

Козлов Олексій Валерійович

Кандидат технічних наук, доцент, докторант кафедри інтелектуальних інформаційних систем, orcid.org/0000-0003-2069-5578

Чорноморський національний університет імені Петра Могили, Миколаїв

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДЛЯ СИНТЕЗУ
ТА ОПТИМІЗАЦІЇ БАЗ ПРАВИЛ НЕЧІТКИХ СИСТЕМ**

***Анотація.** В останні два десятиріччя інтелектуальні комп'ютерні системи, що базуються на теорії нечітких множин, нечіткої логіки та м'яких обчислень, доволі широко застосовуються в різних галузях науки і техніки для вирішення завдань управління, ідентифікації, моделювання складних фізичних та економічних явищ, класифікації, розпізнавання образів тощо. Сучасні дослідження в області створення і розвитку нечітких систем (НС) управління та прийняття рішень ведуться переважно в напрямі розроблення високоефективних методів та інформаційних технологій їх синтезу та структурно-параметричної оптимізації. Робота присвячена розробленню та дослідженню інформаційної технології для синтезу та оптимізації високоефективних баз правил (БП) з оптимальним набором консеквентів та оптимальною кількістю правил для НС типу Мамдані в умовах неповної вихідної інформації. Розроблена інформаційна технологія допомагає проводити ітераційний пошук оптимального вектора консеквентів БП на основі послідовного перебирання консеквентів кожного правила, а також здійснювати виявлення та виключення правил з БП, які не впливають на процес функціонування системи, для зменшення загальної кількості правил до оптимальної. Для дослідження ефективності запропонованої інформаційної технології в запропонованій роботі проведено синтез та оптимізація БП нечіткої системи автоматичного керування (САК) багатоцільовим мобільним роботом (МР), що здатен переміщуватися по похилих і вертикальних феромагнітних поверхнях. Отримані результати комп'ютерного моделювання засвідчили, що нечітка САК МР з оптимізованою БП на основі розробленої інформаційної технології має більш високі показники якості керування в порівнянні із САК з аналогічною БП, що розроблена на основі знань експертів. Також оптимізована БП за допомогою запропонованої інформаційної технології має менше правил ніж повна БП, яка синтезована на основі знань експертів, що в результаті дає змогу значно спростити подальшу програмно-апаратну реалізацію розробленої нечіткої САК МР. Крім того, в процесі синтезу та оптимізації БП для нечіткої САК МР представлена інформаційна технологія не вимагала суттєвих обчислювальних затрат, що загалом підтверджує її високу ефективність та доцільність застосування для проєктування баз правил різнотипних НС управління і прийняття рішень.*

Ключові слова: нечітка система; база правил; інформаційна технологія для синтезу та оптимізації; система автоматичного управління; нечіткий регулятор; мобільний робот

Вступ

Інтелектуальні комп'ютерні системи, що базуються на теорії нечіткої логіки, нечітких множин та м'яких обчислень, останнім часом досить широко впроваджені в різних сферах науки і техніки для вирішення завдань управління та ідентифікації, прогнозування та діагностики, моделювання складних фізичних та економічних явищ, класифікації та розпізнавання образів [1]. Наведені системи дають змогу з достатньо високою ефективністю узагальнювати експертну інформацію, формалізувати механізми мислення і прийняття рішень людини, а також формувати лінгвістичні моделі складних об'єктів і процесів [2]. Найбільш

доцільним є використання математичного апарату нечіткої логіки при побудові інтелектуальних систем управління та прийняття рішень для автоматизації складних нестационарних та нелінійних технічних об'єктів, що функціонують в умовах неповної інформації та невизначеності [3]. Зокрема до таких об'єктів належать: мобільні роботи і роботизовані виробничі лінії, морські рухомі об'єкти та плавучі споруди, безпілотні повітряні та підводні апарати, хімічні реактори, електростанції тощо [4; 5].

Для ефективного застосування нечітких систем управління та прийняття рішень різних типів на стадії їх розроблення необхідно успішно вирішувати такі завдання структурно-параметричного синтезу: 1) визначення кількості лінгвістичних термів (ЛТ)

вхідних і вихідних змінних, а також типів та параметрів їх функцій належності (ФН); 2) синтез бази правил НС, що складається з набору антецедентів та консеквентів; 3) визначення типів процедур агрегації, активації і акумуляції, а також методу дефазифікації; 4) визначення деяких додаткових параметрів, наприклад, нормуючих коефіцієнтів при вхідних та вихідних змінних для їх зведення до відносних одиниць та ін. [6].

Аналіз останніх досліджень і публікацій засвідчує, що в багатьох випадках вищенаведені завдання структурного і параметричного синтезу НС вирішуються за допомогою експертних знань, оцінок і рекомендацій [7; 8]. При цьому суб'єктивний фактор має суттєвий вплив на процес розроблення нечітких систем. В умовах недостатньо повного обсягу вихідної інформації і знань експертів, а також при прийнятті помилкових проектних рішень ефективність НС може істотно знижуватися або їх функціонування буде здійснюватися при занижених, з точки зору потенційних можливостей, показниках. Для підвищення ефективності функціонування нечітких систем управління і прийняття рішень, а також для зниження негативного впливу суб'єктивних факторів на процес їх проектування, вченими різних країн світу останнім часом розробляються і впроваджуються методи, алгоритми та інформаційні технології синтезу НС, які базуються на певних оптимізаційних процедурах [6; 9]. Зокрема, алгоритми та інформаційні технології структурної оптимізації НС на основі оптимального вибору типів функцій належності ЛТ, методів дефазифікації, редукції та інтерполяції БП представлені в публікаціях [10; 11]. Своєю чергою, в роботах [12; 13] розглянуті методи синтезу, що включають в себе процедури параметричної оптимізації ФН лінгвістичних термів НС типу Мамдані, а також вагових коефіцієнтів для консеквентів правил систем типу Такагі-Сугено. Що стосується синтезу високоефективних баз правил з оптимальним набором консеквентів та оптимальною кількістю правил для НС типу Мамдані при недостатньому обсязі вихідної інформації (в умовах високого ступеня невизначеності інформації), то ця задача залишається предметом наукових досліджень низки наукових колективів як в Україні, так і закордоном.

Мета статті

Метою статті є розроблення і дослідження інформаційної технології для синтезу та оптимізації високоефективних баз правил з оптимальним набором консеквентів і оптимальною кількістю правил для НС типу Мамдані в умовах неповної вихідної інформації.

Виклад основного матеріалу

Узагальнена нечітка MISO-система типу Мамдані формалізує взаємозв'язок вхідних і вихідної змінної на основі нелінійної залежності $f_{НС}$ таким чином [14]

$$y = f_{НС}(\mathbf{X}), \mathbf{X} = (x_1, x_2, \dots, x_n), \quad (1)$$

де \mathbf{X} – вектор n вхідних змінних x_1, x_2, \dots, x_n ; y – вихідна змінна нечіткої системи.

Для реалізації вищенаведеної залежності НС на етапі фазифікації оцінює ступені належності чисельних значень вхідних змінних до відповідних нечітких вхідних лінгвістичних термів [8]. Після цього в процесі нечіткого логічного виведення виконуються послідовні операції агрегації, активації і акумуляції з використанням даних з бази правил. БП також містить в собі набір правил, що складаються з відповідних антецедентів (умов) та консеквентів (висновків). На заключному етапі дефазифікації здійснюється перетворення консолідованого нечіткого логічного висновку (результуючої нечіткої множини) в чіткий чисельний сигнал вихідної змінної у НС [7].

При синтезі нечіткої MISO-системи на початковому етапі обирається вектор вхідних змінних \mathbf{X} та вихідна змінна y [14]. Після цього здійснюється вибір кількості лінгвістичних термів w_i для кожної i -ї вхідної змінної вектора \mathbf{X} ($i = 1, \dots, n$) та лінгвістичних термів v для вихідної змінної y НС [15]. Також попередньо обираються типи та параметри функцій належності лінгвістичних термів для кожної вхідної і вихідної змінних системи. Загальна кількість правил s БП НС визначається кількістю всіх можливих комбінацій лінгвістичних термів вхідних змінних НС \mathbf{X} і розраховується згідно виразу (2) [14]

$$s = \prod_{i=1}^n w_i. \quad (2)$$

Отже, кожне r -те правило БП являє собою лінгвістичне твердження виду [15]

$$\text{IF } "x_1 = a" \text{ AND } "x_2 = b" \text{ AND } \dots \text{ AND } "x_i = c" \dots \\ \dots \text{ AND } \dots \text{ AND } "x_n = d" \text{ THEN } "y = h", \quad (3)$$

де a, b, c, d, h – відповідні лінгвістичні терми вхідних та вихідної змінної.

Антецеденти правил являють собою різні комбінації ЛТ вхідних змінних НС [15], а консеквент LT_r кожного r -го правила БП ($r = 1, 2, \dots, s$) обирається з множини всіх можливих консеквентів правил $\{LT^1, LT^2, \dots, LT^v\}$, який включає в себе v лінгвістичних термів вихідної змінної у НС

$$LT_r \in \{LT^1, LT^2, \dots, LT^v\}. \quad (4)$$

Вектор консеквентів \mathbf{Z} БП може бути сформований різними способами, при цьому завдання синтезу й оптимізації консеквентів зводиться до задачі знаходження оптимального вектора консеквентів \mathbf{Z}_{opt} з множини всіх можливих альтернативних варіантів, який забезпечує оптимальні показники якості НС.

Вектор консеквентів \mathbf{Z}_γ для γ -го альтернативного варіанта БП в загальному вигляді можна представити таким чином [15]

$$\mathbf{Z}_\gamma = \{LT_{\gamma 1}, LT_{\gamma 2}, \dots, LT_{\gamma r}, \dots, LT_{\gamma s}\}, \quad (5)$$

$$LT_{\gamma r} \in \{LT^1, LT^2, \dots, LT^v\}, \gamma \in \{1, 2, \dots, v^s\},$$

де v^s – кількість всіх можливих варіантів вектора \mathbf{Z} , яка визначається як кількість ЛТ вихідної змінної v , піднесене до степеня загальної кількості правил БП s .

Отже, завдання створення БП з оптимальним набором консеквентів зводиться до знаходження такого вектора консеквентів $\mathbf{Z}_{\text{opt}} = \mathbf{Z}_\gamma$, при якому значення цільової функції НС J буде оптимальним ($J = J_{\text{opt}}$) [15].

У багатьох випадках така задача розв'язується на основі знань експертів [7; 8]. При цьому, якщо для сформованого експертами вектора консеквентів БП \mathbf{Z} значення цільової функції J не є оптимальним, то для досягнення оптимального значення J_{opt} зазвичай здійснюють подальшу параметричну оптимізацію НС.

Іншим підходом до синтезу БП НС є автоматична генерація БП, що застосовується в програмному пакеті “Fuzzy TECH” [16]. В цьому програмному пакеті майстер формування правил «Rule Block Wizard» допомагає сформувати базу правил на основі аналізу впливу кожної вхідної змінної з вектора \mathbf{X} на вихідну змінну y . При цьому задача експерта полягає в оцінюванні ступеня впливу кожної вхідної змінної на вихідну, який може бути: “Very Negative”, “Negative”, “Not at All”, “Positive” або “Very Positive” [16]. На основі цієї інформації майстер формування правил програми “Fuzzy TECH” генерує БП та вектор її консеквентів \mathbf{Z} в автоматичному режимі. Якщо для згенерованої БП значення цільової функції J не є оптимальним, то вектор її консеквентів \mathbf{Z} може бути в подальшому відкоригований експертом в ручному режимі. Також для досягнення оптимального значення J_{opt} в такому випадку можна застосувати подальшу параметричну оптимізацію НС.

Що стосується створення бази правил з оптимальною кількістю правил s_{opt} ($s_{\text{opt}} < s_{\text{full}}$), то під такою БП розуміється база, що містить тільки ті правила, які суттєво впливають на функціонування НС [10]. Для виявлення і виключення правил з бази, які не впливають або несуттєво впливають на процес функціонування системи, є спеціалізовані методи та інформаційні технології редукції БП [6; 10].

Ці методи та інформаційні технології застосовуються після синтезу повної бази правил та потребують додаткових обчислень.

Розроблена в пропонованій роботі інформаційна технологія допомагає здійснювати синтез та оптимізацію вискоєфективних баз правил з оптимальним набором консеквентів \mathbf{Z}_{opt} та оптимальною кількістю правил s_{opt} , за яких значення цільової функції процесів керування та/або прийняття рішень на основі розробленої НС буде оптимальним ($J = J_{\text{opt}}$). Формування оптимального вектора консеквентів БП \mathbf{Z}_{opt} здійснюється за допомогою ітераційного пошуку на основі послідовного перебирання консеквентів кожного правила БП. Також в процесі пошуку вектора \mathbf{Z}_{opt} здійснюється виявлення правил, які не впливають на процес функціонування системи. Ці правила виключаються з БП після знаходження оптимального вектора консеквентів \mathbf{Z}_{opt} .

Запропонована інформаційна технологія складається з таких послідовних етапів.

Етап 1. Ініціалізація. На цьому етапі здійснюється попередній синтез структури повної БП ($s = s_{\text{full}}$) на основі обраних лінгвістичних термів вхідних змінних \mathbf{X} та визначається набір можливих консеквентів $\{LT^1, LT^2, \dots, LT^v\}$ для кожного r -го правила на основі попередньо обраних v лінгвістичних термів вихідної змінної y . Антецеденти правил формуються на основі всіх можливих комбінацій ЛТ вхідних змінних, початкова кількість правил повної БП s_{full} розраховується згідно залежності (2). Початковий вектор консеквентів \mathbf{Z}_0 , своєю чергою, генерується випадковим чином та встановлюється в БП НС. Крім того, на цьому етапі обирається тип цільової функції J для оцінювання ефективності процесу керування або прийняття рішень на основі НС, а також її оптимальне значення J_{opt} та максимальна кількість ітерацій при реалізації інформаційної технології N_{max} .

Етап 2. Перехід до 1-го правила БП НС. На цьому етапі здійснюється перехід до 1-го правила БП для початку ітераційних процедур пошуку оптимального вектора консеквентів БП \mathbf{Z}_{opt} .

Етап 3. Перевірка Check-листа. До Check-листа заносяться всі вектори консеквентів БП \mathbf{Z} , для яких вже була розрахована цільова функція J в процесі реалізації інформаційної технології, а також відповідні їм значення цільової функції J . Check-лист та його перевірка на цьому етапі застосовується з метою уникнення повторних розрахунків цільової функції J для НС з одним і тим самим вектором консеквентів БП \mathbf{Z} . Це дає змогу позбутися зайвих ітерацій, кількість яких дорівнює l ($s_{\text{full}} - 1$), де l – це кількість кіл послідовних ітераційних процедур оптимізації правил БП від 1-го до s -го.

Якщо поточний вектор консеквентів БП \mathbf{Z} вже перебуває в Check-листі, то здійснюється перехід на *Етап 7*, у протилежному випадку – перехід на *Етап 4*.

Етап 4. Розрахунок значення цільової функції J з поточним вектором консеквентів БП \mathbf{Z} . На цьому етапі здійснюється розрахунок значення цільової функції J для НС з поточним вектором консеквентів БП \mathbf{Z} . Після цього лічильник ітерацій збільшується на 1.

Етап 5. Перевірка на завершення оптимізації вектора консеквентів БП \mathbf{Z} . Оптимізація вектора консеквентів БП \mathbf{Z} вважається закінченою, якщо досягнуто оптимальне значення цільової функції ($J \leq J_{\text{opt}}$) або виконано максимальну кількість ітерацій N_{max} . Якщо така перевірка дала позитивний результат, то здійснюється перехід до *Етапу 10*. В протилежному випадку – перехід на *Етап 6*.

Етап 6. Запис вектора $\mathbf{Z}(N)$ та його цільової функції $J(N)$ до Check-листа. На цьому етапі здійснюється запис поточного вектора консеквентів БП $\mathbf{Z}(N)$ та відповідного йому значення цільової функції $J(N)$ до Check-листа.

Етап 7. Перевірка на завершення процесу оптимізації поточного правила. Оптимізаційні розрахунки для поточного r -го правила вважаються закінченими, якщо були розраховані значення цільової функції J для кожного консеквенту з набору усіх v можливих консеквентів для цього правила. Якщо така перевірка дала позитивний результат, то здійснюється перехід до *Етапу 8*. У протилежному випадку в цьому правилі встановлюється такий консеквент LT_r^{j+1} , $j \in (1, 2, \dots, v)$ з набору v можливих консеквентів та здійснюється перехід до *Етапу 3*.

Етап 8. Вибір найкращого консеквенту. На цьому етапі здійснюється вибір консеквенту, для якого значення цільової функції J є найменшим серед отриманих під час оптимізаційних розрахунків для поточного r -го правила, та встановлення його в цьому правилі.

Етап 9. Перевірка номера поточного правила БП. На цьому етапі здійснюється перевірка номера поточного правила БП. Якщо були оптимізовані всі правила бази ($r = s$), то здійснюється перехід на *Етап 2*. У протилежному випадку виконується перехід до наступного правила $r + 1$ та подальший перехід до *Етапу 3*.

Етап 10. Виявлення правил, які не впливають на процес функціонування системи. На цьому етапі виявляються правила, під час оптимізації яких значення цільової функції J НС не змінювалось при почерговій зміні всіх v можливих консеквентів. Так як послідовні ітераційні процедури оптимізації правил БП від 1-го до s -го можуть проводитися l разів (кіл) до знаходження оптимального вектора

консеквентів БП \mathbf{Z}_{opt} , при якому $J \leq J_{\text{opt}}$, то визначення несуттєвих (зайвих) правил здійснюється тільки на останньому l -му колі оптимізації.

Етап 11. Виключення правил, які не впливають на процес функціонування системи. На цьому етапі здійснюється виключення виявлених зайвих правил (які не впливають на процес функціонування НС) з БП. В результаті кількість правил БП буде зменшена ($s_{\text{opt}} < s_{\text{full}}$).

Етап 12. Завершення процесу синтезу та оптимізації БП. Після цього може здійснюватися додаткова параметрична оптимізація нечіткої системи та її програмно-апаратна реалізація для подальшого застосування в процесах керування та прийняття рішень. При цьому програмно-апаратна реалізація буде спрощеною через зменшену кількість правил БП ($s_{\text{opt}} < s_{\text{full}}$).

На рис. 1 наведено блок-схему представленої інформаційної технології для синтезу та оптимізації баз правил з оптимальним набором консеквентів та оптимальною кількістю правил для НС типу Мамдані в умовах неповної вихідної інформації.

При застосуванні наведеної інформаційної технології максимальну кількість ітерацій N_{max} доцільно визначати з урахуванням такої залежності

$$N_{\text{max}} = l [s_{\text{full}} v - (s_{\text{full}} - 1)]. \quad (6)$$

Кількість кіл оптимізації l підбирається експериментальним шляхом для конкретної БП залежно від її розміру. За наявності вже розробленої бази правил з визначеним вектором консеквентів \mathbf{Z} на основі експертних знань та оцінок, запропоновану інформаційну технологію можна застосовувати для подальшої оптимізації цієї БП з метою підвищення ефективності НС та спрощення її програмно-апаратної реалізації за рахунок зменшення кількості правил. При цьому на першому етапі інформаційної технології початковий вектор консеквентів \mathbf{Z}_0 визначається на основі знань експертів і встановлюється в БП НС. Всі інші етапи наведеної інформаційної технології виконуються таким самим чином, як і у разі відсутності знань та рекомендацій експертів. Однак, за наявності попередніх знань експертів (початкової гіпотези) стосовно вектора консеквентів \mathbf{Z}_0 ітераційні процедури оптимізації БП від 1-го до s -го правил можна проводити лише 1 раз ($l = 1$), що суттєво знизить загальну кількість ітерацій N_{max} .

Для дослідження ефективності запропонованої інформаційної технології в пропонованій роботі проведено синтез та оптимізація бази правил нечіткої системи автоматичного керування швидкістю руху багатоцільового гусеничного мобільного робота, що здатен переміщуватися по похилих і вертикальних феромагнітних поверхнях [17].

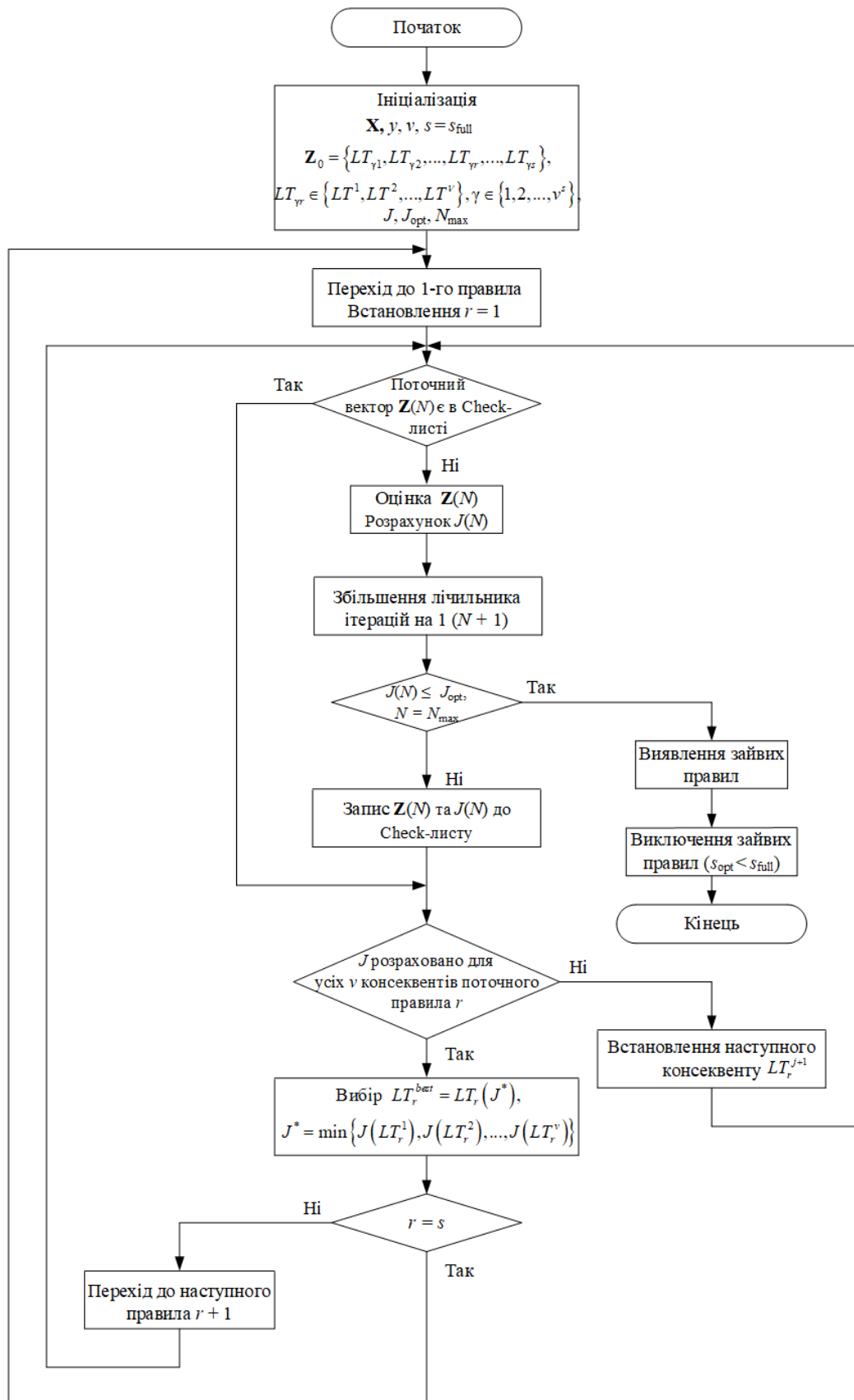


Рисунок 1 – Блок-схема інформаційної технології для синтезу та оптимізації БП НС

Багатоцільові гусеничні МР, що здатні для переміщення різних робочих інструментів по похилих і вертикальних заданих траєкторіях з метою автоматичного виконання таких технологічних операцій, як очищення, феромагнітних поверхнях, широко застосовуються

видалення іржі, фарбування, зварювання тощо в сільському господарстві, газо- і нафто-переробці, суднобудуванні, судноремонті та в інших галузях промисловості [17; 18]. Роботи такого класу є складними технічними об'єктами, для автоматизації яких доцільно застосовувати нечіткі системи автоматичного керування. Однією з найбільш важливих і складних завдань при автоматизації просторового руху гусеничного МР на похилій феромагнітній поверхні є стабілізація та автоматичне керування швидкістю його переміщення з метою забезпечення високої якості виконання певної технологічної операції [18].

Функціональна структура нечіткої САК та математична модель МР як об'єкта керування швидкістю наведені в роботі [18]. В цій роботі здійснений синтез і оптимізація БП нечіткого ПІД-регулятора типу Мамдані САК швидкістю МР. Цей нечіткий регулятор (НР) здійснює керування швидкістю МР на основі залежності

$$u_{FC} = f_{FC}(\varepsilon_V, \dot{\varepsilon}_V, \int \varepsilon_V dt), \quad (7)$$

де u_{FC} – сигнал керування швидкістю МР (вихідний сигнал НР); ε_V – помилка керування швидкістю руху МР.

Для фазифікації сигналу помилки ε_V в такому випадку застосовується п'ять лінгвістичних термів: BN – великий від'ємний; SN – малий від'ємний; Z – нульовий; SP – малий додатний; BP – великий додатний. Отже, для фазифікації похідної та інтегралу від помилки $\dot{\varepsilon}_V, \int \varepsilon_V dt$ обрано по три ЛТ: N – від'ємний; Z – нульовий; P – додатний. Для дефазифікації вихідного сигналу u_{FC} застосовано сім термів: BN – великий від'ємний; N – від'ємний; SN – малий від'ємний; Z – нульовий; SP – малий додатний; P – додатний; BP – великий додатний. Всі обрані ЛТ мають трикутні функції належності та рівномірно розподілені по робочих діапазонах вхідних та вихідних змінних.

Загальна кількість правил повної БП регулятора s_{full} визначається кількістю всіх можливих комбінацій ЛТ вхідних сигналів згідно виразу (2) і дорівнює 45 ($s_{full} = 5 \cdot 3 \cdot 3 = 45$).

Для проведення порівняльного аналізу в цій роботі також здійснено розробку БП НР на основі знань експертів. Фрагмент такої бази правил наведено в табл. 1.

При проведенні синтезу й оптимізації БП НР за допомогою запропонованої інформаційної технології початковий вектор консеквентів Z_0 був згенерований випадковим чином. Як цільову функцію J обрано узагальнене інтегральне відхилення реальної перехідної характеристики САК швидкістю $V_{MP}(t, Z)$ від бажаної перехідної характеристики $V_D(t)$ її еталонної моделі (ЕМ):

$$J(t, Z) = \frac{1}{t_{max}} \int_0^{t_{max}} [(E_V)^2 + k_{J1}(\dot{E}_V)^2 + k_{J2}(\ddot{E}_V)^2] dt, \quad (8)$$

де t_{max} – загальний час перехідного процесу нечіткої САК швидкістю переміщення робота; k_{J1}, k_{J2} – вагові коефіцієнти; E_V – відхилення $V_{MP}(t, Z)$ від $V_D(t)$, $E_V = V_D(t) - V_{MP}(t, Z)$.

Таблиця 1 – Фрагмент БП, синтезованої на основі знань експертів

Номер правила	Вхідні та вихідна змінні			
	ε_V	$\dot{\varepsilon}_V$	$\int \varepsilon_V dt$	u_{FC}
1	BN	N	N	BN
5	BN	Z	Z	N
18	SN	P	P	Z
23	Z	Z	Z	Z
30	SP	N	P	Z
36	SP	P	P	SP
41	BP	Z	Z	P
45	BP	P	P	BP

Отже, ЕМ у цьому випадку представлена такою передаточною функцією

$$W_{EM}(p) = \frac{V_D(p)}{V_S(p)} = \frac{1}{(T_{EM}p + 1)^2}, \quad (9)$$

де T_{EM} – стала часу еталонної моделі; V_S – задане значення швидкості.

Отже, оптимальним значенням цільової функції обрано значення $J_{opt} = 0,1$. Максимальна кількість ітерацій визначена $N_{max} = 813$, для реалізації трьох повних кіл оптимізації БП від 1-го до s -го правил ($l = 3$). Слід зазначити, що для САК мобільним роботом з БП НР, що розроблена на основі знань експертів, значення цільової функції не є оптимальним і становить $J = 0,244$.

На рис. 2 наведено графік зміни значення цільової функції J в процесі синтезу та оптимізації БП на основі запропонованої інформаційної технології.

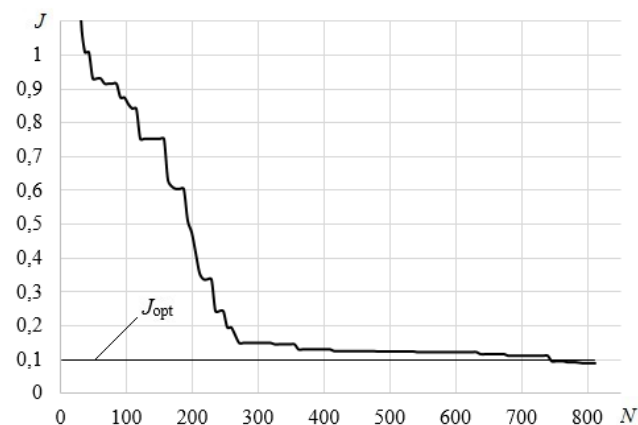


Рисунок 2 – Графік зміни значення цільової функції J в процесі синтезу та оптимізації БП

Як видно з рис. 2, в процесі оптимізації БП визначено мінімальне значення цільової функції $J_{\min} = 0,091$, що є кращим за оптимальне ($J_{\text{opt}} = 0,1$).

Отриманий в процесі синтезу БП оптимальний вектор консеквентів Z_{opt} має такий вигляд:

$Z_{\text{opt}} = (\text{BN}, \text{BN}, 0, 0, \text{BN}, \text{BN}, 0, \text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{BN}, \text{N}, \text{N}, 0, \text{SN}, 0, \text{SN}, \text{SN}, 0, \text{N}, \text{SN}, 0, \text{Z}, \text{Z}, \text{SP}, \text{SP}, \text{P}, \text{SP}, \text{SP}, \text{SP}, 0, \text{P}, \text{P}, \text{SP}, \text{P}, \text{BP}, 0, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP}, \text{BP})$.

У цьому випадку нулями позначені консеквенти правил, які не впливають на процес керування швидкістю МР (функціонування системи) та можуть бути виключені з БП на *Етапі 11* при реалізації інформаційної технології. Отже, із синтезованої бази правил з оптимальним набором консеквентів доцільно виключити правила: 3, 4, 7, 14, 16, 19, 22, 31, 37. Таким чином, отримана БП має оптимальну (скорочену) кількість правил $s_{\text{opt}} = 36$.

Фрагмент розробленої та оптимізованої бази правил за допомогою запропонованої інформаційної технології наведено в табл. 2.

Таблиця 2 – Фрагмент БП, синтезованої на основі запропонованої інформаційної технології

Номер правила	Вхідні та вихідна змінні			
	ε_v	$\dot{\varepsilon}_v$	$\int \varepsilon_v dt$	u_{FC}
1	BN	N	N	BN
5	BN	Z	Z	BN
18	SN	P	P	SN
23	Z	Z	Z	Z
30	SP	N	P	SP
36	SP	P	P	BP
41	BP	Z	Z	BP
45	BP	P	P	BP

На рис. 3 наведено графіки перехідних процесів розгону МР з САК на основі: 1 – розробленої БП за допомогою знань експертів; 2 – розробленої БП за допомогою запропонованої інформаційної технології.

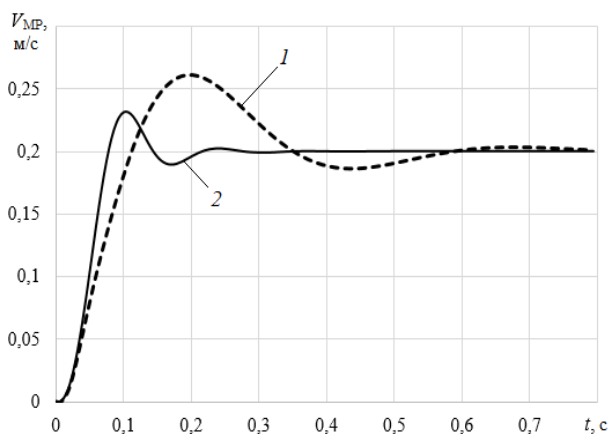


Рисунок 3 – Графіки перехідних процесів розгону МР

Наведені перехідні характеристик отримані за таких умов: кут нахилу робочої ферромагнітної поверхні $\gamma = 60^\circ$; задане значення швидкості $V_s = 0,2$ м/с; постійно діючий збурювальний вплив у вигляді сили навантаження технологічної операції $F_{\text{TO}} = 900$ Н.

В табл. 3 представлено порівняльний аналіз показників якості САК швидкістю МР для вищенаведених перехідних процесів, де прийнято такі позначення: σ – перерегулювання; t_r – час наростання; t_p – час регулювання.

Таблиця 3 – Показники якості САК МР

Показники якості керування	Показники якості САК МР	
	БП на основі знань експертів	БП на основі розробленої інформаційної технології
$\sigma, \%$	35,4	15,3
t_r, s	0,121	0,078
t_p, s	0,54	0,19
J	0,244	0,091

Як видно з рис. 3 і табл. 3, САК швидкістю МР з оптимізованою БП НР на основі розробленої інформаційної технології має більш високі показники якості керування у порівнянні з САК з БП НР, що розроблена на основі знань експертів. Зокрема, застосування НР з оптимізованою БП дало змогу знизити перерегулювання на 20,1%, час наростання на 35,5% та час регулювання на 64,8%. Крім того, подальша програмно-апаратна реалізація розробленого нечіткого регулятора з оптимізованою БП буде значно спрощена через те, що вона має на 9 правил менше, ніж аналогічна повна база правил регулятора, що розроблена на основі знань експертів. Отже, в процесі синтезу та оптимізації БП з оптимальним набором консеквентів і оптимальною кількістю правил для нечіткого регулятора САК швидкістю запропонована інформаційна технологія не вимагала суттєвих обчислювальних затрат ($N_{\text{max}} = 813$), що підтверджує її високу ефективність.

За необхідності подальшого покращення показників якості керування і зменшення значення цільової функції САК МР після синтезу та оптимізації БП на основі запропонованої інформаційної технології можна здійснювати додаткову параметричну оптимізацію нечіткого регулятора на основі спеціалізованих методів та інформаційних технологій [6; 13].

Висновки

У пропонованій роботі представлено розробку і дослідження інформаційної технології для синтезу та оптимізації високоефективних баз правил з оптимальним набором консеквентів та оптимальною кількістю правил для нечітких систем типу Мамдані

в умовах неповної вихідної інформації. Розроблена інформаційна технологія дає змогу проводити ітераційний пошук оптимального вектора консеквентів БП на основі послідовного перебирання консеквентів кожного правила, а також здійснювати виявлення та виключення правил з БП, які не впливають на процес функціонування системи, для зменшення загальної кількості правил до оптимальної.

Для дослідження ефективності запропонованої інформаційної технології в пропонуваній роботі проведено синтез і оптимізація БП нечіткої системи автоматичного керування швидкістю руху багатоцільового гусеничного мобільного робота, який здатен переміщуватися по похилих і вертикальних феромагнітних поверхнях. Отримані результати комп'ютерного моделювання засвідчили, що САК швидкістю МР з оптимізованою БП нечіткого регулятора на основі розробленої інформаційної технології має більш високі показники якості керування у порівнянні із САК з аналогічною БП, що розроблена на основі знань експертів. Отже, в такому випадку застосування НР з оптимізованою БП допомогло знизити

перерегулювання на 20,1%, час наростання на 35,5% та час регулювання на 64,8%. Також отримана оптимізована база правил за допомогою запропонованої інформаційної технології має на 9 правил менше ($s_{opt} = 36$) ніж повна БП ($s_{full} = 45$), яка синтезована на основі знань експертів, що в результаті дає змогу значно спростити подальшу програмно-апаратну реалізацію розробленого нечіткого регулятора для САК швидкістю МР. Крім того, в процесі синтезу та оптимізації БП з оптимальним набором консеквентів та оптимальною кількістю правил для НР швидкістю запропонована інформаційна технологія не вимагала суттєвих обчислювальних затрат (максимальна кількість ітерацій становила $N_{max} = 813$), що в цілому підтверджує її високу ефективність та доцільність застосування для проектування баз правил різнотипних нечітких систем управління і прийняття рішень.

У подальших роботах планується дослідити ефективність запропонованої інформаційної технології в процесі синтезу і оптимізації баз правил різнотипних нечітких систем підтримки прийняття рішень.

Список літератури / References

1. Zadeh, L. A., Abbasov, A. M., Yager, R. R., Shahbazova, S. N., & Reformat, M. Z., (2014). Recent developments and new directions in soft computing. STUDEFUZ 317, Cham: Springer, 466. DOI 10.1007/978-3-319-06323-2
2. Jamshidi, M., Kreinovich, V., & Kacprzyk, J. (2013). Advance trends in soft computing. Cham: Springer-Verlag, 468. DOI 10.1007/978-3-319-03674-8
3. Zadeh, L. A. (1994). The role of fuzzy logic in modeling, identification and control. *Modeling Identification and Control*, 15(3), 191–203. DOI: 10.1142/9789814261302_0041
4. Safaee, B., & Mashhadi, S. K. M. (2016). Fuzzy membership functions optimization of fuzzy controllers for a quad rotor using particle swarm optimization and genetic algorithm. *Proceedings of 2016 4th International Conference on Control, Instrumentation, and Automation (ICCIA)*, pp. 256-261. DOI 10.1109/ICCIAutom.2016.7483170
5. Gupta, M., Behera, L., & Venkatesh, K. S. (2010). PSO based modeling of Takagi-Sugeno fuzzy motion controller for dynamic object tracking with mobile platform. *International Multiconference Computer Science and Information Technology (IMCSIT)*, pp. 37–43. DOI: 10.1109/IMCSIT.2010.5680034
6. Kondratenko, Y. P., & Simon, D. (2018). Structural and parametric optimization of fuzzy control and decision making systems. Recent Developments and the New Direction in Soft-Computing Foundations and Applications. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 361, 273-289. DOI: https://doi.org/10.1007/978-3-319-75408-6_22
7. Hampel, R., Wagenknecht, M., Chaker, N. (2000) Fuzzy control: Theory and practice. New York: Physika-Verlag, Heidelberg, 410. DOI 10.1007/978-3-7908-1841-3.
8. Kacprzyk, J. (1997). Multistage Fuzzy Control: A Prescriptive Approach. John Wiley & Sons, Inc., New York, NY, USA, 338.
9. Castillo, O., Ochoa, P., & Soria, J. (2016). Differential Evolution with Fuzzy Logic for Dynamic Adaptation of Parameters in Mathematical Function Optimization. *Studies in Fuzziness and Soft Computing*, 332, 361-374. https://doi.org/10.1007/978-3-319-26302-1_21
10. Kondratenko, Y. P., Klymenko, L. P., & Al Zu'bi, E. Y. M. (2013). Structural optimization of fuzzy systems' rules base and aggregation models. *Kybernetes*, 42, 5, 831-843. DOI: <http://dx.doi.org/10.1108/K-03-2013-0053>
11. Ishibuchi, H., & Yamamoto, T. (2004). Fuzzy rule selection by multi-objective genetic local search algorithms and rule evaluation measures in data mining. *Fuzzy Sets and Systems*, 141, 1, 59–88. [https://doi.org/10.1016/S0165-0114\(03\)00114-3](https://doi.org/10.1016/S0165-0114(03)00114-3)
12. Simon, D. (2013). Evolutionary optimization algorithms: biologically inspired and population-based approaches to computer intelligence. John Wiley & Sons, Inc., Hoboken, New Jersey, USA, 772. ISBN: 978-0-470-93741-9
13. Simon, D. (2005). Estimation for fuzzy membership function optimization. *International Journal of Approximate Reasoning*, 40, 224–242. <https://doi.org/10.1016/j.ijar.2005.04.002>.

14. Kondratenko, Y. P., Kozlov, O. V., & Korobko, O. V., (2018). Two modifications of the automatic rule base synthesis for fuzzy control and decision making systems. Book series: Communications in computer and information science, 854. Berlin. Heidelberg: Springer International Publishing, 570–582. DOI https://doi.org/10.1007/978-3-319-91476-3_47.

15. Kondratenko, Y. P., & Kozlov, O. V., (2019). Generation of Rule Bases of Fuzzy Systems Based on Modified Ant Colony Algorithms. *Journal of Automation and Information Sciences*, 51, 3, 4-25. DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v51.i3.20

16. Von Altrock, C., (2002). Applying fuzzy logic to business and finance. *Optimus*, 2, 38-39.

17. Duro, R. J., & Kondratenko, Y. P., (2015). Advances in Intelligent Robotics and Collaboration Automation. Series on Automation, Control and Robotics, River Publishers, Denmark, 328. DOI: 10.13052/rp-9788793237049

18. Kondratenko, Y. P., & Kozlov, A. V., (2019). Parametric optimization of fuzzy control systems based on hybrid particle swarm algorithms with elite strategy. *Journal of Automation and Information Sciences*, 51, 12, 25-45, DOI: 10.1615/JAutomatInfScien.v51.i12.40.

Стаття надійшла до редколегії 23.02.2021

Kozlov Oleksiy

PhD (Eng.), PhD, Associate Professor, Doctorant of the Department of Intelligent Information Systems, orcid.org/0000-0003-2069-5578

Petro Mohyla Black Sea National University, Mykolaiv

INFORMATION TECHNOLOGY FOR SYNTHESIS AND OPTIMIZATION OF FUZZY SYSTEMS RULE BASES

Abstract. In the last two decades, intelligent computer systems based on fuzzy set theory, fuzzy logic and soft computing are widely used in various fields of science and technology to solve problems of control, identification, modeling of complex physical and economic phenomena, classification, pattern recognition, etc. Modern research in the field of creation and development of fuzzy systems (FS) of control and decision-making is conducted mainly in the direction of development of highly effective methods and information technologies of their synthesis and structural-parametric optimization. This paper is devoted to the development and research of information technology for the synthesis and optimization of highly efficient rule bases (RB) with the optimal set of consequences and optimal number of rules for Mamdani-type FSs in terms of incomplete source information. The developed information technology allows to conduct iterative search of the optimal vector of RB consequences based on a sequential search of the consequences of each rule, as well as to identify and exclude rules from RB, that do not affect the system operation, to reduce the total number of rules to optimal. To study the effectiveness of the proposed information technology in this work, the synthesis and optimization of the fuzzy automatic control system (ACS) for the multi-purpose mobile robot (MR), which is able to move on inclined and vertical ferromagnetic surfaces, is carried out. The obtained results of computer simulation showed that the fuzzy ACS of MR with optimized RB based on the developed information technology has higher quality indicators of control compared to the ACS with a similar RB developed on the basis of experts knowledge. Also, the optimized RB by means of the proposed information technology has fewer rules than the full RB, which is synthesized on the basis of experts knowledge, which, in turn, significantly simplifies the further software and hardware implementation of the developed fuzzy ACS of MR. In addition, in the process of synthesis and optimization of the RB for the fuzzy ACS of MR, presented information technology did not require significant computational costs, which generally confirms its high efficiency and feasibility of application to design rule bases of control and decision making FSs of different types.

Keywords: fuzzy system, rule base, information technology for synthesis and optimization, automatic control system, fuzzy controller, mobile robot

Посилання на публікацію

APA Kozlov, Oleksiy, (2021). Information technology for synthesis and optimization of fuzzy systems rule bases. *Management of Development of Complex Systems*, 45, 66–74, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.66-74](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.66-74).

ДСТУ Козлов, О. В. Інформаційна технологія для синтезу та оптимізації баз правил нечітких систем. *Управління розвитком складних систем*. Київ, 2020. № 45. С. 66 – 74, [dx.doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.66-74](https://doi.org/10.32347/2412-9933.2021.45.66-74).