

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
МІЖНАРОДНИЙ КЛАСИЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ
ІМЕНІ ПИЛИПА ОРЛИКА

Економічно-технологічний факультет

Кафедра інженерних технологій

КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА
другого (магістерського рівня) вищої освіти
на тему:

«Розробка нечіткої системи автоматичного управління баштою танка»

зі спеціальності 123

«КОМП'ЮТЕРНА ІНЖЕНЕРІЯ»

Виконавець:

Мартиненко Ю.М.

Науковий керівник:

к.т.н., доц. Гайша О.О.

Миколаїв – 2025

ЗМІСТ

Вступ.....	5
Розділ 1. Аналіз предметної галузі.....	9
1.1. Загальна характеристика процесу функціонування об'єкта керування.....	9
1.2. Аналіз існуючих рішень щодо управління процесом функціонування башти танка.....	11
1.3. Висновки по розділу.....	12
Розділ 2. Створення системи автоматизованого управління баштою танка на базі нечіткої логіки.....	13
2.1. Особливості побудови систем управління на базі нечіткої логіки ...	13
2.1.1. Історія впровадження fuzzy logic систем.....	14
2.1.2. Функції належності нечітких змінних.....	17
2.1.3. Правила нечітких продукцій.....	30
2.1.4. Процедура нечіткого виводу.....	33
2.2. Розробка системи автоматизованого управління баштою танку.....	40
2.2.1. Обрання вхідних та вихідних змінних.....	40
2.2.2. Обрання термів та їх функцій належності для кожної змінної. ..	47
2.2.3. Розробка бази правил нечітких продукцій.....	54
2.3. Реалізація розробленої системи управління.....	58
2.3.1. Реалізація у системі Fuzzy Logic Toolbox.....	59
2.3.2. Апаратна база, що може бути основою для функціонування розробленої системи управління.....	65
2.4. Висновки по розділу.....	66
Висновки	68
Перелік використаних джерел	70

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

АСУ Автоматизована система управління

ІТ Інформаційні технології

ПЗ Програмне забезпечення

ПК Персональний комп'ютер

ТАУ Теорія автоматичного управління

ТНМ Теорія нечітких множин

ТП Технологічний процес

ФН Функція (-ції) належності

ВСТУП

Однією з найбільших людських цінностей у всі часи був мирний стан буття, що дозволяє спокійно розвиватися нашій цивілізації та вести щасливе існування людському родю. Однак, часто загарбницька натура окремих державних керівників може порушити мирне існування цілих країн та народів і єдиним фактором стримування такої агресивної поведінки є наявність у протилежної сторони потужної достойної зброї, застосування якої може не тільки дати відсіч нападнику, а й завдати тому значних суттєвих втрат. Відповідно, розробка сучасних зразків техніки в цілому та окремі точкові покращення вже існуючих рішень становлять актуальну задачу сучасної науки. При цьому специфіка військової галузі така, що у ній задіяні передові досягнення практично усіх відділів природничих та технічних наук, зокрема і галузі кібернетики, інформаційних технологій (далі – ІТ), автоматизованих систем управління (далі – АСУ).

При цьому продукти вказаних галузей займають одне з основних місць у загальному рейтингу важливості компонентів військових систем, адже від якості, надійності та точності роботи системи управління залежить виживання як військового технічного об'єкту, так і, що найголовніше, людей, які у ньому знаходяться.

Танки являються дуже поширеним видом військової техніки і за весь період з моменту їх винайдення під час Першої світової війни (перші зразки, які дійсно можна назвати «танками» почали виробляти в Англії у 1914-1915 рр. та транспортували під виглядом цистерн для води – англ. tank, звідки і пішла їх назва) було випущено сотні їх типів та модифікацій. На сьогоднішній день в процесі тривалої еволюції встановилася конструкція танка, яка має одну велику рухому частину – башту, що може обертатися на 360°, забезпечуючи можливість пострілу із головної гармати (яка встановлена на цій башті) у будь-якому напрямку. В свою чергу

гармата танку може рухатися вгору-вниз, забезпечуючи необхідний кут вильоту снаряду. Залежно від точності позиціонування башти та її гармати реалізується точність потрапляння снаряду у задану ціль. Від швидкості здійснення переміщень залежить така важлива характеристика зброї, як скорострільність танку. Забезпечення точності виведення рухомих об'єктів на задані позиції, а також бистроти цих дій є прямими задачами теорії автоматичного управління (далі – ТАУ).

Теорія автоматичного управління є досить великим шаром людських знань на стику математики, технічних наук, інформаційних технологій, і т.п. ТАУ надає різні (часто принципово різні) методи вирішення однієї і тієї ж задачі управління. Одним із найсучасніших розділів ТАУ є застосування теорії нечітких множин (далі – ТНМ) до вирішення задач управління різноманітними технологічними об'єктами. Незважаючи на військовий характер об'єкта, що розглядається (башта танка), принципово він нічим не відрізняється від технологічних об'єктів звичайного, мирного характеру. Відповідно тут можуть бути застосовані усі значні за обсягами наробки по прикладному застосуванню ТНМ в ТАУ. Слід відмітити, що використання ТНМ у якості основного інструмента для створення систем управління має чимало переваг перед традиційними методами проектування систем автоматичного управління (далі – САУ), які докладно будуть розглянуті у наступних розділах пояснювальної записки. Тут же, зважаючи на вище наведене, із впевненістю можна сказати, що розробка на базі нечіткої логіки САУ для управління технологічними об'єктами, до яких, зокрема може бути прирівняна і башта танку, являє собою **актуальну** задачу сучасної ТАУ.

Об'єктом дослідження при цьому виступає процес управління баштою танку в процесі штатної експлуатації танку, зокрема під час бою та навчань.

Предметом дослідження є математичні моделі та їх реалізації, за якими може бути побудована система управління баштою танку.

Метою роботи є створення системи автоматизованого управління баштою танку на базі нечіткої логіки.

Завдання, які необхідно вирішити для досягнення поставленої мети:

- аналіз предметної області, зокрема, діяльності об'єкта дослідження та опис його основних алгоритмів роботи;
- обґрунтування вибору методу проектування у вигляді застосування ТНМ до розробки системи управління;
- вибір вхідних та вихідних нечітких змінних системи, їх функцій належності;
- створення бази правил нечітких продукцій відповідно до алгоритмів роботи об'єкта керування, розроблених вище;
- реалізація нечіткої системи управління у програмному середовищі та її дослідження;
- виконання висновків по роботі.

У якості **методів дослідження** можна назвати загальнонауковий метод аналізу (для предметної галузі та алгоритмів роботи об'єкта), методи теорії нечітких множин (безпосередньо для виконання проекту САУ), методи математичного моделювання (для реалізації моделі спроектованої САУ у програмному середовищі).

Математична модель керування баштою танку, створена на основі нечіткої логіки, є новою та, за умови повноцінної якісної реалізації, може мати реальне **практичне значення**, а саме, може бути впровадженою у танковому виробництві за безпосереднім призначенням. Робота системи може бути також описана у навчальних курсах з теорії автоматичного управління, як приклад застосування теорії нечітких множин до задач управління військовими об'єктами.

Дане дослідження, за необхідності, може бути продовжене в частині удосконалення системи управління «кількісним» та «якісним» шляхом. Під першим варіантом мається на увазі збільшення кількості термів для тих нечітких змінних, що вже враховуються у розробленій нечіткій САУ, що

має сприяти підвищенню точності керування. Другий варіант означає пошук та урахування нових нечітких змінних, що не взяті до уваги у даній роботі, урахування яких також може у деякій мірі підвищити показники кінцевої САУ.

Таким чином, спроектовано та реалізовано сучасну систему автоматизованого управління баштою танку, що створена на основі та за принципами систем fuzzy logic, яка може мати реальне практичне значення, і, за необхідності, може отримувати подальший розвиток.

РОЗДІЛ 1. АНАЛІЗ ПРЕДМЕТНОЇ ГАЛУЗІ

1.1. Загальна характеристика процесу функціонування об'єкта керування.

Башта танку є габаритним рухомим об'єктом, розміщеним у верхній частині військової машини танку. Слід відмітити, що окрім значних просторових розмірів, також вона має значну масу, і, як наслідок, суттєвий момент інерції. Це є важливим моментом для систем управління, оскільки забезпечити прецизійну зупинку масивного об'єкту, звичайно, набагато складніше, ніж маломасивного.

Ще одним неочевидним моментом, який, безперечно слід брати до уваги при проектуванні точних переміщень є існування різних умов руху дула гармати танку при статичному положенні башти та в процесі її руху. Дійсно, при повороті башта стає обертальною системою відліку, у якій, як відомо з курсу загальної фізики, на усі рухомі тіла (як гармата, якщо та в свою чергу рухається) діє додаткова сила Коріоліса. Величина цієї сили є незначною, але при точному позиціонуванні та керуванні рухом її слід брати до уваги, виконуючи компенсуючі впливи з боку САУ.

Вказані підвищені вимоги до точності можуть бути обґрунтовані наступними простими кінематичними розрахунками. Нехай танкові необхідно вразити ціль на середній відстані $l = 3$ км (сучасна техніка забезпечує дальність до 5 км) – рис. 1.1.

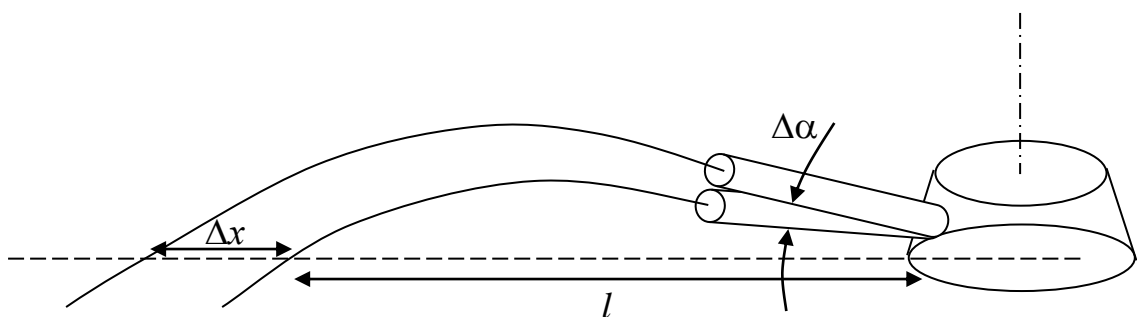


Рис. 1.1. Схема пострілу, що демонструє необхідність надзвичайної точності позиціонування елементів башти танку.

Дальність польоту l визначається горизонтальною складовою швидкості v_x (яка є практично незмінною, якщо не брати до уваги опір повітря) та тривалістю польоту t_n :

$$l = v_x \cdot t_n$$

В свою чергу час польоту визначається початковою вертикальною складовою швидкості і умовою, що на початковому рівні висоти модуль цієї вертикальної складової практично не зміниться (знову нехтуємо опором повітря):

$$-v_{y0} = v_{y0} - gt_n \quad \rightarrow \quad t_n = 2v_{y0}/g = 2v_0 \sin \alpha / g$$

Комбінуючи з дальністю маємо:

$$l = v_x \cdot t_n = v_0 \cos \alpha \cdot 2v_0 \sin \alpha / g = v_0^2 \sin 2\alpha / g$$

Звідси, знаючи, що швидкість вильоту снаряду складає біля 400 м/с можна оцінити кут нахилу дула гармати до горизонту при таких параметрах системи:

$$\alpha_1 = \frac{1}{2} \arcsin \frac{l \cdot g}{v_0^2} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{3000 \cdot 10}{400^2} = 5,403^\circ$$

Якщо дальність польоту буде відрізнятись на 7/2 метрів (де 7 – довжина танка, ділимо на 2 тому, що вважаємо напрям пострілу таки, що забезпечує попадання рівно у середину танку, а отримання похибки більше, ніж 7/2 означає промах), величина кута складатиме:

$$\alpha_2 = \frac{1}{2} \arcsin \frac{l \cdot g}{v_0^2} = \frac{1}{2} \arcsin \frac{3003,5 \cdot 10}{400^2} = 5,410^\circ$$

Абсолютна різниця між двома отриманими значеннями складає:

$$\Delta\alpha = 5,410^\circ - 5,403^\circ = 0,007^\circ.$$

Відносну різницю беремо по відношенню до всього діапазону кута нахилу ствола, який для пострадянських танків складає біля 20° (приблизно від -5° до $+15^\circ$):

$$\varepsilon = \frac{0,007^\circ}{20^\circ} = 0,0004 \approx 0,04\%.$$

Таким чином, для забезпечення влучання у ціль за таким показником як похибка позиціонування дула, відповідний механізм та його система управління має забезпечувати точність не гірше 0,04%, що є досить вибагливим показником.

Аналогічна ситуація спостерігається і для поворотів самої башти: точність таких рухів має бути забезпечена на досить високому рівні. Ситуація ускладнюється ще й тим, що танк повинен мати можливість виконувати постріл не тільки із статичного положення, а й в процесі руху (причому до швидкостей порядку 30 км/год).

Всі описані труднощі є перепоною для побудови класичних моделей систем автоматизованого управління, але з ними легко справляться системи, що працюють за принципами нечіткої логіки. Переваги таких систем будуть докладно розглянуті нижче, рівно як і способи їх побудови.

1.2. Аналіз існуючих рішень щодо управління процесом функціонування башти танка.

Переважає більшість рішень по управлінню баштою танку носять «класичний характер», тобто побудовані за принципами класичної теорії автоматичного управління (ТАУ): для них розглядаються структурні схеми із встановленням типів елементів та їх з'єднань, утворюються обернені зв'язки та досліджуються переважно частотні характеристики. Однак, за таким підходом система управління абсолютно не може «боротися» з невизначеностями, а під цим терміном мається на увазі все наше незнання про систему та її оточення, а також і неможливість зведення точних моделей деяких важливих процесів, нездатність урахування істинно випадкових, можливо, непередбачуваних процесів, і т.п.

Так, приклад побудови класичних моделей (до речі система управління баштою танку може бути умовно чи фактично включена до т.зв. системи керування вогнем, оскільки до її складу включаються привід башти, привід гармати, датчик кутового положення башти, датчик кута

вертикального наведення і датчик кута горизонтального наведення) включений до вітчизняних винаходів [1-4]. Але ці системи, як уже сказано раніше, працюють за принципами використання обернених зв'язків для точного позиціонування, що мають ряд принципових недоліків, тому у даній роботі не будуть використовуватися.

В цілому можна сказати, що патентний пошук та аналіз наукової літератури показали: системи управління баштою танку, побудовані на основі нечіткої логіки, у доступних джерелах не описані.

1.3. Висновки по розділу.

У розділі розглянуто основні принципи та особливості роботи башти танку, обґрунтовано високі вимоги до показників її системи управління, зважаючи на специфіку задач, що вирішуються. В процесі викладення матеріалу ведеться планомірне відстоювання тези, що зведення системи управління на базі саме нечіткої логіки має суттєві переваги, є найбільш сучасним та ефективним способом побудови АСУ, тому і буде прийнято за основу у подальшій роботі.

РОЗДІЛ 2. СТВОРЕННЯ СИСТЕМИ АВТОМАТИЗОВАНОГО УПРАВЛІННЯ БАШТОЮ ТАНКА НА БАЗІ НЕЧІТКОЇ ЛОГІКИ

У попередньому розділі докладно розглянуто особливості функціонування башти танку; коротко розглянуто способи зведення відповідних систем управління за класичною схемою.

Встановлено, що управління баштою танку (та гарматою, як частиною башти) є складним процесом, повністю аналогічним до автоматизуємих технологічних процесів, тому для управління ним необхідною є розробка відповідної системи управління.

Автоматизовані системи управління можуть будуватися за досить різноманітними принципами, але один із найсучасніших підходів – це зведення АСУ на основі використання принципів нечіткої логіки (fuzzy logic). Розглянемо їх докладніше.

2.1. Особливості побудови систем управління на базі нечіткої логіки

Нечітка логіка заснована на теорії нечітких множин. Розглянемо її відмінності від класичної теорії множин Кантора (як їх тепер іноді називають, чітких множин, crisp). Для чітких множин результатом обчислення характеристичної функції можуть бути тільки два значення - 0 або 1. Це означає, що для будь-якої класичної множини усі об'єкти оточуючого світу можна охарактеризувати нулями та одиницями, де 0 означає, що даний об'єкт не належить множині, яка розглядається, а 1 означає, що даний об'єкт входить у множину.

Для нечітких множин кількість результатів обчислення характеристичної функції нескінченна, і усі вони обмежені діапазоном від нуля до одиниці. При цьому, якщо якийсь об'єкт точно не належить нечіткій множині, йому приписують 0, а якщо точно належить – об'єкту відповідає одиниця. Для усіх інших об'єктів, які, як кажуть, частково (не

повністю) належать множині, значення функції належності є дробом від 0 до 1, не включаючи їх.

Такий незвичайний, революційний підхід, а саме, відхід від двійкової дискретної логіки та перехід до неперервної, дозволяє за допомогою формалізованого апарату математичної логіки (тепер уже – нечіткої) вирішувати складні, слабо формалізовані або взагалі неформалізовані задачі (що раніше було просто неможливим за часів використання бінарної логіки). Розглянемо той шлях, що привів математиків ХХ століття до відкриття та широкого використання нечіткої логіки.

2.1.1. Історія впровадження fuzzy logic систем.

Вперше термін «нечітка логіка» (fuzzy logic) був введений американським професором азербайджанського походження Лотфі Заде в 1965 році в роботі «Нечіткі множини» в журналі «Інформатика і управління».

Підставою для створення нової теорії послужила суперечка професора зі своїм другом про те, чия з дружин привабливіше. До єдиної думки вони, звичайно, так і не прийшли, але цей випадок заклав передумови для формування Заде концепції, відповідно до якої стало можливим виражати у числовій формі поняття типу «привабливість», які через саму свою природу слабо підлягають формалізації. Люди часто оперують такими поняттями, але для сучасної обчислювальної техніки, яка працює з послідовностями нулей та одиниць, виразити та обробляти такі поняття надзвичайно складно. Нечітка логіка гарна тим, що взагалі дозволяє проводити такий процес.

Заради справедливості слід зазначити, що Лотфі Заде, формулюючи у своїй теорії властивості нечітких множин, стояв на плечах гігантів. На початку 1920-х років польський математик Лукашевич присвятив багато часу та праць розробці засад багатозначної математичної логіки, в якій значеннями предикатів могли бути не тільки «TRUE» або «FALSE». У

1937 р. ще один американський вчений Макс Блек (до речі, як і Заде, виходець з Азербайджану) у своїй статті в журналі «Філософія науки» вперше застосував багатозначну логіку Лукашевича до списків, розглядаючи їх як множини об'єктів, і назвав такі множини невизначеними. І тільки майже через 30 років після цієї роботи Блека Заде на основі логіки Лукашевича побудував повноцінну алгебраїчну систему. Пройшло ще 10 довгих років, і, нарешті, теоретична алгебра Заде завдяки Ібрагіму Мамдані (Ebrahim Mamdani) з Лондонського коледжу королеви Марії (Queen Mary College) запрацювала «в залізі». Саме Мамдані в 1975 р. спроектував перший в історії контролер, що реалізований на основі алгебри Заде, а функціональне призначення якого полягало у керуванні паровою турбіною (слід відмітити, що принципи побудови цього контролера та відповідна алгоритміка його стали канонічними і увічнінені загальноприйнятою серед фахівців назвою Mamdani-type controller).

В подальшому для нечіткої логіки знайшлися настільки добре окреслені сфери застосування, що стало можливим створення потужних інструментальних засобів, які дозволяють заховати безліч нетривіальних низькорівневих математичних операцій за зручними для користувача інтерфейсами і виразними проблемно-орієнтованими графічними метафорами. Фундаментальні математичні операції нечіткої логіки досить добре визначені, тому давно і успішно реалізовані «в залізі» (точніше, в системах команд) мікроконтролерів, що випускаються серійно.

В Японії даний напрям переживає справжній бум. Тут функціонує спеціально створена організація - Laboratory for International Fuzzy Engineering Research (LIFE). Програмою цієї організації є створення більш близьких людині обчислювальних пристроїв. LIFE об'єднує 48 компаній, в числі яких Hitachi, Mitsubishi, NEC, Sharp, Sony, Honda, Mazda, Toyota. З іноземних (не японських) учасників LIFE можна виділити IBM, Fujі, Xerox; до діяльності LIFE проявляє також інтерес NASA.

Міць і інтуїтивна простота нечіткої логіки як методології вирішення проблемних задач гарантує її успішне використання у вбудованих системах контролю і аналізу інформації. При цьому відбувається залучення людської інтуїції і досвіду оператора.

На відміну від традиційної математики, що вимагає на кожному кроці моделювання точних і однозначних формулювань закономірностей, нечітка логіка пропонує зовсім інший рівень мислення, завдяки якому творчий процес моделювання відбувається на найвищому рівні абстракції, при якому постулюється лише мінімальний набір закономірностей.

Нечіткі числа, що отримані в результаті «не цілком точних вимірювань», багато в чому аналогічні розподілам теорії ймовірностей, але вільні від властивих останнім недоліків: мала кількість придатних до аналізу функцій розподілу, необхідність їх примусової нормалізації, дотримання вимог адитивності, труднощі обґрунтування адекватності математичної абстракції для опису поведінки фактичних величин. В граничному випадку, при зростанні точності, нечітка логіка приходить до стандартної, булевої. У порівнянні з імовірнісним методом, нечіткий метод дозволяє різко скоротити обсяг вироблених обчислень, що, в свою чергу, призводить до збільшення швидкодії нечітких систем.

Недоліками нечітких систем є:

- відсутність стандартної методики конструювання нечітких систем;
- неможливість математичного аналізу нечітких систем існуючими методами;
- застосування нечіткого підходу в порівнянні з імовірнісним не приводить до підвищення точності обчислень.

Але, говорячи в цілому, можна сказати, що недоліки нечіткої логіки не можуть переважити її позитивні аспекти, саме тому ця галузь має райдужні перспективи і, ймовірно, знаходитиме все більш широкого впровадження для вирішення все більш різноманітніших завдань. При комбінуванні її з нейромережевими підходами до вирішення прикладних і

слабко формалізованих задач можна отримати потужний засіб вирішення практично будь-якої, як завгодно складної задачі управління, аналізу даних та знань, чи ін.

2.1.2. Функції належності нечітких змінних.

Для введення якоїсь нестандартної інформації у ЕОМ, тобто такої, що слабко формалізується, яку початково важко виразити числами, особливо, суб'єктивного характеру, її спочатку все ж слід перевести на мову символів та чисел. Для цього використовують цілий апарат теорії нечітких множин, що досить добре формалізований. Розглядати його розпочнемо безпосередньо з поняття нечіткої множини.

Це – найважливіше поняття нечіткої логіки. Будемо вважати, що E – універсальна множина, тобто набір усіх можливих елементів, що взагалі можуть розглядатися у певній прикладній задачі. Назвемо літерою x елемент із E , а позначенням R будемо називати деяку властивість, якій у різній мірі може відповідати елемент x . Будь-яка звичайна (чітка) підмножина A універсальної множини E , елементи якої в загальному випадку можуть задовольняти, чи не задовольняти властивості R , визначається як множина упорядкованих пар

$$A = \{\mu_A(x) / x\},$$

де $\mu_A(x)$ - характеристична функція, що приймає значення 1, якщо x задовольняє властивості R , і 0 - в іншому випадку.

Нечітка підмножина відрізняється від звичайної тим, що не для всіх елементів x із E можна надати однозначну відповідь «так», чи «ні» щодо наявності у них властивості R . У зв'язку з цим нечітка підмножина A універсальної множини E визначається як множина упорядкованих пар

$$A = \{\mu_A(x) / x\},$$

де $\mu_A(x)$ - характеристична функція приналежності (або просто функція приналежності), що може приймати будь-які значення від 0 до 1 включно. При цьому $\mu_A(x) = 0$, як і раніше, відповідає випадкові, що

елемент x не має властивості R , а $\mu_A(x) = 1$ означає, що елемент x відповідає властивості R у повній мірі. У більш загальному випадку значення характеристичної функції можуть лежати необов'язково у діапазоні $[0;1]$, а і у будь-якій цілком упорядкованій множині M (наприклад, $M = [-2, 3]$); при цьому перед подальшим використанням у процедурі нечіткого виведення такі функції належності мають бути нормалізовані, тобто приведені до діапазону $[0;1]$.

У якості **прикладу** розглянемо множину X усіх доступних режимів роботи силового приводу, що складається з чотирьох елементів:

x_1 – привід вимкнено;

x_2 – увімкнено тільки перший, менш потужний двигун на 400 Вт;

x_3 – увімкнено тільки другий, більш потужний двигун на 1,6 кВт;

x_4 – увімкнено обидва двигуни.

Розглянемо ступені приналежності елементів цієї множини $X = \langle \text{режими приводу} \rangle$ до підмножини $A = \langle \text{сильна подача} \rangle$.

При повністю вимкненому приводі сильної подачі взагалі немає, тобто

$$\mu_A(x_1) = 0.$$

При увімкненому лише першому двигуні, який є малопотужним, сильної подачі майже немає, тобто приймаємо

$$\mu_A(x_2) = 0,2.$$

При увімкненому лише другому двигуні, який є досить потужним, маємо майже сильну подачу, тобто приймаємо

$$\mu_A(x_3) = 0,8.$$

У випадку, коли увімкнені обидва двигуни, відбувається найбільш сильна подача, тобто

$$\mu_A(x_4) = 1.$$

Те, що $\mu_A(x_2)$ в сумі з $\mu_A(x_3)$ дає рівно $\mu_A(x_4)$ є чистою випадковістю, і це зовсім не обов'язково має реалізуватися при включенні випадків x_2 та x_3 у єдиний випадок x_4 .

Усі отримані величини можна об'єднати разом у записі:

$$A = \{(0, x_1), (0,2, x_2), (0,8, x_3), (1, x_4)\}, \quad (2.1, \text{а})$$

або

$$A = \{x_1|0 + x_2|0,2 + x_3|0,8 + x_4|1\}, \quad (2.1, \text{б})$$

або

$$A = \left\{ \frac{0}{x_1} + \frac{0,2}{x_2} + \frac{0,8}{x_3} + \frac{1}{x_4} \right\}. \quad (2.1, \text{в})$$

У наведених записах знак «плюс» має не арифметичний, а теоретико-множинний сенс, тобто слугує символом об'єднання інформації у єдине ціле.

Таким чином, функція приналежності $\mu_A(x)$ вказує ступінь (або рівень) приналежності елемента x підмножині A . Множину M називають множиною приналежності. Якщо $M = \{0, 1\}$, то нечітка підмножина A може розглядатися як звичайна, або чітка множина.

Наступним елементом формалізму теорії нечітких множин є поняття нечіткої змінної. Так називають трійку (або іншими словами, кортеж, об'єднання, набір із трьох величин):

$$(\alpha, X, A),$$

де α - найменування або назва нечіткої змінної;

X - універсальна множина (область визначення α), тобто множина усіх можливих значень, яких може набувати змінна α ;

A - нечітка множина на X , що описує усі можливі значення, яких може набувати нечітка змінна α разом із відповідними значеннями функції належності (тобто $\mu_A(x)$).

У якості прикладу нечіткої змінної, яка заснована на нечіткій множині «Сильна подача» можна навести відповідну змінну:

$$(\text{«Сильна подача»}, \{0, 400, 1600, 2000\}, A),$$

де A – нечітка множина відповідно до будь-якої із формул (2.1).

Більш широким поняттям, яке включає в себе поняття нечіткої змінної, є концепція лінгвістичної змінної. У неї є як строге визначення, так і просте пояснення своїми словами.

Наведемо формальне визначення поняття «лінгвістична змінна». Так називають кортеж (набір, упорядковану сукупність) із п'яти величин:

$$(\beta, T, X, G, M),$$

де β - найменування лінгвістичної змінної;

T - множина її значень (терм-множина), що являє собою набір найменувань тих нечітких змінних, областю визначення кожної з яких є множина X . Величина T називається базовою терм-множиною лінгвістичної змінної;

X - область, на якій визначаються нечіткі змінні, що входять до означення лінгвістичної змінної β ;

G - це деяка синтаксична процедура, що дозволяє оперувати елементами терм-множини T , зокрема, утворювати чи генерувати нові терми (значення), що мають сенс для даної прикладної задачі. Множина $T \cup G(T)$, де $G(T)$ - множина згенерованих термів, називається розширеною терм-множиною лінгвістичної змінної;

M - семантична процедура, що дозволяє наповнити кожне нове значення лінгвістичної змінної β , що може бути утворене за допомогою процедури G , осмисленим змістом шляхом залучення відповідної нечіткої змінної, тобто сформуванню відповідну нечітку множину.

У якості прикладу лінгвістичної змінної наведемо величину «швидкість танку», що є важливою при розгляді роботи систем управління баштою танку. Тоді:

$$\beta = \text{«швидкість танку»};$$

$$T = \{\text{«мала»}, \text{«середня»}, \text{«велика»}\};$$

$$X = [0, 70], \text{ км/год};$$

G - спосіб утворення нових термів (крім тих, що вже перелічені у складі T) за допомогою різноманітних зв'язок типу логічних операторів

(ТА, АБО, заперечень НЕ), відтінкових модифікаторів (типу «трохи», «дуже», «надзвичайно», і т.д.) та інших можливих підходів.

M – спосіб утворення на $X = [0, 70]$ нових нечітких змінних, назви яких утворюються із множини T шляхом використання модифікаторів із процедури G , таких як, наприклад, «дуже мала швидкість», «НЕ велика швидкість», і т.д.).

Як бачимо із цього та попередніх прикладів, важливу роль для вираження понять «лінгвістична змінна», і «нечітка змінна» грає нечітка множина (для нечіткої змінної) або нечіткі множини (для лінгвістичної змінної) покладені в їх основу. Поки було розглянуто тільки спосіб завдання нечітких множин для випадку, коли універсум представляє собою дискретну множину, тобто таку, що має зліченну кількість елементів (як от для потужності силового приводу – приклад, розглянутий вище). У практичних задачах набагато частіше зустрічається випадок, коли універсальна множина має неперервний характер (як швидкість танку, розглянута тільки що).

У такому, неперервному, випадку для кожного терму із T необхідно задати нечітку множину, що адекватно характеризувала б даний терм. Наприклад, для терму «мала» (швидкість) слід якимсь чином розповісти, при яких значеннях x (поточного рівня швидкості) його можна вважати слабким. У порівнянні зі способом (2.1) проблема полягає у тому, що немає чітко виділених окремих значень швидкості, а навпаки, усі доступні значення x утворюють континуум. В свою чергу, для кожного елемента цього континууму слід якось вказати ступінь приналежності до відповідного терму. Цілком логічно для таких цілей використати неперервну залежність у вигляді функції $\mu_1(x)$ (використано індекс «1», оскільки в одній задачі маємо декілька термів: «мала», «середня», «велика»). Графік такої функції для терму «мала» швидкість показано на рис. 2.1.

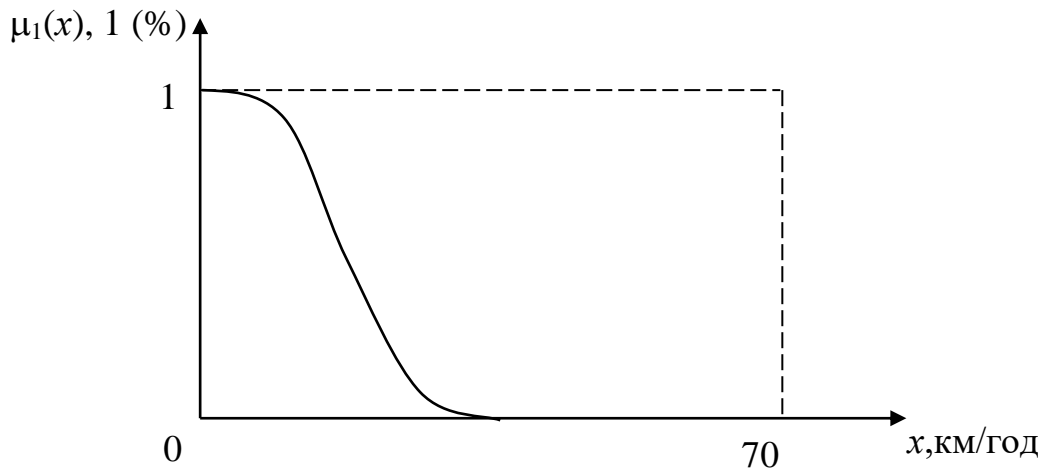


Рис. 2.1. Приклад функції належності для неперервної терм-множини «мала» швидкість танку.

Наведена на графіку функція є досить складною з математичної (обчислювальної) точки зору, так як являє собою криву лінію нерегулярного профілю. Якщо до нечіткої системи висуваються підвищені вимоги щодо обчислювальної ефективності, то вид функцій належності має бути простішим, зокрема, лінійним – рис. 2.2.

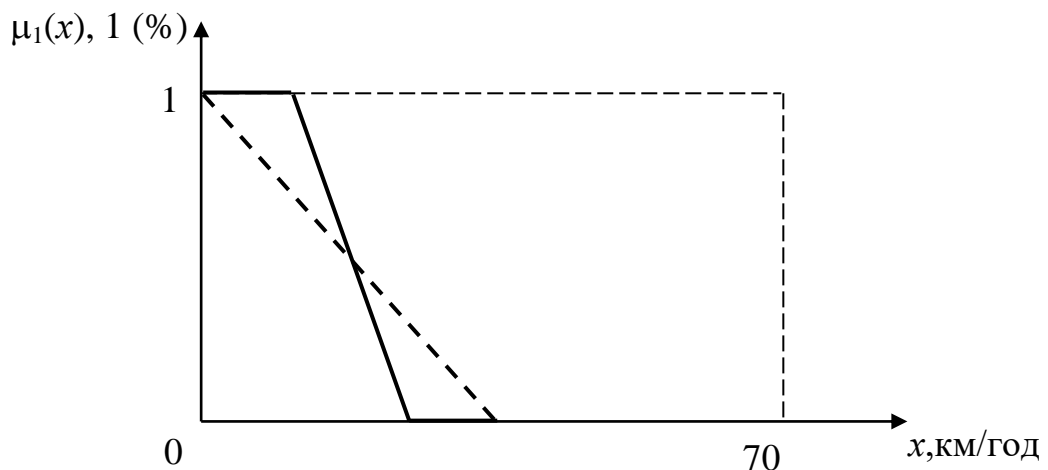


Рис. 2.2. Обчислювально прості приклади функції належності для неперервної терм-множини «мала» швидкість: пунктиром – лінійна, суцільною – кусково-лінійна.

Очевидно, що існує безліч способів завдання функцій належності, причому мається на увазі як тип функціональної залежності, так і числові параметри обраної залежності. Вибір конкретної форми функцій належності є важливою задачею, що безпосередньо впливає на подальший хід процедур нечіткого виводу, тому розглянемо різні їх варіанти.

а) Кусочно-неперервна функція, загальний вид якої показаний на рис. 2.3. На рисунку видно, що конкретний вид функції задається чотирма параметрами a, b, c, d , причому деякі з них можуть дорівнювати нулю, і тоді отримуються графіки на зразок рис. 2.2. Наприклад, якщо $a = b = 0$, то матимемо графік, зображений суцільною лінією, а якщо $a = b = c = 0$, то матимемо найпростіший з усіх пунктирний графік з рис. 2.2. Аналогічно, якщо $b = c = d = 0$, отримаємо найпростіший з усіх варіант функції належності для терму «найбільший» (дзеркальне відображення пунктиру з рис. 2.2 відносно вертикальної прямої, що проходить через точку $x_{\max}/2$).

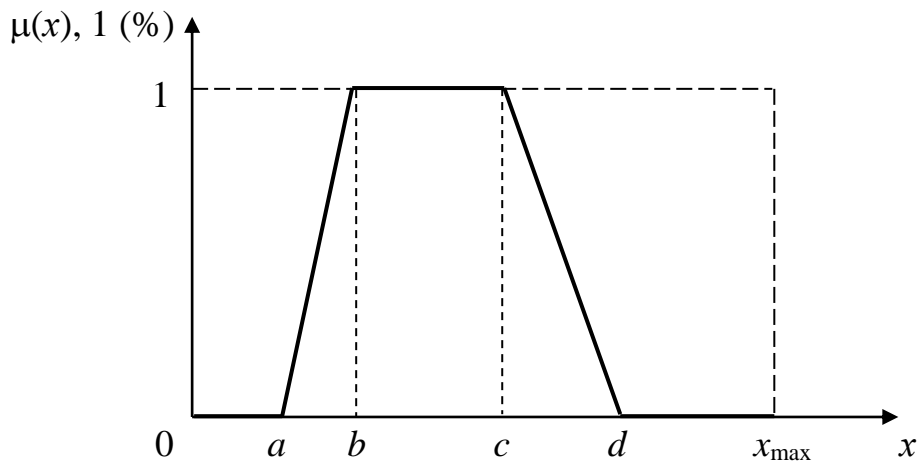


Рис. 2.3. Загальний випадок кусочно-лінійної функції належності.

Формула для такої функції належності має вид:

$$f(x, a, b, c, d) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \leq c \\ \frac{d-x}{d-c}, & c \leq x \leq d \\ 0, & d < x \end{cases}$$

Необхідно звернути увагу, що функції такого типу є найпростішими з точки зору обчислювальної складності, тому широко застосовуються для задач, що містять масовані обчислення.

б) Z-подібні функції належності. Через свою форму, зазвичай використовуються тільки для самих «крайніх» термів (для проміжних – не використовуються). Так для самого лівого по осі абсцис терму (наприклад, для найменшої вентиляції, тобто для терму «слабка», або для терму «малий нагрів») функція належності може задаватися тригонометричною функцією, або степеневою залежністю (квадратичною):

$$f(x,a,b) = \begin{cases} 1, & x < a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-a}{b-a} \pi\right), & a \leq x \leq b \\ 0, & b < x \end{cases}$$

$$f(x,a,b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ 1 - 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 0, & b \leq x \end{cases}$$

Зміст числових коефіцієнтів a та b видно з рис. 2.4.

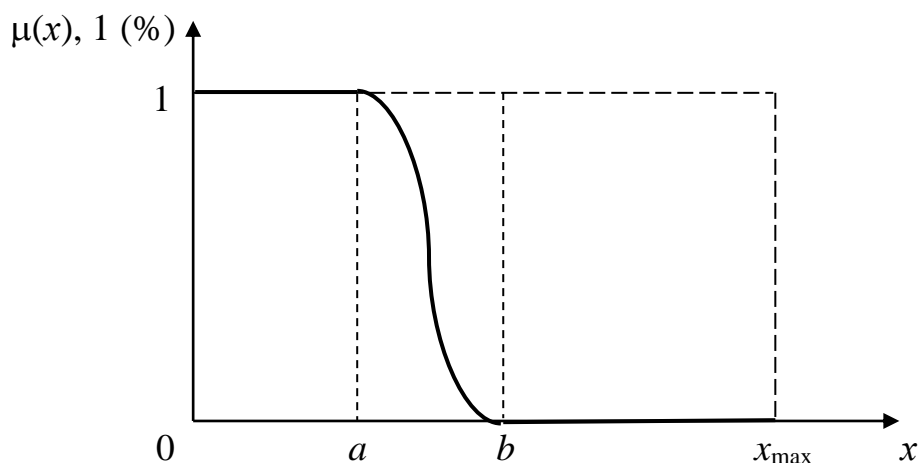


Рис. 2.4. Характер ходу Z-подібних функції належності (для самого «лівого» терму).

в) S-подібні функції належності. У протилежність до Z-подібних функцій належності S-подібні використовуються для самих крайніх справа термів. Наприклад, самим «правим» термом для характеристики вентиляції буде «сильний нагрів», і якраз його функцію належності можна задати S-подібною функцією. При цьому так само, як і у попередньому пункті б) математичною основою може виступати як тригонометрична функція (косинус), так і степенева залежність (квадратична):

$$f(x,a,b) = \begin{cases} 0, & x < a \\ \frac{1}{2} + \frac{1}{2} \cos\left(\frac{x-b}{b-a} \pi\right), & a \leq x \leq b \\ 1, & b < x \end{cases}$$

$$f(x,a,b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ 2\left(\frac{x-a}{b-a}\right)^2, & a \leq x \leq \frac{a+b}{2} \\ 1 - 2\left(\frac{b-x}{b-a}\right)^2, & \frac{a+b}{2} \leq x \leq b \\ 1, & b \leq x \end{cases}$$

Тут числові коефіцієнти a та b мають той самий зміст, що і для рис. 2.4., а саме є, відповідно, абсцисою початку та кінця викривленої ділянки графіку (тобто ділянки, що по осі ординат лежить між нулем та одиницею, не включаючи їх). Загальний вид S-подібної функції належності - рис. 2.5.

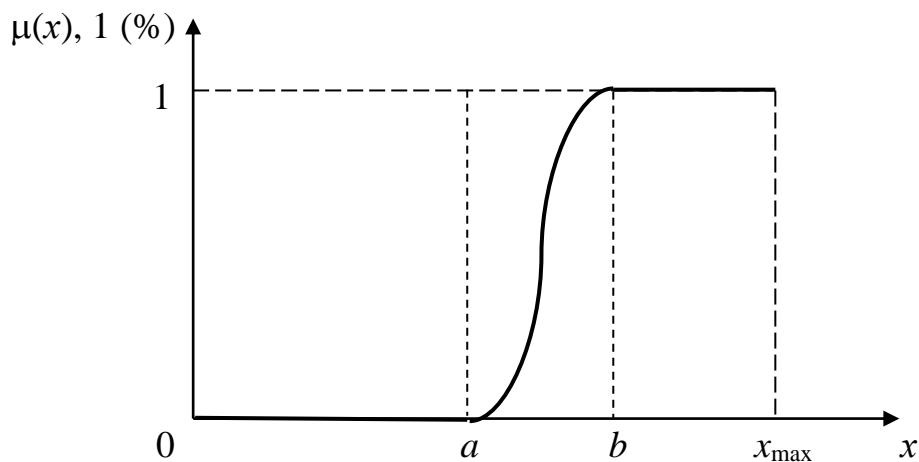


Рис. 2.5. Характер ходу S-подібних функції належності (для самого «правого» терму).

г) до типу S -подібних та одночасно Z -подібних функцій відноситься так звана сигмоїдальна функція (сигмоїд), яка в загальному вигляді задається виразом:

$$f(x, a, b) = \frac{1}{1 + e^{-a(x-b)}},$$

де за умови $a > 0$ маємо S -подібну функцію виду рис. 2.5, а при $a < 0$ – Z -подібну, як на рис. 2.4.

Перевагою сигмоїдної функції є її гнучкість, але вона має і недолік, пов'язаний з великою обчислювальною складністю (навіть у порівнянні з розглянутими вище квадратичними функціями, не говорячи вже про кусочно-лінійні).

д) Π -подібні функції, що спочатку зростають до максимуму а потім спадають – рис. 2.6, використовують для опису нечітких змінних, що відповідають проміжним (не крайнім) термам. В загальному випадку Π -подібна функція може бути отримана як добуток довільної S -подібної та довільної Z -подібної функції:

$$f_{\Pi}(x, a, b, c, d) = f_S(x, a, b) \cdot f_Z(x, c, d).$$

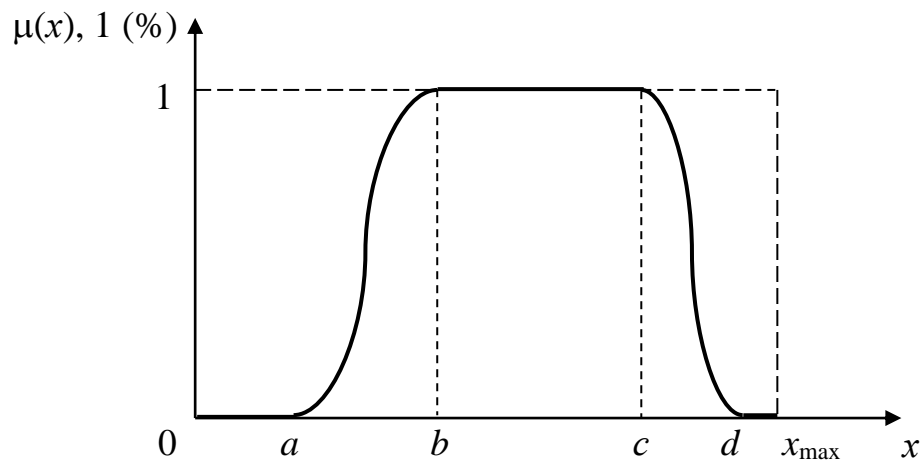


Рис. 2.6. Приклад колоколоподібної функції належності (для проміжних термів).

е) До П-подібних відносять також важливий частинний випадок – колоколоподібну (bell-shaped) функцію, яка у загальному вигляді задається аналітичною залежністю:

$$f_{\Pi}(x, a, b, c) = \frac{1}{1 + \left| \frac{x - c}{a} \right|^{2b}},$$

де a, b, c – деякі числові параметри, що визначають форму колоколу та підчиняються деяким додатковим умовам, зокрема: $a < b < c, b > 0$.

Як видно із наведеного переліку, функції належності можуть бути дуже і дуже різними. Навіть при схожому характері зміни функцій належності, їх аналітичні формули будуть принципово різними за своїм математичним змістом. Отже, вибору конкретних функцій належності слід приділяти належну увагу та робити цей вибір обґрунтовано, спираючись на певні правила та рекомендації, розглянемо їх докладніше.

З практичної точки зору підбір функцій належності означає, що для кожного можливого значення x_i із універсума E слід задати величину його включення $\mu_j(x_i)$ у кожен терм-множину T_j із виділених для цієї лінгвістичної змінної.

Можливі два різних підходи до побудови функцій приналежності: використання прямих методів та непрямих методів.

При прямих методах експерт, або група експертів просто задають значення $\mu_j(x_i)$ для кожного можливого x_i і T_j . Такий підхід зазвичай є можливим, коли описувана властивість добре виражається у числовій формі, тобто, наприклад, є фізичною величиною (а будь-яка фізична величина добре виражається у числовій формі). Прикладом властивості, що не виражається прямим чином через числа є краса певного об'єкта, і взагалі, усі суб'єктивні характеристики, що надаються людиною.

Так до прямого завдання функції належності відноситься приклад, розглянутий вище, в результаті якого отримано залежності (2.1, a - v).

Зафіксованим значенням функції належності тут відповідають закріплені точки на графіку $\mu(x)$, а проміжні ділянки графіка можуть мати певну гнучкість, головне, відповідаючи загальному характеру зростання функції. Наприклад, допустимі варіанти функції належності розглянутого терму «Сильна подача» наведено на рис. 2.7.

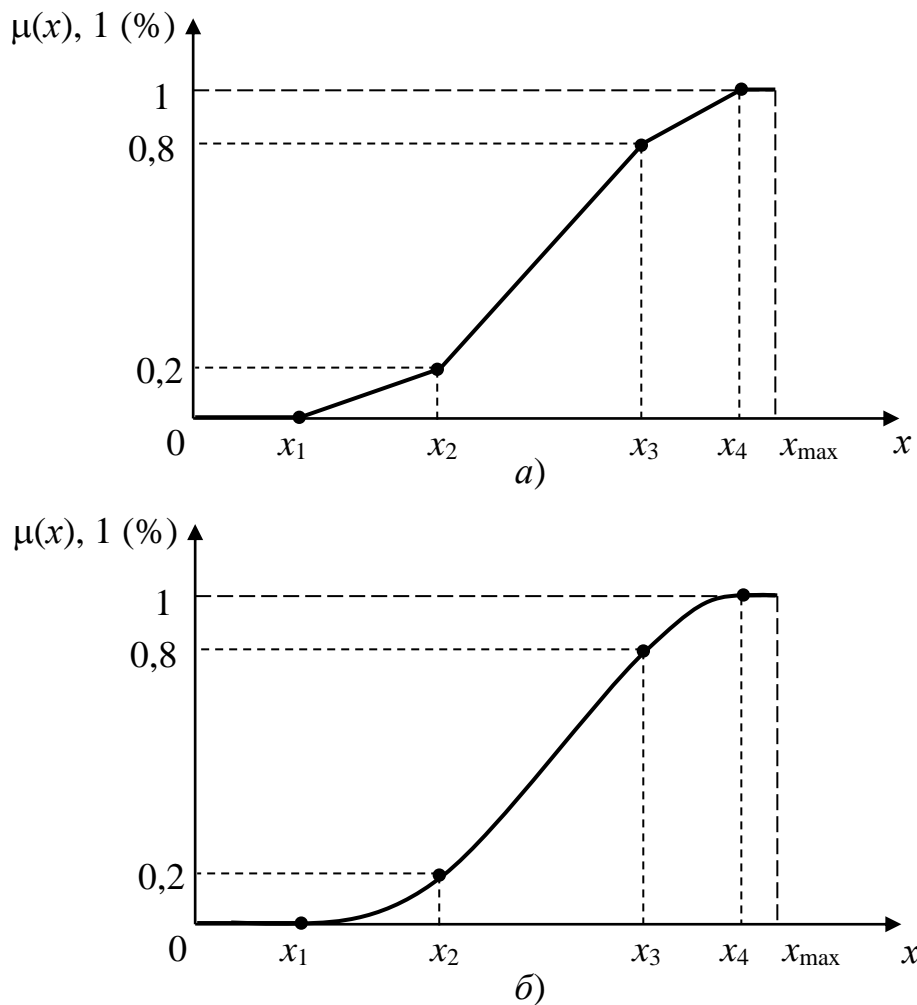


Рис. 2.7. Варіанти завдання функції належності терму «Сильна подача»: а – кусочно-неперервний, б – гладкий.

При використанні прямих методів визначення функцій належності вирисовується ще одна перевага нечіткого підходу: точного значення для функцій задавати не потрібно, достатньо лише завдання значень у кількох контрольних точках та вибору характеру ходу функції. Усе інше (зокрема, точні значення функцій належності у всіх проміжних точках, крім кількох

характерних) для ефективного проведення процедур нечіткого виводу не є обов'язковим.

Використання непрямих методів обґрунтоване коли важко одразу задати значення функцій приналежності, в першу чергу, через саму природу властивості, що описується лінгвістичною змінною. Дійсно, важко одразу проставити «бали» для такої величини, як краса (естетичність – для приладдя).

Серед непрямих методів найбільш поширений метод парних порівнянь, який використовується для кінцевих нечітких множин і заснований на наступних міркуваннях. Якби значення шуканої функції належності були відомі і рівні значенням $\mu(x_i)$, то попарні порівняння відповідних елементів можна представити матрицею \mathbf{A} з елементами a_{ij} , які рівні $a_{ij} = \mu(x_i) / \mu(x_j)$. При вирішенні практичних задачах часто простіше спочатку побудувати матрицю \mathbf{A} з урахуванням її особливостей: діагональні елементи рівні 1, а елементи, які є симетричними відносно головної діагоналі, повинні бути взаємно оберненими (тобто $a_{ij} = 1 / a_{ji}$).

У цьому випадку задача побудови функції належності зводиться до знаходження такого вектору \vec{w} , який є розв'язком рівняння:

$$\mathbf{A}\vec{w} = \lambda_{\max} \vec{w},$$

де λ_{\max} – найбільше власне число матриці \mathbf{A} . Оскільки всі значення елементів матриці \mathbf{A} є додатними, рішення даного рівняння існує і є додатним.

Таким чином, для побудови функцій належності на сьогоднішній день розроблено чимало підходів, які дозволяють задавати їх для переважної більшості практичних випадків.

2.1.3. Правила нечітких продукцій.

Ще одним кроком всього процесу зведення нечіткої системи управління є створення бази правил нечітких продукцій, якими управлятиметься система у процесі свого функціонування. На відміну від етапу завдання функцій належності нечітких змінних, коли було можливим деяке свавілля, правила нечітких продукцій мають бути сформульовані однозначно і без яких-небудь ступенів свободи. Правила нечітких продукцій за своїм характером та властивостями схожі на логічні моделі (у звичайному сенсі двійкової логіки). Вони дозволяють формалізованим чином представляти практичні знання експертів у відповідній проблемній області.

Дамо формальне математичне означення поняттю правила нечіткої продукції. Так називають вираз наступного виду:

$$(i): Q; P; A \Rightarrow B; S, F, N, \quad (2.2)$$

де (i) – назва правила;

Q – область застосування правила нечіткої продукції;

P – умови, за яких можна застосовувати правило нечіткої продукції, що розглядається;

A – логічна умова, при якій застосовується (активізується) дане правило, антецедент;

\Rightarrow - знак логічного слідування або секвенції, вираз $A \Rightarrow B$ називають ядром правила нечіткої продукції;

B – висновок правила (ядра), консеквент;

S – метод визначення кількісного значення ступеня істинності висновку ядра;

F – коефіцієнт визначеності чи іншими словами впевненості самого правила нечіткої продукції;

N – постумови правила продукції.

Як і у звичайних, булевих правил, назвою (i) може виступати будь-який набір символів, за яким можна однозначно ідентифікувати (тобто

фактично – посилалися на) дане правило. Як простий, але поширений приклад формування імен правил нечітких продукцій можна назвати їх звичайне нумерування.

Елементи (2.2) Q , P , N для правила нечіткої продукції мають той самий сенс, що і для правил звичайної двійкової логіки.

Так область застосування продукції Q описує прямим або непрямим чином предметну галузь знання, яку представляє окрема продукція. При цьому надзвичайно актуальною є декомпозиція тобто розбиття усієї предметної галузі на окремі незалежні області, що може суттєво підвищити ефективність висновків у продукційній системі.

Умова застосування правила продукції, що позначається P , являє собою логічний вираз, часто – предикат. Якщо ця умова присутня у продукції, то активізація ядра (причому незалежно від логічного значення антецеденту A) буде можливою тільки за умови, що P – істинна. Часто цю умову або взагалі опускають, або вводять у антецедент ядра нечіткої продукції.

Післяумова N включає дії, які слід виконати при реалізації ядра нечіткої продукції, тобто при отриманні результату про істинність B . Це можуть бути процедури, що відображують обчислювальний, або якийсь інший аспект продукційної системи.

Найголовнішою частиною будь-якого правила нечіткої продукції (2.2) є вираз $A \Rightarrow B$, який і має відповідну назву: «ядро» продукції. Ядро зазвичай записують наступним чином:

$$\text{ЯКЩО } A \text{ ТО } B, \quad (2.3, a)$$

або у більш традиційному вигляді, з використанням англійської нотації:

$$\text{IF } A \text{ THEN } B. \quad (2.3, б)$$

Тут A і B – деякі вирази нечіткої логіки, що найчастіше записані у формі нечітких висловів. Обидва ці вирази, як A так і B , можуть являти собою як прості, елементарні нечіткі вислови, так і комплексні вирази,

складені із кількох елементарних, поєднаних між собою нечіткими логічними зв'язками, такими, як нечітке заперечення, нечітка кон'юнкція, чи нечітка диз'юнкція. В реальних системах дуже часто антецедент A все ж є елементарним висловом, а консеквент B – майже завжди є елементарним виразом.

Окрім варіанту (2.3), ядро правила нечіткої продукції може записуватися також, як

$$\text{ЯКЩО } A \text{ ТО } B \text{ ІНАКШЕ } C \quad (2.4, a)$$

або у англійській нотації:

$$\text{IF } A \text{ THEN } B \text{ ELSE } C \quad (2.4, б)$$

Одне правило виду (2.4) можна представити еквівалентною системою двох правил виду (2.3):

$$\begin{aligned} &\text{ЯКЩО } A \text{ ТО } B, \\ &\text{ЯКЩО НЕ } A \text{ ТО } C. \end{aligned}$$

Таким чином, оскільки будь-яке (2.4) зводиться до двох (2.3), то у подальшому без обмеження загальності викладу матеріалу можна розглядати тільки правила виду (2.3).

Ще одним важливим елементом формалізму правил нечітких продукцій є S – спосіб визначення ступеня істинності консеквенту B на основі знання величини істинності антецеденту A . Вибір того, чи іншого конкретного способу S , в цілому визначає і усю схему, або алгоритм нечіткого виведення. Зважаючи на визначну роль цього елементу S у всьому правилі, його ще називають методом композиції або методом активації – згідно стандарту ІЕС 1137-7.

Тож, важливою проблемою усіх процедур нечіткого виведення, у яких очевидно використовуються наближені величини та, відповідно, наближені розрахунки, є необхідність встановлення ступеня істинності одних нечітких висловлювань (висновку правила, тобто консеквентну) на основі знання ступеня істинності інших нечітких виразів (умови правила, тобто антецеденту, який в загальному випадку може бути і

складеним). Щоби мати можливість такої операції слід вміти давати відповідь на більш просте, частинне питання: чому повинна дорівнювати ступінь істинності висновку одного окремого правила нечіткої продукції, якщо відомою є ступінь істинності умови цього правила? Нижче у тексті даної роботи будуть розглянуті шляхи такого визначення, відповідно до яких формуються цілі системи (алгоритми) нечіткого висновку. Поки що для цілей загального розуміння усієї процедури нечіткого виведення можна вважати операцію S еквівалентністю для випадку, коли A – проста, елементарна умова, яка, відповідно має одну свою ступінь істинності. Таким чином, поки будемо вважати, що ступінь істинності висновку рівна ступеню істинності посилки/умови.

Останнім елементом формалізму поняття правила нечіткої продукції є F – коефіцієнт визначеності, або впевненості – надає числову оцінку ступеня істинності або відносної ваги всього даного правила. Це число в діапазоні від 0 до 1 включно, яке також часто називають ваговим коефіцієнтом нечіткого правила продукції.

2.1.4. Процедура нечіткого виводу.

Весь процес використання систем нечіткого виводу (зокрема, для задач управління, як у даній роботі) полягає у циклічному виконанні процедури нечіткого виводу за допомогою системи нечіткого виводу. Єдиним кроком, що не виконується під час робочого часу системи, а реалізується лише один раз – при розробці системи – є створення системи нечітких правил продукцій (бази правил нечітких продукцій).

Під системою нечітких правил продукцій мається на увазі узгоджена множина окремих правил нечітких продукцій, побудованих на основі виразу (2.3):

$$\text{ПРАВИЛО } \langle 1 \rangle: \text{ЯКЩО } \langle \beta_1 \in \alpha_{11} \rangle \text{ ТО } \langle \beta_2 \in \alpha_{21} \rangle, \quad (2.5)$$

де « \in » означає «являється», або англійською «IS».

Тут нечіткі вирази A та B розписані у формі « $\beta_i \in \alpha_{ij}$ » через лінгвістичні змінні β_i , деякі з яких є вхідними (це змінні, що беруть участь у антецедентах), деякі – вихідними (змінні, які входять до консеквентів). α_{ij} – який-небудь конкретний терм із терм-множини лінгвістичної змінної β_i .

Як уже зазначалося при введенні формул (2.3) посилка A може мати складний характер, тобто бути комбінацією двох умов, об'єднаних операцією ТА чи операцією АБО. Відповідні правила матимуть тоді наступний вигляд:

ПРАВИЛО <2>: ЯКЩО « $\beta_1 \in \alpha_{11}$ » ТА « $\beta_2 \in \alpha_{21}$ » ТО « $\beta_3 \in \alpha_{31}$ ». (2.6)

ПРАВИЛО <3>: ЯКЩО « $\beta_1 \in \alpha_{11}$ » АБО « $\beta_2 \in \alpha_{21}$ » ТО « $\beta_3 \in \alpha_{31}$ ». (2.7)

Останньою можливістю щодо структури правил нечітких продукцій є реалізація консеквенту у вигляді складеного нечіткого виразу типу

« $\beta_3 \in \alpha_{31}$ » ТА « $\beta_4 \in \alpha_{41}$ »,

чи

« $\beta_3 \in \alpha_{31}$ » АБО « $\beta_4 \in \alpha_{41}$ ».

При цьому структура відповідних правил нечітких продукцій буде наступною:

ПРАВИЛО <4>: ЯКЩО « $\beta_1 \in \alpha_{11}$ » ТО « $\beta_3 \in \alpha_{31}$ » ТА « $\beta_4 \in \alpha_{41}$ », (2.8)

ПРАВИЛО <5>: ЯКЩО « $\beta_1 \in \alpha_{11}$ » ТО « $\beta_3 \in \alpha_{31}$ » АБО « $\beta_4 \in \alpha_{41}$ ». (2.9)

Ще більш загальними формами запису правил нечітких продукцій буде комбінація одного із варіантів (2.8)-(2.9) з одним із варіантів (2.6)-(2.7). Тоді можливими стають чотири більш загальних варіанти правил нечітких продукцій:

ПРАВИЛО <6>: ЯКЩО « $\beta_1 \in \alpha_{11}$ » ТА « $\beta_2 \in \alpha_{21}$ » ТО
« $\beta_3 \in \alpha_{31}$ » ТА « $\beta_4 \in \alpha_{41}$ », (2.10)

ПРАВИЛО <7>: ЯКЩО « $\beta_1 \in \alpha_{11}$ » ТА « $\beta_2 \in \alpha_{21}$ » ТО
« $\beta_3 \in \alpha_{31}$ » АБО « $\beta_4 \in \alpha_{41}$ », (2.11)

ПРАВИЛО <8>: ЯКЩО « $\beta_1 \in \alpha_{11}$ » АБО « $\beta_2 \in \alpha_{21}$ » ТО

$$\langle\beta_3 \in \alpha_{31}\rangle \text{ ТА } \langle\beta_4 \in \alpha_{41}\rangle, \quad (2.12)$$

ПРАВИЛО <9>: ЯКЩО $\langle\beta_1 \in \alpha_{11}\rangle$ АБО $\langle\beta_2 \in \alpha_{21}\rangle$ ТО

$$\langle\beta_3 \in \alpha_{31}\rangle \text{ АБО } \langle\beta_4 \in \alpha_{41}\rangle, \quad (2.13)$$

Правила виду (2.10)-(2.13) можна об'єднати разом, записуючи їх компактно, якщо замість двох операцій нечіткої кон'юнкції та диз'юнкції ввести позначення однієї універсальної операції, що може бути як кон'юнкцією, так і диз'юнкцією:

$$ОП = o_i, O = \{ТА, АБО\}.$$

Тоді правила (2.10)-(2.13) можна переписати одним реченням компактніше:

ПРАВИЛО <10>: ЯКЩО $\langle\beta_1 \in \alpha_{11}\rangle$ ОП₁ $\langle\beta_2 \in \alpha_{21}\rangle$ ТО

$$\langle\beta_3 \in \alpha_{31}\rangle \text{ ОП}_2 \langle\beta_4 \in \alpha_{41}\rangle, \quad (2.14)$$

де ОП₁ та ОП₂ – в загальному випадку різні операції (хоча, звичайно, вони можуть і співпадати).

Ще одним недоліком структури правил нечітких продукцій виду (2.14) можна вважати наявність лише двох складових як у антецеденті, так і у консеквентні, хоча немає якихось принципових обмежень на кількість таких елементарних тверджень, що утворюють складений нечіткий вираз. Таким чином, узагальнити (2.14) можна вводячи оператори сумування по кількості складових:

$$\text{ПРАВИЛО } \langle 11 \rangle: \text{ЯКЩО } \prod_{i=1}^{N_1} \langle \beta_i \in \alpha_{ik} \rangle \text{ ТО } \prod_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} \langle \beta_i \in \alpha_{ik} \rangle, \quad (2.14)$$

де N_1 – кількість вхідних лінгвістичних змінних, що беруть участь в організації складеної умови Правила 11;

N_2 – кількість вихідних лінгвістичних змінних, що беруть участь в організації підвисновків Правила 11;

ОП₁ – одна із нечітких логічних операцій ТА, АБО, що використовується для об'єднання вхідних змінних Правила 11;

OP_2 – друга нечітка логічна операція, яка використовується для об'єднання підвисновків Правила11, і яка може співпадати або не співпадати з попередньою операцією OP_1 .

Вираз (2.14) являє собою найзагальнішу форму запису правил нечітких продукцій, яка, втім, має більше теоретичне значення, ніж практичне, оскільки у переважній більшості випадків запису правил нечітких продукцій використовуються правила виду (2.5)-(2.7), тобто такі, що мають елементарний консеквент.

Таким чином, першим кроком процедури нечіткого виводу, який до того ж виконується лише один раз, є створення бази правил нечітких продукцій. Це задача, яку має виконувати експерт (експерти) у даній предметній галузі, оскільки від якості цієї системи (її повноти та адекватності кожного правила) залежить успішна робота системи управління, та й усього об'єкта управління в майбутньому. Помилки при проектуванні бази правил можуть приводити до катастрофічних наслідків, причому найбільша частка складних проблем має за причину саме недоліки системи нечітких правил продукцій.

Поруч із кожним правилом (точніше, справа від нього) виду (2.5)-(2.7) у системі нечітких правил іноді записують число F , що, як зазначено вище у (2.2) є коефіцієнтом визначеності або ваговим коефіцієнтом відповідного правила. Нагадаємо, що $F \in [0;1]$. Вагові коефіцієнти можна і не вказувати, але тоді слід прийняти, що в такому випадку для всіх правил вони будуть рівними 1.

Важливою властивістю бази правил має бути її узгодженість, тобто, по-перше, правила не повинні суперечити одне одному (так завжди і є, коли об'єкт управління та методику роботи з ним описує один експерт, що має закінчений, усталений і ефективний погляд на керування об'єктами заданого класу). По-друге, під узгодженістю мається на увазі те, що у якості умов та висновків правил можуть використовуватися тільки нечіткі лінгвістичні вирази виду (2.14) та його підвиди, і при цьому у кожному із

нечітких висловлювань мають бути визначеними функції належності усіх елементів терм-множини.

Після зведення бази правил нечітких продукцій та її реалізації у певному електронному апаратному забезпеченні розпочинається процес нормального функціонування системи управління, що ітеративним, циклічним і кожна ітерація складається з наступних складових (рис. 2.8):

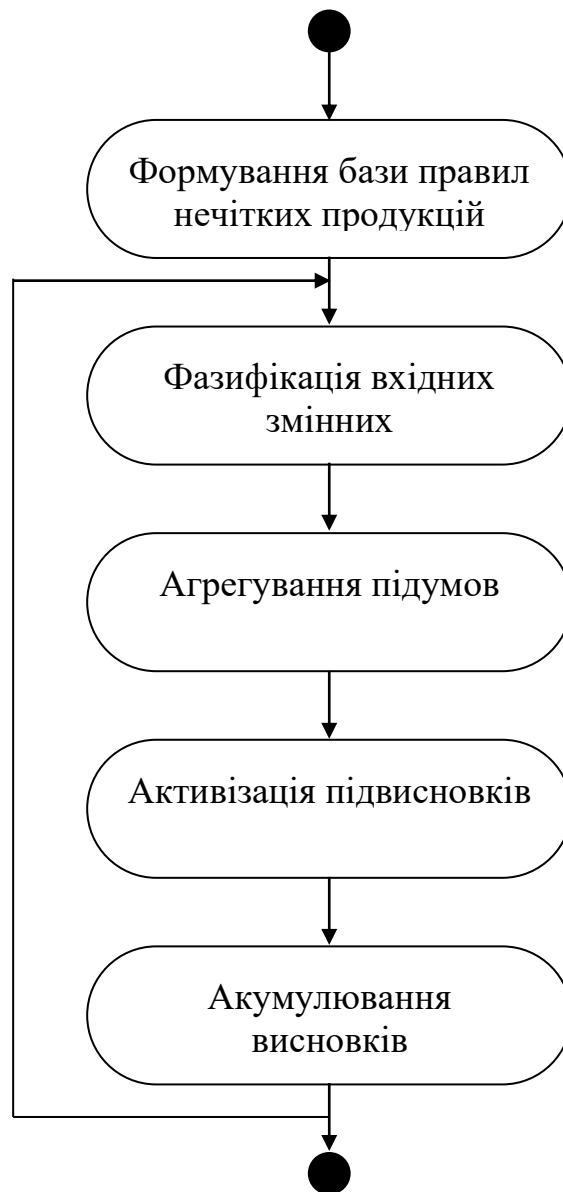


Рис. 2.8. Діаграма діяльності процесу нечіткого виводу (у формі діаграми діяльності мови UML).

- фазифікація вхідних величин, що входять до умов правил нечітких продукцій;

- агрегування підумов для правил виду (2.6) та (2.7), тобто таких, що мають складені антецеденти;

- активізація підвисновків;

- акумулювання висновків (для тих вихідних змінних, різні терми яких входять до різних активних правил нечітких продукцій, а зазвичай для кожної вихідної змінної так і є).

Розглянемо докладніше кожен із п'яти повторюваних етапів процедури нечіткого виведення.

а) Першим із них є фазифікація, суть якої полягає у обчисленні значень функцій належності усіх активних термів усіх вхідних лінгвістичних змінних. Даний процес виконується на основі звичайних (не нечітких) даних і має на меті їх переведення у терміни теорії нечітких множин, саме тому фазифікацію ще називають введенням нечіткості.

Ціллю фазифікації є встановлення відповідності між конкретним (зазвичай, числовим) значенням окремої вхідної змінної системи нечіткого виводу та значенням функції належності відповідного їй терма вхідної лінгвістичної змінної. Після завершення цього етапу для всіх вхідних змінних мають бути визначені конкретні значення функцій належності по кожному із лінгвістичних термів, що використовуються у підумовах бази правил системи нечіткого виводу.

б) Наступним етапом процедури нечіткого виводу є агрегування. Воно застосовується до тих правил, які мають складені умови, що складаються з декількох підумов. Для кожної підумови шляхом виконання процесу фазифікації встановлюється ступінь істинності. По цим даним для кожного правила встановлюється ступінь його істинності в цілому, що виконується на основі об'єднання ступеней істинності окремих підумов, що входять до даного правила (якщо якесь правило побудовано на основі елементарної умови, то ступінь істинності всього правила приймається рівним ступеню істинності цієї єдиної умови). Об'єднання підумов одного

правила здійснюється за допомогою операції нечіткої кон'юнкції ТА чи нечіткої диз'юнкції АБО.

Результатом етапу агрегування є встановлення ступеня істинності (у вигляді числа в діапазоні від 0 до 1 включно) для кожного із правил, що утворюють базу нечітких продукцій

в) Активізація є третім із повторюваних етапів процедури нечіткого виводу і полягає у встановленні ступеня істинності кожного із підвисновків усіх правил, що були активними на цій ітерації процесу (тобто таких правил, які на попередньому кроці агрегування мали ненульові результуючі ступені істинності). Ціллю активізації є вироблення ступенів істинності для кожного підвисновку, в результаті чого на наступному кроці можна буде перейти до визначення цілих лінгвістичних змінних, що є вихідними..

г) Акумуляція є передостаннім етапом процедури нечіткого виводу і необхідна через той факт, що різні терми однієї і тієї ж лінгвістичної змінної можуть входити до підвисновків різних правил нечітких продукцій, і тому мають бути якимсь чином об'єднані для формування значення цієї конкретної лінгвістичної змінної.

Результатом акумуляції є сформований набір функцій належності для кожної лінгвістичної змінної, які враховують і відповідають усім термам, задіяним у активованих правилах бази правил нечітких продукцій.

д) Останній етап процедури нечіткого виводу називається дефазифікацією, а полягає він у тому, щоби на основі розмитої інформації, якою є отримані на попередньому етапі види функцій належності усіх вихідних змінних, обчислити конкретні значення цих змінних, яких їм треба надати.

Для виконання дефазифікації існує багато різноманітних методів, але найбільш популярними є метод центру тяжіння (який також називають просто словом «центроїд») та центру площі, відповідно до яких треба досліджувати геометричну фігуру, обмежену прямими $x = 0$, $x = x_{\max}$, $\mu =$

0, $\mu = 1$, а також – лінією, що зображує функцію належності даної вихідної лінгвістичної змінної. У першому випадку слід знаходити координату x центра тяжіння цієї двовимірної фігури, а у другому – координату x вертикальної прямої, що ділить площу цієї фігури на 2 рівних по площі частини.

Після виконання етапу дефазифікації для кожної вихідної змінної буде наявним конкретне числове значення, якому вона повинна дорівнювати для того, щоби забезпечити найкращий результат.

2.2. Розробка системи автоматизованого управління баштою танку

2.2.1. Обрання вхідних та вихідних змінних.

Як встановлено вище, першим етапом у створенні будь-якої нечіткої системи управління є вибір вхідних та вихідних змінних. Дамо коротке пояснення, які змінні відноситимуться до вхідних для системи управління, а які – до вихідних.

Вхідними для системи управління є різноманітні величини, які, зазвичай, отримуються від датчиків системи і для об'єкту управління є цільовими. Потрапляння їх до системи управління на вхід фактично є реалізацією обернених зв'язків, що і дозволяють здійснювати процес нечіткого управління системою. Наприклад, для об'єкту, що здійснює поступальний рух вздовж напрямної прямої Ox і має зупинитися у певній заданій позиції x_1 , цільовою величиною є поточна координата x , яка кінцево має стати рівною заданому значенню x_1 . Таким чином, в процесі функціонування всієї рухомої системи, в кожний момент часу вона матиме певну координату x , яка змінюватиметься відповідно до дій, виконуваних самою системою (відповідно до роботи силових приводів, включення гальм, і т.п.). Відповідно, для усієї системи величина x може вважатися вихідною, оскільки є результатом дій, вжитих системою. В той же час, для системи управління, яка виробляє управляючі рішення і причому робить це

на основі комплексу параметрів, в числі яких важливе місце займає і поточне положення системи x , ця величина x буде вхідною! Аналогічно і зі швидкістю руху вздовж прямої Ox (яка також має урахуватися, якщо рух достатньо швидкий): для всього рухомого об'єкта – це вихідна величина, оскільки обумовлена поведінкою самого об'єкта, але для системи управління ця величина буде вхідною, так як на основі її вироблятимуться подальші рішення про управління роботою об'єкта.

В свою чергу вихідними величинами для системи управління будуть команди для виконуючих пристроїв, що мають забезпечити «найкращу» поведінку об'єкта управління: мала, чи велика подача для різноманітних наявних силових приводів, включення гальм, коректорів руху, інших пристроїв, що впливають на роботу об'єкта. Ці ж величини можна назвати вхідними для самого об'єкту керування, оскільки на основі їх завдання буде мінятися реальне положення об'єкта та інші його параметри.

Таким чином, у подальшому викладі матеріалу прийнято такі позначення:

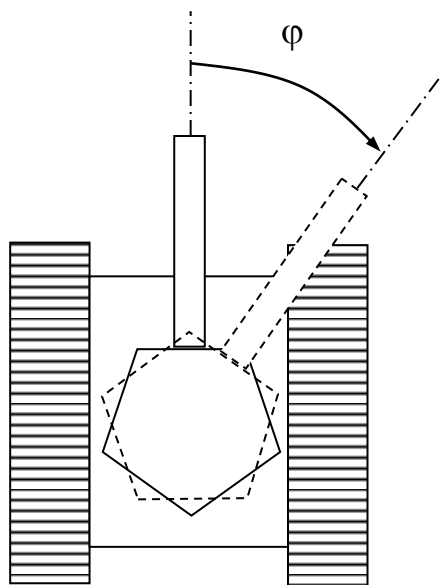
- вхідні змінні для САУ – це поточні значення контрольованих, цільових для об'єкта величин, що поступають від датчиків, наявних в об'єкті управління;

- вихідні змінні для САУ – це команди для виконуючих пристроїв, що впливають на об'єкт управління.

У перелік вхідних, зазвичай, включають поточні значення характеристик технологічних установок, що мають першочергову важливість і підлягають суворому контролю. Для проектованої системи сюди, в першу чергу, слід віднести кутове положення башти та кутове положення гармати.

Для завдання першої величини, яку в подальшому коротко називатимемо «Кут башти», слід зафіксувати якийсь початок відліку, що відповідатиме нульовому значенню кутового положення башти. Логічним

є вибір за нульове такого положення башти, при якому гармата направлена



строго вперед (вздовж діаметральної площині симетрії танку) – рис. 2.9.

Рис. 2.9. Схема визначення кутового положення башти φ .

Додатні значення кута φ будемо відкладати за стрілкою годинника (якщо дивитися на танк згори, так як на рис. 2.9), від'ємні, відповідно, проти стрілки годинника.

При визначенні другої контрольованої величини, якою є кутове положення гармати (далі коротко будемо називати його «Кут гармати»), є набагато менше свободи, оскільки рух цього об'єкту природним чином обмежений конструктивними особливостями танку і складає величини приблизно від -5° до $+15^\circ$. Відповідно кутом гармати будемо вважати кут, утворений дулом гармати та горизонтальним напрямком – рис. 2.10. При цьому додатні значення відповідають піднятому дулу, а від'ємні – опущеному.

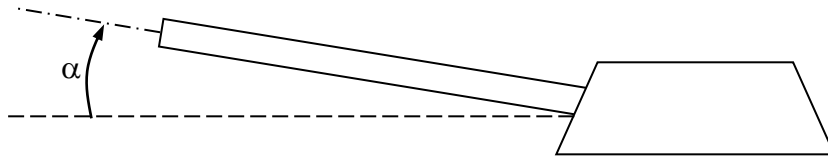


Рис. 2.10. Схема визначення кутового положення гармати α .

Додатні значення кута гармати відкладаються при підйомі дула вгору, а від'ємні – при опусканні дула вниз (такі положення дула необхідні при закопуванні танку на позиції – рис. 2.11).

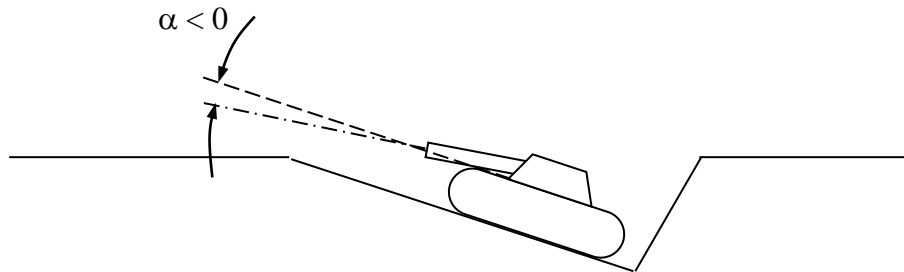


Рис. 2.11. Схема, що пояснює необхідність у від'ємних значеннях кута гармати.

Таким чином, вводимо дві наступних вхідних змінних (традиційно для великої кількості літературних джерел лінгвістичні змінні позначаємо грецькою літерою β):

β_1 = «Кут башти»;

β_2 = «Кут гармати».

Крім самих контрольованих величин, часто у системи управління вводять їх похідні, причому може і не тільки першого порядку, а навіть і другого, а, можливо, і вищих порядків. Як відомо, перша похідна будь-якої фізичної величини по часу дає швидкість зміни цієї величини, друга похідна – прискорення, третя – швидкість зміни прискорення, і т.д. Існує дуже простий критерій, що показує, яку кількість похідних треба брати для правильної роботи системи управління: чим швидше можуть змінюватися

контрольовані змінні, то більшу кількість похідних вищих порядків треба брати до уваги.

У випадку системи, що проектується, зміна кутів башти та гармати відбувається не дуже повільно, але їх рух і не є швидкісним процесом (як, наприклад, рух автомобіля у щільному потоці на шосе). Така «проміжна» оцінка дозволяє не брати до уваги похідні вищих порядків, але вимагає урахування таких величин, як перші похідні контрольованих кутів, тобто кутових швидкостей руху башти та гармати. Таким чином, для кутів башти та гармати будемо розглядати також швидкості їхньої зміни, що є похідними першого порядку від змінних β_1 та β_2 (але не похідні вищих порядків):

β_3 = «Кутова швидкість башти»;

β_4 = «Кутова швидкість гармати».

Окрім обраних величин, теоретично можна брати до уваги і інші вхідні параметри, але вони не матимуть суттєвого впливу на процес позиціонування башти, основними є обрані змінні β_1 - β_4 .

Таким чином, у якості вхідних змінних для системи управління можна взяти кут башти, кут гармати та їхні перші похідні, що з кінематичної точки зору рівні кутовим швидкостям відповідних рухів.

Здійснюючи подальший попередній аналіз процесу управління позиціонуванням можна сказати, що при кожному конкретному переміщенні башти та гармати кут башти та кут гармати мають наблизитися та стати рівними певним заданим значенням, що відповідають цілі, у яку має влучити танк. Оскільки кожного разу бажані значення кутів будуть новими, то для уніфікації роботи системи управління доцільно ввести у розгляд не самі значення кутів башти та гармати, а поточні різниці, що вони утворюють із бажаними значеннями цих кутів. Таким чином, доцільніше розглядати різниці (коригуємо зміст лінгвістичних змінних β_1 та β_2):

β_1 = «Різниця між поточним значенням кута башти φ та бажаним кутом башти φ_1 », або коротко «Різниця кутів башти»;

β_2 = «Різниця між поточним значенням кута гармати α та бажаним кутом гармати α_1 », або коротко «Різниця кутів гармати».

Наступний крок полягає у виборі вихідних змінних, тобто таких, за допомогою яких можна здійснювати управління виконуючими пристроями, що мають здатність змінювати контрольовані вхідні величини (кути башти та гармати, а також відповідні кутові швидкості). На кут башти впливає силовий привод башти, так само, як і на кутову швидкість башти. Кут гармати та відповідна кутова швидкість визначаються приводом дула гармати. Таким чином, вводимо дві вихідних величини нечіткої системи управління – це подача (під цим словом матимемо на увазі комплекс двох факторів: механічна потужність, що видається приводом, та напрямок руху – позитивний чи негативний) силового приводу башти та подача приводу гармати.

Відмітимо, що сучасні приводи дозволяють швидко та ефективно переключатися між кількома доступними рівнями механічної потужності, що видається назовні, а також змінювати напрямок обертального руху вихідного валу.

Тут слід звернути увагу на величезний плюс самого підходу до управління технологічними об'єктами за допомогою нечітких множин. Така система управління може оперувати абстрактним поняття «Силовий привод» не прив'язуючись не просто до конкретного апаратного рішення, а, навіть, до типу та параметрів цього приводу. Інженер, що проектує систему управління лише виробляє рішення «Привод увімкнений на повну потужність у позитивному напрямку», а потім контролює кут та швидкість

повороту по відповідній осі, і, якщо кут наближається до бажаного значення, дає команду «Привід вимкнено», а якщо кут став трохи більшим за бажаний рівень, виробляється команда «Привод увімкнений на малу потужність у від'ємному напрямку». Якщо використовується потужний привод, то процес описується наведеними правилами, але настання моменту спрацьовування другого та третього правил відбувається раніше. Якщо ж привод менш потужний, то це лише впливає на більш пізні спрацьовування правила 2, а потім правила 3. Але принципово процес управління для обох випадків лишається однаковим і це є значною перевагою процесу нечіткого управління.

Повертаючись до процесу нечіткого виводу, обираємо наступні вихідні змінні:

β_5 = «Подача силового приводу башти»;

β_6 = «Подача силового приводу гармати».

Кінцево, перелік лінгвістичних змінних наведено в табл. 2.1.

Табл. 2.1. Перелік прийнятих в роботі лінгвістичних змінних.

№	Позначення	Тип	Текстова назва	Пояснення
1	β_1	Вхідна	Різниця кутів башти	Різниця між поточним значенням кута башти та бажаним цільовим значенням кута башти
2	β_2	Вхідна	Різниця кутів гармати	Різниця між поточним значенням кута гармати та бажаним цільовим значенням кута гармати
3	β_3	Вхідна	Кутова швидкість башти	Перша похідна кута башти
4	β_4	Вхідна	Кутова швидкість гармати	Перша похідна кута гармати

5	β_5	Вихідна	Подача силового приводу башти	Допускає декілька рівнів потужності та два напрямки: позитивний та від'ємний
6	β_6	Вихідна	Подача силового приводу гармати	Допускає декілька рівнів потужності та два напрямки: позитивний та від'ємний

2.2.2. Обрання термів та їх функцій належності для кожної змінної.

Наступним кроком при розробці систем нечіткого виведення є завдання функцій належності, що слід виконати для усіх термів перелічених шести лінгвістичних змінних. Кількість термів може варіюватися, але для задач без вимог до точності, простих, кількість термів однієї змінної може дорівнювати 3. Для задач середньої точності кількість термів може бути збільшеною до 5, а для задач підвищеної точності це число може бути доведено до 7 (очевидно, верхньої межі для кількості термів не існує, однак із міркувань збереження доступної для усвідомлення людиною складності бази правил це число навряд чи доцільно робити більшим за 9). Усі різноманітні варіанти термів, що можуть застосовуватися для різних лінгвістичних змінних наведено у табл. 2.2.

Табл. 2.2. Загальноприйняті позначення (скорочення) для значень термів лінгвістичних змінних, що використовуються у даному дослідженні.

Символ	Англомова нотація	Значення
NB	Negative Big	Від'ємне велике
NM	Negative Medium	Від'ємне середнє
NS	Negative Small	Від'ємне мале

Z	Zero	Нуль. Число, близьке до нуля
PS	Positive Small	Додатне мале
PM	Positive Medium	Додатне середнє
PB	Positive Big	Додатне велике

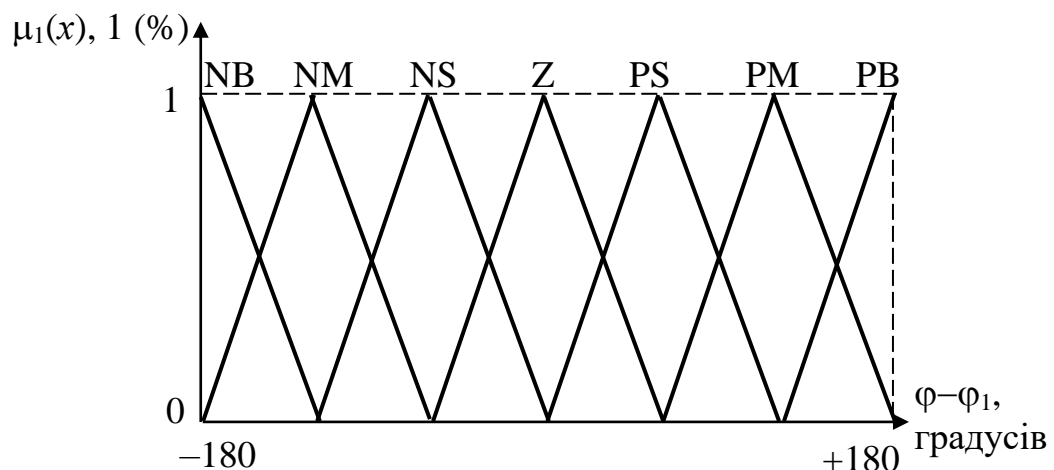
Розглянемо докладно по кожній лінгвістичній змінній, які терми із перелічених можна застосовувати і якими будуть їх функції належності.

а) β_1 = «Різниця кутів башти».

Для цієї лінгвістичної змінної допустимими значеннями термів візьмемо усі 7 значень із тих, що перераховані у табл.2.2 (тобто задачу позиціонування башти вважатимемо задачею із підвищеними вимогами по точності):

$$T_1 = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}.$$

Значна кількість термів (у порівнянні з наступними лінгвістичними змінними, що розглядаються) обумовлена тим, що якісне позиціонування башти є основною умовою для успішного ведення вогню всією системою. Відповідні функції належності обраних термів показано на рис. 2.12, де кожна з них підписана відповідним позначенням. Діапазон кутів відповідно до їх геометричної суті прийнято у межах від -180° до $+180^\circ$. З математичної точки зору, характер функцій належності визначається в першу чергу їх обчислювальною простотою і представляє собою кусочно-



лінійні залежності.

Рис. 2.12. Функції належності для семи термів, що розглядаються для вхідної лінгвістичної змінної «Різниця кутів башти».

б) $\beta_2 =$ «Різниця кутів гармати».

Для цієї лінгвістичної змінної допустимими значеннями термів візьмемо 5 значень із тих, що перераховані у табл. 2.2:

$$T_2 = \{NB, NM, Z, PM, PB\}.$$

Функції належності, що відповідають цим термам також, як і у попередньому випадку, узяті у вигляді кусочно-лінійних залежностей (з метою зменшення обчислювальної складності усієї системи управління) і показані на рис. 2.13, де кожна функція підписана назвою відповідного терму. Діапазон кута гармати відповідно до технічних даних танку прийнято у межах від -5 до 15 градусів, отже різниця кутів гармати може знаходитися у межах від -20° до $+20^\circ$.

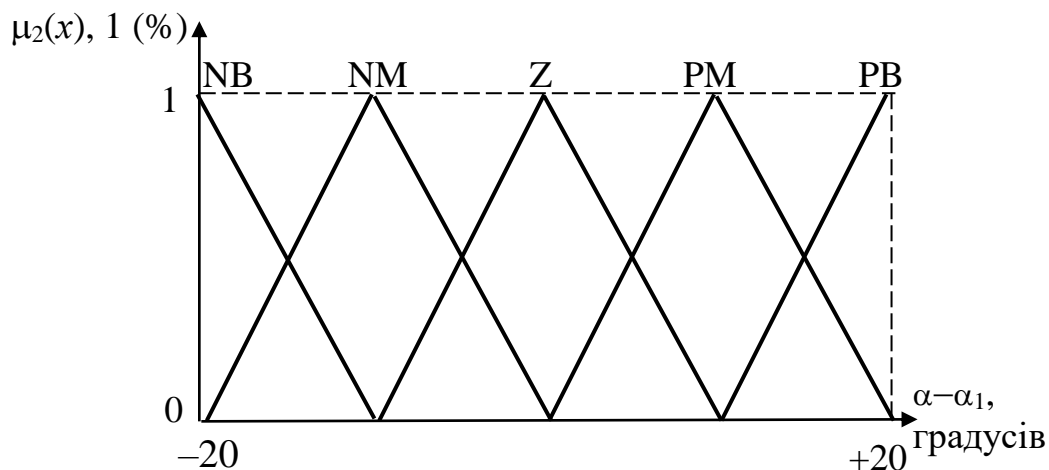


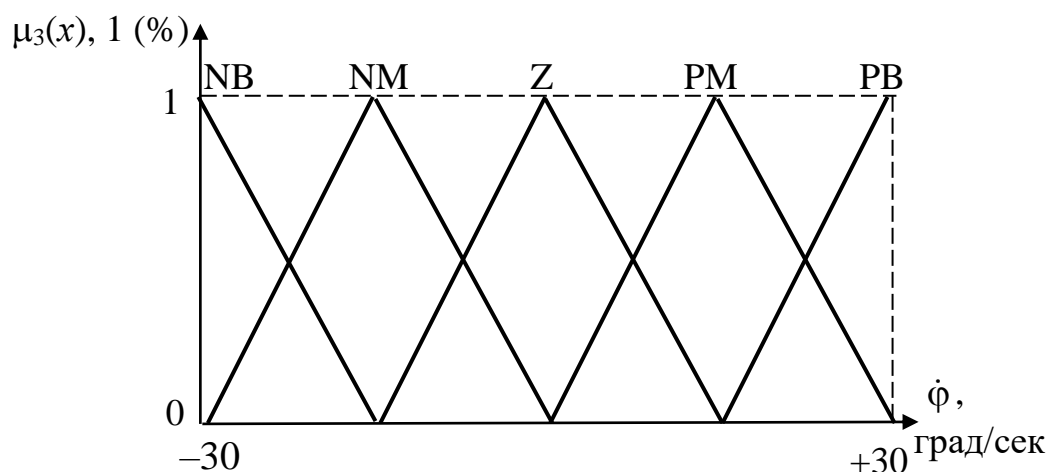
Рис. 2.13. Функції належності для п'яти термів, що розглядаються для вхідної лінгвістичної змінної «Різниця кутів гармати».

в) $\beta_3 =$ «Кутова швидкість башти».

Тут обираємо також 5 значень термів, назви яких виписуємо з табл.2.2:

$$T_3 = \{NB, NM, Z, PM, PB\}.$$

Функції належності, що відповідають цим термам також, як і у попередньому випадку, узяті у вигляді кусочно-лінійних залежностей (з метою зменшення обчислювальної складності усієї системи управління) і показані на рис. 2.14, де кожна функція підписана назвою відповідного



терму. Діапазон кутової швидкості башти зафіксований у межах від $-30^\circ/\text{сек.}$ до $+30^\circ/\text{сек.}$, виходячи із умови, що повний поворот башти на 360° здійснюється протягом 12 с (по даним проекту «Армата»).

Рис. 2.14. Функції належності для п'яти термів, що розглядаються для вхідної лінгвістичної змінної «Кутова швидкість башти».

г) $\beta_4 =$ «Кутова швидкість гармати».

У цьому випадку, зважаючи на невеликий діапазон зміни самого кута гармати, обираємо 3 значення термів, назви яких виписуємо з табл.2.2:

$$T_4 = \{NM, Z, PM\}.$$

Функції належності взято кусочно-лінійними, як і у попередніх випадках, їх наведено на рис. 2.15. Максимальна швидкість позиціонування гармати танку складає величину, трохи більшу 10 градусів за одну секунду, тому приймаємо допустимий для змінної β_4 діапазон у межах від -10 до $+10$ градусів/секунду.

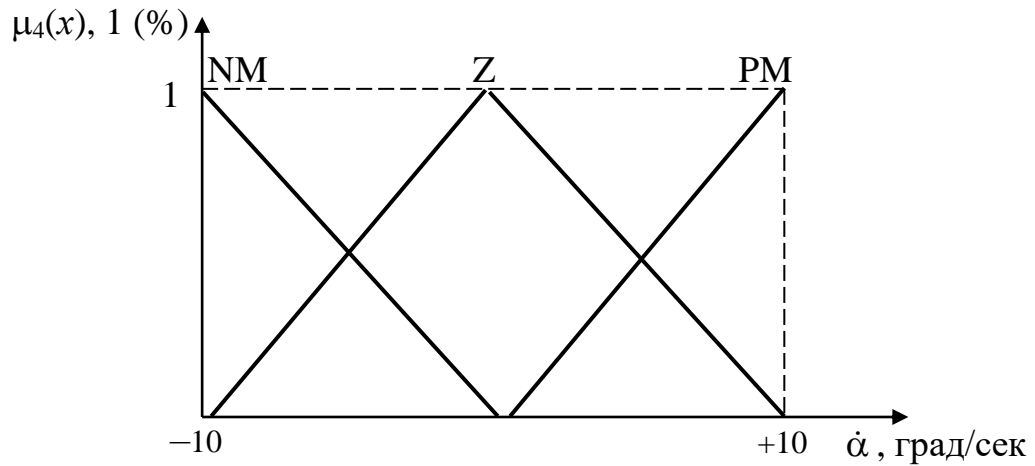


Рис. 2.15. Функції належності для трьох термів, що розглядаються для вхідної лінгвістичної змінної «Кутова швидкість гармати».

д) $\beta_5 =$ «Подача силового приводу башти».

Для цього терму, відповідно до можливостей реальних силових приводів виділяємо три рівні потужності (три – у позитивному напрямку, та три – у негативному, а також стан «вимкнено»), а всього кількість термів тоді буде рівною 7:

$$T_5 = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}.$$

Відповідні функції належності обраних термів показано на рис. 2.16, де кожна з них підписана відповідним позначенням. Характер функцій належності як і у всіх попередніх випадках береться кусочно-лінійним.

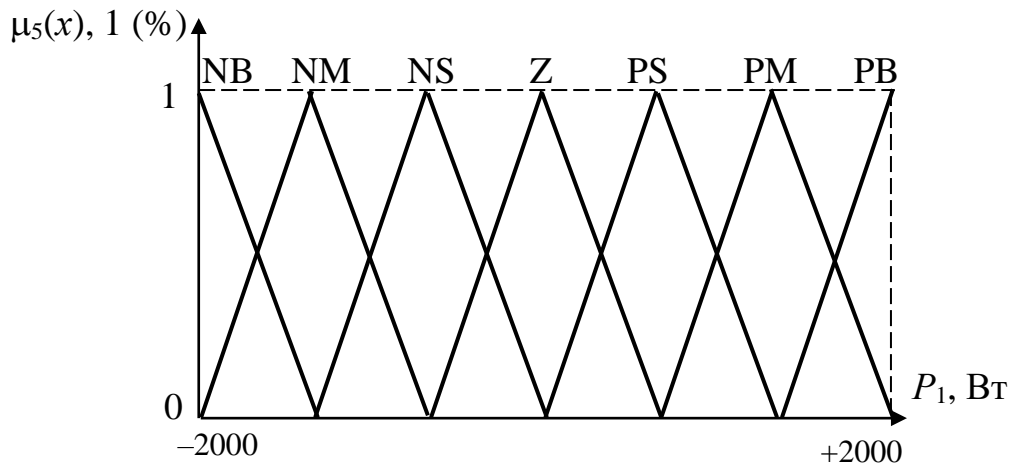


Рис. 2.16. Функції належності для семи термів, що розглядаються для вхідної лінгвістичної змінної «Подача силового приводу башти».

Оскільки на рисунку відображується подача приводу, яка включає в себе поняття напрямку (на відміну від фізичного поняття «потужність»), то руху у від'ємному напрямку умовно поставлені у відповідність від'ємні значення потужності.

е) $\beta_6 =$ «Подача силового приводу гармати».

Для цього терму виділяємо один рівень потужності (а також один у негативному напрямку, і ще стан «вимкнено»), а всього кількість термів тоді буде рівною 3:

$$T_6 = \{NM, Z, PM\}.$$

Відповідні функції належності обраних термів показано на рис. 2.17, де кожна з них підписана відповідним позначенням. Характер функцій належності як і у всіх попередніх випадках береться кусочно-лінійним.

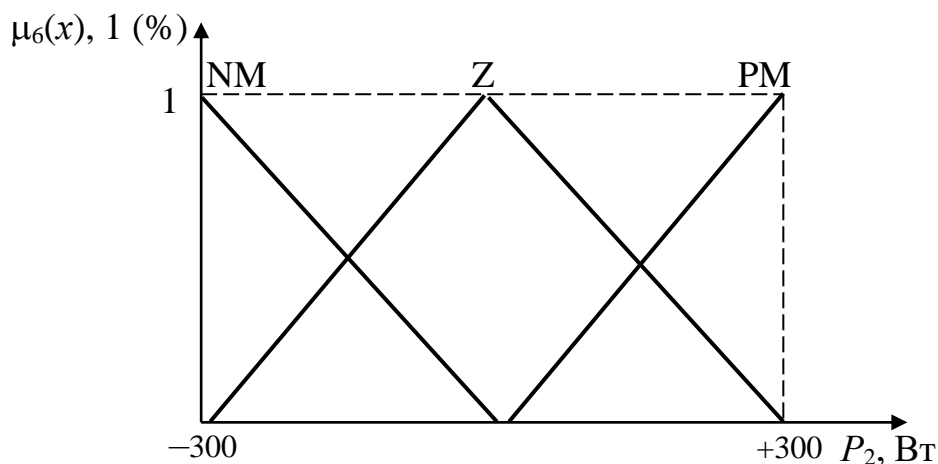


Рис. 2.17. Функції належності для семи термів, що розглядаються для вхідної лінгвістичної змінної «Подача силового приводу гармати».

Після вибору виду та параметрів функцій належності також слід зафіксувати якийсь алгоритм нечіткого виводу. Під цим поняттям мається на увазі конкретний набір варіантів виконання кожного з повторюваних етапів нечіткого виводу (тобто за виключенням формування бази правил нечітких продукцій). Таким чином, для того, щоб задати певний алгоритм нечіткого виводу, необхідно вибрати по одному конкретному способу для наступних етапів нечіткого виводу:

- для фазифікації, тобто введення нечіткості в модель на основі звичайних, чітких даних;
- для агрегування підумов у нечітких правилах продукцій, якщо, звичайно, у базі правил існують правила зі складеними умовами;
- для активізації підвисновків у нечітких правилах продукцій (якщо правило містить лише один висновок, то його вважають підвисновком; якщо висновок є складеним, що на практиці буває рідко, то для кожного підвисновку даного правила слід визначити ступінь істинності);
- для акумуляції висновків нечітких правил продукцій (якщо якась лінгвістична змінна входить до більше ніж одного з усіх підвисновків усіх правил нечітких продукцій);

- для дефазифікації, тобто переходу від нечітких термінів та формулювань до конкретних значень вихідних змінних.

Кожен з перелічених етапів процедури нечіткого виводу може реалізуватися багатьма способами, тому й кількість усіх можливих алгоритмів нечіткого виводу є досить суттєвою. У науковій та технічній літературі часто розглядають наступні алгоритми нечіткого виводу:

- алгоритм Мамдані (Mamdani), який історично є одним із перших, що були застосовані у системах нечіткого виводу;

- алгоритм Цукамото (Tsukamoto);

- алгоритм Ларсена (Larsen);

- алгоритм Сугено (Sugeno);

- спрощений алгоритм нечіткого виводу;

- ін.

Фіксуючи відмінність, тобто оригінальний спосіб проведення хоча б одного із етапів процедури нечіткого виводу, можна отримати оригінальний алгоритм нечіткого виводу. З іншого боку, принципової цінності такі нововведення не несуть, так як на практиці у переважній більшості задач використовується запропонований історично першим алгоритм Мамдані.

Таким чином, обравши вхідні та вихідні змінні, а також задавши функції належності для них, слід переходити до формування бази правил нечітких продукцій.

2.2.3. Розробка бази правил нечітких продукцій.

База правил систем нечіткого виводу є формальним вираженням досвіду, тобто емпіричних знань експертів (людей, що мають великий теоретичний та практичний досвід роботи у даній предметній галузі).

Слід відмітити, що об'єкт, для якого проектується система управління (башта танку) має характеристики, що змінюються в часі із середньою швидкістю (кут повороту башти та кут нахилу гармати), а саме,

у самому найшвидшому випадку – на десятки градусів за секунду. В свою чергу, система управління, буде реалізована на сучасній цифровій апаратній базі (наприклад, мікроконтролері) і може спрацьовувати (виконувати усі п'ять повторюваних етапів процедури нечіткого виводу) та видавати сигнали управління десятки і сотні разів за секунду. Зважаючи на ці фактори, що протидіють один одному, очевидною є необхідність урахування таких показників, як швидкості зміни контрольованих параметрів (обох вказаних кутів), і які є їх першими похідними, але не слід брати до уваги похідні вищих порядків (другого – прискорення, та й більш високих). Отже, система управління повинна бути диференціальною і враховувати тільки перші похідні кутових координат, що підлягають контролю.

Для зручності аналізу сформованих правил нагадаємо сенс введених у системі лінгвістичних змінних та їх прийняті терм-множини:

β_1 = «Різниця кутів башти», вхідна змінна, $T_1 = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$;

β_2 = «Різниця кутів гармати», вхідна змінна, $T_2 = \{NB, NM, Z, PM, PB\}$;

β_3 = «Кутова швидкість башти», вихідна змінна, $T_3 = \{NB, NM, Z, PM, PB\}$;

β_4 = «Кутова швидкість гармати», $T_4 = \{NM, Z, PM\}$;

β_5 = «Подача силового приводу башти», $T_5 = \{NB, NM, NS, Z, PS, PM, PB\}$;

β_6 = «Подача силового приводу гармати», $T_6 = \{NM, Z, PM\}$.

Сукупність усіх правил нечіткого виводу можна розбити на дві групи:

- правила, що впливають на роботу башти;
- правила, що впливають на роботу гармати.

Конкретні правила нечіткого виводу про роботу башти можуть бути сформульовані наступним чином:

ПРАВИЛО 1: ЯКЩО $\beta_1 \in PB$ ТО $\beta_5 \in NB$
ПРАВИЛО 2: ЯКЩО $\beta_1 \in PM$ ТА $\beta_3 \in NB$ ТО $\beta_5 \in Z$
ПРАВИЛО 3: ЯКЩО $\beta_1 \in PM$ ТА $\beta_3 \in NM$ ТО $\beta_5 \in NS$
ПРАВИЛО 4: ЯКЩО $\beta_1 \in PM$ ТА $\beta_3 \in Z$ ТО $\beta_5 \in NM$
ПРАВИЛО 5: ЯКЩО $\beta_1 \in PM$ ТА $\beta_3 \in PM$ ТО $\beta_5 \in NB$
ПРАВИЛО 6: ЯКЩО $\beta_1 \in PM$ ТА $\beta_3 \in PB$ ТО $\beta_5 \in NB$
ПРАВИЛО 7: ЯКЩО $\beta_1 \in PS$ ТА $\beta_3 \in NB$ ТО $\beta_5 \in PS$
ПРАВИЛО 8: ЯКЩО $\beta_1 \in PS$ ТА $\beta_3 \in NM$ ТО $\beta_5 \in Z$
ПРАВИЛО 9: ЯКЩО $\beta_1 \in PS$ ТА $\beta_3 \in Z$ ТО $\beta_5 \in NS$
ПРАВИЛО 10: ЯКЩО $\beta_1 \in PS$ ТА $\beta_3 \in PM$ ТО $\beta_5 \in NM$
ПРАВИЛО 11: ЯКЩО $\beta_1 \in PS$ ТА $\beta_3 \in PB$ ТО $\beta_5 \in NB$
ПРАВИЛО 12: ЯКЩО $\beta_1 \in Z$ ТА $\beta_3 \in NB$ ТО $\beta_5 \in PM$
ПРАВИЛО 13: ЯКЩО $\beta_1 \in Z$ ТА $\beta_3 \in NM$ ТО $\beta_5 \in PS$
ПРАВИЛО 14: ЯКЩО $\beta_1 \in Z$ ТА $\beta_3 \in Z$ ТО $\beta_5 \in Z$
ПРАВИЛО 15: ЯКЩО $\beta_1 \in Z$ ТА $\beta_3 \in PM$ ТО $\beta_5 \in NS$
ПРАВИЛО 16: ЯКЩО $\beta_1 \in Z$ ТА $\beta_3 \in PB$ ТО $\beta_5 \in NM$
ПРАВИЛО 17: ЯКЩО $\beta_1 \in NS$ ТА $\beta_3 \in NB$ ТО $\beta_5 \in PB$
ПРАВИЛО 18: ЯКЩО $\beta_1 \in NS$ ТА $\beta_3 \in NM$ ТО $\beta_5 \in PM$
ПРАВИЛО 19: ЯКЩО $\beta_1 \in NS$ ТА $\beta_3 \in Z$ ТО $\beta_5 \in PS$
ПРАВИЛО 20: ЯКЩО $\beta_1 \in NS$ ТА $\beta_3 \in PM$ ТО $\beta_5 \in Z$
ПРАВИЛО 21: ЯКЩО $\beta_1 \in NS$ ТА $\beta_3 \in PB$ ТО $\beta_5 \in NS$
ПРАВИЛО 22: ЯКЩО $\beta_1 \in NM$ ТА $\beta_3 \in NB$ ТО $\beta_5 \in PB$
ПРАВИЛО 23: ЯКЩО $\beta_1 \in NM$ ТА $\beta_3 \in NM$ ТО $\beta_5 \in PB$
ПРАВИЛО 24: ЯКЩО $\beta_1 \in NM$ ТА $\beta_3 \in Z$ ТО $\beta_5 \in PM$
ПРАВИЛО 25: ЯКЩО $\beta_1 \in NM$ ТА $\beta_3 \in PM$ ТО $\beta_5 \in PS$
ПРАВИЛО 26: ЯКЩО $\beta_1 \in NM$ ТА $\beta_3 \in PB$ ТО $\beta_5 \in Z$
ПРАВИЛО 27: ЯКЩО $\beta_1 \in NB$ ТО $\beta_5 \in PB$.

Кожне правило, за необхідності, може бути переведене у просту текстову форму шляхом підстановки імен відповідних лінгвістичних змінних, задіяних у даному правилі. Наприклад, ПРАВИЛО 2 має вид:

ЯКЩО «Різниця кутів башти» є «Позитивна середня» ТА «Кутова швидкість башти» є «Негативна велика» ТО «Подача силового приводу башти» є «Нульова». Суть цього правила, що при таких умовах башта має рухатися деякий час по інерції (поки не зміняться значення «Різниці кутів башти» або «Кутової швидкості башти»). Аналогічно продумані усі інші правила нечітких продукцій.

Друга група правил в цілому є незалежною від першої і забезпечує керування роботою гармати. Правила можуть бути сформовані в наступному вигляді:

ПРАВИЛО 28: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{PB}$ ТО $\beta_6 \in \text{NM}$

ПРАВИЛО 29: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{PM}$ ТА $\beta_4 \in \text{NM}$ ТО $\beta_6 \in \text{Z}$

ПРАВИЛО 30: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{PM}$ ТА $\beta_4 \in \text{Z}$ ТО $\beta_6 \in \text{NM}$

ПРАВИЛО 31: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{PM}$ ТА $\beta_4 \in \text{PM}$ ТО $\beta_6 \in \text{NM}$

ПРАВИЛО 32: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{Z}$ ТА $\beta_4 \in \text{NM}$ ТО $\beta_6 \in \text{PM}$

ПРАВИЛО 33: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{Z}$ ТА $\beta_4 \in \text{Z}$ ТО $\beta_6 \in \text{Z}$

ПРАВИЛО 34: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{Z}$ ТА $\beta_4 \in \text{PM}$ ТО $\beta_6 \in \text{NM}$

ПРАВИЛО 35: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{NM}$ ТА $\beta_4 \in \text{NM}$ ТО $\beta_6 \in \text{PM}$

ПРАВИЛО 36: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{NM}$ ТА $\beta_4 \in \text{Z}$ ТО $\beta_6 \in \text{PM}$

ПРАВИЛО 37: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{NM}$ ТА $\beta_4 \in \text{PM}$ ТО $\beta_6 \in \text{Z}$

ПРАВИЛО 38: ЯКЩО $\beta_2 \in \text{NB}$ ТО $\beta_6 \in \text{PM}$.

Оскільки у кожній групі на вироблення результату впливає рівно дві вхідних змінних, то правила кожної групи можна зручно подати двовимірною (тобто звичайною) таблицею. Так, змінна β_5 задається табл. 2.3., змінна β_6 – табл. 2.4.

Табл.2.3. Значення вихідної змінної β_5 залежно від значень вхідних змінних β_1 та β_3 .

$\beta_3 \downarrow$ $\beta_1 \rightarrow$	NB	NM	NS	Z	PS	PM	PB
NB	PB	PB	PB	PM	PS	Z	NB
NM	PB	PB	PM	PS	Z	NS	NB
Z	PB	PM	PS	Z	NS	NM	NB
PM	PB	PS	Z	NS	NM	NB	NB
PB	PB	Z	NS	NM	NB	NB	NB

Табл.2.4. Значення вихідної змінної β_6 залежно від значень вхідних змінних β_2 та β_4 .

$\beta_4 \downarrow$ $\beta_2 \rightarrow$	NB	NM	Z	PM	PB
NM	PM	PM	PM	Z	NM
Z	PM	PM	Z	NM	NM
PM	PM	Z	NM	NM	NM

Слід відмітити, що обидві таблиці є симетричними відносно центральної точки таблиці (Z, Z), і це обумовлене тим, що і перший (башти) і другий (гармати) обертальний рух є симетричним, тому і правила для поворотів вліво-вправо (або вгору-вниз – для гармати) повністю повторюють одне одного лише з заміною усіх термів на дзеркально протилежні.

Базу правил можна вважати сформованою і переходити до наступного етапу реалізації всієї моделі в обраному програмному середовищі.

2.3. Реалізація розробленої системи управління

2.3.1. Реалізація у системі Fuzzy Logic Toolbox.

Нечіткі системи, в т.ч. управління можуть реалізовуватися у не дуже великій кількості програм, серед універсальних з яких можна назвати середовище Matlab, що містить пакет розширення для роботи з нечіткими множинами, який називається Fuzzy Logic Toolbox. Він викликається після надання консольної команди `fuzzy` у головному вікні Matlab – рис. 2.18.

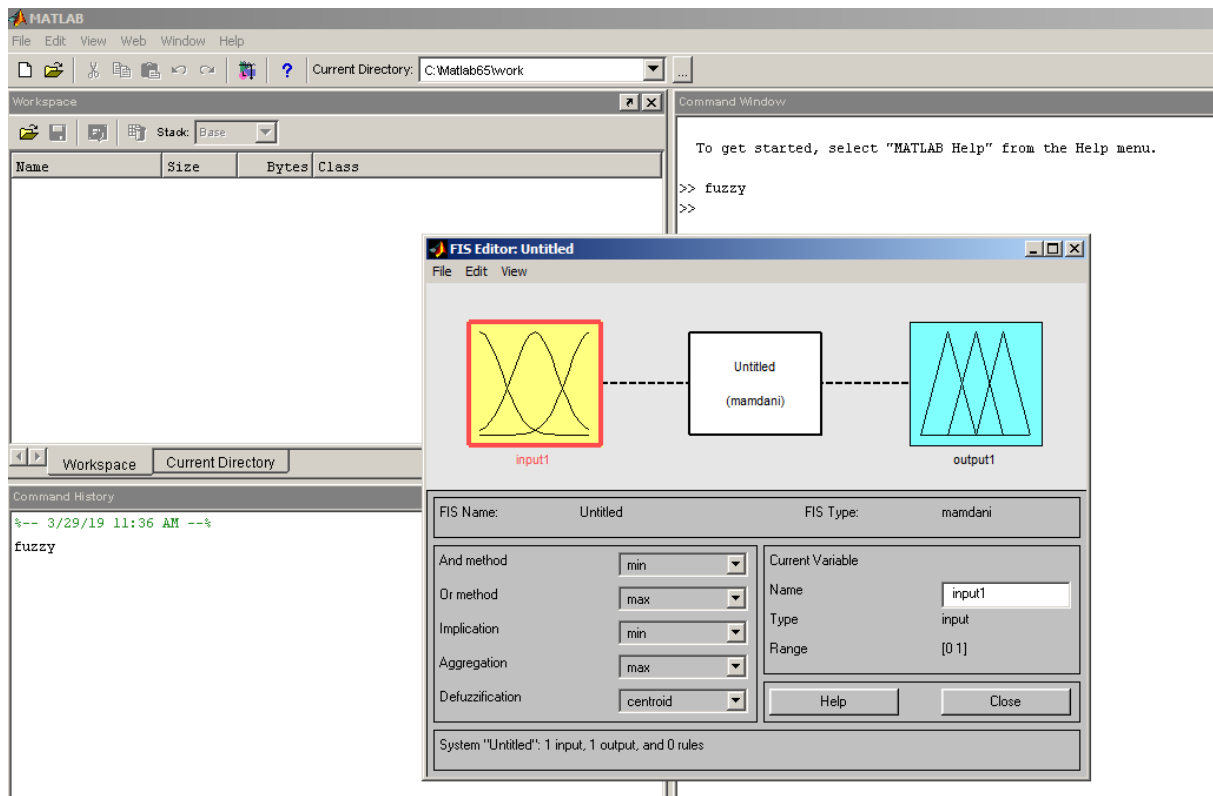


Рис. 2.18. Загальний вигляд вікна пакету Fuzzy Logic Toolbox.

У новому вікні FIS Editor, що відкривається, виконуємо побудову спроектованої системи управління: вводимо чотири вхідних змінних та дві вихідних. Для кожної задаємо функції належності відповідно до раніше прийнятих позначень рис. 2.12 – 2.17.

Так, створення змінної β_1 = «Різниця кутів башти» приведено на рис. 2.19, створення змінної β_2 = «Різниця кутів гармати» - на рис. 2.20, змінна β_3 = «Кутова швидкість башти» - на рис. 2.21, змінна β_4 = «Кутова швидкість гармати» - на рис. 2.22, змінна β_5 = «Подача силового приводу

башти» - рис. 2.23, змінна β_6 = «Подача силового привоу гармати» - рис. 2.24.

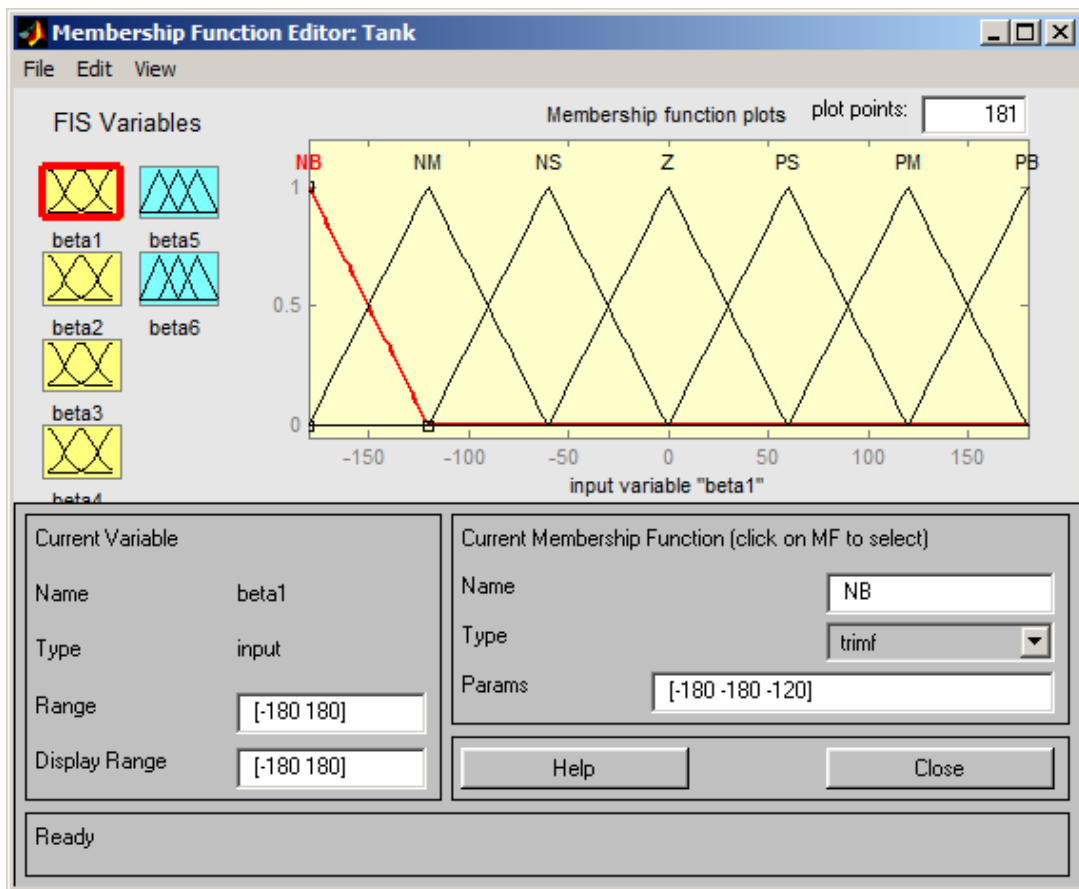


Рис. 2.19. Нечітка вхідна змінна β_1 = «Різниця кутів башти».

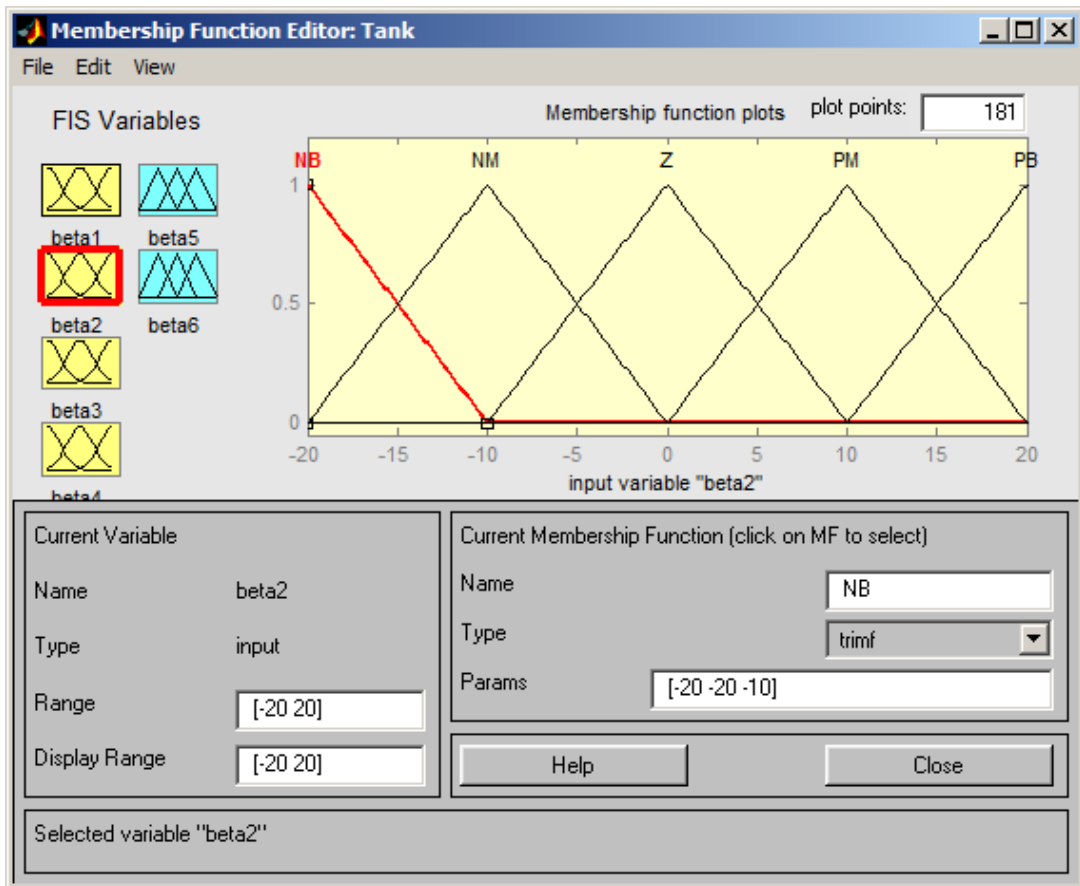


Рис. 2.20. Нечітка вхідна змінна β_2 = «Різниця кутів гармати».

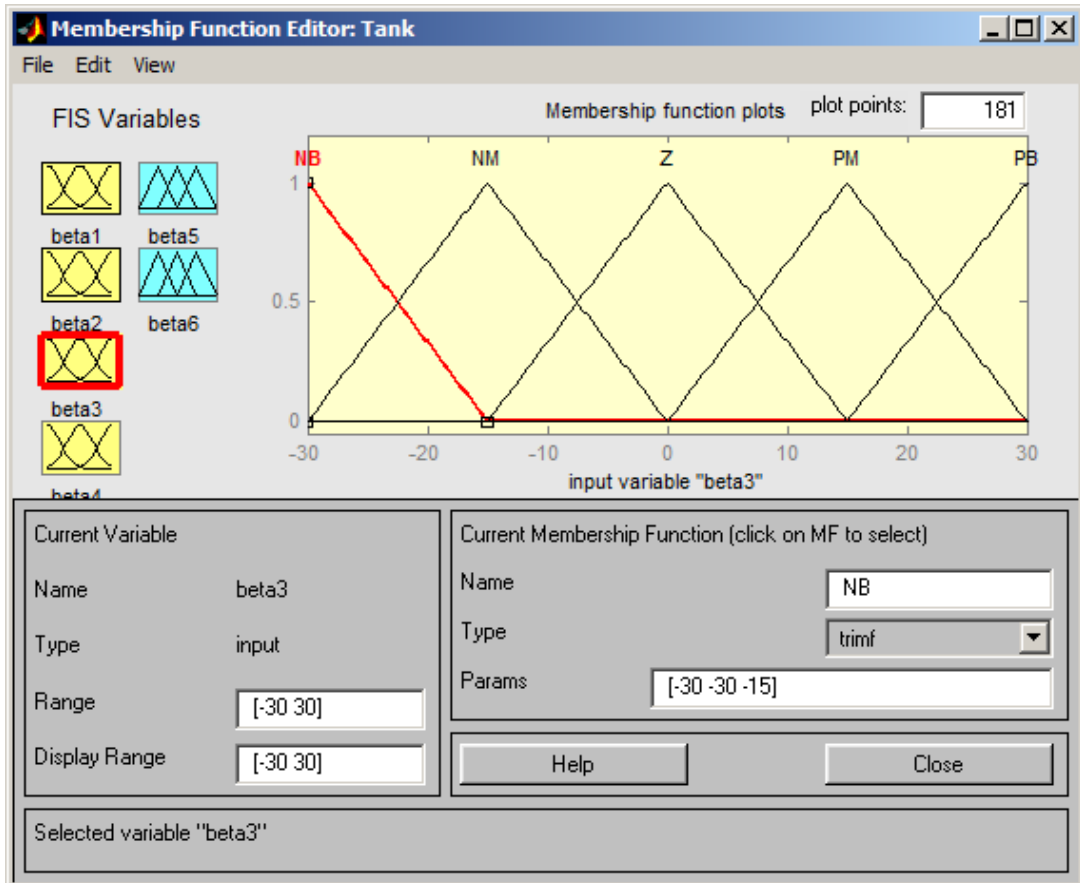


Рис. 2.21. Нечітка вихідна змінна β_3 = «Кутова швидкість башти».

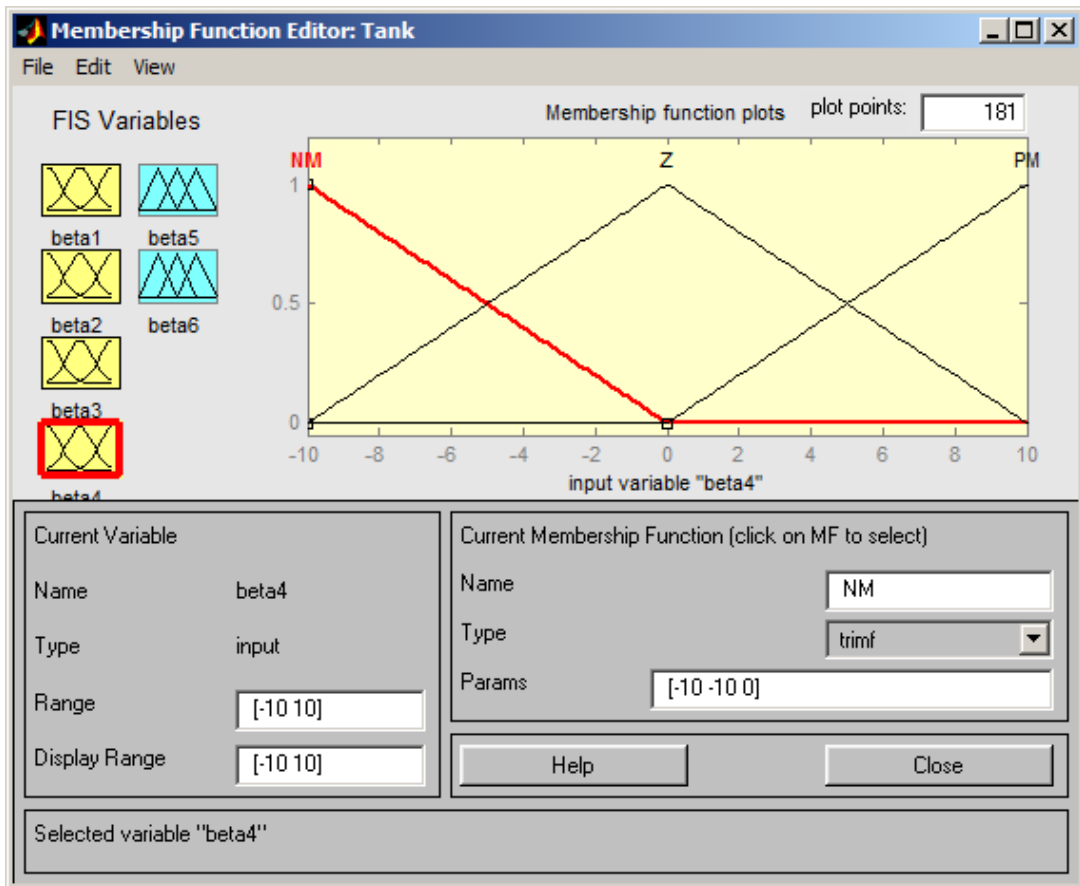


Рис. 2.22. Нечітка вихідна змінна β_4 = «Кутова швидкість гармати».

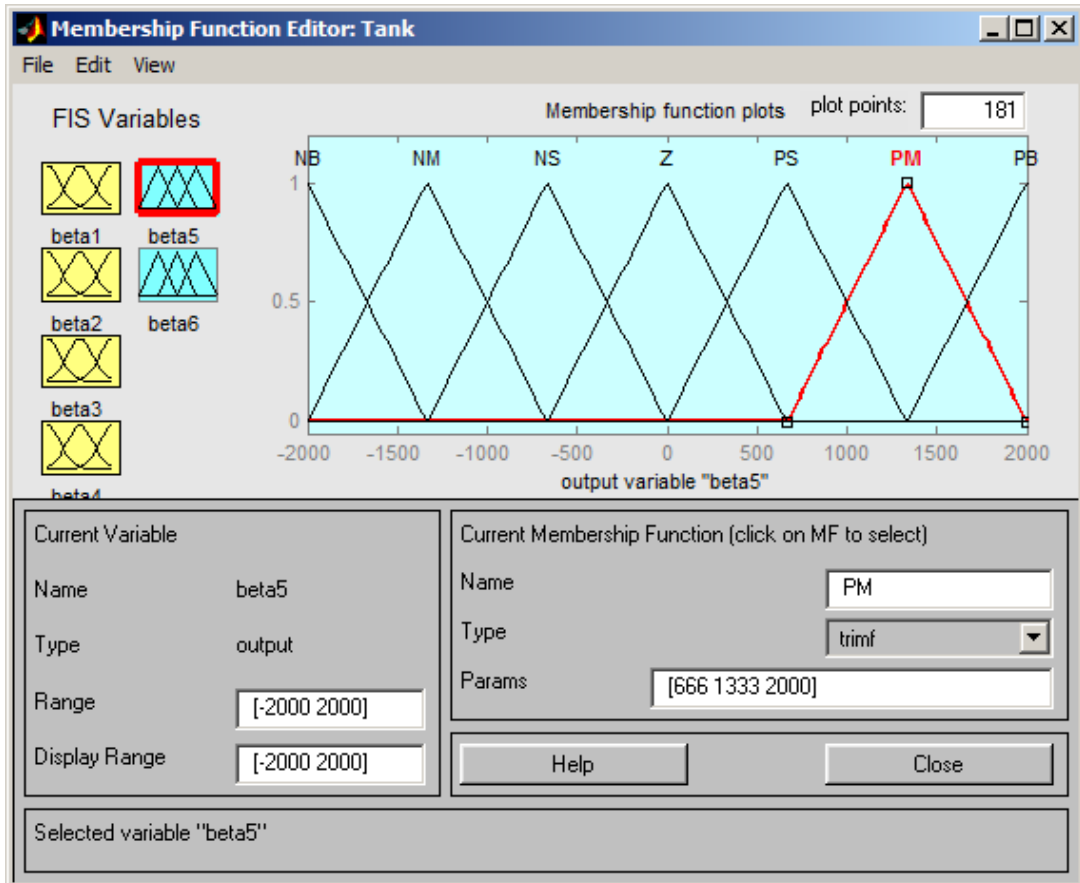


Рис. 2.23. Нечітка вихідна змінна β_5 = «Подача силового приводу башти».

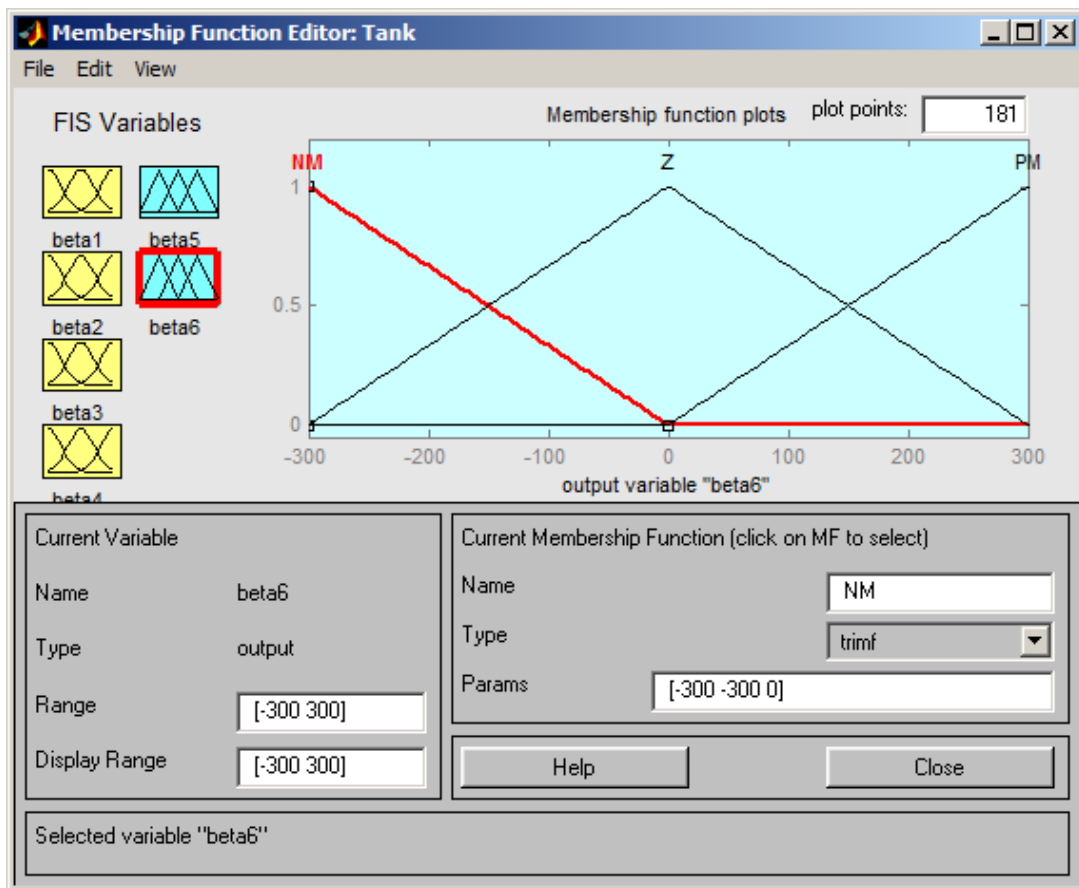


Рис. 2.24. Нечітка вихідна змінна β_6 = «Подача силового приводу гармати».

Після створення усіх вхідних та вихідних змінних та завдання їхніх функцій належності, слід ввести в систему розроблені раніше Правила нечітких продукцій, що виконується у вікні відповідного редактора Rule Editor – рис. 2.25. На цьому створення нечіткої моделі у системі Matlab можна вважати завершеним.

Після реалізації усієї нечіткої моделі можна проводити її дослідження та використання. Пакет Fuzzy Logic Toolbox дозволяє, наприклад, побудувати тривимірні поверхні нечіткого логічного виводу розробленої нечіткої системи управління: для вихідної змінної β_5 = «Подача силового приводу башти» - на рис. 2.26, для вихідної змінної β_6 = «Подача силового приводу гармати» - на рис. 2.27.

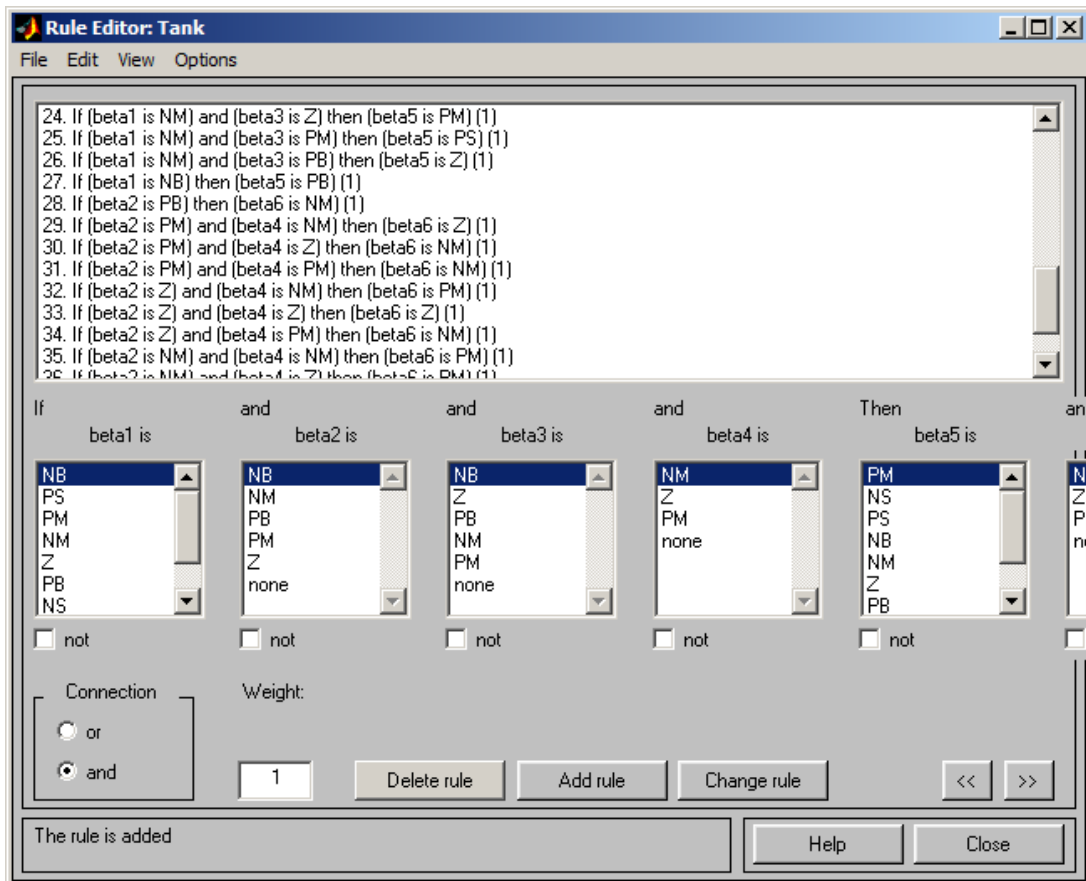


Рис. 2.25. Введення в систему правил нечітких продукцій за допомогою відповідного редактора.

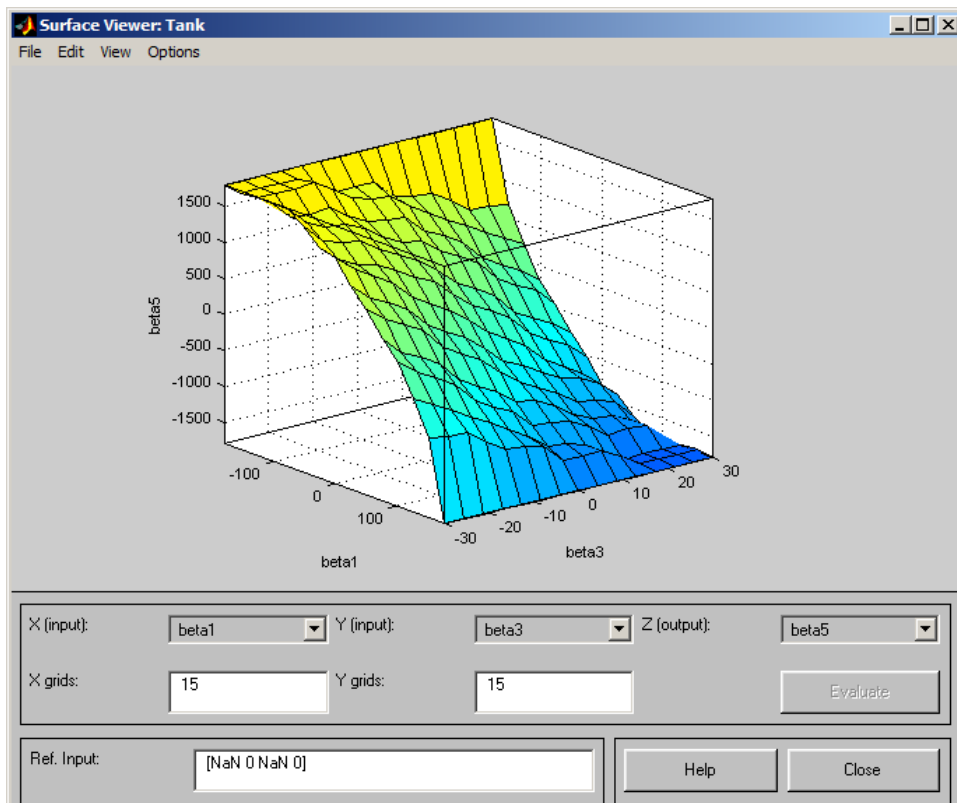


Рис. 2.26. Поверхня нечіткого логічного виводу для змінної β_5 = «Подача силового приводу башти».

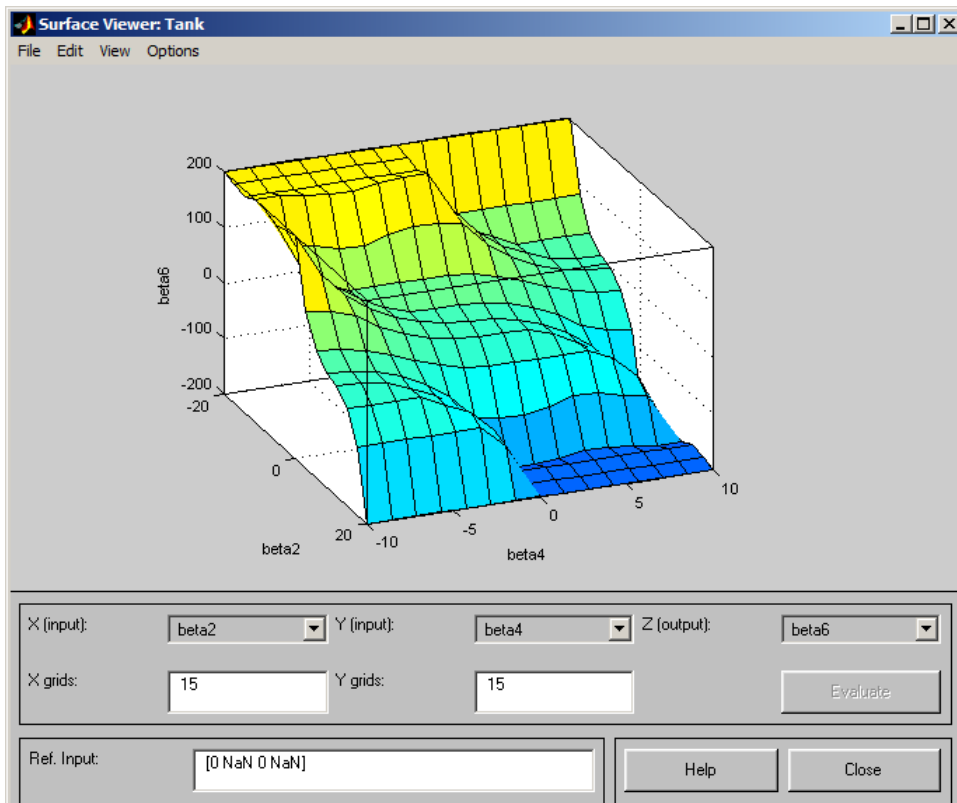


Рис. 2.27. Поверхня нечіткого логічного виводу для змінної β_6 = «Подача силового приводу гармати».

2.3.2. Апаратна база, що може бути основою для функціонування розробленої системи управління.

Створена модель може бути реалізована на будь-якому сучасному нечіткому контролері по схемі рис. 2.28.

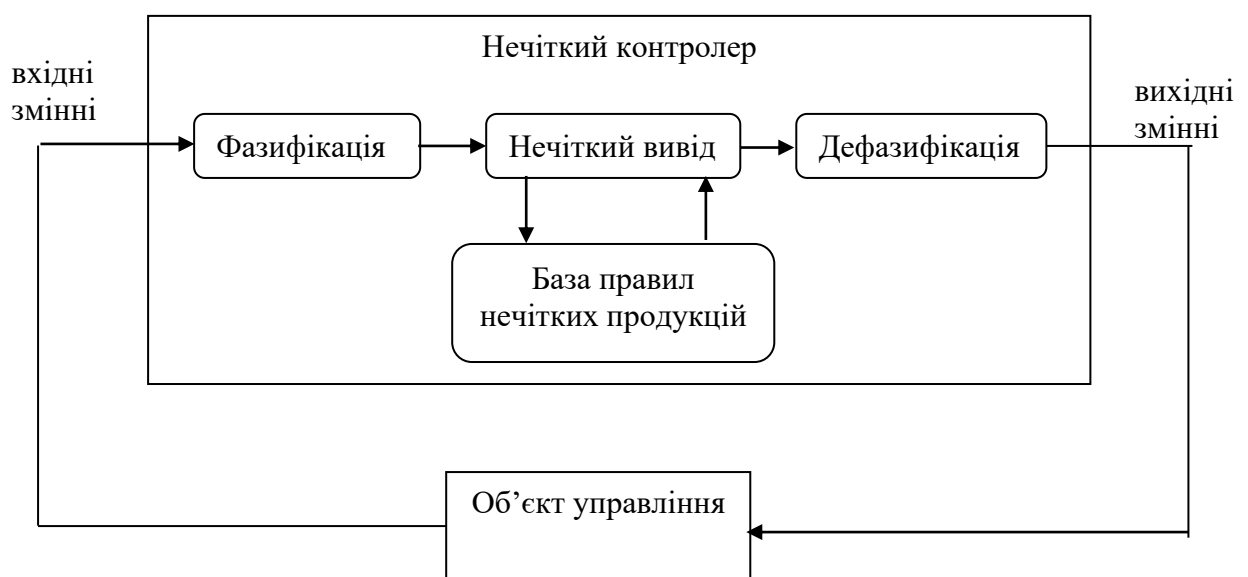


Рис. 2.28. Реалізація системи нечіткого управління на нечіткому мікроконтролері.

У якості апаратної бази можуть бути використані будь-які програмовані логічні інтегральні схеми (наприклад, Altera ACEX1K, як пропонується в [30], або Stratix EP1S10F484C5 як в [31]). Також у якості вирішуючого пристрою, що зберігає базу правил нечітких продукцій може бути використаний практично будь-який мікроконтролер (наприклад, AVR, як пропонується в [32]).

Структурна схема відповідного апаратно-програмного рішення матиме вигляд рис.2.29.



Рис. 2.29. Структурна схема апаратно-програмного рішення по реалізації нечіткої системи управління баштою танку.

На базі даної структурної схеми розроблена нечітка система управління може бути доведена до кінцевого рішення «у залізі».

2.4. Висновки по розділу

Таким чином, у розділі розроблено нечітку систему управління баштою танку, що має одну рухому гармату – рис. 2.30.

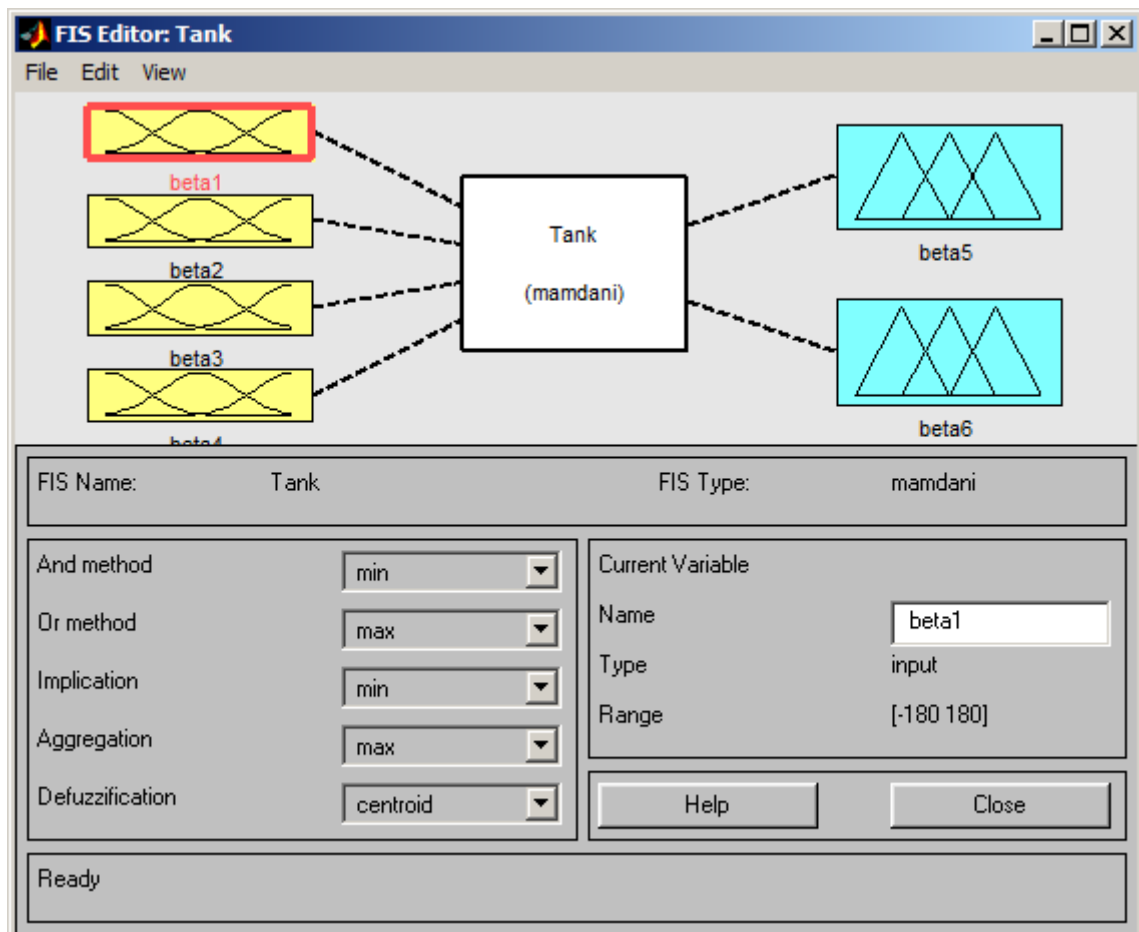


Рис. 2.30. Розроблена нечітка система управління баштою танку.

У якості вхідних змінних обрано неузгодженості поточних кутів повороту башти і гармати з бажаними значеннями цих кутів, а також кутові швидкості башти та гармати. Вихідними змінними обрано подачу силового приводу башти та подачу приводу гармати. Система реалізована на базі алгоритму Мамдані, тобто для неї розроблено систему із 38 правил нечітких продукцій, задано функції належності усіх термів нечітких змінних, і т. д. – тобто виконано повний цикл розробки нечіткої системи управління. Кінцева реалізація системи управління виконана у середовищі Matlab, пакет Fuzzy Logic Toolbox.

Розроблена система може бути застосована у реальних військових системах, звичайно, за умови використання належних датчиків та виконуючих пристроїв.

ВИСНОВКИ

У даній роботі розглянуто важливе питання створення автоматизованих систем управління для прикладних галузей, а саме для військової промисловості розроблено систему управління баштою танку. У якості конкретного підходу до побудови систем управління обрано використання теорії нечітких множин та нечіткої логіки, на ній заснованій (fuzzy logic). Цей підхід є одним із найсучасніших та дозволяє зводити системи управління для об'єктів керування будь-яких типів та складності: від найпростіших з однією-двома вхідними та вихідними змінними до самих складних, що тільки можуть зустрічатися у задачах управління. Особливістю всього підходу є виконання самого процесу управління на основі досвіду експертів у даній галузі, який записується у вигляді бази правил нечітких продукцій, з використанням спеціального виду лінгвістичних змінних, та функцій приналежності окремих термів цих лінгвістичних змінних. Таким чином, підхід на основі fuzzy logic дозволяє наблизити методи вироблення рішень комп'ютером (які традиційно є точними, детермінованими) до способу мислення людини (яка часто спирається на наближені оцінки, і, навіть, інтуїцію).

Відносно зведеної системи управління можна сказати, що зважаючи на середню динаміку об'єкта керування (рух в системі присутній, але не надзвичайно швидкий), до розгляду узяті лише перші похідні обох контрольованих кутів, тобто кутові швидкості руху башти та гармати. Прискорення та похідні ще вищих порядків не розглядаються.

Система управління реалізована у середовищі Matlab, пакет Fuzzy Logic Toolbox, де реалізована база правил нечітких продукцій (яка складається із 38 правил, умовно поділених на дві великих групи), задано функції належності усіх змінних, що розглядаються (6 змінних із загальною кількістю термів більше 30), побудовано поверхні нечітких виводів для вихідних змінних.

В цілому, можна сказати, що створена система управління є сучасною, продуктивною, гнучкою та, за умови її реалізації у кінцевому рішенні, може бути достатньо ефективною для управління параметрами башти танку.

ПЕРЕЛІК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Патент України на винахід №51805. Система керування вогнем танка / Бондаренко О.Г. (UA), Фролов Л.А. О.О. (UA). Заявлено 10.03.2000; Опубл. 16.12.2002, Бюл. 12.
2. Патент України на винахід №51830. Система керування вогнем танка / Мошнін В.М. (UA), Бондаренко О.Г. (UA), Єрдаков Є.В. (UA), Хандога А.М. (UA). Заявлено 10.03.2000; Опубл. 16.12.2002, Бюл. 12.
3. Патент України на винахід №45502. Система керування вогнем танка / Походняков В.Г. (UA), Бусяк Ю.М. (UA), Бондаренко О.Г. (UA), Фролов Л.А. (UA), Руденко М.П. (UA). Заявлено 14.08.2000; Опубл. 15.04.2002, Бюл. 4.
4. Патент України на винахід № 32632. Система керування вогнем танка / Фролов Л.А. (UA), Руденко М.П. (UA), Бусяк Ю.М. (UA) – Заявлено 14.09.1999; Опубл. 15.02.2001, Бюл. 1.
5. Zadeh L. A. Fuzzy sets // Information and Control. 1965. Vol. 8, No. 3. P. 338–353. URL: https://liphu-annuaire.univ-grenoble-alpes.fr/pages_personnelles/bahram_houchmandzadeh/biblio/Zadeh_FuzzySetTheory_1965.pdf (дата звернення: 15.06.2025).
6. Mamdani E. H., Assilian S. An experiment in linguistic synthesis with a fuzzy logic controller // International Journal of Man-Machine Studies. 1975. Vol. 7. P. 1–13. URL: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0020737375800022> (дата звернення: 15.06.2025).
7. Passino K. M., Yurkovich S. Fuzzy Control. Menlo Park, CA: Addison-Wesley Longman, 1998. 513 p. URL: https://a-lab.ee/edu/system/files/eduard.petlenkov/courses/ISS0023/2014_Autumn/materials/FCbook. (дата звернення: 15.06.2025).
8. Tanaka K., Wang H. O. Fuzzy Control Systems Design and Analysis: A Linear Matrix Inequality Approach. New York: John Wiley & Sons, 2001. 320

- p. URL:
<https://theswissbay.ch/pdf/Gentoomen%20Library/Artificial%20Intelligence/Fuzzy%20systems/Fuzzy%20Control%20Systems%20Design%20and%20Analysis%20A%20Linear%20Matrix%20Inequality%20Approach%20-%20Kazuo%20Tanaka%2C%20Hua%20O.%20Wang.pdf> (дата звернення: 15.06.2025).
9. Chen G., Pham T. T. Introduction to Fuzzy Sets, Fuzzy Logic, and Fuzzy Control Systems. Boca Raton: CRC Press, 2001. 340 p. URL: <https://engineering.futureuniversity.com/BOOKS%20FOR%20IT/CHEN-PHAM-Introduction-to-Fuzzy-sets-Fuzzy-logic-and-Fuzzy-control-systems-Page-160.pdf> (дата звернення: 15.06.2025)
10. Lilly J. H. Fuzzy Control and Identification. Hoboken: John Wiley & Sons, 2010. 315 p. URL: https://courses.minia.edu.eg/Attach/10000John_H_Lilly_Fuzzy_Control_and_IdentificationBookZZ.org.pdf (дата звернення: 15.06.2025).
11. Castillo O., Melin P., et al. A Survey on Type-3 Fuzzy Logic Systems and Their Control Applications // IEEE/CAA Journal of Automatica Sinica. 2024. URL: <https://www.ieee-jas.net/article/doi/10.1109/JAS.2024.124530> (дата звернення: 15.06.2025).
12. A Survey on Fuzzy Control for Mechatronics Applications // ResearchGate preprint entry. 2023. URL: https://www.researchgate.net/publication/376377595_A_Survey_on_Fuzzy_Control_for_Mechatronics_Applications (дата звернення: 15.06.2025).
13. A survey of fuzzy control for stabilized platforms // ResearchGate preprint entry. 2025. URL: https://www.researchgate.net/publication/285464065_A_survey_of_fuzzy_control_for_stabilized_platforms (дата звернення: 15.06.2025).
14. Івахів О., Наконечний М. Нечітке моделювання та управління: навчальний посібник. Львів: Растр-7, 2017. 129 с. URL: <https://dte.kpi.ua/wp->

<content/uploads/2022/12/%D0%9D%D0%B5%D1%87%D1%96%D1%82%D0%BA%D0%B5-%D0%BC%D0%BE%D0%B4%D0%B5%D0%BB%D1%8E%D0%B2%D0%B0%D0%BD%D0%BD%D1%8F-%D1%82%D0%B0-%D1%83%D0%BF%D1%80%D0%B0%D0%B2%D0%BB%D1%96%D0%BD%D0%BD%D1%8F.pdf> (дата звернення: 15.06.2025).

15. Кондратенко Ю. П., Кондратенко Г. В., Сиденко Є. В. Нечіткі множини та нечітка логіка: методичні рекомендації. Миколаїв: ЧНУ ім. Петра Могили, 2019. 36 с. URL: <https://dspace.chmnu.edu.ua/jspui/bitstream/123456789/308/1/%D0%9A%D0%BE%D0%BD%D0%B4%D1%80%D0%B0%D1%82%D0%B5%D0%BD%D0%BA%D0%BE%20%D0%AE.%20%D0%9F.%20%D0%9D%D0%B5%D1%87%D1%96%D1%82%D0%BA%D1%96%20%D0%BC%D0%BD%D0%BE%D0%B6%D0%B8%D0%BD%D0%B8.%20%D0%92%D0%B8%D0%BF.%20267.pdf> (дата звернення: 15.06.2025).

16. Желдак Т. А. Нечітка математика та прийняття рішень в умовах невизначеності: навчальний посібник. Дніпро: НМУ, 2020. URL: <https://ir.nmu.org.ua/bitstreams/2cb9c4cf-ec44-4033-b533-b441fe91d5d9/download> (дата звернення: 15.06.2025).

17. Посібник ІАД (розд. ANFIS і нечіткі моделі Такагі-Сугено): навчальний матеріал. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, б. р. URL: <https://ela.kpi.ua/bitstreams/1186476b-42d2-4585-bb3f-02a69b8f26e9/download> (дата звернення: 15.06.2025).

18. Shang K. et al. Applying Fuzzy Logic to Risk Assessment and Decision-Making. Schaumburg: Society of Actuaries, 2013. 59 p. URL: <https://www.soa.org/globalassets/assets/files/research/projects/research-2013-fuzzy-logic.pdf> (дата звернення: 15.06.2025).

19. Інформаційно-орієнтована програма та матеріали конференції з нечітких моделей Такагі–Сугено: Матеріали конференції ICT-2024. Харків: ХНУРЕ, 2024. Ч. 1. URL: https://ist-conf-nure.com.ua/IST-2024_part-1.pdf

(дата звернення: 15.06.2025).

20. Баклан І. В. Експертні системи: навчальний посібник. Київ: НАУ, 2012. Розділи щодо нечіткого виведення. URL: https://onu.edu.ua/pub/bank/userfiles/files/edu-programm/fmfit/obovyazkovi/126_info_system_mag/ok5opp_2022-nechitki_modeli_ta_metody_v_intelektualnykh_systemakh- rp_2023.pdf

(дата звернення: 15.06.2025).

21. Fuzzy Logic Models and Fuzzy Control: An Introduction. Lecture notes. URL: <https://pzs.dstu.dp.ua/logic/bibl/control.pdf> (дата звернення: 15.06.2025).