

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
ОДЕСЬКИЙ ДЕРЖАВНИЙ ЕКОЛОГІЧНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Факультет Магістерської підготовки

Кафедра Інформатики

МАГІСТЕРСЬКА КВАЛІФІКАЦІЙНА РОБОТА

на тему: Система управління інфрачервоною камерою
пелоїдотерапії з біологічним зворотним зв'язком (прийняття
рішень)

Виконав студент 2 курсу групи
МІС-18 спеціальності 122
Комп'ютерні науки
Храмов Юрій Вадимович

Керівник д.т.н., проф.
Мещеряков Володимир Іванович

Рецензент д.х.н., проф.
Кругляк Юрій Олексійович

РЕФЕРАТ

Кваліфікаційна магістерська робота: 88 с., 2 табл., 1 дод., 22 рис., 22 джерел.

ІНФРАЧЕРВОНА ПЕЛОЇДОТЕРАПІЯ, НЕЧІТКІ МОДЕЛІ, НЕЧІТКІ КОНТРОЛЕРИ, АПАРАТНО–ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА.

Мета роботи – моделювання роботи нечіткого регулятора у системі інфрачервої камери пелоїдотерапії для визначення та регулювання нечіткими даними.

Об’єкт роботи – нечіткий регулятор в системі інфрачервої пелоїдотерапії.

Метод дослідження – моделювання програм в середовищі MATLAB, Visual studio, NOTEPAD++, IDE Arduino.

Перший розділ присвячений впливу інфрачервоного випромінювання на людину та методам грязелікування.

У другому розділі розглядаються існуючі нечіткі моделі та історія їх виникнення з докладним описом.

Третій розділ присвячений нечітким контролерам на базі яких і буде відбувається реалізація прийняття рішень та передачі сигналу.

Четвертий розділ присвячений програмної реалізації нечіткого регулятора в процесорі Ардуіно. Змодельовано спосіб отримання первинних даних з Ардуіно і передача сигналу на інфрачервону лампу для подальшої регуляції.

Результати моделювання нечіткого контролера на платформі Ардуіно показали, що дана система проста в розумінні і можлива в реалізації, а також ефективна в умовах систем пелоїдотерапії.

Розглянуто систему як альтернатива нечіткого контролера в системах з нечіткими даними які існують в камерах пелоїдотерапії та різних проектах.

ABSTRACT

Master's thesis: 88 pages, 2 tables, 1 supplement, 22 pics, 22 sources.

INFRARED PELOIDOTHERAPY, FUZZY MODELS, FUZZY CONTROLLERS, WARE AND SOFTWARE IMPLEMENTATION OF THE FUZZY REGULATOR.

The purpose of the work is to simulate the operation of a fuzzy controller in a peloid therapy infrared camera system to identify and control fuzzy data.

The object of work is a fuzzy regulator in the infrared peloidotherapy system.

Research Method – Modeling programs in MATLAB, Visual studio, NOTEPAD ++, IDE Arduino.

The first section is devoted to the effect of infrared radiation on humans and methods of mud treatment.

The second section examines the existing fuzzy models and the history of their occurrence with a detailed description.

The third section is devoted to fuzzy controllers based on which decision-making and signaling take place anywhere.

The fourth section is devoted to the software implementation of the fuzzy controller in the Arduino processor. A method of obtaining primary Arduino data and transmitting a signal to an infrared lamp for further regulation is simulated.

The simulation results of the fuzzy controller on the Arduino platform showed that this system is easy to understand and possible to implement, as well as effective in the conditions of peloid therapy systems.

The system is considered as an alternative to fuzzy controller in systems with fuzzy data that exist in peloid therapy cameras and various projects.

ЗМІСТ

Вступ.....	8
1 Інфрачервона пелоїдо терапія.....	9
1.1 Механізм дії лікувальних грязей.....	12
1.2 Техніка та методика грязелікування.....	14
1.3 Взаємодія пелоїди з шкірним покривом.....	16
1.4 Вплив інфрачервоного випромінювання на шкірний покрив.....	23
2 Нечіткі моделі.....	31
2.1 Моделі Мамдані.....	31
2.2 Глобальні і локальні нечіткі моделі.....	40
2.3 Реляційні моделі.....	44
2.4 Альтернативні моделі.....	46
3 Нечіткі контролери.....	52
3.1 Фазифікація. Засоби реалізації.....	56
3.2 Формування керуючого впливу. Дефазифікація.....	58
3.3 Організації обробки правил умовного логічного висновку.....	61
3.4 Складання правил нечіткого управління.....	65
4 Програмна реалізація нечіткого регулятора.....	67
4.1 Середовище розробки нечіткого регулятора.....	67
4.2 Зчитування первинних даних з Ардуіно.....	72
4.3. Реалізація нечіткого регулятора та бази правил.....	74
4.4 Результати моделювання системи.....	79
Висновки.....	81
Перелік джерел посилання.....	82
Додаток А Коди для нечіткого регулятора.....	84
А.1 Код зчитування 3-х параметрів і записи їх на SD-карту.....	84
А.2 Бази правил для нечіткого регулятора.....	86
А.3 Код формування бази правил для нечіткого регулятора.....	86

СКОРОЧЕННЯ ТА УМОВНІ ПОЗНАКИ

ІЧ	– інфрачервоне випромінювання.
Arduino	– мікропроцесор.
С	– Цельсій. Температура.
SD	– карта пам'яті.
FIS	– редактор призначений для створення, збереження, завантаження і виведення.
PID	– пропорційно–інтегрально–диференціює (ПІД)

ВСТУП

Лікувальні грязі є надбанням держави і їх раціональне використання становить екологічну та економічну проблему. Яскравим прикладом є лікувальні грязі Куяльника – лиману, розташованого в безпосередній близькості від Одеси, якість яких є світовим еталоном. Стандартною процедурою грязелікування є ванні процедури, для проведення яких необхідний значний обсяг грязьового розчину – приблизно 150 літрів на одного пацієнта, нагрітої до 37С. З точки зору екології – це виснаження унікальних природних джерел, економіки – значні енерговитрати.

За рахунок різних механізмів лікувальні грязі здатні впливати на продукцію антитіл, змінювати реакцію іммунокомпітентних органів, обмежувати розвиток алергічних реакцій негайного та уповільненого типів, впливати на самі різні показники неспецифічного імунітету, стимулювати діяльність ретикулоендотеліальної системи. Лікування грязями показано при захворюваннях опорно–рухового апарату (хребта, суглобів, м'язів), які довго не загоюються трофічних виразок і ран, захворюваннях центральної і периферичної нервової системи, гінекологічєкїх захворюваннях, хворобах шлунка і кишечника, судинних порушеннях.

1 ІНФРАЧЕРВОНА ПЕЛОЇДОТЕРАПІЯ

Пелоидотерапія – лікувальне застосування грязей. Лікувальні грязі мають високу теплоємність [24 кДж / кг] і теплопровідністю [0,88 Вт / м], але низькою теплоудержуючою здатністю (350–850 с). Деякі хімічні компоненти пелоїдів (гази, мікроелементи, біологічні речовини типу статевих гормонів і ін.), Проникаючи через шкіру, впливають на перебіг обмінних процесів, імунну реактивність організму [1]¹⁾.

Хвороби опорно–рухового апарату; ревматизм (не раніше, ніж через 6–7 місяців після гострої атаки); хронічний ревматоїдний поліартрит; інфекційні та неспецифічні поліартрити; дистрофічні (неінфекційні) поліартрити; залишкові явища після травм суглобів; остеомієліти; захворювання сечостатевої системи у чоловіків; захворювання жіночих статевих органів, в тому числі хронічні запальні процеси і безпліддя; спастичні запори; хронічні гепатохолецістити; спайкові процеси. Багато захворювань і наслідки травм периферичної нервової системи, особливо: радикуліти, плексити, поліневрити, неврити – інфекційні, ревматичні, на ґрунті отруєнь; наслідки поліомієліту у дітей. З великим успіхом грязелікування застосовується при багатьох хірургічних, оториноларингологічних, очних і шкірних захворюваннях.

Інфрачервоне випромінювання – один з видів випромінювань, які з'явилися в природі, обумовлені в основному техногенним напрямом розвитку нашого життя. На жаль, вирішальними факторами в утворенні репутації різних випромінювань зіграло їх вплив на здоров'я. Науці невідомі які–небудь негативні наслідки впливу інфрачервоного випромінювання на організм людини. Інфрачервоне випромінювання або теплове випромінювання – це вид поширення тепла, яке ми відчуваємо від гарячої грубки, сонця або від батареї центрального опалення. Воно не має нічого спільного ні з ультрафіолетовим випромінюванням, ні з рентгенівським. За-

¹⁾ [1] Федотов А.А., Акулов С.А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. Москва : Радио и связь, 2013. 250 с.

раз інфрачервоне випромінювання знайшло дуже широке поширення в медицині (хірургія, стоматологія, фізіопроцедури), що говорить не тільки про його нешкідливості, але і про корисну дію на організм. Інфрачервоне випромінювання – це вид енергії, який нагріває предмети безпосередньо без нагрівання повітря між джерелом випромінювання і об'єктом.

Технологія освіти інфрачервоних променів здається досить складною, але основи впливу її на організм досить прості. Інфрачервоні промені глибоко проникають в організм, м'язи і тканини. Внаслідок цього досягаються три основних ефекту – це підвищення температури тіла, прискорення серцебиття і виведення шкідливих речовин з організму.

Перший ефект – підвищення внутрішньої температури тіла. Протягом 15–30 хвилинного зовнішнього впливу температура шкіри зростає до 40°C і внутрішня температура тіла зростає до близько 38°C . Це підвищення температури створює стан штучного спека, яка стимулює імунну систему, внаслідок чого виробляються лейкоцити, антитіла і інтерферон (антивірусний білок).

Другий ефект полягає в тому, що серцево–судинна система починає працювати більш активно – кров швидше поширюється по організму, доставляючи необхідні поживні речовини і кисень до органів, виводячи токсини і відходи.

Третій ефект від інфрачервоного випромінювання складається в процесі детоксикації організму. Крім ефектів потіння і прискорення кровообігу, які описані вище, за допомогою яких виводяться токсини, вважається, що інфрачервоне випромінювання здатне нейтралізувати токсини в жирових клітинах і тканинах. Інфрачервона технологія – це одна з кращих форм виведення токсинів з організму, яка при постійному використанні очищає жирові клітини і змушує організм працювати на оптимальному рівні.

Дуже часто ІЧ–випромінювачі застосовуються не тільки на виробництві, а й у побуті, вони економічні і нешкідливі. Інфрачервоне випромінювання буває короткохвильовим ($\lambda =$ від 0,74 до 2,5 мкм – темпера-

тура нагрівального елемента більше 800°C), середньохвильового (середньохвильові: $\lambda =$ від 2,5 до 50 мкм (температура елемента до 600°C) і довгохвильовим (довгохвильові: $\lambda =$ від 50 до 2000 мкм (температура елемента менше 300°C). Короткохвильове та середньохвильове випромінювання характеризується високою інтенсивністю теплового потоку, великою агресивністю [2]²⁾. Короткохвильове інфрачервоне випромінювання, на відміну від довгохвильового інфрачервоного випромінювання, може викликати почервоніння шкіри в місці пролучення. Причина цього в тому, що капілярні судини розширюються, посилюється кровообіг, незабаром на місці опромінення може з'явитися опік. Так само, при попаданні короткохвильових інфрачервоних променів на органи зору, може виникнути катаракта. Важливі моменти, яких необхідно дотримуватися при використанні короткохвильових випромінювачів – це відстань від обігрівача до людини і час перебування людини під обігрівачем. Для застосування в житлових та громадських будівлях краще застосування довгохвильових генераторів тепла з довжиною хвилі $\lambda =$ від 50 до 2000 мкм.

Довгі хвилі найбільш глибоко проникають в організм, викликаючи його максимальний прогрів. Саме на цій властивості заснований ефект теплового лікування, широко використовується в фізіотерапевтичних кабінетах. Важлива характеристика інфрачервоного випромінювання – довжина хвилі (частота) випромінювання. Інфрачервоне випромінювання позитивно діє на організм, якщо довжина його хвилі не перевищує довжини хвилі, що виділяється самою людиною. Тому можна отримати явище, що називається «резонансним поглинанням», при якому зовнішня енергія буде активно поглинатися тілом: інтенсивність випромінювання людського тіла в інфрачервоному спектрі знаходиться в діапазоні від 70 до 200 мкм, максимальне випромінювання в діапазоні від 90 до 115 мкм.

²⁾ [2] Кулаичев А.П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика Москва : ФОРУМ: ИНФРА-М, 2007. 640 с.

здоров'ям. ІЧ промені ефективно усувають запалення, при простудних захворюваннях пригнічується розмноження хвороботворних бактерій не тільки в організмі людини, але і в навколишній атмосфері. ІЧ–випромінювання має хороший косметичний ефект – поліпшується циркуляція крові в шкірному покриві, внаслідок чого поліпшується колір обличчя, розгладжуються зморшки, шкіра виглядає молодшою [3]¹⁾.

Застосування ІЧ–опалення сприяє оздоровленню ряду захворювань шкіри (псоріаз, алергія, нейродерміт і т.д.), загоєнню ран, порізів. При іонізації повітряного простору ІЧ випромінюванням, таке захворювання, як алергія на пил, йде на спад. Довгохвильове ІЧ–випромінювання абсолютно безпечно, надає м'яку оздоровчий вплив на організм здорових людей.

1.1 Механізм дії лікувальних грязей

В основі дії застосовуваних зовнішньо лікувальних грязей лежить складне і взаємозалежне вплив на організм температурного, механічного та хімічного факторів. Висока теплоємність, низька теплопровідність, незначна конвекційна здатність, властиві грязям, забезпечують тривале збереження тепла, поступову віддачу його організму і глибоке проникнення в тканини. Роздратування терморецепторів і підвищення температури оточуючих тканин (на 1,5–2,5 ° С) призводять до активізації терморегуляційних механізмів, прискоренню обмінних і окислювально–відновних процесів. Бруд викликає активну гіперемію не тільки шкіри, але і глибоко розташованих органів, поліпшення в них кровообігу, зміна проникності різних структур.

Механічний фактор виражений менш значно і проявляється головним чином при призначенні загальних грязьових процедур. З одного боку, механічний тиск служить джерелом роздратування механорецепторів шкіри і

¹⁾ [3] Ураков, А.Л. Инфракрасное тепловидение и термология как основа безопасной лучевой диагностики в медицине. Фундаментальные исследования. 2013. 747–751 с.

рефлекторним шляхом впливає на формування загальної реакції організму. З іншого, викликаючи здавлення венозних судин, маса бруду впливає на мікроциркуляцію і гемодинаміку, перерозподіл крові в організмі, роботу серця і лімфовідтік.

Хімічний фактор в дії грязей зумовлений наявністю в них органічних і неорганічних біологічно активних речовин, які можуть діяти на організм різними шляхами: безпосередньо на шкіру і її структури, рефлекторно внаслідок хімічного роздратування екстерорецепторів шкіри або деяких дистантних рецепторів, в гуморальним шляхом при проникненні через шкіру і циркуляції їх в крові. Доведено надходження в організм через шкіру з грязей летючих речовин, гормоноподібних і антибіотичних з'єднань, органічних кислот та інших біоактивних речовин. Мікроорганізми, що містяться в грязі, здатні інактивувати патогенну мікрофлору на поверхні шкіри. Спільно з хімічними сполуками, які надходять в шкіру з бруду, вони підсилюють фагоцитарну активність і клітинний імунітет.

Таким чином, дія лікувальних грязей на організм ґрунтується на загальнофізіологічних механізмах, що включають рефлекторне вплив з залученням нейро–гуморальних регуляторних систем, різноманітних метаболічних реакцій. Хімічним і тепловому факторів належить провідна роль у формуванні відповідних реакцій організму, вираженість яких залежить від властивостей застосовуваного пелоїди, його температури, методики лікування, вихідного функціонального стану організму.

Як лікувальний фактор пелоїди впливають на функціональний стан нервової системи (нормалізують динаміку процесів гальмування і збудження в корі головного мозку), нейрогуморальної процесу, стимулюють імунні і адаптаційні реакції, зменшують ступінь сенсibiliзації організму змінюють вільнорадикальні процеси в тканинах. Лікувальним грязям притаманні виражені протизапальний, розсмоктуючий і трофіки–регенераторний ефекти, в основі яких лежить активація біоенергетичних (особливо в другій половині курсу лікування) і ферментативних процесів, поліпшення гормональне

обміну, кровообігу і мікроциркуляції. Вони володіють помірним болезаспокійливу і седативну дію. Разом з тим слід пам'ятати, що грязелікування є високонагрузочною процедурою, здатної при пере дозуванні або недообліку протипоказань до нього викликати загострення основного захворювання і негативні прояви, перш за все з боку серцево–судинної системи [4]¹⁾.

1.2 Техніка та методика грязелікування

Процедури грязелікування проводять в спеціально обладнаних грязелікарнях, в яких передбачені процедурний зал з грязьовими кабінами, кімнати відпочинку, адміністративно–господарські та виробничі приміщення. До останніх відносяться сховища для свіжої бруду, басейни для її регенерації (відновлення), грязьова "кухня", де відбувається підготовка лікувальної грязі для процедури, і інші приміщення. У грязьовій кабіні, призначеної для лікування, є одна або дві кушетки для прийому процедур, роздягальня і душ.

Розрізняють загальні і місцеві грязьові аплікації і грязьові розвідні ванни. Техніка проведення загальної аплікації виглядає наступним чином. На процедурної кушетці розстеляють байкову ковдру, поверх нього кладуть клейонку, а на неї – простирadlo. На простирadlo накладають шар бруду, нагрітої на водяній бані до заданої температури. Хворого укладають на цей бруд, покривають шаром бруду товщиною 4–6 см майже все тіло, за винятком голови, шиї і області серця. Потім його послідовно укутують простирadлом, клейонкою і ковдрою.

При місцевих процедурах, що застосовуються значно частіше, бруд поміщають на область проекції патологічного процесу або сегментарну зону. Товщина грязьовий аплікації 4–8 см. Температура грязі може коливатися від 37 до 46 ° С. бруду більш високої температури (42–46 ° с) призначають при

¹⁾ [4] Сороко С. И., Трубачев В. В. Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоправления СПб.: ИЭФБ РАН, 2010. 607 с.

підгострому і хронічному перебігу захворювання з помірно або слабовираженим больовим синдромом. Грязі температурою 37–40 ° С (мітігована грязелікування) використовують при вираженому або помірному больовому синдромі, рецидивуючому перебігу процесу, наявності супутніх захворювань, в педіатрії та ін. Тривалість процедури 15–20 хв. Курс лікування 10–15 процедур через день або 2–3 дні поспіль з днем відпочинку [5]¹⁾. Після закінчення процедури хворого звільняють від укутування, знімають бруд, потім він миється під теплим душем (36–37 ° С), одягається і лежить на кушетці 30–40 хв в кімнаті відпочинку.

До місцевих грязьових процедур відносять також грязьові компреси і тампони (вагінальний, ректальний), часто застосовуються в гінекології. Для проведення вагінального грязелікування обов'язковим є попереднє ретельне очищення бруду від сторонніх домішок шляхом протирання її через дрібне металеве сито. Крім того, слід користуватися тільки свіжою (нерегенованою) брудом, що пройшла найсуворіший бактеріологічний контроль. Бруд температурою 38–44 ° С вводиться в піхву через тонкостінну (діаметром 3–4 см) гумову трубку або спеціально виготовлені з синтетичної тканини мішечки, відкриті з двох сторін. Процедури тривалістю 30–40 хв проводять через день або 2 дні підряд з перервою на 3–й день. На курс лікування 12–18 впливів. Після закінчення процедури бруд видаляють з піхви пальцями з подальшим спринцеваним мінеральною водою або яким–небудь дезинфікуючим розчином температурою 38–40 ° С.

Грязьові розвідні ванни готують, додаючи в ванну з прісною або мінеральною водою 2–3 відра бруду. Температура ванн 40–42 ° С, тривалість процедури 10–15 хв. Цей вид лікування легше переноситься хворими, ніж загальні грязьові аплікації.

Під час проведення процедури грязелікування медична сестра зобов'язана періодично контролювати частоту серцевих скорочень і дихання хворого. Важливо також звертати увагу на водно–сольовий і вітамінний ба-

¹⁾ [5] Соловьев С.М. Инфракрасная фотография. Москва.: Искусство, 1960. 216 с.

ланси організму. Поряд з грязьовими аплікаціями і ваннами приміняють "грязьовий віджим" (грязьовий розчин) і препарати з грязі. Грязьовий розчин отримують шляхом центрифугування, дистиляції, віджимання бруду під пресом, фільтрації і потім використовують для електрофорезу. Приготовлені з пелоїдів фармакопейні лікарські препарати (гумизоль, пелоидин, сібїрін, торфот і ін.) Вводять в організм парентерально, використовують для зовнішнього застосування або в якості фармакологічного кошти в методиках сучасної фізіотерапії (електрофорез, фонофорез, аерозольотерапія і ін.).

Для потенціювання дії лікувальних грязей і підвищення ролі в ньому хімічного фактора їх використовують в поєднанні з постійним і імпульсними струмами, індуктотермією, ультразвуком (пелофонотерапія), БАРОТЕРАПІЇ (вакуумпелоелектрофорез).

Грязелікування дітям слід призначати з урахуванням особливостей дитячого організму по більш щадним порівняно з дорослими методикам. Дітям до 2 років пелоїдотерапія протипоказана.

1.3 Взаємодія пелоїди з шкірним покривом

Дія на організм пелоїдов здійснюється за допомогою рефлекторного механізму, нервовим і гуморальним шляхом. В основі впливу на організм людини лежать температурні, хімічні та механічні фактори [6]¹⁾. Проходження речовин через шкіру в значній мірі проходить трансепідерміально. Багато речовини проникають через пори, причому при оцінці хімічного компонента враховується різна здатність шкіри перешкоджати проникненню в організм природних речовин. Найбільшою проникаючої здатністю мають речовини, розчинні одночасно у воді і ліпідах. Проникність шкіри істотно залежить від тривалості контакту речовини зі шкірою – при тривалій експозиції через шкіру проникає практично будь-яка речовина. У зв'язку з вираженою

¹⁾ [6] Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. Москва.: ГЭИ, 1955. 232 с.

адсорбційною здатністю шкіри і можливістю утворення на її поверхні так званого сольового плаща багато інгредієнти лікувальних грязей довго контактують з шкірним покривом людини. Збільшення температури шкіри, її зволоження, зміна і посилення шкірного кровотоку підсилюють транскутанне проходження різних речовин. Разом з тим, відомості про надходження різних хімічних компонентів в організм при грязелеченні вельми суперечливі.

Зміна температури шкіри супроводжується безпосередніми рефлекторними і гуморальними ефектами, які доповнюють і коригують один одного, збільшується активність ферментів і швидкості каталізуючих ними біохімічних реакцій, підвищення обмінних процесів. Підвищення температури супроводжується збільшенням проникності гістогематичні бар'єрів і активізація дифузних процесів. Під впливом теплих грязьових процедур відбувається розширення периферичного судинного русла і збільшується кровопостачання шкіри до 100 і більше разів, що надає розсмоктуючу і болезаспокійливу дію. Гарне кровопостачання нагрітих тканин і надходження в організм великої кількості кисню сприяють посиленню обміну речовин, росту і відновлення пошкоджених тканин.

Тільки дифузний механізм проникнення речовин через шкіру спростовується П.П.Слинько, який встановив явище проникності шкірного покриву після потовиділення. Слідом за припиненням потовиділення шкіра на короткий час втрачає захисні властивості, і речовини через вивідні потоки перекачуються всередину організму. Існує тісний зв'язок між проникаючими здібностями шкірного покриву і діяльністю потоотделительной системи. Гази, органічні розчинники, жиророзчинні речовини проникають через роговий шар, волосяні фоллікули і сальні залози за рахунок дифузії. Речовини розчинні у воді і поті проникають у внутрішнє середовище в обхід епітеліального бар'єру по вивідним протоках потових залоз в період гальмування потовиділення. При відсутності потовиділення даний шлях проникнення речовин закритий через звуженого стану вивідних потоків і закупорюють їх кінцеві відділи повітряних пробок.

Спітніла поверхня шкіри водиється окремими порціями різної величини синхронно на різних ділянках, час виведення окремої порції при температурному потовиділенні становить $1,58 \pm 0,04$ секунд, частота виведення окремих порцій поту чергується з різким поширенням і уражень. Періоди коливань частот і паузи між окремими викидами поту змінюються в широких межах і в середньому становлять $42,1 \pm 3,4$ і $3,0 \pm 0,1$ секунд, відповідно. У паузи між окремими викидами поту в вивідних протоках потових залоз виникає зворотний рух поту, яке при гальмуванні потовиділення обумовлює втягування із зовнішнього середовища в їх глибину розчинів хімічних речовин, що надходять цими шляхами в обхід шкірного бар'єру крізь стінки проток всередину організму. Під час пауз між окремими викидами поту розчини речовин не встигають проникнути на велику глибину в вивідні протоки і крізь їх стінки. Чергові порції поту витісняють проникли речовини назад. Це пояснює непроникність неушкодженого шкірного бар'єру для водорозчинних речовин при безперервному потовиділенні. Тільки слідом за припиненням потовиділення настає період втягування. Вивідні протоки потових залоз звужуються після гальмування потовиділення. В процесі звуження проток інтенсивність надходження розчинів знижується. Гальмування потовиділення може відбуватися як рефлексорно, так і внаслідок охолодження крові, за допомогою впливу охолоджуючого чинника. При багаторазовому чергуванні збуджень і гальмувань потовиділення із зовнішнього середовища всередину організму може надходити значна кількість поверхнево розташованих хімічних речовин.

Можливо, цим пояснюється настільки значна увага терміну "вітер" в східній медицині, адже саме в процесі потовиділення організм виявляється вельми чутливим до зовнішніх впливів і їх незначні варіації можуть мати широкий спектр наслідків.

Тіло людини є провідником електричного струму з різним електричним опором. Найбільший опір електричному струму надає шкіра, тому опір тіла людини визначається, головним чином, опором шкіри.

Електричний опір тіла людини складається з опору шкіри і опору внутрішніх тканин. Шкіра, вірніше її верхній шар, званий епідермісом, має товщину до 0,2 мм і складається в основному з мертвих ороговілих клітин, має більший опір, яке і визначає загальний опір тіла людини. Опір внутрішніх тканин людини незначно і становить 300–500 Ом. При сухій чистій і непошкодженій шкірі опір тіла людини коливається в межах від 2 тис. До 2 млн Ом. При зволоженні і забрудненні шкіри, а також при пошкодженні шкіри (під контактами) опір тіла значно знижується 5 до 500 Ом, тобто доходить до значення, рівного опору внутрішніх тканин тіла.

Потовиділення обумовлено діяльністю потових залоз, що знаходяться в нижньому (внутрішньому) шарі шкіри. У людини близько 500 потових залоз на 1 см² шкіри.

Зі збільшенням струму і часу його проходження опір тіла людини падає, так як при цьому посилюється місцевий нагрів шкіри, що призводить до розширення її судин, до посилення постачання цієї ділянки кров'ю і збільшення потовиділення.

Шкіра складається з двох основних шарів: зовнішнього епідермісу і внутрішнього дерми. Епідерміс, в свою чергу, має кілька шарів, з яких самий товстий верхній шар називається роговим [7]¹⁾.

Роговий шар включає в себе кілька десятків рядів мертвих ороговілих клітин, що мають вигляд лусочок, щільно прилеглих одна до одної. Кожна така чешуйка є щільною рогову оболонку, як би сплюснутую маленьку подушечку, що містить невелику кількість повітря. Роговий шар позбавлений кровоносних судин і нервів і тому є шаром неживої тканини. Товщина його на різних ділянках тіла різна і коливається в межах 0,05–0,2 мм. Найбільшою товщини він досягає в місцях, піддаються постійним механічним впливам, в першу чергу на підшвах і долонях, де, потовщені, він може утворювати мозолі.

¹⁾ [7] Вайль Ю.С., Варановский Я.М. Инфракрасные лучи в клинической диагностике и медико-биологических исследованиях: Медицина. Ленинград, 1969. 239 с: ил.

Інші шари епідермісу, що лежать під роговим шаром і освічені в основному з живих клітин, можна умовно об'єднати в один так званий паростковий шар. У підставі цього шару безперервно відбуваються розподіл і розвиток нових живих клітин, а вгорі – зроговіння і відмирання клітин, які при цьому змінюють свою форму, ущільнюються, просочуються особливим білковим речовиною і стають клітинами рогового шару, заповнюючи постійно злущуються з поверхні шкіри мертві клітини. внутрішній шар шкіри (дерма) складається з міцних волокон сполучної і еластичної тканини, що переплітаються між собою і утворюють густу міцну сітку, яка і є основою всієї шкіри. Між цими волокнами знаходяться кровоносні і лімфатичні судини, нервові закінчення і коріння волосся. Тут же розташовані потові і сальні залози, вивідні протоки яких виходять на поверхню шкіри, пронизуючи епідерміс. Дерма є живою тканиною; електричний опір її незначно: воно в багато разів менше опору рогового шару.

Роговий шар володіє високою механічною міцністю, погано проводить тепло і електрику і є як би захисною оболонкою, що покриває все тіло людини. У сухому і незабрудненому стані роговий шар можна розглядати як діелектрик, так як його об'ємне питомий опір досягає 10^5 – 10^6 Ом * м, а опір нижнього шару шкіри становить всього 300–500 Ом. Сумарний опір тіла людини (зовнішнє плюс внутрішнє) при сухій, чистій і непошкодженій шкірі (виміряний при напрузі 15–20 В) коливається від 3 до 100 кОм і більше.

Внутрішній опір тіла вважається активним. Його величина залежить від довжини і поперечного розміру ділянки тіла, по якому проходить струм.

Зовнішнє опір тіла можна представити у вигляді двох паралельно включених опорів: активного і ємнісного. У практиці зазвичай нехтують ємнісним опором, яке незначно, і вважають опір тіла людини чисто активним і незмінним. У дійсних умовах опір тіла людини не є постійною величиною. Воно залежить від ряду факторів, у тому числі від стану шкіри, стану навколишнього середовища, параметрів електричного кола.

Таким чином, робота сирими руками або в умовах, що викликають зволоження будь-якого з ділянок шкіри створює передумови для важкого результату в разі потрапляння людини під напругу.

Пошкодження рогового шару (порізи, подряпини, садна та ін.) Знижують опір тіла до 500–700 Ом, що збільшує небезпеку ураження людини струмом. Такий же вплив надає зволоження шкіри водою або потом.

Таким чином, робота з електроустановками вологими руками або в умовах, що викликають зволоження шкіри, а також при підвищеній температурі, що викликає посилене потовиділення, посилює небезпеку ураження людини струмом. Забруднення шкіри шкідливими речовинами, добре проводять електричний струм, ризводять до зниження її опору.

Зволоження шкіри знижує її опір навіть у тому випадку, якщо волога володіємо великим питомим опором. Так, зволоження сухих рук сильно підсоленою водою знижує опір тіла на 30–50%, а дистильованою водою на 15–35%. Пояснюється це тим, що волога, по 7 на шкіру, розчиняє на її поверхні мінеральні речовини і жирні кислоти, виведені з організму разом з потом і шкірним салом, і стає більш електропровідної.

При тривалому зволоженні шкіри роговий шар її розпушується, насичується вологою, в результаті чого його опір майже повністю втрачається.

Опір шкіри, а, отже, і тіла в цілому різко зменшується при пошкодженні її рогового шару, наявності вологи на її поверхні, інтенсивному потовиділенні і забрудненні.

З ростом напруги, прикладеного до тіла людини, опір шкіри зменшується в десятки разів, наближаючись до опору внутрішніх тканин (300–500 Ом). Це пояснюється електричним пробоем рогового шару шкіри при напрузі близько 50 В і вище.

Зі збільшенням частоти струму опір тіла буде зменшуватися, і при 10–20 кГц зовнішній шар шкіри практично втрачає опір електричному струму.

До електротехнічних характеристик тіла людини слід віднести його опір, а також залежність цього опору від факторів навколишнього середовища, роду і частоти впливає струму, тривалості прикладення напруги, схеми проходження струму через тіло людини [8]¹⁾.

Перераховані параметри досліджуються методом амперметра–вольтметра, причому людина (його тіло) є елементом експериментальної установки.

На характеристики тіла людини впливають форма електрода, зусилля натискання на нього і ряд інших чинників.

Опір тіла людини, вимірний при напрузі 2,4–4,0 В змінного синусоїдального струму частотою 50 Гц по шляху рука–рука, становить 40–200 кОм. Вважається, що це опір складається з трьох послідовно включених опорів: двох однакових опорів зовнішнього шару шкіри (епідермісу), які в сукупності складають так зване зовнішнє опір тіла людини, і одного званого внутрішнім опором тіла, яке включає опір внутрішнього шару (дерми) і внутрішніх тканин тіла.

Ємнісний опір обумовлено тим, що в місці дотику електрода до тіла людини утворюється як би конденсатор, обкладками якого є електрод і добре проводять ток тканини тіла людини, що лежать під зовнішнім шаром шкіри, а діелектриком, що розділяє обкладки – цей шар (епідерміс).

Ємнісний опір обумовлено тим, що в місці дотику електрода до тіла людини утворюється конденсатор, обкладками якого є електрод і добре проводять струм тканини тіла людини, що лежать під зовнішнім шаром шкіри, а діелектриком – цей шар (епідерміс). Вважається, що ϵ це плоский конденсатор, ємність якого залежить від площі електрода S , м², товщини епідермісу d , м, і його електричної проникності, яка в свою чергу залежить від багатьох факторів: частоти прикладеної напруги, температури шкіри, наявності в

¹⁾ [8] Циркин Г. М, Шперлинг М.М. К вопросу о применении ЭЭГ– и ЭМГ–биоуправления для преодоления патологического двигательного стереотипа Бюллетень СО РАМН. – 2004. – № 3. 132–133 с.

шкірі вологи і ін. При струмі $f = 50$ Гц значення знаходяться в межах 100–200 $\Phi / \text{м}$.

Таким чином, на результат електропоразки впливає ряд факторів: величина прикладеної напруги, місце для вкладання, рід протікає через тіло людини струму, частота струму (для змінного струму), полярність (для постійного струму), фактори неелектричних характеру: температура, тиск, вологість, індивідуальні особливості людини і умови його роботи. Всі ці фактори досліджувати в одній лабораторній роботі не представляється можливим. При сталості прикладеної напруги на результат електропоразки впливатиме насамперед опір тіла людини, яке, в свою чергу, залежить від частоти прикладеної напруги, стану людини (шкіри) і площі торкання. Ці залежності і будуть досліджені в даній лабораторній роботі.

Для визначення змін в стані людини необхідно виміряти його пульс і кров'яний тиск. Множення значень цих параметрів лежать в основі способу, що характеризує стан людини при навантаженні.

1.4 Вплив інфрачервоного випромінювання на шкірний покрив

Регулюванням потовиділення принципово можливо вводити в організм цілющі речовини – з'являється принципово новий динамічний підхід до фізіотерапії, нові методики лікування, наприклад, детоксикація організму при отруєнні гербіцидами і добривами в сільському господарстві, аерозолями при аваріях на хімічних виробництвах. Очевидно, що обсяги речовини, необхідних для таких процедур на порядки менше, ніж для стандартних процедур при прийомі ванн.

Завданням досліджень є забезпечення управління потовиділенням шляхом впливу інфрачервоного випромінювання на шкірний покрив людини, тому необхідно знати залежність пропускання, відбиття і поглинання епітеліального шару в залежності від довжини хвилі випромінювання. Дослідження оптичних властивостей шкіри людини ведуться, як правило, на

зрізах, відсічених ділянках шкіри, що не дає повної відповіді про проходження променистого потоку крізь шкірний покрив людини при великій різноманітності умов всіляких станів живого організму.

Для інфрачервоного випромінювання, що проходить крізь живі тканини, властиво сильне розсіювання. Блажен інфрачервоне випромінювання (приблизно до $\lambda = 1,4$ мкм) пропускається епідермісом, в основному поглинається кров'ю в шарах дерми і підшкірної клітковини на глибині 2,5–4 см. На пропускання променів даного діапазону великий вплив мають спектральні характеристики води і крові. Для них характерно найбільше відображення шкірного покриву. Це пояснюється сильним розсіюванням променевої енергії в глибоких шарах шкіри. Дослідження функції розсіювання дозволило встановити відповідність її закону Ламберта у всьому дослідженому діапазоні довжин хвиль. Середньохвильове інфрачервоне випромінювання ($\lambda > 1,5$ –2 мкм) повністю поглинається міститься в тканинах водою в епідермісі, внаслідок чого шкіра для нього не прозора. В діапазоні 3–6 мкм спостерігаються сильні смуги поглинання C–H, N–H і O–H зв'язків в органічних речовинах, що входять до складу шкіри. Коефіцієнт відображення шкірного покриву довгохвильового випромінювання 2–20 мкм приймають рівним 4,6% .

Інфрачервоне випромінювання викликає в основному тепловий ефект, проникаючи на різну глибину живої тканини, об'ємно нагріваючи шари. Теплова дія інфрачервоного випромінювання залежить від довжини хвилі і спектральної проникаючої здатності ділянок шкіри, визначаючи теплові градієнти у внутрішніх шарах живої тканини. При однаковій щільності потужності випромінювання, але різної довжини хвилі реакція організму може бути різною. Поява перепаду температури призводить до переповнення кровоносних судин кров'ю і посилення обміну речовин. Посилена циркуляція крові, підвищена проникність судинної стінки ведуть до вступу в кров з тканин значної кількості рідини і супроводжуються збільшенням тепловіддачі шляхом потовиділення і випаровування. ІК–випромінювання надають вису-

шують і потогінну дію. Поглинаючись тканинами організму, квант енергії інфрачервоного випромінювання трансформується в теплову енергію. При цьому виникає судиниста реакція як результат безпосередньої дії тепла і возбуждення терморцепторів, імпульси від яких надходять в терморегуляційні центри і викликають теплорегуляційні реакції. Судинна реакція проявляється двома фазами. Спочатку короткочасна, незначно виражена фаза спазму, яка потім змінюється фазою активної гіперемії (активного тонічного розширення судин). В результаті активної гіперемії підвищується місцева васкуляризація тканин, у багато разів зростає кількість крові, що постачає тканини.

Додатковими реакціями організму на інфрачервоне випромінювання є прискорення обмінних, біохімічних процесів, окислювальних реакцій, що підвищують життєдіяльність тканин, короткохвильове випромінювання може викликати також слабкий фотохімічний ефект. Розширення судин, активізація імунобіологічних процесів, розсмоктування і видалення продуктів метаболізму, підвищення проникності судин обумовлює протизапальну дію і надає лікувальний ефект при хронічних і підгострих запальних процесах.

Згідно з даними А.Е.Малишевой тепловіддача випромінюванням займає перше місце серед інших шляхів тепловиділення, складаючи від 43,8 до 59,1% по відношенню до загальної величини тепловтрат людського організму, яку складають конвекція, випромінювання і випаровування. Можливо, при тривалому впливі інфрачервоного випромінювання, єдиною можливістю для організму підтримати певну температуру при перегріванні буде посилення випаровування води з поверхні шкіри і верхніх дихальних шляхів. Забезпечення оптимальної терморегуляції вимагає випаровування великої кількості поту з поверхні шкіри, тому тепловіддача випаровуванням буде перевищувати інші шляхи тепловиділення.

З вищенаведеного випливає, інфрачервоне випромінювання має на живу тканину такий вплив, яке можна використовувати як керуючий вплив на

діяльність потоотделітельной системи і, отже, проникність шкірного покриву.

Розробка методу інфрачервоної пелоїдотерапія в значній мірі вирішила проблеми зниження обсягів лікувальної грязі, необхідних для проведення процедур (в 20–50 разів) і електроенергії потрібної для її прогріву.

Принципово важливим є те, що інфрачервоні радіаційні випромінювачі значно менше інерційні по ставленню з нагрівачами теплопередачею при ванних процедурах і дозволяють формувати теплове поле заданої просторово–часової конфігурації, що забезпечує більш тонке управління процесом. Варіації спектрального діапазону інфрачервоного випромінювання забезпечують можливість формування температурного поля в людському тілі, оскільки в залежності від довжини хвилі глибина проникнення інфрачервоного випромінювання змінюється від одиниць мікрон до 4 см.

Надзвичайно важливою особливістю впливу інфрачервоного випромінювання на організм є здатність цих променів різної довжини хвилі проникати на різну глибину і поглинатися відповідними тканинами. Довгі інфрачервоні промені 6–14 мк затримуються в поверхневих шарах шкіри, в значній мірі вже на глибині 0,1–0,2 мм. У роговому шарі шкіри промені з довжиною хвилі менше 2,75 мк затримуються в кількості 25–40%, з довжиною хвилі 4–5,5 мк 30–50%, з довжиною хвилі менше 6 мк 100%. Короткі інфрачервоні промені (0,76–1,4 мк) проникають в тканини людського тіла на кілька сантиметрів.

Детально вивчено проникнення інфрачервоного випромінювання в очних середовищах. Максимум випромінювання, що досягає рогівки і передньої камери, доводиться на короткі промені з довжиною хвилі 1,5–1,7 мк, а випромінювання, що досягає кришталика, – близько 1,3 мк. Поглинаються короткохвильові промені в значній кількості кришталиком, райдужної і судинної оболонками. Менше значення щодо очних середовищ мають довгохвильові промені (з довжиною хвилі вище 2,4 мк).

Короткі інфрачервоні промені проникають також через шкіру голови, через черепну коробку в мозкові оболонки, мозкову тканину і діють безпосередньо на різні клітинні освіти [9]¹⁾.

Інтенсивність і характер впливу інфрачервоних променів на організм залежать від попереднього стану організму, тренуваності опромінюваної поверхні до інфрачервоних променів, площі опромінення, його тривалості та періодичності і, нарешті, від супутніх факторів виробничого обстановки і характеру трудового процесу.

Інфрачервоне випромінювання має загальне і місцеве вплив на організм. Загальна реакція на опромінення проявляється в підвищенні температури шкіри не тільки на опромінюваної поверхні, але і на віддалених від місця опромінення ділянках. Чим могутніше випромінювання, тим швидше настає максимум температури на облучаючій ділянці шкіри. При одній і тій же інтенсивності випромінювання температура шкіри підвищується тим менше, ніж коротше довжина хвилі.

При опроміненні короткохвильовими інфрачервоними променями, проникаючими в глибоколежащие тканини, спостерігається також підвищення температури легких, головного мозку, нирок, залоз, м'язів.

Мало змінюється під впливом інфрачервоного випромінювання температура тіла; лише при виконанні в умовах інфрачервоного опромінення значної м'язової роботи температура тіла підвищується на 1,5–2°. Підвищується вона також у випадках настав порушення терморегуляції внаслідок опромінення великої поверхні тіла.

Під впливом інфрачервоного випромінювання спостерігається утворення в шкірі, крові і спинномозкової рідини, специфічних біологічно активних речовин типу гістаміну, холіну, аденозину. Підвищується активність холінестерази, посилюється секреторна діяльність шлунка, підшлункової залози, слинних залоз.

¹⁾ [9] Деклараційний патент № 58051А Україна: Спосіб пелоїдотерапії та камера для його здійснення / Косоверов Є.О., Тищук М.М., Мещеряков В.І., Веселкова Т.О.

За даними ряду дослідників, відбуваються також зміни обміну речовин у вигляді нерізкого зниження споживання кисню, підвищений вміст азоту в крові, збільшеного розщеплення білка. Під час інфрачервоного опромінення і безпосередньо після нього протягом тривалого часу відбувається зниження поверхневого натягу крові.

Залежно від інтенсивності і спектрального складу інфрачервоної радіації протікає судинна реакція: короткохвильова викликає розширення судин, довгохвильова – звуження.

Інфрачервоне опромінення впливає на функціональний стан центральної нервової системи – відбуваються зміни, що свідчать про переважне розвитку гальмівного процесу: утруднення передачі нервового збудження в синапсах, зниження електричної чутливості ока, збільшення прихованого періоду зорово–моторної реакції, згасання умовнорефлекторних судинних реакцій.

У зв'язку з інфрачервоним опроміненням змінюється і нервово–м'язова збудливість. При випромінюванні $1,5 \text{ г / см}^2 / \text{хв}$ з довжиною хвилі близько 3 мк було встановлено зменшення хронаксії і збільшення реобазиса вже з перших хвилин опромінення.

Механізм терморегуляції людини як самоврядування системи включає дві складові: фізичну і хімічну терморегуляції.

Основними видами тепловіддачі є теплопровідність, конвекція, радіація і випаровування. Теплопровідність зовнішнього теплового потоку у внутрішній обсяг тіла обмежена низьку теплопровідність шкірного покриву, і оскільки температура людського тіла не може перевищувати 42°C , що знімається тепловий потік незначний. Даний вид тепловіддачі можна віднести до пасивного методу, оскільки він практично не управляється центральною нервовою системою. Вимірюваними показниками теплопровідності можуть служити температура поверхневого шару шкірного покриву безконтактними вимірювачами температури, оскільки спектральний

коефіцієнт чорноти при максимумі випромінювання 8–10 мкм близький до одиниці.

Конвективна тепловіддача в основному обумовлена відбором тепла потоком крові в периферичних областях близьких до шкіри. Даний вид відбору тепла є активним, управляється центральною нервовою системою і проявляється у формі розширення діаметру судин до 6 разів і зміни швидкості кровотоку в 2–20 разів при збільшенні теплопровідності тканини. Це дозволяє розподіляти тепловий потік по всій поверхні тіла і використовувати великий коефіцієнт чорноти і площу шкірного покриву людини для ефективного скидання надлишку тепла радіаційним випромінюванням. Перерозподіл потоків крові до організму може відбуватися практично без підвищення частоти серцевих скорочень, якщо теплові потоки незначні або локальні. При підвищенні теплових навантажень підвищується швидкість кровотоку за рахунок збільшення частоти серцевих скорочень. Вимірювання швидкості кровотоку у великих судинах здійснюється доплерівськими методами на ультразвукових апаратах, що практично виключає можливість їх використання в якості оперативних засобів отримання первинних ознак для управління випромінюванням. Використання пульсоксиметрів дозволяє оперативно отримувати інформацію про частоту серцевих скорочень, однак цей показник характеризує лише можливість перекачування крові серцевосудинної системи, не тільки пов'язаний з цим відбір теплового потоку з поверхні шкіри.

Потовиділення є активним, керованим центральною нервовою системою, ефективним способом тепловіддачі, оскільки для випаровування 1 г води витрачається 0,58 ккал, а при максимальному потовиділенні від тіла відводиться приблизно 870 ккал на годину. При підвищенні температури в камері пелодотерапія до 35 °С тепловіддача з допомогою радіації і конвекції вкрай обмежена і температура тіла підтримується на постійному рівні випаровуванням. Інформацію про потовиділення отримують зазвичай кондуктометричним шляхом зі зміни провідності шкірного покриву, тому він може

бути рекомендований як засіб оперативного контролю інфрачервоного опромінення.

З наведеного якісної аналізу випливає, що частота серцевих скорочень є значущим ознакою реакції організму на зовнішнє інфрачервоне вплив. Реакція судинної системи на відбір зовнішнього теплового потоку кровоносною системою і початок роботи системи скидання тепла випаровуванням становить приблизно 10 секунд, що можна прийняти за попередній показник реакції на стрибкоподібне тепловий вплив. Другим значущим ознакою реакції на щільність потужності інфрачервоного випромінювання можна визнати потовиділення, яке видається провідністю ділянки шкіри. Конвективна тепловіддача в основному обумовлена відбором тепла потоком крові в периферичних областях близьких до шкіри. Даний вид відбору тепла є активним, управляється центральної нервової системою і проявляється у формі розширення діаметру судин до 6 разів і зміни швидкості кровотоку в 2–20 разів при збільшенні теплопровідність тканини. Це дозволяє розподіляти тепловий потік по всій поверхні тіла і використовувати великий коефіцієнт чорноти і площу шкірного покриву людини для ефективного скидання надлишку тепла радіаційним випромінюванням. Перерозподіл потоків крові до організму може відбуватися практично без підвищення частоти серцевих скорочень, якщо теплові потоки незначні або локальні. При підвищенні теплових навантажень підвищується швидкість кровотоку за рахунок збільшення частоти серцевих скорочень. Вимірювання швидкості кровотоку у великих судинах здійснюється доплерівськими методами на ультразвукових апаратах, що практично виключає можливість їх використання в якості оперативних засобів отримання первинних ознак для управління випромінюванням. Використання пульсоксиметрів дозволяє оперативно отримувати інформацію про частоту серцевих скорочень, однак цей показник характеризує лише можливість перекачування крові серцевосудинної системи, не тільки пов'язаний з цим відбір теплового потоку з поверхні шкіри.

Потовиділення є активним, керованим центральною нервовою системою, ефективним способом тепловіддачі, оскільки для випаровування 1 г води витрачається 0,58 ккал, а при максимальному потовиділенні від тіла відводиться приблизно 870 ккал на годину. При підвищенні температури в камері пелоїдотерапія до 35 ° С тепловіддача з допомогою радіації і конвекції вкрай обмежена і температура тіла підтримується на постійному рівні випаровуванням. Інформацію про потовиділенні отримують зазвичай кондуктометричним шляхом зі зміни провідності шкірного покриву, тому він може бути рекомендований як засіб оперативного контролю інфрачервоного опромінення.

З наведеного якісної аналізу випливає, що частота серцевих скорочень є значущим ознакою реакції організму на зовнішнє інфрачервоне вплив.

2 НЕЧІТКІ МОДЕЛІ

У міру розвитку нечіткої логіки розробляються нові типи нечітких моделей. Целью створення нових моделей є забезпечення більшої точності і розмірності, а також спрощення їх структури. Необхідність розробки нових моделей викликана також великою різноманітністю існуючих реальних систем, різними видами інформації про ці системи і різною ступенем доступності.

Основна перевага нечітких моделей в порівнянні з традиційними математичними моделями пов'язано з можливістю використання для їх розробки значно менших обсягів інформації про систему, при цьому інформація може носити наближений, нечіткий характер. Далі будуть представлені два основоположних типу нечітких моделей і розглянуто взаємозв'язок між ними. Найважливішим і найбільш часто використовуваним типом нечіткої моделі є модель Мамдані [10]¹⁾.

2.1 Моделі Мамдані

Концепція лінгвістичної нечіткої моделі, що відтворює людський спосіб мислення, була запропонована в перших роботах Заде. Ідея застосування даної концепції до нечіткого управління динамічними об'єктами належить Мамдані, який поряд з цим представив спосіб побудови моделі людини–оператора, керуючого об'єктом. Запропонований Мамдані метод моделювання був зустрінутий з великим інтересом і отримав схвалення в зв'язку з його простотою і доступністю. В даний час цей метод використовується найчастіше, хоча були розроблені і інші типи моделей. В рамках методу Мамдані моделювана система розглядається як чорний ящик, який

¹⁾ [10] Круглов В. В., Длі М. М., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Москва: Физматлит, 2001. 224 с.

характеризується недостаточністю інформації про що відбуваються всередині нього фізичних явищах.

Метою є розробка моделі, яка виконує таке відображення своїх входів в вихід Y , яке забезпечувало б якомога більше точну апроксимацію реальної системи. Зазначене відображення припускає існування деякої геометричної поверхні, которую будемо далі називати поверхнею отображення, в просторі, що задається декартовим твором $X \times Y$. Модель Мамдані є безліч правил, де кожне правило задає в зазначеному просторі некоторую нечеткую точку. На основі безлічі нечітких точок формується нечіткий графік, механізм інтерполяції між точками в якому залежить від використовуваного апарату нечіткої логіки.

Кожне правило визначає важну типову особенність поведінки системи, геометрично відповідну точці простору $X \times Y$. «Істотні» точки моделі можуть розташовуватися безпосередньо на характеристиці реальної системи – в цьому випадку вони будуть точками її перетину з характеристикою моделі і, отже, точками, в яких модель «повідомляє правду» про систему [11]¹⁾.

Зокрема, правило R1, що має вигляд ЯКЩО x приблизно 1 ТО y приблизно 2, задає точку R1, яка є суттєвою одночасно для системи і її моделі.

Разом з тим, істотні точки нечіткої моделі не обов'язково повинні завжди належати характеристиці реальної системи. Як показує інше розташування цих точок може забезпечити більш високу точність моделі. У даній ситуації параметри функцій приналежності змінюються (що в свою чергу призводить до нових нечітким множинам $A^* 2, B^* 1, B^* 2$), і таким чином,

правила будуть мати такий вигляд:

R1 *: ЯКЩО ($x = A1$) ТО ($y = B^* 1$),

R2 *: ЯКЩО ($x = A^* 2$) ТО ($y = B^* 2$),

R3 *: ЯКЩО ($x = A3$) ТО ($y = B3$).

¹⁾ [11] Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры . Москва : Наука, 1997. 320 с

Правила $R1^*$ і $R2^*$ в не повідомляє правду про систему, оскільки задаються ними точки не належать її характеристиці. Разом з тим, середня точність тут буде вище, ніж в разі моделі. Вид характеристики нечіткої моделі на ділянках між «істотними» точками, для завдання кожної з яких використовується окреме правило, залежить від використовуваного апарату нечіткої логіки. Якщо в прикладі ввести другу функцію приналежності безлічі $A2$, то вид характеристики моделі зміниться.

Вид характеристики нечіткої моделі на ділянках між «істотними» точками, для завдання кожної з яких використовується окреме правило, залежить від використовуваного апарату нечіткої логіки т. Е. Методів виконання фазифікації, дефазифікації. Якщо в прикладі, ввести другу функцію приналежності безлічі $A2$, то вид характеристики моделі зміниться.

При використанні кусково–лінійних функцій приналежності, що задовольняють умові розбиття одиниці, для входів, одноточкових функцій для виходів, оператора PROD для перетину і оператора SUM для об'єднання множин поверхню моделі складається з полілінійних сегментів, які задаються функціями.

Введення трапецієподібної функції приналежності множини $A2$ призводить до зміненні типу інтерполяції, виконуваної моделью на ділянках між її «істотними» точками $R1$, $R2$, $R3$ – інтерполяція має нелінійний характер, але при цьому є локально лінійної. Використання на ділянках між «істотними» точками моделі Мамдані нелінійної інтерполяції може привести до підвищення точності моделі, внаслідок того, що характер вигину поверхні моделі між даними точками буде збігатися з характером вигину поверхні системи.

Разом з тим, на практиці характер опуклості зазначеної поверхні в загальному випадку невідомий, і є лише невеликий обсяг інформації про координати окремих точок, за якими вимірювання проходить. Крім того, в разі нечіткої моделі на характер опуклості поверхні впливає така велика кількість

елементів моделі, що передбачити тип локальної опуклості виявляється досить складним, особливо для систем з багатьма входами до моделей цього типу.

Для будь-якої нечіткої моделі можна теоретично вивести формулу, що задає її поверхню в явному вигляді (т. Е. $Y = f(X)$). Разом з тим, на практиці ці формули не виводять в силу трудомісткості даного процесу, яка значно зростає зі збільшенням числа входів і функцій приналежності. Значення на виході нечіткої моделі отримують шляхом послідовного обчислення вихідних значень окремих її елементів при заданому векторі вхідних значень X . З урахуванням цього, на практиці, при застосуванні моделі Мамдані, точні формули, що задають інтерполяційну поверхню, невідомі [12]¹⁾.

Використовуючи безперервно диференціюються функції належності вхідних параметрів моделі наприклад, гаусові функції, можна забезпечити безперервність першої похідної, а також похідних більш високих порядків для даної поверхні, за умови, що не використовуються оператори типу MIN, пов'язані з возможностью різкого зміни значень.

На самому початку в моделях Мамдані використовувалися, як правило, тільки лінгвістичні мітки типу «малий» або «великий». Нечіткі моделі, що використовують подібні мітки для позначення нечітких множин, називаються лінгвістичним моделями. Тим часом, як було відмічено на практиці, привласнення нечітким множинам лінгвістичних міток часто виявляється позбавленим особливого сенсу. Розглянемо приклади на рис. 2.1. У прикладі на рис. 2.1, а нечітке безліч «приблизно 9» знаходиться настільки близько до безлічі «приблизно 10», що вважати його «середнім» можна лише з великими труднощами. Наявність великої кількості множин в прикладі на рис. 2.1, б призвело б до необхідності використання великого числа міток наприклад, «малий», «близький до малому», «між малим і середнім», «близький до середнь-

¹⁾ [12] Заде Л.А. Принятие решений в расплывчатых условиях, вопросы анализа и процедуры принятия решений / Под ред. И. Ф. Шахнова, с предисл. Г. С. Поспелова. Москва : Мир, 1976. 172–215 с.

ого», «середній», що стало б, в свою чергу, причиною їх важко розрізняються. Більш практичним тут є використання міток у вигляді нечітких чисел «приблизно 1», «приблизно 2», «приблизно 3», оскільки з їх допомогою проше уявити позицію кожного безлічі. На рис. 2.1, в наведено приклад ситуації, коли використання лінгвістичних міток типу «малий», «середній», «великий» має сенс. При малому числі нечітких множин їх ядра знаходяться на досить великій відстані один від одного. Нечіткі моделі, в яких мітки множин представлені в формі нечітких чисел, називаються нелінгвістическими моделями.

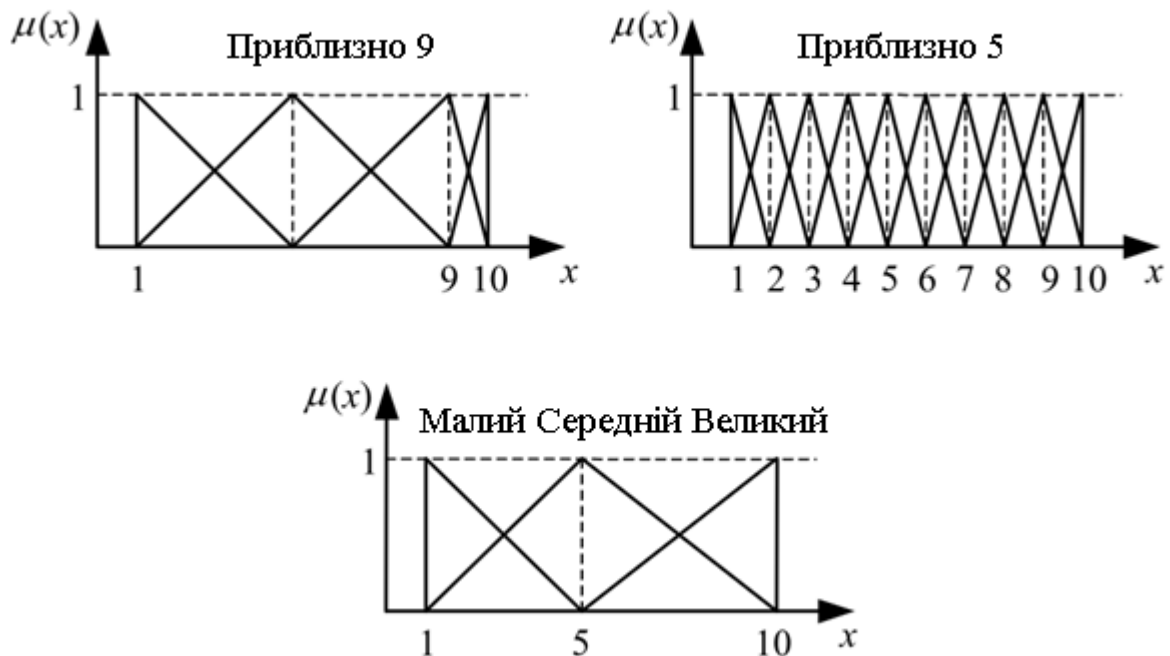


Рисунок 2.1. – Уявлення множин в формі нечітких чисел

Істинність інформації, що міститься в умовах і висновках правил моделі Мамдані, дуже важлива для розуміння взаємозв'язку входів і виходів як моделі, так і моделюється. Найкращою є ситуація, коли правила «повідомляють правду». Наприклад, якщо одне з правил має вигляд ЯКЩО x_1 приблизно 2 І x_2 приблизно 1 ТО у приблизно 5, то в результаті подачі на вхід моделі вектора $[x_1, x_2]^T = [2, 1]^T$ на її виході буде отримано значення $y =$

5, яке задається висновком зазначеного правила. Тим не менш, не завжди подібна ситуація має місце.

Правила «повідомляють правду», якщо для реалізації операції І використовуються t -норми, а для операції АБО – s -норми. Такі оператори, для яких виконують умови $\mu_{A \cap B}(x) = 0$ і $\mu_{A \cup B}(x) = 1$ (цим умовам не задовольняють, наприклад, оператори SUM (арифметична сума) і MEAN).

Як функцій належності вхідних нечітких множин використовуються функції, які мають кінцевий носій (даній умові не задовольняють гаусові функції) і приймають нульове значення в точках, відповідних модальним значенням ($\mu(x) = 1$) суміжних з ними функцій. Приклади наведені на рис. 2.2 та рис. 2.3 наведені приклади функцій, які не дозволяють досягти ефекту «повідомлення правди» правилами.

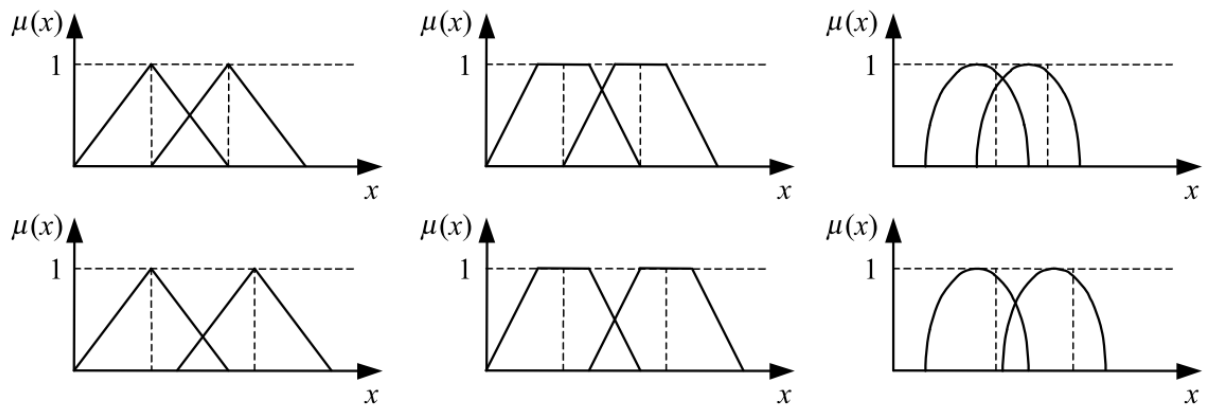


Рисунок 2.2 – Приклади функцій належності входів моделі, при яких правила можуть «повідомляти правду»

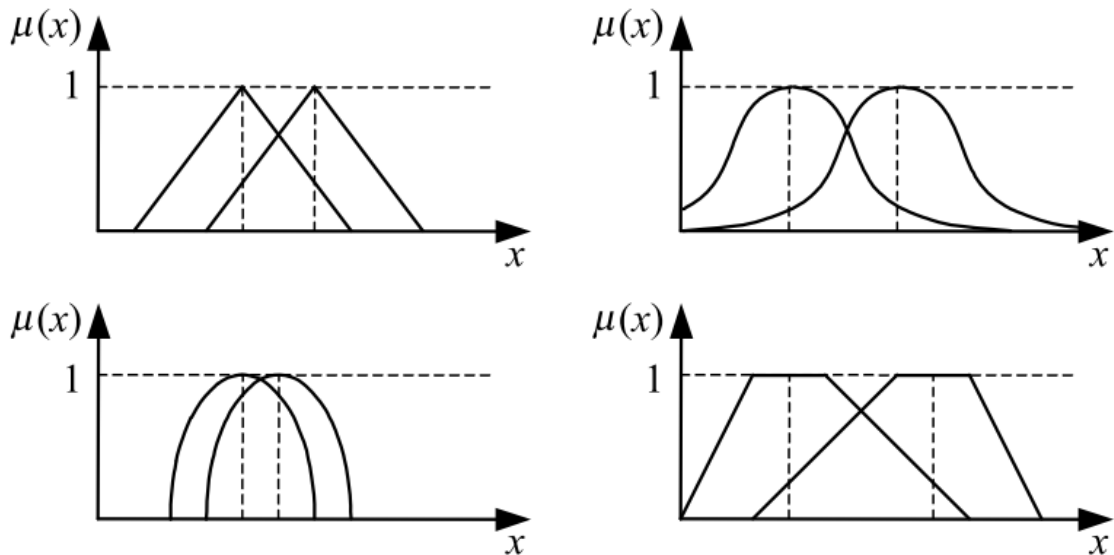


Рисунок 2.3 – Приклади функцій належності входів моделі Мамдані, при яких неможливо досягти ефекту «повідомлення правди» правилами

Інтерполяційна поверхню проходить безпосередньо через опорні точки, і її форма залежить від ряду елементів моделі – використовуваних методів виведення, дефазифікації, типів операторів. У даній ситуації правила моделі будуть «повідомляти правду» про її вихідних значеннях. Тепер розглянемо інший варіант вхідних функцій приналежності, який представлений на рис. 2.4. Представлені на рис. 2.4 функції приналежності вхідного параметра можна задати з допомогою формул, що містять логічні змінні w_i : $\mu_1(x) = 0.25 [(5 - x) (w_1 + w_2 + w_3)]$, $\mu_2(x) = 0.25 [(x + 2) w_1 + (6 - x) (w_2 + w_3)]$, $\mu_3(x) = 0.25 [(x + 1) (w_1 + w_2) + (7 - x) w_3]$, $\mu_4(x) = 0.25 [x (w_1 + w_2 + w_3)]$.

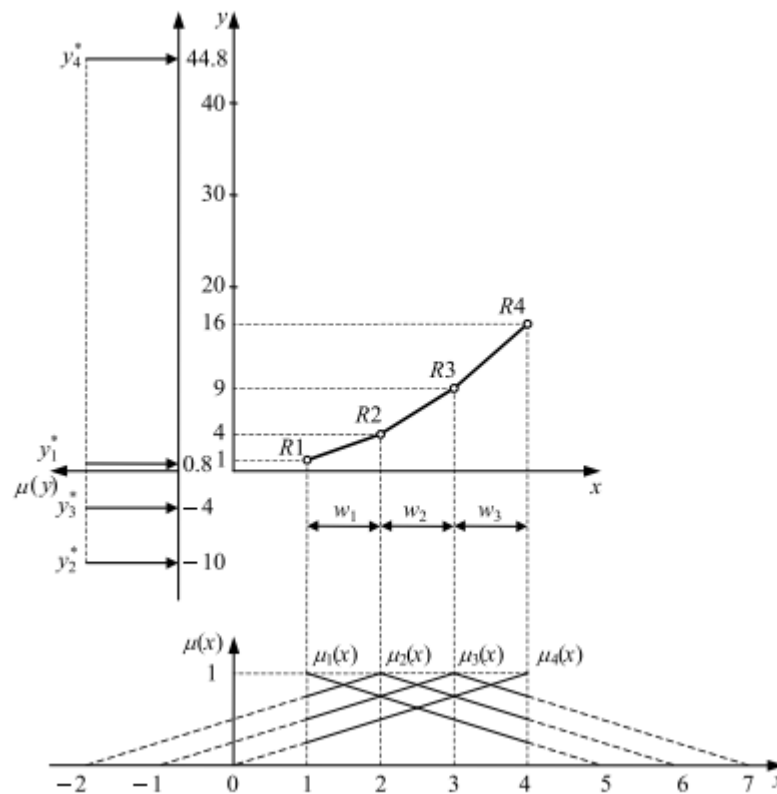


Рисунок 2.4 – Використовувані в другій версії моделі функції приналежності входу і виходу не забезпечують «повідомлення правди» правилами і визначення логічних функцій w_i

База правил моделі має вигляд:

R1 *: ЯКЩО ($x \approx 1$) ТО ($y \approx y^* 1$), R2 *: ЯКЩО ($x \approx 2$) ТО ($y \approx y^* 2$),

R3 *: ЯКЩО ($x \approx 3$) ТО ($y \approx y^* 3$), R4 *: ЯКЩО ($x \approx 4$) ТО ($y \approx y^* 4$).

На основі формул можна отримати вираз для визначення поверхні моделі: $y = 0.1y^* 1 [(5 - x) (w_1 + w_2 + w_3)] + 0.1y^* 2 [(x + 2) w_1 + (6 - x) (w_2 + w_3)] + 0.1y^* 3 [(x + 1) (w_1 + w_2) + (7 - x) w_3] + 0.1y^* 4 [x (w_1 + w_2 + w_3)]$

Інтерполяційна поверхню між окремими опорними точками $R_i - R (i + 1)$ задається за допомогою формул:

R1 – R2: $w_1 = 1, y = 0.1 [y^* 1 (5 - x) + y^* 2 (x + 2) + y^* 3 (x + 1) + y^* 4x]$,

$R2 - R3: w_2 = 1, y = 0.1 [y^* 1 (5 - x) + y^* 2 (6 - x) + y^* 3 (x + 1) + y^* 4x],$

$R3 - R4: w_3 = 1, y = 0.1 [y^* 1 (5 - x) + y^* 2 (6 - x) + y^* 3 (7 - x) + y^* 4x].$

Аналізуючи формули, ми бачимо, що в даній версії моделі локальні інтерполяційні поверхні, розташовані між кожною парою суміжних опорних точок, залежать не тільки від цих, але і від всіх інших опорних точок, оскільки в кожній з інтерполяційних формул присутні всі координати $y^* 1, y^* 2, y^* 3, y^* 4$, що задаються висновками правил які в даній версії не є «повідомляють правду».

Якщо вважати опорними точками моделі точки $R^* i: R^* 1 = R1^* (1, y^* 1), R^* 2 = R2^* (2, y^* 2), R^* 3 = R3^* (3, y^* 3), R^* 4 = R4^* (4, y^* 4)$, а опорними точками, що моделюється точки $R_i: R1 = R1 (1, y_1), y_1 = 1, R2 = R2 (2, y_2), y_2 = 4, R3 = R3 (3, y_3), y_3 = 9, R4 = R4 (4, y_4), y_4 = 16$.

При відповідному виборі параметрів моделі $y^* i$ можна домогтися, щоб її поверхня проходила безпосередньо через опорні точки системи R_i .

Визначення значення $y^* i$ носить глобальний характер виконується одночасно для всіх точок моделі $R^* i$ на основі представлених даних вимірювань параметрів системи, а також формули для визначення вихідного значення y . Підставляючи координати «істотних» точок системи, отримуємо наступну систему рівнянь:

$$R1 (1, 1) \Rightarrow 0.4y^* 1 + 0.3y^* 2 + 0.2y^* 3 + 0.1y^* 4 = 1,$$

$$R2 (2, 4) \Rightarrow 0.3y^* 1 + 0.4y^* 2 + 0.3y^* 3 + 0.2y^* 4 = 1,$$

$$R3 (3, 9) \Rightarrow 0.2y^* 1 + 0.3y^* 2 + 0.4y^* 3 + 0.3y^* 4 = 1,$$

$$R4 (4, 16) \Rightarrow 0.1y^* 1 + 0.2y^* 2 + 0.3y^* 3 + 0.4y^* 4 = 1,$$

рішення якої має вигляд

$$y^* 1 = 0.8, y^* 2 = -10, y^* 3 = -4, y^* 4 = 44.8.$$

Базу правил можна представити у вигляді

$R1^*:$ ЯКЩО $(x \approx 1)$ ТО $(y \approx 0.8)$,

$R2^*:$ ЯКЩО $(x \approx 2)$ ТО $(y \approx -10)$,

R3 *: ЯКЩО ($x \approx 3$) ТО ($y \approx -4$),

R4 *: ЯКЩО ($x \approx 4$) ТО ($y \approx 44.8$).

Аналіз результатів використання функцій приналежності, представлених, носії яких виходять за межі, що задаються модальними значеннями суміжних функцій приналежності, дозволяє зробити наступні висновки.

Інтерполяційна поверхню моделі має той же якісний тип в розглянутому прикладі – лінійний, що і в разі функцій приналежності, що не виходять за межі модальних значень суміжних з ними функцій. Таким чином, розширення носіїв функцій приналежності не змінює властивостей інтерполяції. Налаштування параметрів моделі в ситуації, що розглядається має відбуватися не локально, з використанням тільки безпосередньо прилеглих опорних точок, а глобально, з використанням усіх опорних точок системи. З огляду на явище, зване «прокляттям розмірності», глобальна настройка значно складніше локальної. Отримана після завершення процесу налаштування модель є коректною поверхню моделі проходить через опорні точки R_i системи, але при цьому її правила «не повідомляє правду», що робить модель більш складною для розуміння [13]¹⁾.

Таким чином, по ряду розглянутих в даному прикладі причин, використання в моделях Мамдані функцій приналежності, носії яких не виходять за межі, що задаються суміжними з ними функціями зокрема, функцій, що задовольняють умові розбиття одиниці, є кращим. Та також буде основною моделлю в моделюванні проекту.

2.2 Глобальні і локальні нечіткі моделі

¹⁾ [13] Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. Н. И. Ринго под ред. Н. Н. Моисеева и С. А. Орловского. Москва : Мир, 1976. 165 с.

Все частіше і частіше обговорюється питання, пов'язане зі значімістю глобальних і локальних нечітких моделей. Як приклади можна привести такі публікації, як.

Перші нечіткі моделі носили глобальний характер, тобто ставилися до всієї області визначення. Тим часом, було дуже швидко помічено, що для деяких систем прагнення до високої точності глобальної моделі призводило до її надмірної складності, що виражається у великому числі правил. З'ясувалося також, що з точки зору налаштування параметрів глобальні моделі ефективні лише при досить невеликому числі входів, $n \leq 4$. Ілюстрацією зазначеної проблеми є рис. 2.5.

Розглянутий підхід дозволяє отримати бажане рішення в необхідній області простору вихідних даних, включаючи ті області, де знання експерта, виражені в нечіткому описі системи, виявляються неточними або помилковими, що досягається за допомогою набору коригуючих даних, які задають необхідні значення рішення. При цьому коректувальні дані можуть призвести не до модифікації створених експертом правил або визначень характеристичних функцій, а до доповнення існуючого опису, що дозволяє зберегти пояснювальну можливість нечіткого виведення рішення в термінах, введених експертом.

Щоб забезпечити високу точність відображення показаних на рис. 2.5 «вершина», в області їх місцезнаходження потрібні щільні функції приналежності. Таким чином, ми отримуємо сітку розбиття, що містить $13 \cdot 13 = 169$ вузлів опорних точок, і оскільки з кожним вузлом зіставляється окреме нечітке правило, то загальне число правил в моделі буде великим рівним 169. Тим часом, якщо в областях «піків» потрібна висока щільність вузлів, то для прийняттого по точності опису областей «плато» досить меншого числа правил і відповідно вузлів.

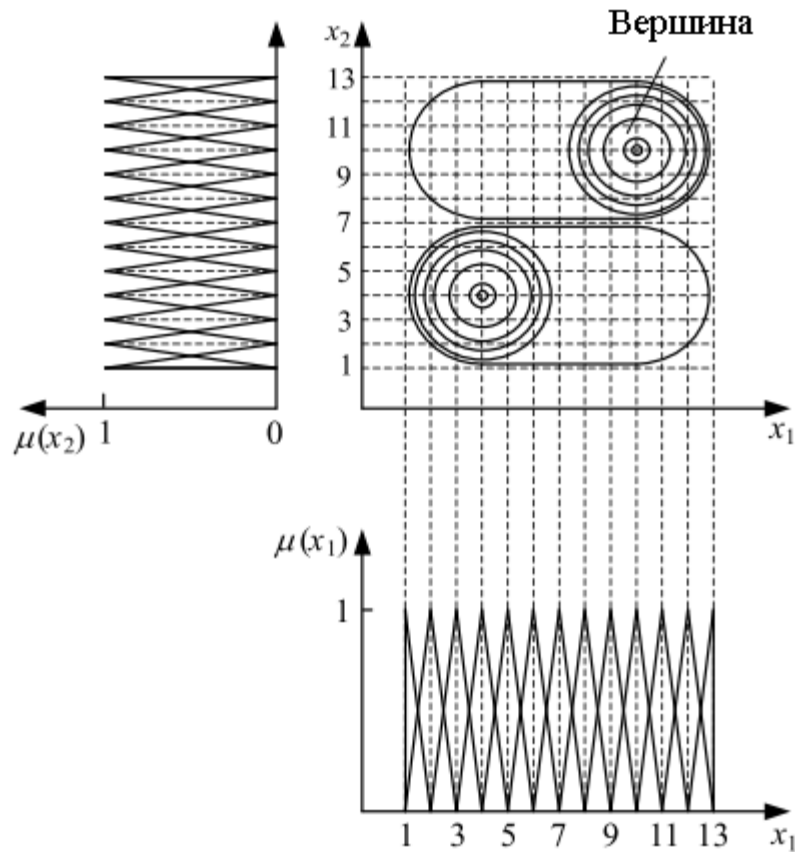


Рисунок 2.5 – Розбиття простору $X_1 \times X_2$ входів глобальної моделі

Доцільно розділити глобальну модель на 4 локальних моделі, які представлені на рис. 2.5. В рамках локальних моделей для опису областей «плато» використовуються тільки 4 правила, в той час як області «піків» задаються за допомогою більшого числа правил. Загальна кількість правил в чотирьох локальних моделях складає 106, на 63 менше, ніж у глобальній моделі.

Для ідентифікації моделі з меншим числом правил досить мати менший обсяг даних вимірювання входів і виходів системи. Це дуже важлива перевага локального моделювання, оскільки наявний обсяг даних про моделюється системі часто буває недостатнім через високу вартість, трудомісткості вимірювань, а також великих затрат часу на їх проведення.

Необхідною і бажаною властивістю набору локальних моделей, які використовуються замість однієї глобальної моделі, є безперервність в областях стикування локальних моделей – в зазначених областях не повинно бути різких змін вихідного параметра y . Метод, з допомогою якого можна забезпечити виконання даної властивості в разі лінійних локальних моделей. Інший метод, що застосовується як для моделей Мамдані, так і для TS-моделей, полягає в використанні ієрархічної структури.

В рамках ієрархічної структури спочатку обчислюються значення на виході локальних нечітких моделей LM_i , після чого відбувається агрегація цих значень з використання трапецієподібних функцій приналежності, що мають змінні значення на кордонах областей.

Оптимізацію розмірів еліптичних областей і розподіл їх центрів можна виконати з допомогою нечітких радіально-базисних нейронних мереж, яких навчають на основі вибірки значень вхідних і вихідного параметрів модельованої системи або методів кластеризації.

Глобальне розбиття області визначення моделі на локальні сегменти є дуже складною задачею. У загальному випадку для областей, де поверхня системи є плоскою, потрібна менша кількість сегментів, а для областей з рельєфною поверхністю – більше число. Разом з тим, не так просто виділити плоскі і рельєфні області на основі даних, схильних до впливу шуму вимірювання, особливо в разі багатовимірних систем. Дана проблема досліджувалась

Педрічем і реформати, які ввели поняття мінливості F поверхні відображення «вхід–вихід». Імовірність є окремим випадком нечіткої приналежності. Якщо ймовірність істини дорівнює $0,8$, тоді ймовірність брехні дорівнює $0,2$ (тобто, якщо ймовірність того, що подія відбудеться, дорівнює x , то ймовірність того, що воно не відбудеться, становить $1-x$). Ця властивість адитивної інверсії ймовірних тверджень в нечіткій логіці не потрібно. Нечітка приналежність може розглядатися як «можливість» того, що висловлювання вірно на рис. 2.6.

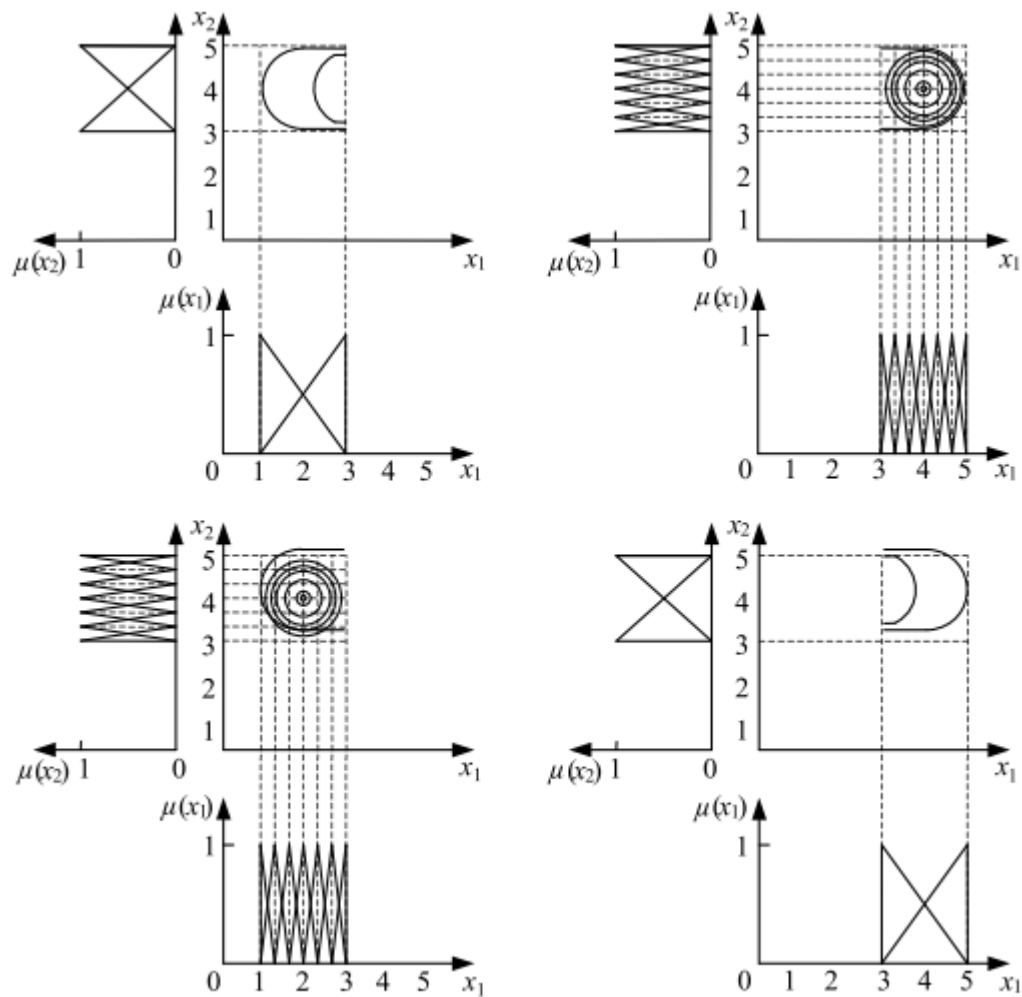


Рисунок 2.6 – Чотири локальні моделі, використовувані замість
представленої на рис. 2.5 глобальної моделі

2.3 Реляційні моделі

Реляційні моделі були запропоновані Педрічем в 1984 р. Фундаментальна особливість даних моделей полягає в тому, що замість лінгвістичних правил, що вважаються абсолютно істинними, в них розглядаються частково справжні лінгвістичні правила. З кожним правилом зіставляється відповідний коефіцієнт довіри. База правил задається з допомогою нечеткого відношення, і для її ідентифікації та аналізу застосовується теорія реляційних рівнянь. Поняття коефіцієнта довіри правила пояснюється за допомогою прикладу.

Приклад: База правил задає відношення між розумовими здібностями дитини та результатами його навчання в школі:

R1: Здібна дитина вчиться добре.

R2: Звичайна дитина вчиться на середньому рівні.

R3: Не дуже здібна дитина вчиться погано.

Поверховий аналіз правил дозволяє вважати їх істинними. Наведені правила можна представити у формі реляційної таблиці 2.1, яка містить коефіцієнти довіри, рівні 0 або 1, що зв'язують вхідні безлічі з вихідними.

Разом з тим, проведені в школах статистичні дослідження, а також досвід більшості батьків показують, що існують здібні діти, які показують середні і навіть погані результати навчання, також як і не дуже здібні діти, які мають середні результати [14]¹⁾. В результаті статистичного аналізу груп здатних, середніх і малоздібних учнів у кожній групі можна отримати процентне співвідношення дітей, які демонструють хороші, середні і погані результати, на основі чого ми можемо визначити коефіцієнти довіри для реляційної таблиці, прикладом якої є табл. 2.1.

Таблиця 2.1 – Реляційна таблиця для подання бази правил з визначеними коефіцієнтами

Успішність / рівень розумових здібностей	добре	середня	погана
здатний	1	0	0
звичайний	0	1	0

¹⁾ [14] Классификация и кластер / Под ред. Дж. Вэн Райзина: Пер. с англ. П. П. Кольцова под ред. Ю. И. Журавлева. Москва : Мир, 1980. 389 с.

не надто здатний	0	0	1
------------------	---	---	---

R1: Здібна дитина: вчиться добре (0.6) на середньому рівні (0.3) погано (0.1),

R2: Звичайна дитина: вчиться добре (0.1) на середньому рівні (0.7) погано (0.2),

R3: Не дуже здібний : добре (0) дитина вчиться на середньому рівні (0.3) погано (0.7)

Висновки правил вже не є однозначними, але при цьому вони більшою мірою відображають реальну ситуацію, ніж правила. У реляційних нечітких моделях перед виконанням процесу міркувань відповідні висновками нечіткі множини зазвичай дефаззифікуються і замінюються одноточечного множинами, після чого виконується агрегація з урахуванням коефіцієнтів довіри окремих правил. Відповідна процедура обчислень приведена в прикладі. Виникає питання, чи є достатнім використання для практичних цілей нечітких моделей Мамдані, і чому необхідно використовувати реляційні нечіткі моделі наведено у табл. 2.2.

Таблиця 2.2 – Приклад таблиці зіставлення рівня розумових здібностей дитини з результатами його навчання з використанням нечітких коефіцієнтів довіри

Успішність / рівень розумових здібностей	добре	середня	погана
здатний	0.6	0.3	0.1
звичайний	0.1	0.7	0.2

не надто здатний	0	0.3	0.7
------------------	---	-----	-----

У задачах моделювання ми багато разів стикаємося з ситуаціями, коли функції належності вихідної змінної задаються апріорі, на основі знань або інтуїтивних уявлень експерта (В разі відсутності знань про систему експерт може припустити, що функції приналежності розподілені рівномірно). Якщо параметри (і особливо модальні значення) зазначених функцій не є оптимальними, то є можливість підвищити точність моделі. У прикладі представлена модель, для якої введено припущення про рівномірний розподіл функцій приналежності на області визначення.

2.4 Альтернативні моделі

Нечіткі моделі Мамдані мають такі особливості:

- а) вони здійснюють прямокутне розбиття вхідного простору,
- б) межі прямокутних сегментів є, як правило, лінійними,
- в) поверхні локальних сегментів є зазвичай «слабо» нелінійними .

Залежно від обраного критерію оцінки, зазначені особливості можуть бути як перевагами, так і недоліками нечітких моделей. Прямокутне розбиття вхідного простору дозволяє формулювати модель з допомогою понятних людині правил. Разом з тим, оскільки функції приналежності задаються окремо для кожної що входить в модель змінної, спроба додати в модель хоча б одну нову функцію привідіт лише до значного увеліченію числа правил.

Невизначеність опису означає його нечіткість, і теорія нечітких систем займається методикою побудови моделей із застосуванням нечітких понять, що використовуються людиною. Відзначимо тут, що, крім лексичних нечітких понять, людина також використовує інтуїтивні поняття і образи, які взагалі не мають словесного опису.

Використання нерегулярного розбиття простору входів дозволяє значно зменшити кількість сегментів і узгодити щільність їх розподілу з ступенем нелінійності моделюється області. Більше число трикутних сегментів потрібно в області «піків», а в разі плато достатньої точності можна досягти, використовуючи значно менше число великих за розміром сегментів рис. 2.7.

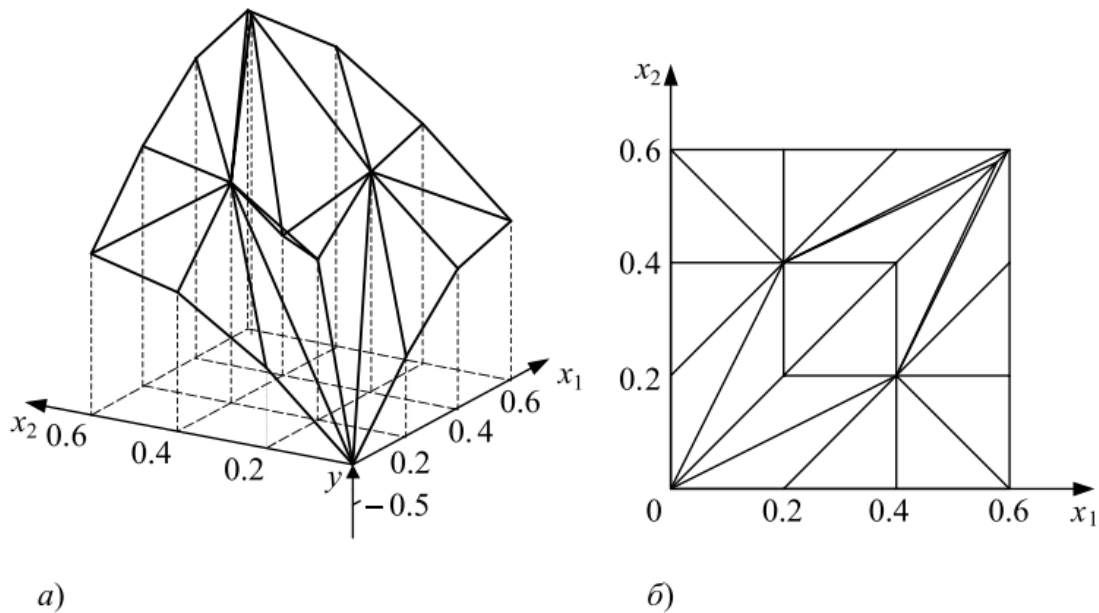


Рисунок 2.7 – Поверхня моделі (а), отримана шляхом розбиття вхідного простору $X_1 \times X_2$ (б) на трикутні сегменти

Модель заснована на нелінійних висновках правил, складається з десяти трикутних сегментів. Модель має лінійні укладення, збігається за точністю з моделлю, але при цьому складається з значно більшої кількості секторів, а саме вісімнадцяти наведено на рис. 2.8.

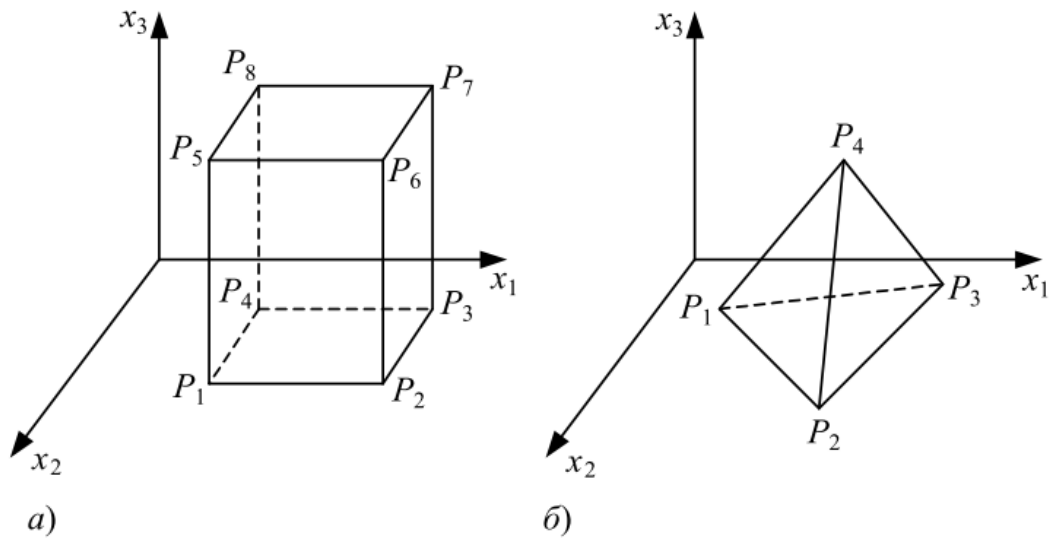


Рисунок 2.8 – Сегмент вхідного простору при регулярному і нерегулярному гіпертреугольному розбитті вхідного простору

В рамках моделі Мамдані кожен вузол P_{ij} сітки розбиття має на увазі наявність одного правила і трьох підлягають настройці параметрів, і таким чином велика кількість вузлів призводить до необхідності отримання великого обсягу вимірюваної інформації про модельовану систему. Збільшення числа параметрів моделі істотно ускладнює процес її налаштування, з ризиком перевищити межі можливостей останньої.

Для порівняння на рис. 2.9 представлена поверхню нечіткої моделі, заснована на прямокутному регулярному розбитті вхідного простору.

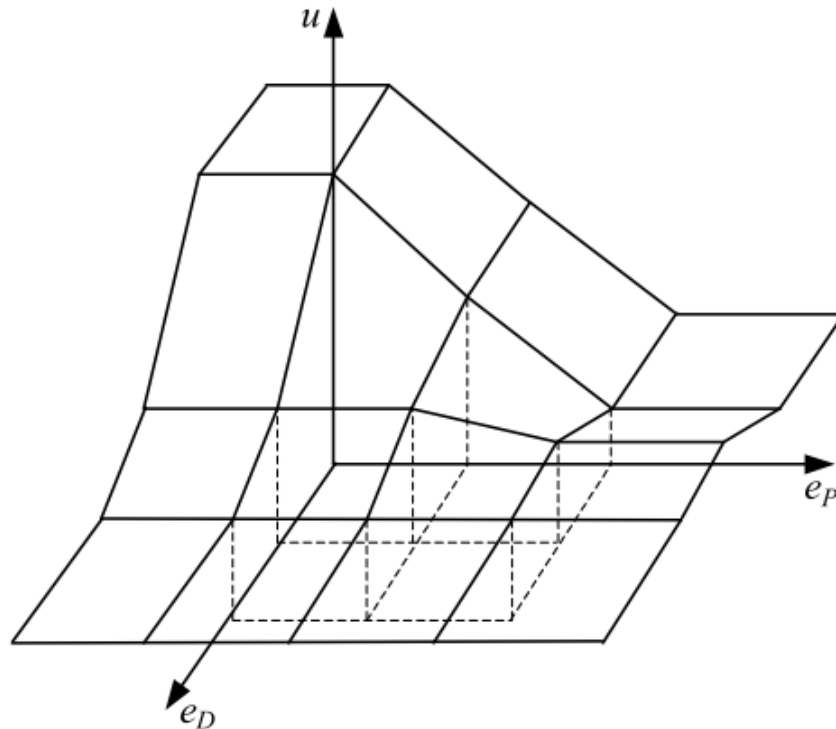


Рисунок 2.9 – Поверхня нечіткої моделі, заснована на регулярному прямокутному розбитті вхідного простору

У разі прямокутного рис. 2.9 розбиття для завдання ділянки поверхні моделі, відповідного одному прямокутному сегменту, необхідно виміряти чотири значення вхідних і вихідного параметрів модельованої системи, а при трикутному розбитті потрібно тільки три таких значення. Нечітка модель системи з трьома входами заснована на кубоїдальному розбитті вхідного простору, а альтернативна модель – на тетраедральному розбитті.

Залежність має нелінійний, експоненціальний характер, в той час як залежність є лінійною. В системі, що має 10 входів, число вимірів, необхідних для завдання одного гіперпрямокутного сегмента, становить $p = 1024$, і всього лише 11 вимірювань потрібно, щоб задати один гіпертрикутний сегмент. Різниця, таким чином, величезна. Особливі переваги використання моделей з гіпертрикутним розбиттям дає в разі систем з великим числом входів, які задані з використанням менших обсягів

вимірюваних даних систем, з недостатніми обсягами вимірюваної інформації особливо часто доводиться стикатися в економічних системах. Крім цього, велике число точок, використовуваних для завдання поверхні моделі над одним гіперпрямоугольним сектором – значно ускладнює настройку нечіткої моделі і є причиною «прокляття розмірності» [15]¹⁾. У разі нечіткої моделі Мамдані кожному вузлу сітки розбиття відповідає одне правило виду, визначальне вихідний стан моделі:

$$\text{ЯКЩО } (x_1 \approx x_{1i}) \text{ І } (x_2 \approx x_{2j}) \text{ ТО } (y \approx y_{ij}).$$

Положення задається цим правилом точки P_{ij} визначається координатами x_{1i} , x_{2j} , y_{ij} . Замість традиційного нечіткого правила виду можна використовувати правило виду, яке задає поверхню $y = f_k(x_1, x_2)$ над прямокутним сегментом k вхідного простору в інший спосіб:

$$\text{ЯКЩО } (x_{1i} \leq x_1 \leq x_{1(i+1)}) \text{ І } (x_{2j} \leq x_2 \leq x_{2(j+1)}) \text{ ТО } (y = f_k(x_1, x_2)).$$

Для моделей Мамдані з оператором PROD і кусочно-лінійними функціями належності поверхню над сегментом має полілінійну форму. Межі кожного сегмента мають вигляд прямих ділянок.

При трикутному розбитті вхідного простору поверхню моделі над окремим сегментом задається лінійною залежністю. Кожному трикутного сегменту в моделі відповідає одне правило виду.

В останні кілька десятиліть моделі з правилами виду, що містять лінійні укладення, відомі під назвою «мережі Делоне» або «триангуляція Делоне». Спочатку вони використовувалися для геодезичного опису земельних ділянок, а потім для них були знайдені нові додатки в моделюванні технічних систем і управлінні. Мережі Делоне є здатними до самоорганізації і самоналаштуванням. є безліч методів їх побудови, при цьому деякі з них, як, наприклад, метод розміщення нових вузлів мережі в точках максимальної помилки моделі, не мають типового для нейронних мереж нестачі, пов'язаного з

¹⁾ [15] Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. С предисл. Л. А. Заде: Пер. с франц. В. Б. Кузьмина под ред. С. И. Травкина. С предисл. М. А. Айзермана. Москва : Радио и связь, 1982. 432 с.

зупинкою процесу навчання в локальних мінімумах функції помилки. Тому навчання мереж Делоне відбувається швидко і завершується поблизу глобального мінімуму зазначеної функції.

Разом з тим дослідження Ульріха в області мереж Делоне з лінійними висновками, які задаються за допомогою формули, показали, що число генеруються ними трикутних сегментів, необхідних для забезпечення необхідної точності моделі, є занадто великим, і при використанні певних методів навчання які потребують обернення матриць для них також має місце «прокляття розмірності».

Введення в правила нелінійних висновків, Делінеаризація мереж Делоне, дозволяє отримати значно більшу високуюточність моделі при одному і тому ж або меншій кількості трикутних сегментів [16]¹⁾.

Таким чином, що нечітка логіка, в деяких найпростіших випадках, дозволяє поліпшити якість управління об'єктами. Вирішальну роль в оптимізації показників ефективності грають експерти, які визначають кількість вхідних і вихідних змінних, число термів для кожної змінної, види функцій приналежності, тому що зміна цих параметрів призводить до поліпшення або погіршення процесу управління об'єктом.

¹⁾ [16] Кузьмин В. Б. Построение групповых решений в пространствах четких и нечетких бинарных отношений. Москва : Наука, 1982. 168 с.

3 НЕЧІТКІ КОНТРОЛЕРИ

Розширення сфери застосування автоматизованих систем управління, підвищення рівня відповідальності цих систем при вирішенні різних завдань управління в промислової і непромислової сфері поставило перед розробниками ряд складних і практично суперечливих проблем. З одного боку, необхідно посилювати можливості цих систем, реалізовувати все більш складні алгоритми управління, з іншого – все більш жорсткі вимоги пред'являються до рівня їх надійності.

Підвищення можливостей і якості управління за рахунок тільки удосконалення апаратної частини дало певний ефект, але в той водночас вказало на наявність істотних обмежень на цьому шляху.

Відомо, що підвищення гнучкості систем управління за рахунок ускладнення апаратної реалізації призводить до погіршення відмовостійкості і живучості систем. Істотне зростання складності об'єктів управління створив певні труднощі і теоретичного характеру. Розробка систем управління неможлива без побудови моделі об'єкта управління. Основний зміст даного завдання полягає у вирішенні наступних проблем:

- описі процесів, що відбуваються в системах управління;
- виборі відповідних методів формалізації і встановленні адекватності одержуваних моделей з вихідним об'єктом, а також з методами дослідження (в залежності від рівня фізичної і математичної строгості).

Слід зазначити, що традиційний підхід до вирішення завдань теорії управління на основі існуючих в прикладній математиці формально–логічних методів ставить собі за мету створення точних (в широкому сенсі) моделей, строгих міркувань і висновків. Основна увага при цьому доводиться приділяти питанням коректності, повноти, несуперечності, замкнутості, стійкості, керованості і багатьом іншим якісним аспектам опису моделей об'єктів і алгоритмів управління.

Слід зазначити, що процес побудови моделей фізичних процесів має складний еволюційний характер, пов'язаний з неминучою аппроксимацией реального об'єкта і призводить до втрати інформації при його описі. При цьому гіпотези і аксіоми, за якими здійснюються аппроксимація і уявлення реального об'єкта відповідної моделлю, можуть не враховувати всієї реальної суті фізичного процесу, що призводить до додаткового приросту ризику і невизначеності в описі об'єкта управління. Тут доречно нагадати принцип несумісності Л. Заде: "У міру зростання складності системи наша здатність формулювати точні, що містять сенс твердження про її поведінці зменшуються аж до деякого порога, за яким точність і зміст стають взаємовиключними".

Таким чином, питання оцінки істинності твердження: "Математична модель адекватна реальному об'єкту управління" – залишається відкритим і не вирішується тільки в рамках прийнятого методу досліджень. Оцінка адекватності математичної моделі реальному об'єкту управління носить відносний характер і істотно залежить від прийнятих гіпотез опису досліджуваної динамічної системи. Одним з можливих напрямків вирішення перерахованих вище проблем є створення "інтелектуальних" систем управління, в яких управління і прийняття рішень реалізуються на моделях нечітких регуляторів і експертних систем з використанням нечітких індукції і алгоритмів керування, узагальнених правил нечіткого логічного виведення. З точки зору нечітких моделей розглядаються два варіанти:

- нечіткість опису як аппроксимація слабоструктурованої моделі реального об'єкта управління через його складності і нечіткості інформації про його властивості;
- реальний об'єкт має об'єктивної внутрішньої нечіткістю опису функціонування.

У першому випадку оцінка адекватності моделі реальному об'єкту встановлюється нечіткої мірою відносини між досліджуваними об'єктами або системами і методами імітаційного моделювання. Особливе значення такий

підхід має при побудові промислових інтелектуальних САУ, заснованих на знаннях і використовують в структурі контурів управління відповідні пристрої з штучним інтелектом.

У другому випадку дослідження повноти відповідної оцінки адекватності об'єкта управління показали, що існує клас динамічних систем, для яких істинність суджень про адекватність систем, що належать цьому класу, своїм моделям, не може принципово приймати булеві значення $\{0,1\}$. В роботі сформульовані п'ять принципів організації інтелектуальної керуючої структури.

Перший принцип. Наявність взаємодії керуючих систем з реальним зовнішнім світом з використанням інформаційних каналів зв'язку.

Другий принцип. Принципова відкритість систем з метою підвищення інтелектуальності і вдосконалення власної поведінки [17]¹⁾.

Третій принцип. Наявність механізмів прогнозу змін зовнішнього світу і власної поведінки системи в динамічно мінливому зовнішньому світі.

Четвертий принцип. Наявність у керуючої системи багаторівневої ієрархічної структури, побудованої відповідно до правила підвищення інтелектуальності і зниження вимог до точності моделей у міру підвищення рангу ієрархії в системі і навпаки.

П'ятий принцип. Збереженість функціонування можливо, з деякою втратою якості або ефективності, інакше з деякою деградацією при розриві зв'язків або втрати керуючих впливів від вищих рівнів ієрархії керуючої структури.

Відповідно до цих принципів були визначені два типи інтелектуальних керуючих систем.

¹⁾ [17] Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования: Пер. с англ. Ю. В. Тюменцева и Ю. Т. Каганова под ред. Ю. В. Тюменцева. — М.: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 416 с.

Визначення 1. Керуючі системи, організовані і функціонують відповідно до сформульованими п'ятьма принципами в повному їх обсязі, називаються керуючими системами, що володіють властивістю "інтелектуальності в великому".

Визначення 2. Управляючі системи, структурно не організована відповідно до наведеними вище п'ятьма принципами, але використовують при функціонуванні знання (наприклад у вигляді правил) як засіб подолання невизначеності вхідної інформації, моделі керованого об'єкта або його поведінки, називаються керуючими системами, що володіють властивістю "інтелектуальності в малому". Прикладом керуючих систем з властивістю "інтелектуальності в малому" слугують нечіткі контролери.

Визначення 3. нечітко регулятором (контролером) називається ієрархічна дворівнева система управління, "інтелектуальна в малому", на нижньому (виконавчому) рівні якої знаходиться традиційний ПД–регулятор, а на верхньому координаційній рівні використовується база знань (з блоком нечіткого виведення у вигляді продукційних правил з нечіткою імплікацією) і пристрої перекладу в лінгвістичні і в точні значення (фазіфікатор і дефазіфікатор відповідно).

Як правило, у всіх нечітких регуляторах використовується основний принцип регулювання – принцип регулювання по відхиленню.

Вихідна змінна об'єкта управління порівнюється з заданим значенням x_g , помилка неузгодженості $E = x_g - x$ зазвичай піддається різним масштабним перетворень. Крім самого значення неузгодженості обчислюється швидкість зміни неузгодженості. Отримані числові значення перетворюються фазіфікатором до відповідних лінгвістичні значення.

Використовуючи ці значення і знання, що зберігаються в базі знань, процесор виведення визначає лінгвістичний еквівалент керуючого впливу, який за допомогою дефазіфікатора перетворюється в числову форму. У всіх цих операціях бере участь база знань контролера, яка, можна вважати, складається з двох частин: бази даних і бази правил. База даних містить

лінгвістичні значення всіх використовуваних змінних і відповідні базові множини. При роботі фазифікатора визначається приналежність і конкретним базовим безлічам з відповідними лінгвістичними значеннями. Дефазифікатор вирішує зворотну задачу, при якій для лінгвістичного значення управління визначається базове безліч і знаходиться точка єдиного керуючого впливу.

3.1 Фазифікація. Засоби реалізації.

У загальному вигляді фазифікація – це виконання відображення безлічі числових значень керуючих параметрів на безліч лінгвістичних значень, визначених для цих параметрів $X \rightarrow Lx$, де X – безліч числових значень, Lx – безліч лінгвістичних значень, Γ – оператор відображення.

Для завдання відображення Γ діапазон можливих значень X розбивається на сукупність базових множин $B = \{b_l; l = 1, \dots, L\}$, кількість яких L визначається числом використовуваних лінгвістичних значень.

Функції приналежності лінгвістичних значень $\mu_l(x)$, $x \in X$, $l \in L$ визначаються на базових множинах з урахуванням вимог, які повинні бути виконані при побудові функцій належності.

Таким чином, в процесі фазифікація вирішується питання про приналежність конкретного значення керуючого параметра конкретному базового безлічі. Як критерій приналежності використовуються значення відповідних функцій приналежності. У ситуації, перед- поставленої змінна x 'може бути віднесена до базового безлічі b_{l+1} , так як $(X)(x) \mu_{l+1} = 1 > \mu_l$.

Числовим значенням x 'ставиться у відповідність лінгвістичне значення " $l+1$ ". Відзначимо, що згідно з правилами побудови функцій приналежності значення x 'може бути спільноти не більше ніж з двома лінгвістичними значеннями [18]¹⁾.

¹⁾ [18] Малышев Н. Г., Бернштейн Л. С., Боженюк А. В. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 136 с.

Як правило, для встановлення відповідності між числовим значенням і лінгвістичним використовують співвідношення. Однак можуть виникнути ситуації, коли слід врахувати те, що числовий оцінкою керуючого параметра в даний момент часу можуть відповідати кілька (два) лінгвістичних значення. Тоді значення функцій приналежності можна розглядати як ступінь істинності відповідного рішення. Очевидно, що ця обставина має враховуватися надалі.

Побудова базових множин і вибір виду функцій приналежності виконуються експертним шляхом. Їх кількість можна вибирати виходячи з умов повноти та ненадлишкових. Слід зазначити, що в нечітких контролерів можна передбачити варіант перегляду в процесі експлуатації структури базових множин. Щодо виду функцій приналежності можна висловити припущення, що при багаторазовому виконанні одних і тих же операцій вид функції приналежності принципового значення не має і на перший план виходять питання простоти відповідних технічних рішень. Мабуть, саме такі міркування можна пояснити той факт, що в більшості технічних додатків використовуються найпростіші трикутні функції, для яких є дуже просте (L, R) уявлення. За умови використання нормальних функцій приналежності що практично завжди має місце $\sup_x \mu(x) = 1$ або $\max[\mu(x)] = 1$, трикутна функція приналежності однозначно задається трійкою (x_L, x^*, x_R) , де x_L – ліва межа носія нечіткої множини; x_R – права; x^* – точка максимуму функції приналежності: $\mu(x_L) = \mu(x_R) = 0$, $\mu(x^*) = 1$.

Досить важливим питанням є вибір шкали, в якій представлені аргументи функцій приналежності.

Можливі два варіанти:

- використання абсолютних шкал в фізичних одиницях, в яких представляються змінні, що беруть участь в управлінні;
- використання відносних шкал.

Відносно першого варіанту можна відзначити наступне. В процесі управління можуть брати участь змінні різної фізичної природи з різними

масштабами абсолютних шкал. Їх обробка в рамках одного правила умовного логічного висновку буде пов'язана з використанням великої кількості масштабних коефіцієнтів з різними операціями перерахунку і т.п. це створює додаткові і мало обгрунтовані складності. значно зручніше приведення всіх змінних до відносної шкалою $[0,1]$ або $[-1,1]$.

Формули приведення тривіальні: для шкали $[0,1]$:

$$x = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (3.1)$$

та для шкали $[-1,1]$:

$$x = \frac{x - \frac{x - x_{min}}{2}}{x_{max} - x_{min}}, \quad (3.2)$$

де x – невідома величина та $x_{max} - x_{min}$ – різниця максимальної та мінімальної x .

Хоча принципів обмежень на вибір цих шкал немає, шкалу $[-1,1]$ доцільно використовувати, якщо змінні, що беруть участь в процесі управління, можуть приймати негативні значення і характер правил умовного логічного висновку залежить від знака використовуваних в ньому змінних.

3.2 Формування керуючого впливу. Дефазікація.

Поряд із загальними моментами в підходах до створення нечітких контролерів існує і ряд відмінностей у визначенні єдиного керуючого впливу з вихідного нечіткого підмножини, яку представляють функцією приналежності, отриманої після обробки правил умовного логічного висновку. Один із застосовуваних способів – вибір такого значення, для якого функція приналежності має найбільше значення рис. 3.1, при наявності

декількох екстремумів на функції приналежності рис. 3.1, вибирається середнє значення для цих точок.

В останньому випадку має місце так званий метод mean of maxima (середнього по максимуму).

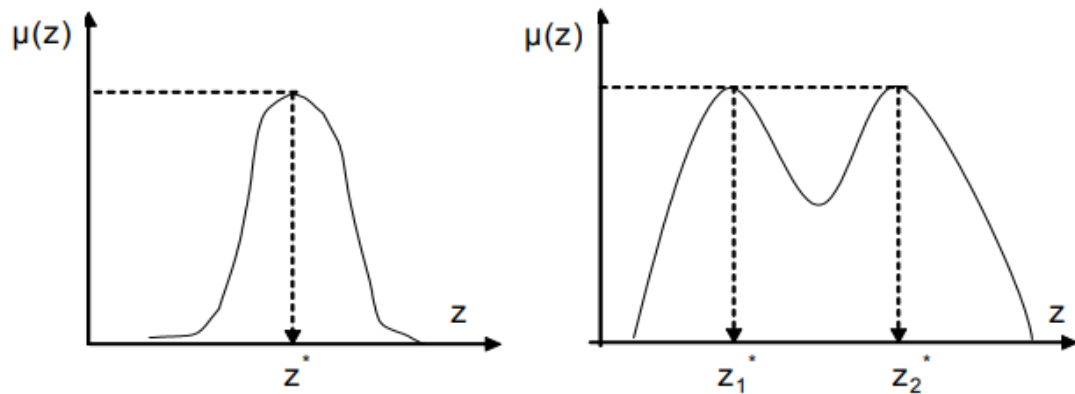


Рисунок 3.1 – Функція приналежності

Різновидом методу середнього по максимуму є метод середньозваженого по максимуму, так як можуть виникнути ситуації, коли екстремуми функції приналежності вихідного нечіткого підмножини не рівні. Але це нерівність не настільки значно, щоб можна було одним з екстремумів знехтувати рисунок 3.2.

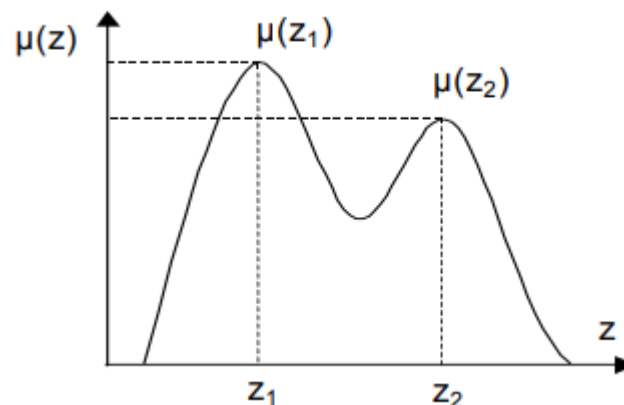


Рисунок 3.2 – Метод середньозваженого по максимуму

У цьому випадку керуючий вплив можна визначити за співвідношенням формулою.

$$z^* = \frac{\mu(z_1)z_2 + \mu(z_2)z_1}{\mu(z_1) + \mu(z_2)}, \quad (3.3)$$

де μ – арифметична функція. z^* – середньозважена величина.

Дослідження, проведені за методами вибору керуючих впливів, показали, що при використанні методу mean of maxima нечіткий алгоритм поводить як позиційне реле і для аналізу застосовні методи класичної теорії нелінійних систем автоматичного управління. У той же час при використанні методу центру площі нечіткий алгоритм ідентичний ПД регулятора і вважається, що цей метод краще рис 3.3. При виборі керуючого впливу слід контролювати рівень функцій приналежності, тобто необхідно встановити певний поріг рішення, нижче якого вибір управляючого впливу проводити не слід.

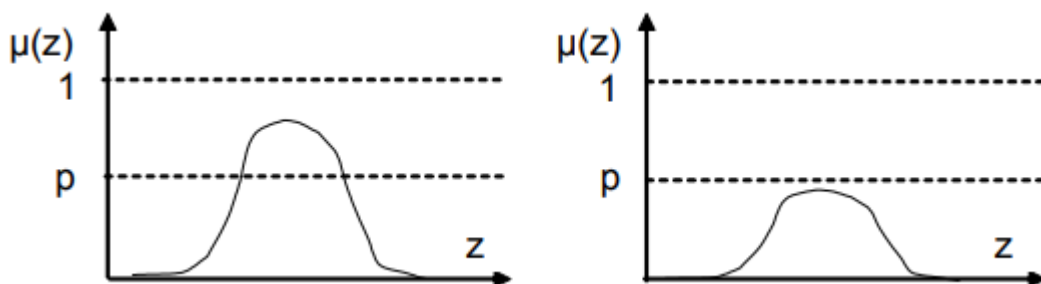


Рисунок 3.3 – Вибір управляючого впливу

У більшості джерел, присвячених нечіткої схемотехніке, детально розглядаються схеми обробки правил умовного логічного висновку і практично відсутні опису реалізації такого важливого вузла, як дефазифікатор.

Особливістю методу дефазифікації є те, що власне значення функції приналежності в характерних точках не використовується в управлінні. Ке-

руючий вплив формується за координатами цих точок незалежно від того, який метод використовується. Методи центру ваги і центру площі вимагають проведення обчислень. Наприклад, центр ваги обчислюється за формулою

$$z^* = \frac{\sum \mu(z_i)z_i}{\sum \mu(z_i)}, \quad (3.4)$$

Де z^* – середньозважена величина. $\sum \mu(z_i)z_i$ – арифметична сума середньозважених чисел.

Розрахунок за формулою може виконуватися за допомогою спеціалізованого обчислювача, який може бути реалізований на базі існуючих мікропроцесорних наборів. Найбільш просто реалізується метод mean of maxima, тобто визначення керуючого впливу по максимуму функції приналежності, визначальною вихідний нечітке підмножина.

Припустимо, що значення функції приналежності представлені двійковим кодом деякої розрядності.

У початковому стані регістр В встановлюється в нуль. У регістр А послідовно заносяться коди значень функції приналежності. Імпульси "Запис" підраховуються в лічильнику циклів запису. Вміст регістрів А і В порівнюються в кодовому компараторе, і якщо $A > B$, то формується сигнал "Перенесення", за яким вміст регістра А переноситься в регістр В, а вміст лічильника циклів запису – в регістр коду MAX. Неважко бачити, що після введення всіх значень функції приналежності в регістрі В буде код її максимуму, в регістрі коду MAX – код координати цього максимуму, який з певним коефіцієнтом пропорційності може використовуватися в якості керуючого впливу.

3.3 Організації обробки правил умовного логічного висновку

Обробка правил умовного логічного висновку відбувається в два етапу:

- пошук за підсумками фазифікація відповідного правила або правил;
- обробка встановлених правил з метою формування результуючої функції належності, на основі якої буде формуватися керуючий вплив.

Розглянемо випадок, коли вибирається тільки одне правило виведення. Це не обмежує спільність, так як специфіка використання декількох правил виведення проявляється головним чином на етапі вибору керуючого впливу.

При виконанні пошуку правил умовного логічного висновку головним обмежуючим фактором є час пошуку. Залежно від складності завдання управління база правил може включати від десятка до сотні, а то й кількох сотень правил. Тому доцільно вести мову тільки про паралельних варіантах пошуку, коли аналізується кілька правил, а то і все одночасно.

Пошук і обробку правил умовного логічного висновку буде виконувати спеціальний пристрій, який назвемо процесором правил [19]¹⁾.

Тут можливі також різні варіанти. Перший варіант передбачає поділ пристроїв зберігання правил і подальшої їх оброблення. У цьому випадку кожна з правил може розглядатися як програма для пристрою обробки. Кожне правило може зберігатися у вигляді довічного слова, певної довжини, в якому виділяються поля по їх функціональному призначенню. Практично це аналог мікропрограмного управління. Обробляє пристрій може бути побудовано за двома варіантами. Використання універсального пристрою під керуванням вбудованого правилом. Природно, що пристрій повинен бути проблемно-орієнтованим.

Це рішення може розглядатися як аналог універсального арифметико-логічного пристрою з мікропрограмного управлінням, широко використовуваним в комп'ютерах загального призначення. Відомий недолік – послідовне виконання команд – очевидно, буде мати місце і в даному випадку. Оскільки обробляти передбачається обмежене число команд, то ближчим аналогом буде RISCархітектура архітектура з скороченим набором команд.

¹⁾ [19] Мелихов А. Н., Бернштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. Москва : Наука, 1990. 272 с.

Інше рішення – це використання набору процесорних модулів, з яких під вбрання правило конфігурується відповідна структура. Таке рішення також відомо в обчислювальній техніці. Основні труднощі будуть пов'язані з ростом апаратних витрат, необхідних для перебудови структури. Очевидно, що вони будуть тим більше, чим складніше правила.

Загальним недоліком цих варіантів є поділ у часі процесів пошуку відповідного нормативного акта та обробки.

Процес пошуку правил виведення може бути організований або по адресному методу, ефективність якого буде падати зі збільшенням складності правил, або по асоціативному, тобто пошуку за змістом, що більш ефективно, але в той же час вимагає більш складних технічних рішень.

На закінчення відзначимо, що розглянуті рішення найбільш ефективні для універсальних контролерів.

У той же час специфіка непарного управління така, що більш раціональним є створення спеціалізованих нечітких контролерів, тому більш доцільними є відмова від програмних методів обробки правил умовного логічного висновку і поєднання в одному пристрої операцій зберігання та обробки.

Іншими словами, для кожного правила призначається свій процесор, структура якого однозначно відображає структуру правила.

При такому підході забезпечується паралельна обробка декількох правил виведення, але в той же час вимагає серйозної уваги проблема мінімізації апаратних витрат.

Найбільш раціональним представляється підхід, коли для побудови процесорів використовується деякий елементарний базовий елемент, на основі якого реалізуються всі необхідні операції. Це дозволить в певній мірі виконати вимоги однорідності та регулярності, що зробить контролер більш технологічним. Таким чином, виникає задача визначення деякого функціонального перетворення, яке повинен виконувати базовий елемент.

Функціональне перетворення базового елемента повинно відповідати, принаймні, двома основними умовами:

- простота реалізації;
- функціональна повнота, тобто з його допомогою шляхом суперпозиції

повинні реалізуватися все певні в теорії нечітких множин перетворення над функціями належності.

Одним з можливих варіантів є використання обмеженою різниці, яка визначається наступним чином, рисунок 3.4.

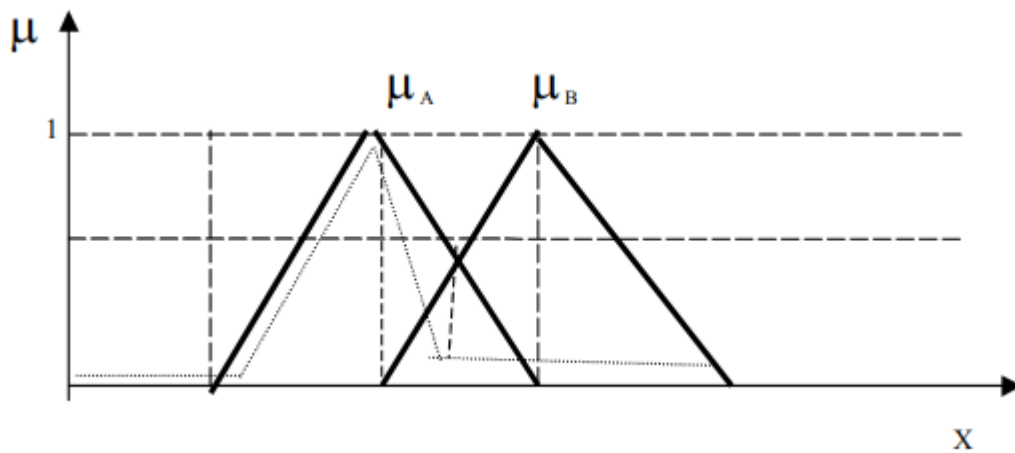


Рисунок 3.4 – Використання обмеженою різниці.

Та формула використання обмежених різниць.

$$\mu_{A-B} = 0 \cup (\mu_A - \mu_B) = \mu_A - \mu_B = \begin{cases} 0, & \mu_A - \mu_B \leq 0 \\ \mu_A - \mu_B & \end{cases}, \quad (3.5)$$

де μ_{A-B} – арифметична функція величин A та B. $0 \cup (\mu_A - \mu_B)$ – об'єднання різниці арифметичних функцій в межах $\begin{cases} 0, & \mu_A - \mu_B \leq 0 \\ \mu_A - \mu_B & \end{cases}$.

При використанні вибору керуючого впливу по максимуму $\mu R(x)$ помилка дискретизації не відіграє суттєвої ролі, оскільки важливо лише

наявність глобального максимуму функцій приналежності, а не його абсолютне значення. При відсутності зворотного зв'язку алгоритм управління може містити тільки однозначну лінійну послідовність команд.

3.4 Складання правил нечіткого управління

Алгоритми нечіткого управління, що представляють якісний процес вирішення завдань, описуються набором правил умовного логічного висновку.

При використанні першого способу, як і при створенні експертних систем, виробляється словесний опис досвіду кваліфікованого фахівця в даній проблемній області, який потім формалізуються у вигляді набору правил «якщо ..., то».

Так само, як і при розробці експертних систем, необхідний інженер по знаннях, тобто фахівець, здатний кваліфіковано працювати з експертом. Цей спосіб був реалізований при управлінні доменною піччю.

Другий спосіб використовується тоді, коли експерт не може описати свої дії, а запам'ятовує маніпуляції механічно. В цьому випадку розробник нечіткого регулятора інженер по знаннях робить спробу описати дії оператора у вигляді правил умовного висновку. цей метод може зажадати кілька ітерацій, для того щоб отримати прийнятний результат.

Спосіб навчання доцільно застосовувати при експериментах на реальному обладнанні, або коли існує наближена його модель.

Правила нечіткого управління формуються шляхом навчання, починаючи з ситуації, коли взагалі немає жодного правила. Навчання можна вести практично безперервно, покращуючи управління відповідно до зміни умов і не привертаючи при цьому експертів. Цей метод зручний при розробці систем управління інтелектуальними роботами. Прикладом застосування цього

методу може служити нечіткий контролер для управління швидкістю автомобіля.

База правил повинна забезпечувати можливість досягнення необхідної точності нечіткої моделі (після того, як визначені параметри останньої). Одночасно з цим, щоб зменшити вартість обчислень і зробити модель більш «прозорою» (інтуїтивно зрозумілій), число правил, що містяться в базі, повинно бути якомога меншим. Більш того, скорочення числа правил в моделі з декількома входами може бути попередньою вимогою для виконання налаштування її параметрів [20]¹⁾.

У літературі можна зустріти твердження про те, що настройка моделі, має більше чотирьох вхідних параметрів, практично неможлива або складними для виконання рис 3.5.

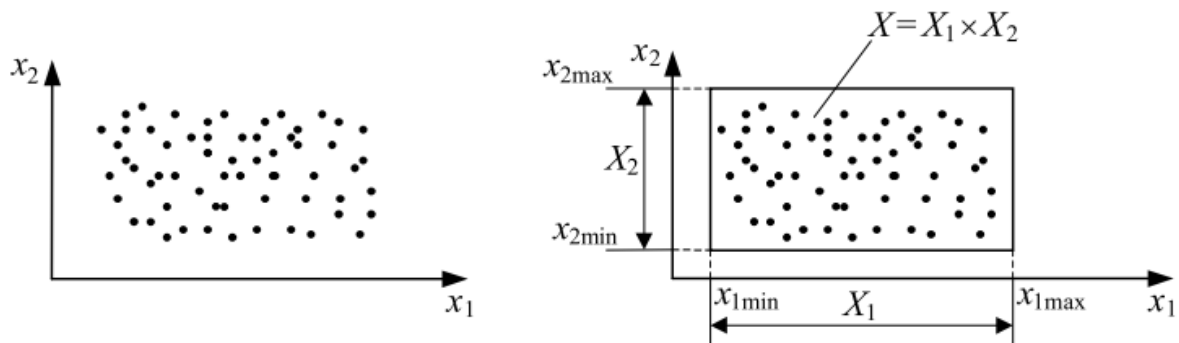


Рисунок 3.5 – Завдання області X значень вхідних параметрів моделі на основі розподілу результатів вимірювання їх значень

Зазначені властивості нечіткої моделі – точність і число правил – є взаємовиключними. При великому числі правил досягнення високої точності моделі потенційно є більш простим завданням, а зменшення числа правил в моделі в загальному випадку знижує її точність. При виборі числа правил необхідно враховувати наступні рекомендації. Число правил збільшується

¹⁾ [20] Нечеткие множества и теория возможностей: Последние достижения / Под ред. Р. Р. Ягера: Пер. с англ. В. Б. Кузьмина под ред. С. И. Травкина. Москва: Радио и связь, 1986. 408 с.

при ущільненні сітки, використовуваної для розбиття простору X входів моделі. Щільність використовуваної для розбиття сітки слід збільшувати в разі більш рельєфній поверхні відображення $X \rightarrow Y$ моделі [21]²⁾.

²⁾ [21] Новак В., Перфильева И., Мочкорж И. Математические принципы нечеткой логики: Пер. с англ. под ред. А. Н. Аверкина. Москва : Физматлит, 2006. 352 с

4 ПРОГРАМНА РЕАЛІЗАЦІЯ НЕЧІТКОГО РЕГУЛЯТОРА

4.1 Середовище розробки нечіткого регулятора

Для розробки і подальшого застосування систем нечіткого виводу в інтерактивному режимі використовувалися наступні графічні засоби, що входять до складу пакета Fuzzy Logic Toolbox. Редактор систем нечіткого виводу FIS (FIS Edition) або скорочено редактор FIS показано на рис. 4.1. Редактор систем нечіткого виводу FIS є основним засобом, що використовується для створення або редагування систем нечіткого виводу в графічному режимі.

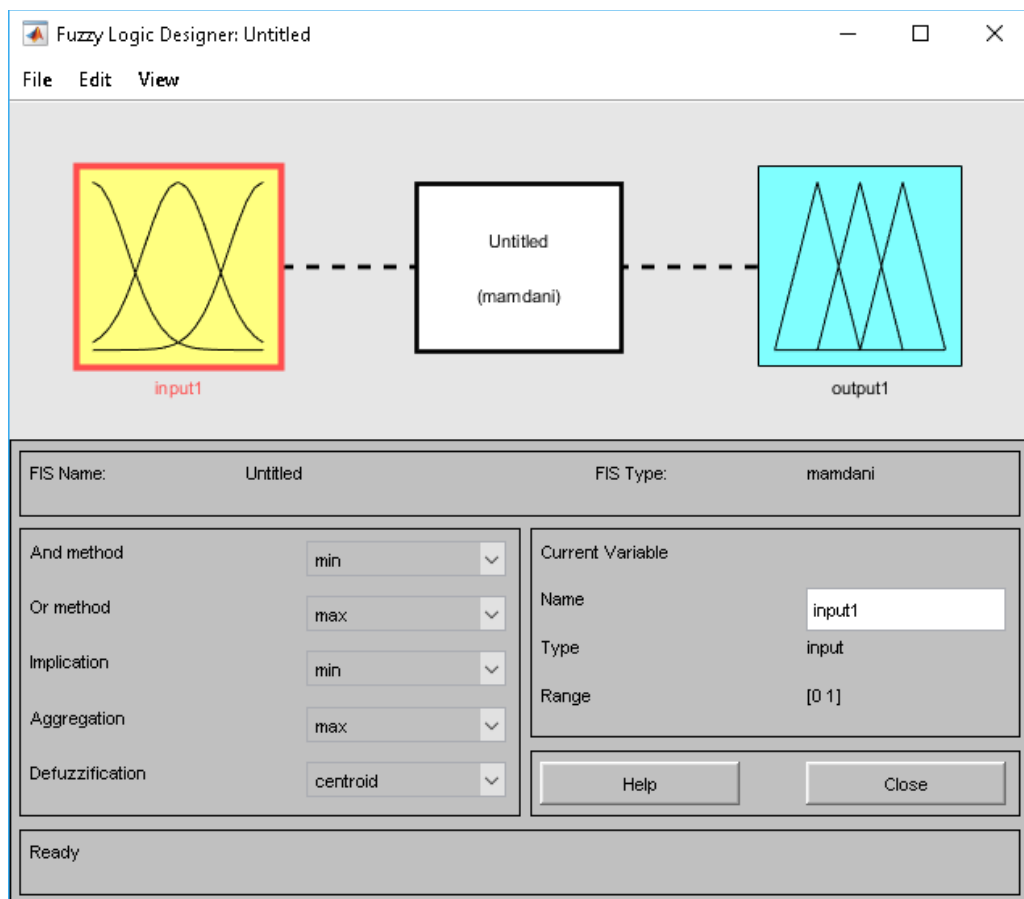


Рисунок 4.1– Графічний інтерфейс редактора FIS

Редактор функцій приналежності системи нечіткого виведення (Membership Function Editor) або скорочено редактор функцій належності зображено на рис. 4.1 Редактор функцій приналежності призначений для завдання і редагування функцій приладдя окремих термів системи нечіткого виведення в графічному режимі.

Для відображення графіків функцій приналежності слід вибрати необхідну змінну в лівій частині графічного інтерфейсу редактора під заголовком FIS Variables на рис 4.2.

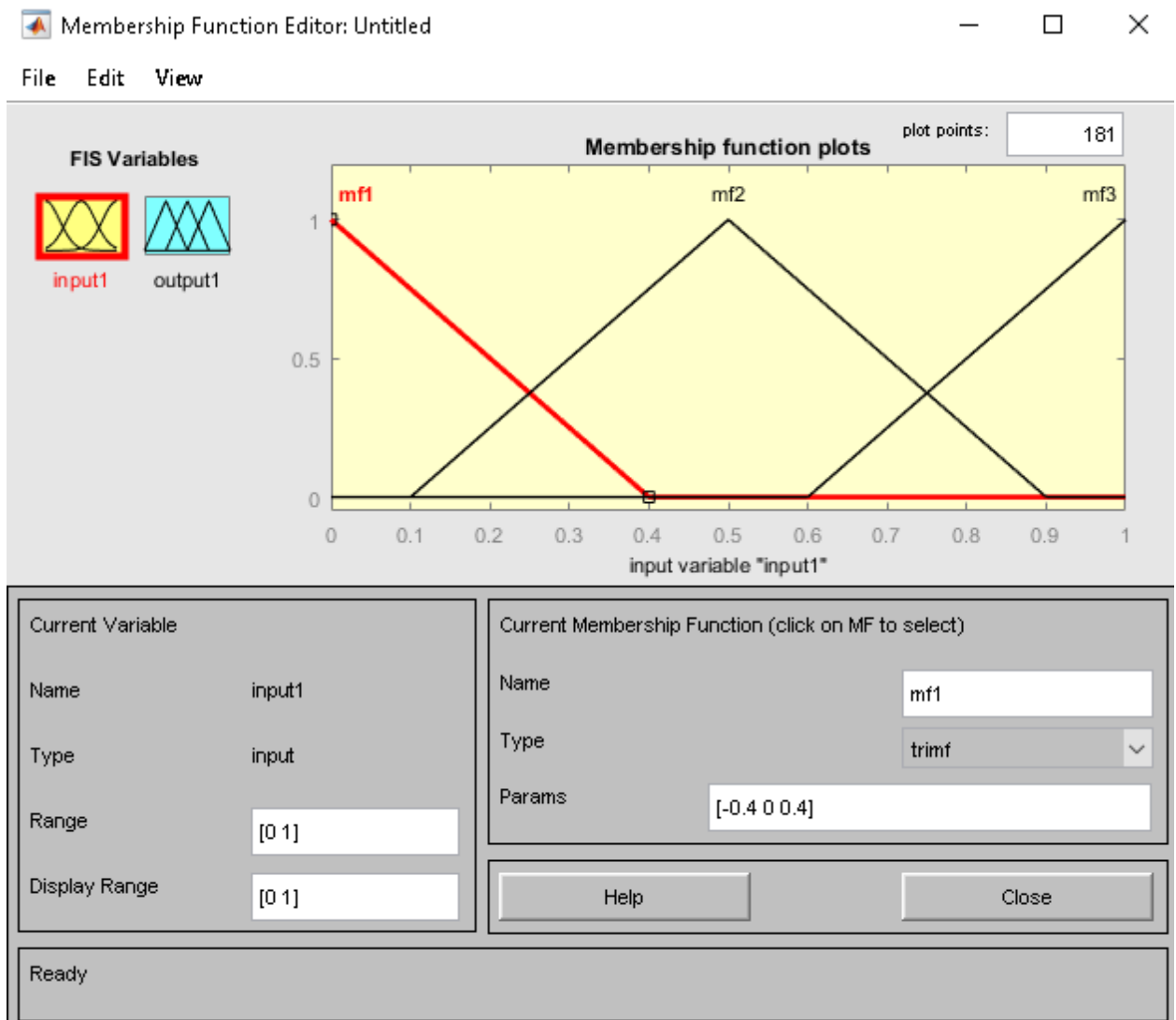


Рисунок 4.2 – Редактор функцій приналежності, що викликається функцією `mfedit`

Редактор правил системи нечіткого виведення (Rule Editor) або скорочено редактор правил зображений на рис. 4.3.

Редактор правил системи нечіткого виведення, як випливає з його назви, призначений для завдання і редагування окремих правил системи нечіткого виведення в графічному режимі.

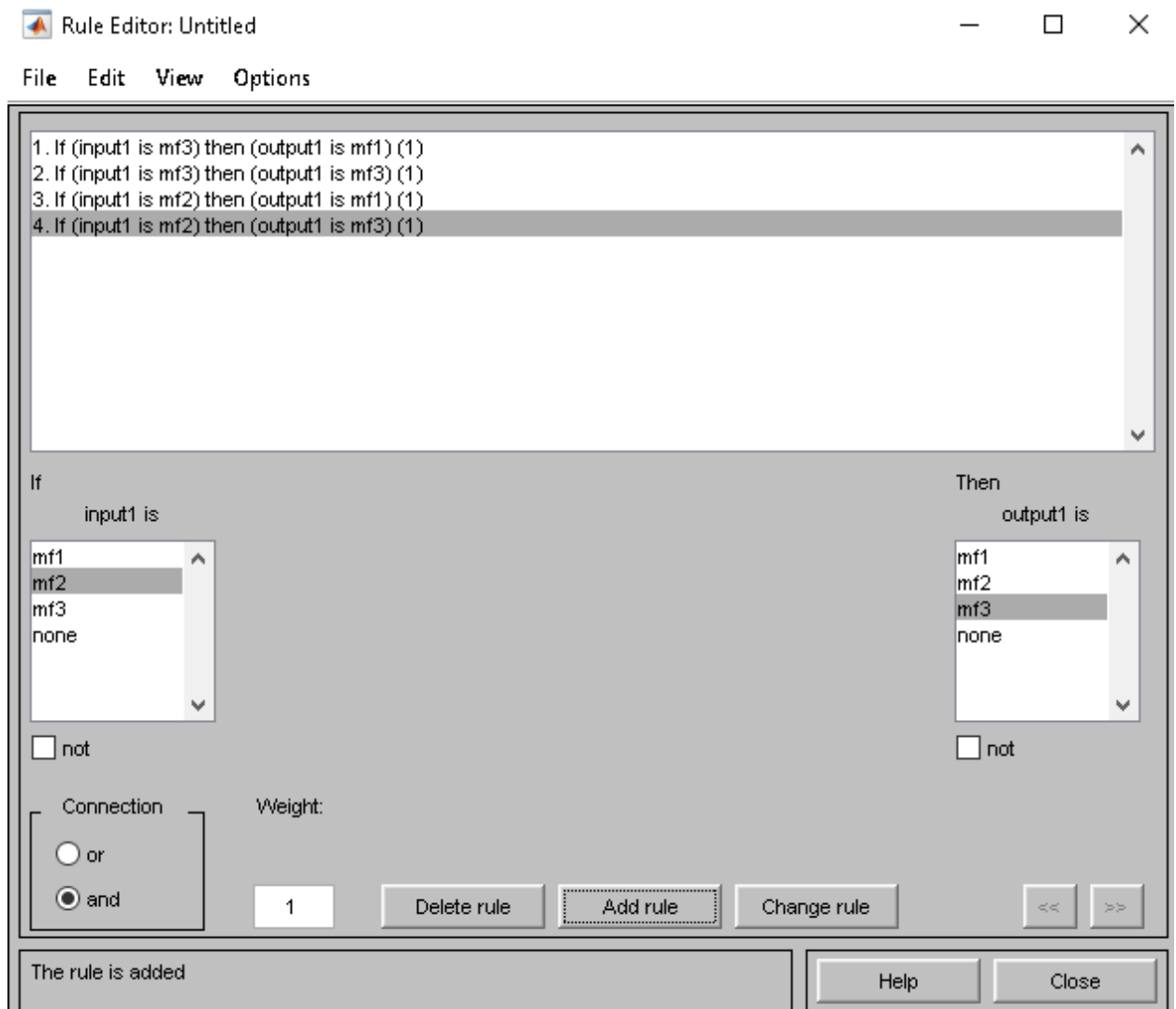


Рисунок 4.3 – Редактор правил, що викликається функцією ruleedit

Редактор правил має головне меню, яке дозволяє користувачеві викликати інші графічні засоби роботи з системою нечіткого виведення FIS, завантажувати і зберігати структуру FIS в зовнішніх файлах.

Програма перегляду правил системи нечіткого виведення (Rule Viewer) або скорочено переглядач правил виведення на рис. 4.4. Головне призначення програми перегляду правил полягає в можливості візуалізувати результати нечіткого виведення і отримувати значення вихідних змінних в залежності від вихідних значень вхідних змінних.

Програма перегляду правил не дозволяє редагувати правила і функції приналежності термів змінних і використовується після розробки системи нечіткого виведення на етапі її аналізу та оцінки.

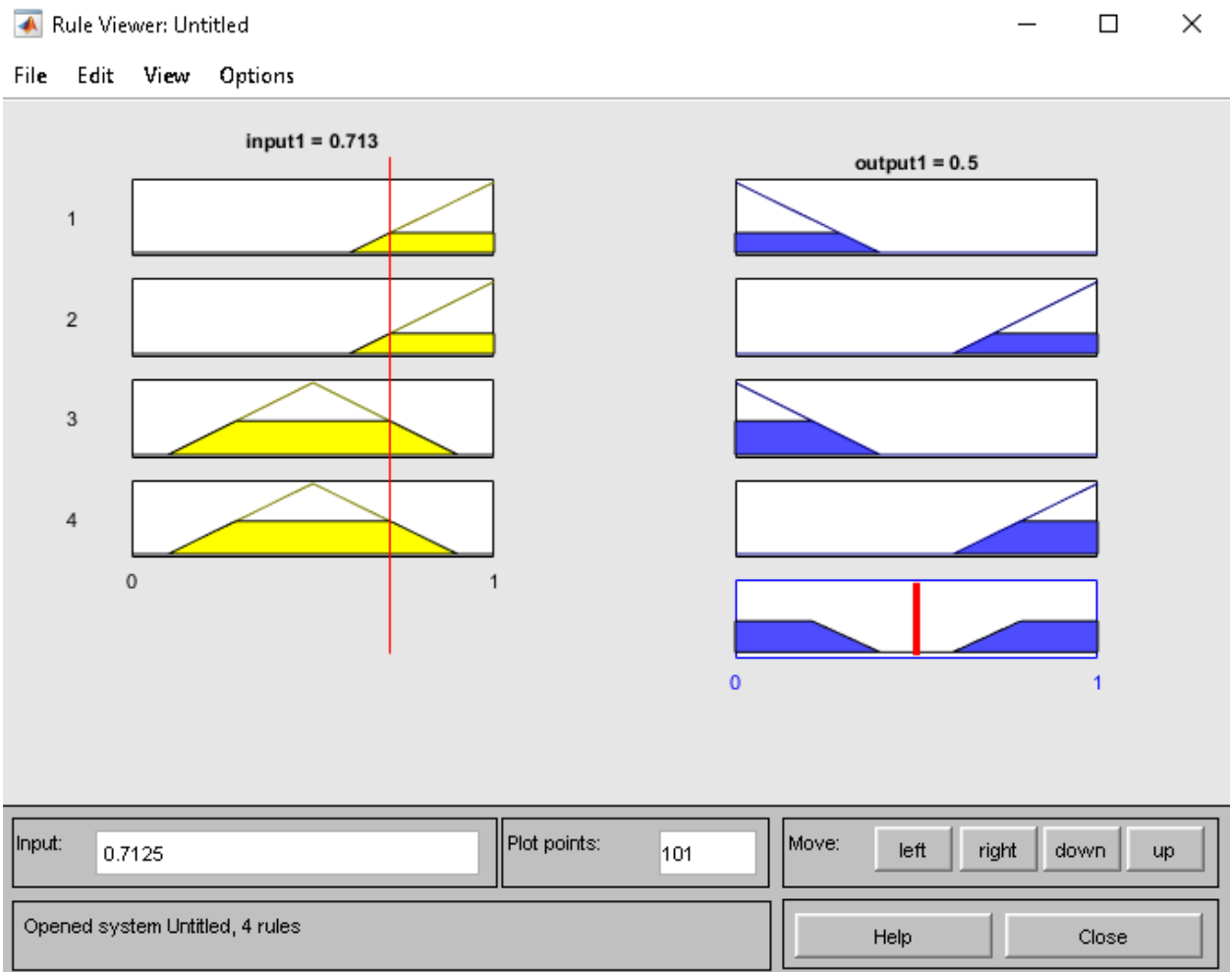


Рисунок 4.4 – Програма перегляду правил, викликана функцією ruleview

Програма перегляду поверхні системи нечіткого виведення (Surface Viewer) або скорочено переглядач поверхні виведення на рис. 4.5. Програма перегляду поверхні системи нечіткого виведення дозволяє переглядати поверхню системи нечіткого виведення і візуалізувати графіки залежності вихідних змінних від окремих вхідних змінних.

Програма перегляду поверхні висновку не дозволяє вносити зміни в систему нечіткого виведення і відповідну їй структуру FIS.

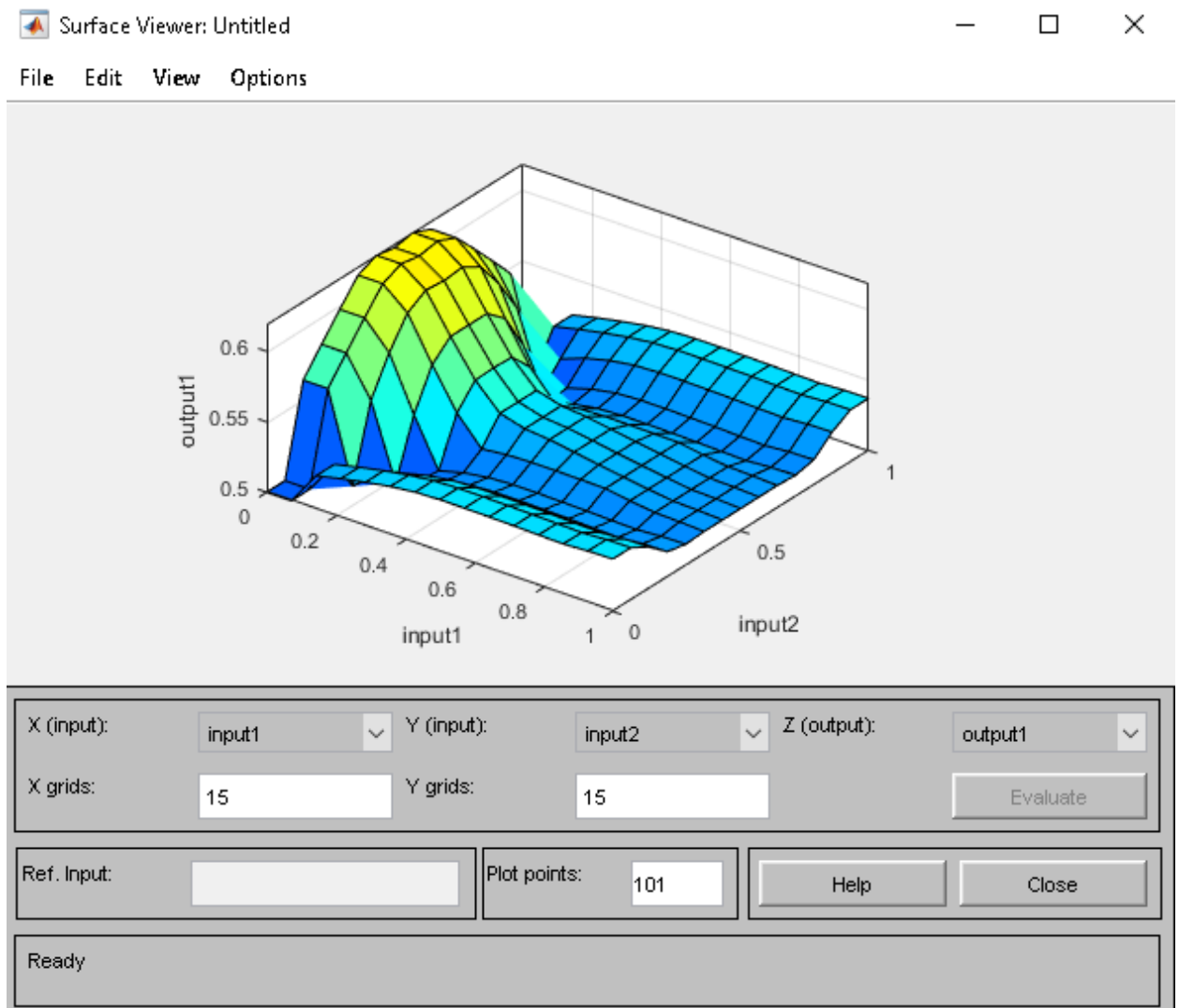


Рисунок 4.5 – Програма перегляду поверхні виведення, що викликається функцією surfview

Використовуючи головне меню програми, користувач може вибрати вхідні змінні і відповідні їм горизонтальні осі системи координат (X та Y), а також вихідну змінну, якій відповідає вертикальна вісь системи координат (Z). Функцію також доцільно використовувати в тому випадку, коли необхідно візуально уявити весь процес нечіткого виведення від початку до кінця. При цьому користувач має віз потужність оцінити значення вихідних змінних нечіткої моделі і вплив кожного з правил на результат нечіткого виведення за допомогою зміни значень вхідних змінних. Якщо функція `fuzzy` викликається без аргументів, то редактор FIS викликається для новостворюваної системи нечіткого виведення з ім'ям `Untitled` за замовчуванням.

4.2 Зчитування первинних даних з Ардуіно

Особливістю записів на більшість SD-картах на мікроконтролери, що не використовують файловою систему, є специфічна організація їх структури зберігання даних, при якій на початку шукається вільний блок (512 Кб або 1024 Кб), в нього вносяться дані і потім перезаписується весь цей блок. З огляду на це доцільно готувати і записувати дані на SD-карту блоком 512 Кб, а не по одному байту [22]¹⁾. Також слід враховувати, що використовуються в Arduino функції `write ()`, `print ()` можуть записувати інформацію тільки в символному вигляді. Функції `write ()` може записати символний рядок об'ємом тільки 255 байт, а `print ()` – 127 байт в коді ASCII. Це пов'язано з використанням у функції `size_t write (const uint8_t * buf, size_t size)` змінної `uint8_t * buf` (8-ми бітного числа). Виходячи з цього впливає, що інформацію доцільно записувати за допомогою функції `write ()` блоком максимальним близьким до 255 байт. Запис по одному байту, як пропонується нерациональна і непродук-

¹⁾ [22] Соммер, У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino Philadelphia: SIAM, 2012. 241 с.

тивно. Вона не забезпечує необхідний мінімальний час реєстрації даних і управління швидкодіючим об'єктом

Для управління швидкодіючими об'єктами, важливу роль відіграє швидкодію системи управління, залежне, як від тактової частоти мікроконтролера, його розрядності, так і часу запису на SD-карту. Щоб вважати 6 байт з 3-х осьового акселерометра, бібліотека посилає адресу читаного регістра. При заповненні символьного рядка до максимально можливого (240 байт), вона записується на SD-карту за допомогою стандартної функції `write ()` і цикл повторюється.

Для запису інформації в символьному вигляді на один параметр (`float`, `long`) потрібно 11–12 символів з роздільником. Звідси виходить, в рядку 255 байт можна записати тільки 5 блоків по 4 параметра ($4 \times 11 - 12 = 220 - 240$ символів). Найбільш гіршим варіантом є запис по одному байту, що знижує продуктивність більш ніж в 1100 разів, т. К. Для кожного символу потрібно спочатку знайти блок, змінити його, а потім перезаписати. Це не дозволяє використовувати такий підхід при реєстрації даних і управління

Для зручності перетворення дані організовані у вигляді структури `struct`. Це дозволяє полегшити їх обробку, перетворення через контрольний механізм, не збільшуючи обсягу інформації.

Записаний на SD-карті масив в подальшому може бути лічений за допомогою функції мови C `fread ()` і занесений в структуру. І далі при необхідності відповідним чином оброблений і використаний. Наприклад, використаний в якості порівняння вихідних даних і порівняння при моделюванні на Matlab / Simulink

```
#include <SPI. h>
#include <SD. h> void loop() {
#include <string. h> // my program
#include <stdio. h> char s1[20];
struct dd { int i;
float d1; //----- збільшити числовий файл 1
float d2; //----- збільшити числовий файл
```

```

float d3; while (j<=mkf)
float d4; {
byte bs[240]; if (kd==0)
int blz; {
int kbz; nfl[0]='\0';
int zsb; itoa(j, nfl,10);
long kbf; strcat(nfl,"test. txt");
}; mF = SD. open(nfl, FILE WRITE);
struct dd fd; kd=1;
void zfl_bs(struct dd *d); Serial. println("File open");
void zbl_sd(struct dd *d); if (j>0)
int j, ibl, kbf, kw, nf, mkf, kd; fd. d1=j;
//kf пахувати файл запису
unsigned long time1, time2;
File mF; //if (kw%kbf==0&&kw==kbf)

```

Повний зміст коду наведений у додатку А (див. А.1).

Алгоритм програми наступний: вважаючи–ються дані з датчиків (в даному випадку імітатора), їх параметри заносяться в структуру, перетворюються і записуються в символний масив блоками по 16 байт. При заповненні масиву 240 байт проводиться запис на SD карту і цикл повторюється. При досягненні певного обсягу файлу, він закривається, відкривається новий файл з відповідним номером і так далі. Такий підхід дозволяє підвищити надійність реєстрації даних і зберегти більшу частину інформації при збоях апаратури.

4.3. Реалізація нечіткого регулятора та бази правил

Для початку потрібно визначити які вхідні параметри будуть подаватися на регулятор. Це частота серцевих скорочень, шкірний опір людської шкіри і частота дихання. Для цього створюємо 3 входу рис 4.6.

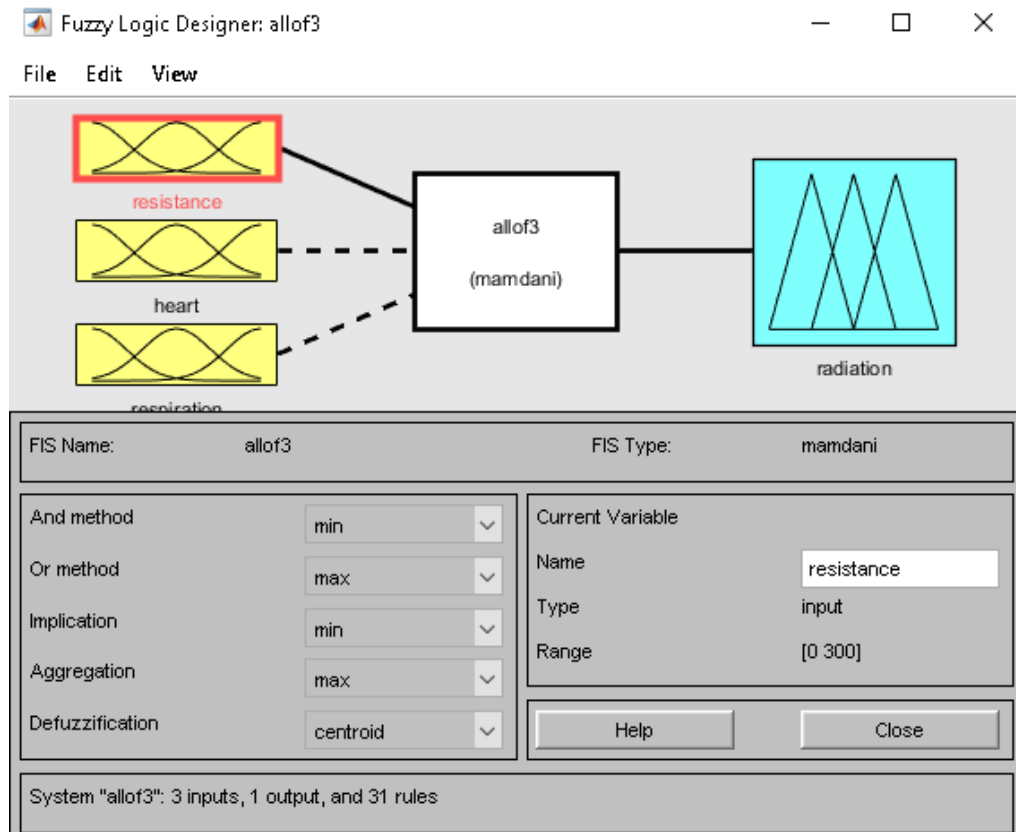


Рисунок 4.6 – Вхідні данні опіру, скорочень та дихання.

Опір тіла людини – в стані спокою і сухому –100КОм до 1 МОм для постійного струму, при рясному потоотденні 400 – 200 Ом. Частота дихання становить 20 – 45 скорочень грудної клітини в хвилину. 20 в стані спокою і 45 при тривалих силових тренуваннях. Частота серцевих скорочень становить 60 – 200 ударів в хвилину. 60 ударів в стані спокою і 150 – 200 при тривалих силових тренуваннях.

Тепер треба вказати діапазон опору шкіри людини: range for resistance = 100КОм – 1МОм. Зробимо це для частоти дихання та серцевих скорочень: range for heart rate = 60 – 200 та range for respiration 18 – 45 рисунок 4.7.

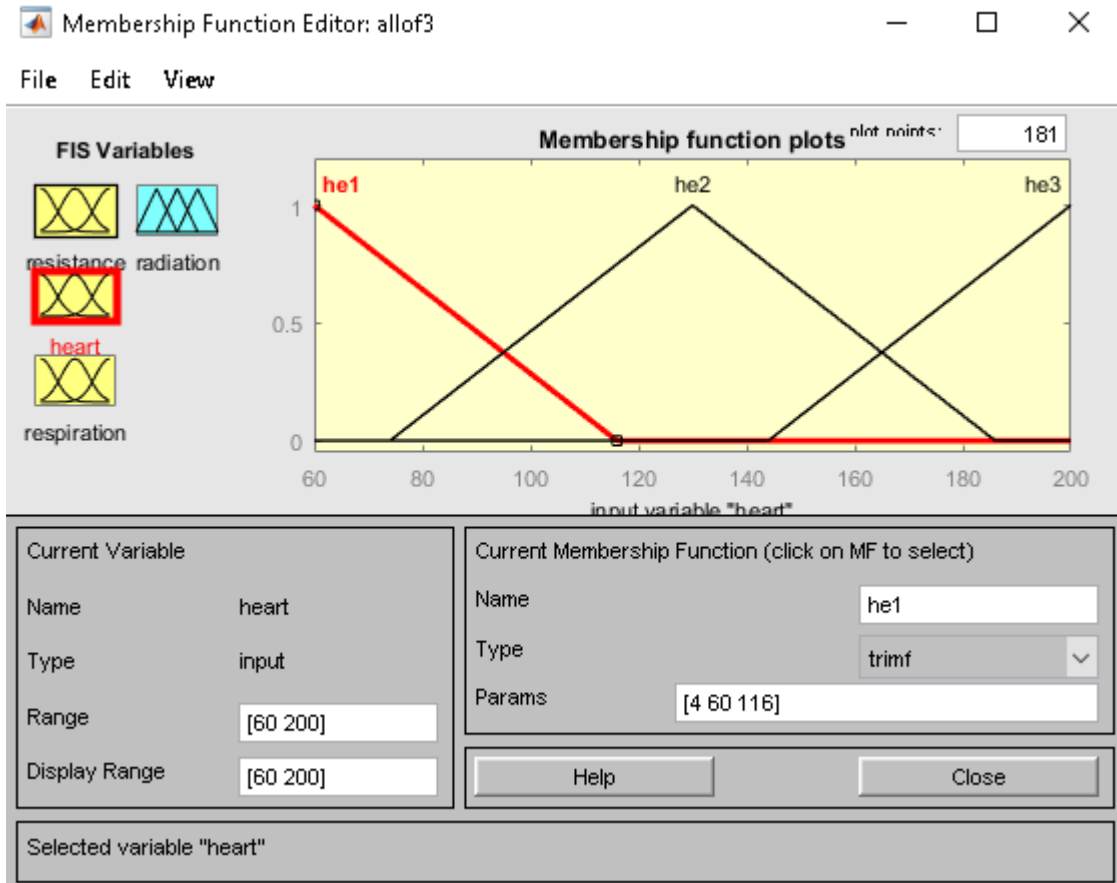


Рисунок 4.7 – Діапазони для вхідних даних

Вихідні при малому відхиленні кожену секунду повинен додавати або віднімати одиницю при малих відхиленнях, дві одиниці при середніх і 4 при великих, що пов'язано з постійною часу ІЧ випромінювачів. Його функції полягають в прийнятті рішень щодо зміни інтенсивності ІЧ випромінювання нагрівачів.

Формування бази правил систем нечіткого виводу і введення нечіткості для вхідних змінних буде реалізовуватися за допомогою алгоритму Мамдані. Повний зміст бази правил наведений у додатку А (див. А.2).

Вносимо правила до fuzzy toolbox та бачимо результат рис. 4.8.

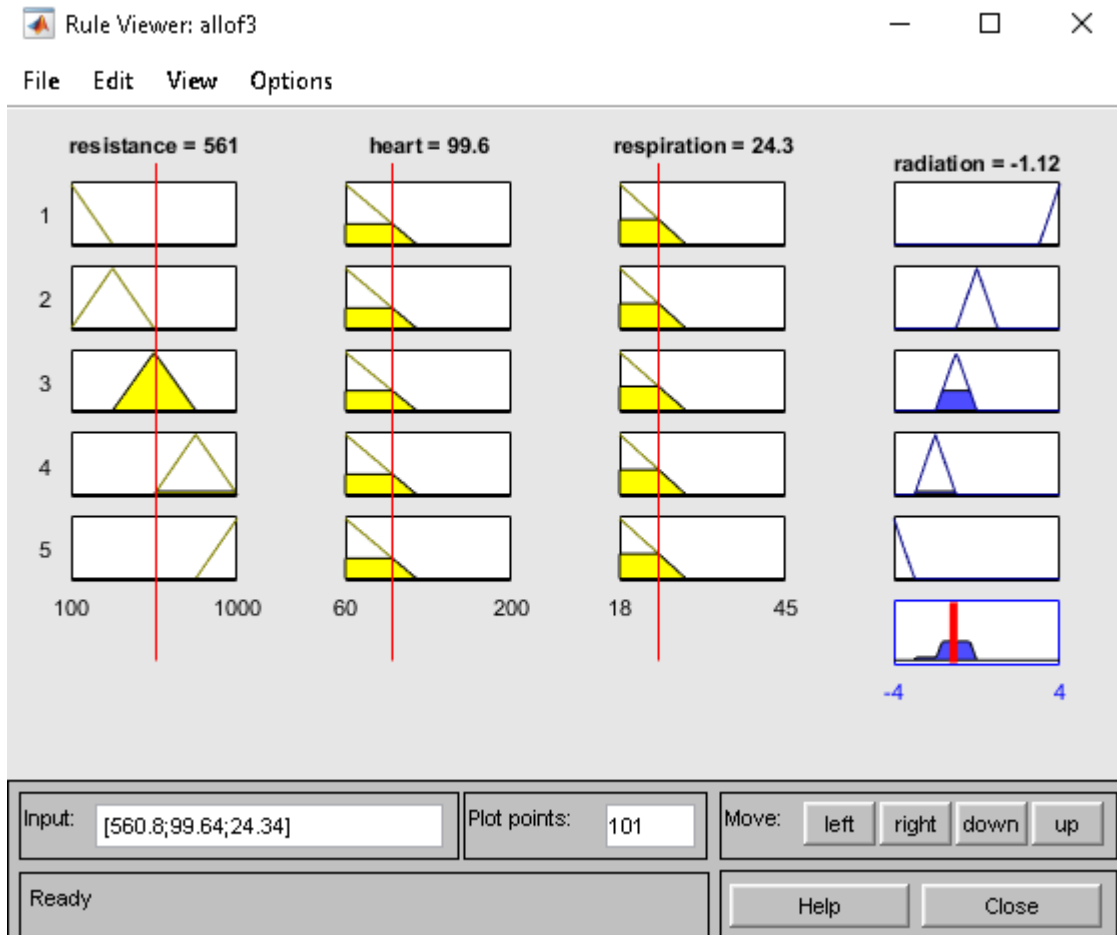


Рисунок 4.8 – Система правил для нечіткого регулятора

Код формування бази правил для нечіткого регулятора:

```
[System]
Name='allof4'
Type='mamdani' // Алгоритм Мамдані
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=5
AndMethod='min' // метод мінімізації
OrMethod='max' // метод максимізації
ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid' // Дефазифікація
[Input1] /// Вхід 1
Name='resistance' // Опір
Range=[100 1000] // Від 100 КОМ до 1 МОМ
NumMFs=5 // Визначення проміжків
MF1='mf1':'trimf',[-125 100 325]
```

```
MF2='mf2': 'trimf', [100 325 550]
MF3='mf3': 'trimf', [325 550 775]
MF4='mf4': 'trimf', [550 775 1000]
MF5='mf5': 'trimf', [775 1000 1225]
```

Повний зміст коду наведений у додатку А (див. А.3).

Та передача параметрів та регулювання температурою продемонстровано у кодї:

```
float trimf(float x, float a, float b, float c){
    float f; if(x<=a)
        f=0;
    else if((a<=x)&&(x<=b))
        f=(x-a)/(b-a);
    else if((b<=x)&&(x<=c))
        f=(c-x)/(c-b);
    else if(c<=x)
        f=0;
    return f;
}
// Функція для прогнозування атмосферного комфорту від температури та відносної вологості
float comfort(float T, float V){
    float C1 = 1; // однотонний, комфортний
    float C2 = 0.5; // однотонний, незручний
    float C3 = 0; // Однотонний, дуже незручний
    if(T>35) T=35; // якщо температура вище 35 ° C,
    Fuzzy rules
    float w1 = min (trimf(V, 0, 50, 100), trimf(T, 10, 22.5, 35));
    comfortable
    float w2 = min (trimf(V, 0, 50, 100), trimf(T, 10, 10, 22.5));
    uncomfortable
    float w3 = min (trimf(V, 0, 50, 100), trimf(T, 22.5, 35, 35));
    uncomfortable
    float w4 = min (trimf(V, 0, 0, 50), trimf(T, 10, 22.5, 35));
    uncomfortable
    float w5 = min (trimf(V, 0, 0, 50), trimf(T, 10, 10, 22.5));
    very uncom
    fortable
    float w6 = min (trimf(V, 0, 0, 50), trimf(T, 22.5, 35, 35));
    very uncomfortable
    float w7 = min (trimf(V, 50, 100, 100), trimf(T, 10, 10, 22.5)); // very uncomfortable
    float w8 = min (trimf(V, 50, 100, 100), trimf(T, 10, 22.5, 35)); // uncomfortable
    float w9 = min (trimf(V, 50, 100, 100), trimf(T, 22.5, 35, 35)); // very uncomfortable
    Defuzzification // Дефазифікація
    float z = (w1*C1 + w2*C2 + w3*C2 + w4*C2 + w5*C3 + w6*C3 + w7*C3 + w8*C2 + w9*C3)/(w1+w2+w3+w4+w5+w6+w7+w8+w9); return z;
```

4.4 Результати моделювання системи

Результатом розробки стало пристрій на базі технології Arduino з програмним продуктом, яке здійснює моніторинг тіньової та радіаційної температури всередині камери інфрачервоної пелюїдотерапія, опору шкірного покриву, частоти серцевих скорочень, частоти дихання.

З наведеного аналізу випливає, що кожен показник повинен мати свій алгоритм перетворення первинної інформації. Деякі ознаки, наприклад радіаційна температура шкірного покриву, можуть бути використані як керуючі і застосовані для зменшення часу запізнювання такого інформативного ознаки як поверхневий опір шкірного покриву. Використання частоти серцевих скорочень передбачає визначення перших похідних і їх подальший аналіз.

Для експериментальної перевірки можливості управління інтенсивністю випромінювання тільки по одному фактору – опору шкірного покриву змодельована система управління інтенсивністю випромінювання інфрачервоними нагрівачами на базі стандартного смартфона та апаратно–програмних засобів Arduino. Система виробляє зчитування даних про опір шкірного покриву з зовнішнього пристрою моніторингу, здійснює фільтрацію сигналу з метою шумозаглушення, генерує графічне зображення процесу, приймає рішення щодо покрокового зміни інтенсивності випромінювання, формує сигнал широтно–імпульсного управління інфрачервоними випромінювачами. Як тестуючого сигналу використаний меандр прямокутних імпульсів, обробка якого дозволяє визначити ступінь шумозаглушення, запізнювання реакції проміжних ланок системи на входні зміни і, як наслідок, вимоги до структури системи, що дозволяє мінімізувати їх вплив.

З наведених залежностей випливає, що опір шкірного покриву є досить інформативним показником, проте час запізнювання вкрай велике, особливо при зниженні інтенсивності випромінювання, що пов'язано з повільним випаровуванням рідини з поверхні шкіри. Виходячи з отриманих результатів

експериментів, стає очевидним, що жоден з наведених ознак не може повністю характеризувати реакцію організму людини на опромінення інфрачервоним полем різної інтенсивності. Тому вимірювані ознаки можна розділити по інформативною і тимчасової значущості. Так, опір шкірного покриву є найбільш інформативним, проте час запізнювання занадто велике, особливо при зниженні інтенсивності опромінення. Результати первинного перетворення істотно залежать від іонної провідності рідини поверхні шкіри, яку необхідно знижувати, наприклад, шляхом примусового охолодження за інформацією про початок зниження інтенсивності опромінення. Ця інформація може бути отримана від пірометра, який відстежує поверхневу температуру шкіри пацієнта. Частота серцевих скорочень у безпосередньому вигляді не дуже інформативна, оскільки вона не відображає процеси перерозподілу потоків крові всередині організму, проте швидкість її зміни досить чітко сигналізує про такі зміни. Зміна показників частоти серцевих скорочень, як і частоти дихання і артеріального тиску, істотно лише при великій інтенсивності теплового потоку.

ВИСНОВКИ

У дипломній роботі розглянуті особливості процесу прийняття рішень при управлінні інтенсивністю опромінення людини в інфрачервоній камері пелоїдотерапія, що працює за схемою з біологічним зворотним зв'язком. Показано, що прийняття рішень вимагає врахування невизначеності декларованої мети, тимчасових інтервалів реалізації процедури, залежно простору ознак людини не тільки від вхідних впливів, але передісторії впливів і станів.

Представлені результати експериментальних досліджень по виявленню значущих ознак, які можуть бути використані при прийнятті рішень з управління потужністю інфрачервоного випромінювання камери пелоїдотерапія системою з біологічним зворотним зв'язком. Показано, що в системі з біологічним зворотним зв'язком вихідні ознаки об'єкта нерівнозначні за значимістю і їм об'єктивно властива невизначеність;

Запропоновано підхід забезпечення можливості прийняття рішення з управління системою інфрачервоної пелоїдотерапія при нечіткості вхідної інформації.

Рекомендації:

- Рекомендується встановити велику вибірку даних з досліджень в інфрачервоній системі пелоїдотерапія.
- Провести більше експериментальних досліджень за участю людей.
- Корекція регулятора нечіткої логіки при великій базі даних клієнтів.

ПЕРЕЛІК ДЖЕРЕЛ ПОСИЛАННЯ

1. Федотов А.А., Акулов С.А. Измерительные преобразователи биомедицинских сигналов систем клинического мониторинга. Москва : Радио и связь, 2013. 250 с.
2. Кулаичев А.П. Компьютерная электрофизиология и функциональная диагностика Москва : ФОРУМ: ИНФРА–М, 2007. 640 с.
3. Ураков, А.Л. Инфракрасное тепловидение и термология как основа безопасной лучевой диагностики в медицине. Фундаментальные исследования. 2013. 747–751 с.
4. Сороко С. И., Трубачев В. В. Нейрофизиологические и психофизиологические основы адаптивного биоуправления СПб.: ИЭФБ РАН, 2010. 607 с.
5. Соловьев С.М. Инфракрасная фотография. Москва.: Искусство, 1960. 216 с.
6. Лебедев П.Д. Сушка инфракрасными лучами. Москва.: ГЭИ, 1955. 232 с.
7. Вайль Ю.С., Варановский Я.М. Инфракрасные лучи в клинической диагностике и медико–биологических исследованиях: Медицина. Ленинград, 1969. 239 с: ил.
8. Циркин Г. М, Шперлинг М.М. К вопросу о применении ЭЭГ– и ЭМГ–биоуправления для преодоления патологического двигательного стереотипа Бюллетень СО РАМН. 2004. № 3. 132–133 с.
9. Деклараційний патент № 58051А Україна: Спосіб пелюдотерапії та камера для його здійснення / Косоверов Є.О., Тищук М.М., Мещеряков В.І., Веселкова Т.О.
10. Круглов В. В., Дли М. М., Голунов Р.Ю. Нечеткая логика и искусственные нейронные сети. Москва: Физматлит, 2001. 224 с.
11. Самарский А.А., Михайлов А.П. Математическое моделирование: идеи, методы, примеры . Москва : Наука, 1997. 320 с

12. Заде Л.А. Принятие решений в расплывчатых условиях, вопросы анализа и процедуры принятия решений / Под ред. И. Ф.Шахнова, с предисл. Г. С. Поспелова. Москва : Мир, 1976. 172–215 с.
13. Заде Л. А. Понятие лингвистической переменной и его применение к принятию приближенных решений: Пер. с англ. Н. И. Ринго под ред. Н. Н. Моисеева и С. А. Орловского. Москва : Мир, 1976. 165 с.
14. Классификация и кластер / Под ред. Дж. Вэн Райзина: Пер. с англ. П. П. Кольцова под ред. Ю. И. Журавлева. Москва : Мир, 1980. 389 с.
15. Кофман А. Введение в теорию нечетких множеств. С предисл. Л. А. Заде: Пер. с франц. В. Б. Кузьмина под ред. С. И. Травкина. С предисл. М. А. Айзермана. Москва : Радио и связь, 1982. 432 с.
16. Кузьмин В. Б. Построение групповых решений в пространствах четких и нечетких бинарных отношений. Москва : Наука, 1982. 168 с.
17. Лю Б. Теория и практика неопределенного программирования: Пер. с англ. Ю. В. Тюменцева и Ю. Т. Каганова под ред. Ю. В. Тюменцева. Москва: БИНОМ. Лаборатория знаний, 2005. 416 с.
18. Малышев Н. Г., Бернштейн Л. С., Боженюк А. В. Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. Москва : Энергоатомиздат, 1991. 136 с.
19. Мелихов А. Н., Бернштейн Л. С., Коровин С. Я. Ситуационные советующие системы с нечеткой логикой. Москва : Наука, 1990. 272 с.
20. Нечеткие множества и теория возможностей: Последние достижения / Под ред. Р. Р. Ягера: Пер. с англ. В. Б. Кузьмина под ред. С. И. Травкина. Москва: Радио и связь, 1986. 408 с.
21. Новак В., Перфильева И., Мочкорж И. Математические принципы нечеткой логики: Пер. с англ. под ред. А. Н. Аверкина. Москва : Физматлит, 2006. 352 с.
22. Соммер, У. Программирование микроконтроллерных плат Arduino Philadelphia: SIAM, 2012. 241 с.

ДОДАТОК А

Коди для нечіткого регулятора

А.1 Код зчитування 3-х параметрів і записи їх на SD-карту

```

#include <SPI. h>
#include <SD. h> void loop() {
#include <string. h> // програма
#include <stdio. h> char s1[20];
struct dd { int i;
float d1; // збільшити числовий файл 1
float d2; // збільшити числовий файл 2
float d3; while (j<=mkf)
float d4; {
byte bs[240]; if (kd==0)
int blz; {
int kbz; nfl[0]='\0';
int zsb; itoa(j, nfl,10);
long kbf; strcat(nfl,"test. txt");
}; mF = SD. open(nfl, FILE WRITE);
struct dd fd; kd=1;
void zfl_bs(struct dd *d); Serial. println("File open");
void zbl_sd(struct dd *d); if (j>0)
int j, ibl, kbf, kw, nf, mkf, kd; fd. d1=j;
//kf рахувати файл запису
unsigned long time1, time2;
File mF; //if (kw%kbf==0&&kw==kbf)
char nfl[24]; if (kw==kbf)
char s1[24]; {
// j++ додає одиницю;
void setup() { //nf=0;
// mF. close();
int i; Serial. println("File close");
kd=0;
// чистить пам'ять МС kw=0;
/* Serial. begin(1200); time2 = millis();
while(Serial. available()) Serial. print("Time write - ");
Serial. read(); Serial. println(time2);
Serial. end(); !
delay(5000); fd. d1=1;
*/ fd. d2=2;
fd. d3=3;
j=0; fd. d4=4;
nf=0; //номер файлу //
kbf=500; // числа блоків у файлі //fd. bs[0]='\0';
mkf=3; // максимальне число блоків у файлі // fd. zsb=0;
kw=0; // числа тексту //

```

```

fd. blz=240;
fd. kbz=16; // 4*4; for (i=0; i<ibl; i++)
time1=0; {
kd=0; fd. d1+=0.001;
pinMode(53, OUTPUT); fd. d2+=0.001;
//fd. bs[fd. blz]=0; fd. d3+=0.001;
// Відкрийте послідовний зв'язок та чекає, поки порт
відкриється:
fd. d4+=0.001;
Serial. begin(250000); zfl bs(&fd);
while (! Serial) { !
; // чекайте підключення послідовного порту. Потрібно для
рідного USB порт тільки zbl sd (& fd);
} //if (kjkbf==0)
Serial. print("initializing SD card..."); //mF. close();
if (! SD. begin(53)) { Serial. println("initialization
failed!"); return;
}
else
Serial. println("initialization done."); //while (! seri-
al); time2=0;
ibl=fd. blz/fd. kbz;
sprintf(s1"%ld%ld%ld\n", ibl, fd. zsb, fd. blz);
Serial. print(s1);
if (j==mkf) {
time2 = millis();
Serial. print("Time write - ");
Serial. println(time2);
Serial. println("Record File done."); }
} // Закінчення загрузки
//j++; }
//mF. close(); }
// Запис поплавця в struct bs
void zfl_bs(struct dd *d) {
int i;
byte *yf, *ys;
yf=(byte *)&d->d1;
ys=(byte *)&d->bs[0] + d->zsb;
if (d->zsb!=d->blz) {
for (i=0; i<d->kbz; i++)
*ys++=*yf++;
d->zsb= d->zsb + d->kbz; }
else {
d->bs[0]='\0'; d->zsb=0;
void zbl_sd(struct dd *d) {
int i, t, m; byte *yf, *ys; byte z; //bl=d->blz; z=240;
if (d->zsb==d->blz) {
mF. write((const uint8_t *)&d->bs, z); kw++;
} // if (d->zsb==d->blz)

```

A.2 Бази правил для нечіткого регулятора

1. If (resistance is mf1) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is plus4) (1)
2. If (resistance is mf2) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is nothing) (1)
3. If (resistance is mf3) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is minus1) (1)
4. If (resistance is mf4) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is minus2) (1)
5. If (resistance is mf5) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is minus4) (1)
6. If (resistance is mf2) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is nothing) (1)
7. If (resistance is mf5) and (heart is he3) and (respiration is res3) then (radiation is minus4) (1)
8. If (resistance is mf5) and (heart is he3) and (respiration is res3) then (radiation is minus2) (1)
9. If (resistance is mf4) and (heart is he3) and (respiration is res3) then (radiation is minus1) (1)
10. If (resistance is mf3) and (heart is he3) and (respiration is res3) then (radiation is minus1) (1)
11. If (resistance is mf2) and (heart is he3) and (respiration is res3) then (radiation is minus2) (1)
12. If (resistance is mf2) and (heart is he2) and (respiration is res2) then (radiation is minus1) (1)
13. If (resistance is mf2) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is plus1) (1)
14. If (resistance is mf5) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is minus4) (1)
15. If (resistance is mf5) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is minus2) (1)
16. If (resistance is mf3) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is plus2) (1)
17. If (resistance is mf3) and (heart is he1) and (respiration is res1) then (radiation is plus1) (1)

A.3 Код формування бази правил для нечіткого регулятора

```
[System]
Name='allof4'
Type='mamdani' // Алгоритм Мамдані
Version=2.0
NumInputs=3
NumOutputs=1
NumRules=5
AndMethod='min' // метод мінімізації
OrMethod='max' // метод максимізації
```

```

ImpMethod='min'
AggMethod='max'
DefuzzMethod='centroid' // Дефазифікація
[Input1] // Вхід 1
Name='resistance' // Опір
Range=[100 1000] // Від 100 КОМ до 1 МОМ
NumMFs=5 // Визначення проміжків
MF1='mf1':'trimf',[-125 100 325]
MF2='mf2':'trimf',[100 325 550]
MF3='mf3':'trimf',[325 550 775]
MF4='mf4':'trimf',[550 775 1000]
MF5='mf5':'trimf',[775 1000 1225]
[Input2] // Другий вхід
Name='heart' // Частота серцевих скорочень
Range=[60 200]
NumMFs=3
MF1='he1':'trimf',[0 60 120]
MF2='he2':'trimf',[80 130 180]
MF3='he3':'trimf',[140 200 260]
[Input3] // Третій вхід
Name='respiration' // Частота дихання
Range=[18 45]
NumMFs=3
MF1='res1':'trimf',[7.2 18 28.8]
MF2='res2':'trimf',[20.7 31.5 42.3]
MF3='res3':'trimf',[34.2 45 55.8]
[Output1] // Вихід
Name='radiation' // Для регулювання випромінюванням
Range=[-4 4]
NumMFs=7
MF1='minus4':'trimf',[-5 -4 -3] // -4 від стандартного значення
MF2='minus2':'trimf',[-3 -2 -1] // -2
MF3='minus1':'trimf',[-2 -1 0] // -1
MF4='nothing':'trimf',[-1 0 1] // 0
MF5='plus1':'trimf',[0 1 2] // +1
MF6='plus2':'trimf',[1 2 3] // +2
MF7='plus4':'trimf',[3 4 5] //+4
[Rules] // Правила для регулювання температурою
1 1 1, 7 (1) : 1
2 1 1, 4 (1) : 1
3 1 1, 3 (1) : 1
4 1 1, 2 (1) : 1

```


5 1 1, 1 (1) : 1
2 1 1, 4 (1) : 1
5 3 3, 1 (1) : 1
5 3 3, 2 (1) : 1
4 3 3, 3 (1) : 1
3 3 3, 3 (1) : 1
2 3 3, 2 (1) : 1
2 2 2, 3 (1) : 1
2 1 1, 5 (1) : 1
5 1 1, 1 (1) : 1
5 1 1, 2 (1) : 1
3 1 1, 6 (1) : 1
3 1 1, 5 (1) : 1