

КАРГІН А. О., д.т.н, професор

КУЗЬМЕНКО Р. С., PhD студент

(Український державний університет залізничного транспорту)



## Модель імовірно-нечіткого контролера зі змінною структурою в контурі нечіткого управління автономним роботом

Розповсюдження безпілотних систем у різних сферах, насамперед промисловості, транспортній і військовій галузі, передбачає найголовніше завдання підвищення їхньої автономності. Рівень автономності цих систем безпосередньо залежить від їхньої здатності ухвалювати рішення в умовах невизначеності. Класичні нечіткі логічні системи (Fuzzy Logic System, FLS) дають змогу формалізувати ухвалення рішень в умовах неповного знань чи неточних даних, але мають певні обмеження. По-перше, налаштування нечіткої системи можливо тільки для нескладних завдань. По-друге, FLS не мають властивості масштабованості. По-третє, існують обмеження щодо реалізації нечітких рішень, отриманих FLS: відсутність апаратно реалізованих нечітких актуаторів потребує дефазифікації нечітких рішень, коли всі можливі варіанти рішення узагальнюють і зводять до одного числа, як наслідок, це унеможливає використання альтернативних або «слабких» рішень, що теж призводить до ситуації, які порушують автономність. У статті розглянуто шляхи подолання останнього обмеження на базі нової моделі штучного інтелекту, що відчуває (Feeling Artificial Intelligence, FAI). Запропоновано модифіковану версію FLS із моделлю ймовірно-нечіткого контролера зі змінною структурою (Probabilistic-Fuzzy Controller, PFC). FLS із моделлю PFC забезпечує вибір альтернативних керуючих дій у невизначених умовах, реалізуючи управління як випадкову величину з розподілом ймовірностей, що отримано на основі значень упевненості, що були розраховані FLS на етапі акумуляції нечітких правил. Це дає змогу реалізувати рішення, що не домінують у традиційній FLS. Показано переваги застосування модифікованої FLS із PFC моделлю для управління автономним роботом і наведено порівняння її рішень із тими, що отримані за допомогою класичної FLS. Визначення потрібної структури закону управління для вибраного значення керуючого рішення, що додатково робить PFC, додає адаптивності ймовірно-нечіткому контролеру зі змінною структурою в контурі нечіткого управління автономними системами і є ще однією його перевагою. У статті наведено результати розрахунків, моделювання та експериментів, що підтвердили практичну перевагу моделі. Новий підхід підвищує автономність безлюдних систем і адаптивність ухвалення керуючих рішень.

**Ключові слова:** автономна безпілотна система, робот, нечітка логічна система, ймовірно-нечіткий контролер, контролер зі змінною структурою, штучний інтелект, що відчуває.

### Вступ.

У своєму розвитку автономні роботизовані системи (Autonomous Robotic System, ARS) пройшли три етапи [1-3]. На першому етапі програмовані автоматичні ARS потребували повністю впорядкованого середовища, точного дотримання часових інтервалів і послідовності операцій. На другому етапі вимоги впорядкування середовища були частково зняті, ARS могли виконувати деякі функції в умовах перешкод і часткової невизначеності. Прикладами цього є роботи, що надають різні види послуг [4]. Сьогодні актуальними є інтелектуальні ARS (Intelligent ARS, IARS), які, як сподіваються, замінять людину в різних сферах її діяльності [5-10]. Широке розгортання IARS для вирішення завдань воєнного часу актуалізувало дослідження проблеми підвищення їхньої автономності: здатність IARS виконувати місію без втручання людини.

Автономність підтримують багато компонентів IARS. Ця стаття зосереджена на функції ухвалення рішень. Розглянемо основні особливості цього завдання IARS:

1) IARS належить до класу вбудованих систем, що працюють у реальному часі та безпосередньо взаємодіють із датчиками та виконавчими механізмами. Тому модель AI має бути компактною та ефективною [2, 3];

2) IARS використовує дані з великої кількості гетерогенних датчиків, що характеризує систему як мультимодальну та гетерогенну [11]. Цю особливість враховують у багатьох підходах щодо первинної обробки даних [12-14]. Однак головну вимогу щодо системи сприйняття IARS - результати обробки гетерогенних даних мають бути поданими однаково - вони не задовольняють;

3) IARS працює в середовищі, для якого характерні невизначеність і мінливість, зашумлені дані, а рішення ухвалюють в умовах неповних знань.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Від подолання вказаних проблем залежить рівень автономності системи. У роботі [15] визначено основні причини, що порушують автономність ухвалення рішень IARS, і для кожної з них рекомендовано способи вирішення. Деякі з них наведено нижче:

1) усі компоненти IARS мають бути базовані на універсальній моделі сенсу даних, отриманих від датчиків. Модель сенсу повинна мати можливість подавати дані за допомогою понять різного рівня узагальнення та абстракції;

2) формальна основа сенсу має бути побудована на моделі нечітких множин;

3) зменшення розмірності простору ухвалення рішень у реальному часі має бути виконана за допомогою технології Computing With Word [16], яка теж базована на апараті нечітких множин.

Отже, формальний апарат має бути побудований на нечітких моделях. На жаль, на сьогодні відсутні IARS, у яких системи ухвалення рішень базовані на нечіткій логіці. Головними перешкодами на шляху використання FLS у IARS є такі. По-перше, серед фахівців із нечітких систем існує переконання, що налаштувати реально нечітку систему можна тільки для нескладних завдань із кількістю вхідних змінних, що не перевищує 5-7 [16-18]. Ця обставина обмежує використання FLS у її «чистому» вигляді для таких сфер, як сучасна робототехніка, відповідно до особливостей вказаних вище. По-друге, FLS не має властивості масштабованості [15, 18]: додавання нових вхідних числових змінних або зміна кількості чи сенсу термінів лінгвістичних змінних потребує зміни існуючої бази знань. По-третє, існують обмеження щодо реалізації нечітких рішень, отриманих FLS: відсутність апаратно реалізованих нечітких актуаторів (виконавчих механізмів системи управління) потребує дефазифікації нечітких рішень, що теж призводить до

ситуацій, які порушують автономність. Шляхи подолання перших двох обмежень запропоновані в моделі FAI [19-21]. Третє обмеження, що пов'язане з проблемою дефазифікації, розглянуто в роботі [22], де введено модель імовірно-нечіткого конвертора (Fuzziness-to-Random Converter, F2RC), яка відтворює особливості біологічних систем для імплементації нечіткої впевненості, поданої як рівень нервового сигналу, в імовірнісний розподіл молекул-лігандів, які активізують м'язові волокна.

**Мета статті** – дослідити можливості застосування моделі F2RC для імплементації ухвалених FAI нечітких рішень; запропонувати для використання в IARS модифіковану версію FLS із моделлю PFC на базі F2RC; показати переваги застосування модифікованої FLS моделі з PFC і порівняти її рішення з тими, що отримані за допомогою класичної FLS.

### Обговорення проблеми

Проблему розглянемо на прикладі управління рухом колісного робота. Маршрут, яким рухається колісний робот, зображено на рис. 1. Рельєф включає три типи поверхні: рух прямою горизонтальною ділянкою (I), рух під нахилом менше 30 градусів (II), рух під великим нахилом із кутом більше 30 градусів (III). Сенс точок 1, 2, ..., 9 стане зрозумілим з аналізу рішень, отриманих під час моделювання. Розглядають колісний робот, оснащений двигунами постійного струму 12 В із редукторами (12 V 100RPM DC Gear Motor) із модулем Adafruit Motor Shield v2.0, що підтримує до чотирьох двигунів. Вони забезпечують необхідний обертальний момент для руху на пересіченій місцевості і дають змогу реалізувати управління роботом, а саме рух вперед/назад із певною швидкістю, прискорення/гальмування, поворот на заданий кут завдяки різній швидкості обертання коліс правої і лівої сторін.

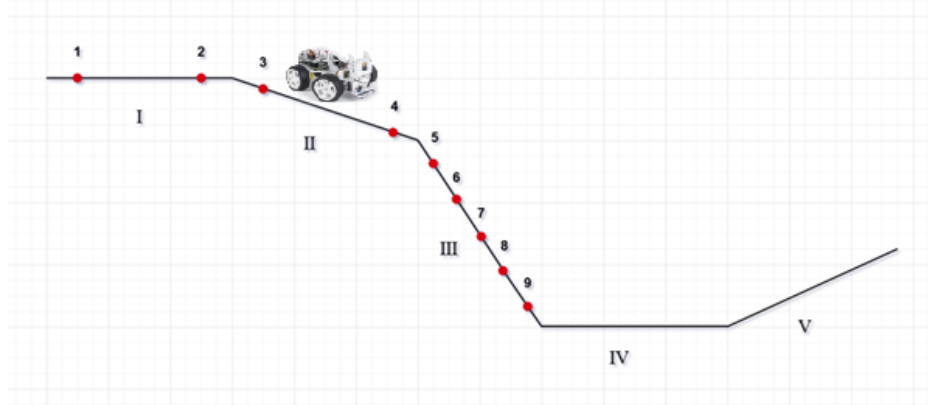


Рис. 1. Рельєф маршруту колісного робота

Сенсорна система робота включає одометр (оптичний енкодер KY-040 коліс), на базі якого драйвер виміряє кутову та лінійну швидкість і пройдену відстань; ультразвуковий датчик відстані HC-SR04 на поворотній платформі; комбінований

модуль MPU-6050, що включає тривісний акселерометр і тривісний гіроскоп; модуль TTP223B із датчиками зіткнень та інфрачервоні датчики відбиття для виявлення наближення до перешкод без дотику. У різних експериментах застосовано різний комплект сенсорів. Для перевірки моделі PFC було

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

застосовано комплект із двох датчиків: одометр і акселерометр із гіроскопом.

Склад системи управління рухом робота наведено на рис. 2. Це багаторівнева система з контролерів, що вирішують різні завдання. В експериментах, обговорюваних у цій статті, Line-following feedback controller і Feedforward controller of turn не були задіяні. Перевіряли рух робота на різних швидкостях по прямій лінії по рельєфу (рис. 1) з гори до низу.

Експерименти з дослідження руху робота по маршруту, зображеному на рис. 1, з управлінням традиційною FLS, що показана червоним блоком на рис. 2, проводили в такий спосіб. Спочатку в середовищі MATLAB Fuzzy Tools розраховували швидкість руху в різних точках маршруту, а потім цей режим руху перевіряли в штучному оточенні на прототипі вище згаданого робота.

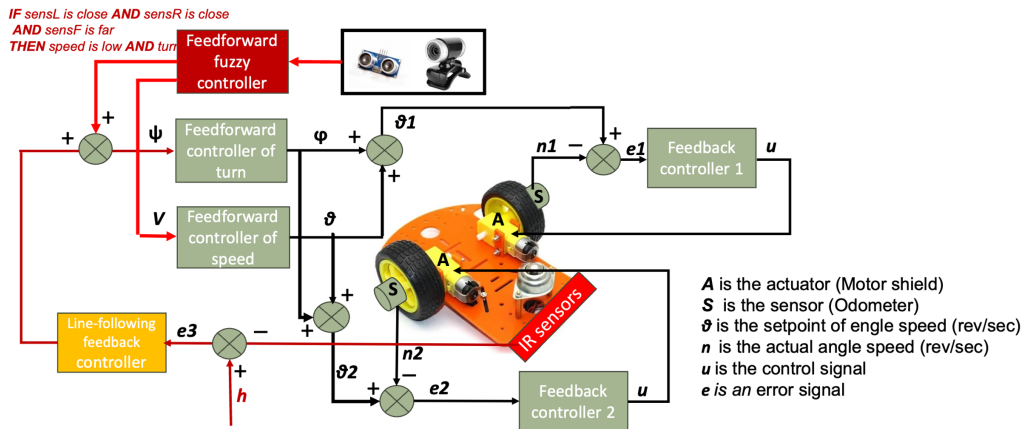


Рис. 2. Структура системи управління колісним роботом

У MATLAB Fuzzy Tools було створено нескладну нечітку систему із трьох вхідних чисельних змінних і однієї вихідної, що наведені в табл. 1. На цих універсумах були визначені три вхідні лінгвістичні змінні (Linguistic Variable, LV): Speed, Angle, Acceleration, а також вихідна LV Output\_Speed. Змінна Speed описує лінійну швидкість руху колісного робота, змінна Angle відповідає за кут нахилу робота відносно горизонтальної поверхні, а

Acceleration характеризує його прискорення у просторі. Вихідна LV Output\_Speed задає керуюче рішення про рекомендовану швидкість. Кожна LV подана як набір термів, наведених у табл. 1, де літери «n» і «p» означають відповідно, на якій півосі значень універсумів negative чи positive визначені терми.

Таблиця 1 Визначення LV

Лінгвістична змінна	Терм лінгвістичних змінних						
	nHigh	nMedium	nLow	None	pLow	pMedium	pHigh
Speed	trapmf [-85,-85, 50,-39]	trapmf [-50,-43,-23,-11]	trapmf [-20,-13,-5,0]	trimf [-6,0,+6]	trapmf [0,+5,+13,+20]	trapmf [+11,+23,+43,+50]	trapmf [+39,+50,+85,+85]
Angle	trapmf [-45,-45,-25,-17]	trapmf [-21,-18,-12,-8]	trapmf [-12,-8,-4,0]	trimf [-3.5,0,3.5]	trapmf [0,+4,+8,+12]	trapmf [+8,+12,+18,+21]	trapmf [+17,+25,+45,+45]
Acceleration	trapmf [-120,-120,-66,-44]	trapmf [-56,-48,-32,-20]	trapmf [-32,-20,-10,0]	trimf [-8,0,+8]	trapmf [0,+10,+20,+32]	trapmf [+20,+32,+48,+56]	trapmf [+44,+66,+120,+20]
Output_Speed	trapmf [-85,-85, 50,-39]	trapmf [-50,-43,-23,-11]	trapmf [-20,-13,-5,0]	trimf [-6,0,+6]	trapmf [0,+5,+13,+20]	trapmf [+11,+23,+43,+50]	trapmf [+39,+50,+85,+85]

Використовуючи ці лінгвістичні змінні та знання експертів, було створено базу знань, фрагмент

якої, необхідний для пояснень результатів моделювання, наведено на рис. 3.

1. IF (Angle is None) and (Acceleration is None) then (Output\_Speed is pHigh)

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

2. IF (Speed is High) and (Angle is nLow) and (Acceleration is pLow) then (Output\_Speed is pMedium)
3. IF (Angle is nLow) and (Acceleration is None) then (Output\_Speed is pMedium)
4. IF (Speed is Medium) and (Angle is nMedium) and (Acceleration is pLow) then (Output\_Speed is pLow)
5. IF (Angle is nHigh) and (Acceleration is pMedium) then (Output\_Speed is None)
6. IF (Speed is None) and (Angle is nHigh) and (Acceleration is None) then (Output\_Speed is nLow)
7. IF (Angle is nHigh) and (Acceleration is pLow) then (Output\_Speed is pLow)
8. IF (Speed is Low) and (Angle is nHigh) and (Acceleration is pMedium) then (Output\_Speed is pMedium)

Рис. 3. Фрагмент бази знань, що визначає рекомендовану швидкість руху

Результати моделювання переміщення робота по маршруту через задані точки наведені в табл. 2. Для нечіткого виведення було застосовано дві моделі: Мамдані і Цукamoto.

Результати симуляції в середовищі Matlab руху колісного робота

Номер точки маршруту	Speed, см/с	Angle, градус	Acceleration, см/с <sup>2</sup>	Output_Speed, Модель Mamdani, см/с	Output_Speed, Модель Tsukamoto, см/с
1	10	0	2	64	47
2	64	0	3	64	45
3	64	-10	10	31	31
4	31	-15	14	9	9
5	9	-36	29	24	15
6	24	-36	29	24	15
7	24	-36	29	24	15
8	24	-36	29	24	15
9	24	-36	29	24	15

Колісний робот починає свій рух по горизонтальній поверхні (кут нахилу дорівнює нулю, а прискорення дорівнює 2 см/с<sup>2</sup>) і в точці 1 має швидкість 10 см/с (табл. 2). На основі бази знань (рис. 3) за допомогою нечіткого виведення по моделі Mamdani FLS рекомендує збільшити швидкість до 64 см/с. Із цією швидкістю робот рухається до точки 2 (рис. 1), у якій FLS рекомендує продовжити рух із цією швидкістю, тому що ця ділянка не має нахилу. Коли робот потрапляє на початок спуску в точку 3, значення негативного кута нахилу починає поступово збільшуватися. Такий кут нахилу призводить до того, що рекомендовано зниження швидкості (значення вихідної чисельної змінної дорівнює 31 см/с), оскільки актуалізовано правило 3 на рис. 3. Від точки 3 до точки 4 робот рухається в такому самому режимі, а з цього місця він заїжджає на ділянку (точки 5-9) із

великим кутом нахилу, що досягає значень до -36 град (рис. 4). Намагання контролера нижнього рівня підтримувати рух на цій ділянці з постійною рекомендованою швидкістю призводить до короткострокових різких гальмувань, і такий рух із дрібними коливаннями швидкості реєструє сенсор як прискорення, що має значення 29 см/с<sup>2</sup>. Як видно з табл. 2, на всій ділянці від 5 до 9 точки значення вихідної бінної Output\_Speed дорівнює 24 см/с. Це базовано на допущенні, що контролери обертів коліс зі зворотними зв'язками (Feedback controller 1 і Feedback controller 2 на рис. 2) під час спуску здатні підтримувати постійно рекомендовану швидкість. Із цим припущенням пов'язано дві проблеми, що обмежують застосування FLS в IARS.

Перша з них полягає в тому, що контролери нижнього рівня не на всьому діапазоні задаючих (цільових) значень однаково виконують завдання управління, особливо для широких діапазонів, як це має місце для розгляданого прикладу. Як показали експерименти з роботом прототипом, залежно від навантаження робота і цільового значення швидкості контролери нижнього рівня втрачали контроль над швидкістю обертання коліс: значення не поверталось до заданого, і робот різко і безповоротно набрав швидкість. Це може призвести до аварії, із якої IARS самостійно не спроможний вийти, тобто втратити автономність. У теорії управління цю проблему долають завдяки застосуванню інтелектуальних регуляторів зі змінною структурою [23]. У нашому випадку для різних ділянок цільового значення швидкості налаштовано окремий закон управління, чи то PID регулятор, чи то класичний нечіткий регулятор. Якщо повернутися до рис. 2, то замість одного Feedback controller 1 мають бути, наприклад, три: один для регулювання швидкості в діапазоні малих значень (Low), другий для діапазону середніх значень (Medium), третій для високих значень швидкості (High), які вказані в табл. 1.

Друга проблема пов'язана з тим, що для випадків, коли вхідна ситуація (значення вхідних змінних) не дуже змінюється, FLS видає одні і те самі значення на вихідних змінних. Так, для нашого прикладу, коли характеристики руху (швидкість і прискорення) і навколишня ситуація (кут нахилу) залишаються відносно незмінними, це призводить до того, що FLS знову і знову, коли перераховує вихідну змінну від точки 5 до точки 9, видає (рекомендує) одне і те саме значення швидкості (табл. 2), що, з одного боку, непогано, але саме це є другим обмеженням застосування в «чистому» вигляді FLS

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

для управління автономними системами. І це теж накладає обмеження на рівень автономності. Пояснимо таку ситуацію на даних, наведених на рис. 4. Із рисунка видно, що ситуація має невизначеність, і тому три різних правила (5, 7 і 8) із різною впевненістю рекомендують різні значення швидкості для такої ситуації. П'яте правило рекомендує зупинитися, сьоме правило рекомендує рухатися з низькою швидкістю, а восьме взагалі рекомендує середню швидкість. Тим не менш, FLS на етапах акумулювання та дефазифікації узагальнює ці рішення і обчислює кожен раз одне і те значення, яке не є прийнятним для наведеної на рис. 2 ситуації. Як уже було сказано, контролери нижнього рівня в цій

ситуації не завжди справлялися зі своїм завданням, і робот втрачав контроль над швидкістю: різко і безповоротно набирив швидкість. Це є аварією, із якої IARS самостійно не може вийти, тобто втрата автономності. У таких неповністю визначених ситуаціях краще було б, якби рішення, рекомендовані різними правилами, не узагальнювали, а на різних тактах нечіткого виведення надавали можливість спробувати рішення іншого правила: випадково реалізувати рішення різних правил з імовірністю, пропорційною значенню впевненості, отриманої з нечітким виведенням.

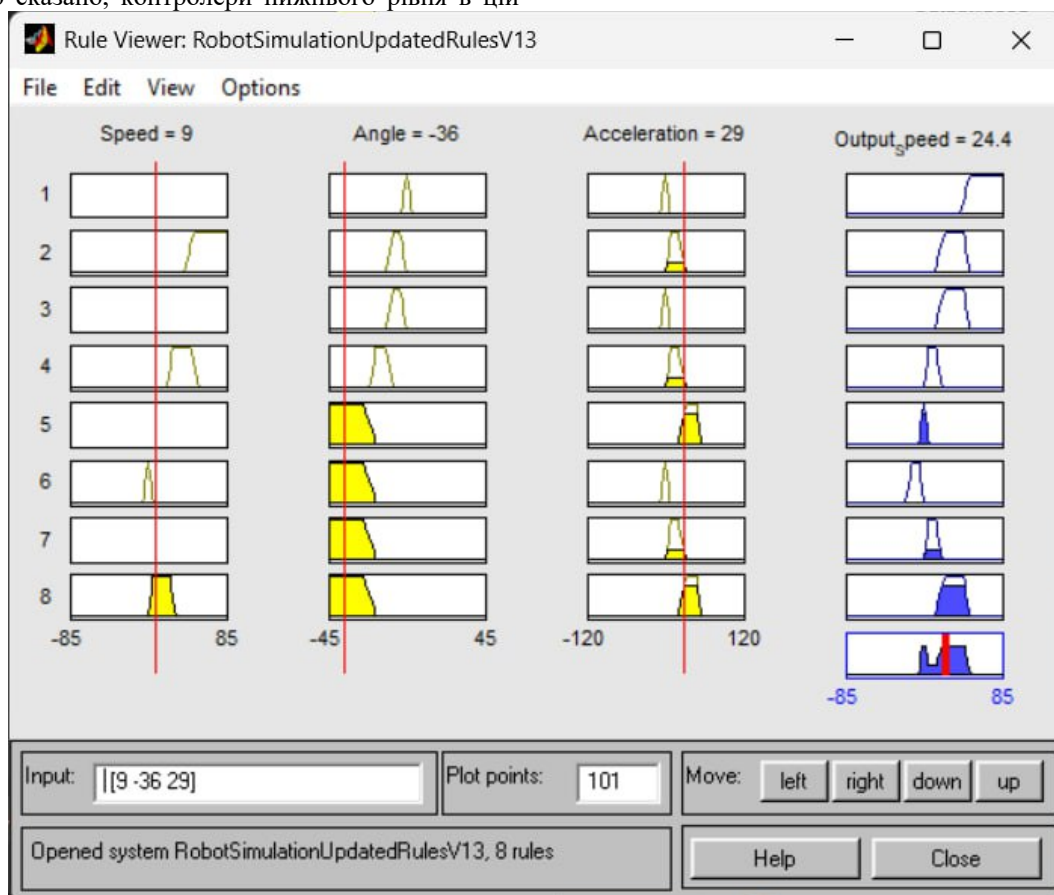


Рис. 4. Результати моделювання для точок 5-9 маршруту

П'яте і восьме правила з однаковою впевненістю 0.71 рекомендують конфліктні керуючі рішення. І якби в будь-якій точці третьої ділянки маршруту, наприклад, точці 7, випало б рішення зупинитися, то починаючи з цієї ситуації вже були б задіяні зовсім інші правила бази знань, і вони б рекомендували зовсім іншу поведінку робота, наприклад відповідно до шостого правила повільний рух назад у гору. Може не зовсім ефективно рішення, однак це рішення не призвело б до втрати автономності робота.

#### Дослідження моделі ймовірно-нечіткого контролера

Обидві проблеми, що були обговорені, обмежують застосування FLS в управлінні IARS. Однак ці проблеми можна подолати завдяки використанню ймовірно-нечіткого контролера в модифікованій моделі нечіткого виведення. Модифікація моделі нечіткого виведення полягає в тому, що перші три етапи класичної моделі, відомі як фазифікація, агрегація і актуалізація, залишаються незмінними, а четвертий і п'ятий етапи моделі - акумулювання і дефазифікація - замінені на процедуру, виконувану за моделлю конвертора F2RC. Зберігання тотожними перші три етапи для обох моделей нечіткого виведення дає змогу порівнювати результати управління роботом, отримані з

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

використанням F2RC, із тими, що були проаналізовані раніше. Тому в подальших викладах у статті використано одну і ту саму нечітку систему з

тими самими вхідними і вихідними змінними, значеннями LV і базою правил, що розглянуто вище.

На рис. 5 зображена структура модифікованої нечіткої системи.

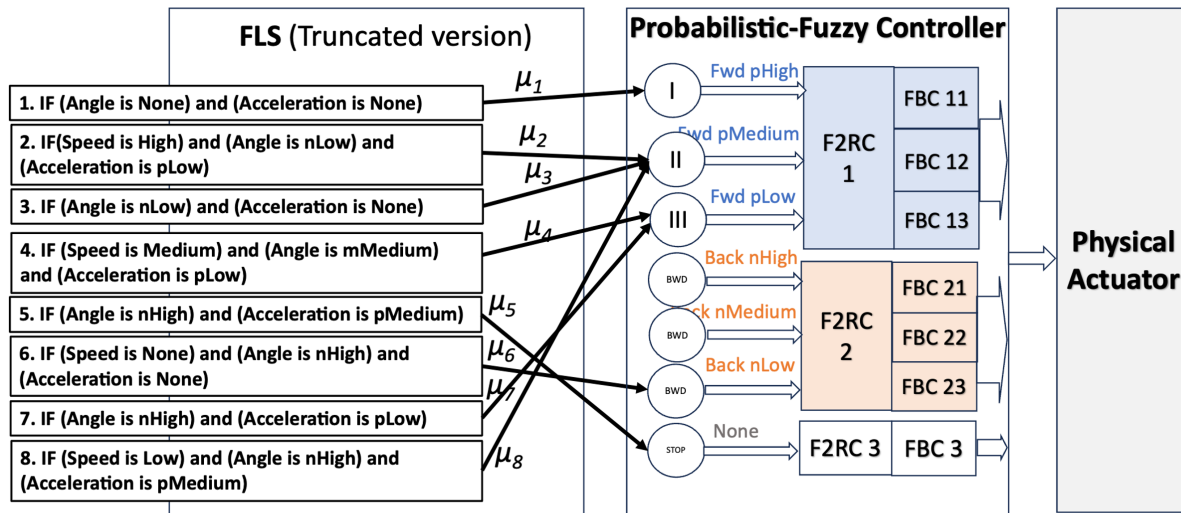


Рис. 5. Структура нечіткої системи з імовірісно-нечітким контролером

Результати обробки після етапу актуалізації кожного  $i$ -го правила подані як значення впевненості  $\mu_i$ . Ці значення подано на  $j$ -й вхід імовірісно-нечіткого контролера. Структура входів PFC відповідає структурі вихідної LV традиційної нечіткої системи, а саме кожному терму LV поставлено відповідний вхід PFC. Більш того, множину входів PFC поділено між трьома конверторами F2RC 1, F2RC 2 і F2RC 3. Конвертор F2RC 1 об'єднує такі терми вихідної лінгвістичної змінної Output\_Speed (табл. 1), як pHigh, pMedium, pLow. Входи F2RC 2 відповідають термам nHigh, nMedium, nLow цієї ж LV Output\_Speed. Вхід F2RC 3 відповідає одному терму None, що моделює зупинення руху або миттєве гальмування. Із кожним конвертором пов'язано декілька контролерів FBC, налаштованих на управління в тих діапазонах задаючих значень (універсуму), які вказані у визначенні відповідних термів вихідної LV. Так, на рис. 5 конвертор F2RC 1 має три входи для трьох термів pHigh, pMedium, pLow. Контролер FBC 11 (один із трьох контролерів «Feedback controller 1» на рис. 2) налаштований на управління швидкістю в діапазоні цільових значень [+39, +85], який вказано в табл. 1 для визначення терму pHigh. Контролери FBC 12 і FBC 13 налаштовані на діапазони, що задані для визначення термів pMedium і pLow відповідно. Вихід PFC пов'язаний із входом фізичного актуатора (Physical Actuator на рис. 5).

Як видно з рис. 5, значення впевненості  $\mu_i$ , отримані після обробки на етапі активізації  $i$ -го

правила, подають на той вхід PFC, який відповідає терму в полі ТОДІ цього правила. Якщо декілька правил мають у полі ТОДІ один і той самий терм, то значення впевненості цих правил акумулюють.

Отже, технологія обробки вхідних даних PFC така.

На першому кроці для кожного входу виконується акумуляція значень належності  $\mu_i$ , отриманих після обробки на етапі активізації всіх правил, які пов'язані з цим входом PFC, аналогічно тому, як це зроблено в моделі Мамдані:

$$\mu^* = \text{MAX}(v_1 \cdot \mu_1, v_2 \cdot \mu_2, \dots, v_k \cdot \mu_k), \quad (1)$$

$\kappa$  - кількість правил які посилають на терм, що подано як вхід PFC.

Отримані значення впевненості  $\mu^*$  перетворюються в нечіткий фактор впевненості -  $1 < \alpha < +1$  [23] за формулою

$$\alpha^* = 2 \cdot \mu^* \begin{matrix} \square \\ \square \\ \square \end{matrix} 1. \quad (2)$$

На другому кроці розраховують виходи конверторів. Розглянемо це на прикладі F2RC 1, який має три входи (рис. 5). Конвертор перетворює значення фактора впевненості  $\alpha^*$  на вході в реалізацію випадкового числа. Сенс цього числа - це кількість елементарних актуаторів, що активують відповідну дію (управління). Модель цього етапу наведено в роботі [22]. На рис. 6 показана структура конвертора на прикладі F2RC 1. Конвертор імітує

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

процес активізації м'язів живих істот, де значення впевненості, подане як рівень потенціалу нейрона, перетворюється в кількість лігандів-іонів, що випромінюються і розповсюджуються в просторі серед елементарних актуаторів, якими є волокна м'язів (фізичний актуатор). Кількість лігандів пропорційна потенціалу нейрона. Ліганди випадково зустрічаються з елементарними актуаторами з імовірністю, пропорційній їхній кількості. На рис. 6 набір глобул моделює пучки м'язових волокон (клітин), що складають окремих м'яз (фізичний актуатор). Кожна глобула - це пучок, що складається з набору м'язових волокон. На рисунку м'язові волокна зображені трикутниками чорного та червоного кольорів і названі елементарними актуаторами. Є три типи глобул, показані різними кольорами:

помаранчевим, зеленим і синім, для зображення різних способів реалізації дії. Глобули торкаються кіл такого самого кольору, які моделюють взаємодію пучків із руховими нейронами соматичної нервової системи. Модель м'язових пучків може реалізувати дію трьома способами, залежно від того, який вхідний сигнал отримує активацію у вигляді значення факторів впевненості. Отже, модель F2RC, що графічно подана на рис. 6, формально задана набором параметрів  $l, q_j, j = 1, \dots, l, r$ , де  $l$  - кількість входів конвертора,  $q_j$  - кількість глобул, пов'язаних із  $j$ -м входом,  $r$  - кількість елементарних актуаторів однієї глоби. Загальна кількість елементарних актуаторів, пов'язаних із  $j$ -м входом,  $N_j = q_j \cdot r$ , загальна кількість елементарних актуаторів, пов'язаних у цілому з конвертором,  $N = N_1 + N_2 + \dots + N_l$ .

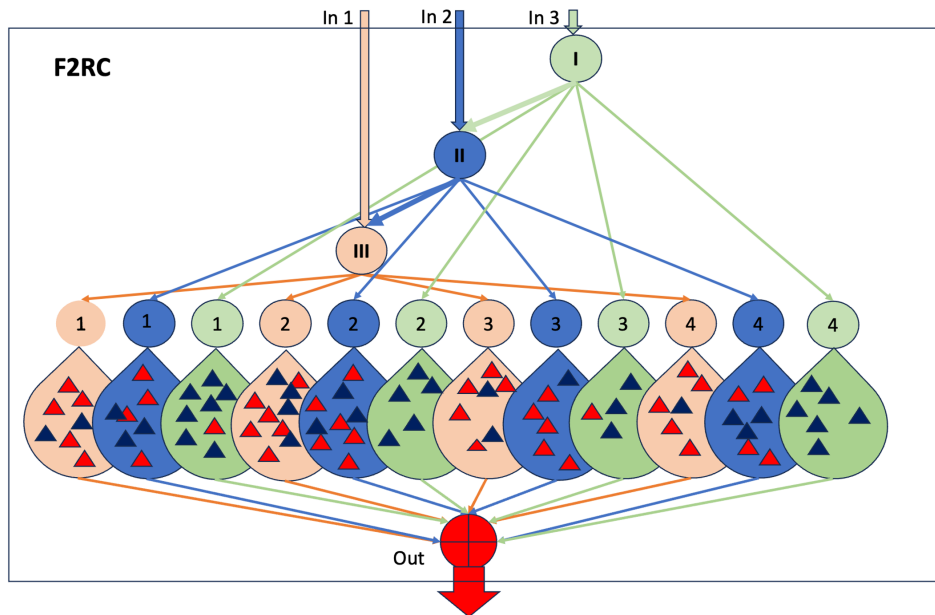


Рис. 6. Структура конвертора F2RC

Конвертор реалізує такий алгоритм обчислень. Спочатку на вхід III конвертора подана послідовність  $(a_{III}^*, a_{III}^*, \dots, a_{III}^*)$  довжиною  $t$ , що складена з однієї і тієї самої кількості  $a_{III}^*$  (фактор впевненості знайдений на першому кроці для III входу). Для цієї послідовності F2RC моделює ймовірнісний процес активізації елементарних актуаторів  $i$ , як наслідок, видає число цілого типу  $0 < n_j < N_j$ , де  $n_j$  є кількість елементарних актуаторів, які знаходяться в активному стані і належать всім  $q_{III}$  глобулам. Потім процедура виконується для входу II, вхідні значення  $a_{II}^*$  якого розповсюджені і на вхід III (рис. 6), тільки в моделюванні задіяні не всі елементарні актуатори, що належать входу III, а ті, що не були в активному стані на кінець моделювання входу III. Отже, на вхід II подано пакет  $(a_{II}^*, a_{II}^*, \dots, a_{II}^*)$  довжиною  $t$  факторів впевненості, і підраховують кількість елементарних актуаторів в активному стані:  $n_{12}$  і  $n_2$ , де  $n_{12}$  - це кількість активних елементарних актуаторів, що належать глобулам входу III серед тих, що брали

участь у моделюванні входу II. Аналогічно моделюють вхід I: подано пакет  $(a_I^*, a_I^*, \dots, a_I^*)$  на всі три входи, попередньо виключивши з моделювання елементарні актуатори в активному стані, що належать входу II і множині відібраних раніше входу III. Результат моделювання подано як набір чисел  $n_{123}, n_{23}$  і  $n_3$ , де  $n_{123}$  - це кількість активних елементарних актуаторів входу III серед тих, що брали участь у моделюванні входу I. На основі цих даних спочатку розраховують переможця  $i^*$  серед всіх  $l$  входів F2RC:

$$h = n_{i^*}/N_{i^*} = \text{MAX}(n_1/N_1, n_2/N_2, \dots, n_l/N_l), \quad (3)$$

а потім остаточне значення на виході конвертора як загальну кількість елементарних актуаторів в активному стані, що була активована входом-переможцем:

$$d = (n_{i^*} + n_{i^*-1} + \dots + n_{i^*-l+1}). \quad (4)$$

ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Отже, результати другого кроку обчислень подано як пару чисел (3) і (4) для всіх  $k$  конверторів контролера:

$$\{h_i, d_i\}_{i=1,k} \quad (5)$$

На третьому кроці визначають контролер FBC (рис. 5), який буде активованим, і цільове значення керуючого сигналу для ситуації, у якій знаходиться робот. Для цього тепер знаходять переможця  $i^*$  серед конверторів (5), визначають, якому діапазону  $\{U_1, U_2, \dots, U_g\}$  належить його вихідний сигнал  $d_{i^*}$ , і активують контролер FBC $_m$ , який підтримує це цільове значення  $d_{i^*}$ .

$$h_{i^*} = \text{MAX}(h_1, h_2, \dots, h_k), \quad D = d_{i^*} \cdot \gamma \in U_m, \quad (6)$$

де  $\gamma$  - масштабний коефіцієнт перерахунку від універсуму, на якому визначені виходи F2RC, до універсуму, на якому визначають входи FBC.

Розглянемо застосування описаної вище модифікованої нечіткої системи для управління

роботом на прикладі, що був наведений для традиційної FLS: переміщення робота від точки 5 до точки 9 (рис. 1) за управління PFC.

Результати розрахунків першого кроку алгоритму наведені у другому стовпчику табл. 3. Розрахунки виконували для тих самих значень впевненості  $\mu$ , які були отримані після етапу активізації правил і застосовані для традицій FLS, а саме  $\mu_1 = 0.0, \mu_2 = 0.0, \mu_3 = 0.0, \mu_4 = 0.0, \mu_5 = 0.72, \mu_6 = 0.0, \mu_7 = 0.28, \mu_8 = 0.71$ .

Розрахунки кількості активних елементарних актуаторів для точок № 5, 6, 7, 8, 9

Вхід F2RC	Фактор впевненості $\alpha^*$	Параметр F2RC				Кількість активних елементарних актуаторів $n_1/n_2/n_3, n_2/n_23, n_3$				
		$m$	$r$	$q$	$N$	Точка 5	Точка 6	Точка 7	Точка 8	Точка 9
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11
pHigh	-1.0	45	9	11	99	0	0	0	0	0
pMed	0.42	45	9	11	99	40/0	33/0	31/0	39/0	28/0
pLow	-0.44	45	9	11	99	1/38/0	0/32/0	0/33/0	0/40/0	0/33/0
nHigh	-1.0	45	9	11	99	0	0	0	0	0
nMed	-1.0	45	9	11	99	0/0	0/0	0/0	0/0	0/0
nLow	-1.0	45	9	11	99	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0	0/0/0
None	0.42	45	9	11	99	38	34	36	36	43

Із таблиці видно, що контролер складається з трьох конверторів, відповідно до рис. 5. Параметри конверторів, що графічно зображені на рис. 6, наведені у стовбцях 3-6 табл. 3. Результати обчислень на другому кроці алгоритму вказані в стовпцях 7-11 табл. 3. На основі цих даних обчислення за формулами (3) і (4) дають остаточні результати другого кроку обчислень у вигляді виразу (5) для точки 5.

$$h_1 = \text{MAX}(0/99, 40/99, \dots, 1/99) = 0.4; \quad d_1 = (40+39) = (79);$$

$$h_2 = \text{MAX}(0/99, 0/99, \dots, 0/99) = 0.0; \quad d_2 = 0.0;$$

$$h_3 = \text{MAX}(38/99) = 0.38; \quad d_3 = 0.0. \quad (7)$$

Після обчислень на третьому кроці на основі даних (7) визначають контролер FBC і цільове значення швидкості на його вході, яку він має забезпечувати.

$$h_1 = \text{MAX}(0.4, 0.0, 0.38) = 0.4, \quad \gamma = 85/297 = 0.29, \quad D_1 = 79 \cdot 0.29 = 22.9,$$

$$D_1 \subset [1, 50], \text{ FBC } 12.$$

Результати розрахунків для інших точок маршруту наведені в табл. 4.

Таблиця 4  
Розрахунки рекомендованої швидкості і визначення структури контролера FBC для точок 5, 6, 7, 8, 9. Модифікована FLS модель

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

Терм	FBC	Діапазон	Номер точок маршруту				
			5	6	7	8	9
nHigh	FB C 21	[-85, -39]					
nMed	FB C 22	[-50, -11]					
nLow	FB C 23	[-20, 0]					
None	FB C 3	[-6, +6]		2.06/3	2.18/3		2.6/3
pLow	FB C 13	[0, +20]					
pMed	FB C 12	[+11, +50]	22.9/12			22.9/12	
pHigh	FB C 11	[+39, +85]					

Розрахунки для точок 5-9 проводили для значень фактора впевненості  $\alpha^*$  відповідно до табл. 3. Нагадаємо, що ці значення відповідають параметрам руху, які застосовували для моделювання управління класичної FLS, що вказані в табл. 2 у стовбцях Speed, Angle і Acceleration. Так, у п'ятій точці маршруту PFC рекомендує швидкість 22.9 см/с і вибирає структуру контролера FBC 12, що майже співпадає з тим, що рекомендував класичний FLS контролер 24 см/с (табл. 2). Але моделювання продовжували для точки 6 зі значенням вхідної швидкості 24 см/с, що вказане в табл. 2. Для цієї ситуації PFC вибрав значення швидкості 2.06 см/с і структуру контролера FBC 3 (табл. 4). Це управління вже кардинально відрізняється від того, що було реалізовано класичним FLS контролером 24 см/с (табл. 2). Як було зазначено раніше, зупинка чи рух робота з малою швидкістю 2.06 см/с (рекомендація PFC) повністю відповідають ситуації безаварійного завершення руху, ніж продовження руху зі швидкістю 24 см/с (рекомендація класичного FLS контролера). В експерименті моделювання проводили з припущенням, що рух у точках 7-9 відбувався не з рекомендованою PFC швидкістю, а з тією, що була в експериментах із класичним FLS контролером, тобто 24 см/с, із метою дослідити, якою мірою PFC здатний запобігти аварійній ситуації. Із табл. 4 видно, що в точках 7 і 9 контролер рекомендує майже зупинитися. Тобто на практиці, дійсно, із великою ймовірністю робот на ділянці від 5 до 9 точки змінив би режим руху, чого не здатна рекомендувати FLS із класичним дефазифікатором.

#### Висновки

PFC, на відміну від існуючих нечітких контролерів, на етапі дефазифікації нечітких рішень знаходить чисельне значення управління як

реалізацію випадкового числа, імовірнісний розподіл якого відповідає нечіткій впевненості, отриманій на етапі активізації правил. Це відкриває можливість реалізації команди, яка не була першою у списку пріоритетів, і в традиційній FLS не отримала би переваги серед усіх потенційно можливих команд. Ця особливість є важливою для виконавчих механізмів, що використовують в автономних системах. В умовах невизначеності, коли автономна система опиняється в незнайомій ситуації, усі існуючі прототипи реакцій мають малу впевненість. У таких випадках важливо спробувати різні варіанти управління, а не лише той, що є усередненим серед усіх, як це має місце за традиційної дефазифікації у FLS. Визначення потрібної структури закону управління для вибраного значення управління, що додатково робить PFC, це є ще однією його перевагою. Експерименти, наведені в роботі, підтвердили можливість реалізації запропонованої моделі.

У майбутньому заплановано дослідити універсальну модель PFC і розробити рекомендації з її використання в різних додатках м'якого управління в автономних системах.

#### Список використаних джерел

- Zhang T. et al. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems, *Frontiers Inf. Technol. Electron. Eng.* 2017. Vol. 18. P. 68–85, DOI: 10.1631/FITEE.1601650.
- Chen J., Sun J., Wang G. From Unmanned Systems to Autonomous Intelligent Systems. *Engineering.* 2022. Vol. 12. P. 16–19, DOI: 10.1016/j.eng.2021.10.007.
- Reis J., Cohen Y., Melao N., Costa J., Jorge D., High-Tech Defense Industries: Developing Autonomous Intelligent Systems, *Appl. Sci.* 2021. Vol. 11, No. 11. DOI: 10.3390/app11114920.
- Guizzo E. Types of Robots. 2018. URL: <https://robotsguide.com/learn/types-of-robots> (last accessed: 22.01.2026)
- Shakhatreh H. et al. Unmanned Aerial Vehicles (UAVs): A Survey on Civil Applications and Key Research Challenges. *J. IEEE Accessl.* 2019. Vol. 7. P. 48572–48634, DOI: 10.1109/ACCESS.2019.2909530
- NovAtel, Unmanned Systems. 2022. URL: <https://novatel.com/industries/unmanned-systems> (last accessed: 20.09.2022).
- Lockheed M. The Future of Autonomy. Isn't Human-Less. It's Human More. 2022. URL: <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/autonomous-unmanned-systems.html> (last accessed: 25.09.2022).
- Rasmussen S., Kingston D., Humphrey L. Brief Introduction to Unmanned Systems Autonomy Services (UxAS). *Int. Conf. on Unmanned Aircraft Sys. (ICUAS).* 2018. DOI: 10.1109/ICUAS.2018.8453287.

## ІНФОРМАЦІЙНО-КЕРУЮЧІ СИСТЕМИ НА ЗАЛІЗНИЧНОМУ ТРАНСПОРТІ

9. Litman T. A. Autonomous Vehicle Implementation Predictions: Implications for Transport Planning. 2022. URL: <https://www.vtpi.org/avip.pdf> (last accessed: 25.09.2022).
10. Joseph L., Mondal A. K. (eds) Autonomous Driving and Advanced Driver-Assistance Systems (ADAS). Applications, Development, Legal Issues, and Testing, 1st ed., CRC Press, Boca Raton. 2021. DOI: 10.1201/9781003048381.
11. Yasumoto K., Yamaguchi H., Shigeno H. Survey of Real-time Processing Technologies of IoT Data Streams. *Journal of Information Processing*. 2016. Vol. 24, No. 2. P. 195–202, DOI: 10.2197/ipsjip.24.195.
12. Klein L. A. Sensor and data fusion: A tool for information assessment and decision making. 2nd ed. SPIE Press, Bellingham. 2012. DOI: 10.1117/3.928035.
13. Gou J., Yu B., Maybank S. J., Tao D. Knowledge Distillation: A Survey. *International J. of Computer Vision*. 2021. Vol. 129. P. 1789–1819. DOI: 10.1007/s11263-021-01453-z.
14. Hu X., Shen Y., Pedrycz W., Li Y., Wu G. Granular Fuzzy Rule-Based Modeling With Incomplete Data Representation. *IEEE Transactions on Cybernetics*. 2022. Vol. 52, No. 7. P. 6420–6433. DOI: 10.1109/TCYB.2021.3071145.
15. Kargin A., Petrenko T. Knowledge Distillation for Autonomous Intelligent Unmanned Systems / In: Pedrycz, W., Chen, S.-M. (eds.). *Advancements in Knowledge Distillation: Towards New Horizons of Intelligent Systems*, Studies in Computational Intelligence. 2023. Vol. 1100, Springer. P. 193–230. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32095-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32095-8_7).
16. Kargin A., Petrenko T. Multi-level Computing With Words Model to Autonomous Systems Control. In: Pakstas A., Hovorushchenko T. (eds.). *Workshop Proceedings*. 2020. Vol. 2711, CEUR. P. 16–30. <http://ceur-ws.org/Vol-2711/>.
17. Michels K., Klawonn F., Kruse R., Nürnberger A. Fundamentals of Control Theory. *Fuzzy Control, Studies in Fuzziness and Soft Computing*. 2006. Vol. 200, Springer, Heidelberg. P. 57–234. DOI: 10.1007/3-540-31766-x\_2.
18. Piegat A. Fuzzy modelling and control. *Studies in Fuzziness and Soft Computing. Physica*. 2001. Heidelberg; New York. DOI: 10.1007/978-3-7908-1824-6.
19. Kargin A., Petrenko T. Feeling Artificial Intelligence for AI-Enabled Autonomous Systems. Proc. Global Conf. on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT), Alamein New City, Egypt: IEEE, 2022. P. 88–93. DOI: 10.1109/GCAIoT57150.2022.10019235.
20. Kargin A., Petrenko T. Feeling Artificial Intelligence. Cognitive Decision-making Model Borrowed from Living Beings. International Symposium on Networks, Computers and Communications, Washington, DC, USA: IEEE, 2024. P. 1–6.
21. Kargin A., Petrenko T. Event-Driven Architecture of Feeling Artificial Intelligence Supported by Data Aging Model. In: Mejdoub Y., Elamri A., Kardouchi M. (eds.) *Connected Objects, Artificial Intelligence, Telecommunications and Electronics Engineering (COCIA 2025)*. Lecture Notes in Networks and Systems. 2025. Vol. 1584. Cham: Springer. P. 178–183. DOI: 10.1007/978-3-032-01536-5\_27.
22. Каргін А. О., Кузьменко Р. С. Модель ймовірно-нечіткого актуатора в контурі м'якого управління автономною безлюдною системою. *Сучасний стан наукових досліджень та технологій в промисловості*. 2025. № 1 (31). С. 61–72. DOI: 10.30837/2522-9818.2025.1.061.
23. Каргін А. О. Вступ до інтелектуальних машин. Кн. 1. Інтелектуальні регулятори. Донецьк: Норд-Пресс, ДонНУ, 2010. 526 с.

## References

- Zhang, T., et al. (2017)**. Current trends in the development of intelligent unmanned autonomous systems. *Frontiers of Information Technology & Electronic Engineering*, 18, 68–85. <https://doi.org/10.1631/FITEE.1601650>
- Chen, J., Sun, J., & Wang, G. (2022)**. From unmanned systems to autonomous intelligent systems. *Engineering*, 12, 16–19. <https://doi.org/10.1016/j.eng.2021.10.007>
- Reis, J., Cohen, Y., Melao, N., Costa, J., & Jorge, D. (2021)**. High-tech defense industries: Developing autonomous intelligent systems. *Applied Sciences*, 11(11), Article 4920. <https://doi.org/10.3390/app11114920>
- Guizzo, E. (2018)**. *Types of robots*. <https://robotsguide.com/learn/types-of-robots>
- Shakhtrah, H., et al. (2019)**. Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges. *IEEE Access*, 7, 48572–48634. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2909530>
- NovAtel. (2022)**. *Unmanned systems*. <https://novatel.com/industries/unmanned-systems>
- Lockheed Martin. (2022)**. *The future of autonomy isn't human-less. It's human more*. <https://www.lockheedmartin.com/en-us/capabilities/autonomous-unmanned-systems.html>
- Rasmussen, S., Kingston, D., & Humphrey, L. (2018)**. Brief introduction to unmanned systems autonomy services (UxAS). In *Proceedings of the 2018 International Conference on Unmanned Aircraft Systems (ICUAS)*.

- IEEE. <https://doi.org/10.1109/ICUAS.2018.8453287>
9. **Litman, T. A. (2022).** *Autonomous vehicle implementation predictions: Implications for transport planning*. Victoria Transport Policy Institute. <https://www.vtpi.org/avip.pdf>
  10. **Joseph, L., & Mondal, A. K. (Eds.). (2021).** *Autonomous driving and advanced driver-assistance systems (ADAS): Applications, development, legal issues, and testing* (1st ed.). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/9781003048381>
  11. **Yasumoto, K., Yamaguchi, H., & Shigeno, H. (2016).** Survey of real-time processing technologies of IoT data streams. *Journal of Information Processing*, 24(2), 195-202. <https://doi.org/10.2197/ipsjip.24.195>
  12. **Klein, L. A. (2012).** *Sensor and data fusion: A tool for information assessment and decision making* (2nd ed.). SPIE Press. <https://doi.org/10.1117/3.928035>
  13. **Gou, J., Yu, B., Maybank, S. J., & Tao, D. (2021).** Knowledge distillation: A survey. *International Journal of Computer Vision*, 129, 1789-1819. <https://doi.org/10.1007/s11263-021-01453-z>
  14. **Hu, X., Shen, Y., Pedrycz, W., Li, Y., & Wu, G. (2022).** Granular fuzzy rule-based modeling with incomplete data representation. *IEEE Transactions on Cybernetics*, 52(7), 6420-6433. <https://doi.org/10.1109/TCYB.2021.3071145>
  15. **Kargin, A., & Petrenko, T. (2023).** Knowledge distillation for autonomous intelligent unmanned systems. In W. Pedrycz & S.-M. Chen (Eds.), *Advancements in knowledge distillation: Towards new horizons of intelligent systems* (Vol. 1100, pp. 193-230). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-031-32095-8\\_7](https://doi.org/10.1007/978-3-031-32095-8_7)
  16. **Kargin, A., & Petrenko, T. (2020).** Multi-level computing with words model to autonomous systems control. In A. Pakstas & T. Hovorushchenko (Eds.), *CEUR Workshop Proceedings: Vol. 2711* (pp. 16-30). CEUR-WS. <http://ceur-ws.org/Vol-2711/>
  17. **Michels, K., Klawonn, F., Kruse, R., & Nürnberger, A. (2006).** Fundamentals of control theory. In *Fuzzy control* (Vol. 200, pp. 57-234). Springer. [https://doi.org/10.1007/3-540-31766-x\\_2](https://doi.org/10.1007/3-540-31766-x_2)
  18. **Piegat, A. (2001).** *Fuzzy modelling and control*. Physica. <https://doi.org/10.1007/978-3-7908-1824-6>
  19. **Kargin, A., & Petrenko, T. (2022).** Feeling artificial intelligence for AI-enabled autonomous systems. In *Proceedings of the Global Conference on Artificial Intelligence and Internet of Things (GCAIoT)* (pp. 88-93). IEEE. <https://doi.org/10.1109/GCAIoT57150.2022.10019235>
  20. **Kargin, A., & Petrenko, T. (2024).** Feeling artificial intelligence: Cognitive decision-making model borrowed from living beings. In *Proceedings of the International Symposium on Networks, Computers and Communications* (pp. 1-6). IEEE.
  21. **Kargin, A., & Petrenko, T. (2025).** Event-driven architecture of feeling artificial intelligence supported by data aging model. In Y. Mejdoub, A. Elamri, & M. Kardouchi (Eds.), *Connected objects, artificial intelligence, telecommunications and electronics engineering (COCIA 2025)* (Vol. 1584, pp. 178-183). Springer. [https://doi.org/10.1007/978-3-032-01536-5\\_27](https://doi.org/10.1007/978-3-032-01536-5_27)
  22. **Kargin, A. O., & Kuzmenko, R. S. (2025).** Model imovirmisno-nechitkoho aktuatora v konturi miakoho upravlinnia avtonomnoiu bezliudnoiu systemoju [Model of a probabilistic-fuzzy actuator in the soft control loop of an autonomous unmanned system]. *Suchasnyi stan naukovykh doslidzhen ta tekhnolohii v promyslovosti*, (1(31)), 61-72. <https://doi.org/10.30837/2522-9818.2025.1.061> [in Ukrainian].
  23. **Kargin, A. O. (2010).** *Vstup do intelektualnykh mashyn. Kn. 1. Intelektualni rehuliatory* [Introduction to intelligent machines. Book 1. Intelligent regulators]. Nord-Press; DonNU [in Ukrainian].

**Anatolii Kargin, Roman Kuzmenko. A model of a probabilistic-fuzzy controller with a variable structure in the fuzzy control loop of an autonomous robot**

The widespread adoption of unmanned systems across various domains, primarily in industry, transportation, and the military sector, brings to the forefront the challenge of increasing their level of autonomy. The autonomy level of such systems directly depends on their ability to make decisions under conditions of uncertainty. Classical Fuzzy Logic Systems (FLS) enable the formalization of decision-making in situations involving incomplete knowledge or imprecise data; however, they have several limitations. First, the tuning of a fuzzy system is feasible only for relatively simple tasks. Second, FLS lacks scalability. Third, there are limitations in implementing fuzzy decisions produced by FLS: the absence of hardware-implemented fuzzy actuators necessitates defuzzification, which aggregates all possible decision alternatives into a single crisp value. As a consequence, the use of alternative or «weak» decisions becomes impossible, which in turn leads to situations that limit system autonomy. This paper explores approaches to overcoming the latter limitation using a new artificial intelligence model, referred to as Feeling Artificial

Intelligence (FAI). A modified version of the FLS is proposed, incorporating a Probabilistic-Fuzzy Controller (PFC) with a variable structure. PFC provides a choice of alternative control actions under uncertain conditions, implementing control as a random variable with a probability distribution, which is defined based on the value of fuzzy certainty of the rule computed by FLS at the accumulation stage of fuzzy inference. This enables the implementation of solutions that do not dominate in traditional FLS. The advantages of using a modified FLS with a PFC model for controlling an autonomous robot are demonstrated, and its solutions are compared with those obtained with a classical FLS. Determining the required structure of the control law for the selected control solution, which also implements PFC, adds adaptability to the probabilistic-fuzzy controller with a variable structure in the fuzzy control circuit of autonomous systems, and is another of its advantages. The article presents the results of computations, modeling, and experiments that confirmed the practical advantage of the model. The new approach increases the autonomy of unmanned systems and the adaptability of making control decisions.

**Keywords:** autonomous unmanned system, robot, fuzzy logic system, probabilistic-fuzzy controller, variable-structure controller, Feeling Artificial Intelligence.

**Каргін Анатолій Олексійович**, доктор технічних наук, професор, Український державний університет залізничного транспорту, завідувач кафедри інформаційних технологій, Харків, Україна. E-mail: [kargin@kart.edu.ua](mailto:kargin@kart.edu.ua). ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-2885-9071>.

**Кузьменко Роман Сергійович**, аспірант кафедри інформаційних технологій, Український державний університет залізничного транспорту, Харків, Україна. E-mail: [kuzmenko88@kart.edu.ua](mailto:kuzmenko88@kart.edu.ua). ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-1675-8658>.

**Kargin Anatolii**, Doctor of Technical Science, Professor, Ukrainian State University of Railway Transport, Department of Information Technology, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [kargin@kart.edu.ua](mailto:kargin@kart.edu.ua). ORCID ID <http://orcid.org/0000-0003-2885-9071>.

**Roman Kuzmenko**, PhD Student at the Department of Information Technology, Ukrainian State University of Railway Transport, Kharkiv, Ukraine. E-mail: [kuzmenko88@kart.edu.ua](mailto:kuzmenko88@kart.edu.ua). ORCID ID: <https://orcid.org/0009-0000-1675-8658>.

*Стаття надійшла 02.02.26*

*Стаття прийнята до друку після рецензування 07.03.26*

Стаття опублікована (оприлюднена) 27.04.26

Стаття поширюється на умовах ліцензії Creative Commons Attribution License International CC-BY.