше розроблено методи синтезу адаптивних регуляторів для керування лінійними багатозв'язними об'єктами без пам'яті з матрицями коефіцієнтів підсилення будь-якого ненульового рангу при обмежених нестохастичних збуреннях, рівні яких можуть бути апріорі невідомими.

Практичне значення отриманих результатів. На основі запропонованого підходу до побудови систем керування багатозв'язними об'єктами без пам'яті, що спирається на загальний метод псевдооберненої моделі, розроблено методи та алгоритми керування типовими неперервними технологічними процесами, а саме технологічним процесом поділу складних сумішей в ректифікаційній колоні та технологічним процесом розподілу дуття за фурмами доменної печі. Ефективність одного з цих методів підтверджена актом про впровадження результатів дослідження в практичну діяльність АТ «Полтавський турбомеханічний завод» (Додаток Б).

Результати роботи впроваджено в навчальний процес Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка» на кафедрі автоматики, електроніки та телекомунікацій (Додаток В).

Особистий внесок здобувача. Всі основні положення і результати, що складають основний зміст роботи, отримані автором самостійно і опубліковані в роботах [1 – 31]. Серед 12 публікацій у фахових виданнях 2 статті написані автором одноосібно. У працях, які виконані зі співавторами, здобувачеві належать наступні результати: [1] – встановлення достатніх умов робастної стійкості лінійних систем з інтервальними невизначеностями; [2] – встановлення достатніх умов робастної стійкості систем керування нелінійними об’єктами з нелінійністю класу I; [3] – розроблення удосконаленого методу керування об’єктами з погано обумовленими матрицями коефіцієнтів підсилення та встановлення загальних умов існування положення рівноваги; [4] – дослідження методу адаптивного керування за наявності прямокутної матриці коефіцієнтів підсилення; [6] – моделювання адаптивних систем керування об’єктами з прямокутною матрицею коефіцієнтів підсилення; [7] – розроблення методу робастного керування нелінійними об’єктами з нелінійністю класу II; [8] – дослідження методу адаптивного робастного керування об’єктами з квадратними можливо виродженими матрицями коефіцієнтів підсилення за наявності збурень невідомих рівнів; [9] – аналіз асимптотичних властивостей оптимальної системи керування багатозв’язним об’єктом, побудованої за методом псевдооберненої моделі; [10] – аналіз методу керування багатозв’язними об’єктами з погано обумовленими матрицями коефіцієнтів підсилення; [11] – дослідження методу псевдооберненої моделі; [12] – дослідження методу адаптивного робастного керування об’єктами з квадратними можливо виродженими матрицями коефіцієнтів підсилення за наявності збурень невідомих рівнів; [14] – моделювання процесів адаптивного та неадаптивного робастного керування.

Апробація результатів дисертації. Основні положення роботи були представлені і схвалені на міжнародних та всеукраїнських наукових та науково-практичних конференціях: 19th IFAC World Congress (Кейптаун, Південна Африка, 24–29 серпня 2014 р.); XII та XIII Всеросійські наради з проблем керування ВСПУ (Інститут проблем управління ім. В. О. Трапезнікова, Москва, Росія, 16–19 червня 2014 р.; 17–20 червня 2019 р.); X Міжнародна конференція «Идентификация систем и задачи управления» SICPRO (Інститут проблем управління ім. В. О. Трапезнікова, Москва, Росія, 26–30 січня 2015 р.); 1st and 2nd Ukraine Conferences on Electrical and Computer Engineering UKRCON (Київ, 29 травня – 2 червня 2017 р.; Львів, 2–6 липня 2019 р.); XIX – XXIII та XXV Міжнародні конференції з автоматичного управління «Автоматика/Automatics» (Київ, 26–28 вересня 2012 р.; Миколаїв, 25–27 вересня 2013 р.; Київ, 23–27 вересня 2014 р.; Одеса, 23–27 вересня 2015 р.; Суми, 22-23 вересня 2016 р.; Львів, 18–19 вересня 2018 р.); I Міжнародна конференція «Infocom Advanced Solutions 2015», присвячена 70-річчю кафедри автоматики та управління в технічних системах НТУУ

«КПІ» (Київ, 24–25 листопада 2015 р.); ІІІ Всеукраїнська науково-практична конференція «Інформатика та системні науки» (Полтава, 1-3 березня 2012 р.). Положення роботи доповідались на наукових семінарах відділу інтелектуальних автоматичних систем МННЦІТіС.

Публікації. За темою дисертаційної роботи опубліковано 31 наукову працю, серед яких 11 статей у наукових фахових виданнях України, три статті у періодичних закордонних виданнях, з яких дві входять до міжнародної наукометричної бази даних Scopus, 7 публікацій в працях міжнародних конференцій, три з яких зареєстровані в базі даних Scopus, та 10 тез доповідей у збірниках матеріалів інших міжнародних та всеукраїнських конференцій.

Структура і обсяг роботи. роботи. Дисертаційна робота складається з вступу, 5 розділів, висновків, списку використаних джерел і трьох додатків. Повний обсяг роботи – 192 сторінок, із них список використаних джерел зі 151 найменуванням на 11 сторінках, 3 додатки на 7 сторінках, обсяг основного тексту дисертації складає 160 сторінок. Робота містить 59 рисунків та одну таблицю.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність обраної теми дисертаційної роботи і необхідність проведення дослідження, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об’єкт і предмет дослідження, сформульовано наукову новизну і практичне значення отриманих результатів, подано інформацію про особистий внесок здобувача, а також наведено відомості про апробацію отриманих результатів і наявні публікації.

У **першому розділі** проведено аналіз сучасного стану теорії керування багатозв’язними об’єктами, в тому числі так званими об’єктами без пам’яті, при повній і неповній інформації про параметри об’єкта за наявності зовнішніх невимірюваних збурень. Наведено приклади деяких типових неперервних технологічних процесів, що орієнтовані на автоматичне керування з використанням засобів комп’ютерної техніки. При достатньо великому періоді T_0 квантування сигналів математичні моделі цих процесів у дискретному часі $n \in N_+$, де N_+ – множина цілих невід’ємних чисел, можуть бути описані різницевим рівнянням

$$y_n = \varphi(u_{n-1}) + v_{n-1}. \qquad (1)$$

У цьому рівнянні змінні $y_n = [y_n^{(1)}, \dots, y_n^{(m)}]^{\mathrm{T}}$, $u_n = [u_n^{(1)}, \dots, u_n^{(r)}]^{\mathrm{T}}$ та $v_n = [v_n^{(1)}, \dots, v_n^{(m)}]^{\mathrm{T}}$ – відповідно m-, r- та m-вимірні вектори вихідних змінних, керувальних дій та зовнішніх адитивних неконтрольованих збурень, віднесених до n-го моменту часу, а $\varphi\colon \mathbf{R}^r \to \mathbf{R}^m$ – деякий, взагалі кажучи, нелінійний оператор. Зазвичай неперервні збурення $v^{(i)}(t)$ $(1 \le i \le m)$, що діють на вихідні величини реальних технологічних процесів і потребують придушення, являють собою не типові функції часу t (стрибок, синусоїда тощо), а деякі випадкові змінні, фізично обмежені за рівнями.

Огляд літературних джерел, присвячених проблематиці керування багатозв’язними об’єктами, моделі яких описуються рівнянням (1), показав, що немає жодних теоретичних результатів стосовно можливості оптимального керування такими об'єктами навіть в ідеальному випадку, коли: а) φ – відомий лінійний оператор, що визначає матрицю $B \in \mathbf{R}^{r \times m}$ коефіцієнтів підсилення об'єкта, ранг якої може бути довільним; б) число r каналів передачі керувальних дій не перевищує числа m вихідних змінних; в) $\{v_n\}$ – нерегулярна обмежена послідовність. Окрім того, ніяких конструктивних умов робастності систем керування нелінійними об'єктами з невизначеністю відносно оператора φ немає; відсутні також методи адаптивного керування навіть лінійними об'єктами за умов, що $r \le m,$ а B може бути матрицею неповного рангу.

Другий розділ присвячено розв'язанню задачі синтезу регуляторів, здатних забезпечити оптимальне (за певним критерієм) керування лінійними багатозв'язними об'єктами без пам'яті при повній апріорній інформації про їхні статичні характеристики. Для цього класу об'єктів рівняння (1) набуває вигляду

$$y_n = Bu_{n-1} + v_{n-1}. \tag{2}$$

Тут $B = (b^{(ij)})$ – довільна $m \times r$-матриця коефіцієнтів підсилення з елементами $b^{(ij)}$, точно відомими конструкторові системи. Вважається, що $1 \le$ $\le \operatorname{rank} B \le r.$ Введено припущення, що послідовність $\{v_n^{(i)}\} := v_0^{(i)}, v_1^{(i)}, \ldots$ кожної i-ої складової вектора збурень v_n – нерегулярна (нестохастична) послідовність скалярних величин, обмежених за рівнем, тобто

$$|v_n^{(i)}| \le \varepsilon^{(i)} \ (< \infty) \qquad \forall n = 1, 2, \ldots \quad (i = 1, \ldots, m). \tag{3}$$

У рамках цього припущення можна уявити, що $v_n \in \Omega \subseteq [-\varepsilon^{(1)}, \varepsilon^{(1)}] \times \ldots$ $\ldots \times [-\varepsilon^{(m)}, \varepsilon^{(m)}] \ \forall n \in N_+$ $(\operatorname{diam} \Omega < \infty),$ де $N_+ := \{0, 1, 2, \ldots\}$ – множина цілих невід'ємних чисел, а Ω – симетрична обмежена замкнена множина (компакт) з діаметром $\operatorname{diam} \Omega := \max_{v', v'' \in \Omega} \| v' - v'' \|_2$ ($\| w \|_2$ – позначення евклідової норми вектора w).

Зауваження 1. Не слід ототожнювати послідовність нерегулярних випадкових збурень $\{v_n\},$ які задані у формі (3) і не мають стохастичної природи, зі стаціонарною випадковою послідовністю, яку називають «білошумною»: остання являє собою послідовність стохастично незалежних векторів $v_1, v_2, \ldots$ з нульовим середнім, тоді як для нерегулярної обмеженої послідовності таке середнє не існує (відомо не більше, ніж те, що в кожний момент часу n вектор v_n належить деякій обмеженій множині Ω).

Загальна стратегія керування багатозв'язним об'єктом (2) визначається у формі стаціонарної ітераційної процедури

$$u_n = u_{n-1} + \chi(e_n). \tag{4}$$

Тут $\chi: \mathbf{R}^m \to \mathbf{R}^r$ – деякий оператор, а

$$e_n = y_n^0 - y_n \tag{5}$$

– вектор похибок системи в n-й дискретний момент часу, де $y_n^0 = [y_n^{0(1)}, \ldots$

$\ldots, y_n^{0(m)}]^{\mathrm{T}}$ – m-вимірний вектор бажаних значень вихідних змінних. Вважається, що $\| y_n^0 \| \not\equiv 0,$ тобто хоча б одне значення $y_n^{0(i)}$ відмінне від нуля. Додаткове припущення полягає у тому, що

$$\sup\nolimits_{n \in N_+} \| y_n^0 \| < \infty, \tag{6}$$

звідки $\sup_{n \in N_+} \| h_n \|_2 \le \bar{h}$ $(< \infty)$, де $h_n := y_n^0 - y_{n-1}^0$.

Зауваження 2. Звертає на себе увагу той факт, що хоча сам по собі об'єкт (2) є статичним, однак замкнена система керування, яка містить такий об'єкт і зворотний зв'язок (4), (5), є дискретною динамічною системою: вона описується векторним різницевим рівнянням першого порядку

$$e_n - e_{n-1} + B\chi(e_{n-1}) = h_n - \nabla v_{n-1},$$

де $\nabla v_n = v_n - v_{n-1}$. Тому природнім чином виникла нагальна потреба у дослідженні асимптотичних властивостей цієї системи, в першу чергу, її стійкості.

Якість функціонування системи керування (2), (4), (5) доречно оцінювати локальним показником

$$J_n := \sup_{\substack{v_0,\ v_1, \ldots, v_{n-1} \in \Omega \\ h_n:\ \|h_n\|_2 \le \bar{h}}} \| e_n \|_2, \tag{7}$$

що залежить лише від оператора χ.

Поставлена в дисертації задача полягає в знаходженні оператора χ з умови мінімуму функціонала J_n виду (7) на множині всіх можливих відображень $\chi(\cdot)$, визначеної як

$$J_n = J_n^0 := \inf\nolimits_{\chi(e_{n-1})} J_n. \tag{8}$$

У такій постановці цю задачу вправі інтерпретувати як певну оптимізаційну задачу.

Окрім розв'язання задачі (8) одночасно потрібно також забезпечити граничну обмеженість послідовності $\{u_n\}$ у формі

$$\limsup_{n\to\infty} \| u_n \| \le C_u < \infty, \tag{9}$$

що в силу (2), (3), (5), (6) гарантується гранична обмеженість $\{e_n\}$:

$$\limsup_{n\to\infty} \| e_n \| \le C_e < \infty. \tag{10}$$

Використання відомої техніки побудови оптимального за критерієм (7) регулятора для керування об'єктом (2) в умовах (6), коли B – невироджена квадратна матриця, а неконтрольовані збурення відсутні ($v_n^{(i)} \equiv 0,\ \ i = 1, \ldots$ $\ldots, m$), дає $\chi(e_{n-1}) = B^{-1} e_n$, що негайно приводить до закону керування

$$u_n = u_{n-1} + B^{-1} e_n, \tag{11}$$

здатного розв'язати задачі (9), (10) з $C_u = \| B^{-1} \| \sup_{n \in N_+} \| y_n^0 \|,\ C_e = \bar{h}.$

Ясно, що коли B – квадратна вироджена або прямокутна матриця, то законом керування (11) скористатися не можна, оскільки в цьому випадку обернена матриця B^{-1} не існує. Інтуїтивно здавалось, що достатньо замінити B^{-1} на псевдообернену матрицю B^+, визначену, як відомо, формулою

$$B^{+}=\lim_{\delta\to 0}(B^{\mathrm{T}}B+\delta^{2}I_{r})^{-1}B^{\mathrm{T}},$$

у якій I_p – одинична $p\times p$-матриця. При такому підході закон керування об'єктом (11) з повною інформацією про матрицю B має набути вигляду

$$u_n=u_{n-1}+B^{+}e_n. \tag{12}$$

Проте така приваблива, на перший погляд, ідея зовсім ще не може гарантувати, що замкнена система, побудована на основі псевдооберненої матриці B^{+}, буде щонайменше стійкою.

Виявилось, що регулятор (12), (5), який реалізує метод псевдооберненої моделі, дійсно спроможний забезпечити стійкість (при $y_n^{0(i)}\equiv\mathrm{const}$ $\forall i=1,\dots,m$) та дисипативність (при $y_n^{0(i)}\not\equiv\mathrm{const}$ $\forall i=1,\dots,m$) системи керування об'єктом (11). Цей факт встановлює наступне твердження.

Твердження 1. Нехай B – квадратна вироджена або прямокутна матриця. Позначимо $Q_u:=I_r-B^{+}B$, $Q_e:=I_m-BB^{+}$. Тоді за умови (6) при $v_n\equiv 0_m$, де 0_m – нульовий m-вимірний вектор, замкнена система керування (11), (5), (12) буде мати такі властивості: 1) при будь-якій матриці $B\in\mathbf{R}^{m\times r}$ і $y_n^{0(i)}\equiv\mathrm{const}$ $(i=1,\dots,m)$ положення рівноваги $\{u^{\mathrm{e}},y^{\mathrm{e}}\}$ цієї системи існує, причому $u^{\mathrm{e}}=Q_u\bar{u}+B^{+}y^{0}$, $y^{\mathrm{e}}=BB^{+}y^{0}$, де $\bar{u}\in\mathbf{R}^{r}$ – довільний вектор; 2) гранична обмеженість послідовностей $\{u_n\}$ і $\{v_n\}$ гарантується:

$$\limsup_{n\to\infty}\|u_n\|\le\|Q_u\|\|u_0\|+\|B^{+}\|\|\sup\nolimits_{n\in N_+}\|y_n^{0}\|<\infty,$$

$$\limsup_{n\to\infty}\|e_n\|\le\|Q_e\|\sup\nolimits_{n\in N_+}\|y_{n-1}^{0}\|+\bar{h}<\infty;$$

3) якщо $y_n^{0(i)}\equiv\mathrm{const}$ $(i=1,\dots,m)$, то керування, що визначається зворотним зв'язком (12), буде оптимальним за критерієм (7).

В дисертації розроблено алгоритм, що реалізує закон керування (12).

При розв'язанні задачі оптимального керування об'єктом (2) з відомою матрицею B, коли $r\le m$, за наявності обмежених збурень ($v_n\not\equiv 0_m$) сформульовано і доведено наступне твердження, яке встановлює асимптотичні властивості системи керування (2), (5), (12).

Твердження 2. Якщо умови (3), (6) виконані, то: 1) замкнена система керування (2), (5), (12) дисипативна: $\lim_{n\to\infty}\sup\|u_n\|_2\le\|Q_u\|_2\|u_0\|_2+\|B^{+}\|_2\times(\sup_{n\in N_+}\|y_{n-1}^{0}\|_2+\mathrm{diam}\,\Omega/2)<\infty$; 2) при $y_n^{0(i)}=y^{0(i)}\equiv\mathrm{const}$ $(i=1,\dots,m)$ керування за законом (12) дає $+\sqrt{\|Q_e\,e_{n-1}\|_2^2+(\mathrm{diam}\,\Omega)^2}\le J_n\le\|Q_e\|_2\|e_{n-1}\|_2+\mathrm{diam}\,\Omega$; 3) задача оптимального керування об'єктом (2) при $y_n^{0(i)}\equiv\mathrm{const}$ $(i=1,\dots,m)$ має розв'язок, коли $\Omega=\{v:\|v\|_2\le\varepsilon\}\subset\mathbf{R}^{m}$ – m-вимірна куля, причому на оптимальному керуванні справедлива оцінка

$$J_n=J_n^{0}\le\|Q_e\|_2\|e_0\|_2+(1+\|Q_e\|_2)\,\mathrm{diam}\,\Omega.$$

Встановлені в твердженні 2 властивості системи керування (2), (5), (12) підтвердились результатами проведених модельних експериментів.

У **третьому розділі** поставлено і розв’язано задачі робастного керування лінійними та деякими класами нелінійних багатозв’язних об’єктів без пам’яті за фіксованими лінійними псевдообернененими моделями. Вважалось, що елементи матриці B, яка фігурує в рівнянні об’єкта (2), апріорі невідомі конструкторові системи. Тим часом припускалось, що відома деяка множина Ξ, задана інтервальним сімейством

$$\Xi := \{(b^{(ij)}) : \underline{b}^{(ij)} \le b^{(ij)} \le \overline{b}^{(ij)}, \quad i = 1, \ldots, m, \ j = 1, \ldots, r\}, \tag{13}$$

до якого належить B. Додатково вводилось обмеження

$$\underline{b}^{(ij)} \overline{b}^{(ij)} > 0 \quad \forall i = 1, \ldots, m, \ j = 1, \ldots, r, \tag{14}$$

яке означає, що в цьому сімействі не міститься жодного нульового елементу $b^{(ij)}$.

Для керування об’єктом (2) при $r \le m$ в умовах $B \in \Xi$, що описують невизначеність відносно матриці B, запропоновано закон керування

$$u_{n+1} = u_n + B_0^+ e_n, \tag{15}$$

отриманий заміною в (12) матриці B на деяку її фіксовану оцінку $B_0 = (b_0^{(ij)})$.

Структурна схема замкненої системи керування (2), (5), (15) зображена на рис. 1. В цій схемі регулятор будується послідовним з’єднанням псевдооберненої моделі і дигратора (дискретного інтегратора), який здійснює операцію накопичення суми $u_n = \sum_{k=1}^{n} \nabla u_k$, де $\nabla u_n := u_n - u_{n-1}$ – вихід псевдооберненої моделі, що визначається як $\nabla u_n = B_0^+ e_n$.

Дослідженню асимптотичних властивостей замкненої системи керування (2), (5), (15) передував аналіз положення її рівноваги, що визначається парою $\{u^{\mathrm{e}}, y^{\mathrm{e}}\}$, в якій $u = u^{\mathrm{e}}$ – розв’язок системи r рівнянь

$$B_0^+ B u = B_0^+ y^0 \tag{16}$$

відносно складових вектора $u = [u^{(1)}, \ldots, u^{(r)}]^{\mathrm{T}}$. Згідно з (16) це положення неодмінно існує, якщо $r \times r$-матриця $B_0^+ B$ невироджена. Виявляється, що за певних умов вимога $\det B_0^+ B \ne 0$, яка гарантує сумісність системи (16), буде виконуватися для всіх $B \in \Xi$. Аби встановити цей факт, введена матриця $\Delta = B_0 - B$, елементи $\delta^{(ij)}$ якої в силу (13) задовольняють обмеження

$$\underline{\delta}^{(ij)} \le \delta^{(ij)} \le \overline{\delta}^{(ij)} \quad i = 1, \ldots, m, \ j = 1, \ldots, r,$$

де $\underline{\delta}^{(ij)} = b_0^{(ij)} - \overline{b}^{(ij)}$, $\overline{\delta}^{(ij)} = b_0^{(ij)} - \underline{b}^{(ij)}$.

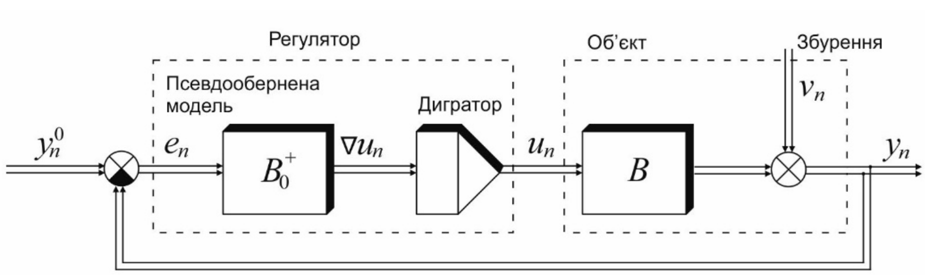

Рисунок 1 – Конфігурація системи керування об’єктом (2) за методом псевдооберненої моделі в умовах невизначеності $B \in \Xi$

Лема 1. Нехай B_0 – матриця повного рангу. Тоді якщо виконана умова

$$q < 1, \tag{17}$$

де

$$q = \max_{\Delta:\,\delta^{(ij)} \in [\underline{\delta}^{(ij)},\ \overline{\delta}^{(ij)}]} \| B_0^+ \Delta \|, \tag{18}$$

то положення рівноваги замкненої системи керування (2), (5), (15) завжди існує при будь-якій матриці $B \in \Xi$ незалежно від y^0.

Нажаль, умова (17) разом з (18) завідомо не виконується, якщо $\operatorname{rank} B_0 = r$, а множина Ξ містить матриці неповного рангу. Проте положення рівноваги в принципі може існувати навіть тоді, коли $\operatorname{rank} B < r$. Цей факт встановлює така лема.

Лема 2. Зафіксуємо деяку $m \times r$-матрицю B_0 рангу 1 з таким розрахунком, аби всі елементи псевдооберненої матриці B_0^+, заданої у формі

$$B_0^+ = \underbrace{\begin{pmatrix} \beta_0^{(11)} & k_{12}\beta_0^{(11)} & \dots & k_{m-1,\,m}\beta_0^{(11)} \\ \beta_0^{(21)} & k_{12}\beta_0^{(21)} & \dots & k_{m-1,\,m}\beta_0^{(21)} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ \beta_0^{(r1)} & k_{12}\beta_0^{(r1)} & \dots & k_{m-1,\,m}\beta_0^{(r1)} \end{pmatrix}}_{m \text{ стовпців}},$$

були ненульовими. Якщо умова $\underline{d}_k(B)\,\overline{d}_k(B) > 0,$ в якій

$$\underline{d}_k(B) = \min\nolimits_{B \in \Xi} d_k(B), \qquad \overline{d}_k(B) = \max\nolimits_{B \in \Xi} d_k(B), \tag{19}$$

де $d_k = b^{(1k)} + k_{12} b^{(2k)} + \ldots + k_{m-1,\,m} b^{(mk)}$, виконана хоча б для одного $k \in \{1, \ldots, r\}$, то замкнена система керування (2), (5), (15) за відсутності збурень має положення рівноваги при будь-якій $B \in \Xi$ і будь-якому $y^0 \in \mathbf{R}^m$.

Зауваження 3. Оскільки $d_k(B)$ – лінійні функції від $b^{(1k)}, \ldots, b^{(mk)}$, де $b^{(ik)} \in [\underline{b}^{(ik)}, \overline{b}^{(ik)}]$, то знаходження $\underline{d}_k(B)$ і $\overline{d}_k(B)$ за формулами (19) негайно зводиться до розв’язання простих задач лінійного програмування (ЛП).

Достатня умова, яка гарантує робастну стабілізацію матричного сімейства об’єктів (13) при $v_n \equiv 0_m$ та дисипативність замкненої системи керування (2), (5), (15) при $v_n \not\equiv 0_m$, сформульована у наступному твердженні.

Твердження 3. Нехай $B \in \Xi$, де множина Ξ визначається згідно з (13), (14). Тоді в умовах леми 1, а також в умовах леми 2, доповнених умовою (17), регулятор (5), (15) робастно стабілізує сімейство Ξ об’єктів (2); при цьому для довільного u_0: $\| u_0 \| < \infty$, будь-якого u^{e}, що задовольняє (16), і довільній обмеженій послідовності $\{v_n\}$ справедливі граничні оцінки зверху

$$\limsup_{n\to\infty} \| e_n \| \le \| I_m - B_0 B_0^+ \| [\| e_0 \| + 2 \sup_{0 \le n < \infty} \| v_n \|] + 2 \sup_{0 \le n < \infty} \| v_n \| (1-q)^{-1} < \infty,$$

$$\limsup_{n\to\infty} \| u_n - u^{\mathrm{e}} \| \le \| I_r - B_0^+ B_0 \| \| u_0 - u^{\mathrm{e}} \| + \| B_0^+ \| (1-q)^{-1} \sup_{0 \le n < \infty} \| v_n \|] < \infty,$$

де q визначається формулою (18).

На перший погляд здавалось, що перевірка умови (17) вимагає надмірних зусиль, пов’язаних з необхідністю перебору можливих значень елементів $\delta^{(ij)}$ матриці Δ з множин $[\underline{\delta}^{(ij)}, \overline{\delta}^{(ij)}]$ ($i = 1,\ldots, m$, $j = 1,\ldots, r$) для обчислення значення q за формулою (18). В дійсності ж це далеко не так: такого перебору можна уникнути, враховуючи те, що ця умова справедлива для будь-якої матричної норми $\| B_0^+ \Delta \|$, в тому числі й рядкової норми $\| B_0^+ \Delta \|_1$, яка є кусково-лінійною функцією від $\delta^{(ij)} \in [\underline{\delta}^{(ij)}, \overline{\delta}^{(ij)}]$. Тому перевірку умови (17) запропоновано зводити до розв’язання серії таких задач ЛП:

$$\begin{gathered} \min \sigma^{(ij)}, \qquad \max \sigma^{(ij)}, \\ \underline{\delta}^{(ij)} \le \delta^{(ij)} \le \overline{\delta}^{(ij)}, \quad i = 1,\ldots, m,\ j = 1,\ldots, r. \end{gathered} \tag{20}$$

Тут $\sigma^{(ij)} = \sum_{k=1}^{m} \beta_0^{(ik)} \delta^{(kj)}$ – лінійні форми, що залежать від елементів $B_0^+ = (\beta_0^{(ij)})$.

Наступне твердження є переформулюванням твердження 3 в термінах задач ЛП.

Твердження 4. Нехай B_0 – деяка фіксована $m \times r$-матриця, що задовольняє одну з двох вимог: 1) $\operatorname{rank} B_0 = r$, 2) $\operatorname{rank} B_0 = 1$ і виконана решта умов леми 2. Тоді при

$$\sum_{j=1}^{m} \max\{|\min \sigma^{(ij)}|, |\max \sigma^{(ij)}|\} < 1 \qquad \forall i = 1,\ldots, m,$$

де $\min \sigma^{(ij)}$ й $\max \sigma^{(ij)}$ – розв’язки задач (20) ЛП, регулятор (5), (15) забезпечує робастну стабілізацію сімейства всіх об’єктів (2) в сімействі (13).

Для експериментального підтвердження встановлених теоретичних результатів проводились розрахунки і моделювання системи керування (2), (5), (15) за наявності матриці B неповного рангу і невизначеності, заданої множиною $\Xi = \{b^{(ij)} : 0{,}4 \le b^{(11)} \le 1{,}4,\ -2 \le b^{(12)} \le -1,\ -1{,}2 \le b^{(21)} \le\le -0{,}2,\ 0{,}7 \le$ $\le b^{(22)} \le 1{,}7,\ -1{,}7 \le b^{(31)} \le -0{,}7,\ 1 \le b^{(32)} \le 2\}$, при

$$B = \begin{pmatrix} 1{,}0 & -1{,}5 \\ -0{,}8 & 1{,}2 \\ -1{,}2 & 1{,}8 \end{pmatrix} \in \Xi, \quad B_0 = \begin{pmatrix} 0{,}8 & -1{,}6 \\ -0{,}7 & 1{,}4 \\ -1{,}0 & 2{,}0 \end{pmatrix} \qquad (\operatorname{rank} B_0 = 1)$$

і $y^0 = [0{,}3,\ 0{,}4,\ 0{,}3]^{\mathrm{T}}$, аби виконати вимогу $y^0 \notin \operatorname{im} B$.

Розрахунки, проведені відповідно до (19), (20), показали, що як умови леми 2, так і в цілому умови твердження 4 виконані. Знайдена з рівняння (16) множина векторів $E_u = \{u^{\mathrm{e}}\}$ зображена на рис. 2.

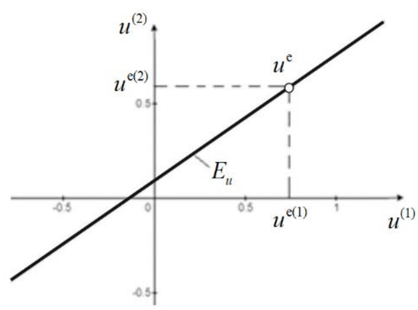

Рисунок 2 – Множина $E_u = \{u^{\mathrm{e}}\}$ положень рівноваги замкненої системи керування (2), (5), (15)

Рис. 3 ілюструє результати моделювання, при проведенні якого $\{v_n^{(1)}\}$, $\{v_n^{(2)}\}$ генерувалися як послідовності псевдовипадкових чисел, рівномірно розподілених в інтервалі $[-0{,}07,\ 0{,}07]$. Вони наочно демонструють працездатність запропонованого методу псевдооберненої моделі для керування лінійними об'єктами (2) в умовах невизначеності $B \in \Xi$.

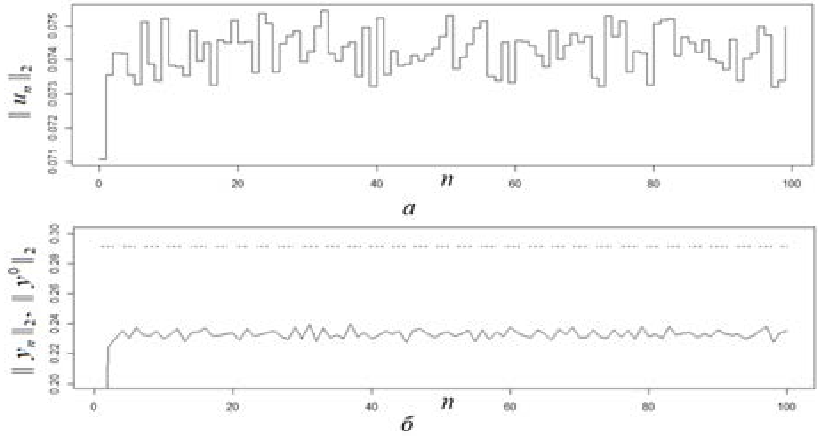

Рисунок 3 – Динамічні процеси в системі керування (2), (5), (15): *а* – норма вектора керувальних дій $\| u_n \|_2$; *б* – норма вектора вихідних величин $\| y_n \|_2$ (суцільна лінія) та вектора їхніх бажаних значень $\| y^0 \|_2$ (пунктирна лінія)

Для керування нелінійними об'єктами, що описуються рівнянням (1) з невизначеністю відносно оператора φ, запропоновано використати той же самий лінійний закон (15), в якому на матрицю B_0 покладено роль матриці коефіцієнтів підсилення лінійної номінальної моделі об'єкта. Припускається, що кожна *i*-та складова $\varphi^{(i)}(u)$ $(i = 1, \ldots, m)$ апріорі невідомої нелінійної вектор-функції $\varphi(u) = [\varphi^{(1)}(u), \ldots, \varphi^{(m)}(u)]^{\mathrm{T}}$ – неперервно диференційована функція змінних $u^{(1)}, \ldots, u^{(r)}$. Вважається далі, що

$$\underline{b}^{(ij)} \le \partial\varphi^{(i)}(u) / \partial u^{(j)} \le \overline{b}^{(ij)},\ \ 0 < \underline{b}^{(ij)} \overline{b}^{(ij)} < \infty, \quad (i = 1, \ldots, m;\ j = 1, \ldots, r),$$

причому всі межі $\underline{b}^{(ij)}, \overline{b}^{(ij)}$ апріорі відомі. В дисертації наведено приклади нелінійностей, які задовольняють ці припущення (такі нелінійності названі нелінійностями класу I).

Асимптотичні властивості замкненої системи керування об'єктом (1) з нелінійністю класу I встановлює таке твердження.

Твердження 5. Зафіксуємо деяку $m \times r$-матрицю B_0 повного рангу. Нехай $\varphi(\cdot)$ – нелінійність класу I. Якщо положення рівноваги замкненої системи керування нелінійним об'єктом (1) з лінійним зворотним зв'язком (5), (15), яке визначається розв'язком $u = u^{\mathrm{e}}$ системи рівнянь

$$B_0^{+}(y^0 - \varphi(u)) = 0_r,$$

існує, і виконана вимога (17), в якій

$$q = \max_{i=1, \ldots, m} \sum_{j=1}^{m} \max\{|\min \sigma^{(ij)}|, |\max \sigma^{(ij)}|\}, \qquad (21)$$

де $\min \sigma^{(ij)}$ і $\max \sigma^{(ij)}$ – розв'язки задач (20) ЛП, то при $v_n \equiv 0_m$ система керування (1), (5), (15) буде робастно стійкою для всього класу I нелінійностей і дисипативною за наявності обмежених відповідно до (3) збурень ($v_n \not\equiv 0_m$); при цьому

$$\limsup_{n\to\infty} \| u_n - u^{\mathrm{e}} \|_\infty \le \| B_0^+ \|_1 \, \bar{\varepsilon} \, (1-q)^{-1} < \infty,$$

$$\limsup_{n\to\infty} \| y_n - y^{\mathrm{e}} \|_\infty \le \max_{B:\, B\in\Xi} \| B \|_1 \, \| B_0^+ \|_1 \, \bar{\varepsilon} \, (1-q)^{-1} + \bar{\varepsilon} < \infty,$$

де $\bar{\varepsilon} := \sup_{n\in N_+} \| v_n \|_\infty = \max_{i=1,\dots,m} \varepsilon^{(i)}$.

Наслідок. В умовах твердження 5 при $v_n \equiv 0_m$ справедлива гранична властивість $e_n \to 0_m$ при $n \to \infty$, яка означає, що система керування нелінійним об'єктом (1) з лінійним зворотним зв'язком (5), (15) стає астатичною.

Зауваження 4. При доведенні твердження 5 суттєво використані співвідношення

$$\sup_{u\in\mathbf{R}^r} \| B_0^+ \Delta(u) \| \le \max_{\Delta:\ \delta^{(ij)} \in [\underline{\delta}^{(ij)},\, \overline{\delta}^{(ij)}]} \| B_0^+ \Delta \| < 1,$$

з яких випливає, що умова (17), (21) накладає більш жорсткі обмеження на допустимі відхилення $\Delta(u) = B_0 - B(u)$ матриці Якобі $B(u) = (\partial\varphi^{(i)}(u) / / \partial u^{(j)})$ від матриці B_0, ніж відома умова

$$q = \sup_{u\in\mathbf{R}^r} \| B_0^+ \Delta(u) \| < 1, \tag{22}$$

оскільки елементи матриці $\Delta = (\delta^{(ij)})$ пробігають можливі значення в інтервалах $[\underline{\delta}^{(ij)}, \overline{\delta}^{(ij)}]$ незалежно один від одного. Однак умова (17), в якій q визначається виразом (21), конструктивна (на відміну від умови (22)), що в практичному плані вельми важливо.

Зауваження 5. Нажаль, умови твердження 5 не можуть бути розповсюджені на випадок, коли Ξ містить хоча б одну матрицю $B(u)$ неповного рангу.

Результати модельних експериментів, проведених з системою керування (1), (5), (15) в умовах невизначеності відносно нелінійності $\varphi(\cdot)$ класу I, підтверджують працездатність запропонованого методу керування.

В роботі досліджено також асимптотичні властивості тієї ж системи робастної стабілізації сімейства нелінійних об'єктів (1) з нелінійністю класу II, визначеною наступним чином:

$$\varphi(u) = Bu + \psi(u). \tag{23}$$

Тут $B = (b^{(ij)})$ – невідома матриця, що належить інтервальному сімейству Ξ, а $\psi(u)$ – невідома нелінійна вектор-функція, обмежена за нормою:

$$\| \psi(u) \| \le C_\psi < \infty. \tag{24}$$

Проведений аналіз показав, що коли положення рівноваги замкненої системи керування (1), (5), (15), в якій $\varphi(u)$ визначається виразом (23), існує, то за наявності невизначеності у формі $B \in \Xi$ і нерівності (24) умова (17), (18) є достатньою умовою робастної стійкості (при $v_n \equiv 0_m$) і дисипативності (при $v_n \not\equiv 0_m$) цієї системи.

Зауваження 6. Для забезпечення робастної стабілізації об'єктів з нелінійністю класу II в принципі зовсім не обов'язково, аби при обмеженні (24) вектор-функція (23) задовольняла відому умову Ліпшиця

$$\| \psi(u') - \psi(u'') \| \le L \| u' - u'' \| \quad \forall\, u',\, u'' \in \mathbf{R}^r \quad (0 < L < \infty).$$

Більш того, на відміну від об'єктів з нелінійністю класу I не вимагається навіть, аби $\varphi^{(1)}(u), \ldots, \varphi^{(m)}(u)$ були гладкими функціями від $u^{(1)}, \ldots, u^{(r)}$.

Зауваження 7. На відміну від нелінійності класу I для робастного керування об'єктами з нелінійністю класу II, вимога $\operatorname{rank} B = r$ зовсім не обов'язкова.

У **четвертому розділі** проведено синтез адаптивних систем стабілізації лінійних об'єктів виду (2) і аналіз асимптотичних властивостей цих систем. В рамках стандартного ідентифікаційного підходу до побудови адаптивних регуляторів за наявності одного каналу передачі керувальних дій і кількох вихідних змінних $(m \ge 2)$ запропоновано закон керування

$$u_n = u_{n-1} + B_n^+ e_n, \tag{25}$$

отриманий заміною в (12) невідомої матриці $B = [b^{(1)}, \ldots, b^{(m)}]^{\mathrm{T}}$ з усіма ненульовими елементами на її поточну оцінку $B_n = [b_n^{(1)}, \ldots, b_n^{(m)}]^{\mathrm{T}}$, яка уточнюється на кожному n-му кроці шляхом функціональної ідентифікації моделі об'єкта (2); при цьому

$$B_n^+ = \frac{1}{[b_n^{(1)}]^2 + \ldots + [b_n^{(m)}]^2} B_n^{\mathrm{T}}, \quad b_n^{(i)} \ne 0 \quad \forall i = 1, \ldots, m.$$

Процедури адаптації визначаються суперпозицією операцій поточного точкового і множинного оцінювання, що зводиться до рекурентного розв'язування нескінченних систем нерівностей

$$|\hat{b}^{(i)} \nabla u_{n-1} + e_n^{(i)} - e_{n-1}^{(i)}| \le 2\varepsilon^{(i)}, \quad |\hat{b}^{(i)} u_{n-1} - y_n^{(i)}| \le \varepsilon^{(i)}, \quad n = 1, 2, \ldots$$

відносно $\hat{b}^{(i)} \in \mathbf{R}$ (при відомих межах $\varepsilon^{(i)}$ збурень $v_n^{(i)}$) і нескінченних систем нерівностей

$$|\hat{b}^{(i)} \nabla u_{n-1} + e_n^{(i)} - e_{n-1}^{(i)}| \le 2\hat{\varepsilon}^{(i)}, \quad |\hat{b}^{(i)} u_{n-1} - y_n^{(i)}| \le \hat{\varepsilon}^{(i)}, \quad n = 1, 2, \ldots$$

відносно $\hat{b}^{(i)}$ і $\hat{\varepsilon}^{(i)} \in \mathbf{R}$ $(i = 1, \ldots, m)$ (при невідомих межах $\varepsilon^{(i)}$ збурень $v_n^{(i)}$), де $e_n^{(i)}, e_{n-1}^{(i)}$ – i-ті складові векторів e_n та e_{n-1} відповідно.

Теоретично встановлено, що при будь-яких початкових оцінках $b_0^{(i)} \ne 0$ $(i = 1, \ldots, m)$ синтезовані процедури адаптивного керування забезпечують виконання граничних вимог (9), (10). Працездатність систем стабілізації об'єкта (2) за законом (25) підтверджено результатами моделювання.

Нажаль, стандартний ідентифікаційний підхід виявився неприйнятним при $r \ge 2$, якщо $r < m$, чи $r = m$, а $\operatorname{rank} B < r$. Аби справитись з керуванням об'єктом (2) в умовах невизначеностей, коли ранг матриці B довільний, а $B \in \Xi$, в роботі висунута одна ідея, яка у випадку $r \times r$-матриці B передбачає перехід від адаптивного оцінювання невідомих елементів $b^{(ij)}$ можливо виродженої матриці B і керування об'єктом (2) за законом (25) до адаптивного оцінювання елементів $\tilde{b}^{(ij)}$ завідомо невиродженої матриці $\tilde{B}$ коефіцієнтів підсилення деякого віртуального об'єкта за іншим законом одночасно з керуванням істинним об'єктом (2) за цим же законом. Сама ж матриця $\tilde{B}$ визначається як $\tilde{B} = B + \delta_0 I_r$, де δ_0 – скаляр, вибором якого в силу відомої з матричної алгебри теореми Адамара можна гарантувати невиродженість $\tilde{B}$. А для знаходження прийнятного значення δ_0 з умови $\det \tilde{B} \neq 0$ запропоновано оригінальний прийом, що спирається на відому в теорії матриць теорему Гершгорина і використання апріорної інформації відносно B.

Важливо зазначити, що віртуальний об'єкт, який описується рівнянням

$$\tilde{y}_n = \tilde{B} u_{n-1} + v_{n-1} \tag{26}$$

і піддається дії тих же збурень $v_n^{(1)}, \ldots, v_n^{(r)}$, що й істинний об'єкт (2) при $m = r$, має, очевидно, вихід $\tilde{y}_n = y_n + \delta_0 u_{n-1}$, доступний для опосередкованого вимірювання. Цей факт дозволяє стабілізувати віртуальний об'єкт (26) (одночасно з істинним об'єктом (2)) за методом оберненої моделі у формі

$$u_n = u_{n-1} + \tilde{B}_n^{-1}(y^0 - \tilde{y}_n), \tag{27}$$

де $\tilde{B}_n$ – поточна оцінка невідомої матриці $\tilde{B}$ така, що $\det \tilde{B}_n \neq 0 \;\forall n \in N_+$. В умовах, коли $\varepsilon^{(i)}$ відомі, вектори $\tilde{b}_n^{(i)} = [\tilde{b}_n^{(i1)}, \ldots, \tilde{b}_n^{(ir)}]^{\mathrm{T}}$ $(i = 1, \ldots, r)$, утворені рядками $\tilde{B}_n$, уточнюються на основі стандартної процедури ідентифікації

$$\tilde{b}_n^{(i)} = \begin{cases} \tilde{b}_{n-1}^{(i)}, & \text{якщо } |\tilde{e}_n^{*(i)}| \leq \varepsilon^{0(i)}, \\ \tilde{b}_{n-1}^{(i)} + \gamma_n^{(i)} \dfrac{\tilde{e}_n^{*(i)} - 2\varepsilon^{(i)} \operatorname{sign} \tilde{e}_n^{*(i)}}{\| \nabla u_{n-1} \|_2^2} \nabla u_{n-1} & \text{в іншому випадку.} \end{cases} \tag{28}$$

Тут $\tilde{e}_n^{*(i)} = \nabla \tilde{y}_n^{(i)} - \tilde{b}_{n-1}^{(i)\mathrm{T}} \nabla u_{n-1}$ – поточна похибка оцінювання $\tilde{b}^{(i)}$, де $\nabla \tilde{y}_n^{(i)} := \tilde{y}_n^{(i)} - \tilde{y}_{n-1}^{(i)}$; $\varepsilon^{0(i)} > 2\varepsilon^{(i)}$; $\gamma_n^{(i)}$ – коефіцієнти, які вільно вибираються в інтервалі $0 < \underline{\gamma}^{(i)} \leq \gamma_n^{(i)} \leq \bar{\gamma}^{(i)} < 2$, виходячи з потреби виконання вимоги $\det \tilde{B}_n \neq 0$.

Здатність синтезованого адаптивного регулятора (27), (28) забезпечити виконання граничних вимог (9), (10) спирається на наступну лему.

Лема 3. При $m = r$ і будь-яких $u_0 \in \mathbf{R}^r$, $\tilde{B}_0$: $\det \tilde{B}_0 \neq 0$ замкнена система (26) – (28) в умовах (3), коли $\det \tilde{B} \neq 0$, має такі асимптотичні властивості: а) оцінки $\tilde{B}_n$, породжені процедурою (28), збігаються за скінченний час; б) $\exists\, n^* < \infty : \;\; \| u_n \|_2 \leq \| \tilde{B}^{-1} \|_2 \,(\| y^0 \|_2 + 3\varepsilon^0 / 2) \;\;\; \forall n \geq n^*$, де

$$\varepsilon^0 = +\sqrt{[\varepsilon^{0(1)}]^2 + \ldots + [\varepsilon^{0(r)}]^2}.$$

Для стабілізації об'єкта (2) при $m = r$ і невідомих рівнях збурень закон керування (27) залишається незмінним, тоді як процедура адаптивної ідентифікації (28) певним чином модифікується введенням додаткової операції поточного оцінювання рівнів $\varepsilon^{(1)}, \ldots, \varepsilon^{(r)}$.

Висунуту ідею адаптивної стабілізації об'єкта (2) при $\det B = 0$ розповсюджено на випадок невідомої прямокутної матриці B будь-якого рангу. Реалізація цієї ідеї потребувала введення $r \times r$ -підматриць $B[i_1[k], \ldots, i_r[k] | 1, \ldots, r]$, рядки яких співпадають з рядками B, що мають номери $i_1[k], \ldots, i_r[k]$ $(1 \leq i_1[k] < \ldots < i_r[k] \leq m)$, $k = 1, \ldots, N$, де $N = \begin{pmatrix} m \\ r \end{pmatrix} \geq 3$. Такий прийом дозволив визначити N рівнянь віртуальних об'єктів у формі

$$\tilde{y}_n[k] = \tilde{B}[k]u_{n-1} + v_{n-1}[k], \quad k = 1, \ldots, N.$$

У цих рівняннях $\tilde{B}[k] = B[k] + \delta_0[k]I_r$, де $B[k] := B[i_1[k], \ldots, i_r[k] | 1, \ldots, r]$; $\delta_0[k]$ – деякі фіксовані числа, знайдені з умови $\det \tilde{B}[k] \neq 0 \ \forall k = 1, \ldots, N$; $\tilde{y}_n[k] = [\tilde{y}_n^{(i_1[k])}, \ldots, \tilde{y}_n^{(i_r[k])}]^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^r$ – вектор вихідних змінних k-го віртуального об’єкта, який можна опосередковано виміряти, використовуючи формулу

$$\tilde{y}_n[k] = y_n[k] + \delta_0[k]u_{n-1};$$

$v_n[k] = [v_n^{(i_1[k])}, \ldots, v_n^{(i_r[k])}]^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^r$ – вектор збурень, що діють на цей об’єкт.

Відповідно до запропонованого методу на основі інформації про $\tilde{y}_n[k]$ за процедурами типу (28) мають одночасно уточнюватися не тільки оцінки $\tilde{B}_n[k]$ всіх N матриць $\tilde{B}[k]$, але й оцінки B_n матриці B в рівнянні (2) істинного об’єкта (на відміну від випадку, коли $m = r$). При виконанні ж вимоги $\det \tilde{B}_n[k] \neq 0$ це дозволяє в кожний момент n сформувати набір $U_n = \{u_n[1], \ldots \ldots, u_n[N]\}$ «потенційно» можливих векторів керувальних дій

$$u_n[k] = u_{n-1} + \tilde{B}_n^{-1}[k]\,(y^0[k] - \tilde{y}_n[k]), \quad k = 1, \ldots, N,$$

де $y^0[k] = [y^{0(i_1[k])}, \ldots, y^{0(i_r[k])}]^{\mathrm{T}} \in \mathbf{R}^r$, і при $\tilde{B}_n = \tilde{B}_{n-1} \ \forall k$ прогнозувати на один крок вперед вектор $\vec{e}_{n+1}[k] = y^0 - B_n u_n[k] - v_n$ похибок істинного об’єкта в момент $n+1$. Тоді мінімізація верхньої грані 1-норми вектора $\vec{e}_{n+1}[k]$ за k при всіх $v_n \in \Omega$ врешті-решт приводить до закону керування

$$u_n = u_{n-1} + \tilde{B}_n^{-1}[k_n]\,(y^0[k_n] - \tilde{y}_n[k_n]), \tag{29}$$

де k_n – довільне число з набору $\{1, \ldots, N\}$, якщо $n = 0$; якщо ж $n = 1, 2, \ldots$, то

$$k_n = \begin{cases} \arg \min\limits_{k:\, u_n[k] \in U_n} \| y^0 - B_n u_n[k] \|_1 & \text{при } \tilde{B}_n[k] = \tilde{B}_{n-1}[k] \quad \forall k = 1, \ldots, N, \\ k_{n-1} & \text{в інших випадках.} \end{cases} \tag{30}$$

Для встановлення асимптотичних властивостей адаптивної системи керування об’єктом (2) за законом (29), (30), що гарантують виконання вимог (9), (10), суттєво використано лему 3, в основу якої покладена концепція В. А. Якубовича скінченно-збіжних процедур адаптивного оцінювання.

Результати математичного моделювання цієї системи показали працездатність і ефективність запропонованого методу адаптивного керування.

П'ятий розділ присвячено прикладним питанням автоматичного керування двома промисловими технологічними процесами, а саме процесами ректифікації і процесами розподілу дуття за фурмами доменної печі, принципіальні схеми яких зображені на рис. 4 і 5.

Вихідними змінними процесу ректифікації як об’єкта керування слугують склад x_{D} дистиляту й кубового продукту x_{B}, а керувальними діями – витрата L флегми і витрата V кубового залишку, що повертаються (рис. 4). Виявилося, що при відносно великому періоді T_0 дискретизації цей процес можна з прийнятною точністю описати в дискретному часі $n \in N_+$ різницевим рівняння типу (2), в якому $y_n = [x_{\mathrm{D}}(n), x_{\mathrm{B}}(n)]^{\mathrm{T}}$, $u_n = [L(n), V(n)]^{\mathrm{T}}$,

$v_n = [v_n^{(1)}, v_n^{(2)}]^{\mathrm{T}}$ – вектор неконтрольованих збурень, а B – погано обумовлена матриця ($\mathrm{cond}\, B >> 1$). Хоча тут $\det B \neq 0,$ проте від керування таким процесом за методом оберненої моделі відповідно до (11) з урахуванням (5) при $y^0 = [x_{\mathrm{D}}^0, x_{\mathrm{B}}^0]^{\mathrm{T}}$ в умовах довільних обмежених збурень $v_n^{(1)}, v_n^{(2)}$ слід відмовитися, оскільки, як встановлено в дисертації, це керування неминуче має привести до помітних коливань $\| u_n \|$. Аби придушити ці коливання і одночасно забезпечити астатизм замкненої системи, запропоновано метод зваженої оберненої/псевдооберненої моделі

$$u_n = u_{n-1} + (c_0 B^{-1} + c_1 B_0^{+})\, e_n. \tag{31}$$

де B_0 – найближча до B (в сенсі мінімуму фробеніусової норми $\| B_0 - B \|_{\mathrm{F}}$) вироджена матриця, а $c_0,\ c_1 > 0$ – вагові коефіцієнти, вибором яких завжди можна забезпечити дисипативність системи керування. Цей закон акумулює переваги і можливості методу оберненої моделі та так званого модифікованого методу псевдооберненої моделі. Реалізація закону (31), що потребує пошуку B_0, зводиться до математичної задачі умовної оптимізації, яка розв’язується відомим методом множників Лагранжа.

Результати моделювання системи керування процесом ректифікації за даним законом показали його ефективність.

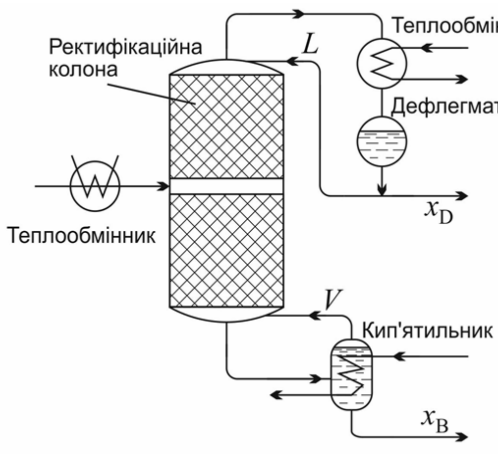

Рисунок 4 – Принципіальна схема процесу ректифікації

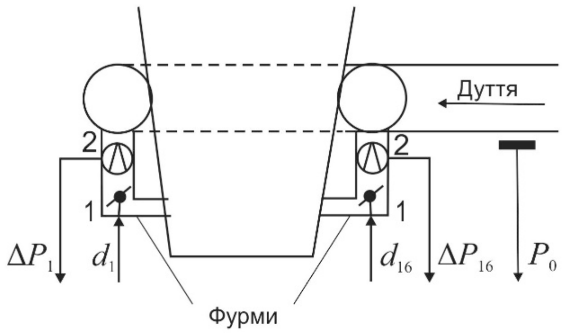

Рисунок 5 – Принципіальна схема процесу розподілу дуття за фурмами доменної печі: 1 – заслінки; 2 – звужуючі пристрої

Керування процесом розподілу дуття за фурмами доменної печі (рис. 5) здійснюється зміною положень регулюючих заслінок 1 за сигналами $d_1, \ldots, d_{16}$ (відповідно до числа $r = 16$ фурм). Вихідними змінними тут виступають складові розподілу дуття (різниці $\Delta Q_{1,2}, \ldots, \Delta Q_{16,1}$ між витратами дуття у сусідніх фурмах), які опосередковано вимірюються за сигналами $\Delta P_1, \ldots, \Delta P_{16}, P_0$ давачів перепаду тиску на звужуючих пристроях 2 і тиску газу в трубопроводі. Як об’єкт керування цей технологічний процес описується рівнянням (2). Його особливістю є виродженість матриці B. Тому керування цим процесом запропоновано здійснювати за законом (12).

Результати проведених на промисловому підприємстві АТ «Полтавський турбомеханічний завод» випробувань підтвердили працездатність та ефективність розробленого методу і алгоритму керування.

У **додатках** наведено розраховані пряма та псевдообернена матриці коефіцієнтів підсилення моделі технологічного процесу розподілу дуття, а також копії документів про впровадження результатів дисертаційної роботи на АТ «Полтавський турбомеханічний завод» та в навчальний процес Національного університету «Полтавська політехніка імені Юрія Кондратюка».

ВИСНОВКИ

В дисертації розв'язана актуальна науково-технічна задача розроблення і дослідження дискретних систем керування лінійними і деякими класами нелінійних багатозв'язних об'єктів без пам'яті з числом каналів передачі керувальних дій, що не перевищує числа вихідних змінних, при повній і неповній інформації про матрицю коефіцієнтів підсилення об'єкта незалежно від її рангу. За отриманими при виконанні роботи результатами досліджень можна зробити наступні висновки.

1. Замкнена система керування, побудована за методом псевдооберненої моделі при відомій матриці коефіцієнтів підсилення об'єкта, має положення рівноваги незалежно від рангу цієї матриці, причому при повному ранзі цієї матриці положення рівноваги – одноточкова множина, а при неповному ранзі – деякий лінійний многовид.

2. Якщо вектор бажаних значень вихідних величин системи сталий, а збурення відсутні, то при повній апріорній інформації відносно матриці коефіцієнтів підсилення об'єкта і будь-якому її рангу метод псевдооберненої моделі дає змогу мінімізувати верхню межу евклідової норми вектора похибок замкненої системи керування в кожний дискретний момент часу. В тих самих умовах гарантується стійкість, а за наявності обмежених збурень – дисипативність цієї системи.

3. При виконанні певних умов, встановлених в роботі, за наявності інтервальної невизначеності відносно елементів матриці коефіцієнтів підсилення лінійного багатозв'язного об'єкта без пам'яті незалежно від рангу цієї матриці гарантується існування положень рівноваги замкненої системи керування, що містить такий об'єкт і регулятор, побудований на основі лінійної псевдооберненої моделі. Ці умови конструктивні: їх можна доволі просто перевірити методами лінійного програмування.

4. При певних умовах за наявності інтервальних обмежень на елементи невідомої матриці коефіцієнтів підсилення об'єкта розроблений метод псевдооберненої моделі дозволяє забезпечити робастну стійкість замкненої системи керування лінійними і деякими класами нелінійних багатозв'язних об'єктів без пам'яті, коли збурення відсутні, та дисипативність такої системи при обмежених збуреннях. Встановлені умови допускають перевірку такими ж засобами, як і перевірку умов існування положення рівноваги.

5. Розроблений в рамках концепції псевдообернення метод адаптивної стабілізації лінійного багатозв'язного об'єкта без пам'яті з одним каналом передачі керувальних дій і кількома вихідними змінними, що передбачає використання стандартних процедур адаптивної ідентифікації, здатний забезпечити дисипативність замкненої системи керування за наявності як параметричної, так і непараметричної невизначеності, пов'язаної з відсутністю апріорної інформації про рівні невимірюваних збурень.

6. Розроблений метод адаптивної стабілізації лінійних багатозв'язних об'єктів без пам'яті, основу якого складає висунута ідея одночасного керування істинним і так званими віртуальними об'єктами на основі стандартних процедур адаптивного оцінювання, дозволяє стабілізувати такі об'єкти в умовах інтервальної невизначеності відносно елементів матриць коефіцієнтів підсилення незалежно від рангу цих матриць.

7. Математичне моделювання системи керування технологічним процесом ректифікації, яке реалізує запропоновані метод і алгоритм керування багатозв'язним об'єктом без пам'яті за наявності поганообумовленої матриці коефіцієнтів підсилення, продемонструвало можливість придушення коливань керувальних дій, викликаних збуреннями, і забезпечення астатизму цієї системи. Розроблені алгоритми керування багатозв'язним об'єктом без пам'яті за наявності виродженої матриці коефіцієнтів підсилення, які пройшли випробування в реальних умовах АТ «Полтавський турбомеханічний завод» у складі програмно-алгоритмічного забезпечення системи автоматичного керування процесом розподілу дуття за фурмами доменної печі, показали свою ефективність.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Статті в наукових журналах, які включено до наукометричної бази Scopus

1. 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.

2. 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. N 5. P. 12–26.

Статті у наукових фахових виданнях

3. Гриценко В. И., Житецкий 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.

4. Zhiteckii L. S., Azarskov V. N., Solovchuk K. Yu. Solving a problem of adaptive stabilization for some static MIMO systems. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2019. N 3 (197). P. 33–50.

5. Соловчук К. Ю. Математичні моделі типових неперервних технологічних процесів, орієнтованих на комп'ютерне керування. *Управляющие системы и машины*. 2018. № 5. С. 79–92.

6. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Adaptive stabilization of some multivariable systems with nonsquare gain matrices of full rank. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2018. № 2 (192). С. 44–61.

7. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Discrete-time steady-state control of interconnected systems based on pseudoinversion concept. *Кибернетика и вычислительная техника*. 2017. № 189. С. 29–43.

8. Zhiteckii L. S., Nikolaienko S. A., Solovchuk K. Yu. Adaptation and learning in some classes of identification and control systems. *Cybernetics and Computer Engineering*. 2015. N 181.C. 47–65.

9. Скурихин В. И., Гриценко В. И., Житецкий 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.

10. Azarskov V. N., Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Discrete-time control of linear multivariable systems with either singular or ill-conditioned transfer function matrices. *Proceedings of the National Aviation University*. 2014. N 2. P. 19–27.

11. Скурихин В. И., Житецкий Л. С., Соловчук К. Ю. Управление многосвязными объектами с вырожденными и плохо обусловленными передаточными матрицами на основе метода псевдообратного оператора. *Управляющие системы и машины*. 2013. №3. С. 14–20, 29.

12. Azarskov V. N., Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Adaptive robust control of multivariable static plants with possibly singular transfer matrix. *Electronics and Control Systems*. 2013. N 4. P. 47–53.

13. Соловчук К. Ю. Управление в многосвязных системах с плохо обусловленной передаточной матрицей объекта. *Математичні машини і системи*. 2013. №2.С. 45–45.

Статті в закордонних наукових журналах

14. Азарсков В. Н., Житецкий Л. С., Соловчук К. Ю. Управление многосвязными технологическими процессами в условиях неопределенности с использованием концепции обобщенного инвертирования. *Современная наука: актуальные проблемы теории и практики. Естественные и технические науки*. 2014. №5/6. С. 11–20 (РИНЦ).

Матеріали конференцій, які включено до наукометричних баз Scopus

15. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Robust adaptive pseudoinverse model-based control of an uncertain SIMO memoryless system with bounded disturbances. *IEEE 2nd Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2019* : proc. Lviv, 2019. P. 628–633.

16. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Analysis of Multivariable Regulation Systems Using Pseudo-Inverse Model-Based Controllers. *IEEE First Ukraine Conference on Electrical and Computer Engineering UKRCON-2017* : proc. Kiev, 2017. P. 894–899.

17. Zhiteckii L. S., Azarskov V. N., Solovchuk K. Yu., Sushchenko O. A. Discrete-time robust steady-state control of nonlinear multivariable systems : a unified approach. *19th IFAC World Congress* : proc. Cape Town, 2014. P. 8140–8145.

18. Azarskov V. N., Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. A robust adaptive automatic MIMO process control in the presence of great parametric uncertainty. *Aviation in the XXI-st Century* : the VI World Congress Safety in Aviation and Space Technologies : proc. Kiev : NAU, 2014. V. 2. P. 351–355.

Матеріали конференцій

19. Житецкий Л. С., Азарсков В. Н., Соловчук К. Ю. Адаптивное робастное управление многосвязными статическими объектами с прямоугольными матрицами коэффициентов усиления. *XIII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2019* : тр. Всерос. совещания. Москва : ИПУ, 2019. С. 713–718.

20. Азарсков В. Н., Житецкий Л. С., Соловчук К. Ю. Идентификационный подход к задаче робастного управления многосвязными статическими объектами с нестохастическими неопределенностями. *Идентификация систем и задачи управления SICPRO'15* : тр. X международной конференции. Москва : ИПУ, 2015. С. 520–538.

21. Азарсков В. Н., Житецкий Л. С., Соловчук К. Ю. Параметрическая идентификация многосвязного статического объекта в замкненом контуре управления: специальный случай. *XII Всероссийское совещание по проблемам управления ВСПУ-2014* : тр. Всерос. совещания. Москва : ИПУ, 2014. С. 2764–2776.

22. Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Adaptive pseudoinverse model-based control of some memoryless SIMO and MIMO systems. *Автоматика/Automatics–2018* : матеріали XXV міжнародної конференції. Львів : ЛПТ, 2018. С. 145–146.

23. Соловчук К. Ю. Робастное управление одним классом нелинейных статических объектов с использованием метода псевдообращения. *Автоматика/Automatics–2016* : матеріали XXIII міжнародної конференції. Суми : СумДУ, 2016. С. 65–66.

24. Azarskov V. N., Zhiteckii L. S., Solovchuk K. Yu. Robustness analysis of some multivariable feedback control systems containing generalized inverse model-based controllers. *Infocom Advanced Solution 2015* : матеріали міжнародної конференції. Київ : КПІ, 2015. V. 1. P. 94–95.

25. Azarskov V. N., Rudiuk G. I., Kurganskyi O. Yu., Solovchuk K. Yu. Adaptive robust control of linear MIMO static plant with an arbitrary transfer matrix and bounded noise: a generalization. *Автоматика/Automatics–2015* : матеріали XXII міжнародної конференції. Одеса : ОНПУ, 2015.

26. Азарсков В. Н., Житецкий Л. С., Соловчук К. Ю. Робастно-адаптивное управление многосвязным статическим объектом с вырожденной передаточной матрицей. *Автоматика/Automatics–2014* : матеріали XXI міжнародної конференції. Київ : КПІ, 2014.

27. Азарсков В. Н., Житецкий Л. С., Соловчук К. Ю. Optimal and suboptimal control of static multivariable plants based on generalized inverse matrix approach. *Автоматика/Automatics–2013* : матеріали XX міжнародної конференції. Миколаїв : НУК, 2013. С. 65–66.

28. Скурихин В. И., Житецкий Л. С., Соловчук К. Ю. Оптимальное управление многосвязными статическими объектами с произвольными передаточными матрицами. *Автоматика/Automatics–2013* : матеріали XX міжнародної конференції. Миколаїв : НУК, 2013. С. 63–64.

29. Скурихин В. И., Житецкий Л. С., Соловчук К. Ю. Метод псевдообратного оператора в задаче оптимального управления многосвязным объектом с вырожденной передаточной матрицей. *Автоматика/ Automatics–2012* : матеріали XIX міжнародної конференції. Київ : НУХТ, 2012. С. 63–64.

30. Соловчук К. Ю. Системы управления технологическими процессами на основе встроенных псевдообратных моделей. *Математичне та імітаційне моделювання систем. МОДС 2012* : матеріали VII міжнародної науково-практичної конференції. Чернігів : ЧТУ. 2012. С. 185–189.

31. Соловчук К. Ю. Керування дискретними багатовимірними об'єктами з виродженими передавальним матрицями за наявності обмежених збурень. *Інформатика та системні науки* : наук. праці III Всеукраїнської науково-практичної конференції. Полтава : ПУЕТ, 2012. С. 634– 636.

АНОТАЦІЯ

Соловчук К. Ю. Методи та алгоритми керування багатозв'язними об'єктами без пам'яті в умовах невизначеності. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 05.13.03 – «Системи та процеси керування». – Національний авіаційний університет, Київ, 2020.

Дисертація присвячена розробленню та дослідженню методів та алгоритмів керування в дискретному часі багатозв'язними об'єктами без пам'яті з числом вихідних змінних, що можуть перевищувати число каналів передачі керувальних дій, за наявності невимірюваних, але обмежених збурень в умовах невизначеностей відносно коефіцієнтів підсилення об'єкта та рівнів збурень. Новизна основного наукового результату полягає в тому, що запропонований метод псевдооберненої моделі може бути використаний як деякий універсальний метод побудови замкнених дискретних систем керування багатозв'язними об'єктами без пам'яті при будь-якій матриці коефіцієнтів підсилення об'єкта.

Наведено результати моделювання системи керування дистиляційною колоною за методом псевдооберненої моделі, а також реальні практичні результати, отримані після впровадження цього методу для автоматичного керування розподілом дуття за фурмами доменної печі.

Ключові слова: багатозв'язний об'єкт без пам'яті, замкнена система керування, псевдообернена модель, положення рівноваги, стійкість, оптимальність, робастність, адаптивне керування, дисипативність.

АННОТАЦИЯ

Соловчук К. Ю. Методы и алгоритмы управления многосвязными объектами без памяти в условиях неопределенности. – Квалификационная научная работа на правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 05.13.03 – «Системы и процессы управления». – Национальный авиационный университет, Киев, 2020.

Диссертация посвящена разработке и исследованию методов и алгоритмов построения дискретных систем управления многосвязными объектами без памяти с числом выходных переменных, которые могут превышать число каналов передачи управляющих воздействий, при наличии ограниченных неизмеряемых возмущений с неопределенностями относительно статических характеристик объектов и границ возмущений.

Новизна основного научного результата заключается в том, что в рамках общей концепции решения так называемых задач обратной динамики впервые предложен и теоретически обоснован метод псевдообратной модели как некий универсальный метод построения замкнутых дискретных систем управления многосвязными объектами без памяти при произвольных и возможно неизвестных матрицах коэффициентов усиления.

Показано, что если имеется полная информация о всех коэффициентах усиления, а возмущения отсутствуют, то закон управления, построенный на основе псевдообратной модели объекта, формально синтезируется путем решения одной оптимизационной задачи, в которой критерием качества функционирования системы выступает такой локальный показатель как верхняя грань евклидовой нормы вектора ошибок этой системы. Теоретически установлено, что при наличии нерегулярных ограниченных возмущений этот закон минимизирует указанный показатель в случае, когда множество возможных значений возмущений имеет форму шара. При этом в условиях ограниченных возмущений гарантируется диссипативность замкнутой системы управления, а при отсутствии возмущений – существование устойчивых положений равновесия системы независимо от ранга матрицы коэффициентов усиления. Синтезированный закон позволяет достичь наилучшего показателя качества управления линейными многосвязными объектами без памяти с вырожденными, плохообусловленными или прямоугольными матрицами коэффициентов усиления.

Метод псевдообратной модели распространен на класс линейных, а также на некоторые классы нелинейных многосвязных объектов без памяти при наличии неопределенностей. Реализация этого метода предполагает выбор некоторой фиксированной линейной номинальной модели объекта, которая позволяет построить регулятор, содержащий модель, псевдообратную выбранной номинальной модели. Установлены достаточные условия существования положения равновесия и робастной устойчивости синтезированных систем управления. Показано, что при выполнении этих условий и отсутствии возмущений система управления, содержащая нелинейный многосвязный объект и линейный регулятор, будет обладать свойством астатизма.

На основе концепции псевдообращения разработан и обоснован метод адаптивного управления объектом с одним каналом передачи управляющих воздействий и любым числом выходных переменных, предусматривающий использование процедур точечного и множественного оценивания неизвестной матрицы коэффициентов усиления объекта. Для адаптивной стабилизации объектов с произвольной матрицей коэффициентов усиления при наличии интервальной неопределенности относительно элементов этой

матрицы предложен метод, основу которого составляет идея одновременной функциональной идентификации истинного объекта и определенного числа виртуальных объектов. Особенностью этого метода является то, что матрицы коэффициентов усиления этих виртуальных объектов – заведомо невырожденные квадратные матрицы, а векторы выходных переменных могут быть косвенно измерены. Установлены асимптотические свойства синтезированных систем управления, подтвержденные результатами модельных экспериментов.

Приведены результаты практической реализации разработанных на основе метода псевдообратной модели алгоритмов для автоматического управления технологическим процессом ректификации, особенностью которого является плохая обусловленность матрицы коэффициентов усиления, а также технологическим процессом распределения дутья по фурмами доменной печи, особенность которого состоит в вырожденности этой матрицы. Эти результаты подтверждают работоспособность и эффективность разработанного метода.

Ключевые слова: многосвязный объект без памяти, замкнутая система управления, псевдообратная модель, положение равновесия, устойчивость, оптимальность, робастность, адаптивное управление, диссипативность.

ABSTRACT

Solovchuk K. Yu. Methods and algorithms for control of interconnected memoryless plants under uncertainty. – Qualification scientific work on the rights of the manuscript.

Thesis for the degree of Candidate of Technical Sciences in specialty 05.13.03 – «Control Systems and Processes». – National Aviation University, Kyiv, 2020.

The thesis is devoted to the development and study of methods and algorithms for the discrete-time control of interconnected memoryless plants where the number of output variables can exceed the number of their input variables in the presence of unmeasurable but bounded disturbances under possible uncertainties about the gain matrices and also the bounds on these disturbances. The novelty of main scientific results is that the proposed pseudoinverse model-based method may be used as a universal method to deal with the interconnected memoryless plants to be controlled irrespective of the ranks of their gain matrices.

Simulation results concerning the implementation of the pseudoinverse model-based approach to control a distillation column and also the real practical results obtained after the use of this approach to automatic blast distribution among the tuyeres of a blast furnace are presented.

Keywords: interconnected memoryless plant, closed-loop control system, pseudoinverse model, equilibrium state, stability, optimality, robustness, adaptive control, dissipativeness.

Підписано до друку 07.12.2020 р. Формат 60x84/16.
Папір офс. Ум. др. арк. 1,9 Друк різограф.
Тираж 100 прим. Зам. № 123-5.

Надруковано ФОП Пусан А.Ф.
Податковий номер №2975313693

м. Полтава,
вул. Нікітченка, 6 кв. 48
Тел.: 050-911-65-07.