

Національний університет «Одеська морська академія»

Міністерства освіти і науки України

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Харченко Роман Юрійович

УДК 629.5.048 + 681.58

ДИСЕРТАЦІЯ

ГІБРИДНІ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНІ МЕРЕЖІ ДЛЯ СУДНОВИХ СИСТЕМ МІКРОКЛІМАТУ

Спеціальність 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту

Подається на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук

Технічні науки

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело



Р.Ю. Харченко

Науковий керівник д.т.н. професор Михайлов С. А.

Одеса – 2018

АНОТАЦІЯ

Харченко Р.Ю. Гібридні інтелектуальні мережі для суднових систем мікроклімату. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук (доктора філософії) за спеціальністю 05.22.20 – експлуатація та ремонт засобів транспорту. – Національний університет «Одеська морська академія», Одеса, 2018.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-прикладної задачі – підвищення ефективності експлуатації суднових систем комфортного мікроклімату. В роботі виконано огляд літературних джерел та проведено аналіз напрямків вирішення проблеми забезпечення приміщень суден комфортними умовами мікроклімату разом з покращенням техніко-економічних показників. Було виявлено, що основними напрямками вирішення даної проблеми є впровадження сучасних інтелектуальних систем управління та експлуатації суднового кліматичного обладнання та розробка методів моніторингу та діагностики роботи обладнання. Обґрунтовано напрями дисертаційного дослідження, які присвячені проблемі вдосконалення програмного забезпечення та впровадженню сучасних інтелектуальних гібридних методів експлуатації. Об'єктом дослідження є внутрішньосуднове атмосферне середовище, а предметом – параметри мікроклімату суднових приміщень.

Методологічна структура дисертаційного дослідження відображена в технологічній карті, за допомогою якої здійснено методологічне забезпечення дисертаційної роботи. Тут відображена мета дисертаційного дослідження і його головне завдання, яке розділено на чотири незалежні складові задачі. Запропоновано робочу гіпотезу наукового дослідження, показано, що спрогнозовані наукові результати дисертаційної роботи стануть рішенням незалежних складових задач. Також спрогнозоване головне наукове положення, показано практичну цінність і наукову значимість дисертаційного дослідження.

В основній частині дисертації розглянуто теоретичні основи роботи кліматичних систем судна, отримані математичні моделі та алгоритми, що враховують

динаміку при зміні параметрів повітряної суміші. Особливості експлуатації описані математичними моделями з різними методами управління і ступенем врахування зовнішніх впливів, які у свою чергу мають різний рівень якості та адекватності результату.

Відбулася програмна реалізація системи з врахуванням збурюючих факторів із застосуванням паралельної роботи декількох регуляторів. Розроблено алгоритм роботи та модуль динамічно-підключаємої бібліотеки, приведені необхідні аналітичні вирази. На базі складених алгоритмів розроблений модуль програми, що дозволяє розрахувати параметри і провести імітаційне моделювання. Для моделювання використовувалися експертні експлуатаційні дані реальних суден, одержані в реальних умовах експлуатації.

Моделі, які розглянуті у другому та третьому розділах можуть бути застосованими при відносно незначних вимогах до якості складу та температурних показниках повітряної суміші та на суднах з невеликими переходами в одній кліматичній зоні, коли можна нехтувати багатьма зовнішніми параметрами збурення.

Пропонується на перехідному етапі до повної автоматизації при експлуатації обладнання використовувати систему підтримки прийняття рішень. У запропонованому варіанті побудови такої системи функцію адаптації виконують нейронні мережі, здатні до самонавчання. Дана інтелектуальна система має властивості самонавчання і адаптації.

У заключному розділі роботи розглянуто альтернативний метод експлуатації систем мікроклімату із застосуванням інтелектуальних систем в єдиному комплексі. Отримано аналітичні вирази для побудови гібридної інтелектуальної мережі. За допомогою запропонованого методу проведено розрахунок параметрів системи на прикладі окремих вузлів, значення яких збігаються зі стандартизованими для задовільної роботи даних систем. Розглянуто вплив збурюючих факторів, отримані формульні вирази для розрахунку характеристик. Проведена їх оцінка для конкретного випадку та виконано розрахунок перехідних характеристик.

Представлені у табличному вигляді бази знань для синтезу відповідних регуляторів. Окрім табличних залежностей наведені графічні криві, що відобража-

ють залежність параметрів від моделі що застосовується, отримані за допомогою комп'ютерної програми.

В результаті дисертаційного дослідження встановлено, що застосування гібридних інтелектуальних мереж дозволило вирішити завдання оптимізації процесів повітрообміну. На основі апарату нейро-нечіткої логіки та генетичних алгоритмів запропоновано інтелектуальні системи управління якістю повітря із можливістю розширення списку контрольованих параметрів та складу повітряної суміші. Імітаційні експерименти запропонованих моделей продемонстрували їх ефективність у порівнянні з традиційними в плані досягнення найкращих показників якості в процесі експлуатації. Розроблена система придатна для експлуатації в автоматичному або супервізорному режимі та дозволяє формувати завдання локальним вузлам, виводячи експлуатацію систем на новий рівень комфорту і дозволяє досягнути значної економії електроенергії в порівнянні з діючими. Також запропоновано систему діагностики технічного стану обладнання, яка відрізняється функцією врахування експертного досвіду і можливістю одночасного розрахунку показників надійності, що підвищує ступінь достовірності результату. Експериментальним шляхом встановлено, що робота системи за допомогою апарату нейро-нечіткої логіки, в якій враховується експертний досвід та реалізуються апарат штучного інтелекту, може бути з прийнятною для практичного застосування точністю.

Наукова новизна отриманих в дисертації результатів полягає в створенні нового методу побудови систем мікроклімату судна за допомогою гібридних інтелектуальних мереж.

У дисертаційній роботі:

Вперше запропоновано метод інтелектуальної експлуатації системи мікроклімату судна на базі гібридних мереж управління, який відрізняється поліпшеними показниками якості перехідних процесів в порівнянні з діючими, також запропоновано метод моніторингу, що діє на основі апарату нейро-нечіткої логіки та генетичних алгоритмів і дозволяє оптимально підтримувати співвідношення воло-

гості і температури повітря і знизити енергоспоживання виконавчих механізмів системи.

Отримали подальший розвиток: методи теорії нечіткої логіки та нейронних мереж в системах моніторингу параметрами вузлів системи мікроклімату; методи створення бази правил нечітких регуляторів для адаптації регуляторів в процесах зміни режимів роботи обладнання.

Удосконалено: методи роботи нечітких регуляторів по ідентифікації показників експлуатаційних процесів, що дозволяє проводити стабілізацію контрольованих параметрів за мінімальний час регулювання в порівнянні з традиційними. Математичні моделі отримані в ході активних і пасивних експериментів, забезпечують можливість проведення адаптації параметрів регуляторів; системи діагностики технічного стану обладнання відрізняються функцією врахування експертного досвіду і можливістю прогнозування процесу зносу, що знижує ступінь розвитку аварійної ситуації.

Практичне значення отриманих в дисертації результатів полягає в тому, що вони можуть бути використані на суднах в процесі експлуатації, а також розробниками суднових систем комфортного мікроклімату.

Практичні результати дисертаційного дослідження впроваджені:

- у методику та роботу із модернізації систем автоматичного управління теплоенергетичними процесами енергоблоків і допоміжного енергетичного обладнання Ладизинської ТЕС;

- в роботі з модернізації систем автоматичного управління процесами повітрообробки в приміщеннях; в проектуванні і розробці адаптивної інтелектуальної системи автоматичного управління систем кондиціонування і вентиляції Ладизинської ТЕС.

- в проектуванні і розробці адаптивної інтелектуальної системи автоматичного управління систем кондиціонування і вентиляції із застосуванням регуляторів що працюють на базі контролерів з нечіткою логікою в проектно-монтажній компанії ТОВ «Енергетичні Інвестори»;

- при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт в період з 2008 по 2018 кафедри Морської електроніки НУ «ОМА».

Основні наукові і практичні результати роботи були впроваджені в навчальний процес кафедри Морської електроніки НУ «ОМА» у вигляді глав лекційного курсу та деяких лабораторно-практичних робіт з дисциплін «Програмне забезпечення вбудованих комп'ютерних систем», «Контроль і діагностика суднових електронних і електротехнічних систем» та «Електронні судові системи».

Ключові слова: Гібридні інтелектуальні мережі, нечіткі контролери, нейронні мережі, генетичні алгоритми, системи підтримки прийняття рішень, суднові системи комфортного мікроклімату, фазифікація, база знань.

Основні результати дисертаційного дослідження здобувача опубліковані в наступних наукових працях:

Основні наукові результати дисертації.

1. Михайленко В. С. Сравнительный анализ робастной и нечеткой АСР действующих в условиях неопределенности/ В.С. Михайленко, Р.Ю.Харченко // Сборник научных трудов КНТУ. Вып. 22 (часть 2). – 2011. – С. 198-206.

2. Михайленко В. С. Использование нечеткого алгоритма Такаги – Сугено в адаптивных системах управления сложными объектами/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Научно-теоретический журнал Искусственный интеллект. – 2011. – №2. – С. 53-59.

3. Михайленко В. С. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Электротехнические и компьютерные системы.– 2011. – № 4 (80). – С. 199-204.

4. Михайленко В. С. Сравнительный анализ теории принятия решений в условиях неопределенности и нечеткой логики на примере настройки ПИ – регу-

лятора/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // АСУ и приборы автоматики. – 2011. – № 154. ХНУРЭ. – С. 76-83.

5. Михайленко В. С. Застосування гібридних мереж в адаптивних системах управління теплоенергетичних об'єктів/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Наукові праці ВНТУ.– 2012. – № 1.– С.1-9.

6. Михайленко В. С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ – регулятора по идентификации переходного процесса/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Труды Одесского политехнического университета. – 2012. – № 1 (38). – С. 152-156.

7. Михайленко В. С. Синтез адаптивного нечеткого регулятора с прогнозирующей нейро-нечеткой сетью/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Вісник СумДУ. Серія “Технічні науки”, №3, 2012. – С. 30-37.

8. Михайленко В. С. Анализ традиционных методов адаптации систем автоматического управления и их усовершенствование с использованием нейронных сетей/ В. С. Михайленко, Р. Ю.Харченко // Радиоэлектронные и компьютерные системы № 4(56), 2012. – С. 50-56.

9. V. S. Mikhailenko Analysis of Traditional and Neuro_Fuzzy Adaptive Systemof Controlling the Primary Steam Temperature in the Direct Flow Steam Generators in Thermal Power Stations/ V. S. Mikhailenko, R. Yu. Kharchenko // Automatic Control and Computer Sciences, 2014, Riga Vol. 48, No. 6, pp. 334–344.

10. Харченко Р. Ю. Анализ адаптивных методов настройки нечетких и ПИ – регуляторов в сложных объектах управления/ Р. Ю. Харченко, В. С. Михайленко // Научные труды ХПИ.– 2012. –№37.– С. 78-89.

11. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети для оптимизации режимов эксплуатации судовых систем комфортного микроклимата/ С. А. Михайлов, Р. Ю. Харченко // Судовые энергетические установки: научно- технический сборник. Вып. 36.–Одесса: НУ «ОМА», 2016. С. 24-32.

12. Харченко Р. Ю. Методы адаптивного регулирования в системе климатического контроля судна/ Р. Ю. Харченко //Автоматизація суднових технічних засобів, Науково-технічний збірник ОНМА, випуск 17, 2011. С. 95-106.

13. Харченко Р. Ю. Сравнительный анализ методов активной адаптации ПИ-регуляторов и нечетких регуляторов для систем кондиционирования и вентиляции (СКВ) морских судов/ Р. Ю. Харченко // Науковий вісник ХДМА. Науковий журнал. Херсонська державна морська академія. №2 (7) 2012 г. С. 276-286.

14. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети/ С. А. Михайлов, Р. Ю. Харченко // Монография, ISBN: 978-620-2-07416-2, издательство LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2017, 225 с.

Публікації які засвідчують апробацію матеріалів дисертації.

15. Михайленко В. С. Исследование гибридной сети при идентификации объекта управления в системах поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Вторая Международная научно-техническая конференция «Компьютерные науки и технологии» КНиТ-2011. 3-5 октября 2011 г. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Белгород, Россия. С. 268-272.

16. Михайленко В. С. Сравнительный анализ методов анализа иерархий и нечеткой логики в системе поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 15-й Международной конференции «Информационные интеллектуальные системы». – 2011. – Харьков. – С. 297-298.

17. Михайленко В. С. Методы дефаззификации в алгоритмах нечеткого вывода/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 8-й региональной конференции молодых ученых «Информатика, информационные системы и технологии». – 2011. – Одесса. – ОГУ. - С. 7-8.

18. Михайленко В. С. Сравнительный анализ теорий принятия решений в условиях неопределенности и нечеткой логики на примере настройки ПИ-регулятора/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «АСУ и приборы автоматизации», 2011, Харьков, выпуск 154. С. 76-83.

19. Михайленко В. С. Синтез нейросетевой СППР нагрузки между энергоблоками СЭУ/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 8-й дистанцион-

ной международной научно-практической конференции «Системы поддержки принятия решений. Теория и практика. СППР 2012» (Киев). – С. 46-49.

20. Михайленко В. С. Нейро-нечеткие технологии в системах поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко //Материалы международной научно-практической интернет конференции «Advanced Information Systems and Technologies, AIST 2012» (Сумы). – С. 144-146.

21. Михайленко В. С. Анализ научных подходов в теории нейросетевых систем управления сложными объектами/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Сборник трудов международной молодежной конф. «Прикладная математика, управление и информатика» Белгород (Россия).– 2012. – Том 2. – С. – 481-485.

22. Михайленко В. С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ-регулятора по идентификации переходного процесса/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко //Материалы 19-й Международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика-2012». (Киев), Том 1.– С. 117.

23. Михайленко В. С. Анализ метода оценки настраиваемой модели объекта в процессе адаптации САУ/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Научный журнал: Сборник научных трудов SWorld. Вып. 4, Т.14 - Одесса, 2012 – С. 10-13.

24. Харченко Р. Ю. Анализ традиционных и новых методов вычислений в системах поддержки принятия решений/ Харченко Р. Ю. // Материалы научно-технической конференции «Энергетика судна: эксплуатация и ремонт», 05.04.2011 – 07.04.2011. – Одеса: ОНМА, 2011, С. 308-310.

25. Харченко Р. Ю. Адаптивное регулирование в системах климатического контроля/ Харченко Р. Ю. // Десятая всеукраинская научно – техническая конференция «Математическое моделирование и информационные технологии»(ММИТ-2011), Одесса, ОГАХ. 23-25.10. С. 81-82.

26. Михайленко В. С. Использование интеллектуальных систем поддержки принятия решений в автоматизации процессов управления судном/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Третя Міжнародна науково-практична конференція

«Сучасні інформаційні та іноваційні технології на транспорті MINTT-2011» 23 – 25 травня 2011 р. Херсон. С. 59 1-й том.

27. Харченко Р. Ю. Сравнительный анализ традиционных и нечетких методов регулирования в системах кондиционирования воздуха (СКВ)/ Харченко Р. Ю. // XII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів та студентів “Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій” 11-12 квітня 2012 р. Одеса, ОДАХ. С.38-40.

28. Харченко Р. Ю. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления/ Харченко Р. Ю. // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» ХНУРЕ 17 - 19 апреля 2012г. С. 33.

29. Харченко Р. Ю. Компьютерное моделирование системы кондиционирования и вентиляции судна с разными типами регуляторов/ Харченко Р. Ю. // Матеріали науково-методичної конф. «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки». – Одеса: ОНМА, 14.12 – 15.12.12. С. –36.

30. Михайленко В. С. Постановка задачи синтеза интеллектуальной системы адаптивного управления/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Матеріали XX международной конференции по автоматическому управлению. НУК им. Адмірала Макарова. Николаев. 25-27 сентября 2013г. С. 228-230.

31. Михайлов С. А. Применение гибридных интеллектуальных сетей в судовых системах климат-контроля/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // конференция «СИЭТ-2014» МНПК «Современные информационные и электронные технологии», – 2014.– С. 13.

32. Харченко Р. Ю. Идентификация объектов в системах адаптивного управления с помощью нейро-нечетких сетей/ Харченко Р. Ю. // Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки». – Одеса: НУ «ОМА», 2016. С. 97-100.

33. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети в судовых системах комфортного микроклимата/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // Материалы V науч.практ. конф. ИУСТ Морской университет– Одеса: ОНМУ, 2016. С. 207-210.

34. Харченко Р. Ю. Впровадження гібридних інтелектуальних технологій при експлуатації суднових електронних систем/ Харченко Р.Ю., Шатілов Д.С., Кочетков О.В. // VII Всеукраїнська НПК студентів та молодих вчених «Проблеми і перспективи розвитку транспорту» Морський університет– Одеса: ОНМУ, 2018. С. 85-87.

35. Михайлов С. А. Гібридна інтелектуальна система комфортного мікроклімату судна/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // Матеріали VII НПК. ІУСТ,– Одеса: ОНМУ, 2018. С. 182-185.

Публікації які додатково відображають наукові результати дисертації.

36. Михайленко В. С. Синтез интеллектуальной системы автоматического управления процессом горения топлива в энергоблоках тепловых электростанций/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Промышленная теплотехника. – 2012. – № 5. – С. 45-52.

37. Михайленко В. С. Синтез нейро-мережевої системи автоматичного регулювання рівня води в барабані котла енергоблоку ТЕС/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Наукові вісти НТУУ «КПІ», № 5, 2012. – С. 45-51.

38. Михайленко В. С. Определение параметров математических моделей энергоблоков ТЭС на основе аппарата гибридных сетей/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Информатика и математические методы в моделировании Т. 2, № 3, 2012. – С. 286-292.

39. Михайленко В. С. Решение задач идентификации и управления температурным контуром системы охлаждения судового дизеля/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Науковий вісник ХДМА. Науковий журнал. Херсонська державна морська академія. №2 (17) 2017г. С. 69-77.

ANNOTATION

Kharchenko R.Yu. Hybrid intelligent networks for ship microclimate systems. It is Qualifying scientific labor on rights for a manuscript. Dissertation on the receipt of

scientific degree of candidate of engineering sciences (Ph.D.) after specialty 05.22.20 – operation and repair of means of transport (271 “River and sea transport”). It is the National University "Odessa marine academy", Odessa, 2018.

The dissertation is devoted to the decision of an important scientific and applied problem - increase of efficiency of operation of ship systems of a comfortable microclimate. In the work the review of literary sources was carried out and the analysis of directions for solving the problem of providing spaces for vessels with comfortable conditions of the microclimate with the improvement of technical and economic indicators was carried out. It was found that the main directions of the solution of this problem are the introduction of modern intelligent systems for the management and operation of marine climate equipment and the development of monitoring and diagnostic methods of equipment operation. The directions of the dissertation research which are devoted to the problem of software upgrading and implementation of modern intellectual hybrid methods of exploitation are substantiated. The object of research is the ship system of a comfortable microclimate, and the subject - the methods of management and operation of these systems.

The methodological structure of the dissertation research is reflected in the technological map, through which the methodological support of the dissertation work is carried out. The purpose of the dissertation study and its main task, which is divided into four independent components of the problem, is reflected here. The working hypothesis of scientific research has been proposed and confirmed, and the obtained scientific results of the dissertation work are solutions of independent components of tasks. The basic scientific position is also formulated, the practical value and significance of the dissertation research are shown.

In the main part of the dissertation the theoretical bases of the work of the climatic systems of the ship are considered, mathematical models and algorithms that take into account the dynamics when changing the parameters of the air mixture are considered. The features of operation are described by mathematical models with different control

methods and the degree of consideration of external influences, which in turn have different levels of quality and adequacy of the result.

Software implementation of the system took place taking into account disturbing factors with the use of parallel operation of several regulators. The algorithm of work and the module of dynamically-connecting library is developed, the necessary analytical expressions are given. Based on the compiled algorithms, a program module is developed that allows you to calculate the parameters and conduct simulation. For simulation, expert data from real ships, obtained in real conditions of operation, was used.

The models considered in the second and third sections can be applied with relatively insignificant requirements to the quality of the composition and temperature of the air mixture and on ships with small transitions in one climatic zone, where it is possible to neglect many external parameters of perturbation.

It is offered at the transition stage to complete automation of the equipment used to use the decision support system. In the proposed variant of constructing such a system, the adaptation function is performed by neural networks capable of self-learning. This intellectual system has the properties of self-learning and adaptation.

The final section of the paper considers an alternative method of exploiting microclimate systems with the use of intelligent systems in a single complex. The analytical expressions for constructing a hybrid intelligent network are obtained. Using the proposed method, the system parameters are calculated on the example of individual nodes, the values of which coincide with the standardized for satisfactory operation of these systems. Influence of disturbing factors is considered, the formulas for the calculation of characteristics are obtained. Their evaluation for a specific case was made and the transition characteristics were calculated.

Presented in tabular knowledge base for the synthesis of the appropriate regulators. In addition to tabular dependencies, graphical curves showing the dependence of the parameters on the model used, obtained using a computer program are given.

As a result of the dissertation research, it was found that the use of hybrid intelligent networks allowed to solve the problem of optimization of air exchange processes. On the basis of the apparatus of neuro-fuzzy logic and genetic algorithms, intelligent air

quality control systems with the possibility of expanding the list of controlled parameters and the composition of the air mixture are proposed. The simulation experiments of the proposed models demonstrated their effectiveness compared to the traditional ones in terms of achieving the best quality indicators during the operation. The system is suitable for use in automatic or supervisory mode and allows you to create tasks local host, bringing operating systems to a new level of comfort and achieves significant energy savings compared with current. Also, a system of diagnostics of the technical state of equipment is offered, which differs by the function of taking into account expert experience and the possibility of simultaneous calculation of reliability indicators, which increases the degree of reliability of the result. Experimentally established that the work of the system with the help of a device of neuron-fuzzy logic, which takes into account expert experience and implements a device of artificial intelligence, may be acceptable with practical accuracy.

The scientific novelty of the results obtained in the dissertation is the creation of a new method for constructing systems of a microclimate of a ship using hybrid intelligent networks.

In the dissertation:

For the first time the method of intellectual operation of microclimate vehicles based on hybrid network management, wherein the improved indicators of quality of transients compared to current, as the method of monitoring, acting on the basis of vehicle neuro-fuzzy logic and genetic algorithms and optimally maintain the ratio of moisture and air temperature and reduce power consumption of the executive mechanisms of the system.

Received further development: methods of the theory of fuzzy logic and neural networks in monitoring systems by parameters of units of the microclimate system; methods of creating a base of rules for fuzzy regulators to adapt regulators in the process of changing the operating modes of equipment.

Improved: methods of fuzzy controllers to identify performance indicators, which allows to stabilize controlled parameters at a minimum control time compared with traditional ones. Mathematical models obtained during active and passive experiments,

provide the possibility of adapting the parameters of the regulators; systems of diagnostics of the technical state of equipment are distinguished by the function of taking into account the expert experience and the possibility of forecasting the process of wear, which reduces the degree of development of the emergency situation.

The practical significance of the results obtained in the dissertation is that they can be used on ships during the operation, as well as by developers of marine systems of a comfortable microclimate.

Practical results of the dissertation research are implemented:

- in the methodology and work on the modernization of automatic control systems for heat and power processes of power units and auxiliary power equipment of Ladyzhinskaya TPP;

- in work on modernization of systems of automatic control of processes of air treatment in premises; in designing and developing an adaptive intelligent system of automatic control of air conditioning and ventilation systems at Ladyzhinskaya TPP.

- in designing and developing an adaptive intelligent system of automatic control of air conditioning and ventilation systems using regulators operating on the basis of controllers with fuzzy logic in the design and assembly company LLC "Energy Investors";

- at carrying out of state budget scientific research works in the period from 2008 to 2018 Department of Marine Electronics NU "OMA".

The main scientific and practical results of the work were introduced into the educational process of the Department of Marine Electronics NU "OMA" in the form of lecture course heads and some laboratory and practical works on disciplines "Software of embedded computer systems", "Control and diagnostics of ship electronic and electrical systems" and "Electronic systems ship".

Keywords: hybrid intelligence networks, fuzzy controllers, neural networks, genetic algorithms, decision support systems, marine systems of a comfortable microclimate, pacification, knowledge base.

The basic results of dissertation research of bread-winner are published in the following scientific labors:

Basic scientific results of dissertation.

1. Михайленко В. С. Сравнительный анализ робастной и нечеткой АСР действующих в условиях неопределенности/ В.С. Михайленко, Р.Ю.Харченко // Сборник научных трудов КНТУ. Вып. 22 (часть 2). – 2011. – С. 198-206.

2. Михайленко В. С. Использование нечеткого алгоритма Такаги – Сугено в адаптивных системах управления сложными объектами/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Научно-теоретический журнал Искусственный интеллект. – 2011. – №2. – С. 53-59.

3. Михайленко В. С. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Электротехнические и компьютерные системы.– 2011. – № 4 (80). – С. 199-204.

4. Михайленко В. С. Сравнительный анализ теории принятия решений в условиях неопределенности и нечеткой логики на примере настройки ПИ – регулятора/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // АСУ и приборы автоматики. – 2011. – № 154. ХНУРЭ. – С. 76-83.

5. Михайленко В. С. Застосування гібридних мереж в адаптивних системах управління теплоенергетичних об'єктів/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Наукові праці ВНТУ.– 2012. – № 1.– С.1-9.

6. Михайленко В. С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ – регулятора по идентификации переходного процесса/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Труды Одесского политехнического университета. – 2012. – № 1 (38). – С. 152-156.

7. Михайленко В. С. Синтез адаптивного нечеткого регулятора с прогнозирующей нейро-нечеткой сетью/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Вісник СумДУ. Серія “Технічні науки”, №3, 2012. – С. 30-37.

8. Михайленко В. С. Анализ традиционных методов адаптации систем автоматического управления и их усовершенствование с использованием нейронных сетей/ В. С. Михайленко, Р. Ю.Харченко // Радиоэлектронные и компьютерные системы № 4(56), 2012. – С. 50-56.

9. V. S. Mikhailenko Analysis of Traditional and Neuron Fuzzy Adaptive System of Controlling the Primary Steam Temperature in the Direct Flow Steam Generators in Thermal Power Stations/ V. S. Mikhailenko, R. Yu. Kharchenko // Automatic Control and Computer Sciences, 2014, Riga Vol. 48, No. 6, pp. 334–344.

10. Харченко Р. Ю. Анализ адаптивных методов настройки нечетких и ПИ – регуляторов в сложных объектах управления/ Р. Ю. Харченко, В. С. Михайленко // Научные труды ХПИ.– 2012. –№37.– С. 78-89.

11. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети для оптимизации режимов эксплуатации судовых систем комфортного микроклимата/ С. А. Михайлов, Р. Ю. Харченко // Судовые энергетические установки: научно- технический сборник. Вып. 36.–Одесса: НУ «ОМА», 2016. С. 24-32.

12. Харченко Р. Ю. Методы адаптивного регулирования в системе климатического контроля судна/ Р. Ю. Харченко //Автоматизація суднових технічних засобів, Науково-технічний збірник ОНМА, випуск 17, 2011. С. 95-106.

13. Харченко Р. Ю. Сравнительный анализ методов активной адаптации ПИ-регуляторов и нечетких регуляторов для систем кондиционирования и вентиляции (СКВ) морских судов/ Р. Ю. Харченко // Науковий вісник ХДМА. Науковий журнал. Херсонська державна морська академія. №2 (7) 2012 г. С. 276-286.

14. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети/ С. А. Михайлов, Р. Ю. Харченко // Монография, ISBN: 978-620-2-07416-2, издательство LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2017, 225 с.

Publications which certify approbation of materials of dissertation.

15. Михайленко В. С. Исследование гибридной сети при идентификации объекта управления в системах поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко,

Р. Ю. Харченко // Вторая Международная научно-техническая конференция «Компьютерные науки и технологии» КНиТ-2011. 3-5 октября 2011 г. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Белгород, Россия. С. 268-272.

16. Михайленко В. С. Сравнительный анализ методов анализа иерархий и нечеткой логики в системе поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 15-й Международной конференции «Информационные интеллектуальные системы». – 2011. – Харьков. – С. 297-298.

17. Михайленко В. С. Методы дефаззификации в алгоритмах нечеткого вывода/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 8-й региональной конференции молодых ученых «Информатика, информационные системы и технологии». – 2011. – Одесса. – ОГУ. - С. 7-8.

18. Михайленко В. С. Сравнительный анализ теорий принятия решений в условиях неопределенности и нечеткой логики на примере настройки ПИ-регулятора/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «АСУ и приборы автоматизации», 2011, Харьков, выпуск 154. С. 76-83.

19. Михайленко В. С. Синтез нейросетевой СППР нагрузки между энергоблоками СЭУ/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 8-й дистанционной международной научно-практической конференции «Системы поддержки принятия решений. Теория и практика. СППР 2012» (Киев). – С. 46-49.

20. Михайленко В. С. Нейро-нечеткие технологии в системах поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы международной научно-практической интернет конференции «Advanced Information Systems and Technologies, AIST 2012» (Сумы). – С. 144-146.

21. Михайленко В. С. Анализ научных подходов в теории нейросетевых систем управления сложными объектами/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Сборник трудов международной молодежной конф. «Прикладная математика, управление и информатика» Белгород (Россия). – 2012. – Том 2. – С. – 481-485.

22. Михайленко В. С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ-регулятора по идентификации переходного процесса/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко //Материалы 19-й Международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика-2012». (Киев), Том 1.– С. 117.

23. Михайленко В. С. Анализ метода оценки настраиваемой модели объекта в процессе адаптации САУ/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Научный журнал: Сборник научных трудов SWorld. Вып. 4, Т.14 - Одесса, 2012 – С. 10-13.

24. Харченко Р. Ю. Анализ традиционных и новых методов вычислений в системах поддержки принятия решений/ Харченко Р. Ю. // Материалы научно-технической конференции «Энергетика судна: эксплуатация и ремонт», 05.04.2011 – 07.04.2011. – Одеса: ОНМА, 2011, С. 308-310.

25. Харченко Р. Ю. Адаптивное регулирование в системах климатического контроля/ Харченко Р. Ю. // Десятая всеукраинская научно – техническая конференция «Математическое моделирование и информационные технологии»(ММИТ-2011), Одесса, ОГАХ. 23-25.10. С. 81-82.

26. Михайленко В. С. Использование интеллектуальных систем поддержки принятия решений в автоматизации процессов управления судном/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Третя Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2011» 23 – 25 травня 2011 р. Херсон. С. 59 1-й том.

27. Харченко Р. Ю. Сравнительный анализ традиционных и нечетких методов регулирования в системах кондиционирования воздуха (СКВ)/ Харченко Р. Ю. // XII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів та студентів “Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій” 11-12 квітня 2012 р. Одеса, ОДАХ. С.38-40.

28. Харченко Р. Ю. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления/ Харченко Р. Ю. // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» ХНУРЭ 17 - 19 апреля 2012г. С. 33

29. Харченко Р. Ю. Компьютерное моделирование системы кондиционирования и вентиляции судна с разными типами регуляторов/ Харченко Р. Ю. // Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки». – Одеса: ОНМА, 14.12- 15.12.12. С. 36

30. Михайленко В. С. Постановка задачи синтеза интеллектуальной системы адаптивного управления/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Матеріали XX международной конференции по автоматическому управлению. НУК им. Адмірала Макарова. Николаев. 25-27 сентября 2013г. С. 228-230.

31. Михайлов С. А. Применение гибридных интеллектуальных сетей в судовых системах климат-контроля/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // конференция «СИЭТ-2014» МНПК «Современные информационные и электронные технологии», – 2014. С. 13.

32. Харченко Р. Ю. Идентификация объектов в системах адаптивного управления с помощью нейро-нечетких сетей/ Харченко Р. Ю. // Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки». – Одеса: НУ «ОМА», 2016. С. 97-100.

33. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети в судовых системах комфортного микроклимата/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // Материалы V научно-практической конференции ИУСТ Морской университет– Одеса: ОНМУ, 2016. С. 207-210.

34. Харченко Р. Ю. Впровадження гібридних інтелектуальних технологій при експлуатації судових електронних систем/ Харченко Р.Ю., Шатілов Д.С., Кочетков О.В. // VII Всеукраїнська НПК студентів та молодих вчених «Проблеми і перспективи розвитку транспорту» Морський університет– Одеса: ОНМУ, 2018. С. 85-87.

35. Михайлов С. А. Гібридна інтелектуальна система комфортного мікроклімату судна/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // Материалы VII НПК. ИУСТ,– Одеса: ОНМУ, 2018. С. 182-185.

Publications that further reflect the scientific results of the dissertation.

36. Михайленко В. С. Синтез интеллектуальной системы автоматического управления процессом горения топлива в энергоблоках тепловых электростанций/ В.С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Промышленная теплотехника. – 2012. – № 5. – С. 45-52.

37. Михайленко В. С. Синтез нейро-мережевої системи автоматичного регулювання рівня води в барабані котла енергоблоку ТЕС/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Наукові вісти НТУУ «КПІ», № 5, 2012. – С. 45-51.

38. Михайленко В. С. Определение параметров математических моделей энергоблоков ТЭС на основе аппарата гибридных сетей/ Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. // Информатика и математические методы в моделировании Т. 2, № 3, 2012. – С. 286-292.

39. Михайленко В. С. Решение задач идентификации и управления температурным контуром системы охлаждения судового дизеля/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Науковий вісник ХДМА. Науковий журнал. Херсонська державна морська академія. №2 (17) 2017г. С. 69-77.

ЗМІСТ

ВСТУП.....	25
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ПРОБЛЕМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	
СУДНОВИХ СИСТЕМ МІКРОКЛІМАТУ	37
1.1 Особливості експлуатації кліматичних систем в навігаційних умовах, ключові параметри математичних моделей.....	37
1.2 Критерії експлуатації систем клімат-контролю для суден різного типу.....	44
1.3 Традиційні і сучасні методи експлуатації систем вентиляції и кондиціювання суден, методи дослідження дисертаційної роботи	52
1.4 Висновки за першим розділом	64
РОЗДІЛ 2 АНАЛІЗ І РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ	
ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	67
2.1 Експериментальне та аналітичне моделювання процесів в об'єктах.....	67
2.2 Аналіз та комп'ютерне моделювання класичних методів управління та експлуатації систем мікроклімату	82
2.3 Адаптивні методи при експлуатації систем мікроклімату, їх аналіз та комп'ютерне моделювання	92
2.4 Висновки за другим розділом	109
РОЗДІЛ 3 РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ПРОГРАМНИХ МОДУЛІВ ТА	
ГІБРИДНИХ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ	112
3.1 Розробка алгоритмів та програмного забезпечення для дослідження роботи системи в процесі експлуатації	112
3.2 Синтез нечітких регуляторів для системи управління	123
3.3 Розробка програмного забезпечення з використанням нейро-нечітких алгоритмів для адаптивної інтелектуальної.....	126
3.4 Розробка нечіткої експертної інтелектуальної моделі	132
3.5 Висновки за третім розділом.....	138
РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ	
МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ РОБОТИ СИТЕМИ	140

4.1 Експлуатація системи в умовах несправності обладнання.....	141
4.2 Проектування модулю діагностики експлуатаційних характеристик та на- стройки параметрів електронних компонентів	145
4.3 Розробка програмного комплексу моніторингу технічного стану ССКМ.....	148
4.4 Методика автоматизованого проектування апаратної частини	154
4.5 Висновки за четвертим розділом.....	163

РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ МІКРОКЛІМАТУ165

5.1 Аналіз наукових підходів в розробці інтелектуальних мереж	165
5.2. Розробка системи мікроклімату з використанням нейро-нечіткої мережі ...	168
5.3 Вдосконалення та навчання розробленої гібридної структури для використан- ня на судні.....	178
5.3.1 Розробка алгоритму функціонування адаптивної системи	178
5.3.2 Розробка нейро-нечіткої системи	182
5.3.3 Впровадження гібридної мережі системи мікроклімату як підсистеми підтримки прийняття рішень	186
5.4 Синтез адаптивного нечіткого регулятора з прогнозуючою нейро-нечіткою мережею	189
5.5 Висновки за п'ятим розділом	194

ВИСНОВКИ..... 196

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ..... 200

ДОДАТОК А. Вихідний код основної функції розрахунку динамічно-підключаємої бібліотеки	218
--	-----

ДОДАТОК В. Розробка програми для нечіткого контролера в середовищі fuzzyTech.....	225
--	-----

ДОДАТОК С. Розробка нечіткої моделі керування засувкою теплообмінного апарату.....	241
---	-----

ДОДАТОК D. Список публікацій здобувача та відомості про апробацію ре- зультатів дисертації.....	247
--	-----

ДОДАТОК Е. Акти упровадження результатів дисертації.....	255
--	-----

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

ССКМ – суднова система комфортного мікроклімату;

СКВ – система вентиляції і кондиціювання

СЕУ – суднова енергетична установка;

АСР – автоматизована система регулювання;

СППР – система підтримки прийняття рішень;

ПІ – пропорційно – інтегральний;

ПІД – пропорційно – інтегрально – диференціальний;

КЗ – компенсатор збурень;

КЧХ – комплексно частотна характеристика;

ГСК – генератор синусоїдальних коливань;

НР – нечіткий регулятор (контролер);

ЛЗ – лінгвістична змінна;

ФП – функція приналежності;

НЕС – нечітка експертна система;

БЮ – блок ідентифікації об'єкту;

БЗ – база знань;

ОПР – особа що приймає рішення;

ННМ – нейро-нечітка мережа;

НМП – нечітка мережа Петрі

НМК – нейромережевий контролер

ДПБ – динамічно-підключаєма бібліотека

ГІМ – гібридна інтелектуальна мережа;

ЗП – задаючий пристрій;

КБ – командний блок;

T_p – час регулювання.

ВСТУП

Актуальність теми. Дисертацію присвячено питанням підвищення ефективності експлуатації та ергатичного управління судновими системами вентиляції і кондиціювання повітря. Останнім часом, в силу ряду продиктованих соціально-економічними питаннями проблем, практично на всіх сучасних судах встановлюються, а на старих модернізуються, системи вентиляції та кондиціювання повітря, назовемо їх судновими системами комфортного мікроклімату (ССКМ) [1, 2, 5]. У багатьох випадках проектування систем комфортного кондиціювання повітря необхідно вести з урахуванням індивідуальних фізіологічних особливостей людини, його фізичної діяльності і місця існування. Особливо це відноситься до об'єктів із специфічними умовами життєдіяльності (до яких відносяться морські та річкові судна), які можна розглядати як штучно замкнуті або напівзамкнені екологічні системи, що забезпечують екіпажу тривале існування. Рейсові випробування ССКМ, особливо на судах необмеженого району плавання, оснащених різними системами вентиляції і кондиціювання, що проводяться різними фахівцями з метою обстеження ефективності їх роботи, показали значне відхилення параметрів мікроклімату від нормованих на проміжних режимах і незадоволеність екіпажу підвищеною або зниженою температурою повітря в каютах (до 50%), підвищеною вологістю або сухістю повітря (15-40%), недоліком свіжого повітря (30-40%) тощо. Причинами зазначених недоліків є недосконалість експлуатованих ССКМ і застосовуваний в даний час у вітчизняній і зарубіжній практиці проектування підхід щодо забезпечення "середнього рівня комфорту", який не враховує індивідуальних характеристик людини [6-9]. Особливо гостро питання постає у зв'язку зі збільшенням психологічного «мозкового» навантаження на відповідальний персонал через стрімкий розвиток автоматизації суден і, відповідно, зменшення чисельності екіпажів з пропорційно зростаючим ступенем відповідальності. Дослідження показують що переважна більшість аварійних ситуацій і надзвичайних подій на судах відбувається через перевтому екіпажу і втрату уваги, на що без-

посередній вплив надає якість повітряного середовища навколо людини, не кажучи вже про загальновідомий вплив клімату на продуктивність праці [10, 13].

Морське і річкове судно, як транспортний засіб, є складним об'єктом управління і схильне частому впливу зовнішніх та внутрішніх збурень в силу специфіки своєї роботи. Працездатність екіпажу судна і ефективне вирішення поставлених перед ним завдань багато в чому визначається умовами і параметрами мікроклімату в приміщеннях і каютах судна. Успішна експлуатація суден, стан здоров'я членів екіпажу і пасажирів, збереження вантажу та різні техніко-економічні показники багато в чому визначаються ефективністю роботи ССКМ - однієї з найбільш головних функціональних систем забезпечення життєздатності суден в цілому. Мікроклімат повітряного середовища в приміщеннях суден формується в умовах цілодобової дії на організм людини динамічного комплексу природних, виробничих і побутових чинників з параметрами, які досягають екстремальних значень. Підвищення ефективності роботи центральних і зональних ССКМ пов'язано з вирішенням великої кількості взаємозалежних, а іноді суперечливих наукових і практичних завдань, пов'язаних зі зменшенням енергоспоживання і одночасним збільшенням точності і якості процесу управління параметрами температури і вологості повітря в приміщеннях судна [11-16].

Аналіз сучасного стану розвитку електроніки і інтелектуальних технологій дозволяє зробити висновок, що ще зовсім недавно звучав досить фантастично, про те, що в найближчому майбутньому судном буде управляти мережа нейронів штучного інтелекту без участі людини. Впровадження спеціальних алгоритмів в електронні системи управління на судах дозволить знайти оптимальний варіант маршруту, прорахувати найефективніший режим проходження судна з урахуванням метеорологічних умов і витрати палива, створити оптимальні умови для роботи екіпажу [5]. Судячи з тенденцій в розробках провідних світових суднобудівних корпорацій (OSK Lines, Japan Nippon Yusen, Marine United, Rolls-Royce) - автономні суду без екіпажу - це майбутнє світової логістичної системи, фактор зміни правил ринку судноплавства, перетворення світової економіки в цілому [130-135]. У підрозділах концернів, зайнятих розробкою технологій дистанційного ке-

рування водним транспортом, впевнені: такий спосіб управління дозволить значно знизити експлуатаційні витрати і кардинально змінить весь глобальний сектор водних вантажоперевезень.

Автором пропонується розглянути до застосування при експлуатації ССМК апарат гібридних інтелектуальних мереж (ГІМ). На мою думку вони є потенційно потужним інструментом вирішення складних проблем, які не під силу окремим підходам. Наприклад саме гібридні знання забезпечують повноту бази знань [27, 31-34].

Виходячи з вищесказаного і враховуючи загальносвітову тенденцію провідних суднобудівників по створенню повністю автоматизованих «розумних» суден із застосуванням штучного інтелекту для постійного моніторингу всіх систем судна і своєчасне попередження і ліквідацію поломок і несправностей, актуальність роботи ледь може викликати питання. Всі необхідні технології, що дозволяють забезпечити автономне судноплавство вже існують [118-121].

В архітектуру таких гібридних систем інтегровані, в залежності від поставленого завдання, різні інтелектуальні модулі - нейронні мережі, генетичні алгоритми, нечіткі контролери, системи підтримки прийняття рішень, адаптивні системи та інші складові так званого «штучного інтелекту». У коло завдань штучного інтелекту входить постійний моніторинг всіх систем судна і своєчасне попередження і ліквідація поломок і несправностей. Нейронна мережа зможе розрахувати ймовірність несправності ССКМ і розробити варіанти її запобігання [1-5].

Ці системи успішно реалізують досвід і знання експертів (нечіткі регулятори), а також мають здатність до самонавчання (нейро-регулятори). Спільне або комбіноване застосування даних напрямків й стало поштовхом до виникнення нового наукового напрямку – ГІМ та нейро-нечітких мереж (ННМ). Дослідження даної технології стосовно ідентифікації та адаптації АСР параметрів повітряної суміші кліматичних систем є актуальною науковою задачею [13-16].

Значний внесок у вивчення і розвиток систем вентиляції і кондиціонування повітря, принципів управління і методів автоматизації систем мікроклімату внесли наступні вчені: В.А. Голіков, [6 - 9], В.В. Вичужанін [10 - 16], С.А. Михайлов

[1-5], С. В. Нефелов [30-34], Ю.Д. Губернский [35-38]. В даний час значного розвитку набули інтелектуальні системи управління, що дозволяють використовувати накопичений досвід експертів по технологічному процесу для створення ефективних систем управління. Це підтверджується роботами таких авторів як Д. А. Поспелов [98], А. П. Ротштейн [104], Д. Рутковська [105], Ю.П. Кондратенко [52-53], Н. П. Деменков [34], Р. А. Гостєв [31-33], К. Асаї, А. В. Леоненков [61], С. Д. Штовба [126] та інші.

Метою наукових досліджень є розробка та навчання ГІС для визначення оптимальних значень параметрів регуляторів в АСР температури, повітрообміну і вологості при зміні навантаження об'єкта (регульовального режиму) і наявності пускового режиму.

З огляду на специфіку експлуатації ССКМ, актуальною є задача пошуку ефективних алгоритмів управління та моніторингу технічного стану агрегатів і технологічного обладнання ССКМ. Контроль якості робочих процесів в системах автоматизованого управління ССКМ є необхідною умовою економічної ефективності, безаварійної і енергоефективної експлуатації. Вітчизняний і зарубіжний досвід показує, що неодмінною умовою підвищення ефективності таких систем є врахування досвіду і знань експертів-операторів тобто впровадження інтелектуальних технологій [14-22]. Однак, незважаючи на низку вирішених завдань, широке коло питань, пов'язаних з побудовою, налагодженням, експлуатацією і адаптацією АСР ССКМ на сьогоднішній день до кінця не вивчені. Існують проблеми, що виникають при аналізі і дослідженні розглянутих систем, що ускладнюють процес проектування і тим самим обмежують широке їх використання на судах.

Пропонується на перехідному етапі до повної автоматизації при експлуатації обладнання використовувати систему підтримки прийняття рішень. У запропонованому варіанті побудови такої системи функцію адаптації виконують нейронні мережі, здатні до самонавчання. Дана інтелектуальна система має властивості самонавчання і адаптації [141-148].

Актуальними є питання аналізу умов протікання технологічних процесів ССКМ, що дозволяють визначити сукупність взаємовпливу контрольованих па-

раметрів і виявлення основних збурюючих впливів, питання аналізу причин несправностей і відхилень контрольованих параметрів від приписів, що виникають в ході експлуатації і налагодження систем автоматизації. Дослідження і проектування АСР ССКМ значно спрощується при наявності математичних моделей, що адекватно описують їх процеси. У відомих публікаціях [5, 13 - 20, 33, 35, 36] наведені математичні моделі, які описують теплоенергетичні процеси в приміщеннях судна. Однак існуючі математичні моделі [37 - 40], не дозволяють в повній мірі отримати описи властивостей, зв'язків і відносин між контрольованими параметрами ССКМ, що стримує створення інтелектуальних методів управління та експлуатації, адаптації АСР і діагностики ССКМ для використання їх на практиці.

Як випливає з [41, 42] актуальними є питання отримання математичних моделей теплоенергетичних процесів в приміщеннях судна. На сьогоднішній день відсутні методики дослідження нечітких, генетичних та інших інтелектуальних методів експлуатації ССКМ, методи адаптації їх автоматичної діагностики і регулювання; в повному обсязі не вирішено питання програмного забезпечення яке буде зручним для вирішення завдань аналізу і проектування ССКМ; відсутні систематизовані результати досліджень, необхідні для розробки методики проектування ССКМ. Зокрема, недостатньо повно висвітлено результати з автоматизованого дослідження та аналізу інтелектуальних методів експлуатації та ергатичного управління, що перешкоджає широкому використанню на практиці ССКМ, а відомі системи автоматизованого проектування виявляються, як правило, не пристосованими для швидкого і ефективного використання при дослідженні і проектуванні таких систем [53 - 55].

Таким чином, розробка і застосування математичних моделей, адекватно описуючих теплоенергетичні процеси в приміщеннях судна які дозволяють використовувати ЕОМ при аналізі і проектуванні пристроїв і систем ССКМ, є актуальним завданням. Отримані результати досліджень будуть основою для розробки методики проектування, моніторингу та ергатичного управління ССКМ з метою поліпшення їх техніко-економічних показників.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Тематика дисертаційної роботи відповідає пріоритетним напрямкам розвитку науки і техніки, сформульованим в планах Морської доктрини України до 2035 року (постанова Верховної Ради України від 7 жовтня 2009 р. №1307), а також відповідно до указу Президента від 20.05.2008 р. № 463/2008 «Про рішення Ради національної безпеки і оборони України» від 16.05.2008 р «Про заходи щодо забезпечення розвитку України як морської держави». Актуальність проведення досліджень в галузі підвищення екологічної безпеки морських перевізків підтверджується нормами міжнародного права: «ISM Code», «Положення про Державну систему управління безпекою судноплавства» (постанова Кабінету Міністрів України від 07.10.2009 р. № 1137), «Положення про систему управління безпекою судноплавства на морському та річному транспорті» (наказ міністерства інфраструктури України від 01.11.2011 р. № 787), та «Транспортну стратегію України на період до 2020 р.» (постанова Кабінету Міністрів України від 20.10.2010 р. № 2174-р), де йдеться про низький рівень експлуатаційної безпеки на транспорті України, невідповідність сучасним вимогам показників якості та ефективності перевізків пасажирів та погану екологічну складову.

Також робота відповідає:

– Постанові Президії НАН України від 25.02.09 р № 55 «Основні наукові напрямки і найважливіші проблеми фундаментальних досліджень у галузі природничих, технічних і гуманітарних робіт на 2009 - 2013 роки.», пп. 1.2.3.3. - Розробка теорії інтелектуального управління; 1.2.4.2. - Оптимізація керованих систем щодо різних критеріїв якості: швидкості, мінімуму витрат енергії, мінімізації відставання; пп. 1.2.4.4 - Розробка методів керування динамічними процесами в умовах невизначеності, рішення ігрових завдань динаміки;

– Розпорядженню Кабінету Міністрів України № 145-р від 15.03.2006 р.— «Про схвалення енергетичної стратегії України на період до 2030 року»;

– Комплексній державній програмі «Енергозбереження України» в «Концепції пріоритетних напрямів науки та техніки», прийнятих постановами Кабінету Міністрів України № 148 від 5.02.97 р.; і № 1040 від 27.06.2000 р.

Поставлені і вирішені в дисертації завдання пов'язані з основними напрямками науково-дослідних робіт, які виконуються на кафедрі Морської електроніки НУ «ОМА». Результати дисертаційної роботи представлені та увійшли складовою частиною до звіту по науково-дослідних роботах «Дослідження проблем надійності НВІС і розробка засобів її підвищення при переході до субмікронних технологій». № ДР 0109U001527 (2009-2011 рр.); «Підвищення якості програмованих користувачем НВІС (FPGA)» № ДР 0115U003578 10/994 (2012-2014 рр.); «Підвищення якості програмованих користувачем НВІС (FPGA) для систем захисту інформації» №ДР 0115U003578 10/994 (2015-2018рр).

Мета і завдання дослідження. Метою роботи є розробка теоретичних і практичних основ підвищення якості експлуатації та управління ССКМ на основі інтелектуальних технологій, що забезпечує зниження паливо-енергетичних і експлуатаційних витрат, а також поліпшення параметрів мікроклімату в приміщеннях судна.

Для досягнення поставленої мети в роботі вирішені наступні завдання:

- виконаний аналіз умов протікання технологічних процесів в ССКМ що дозволяють визначити сукупність взаємовпливу контрольованих параметрів і виявлення основних збурюючих впливів;
- виконано аналіз причин несправностей і відхилень контрольованих параметрів від приписів, що виникають в ході експлуатації і налагодження систем автоматизації ССКМ;
- отримані математичні моделі теплоенергетичних процесів в приміщеннях судна, що описують властивості, зв'язки і відносини між контрольованими параметрами ССКМ;
- проведена розробка адаптивних, нечітких, нейро-нечітких та інших інтелектуальних методів експлуатації, адаптації АСР і діагностики ССКМ;
- виконана перевірка, отримано експериментальне підтвердження адекватності нових методів і алгоритмів моделей;

- проведено порівняльний аналіз роботи традиційних і запропонованих інтелектуальних систем управління, показано, що розроблені інтелектуальні системи управління є більш ефективними.

Об'єкт дослідження – процеси впливу на внутрішню атмосферу приміщень судна.

Предметом дослідження є система ергатичного управління і діагностики обладнання та параметри суднового мікроклімату.

Методи дослідження. В процесі вирішення поставлених у роботі завдань використані наступні методи: теорії термодинаміки – для опису фізичних процесів ССКМ; теорії автоматичного управління – для аналізу ефективності діючих традиційних АСР; теорії ідентифікації та адаптивного управління – для аналізу ефективності адаптивних АСР при управлінні складними об'єктами ССКМ в умовах зміни навантаження; теорія нечітких множин та нечіткої логіки – для моделювання знань і досвіду експертів судномеханіків і електромеханіків; теорія нейронних мереж – для створення методів в системах діагностики обладнання ССКМ; методи цифрового моделювання – для виконання порівняльного аналізу роботи традиційних і запропонованих інтелектуальних систем управління.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в наступному:

– *отримали подальший розвиток:* методи теорії нечіткої логіки та нейронних мереж в системах моніторингу параметрами об'єктів ССКМ; методи створення бази правил нечітких регуляторів для адаптації типових регуляторів в процесах зміни режимів роботи обладнання ССКМ.

– *удосконалено:* метод створення двоканальних нечітких регуляторів по ідентифікації показників експлуатаційних процесів ССКМ, що дозволяє проводити стабілізацію контрольованих параметрів за мінімальний час регулювання в порівнянні з традиційними АСР ССКМ мінімум у 3 рази; математичні моделі теплоенергетичних об'єктів ССКМ, отримані в ході активних і пасивних експериментів. Моделі забезпечують можливість проведення адаптації настрювальних параметрів типових регуляторів ССКМ широкого класу; системи діагностики технічного стану обладнання ССКМ відрізняються функцією врахування досвіду експлуата-

ційного персоналу і можливістю прогнозування процесу зносу, що знижує ступінь розвитку аварійної ситуації.

– *вперше запропоновано* метод інтелектуального налаштування обладнання в процесах ССКМ на базі гібридних мереж управління що відрізняється поліпшеними показниками перехідних процесів в порівнянні з діючими ССКМ; запропоновано інтелектуальний метод моніторингу кліматичних параметрів в приміщеннях судна, що діє на основі теорії нейро-нечіткої логіки та генетичних алгоритмів і дозволяє оптимально підтримувати співвідношення вологості і температури повітря і знизити енергоспоживання виконавчих механізмів ССКМ.

Практичне значення отриманих результатів. Використання отриманих результатів в системах управління і експлуатації обладнання ССКМ дозволяє отримувати експлуатаційні процеси зі значно меншим часом регулювання в базових і регулювальних режимах об'єктів, в порівнянні з існуючими АСР, що дає значне зменшення витрат електроенергії.

Результати роботи у вигляді математичної моделі і спеціалізованого програмного забезпечення для розрахунку енергетичних характеристик ССКМ були використані, про що свідчать акти впровадження (додаток F):

- у методику та роботу із модернізації систем автоматичного управління теплогенергетичними процесами енергоблоків і допоміжного енергетичного обладнання Ладжинської ТЕС;
- в роботі з модернізації систем автоматичного управління процесами повітрообробки в приміщеннях Ладжинської ТЕС; в проектуванні і розробці адаптивної інтелектуальної системи автоматичного управління систем кондиціонування і вентиляції Ладжинської ТЕС.
- в проектуванні і розробці адаптивної інтелектуальної системи автоматичного управління систем кондиціонування і вентиляції із застосуванням регуляторів що працюють на базі контролерів з нечіткою логікою в проектно-монтажній компанії ТОВ «Енергетичні Інвестори»;
- при виконанні держбюджетних науково-дослідних робіт в період з 2008 по 2018 кафедри Морської електроніки НУ «ОМА».

Основні наукові і практичні результати роботи були впроваджені в навчальний процес кафедри Морської електроніки НУ «ОМА» у вигляді глав лекційного курсу та деяких лабораторно-практичних робіт з дисциплін «Програмне забезпечення вбудованих комп'ютерних систем», «Контроль і діагностика суднових електронних і електротехнічних систем», «Системи динамічного позиціонування» та «Електронні судові системи».

Особистий внесок здобувача. Основні наукові, теоретичні та практичні результати дисертаційної роботи отримані особисто автором. Автор самостійно виконав всі теоретичні і практичні дослідження які становлять основу дисертаційної роботи. В дисертаційній роботі особисто автором розроблена математична модель перехідних процесів в АСР ССКМ, методики, алгоритми та програмні модулі для проведення досліджень, виконані дослідження характеристик і показників якості ССКМ. Всі наукові результати, що виносяться на захист, отримані здобувачем особисто і опубліковані в роботах [1-5, 17-25, 69-92]. У спільних роботах дисертанту належить: [1] - розробка комп'ютерної моделі; [2] - розробка бази правил нечіткого регулятора; [3] - розробка структури і моделі нечіткої адаптивної АСУ; [4] - постановка наукової задачі, проведення комп'ютерних експериментів; [5] - розробка комп'ютерної моделі нечіткої АСУ; [69] - методологія дослідження, виконання розрахунків; [70] - розробка бази знань нечіткого регулятора; [71] - розробка моделі нечіткого компенсатора; [72] - синтез нечіткого регулятора; [73] - синтез нечіткої АСУ та її апробація; [74] - розробка нечіткої АСР; [75] - розробка методу настройки нечіткого адаптивного ПД-регулятора; [76] - виконання розрахунку параметрів регулятора і проведення комп'ютерних експериментів; [77] - розробка структури нечіткої АСР, розрахунок параметрів нечіткого адаптивного ПД-регулятора; [78] - дослідження методів фазифікації; [79] - синтез нечіткої експертної системи; [80] - розробка гібридної АСУ; [81] - розробка методу настройки нечіткого ПД - регулятора; [82] - аналіз традиційних методів адаптивного управління; [83] - синтез нейромережевої АСУ процесу горіння палива; [84] - аналіз структури АСУ; [85] - навчання нейромережевої АСР; [86] - розробка структури і навчання нейро-нечіткої мережі; [87] - навчання нейронної мережі і проведення

імітаційних експериментів, [88,89] - постановка задачі та розробка структури гібридної мережі; [89,90] - розрахунки математичної моделі; [91,92] - розробка структури нейронної мережі і її навчання.

Також в роботах апробаційного характеру автором проведений порівняльний аналіз математичних підходів, що дозволяють створювати моделі складних об'єктів управління; запропоновані нові методи фазифікації і дефазифікації лінгвістичних змінних, що застосовуються при створенні таблиць лінгвістичних правил систем нечіткого виводу; розроблені бази правил системи нечіткого виводу для теплоенергетичних процесів; запропоновані структури нейро-нечітких систем управління і систем з прогнозування динамічних параметрів теплових об'єктів. Автор брав участь у виробничих випробуваннях, що дозволило уніфікувати розроблені методики з використанням пакетів прикладних програм для впровадження нейро-нечітких систем автоматизованого управління.

Апробація результатів дисертації. Основні положення і результати роботи докладалися, обговорювалися і були схвалені на науково-практичних, науково-технічних і науково-методичних конференціях:

Міжнародних – 15-й Юбилейный Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харків, 2011-12р.), II МНТК «Компьютерные науки и технологии» (Білгород, Росія, 2011р.), МНПК «Сучасні інформаційні системи та технології» (Суми, 2012р.), МНПК «Прикладная математика, управление и информатика» (Білгород, Росія, 2012р.), XIX МНПК з автоматичного управління «Автоматика» (Київ, 2012р.), МНПК «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании» (Суми, 2012р.), XIII МНПК «Системы поддержки принятия решений. Теория и практика» (Київ, 2012р.), XX МНПК по автоматическому управлению (Миколаїв, 2013р.), МНПК «Современные информационные и электронные технологии» (Одеса, 2014р.), Всеукраїнські та регіональні – НМК «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки» (Одеса, 2011-2016р.), НМК «Энергетика судна: эксплуатация и ремонт» (Одеса, 2011р.), VII Региональная конференция студентов и молодых ученых «Информатика, информационные системы и технологии» (Одеса,

2011р.), IX Всеукраїнська НТК «Математическое моделирование и информационные технологии» (Одеса, 2011р.), XII Всеукраїнська НТК молодих учених, аспірантів та студентів “Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій” (Одеса 2012р.), Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті (Херсон 2012р.), Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування (Херсон 2012р.), VII Всеукраїнська НПК студентів та молодих вчених «Проблеми і перспективи розвитку транспорту» (Одеса, 2018), V та VII НПК «Інформаційні управляючі системи та технології» (Одеса, 2016-18р.).

Публікації. Результати дисертації викладені в 41 публікації, в тому числі: 16 наукових статей в журналах і збірниках зі спеціального переліку ДАК МОН України (з них 3 без співавторів) [2, 17, 18, 21, 69-72, 76, 77, 80, 83, 84, 86, 87, 89, 92]; в зарубіжних наукових профільних виданнях – 2 статті [4, 88]; кілька статей входять в зарубіжні наукометричні бази: Scopus, ORCID, РИНЦ, Index Copernicus, Google Scholar, INSPEC IDEAS та інші, 28 - тези в збірниках праць міжнародних і всеукраїнських конференцій [3, 19,20, 22-26, 73, 74,75, 78, ,79, 81, 82, 85, 90, 91], 1 монографія в німецькому науковому видавництві Lambert Academic Publishing LAP «LAMBERT» спільно з науковим керівником [4].

Структура роботи. Дисертація складається зі вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних літературних джерел (159 найменувань) і 5 додатків. Загальний обсяг роботи становить 255 сторінки і містить 109 рисунків та 14 таблиць, зокрема: 174 сторінок основного тексту, 17 сторінок списку використаних джерел, 43 сторінок додатків.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ ОСОБЛИВОСТЕЙ ТА ПРОБЛЕМ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СУДНОВИХ СИСТЕМ МІКРОКЛИМАТУ

1.1 Особливості експлуатації кліматичних систем в навігаційних умовах, ключові параметри математичних моделей.

Сучасне морське судно є об'єктом управління, який в залежності від конструкції, місцезнаходження, характеру вантажу та інших чинників, піддається впливу зовнішніх і внутрішніх збурень, в тому числі які нелінійно змінюються в часі [6]. Наприклад, система кондиціонування і вентиляції (СКВ) судна піддається впливу таких збурень як температура заборотної води, сонячна активність, швидкість і температура повітряних потоків, мінливі температурні умови всередині приміщень тощо (рис. 1.1). Температура і вологість повітря всередині приміщень судна є життєво важливими параметрами, від стабілізації значень яких залежить стан здоров'я екіпажу та пасажирів.

Відомо, що складні об'єкти управління мають низку характеристик, що істотно ускладнюють створення їх математичних моделей [13]. Аналіз наукових публікацій в області автоматизованих систем регулювання (АСР) складних об'єктів показує, що найкращим є застосування адаптивних і інтелектуальних методів управління. Однак питання вибору оптимальної методики і її синтезу на діючому об'єкті залишається відкритим. У зв'язку з цим авторами пропонується досліджувати найбільш поширені методи налаштувань адаптивних АСР на прикладі СКВ - складних об'єктів управління, які володіють нелінійними характеристиками і схильні до дії різноманітних збурень. Процес автоматизації цих систем є трудомістким завданням, що вимагає детального аналізу основних характеристик [12]. Для підтримки заданих значень сучасних систем клімат-контролю використовуються АСР із застосуванням типових регуляторів (П, ПІ, ПІД), налаштування яких проводять, як правило, використовуючи класичні методи аналізу передавальної функції об'єкта – $W_{об}(s)$. Основним напрямком розвитку промис-

лових регуляторів є розробка методів, що дозволяють знизити витрати людської праці на їх інсталяцію, налаштування і обслуговування. Однак в силу впливу неконтрольованих факторів (див. рис. 1.1), спочатку закладені в математичну модель значення параметрів об'єкта піддаються зміні, в силу чого система регулювання перестає бути досить адекватною об'єкту (приміщенню судна). Це призводить до необхідності частой переналагодження регуляторів внаслідок незадовільної роботи АСР що в свою чергу викликає додаткові витрати енергії, коливання температурного режиму тощо. Аналіз проблем показав, що в даний момент відсутні прості, надійні і загальноприйняті методи автоматичної настройки. Таким чином, для компенсації перерахованих факторів автором пропонується використання інтелектуальних систем з експертними базами знань.

Одним із початкових завдань в роботі є практичне рішення перерахованих вище проблем шляхом аналізу табличного методу адаптації та методу Зіглер-Ніколса для типових (П, ПІ, ПІД) систем регулювання з об'єктом, що діють в невизначених умовах, тобто при впливі зовнішніх і внутрішніх збурень змінюються випадковим чином [40].

Для того, щоб визначити характер поведінки АСР при збурюючих впливах, як правило, можна обмежитися побудовою перехідної функції системи $W_{\text{сист}}$, описує реакцію АСР на одиничний поетапний вплив [46].

Основним завданням досліджень в даній роботі є поліпшення регулювальних характеристик безпосередньо регуляторів системи мікроклімату, отже, як об'єкт управління можна розглядати практично будь-яке окремо взяте приміщення судна з системою регулювання температури, що діє на основі повітряного опалення або охолодження (рис. 1.2), в якій в якості виконавчого органу використовується триходовий клапан з електроприводом. Витрата теплоносія, що проходить через теплообмінник, регулюється за рахунок зміни прохідного перетину клапана. Керуючий сигнал на виконавчий механізм клапана відсилає типовий регулятор. У свою чергу, регулятор отримує інформацію від датчика температури повітря (ТЕ), що знаходиться в приміщенні і реагує на її відхилення від заданої уставки. Контур регулювання є замкнутим. При цьому передбачається кіль-

кісно-якісний спосіб регулювання, тобто коливання теплонадходжень і тепловтрат в приміщенні усуваються за рахунок зміни температури припливного повітря при постійному його витраті.

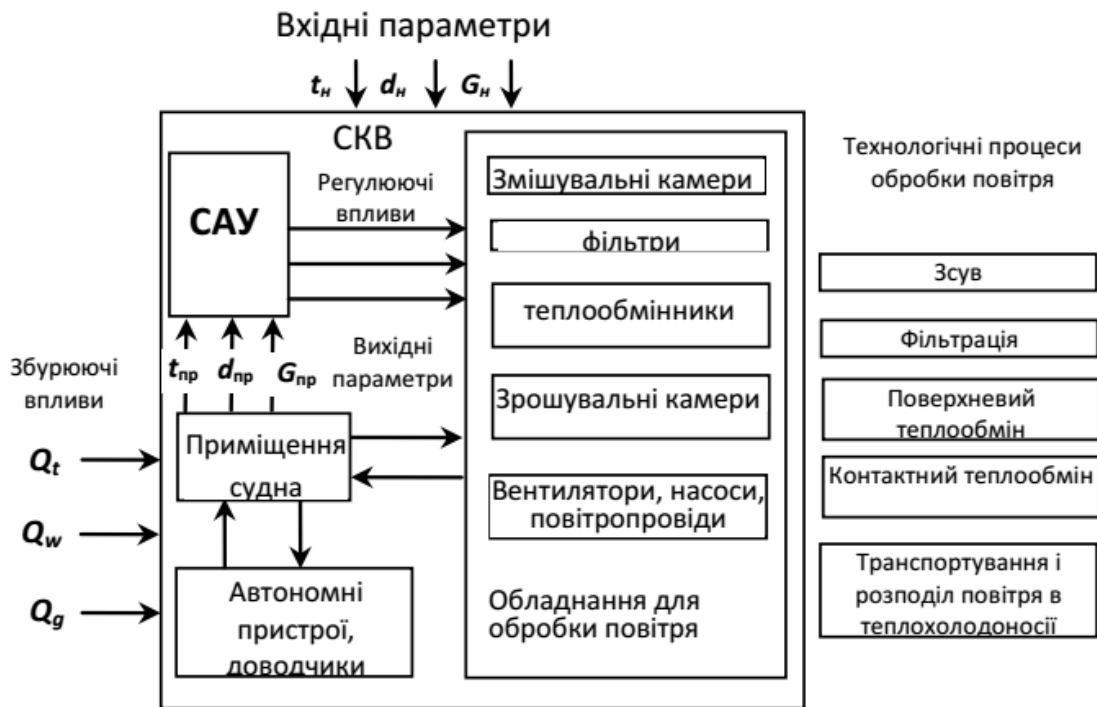


Рис. 1.1. Узагальнена структурна схема СКВ судна як об'єкта автоматизації

де: t_n , d_n , G_n – температура, вологість, витрата зовнішнього повітря;
 t_{np} , d_{np} , G_{np} – температура, вологість, витрата повітря в приміщенні;
 Q_t , Q_w , Q_g – теплове, вологісне та газове навантаження

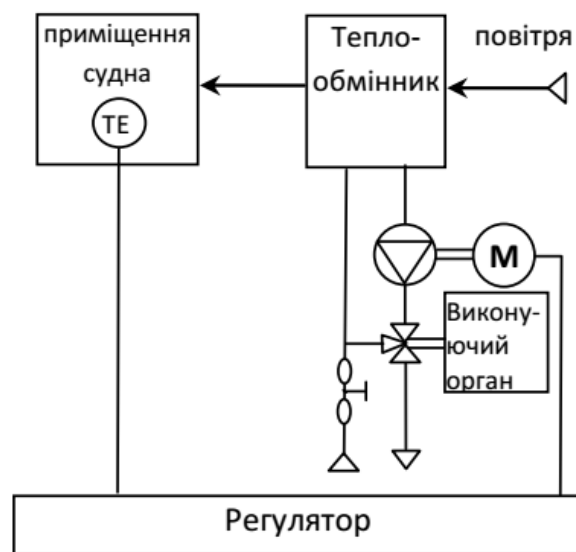


Рис. 1.2. Функціональна схема автоматизації СКВ приміщення судна

У свою чергу, температура припливу змінюється внаслідок підмішування тієї чи іншої кількості охолодженої води із зворотного трубопроводу через триходовий клапан до гарячої води, що надходить в теплообмінник, також при постійному загальному її витраті.

Як об'єкт дослідження взято найбільш функціонально значуще і вразливе, в силу свого розташування, приміщення судна – ходовий місток. Прийmemo його основним елементом або об'єктом СКВ. Для підтримки заданих параметрів в це обслуговуване приміщення подається припливне повітря з параметрами, відмінними від параметрів всередині приміщення. Перемішуючись з внутрішнім повітрям і витісняючи його, припливне повітря асимілює надлишкове тепло і вологу, підігріває і зволожує повітря приміщення. Відомо, що приміщення яке обслуговується характеризується розосередженими показниками повітря. Однак, в силу складності аналізу всіх факторів, облік розосереджених характеристик утруднений, тому ходовий місток при вирішенні задач автоматичного регулювання треба розглядати як об'єкт із зосередженими параметрами, тобто температура і вологість повітря визначаються в найбільш типовій (робочій) зоні. Саме в такій зоні повинні бути встановлені датчики регульованих параметрів.

На функціональній схемі даного приміщення (рис. 1.3) відокремлені зовнішні впливи (теплове Q_n , вологісне W_n і аеродинамічне G_n навантаження) і внутрішні (теплове $Q_{пом}$, вологісне $W_{пом}$ і газове $C_{пом}$ навантаження). Вхідними параметрами є: температура $t_{под}$, вологість $d_{под}$ і витрата повітря що подається в приміщення $G_{под}$, і відповідно регульованими: $t_{пом}$, $d_{пом}$ й $C_{пом}$. У системах комфортного кондиціювання для стабілізації заданого стану повітря, тобто двох незалежних змінних $t_{пом}$ й $d_{пом}$ можна використовувати, в загальному випадку, три керуючі впливи: $t_{под}$, $d_{под}$ і $G_{под}$. Особливості застосування кожного визначаються вихідними умовами, обмеженнями, що накладаються на систему, а також економічними міркуваннями.

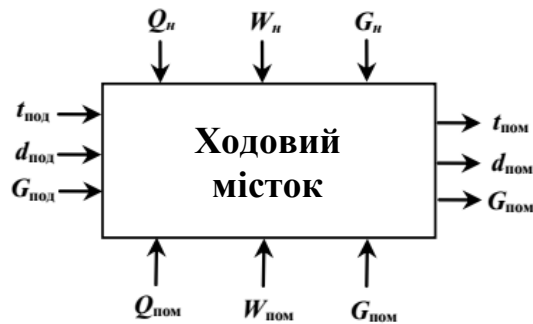


Рис. 1.3. Функціональна модель ходового містка як об'єкта регулювання

Узагальнену структурну схему АСР можна представити у вигляді, показаному на рис. 1.4.

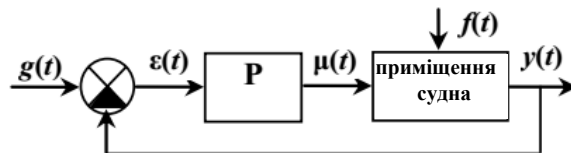


Рис. 1.4. Узагальнена структурна схема АСР

де: P – регулятор з передавальною функцією $W_p(s)$; $f(t)$ – збурюючий вплив; $y(t)$ – регулююча величина; $\varepsilon(t)$ – помилка регулювання; $g(t)$ – задаючий вплив; $\mu(t)$ – керуючий вплив.

Подібне приміщення судна є об'єктом у вигляді інерційної ланки першого порядку. Динамічні властивості приміщення залежать від кратності повітрообміну K_v , узагальненого розміру приміщення l_v (відношення обсягу приміщення $V_{\text{пом}}$ до площі поверхні огорожень F), коефіцієнтів теплопередачі огорожень $K_{\text{огр}}$ і постійної часу огорожі $T_{\text{огр}}$. Аналітично передавальна функція по каналу температури припливного повітря отримана у вигляді

$$W_{\text{тпр}}(s) = \frac{T_{\text{огр}} \cdot s + 1}{T_{\text{пом}} \cdot s + 1} K_{\text{пом}}, \quad (1.1)$$

де коефіцієнт передачі приміщення(об'єкта) $K_{\text{пом}}$ і $T_{\text{огр}}$ можуть бути визначені за показниками K_v , l_v , $K_{\text{огр}}$, теплопровідності c_v й щільності ρ_v повітря; $T_{\text{пом}}$ – стала часу приміщення, $T_{\text{пом}} \approx K_v^{-1}$.

В силу того, що значення параметрів аналітичної моделі в залежності від типу приміщення і його конструкції є змінними, для отримання адекватної моделі об'єкта використовуємо графічну обробку експериментальної кривої розгону (рис.1.5). Крива розгону демонструє зміни температури повітря в приміщенні протягом доби при впливі зовнішніх і внутрішніх факторів з умов перебування судна в районі екватора. Тут враховано, що ходовий місток, як правило, знаходиться на верхній палубі під безпосереднім впливом сонячних променів вікон, стін і даху, що робить його особливо уразливим до зовнішніх збурень і схильним до різких перепадів температур.

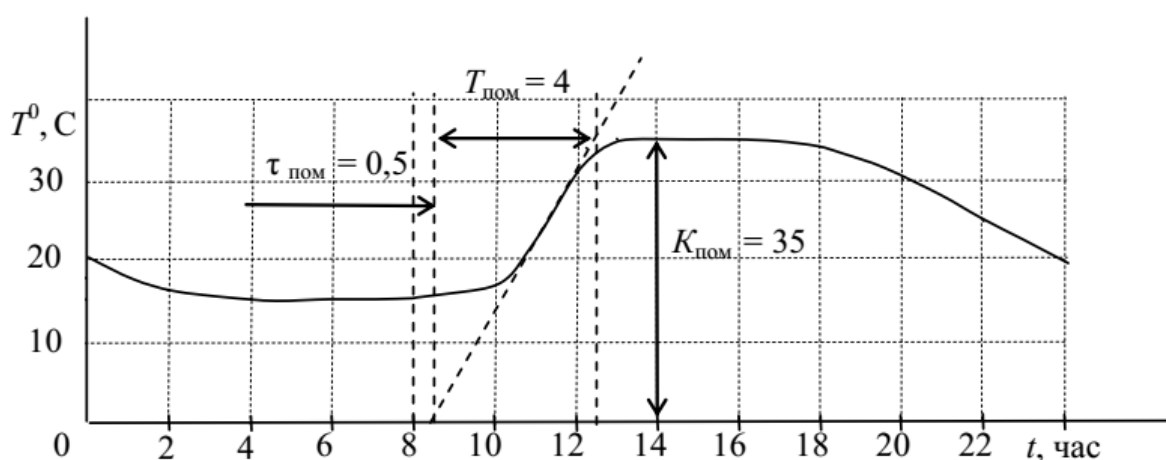


Рис. 1.5. Крива розгону температури повітря приміщення судна

Подібні розгінні криві можливо отримати виходячи із загальнодоступних даних по багаторічному спостереженню температур практично в будь-якій точці знаходження судна.

З огляду на те, що для приміщень характерні періоди зміни складових теплового навантаження від декількох хвилин до годин, в задачах з такими періодами коливань можна знехтувати інерційністю огорож і уявити приміщення аперіодичною ланкою першого порядку з запізненням і передавальною функцією

$$W_{\text{tmp}}(s) = \frac{K_{\text{пом}}}{T_{\text{пом}} \cdot s + 1} \cdot e^{-\tau_{\text{пом}} s} \quad (1.2)$$

Обробка експериментальної кривої розгону на рис. 5 на ділянці 8-18 годин спостереження дозволяє отримати наступну функцію: $W(s) = (35 / 4s + 1)e^{0.5s}$.

Для розробки адаптивної АСР ССКМ ходового містка проаналізуємо один із сучасних підходів в адаптивних системах регулювання - табличний або формульний метод розрахунку параметрів типового регулятора. Цей метод оптимально підходить для розробки адаптера, що вибирає найкращі значення налаштувань регуляторів, що дозволяє отримати очікувані критерії якості перехідного процесу при зміні значень параметрів приміщення, знайдених в процесі обробки кривої розгону: $K_{\text{пом}}$, $T_{\text{пом}}$ і $\tau_{\text{пом}}$ – запізнення (див. рис. 1.5).

Даний метод актуальний для судна, тому що управління настройками регулятора з використанням таблиць за методом Копеловіча доцільно використовувати в тих випадках, коли експериментально можна отримати ряд передавальних функцій об'єкта при впливі на нього невизначених збурень. Знаючи заздалегідь можливі зміни режиму роботи системи (в нашому випадку параметри зовнішнього середовища - температуру повітря, води, швидкість вітру і течії, сонячну активність тощо), експерт-наладчик виконує ідентифікацію об'єкта для декількох різних режимів і для кожного з них знаходить значення параметрів (налаштувань) регулятора. Значення цих параметрів записують в таблицю. У процесі функціонування системи датчики вимірюють величину, яка характеризує режим роботи системи та в залежності від її значень адаптер обирає з таблиці величини коефіцієнтів П, ІІ або ІІД-регулятора.

Недоліком цього методу є великі витрати на попередню ідентифікацію, необхідну для складання таблиці [49]. Однак цю проблему частково можна вирішити застосуванням спеціальних програмних засобів і загальнодоступних даних для автоматичної ідентифікації та адаптації регулятора, після виконання яких отримані параметри заносяться в таблицю або блок адаптера.

Запропонуємо адаптивну автоматизовану систему регулювання (ААСР) температури повітря в приміщенні судна (рис. 1.6). У завдання блоку ідентифікації об'єкта (БІО) входить спостереження і оцінка значень параметрів об'єкта регулювання. Блок адаптації самостійно виробляє добірку нових налаштувань регулятора, вибираючи його алгоритм (П, ІІ, ІІД) і здійснює автонастройку. Наявність блоку дозволяє стабілізувати процес регулювання без участі операто-

ра і зупинки обладнання. Блок ідентифікації проводить ідентифікацію об'єкта, який функціонує в умовах невизначеності.

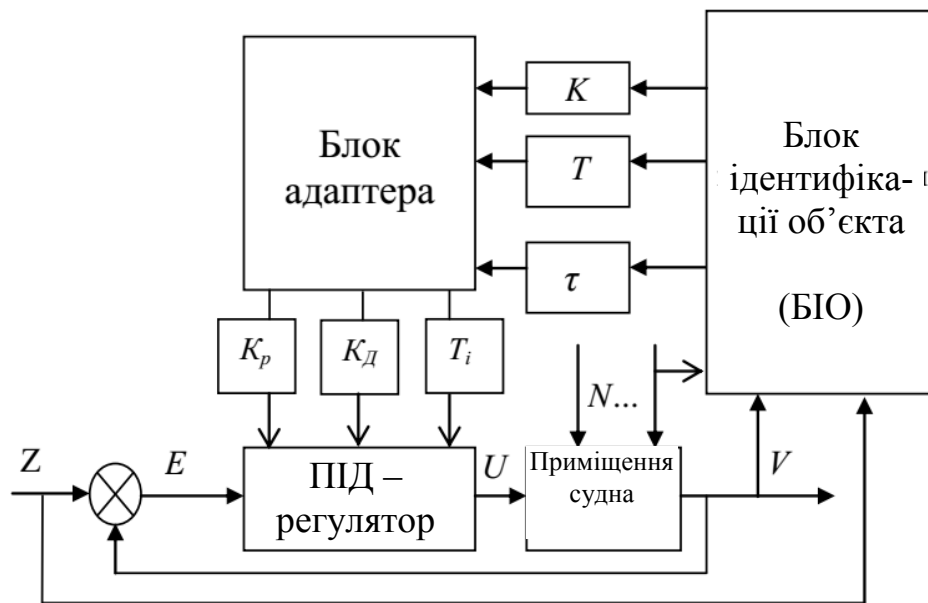


Рис. 1.6. Структура адаптивного ПІД-регулятора з об'єктом управління

де: E – помилка; Z – завдання; V – вихідне значення; N – збурення; U – управляючий вплив; K_p , T_i , T_d – значення налаштувань ПІД-регулятора

У завдання блоку ідентифікації об'єкта (БІО) входить спостереження і оцінка значень параметрів об'єкта регулювання. Блок адаптації самостійно виробляє добірку нових налаштувань регулятора, вибираючи його алгоритм (П, ПІ, ПІД) і здійснює автонастройку. Наявність блоку дозволяє стабілізувати процес регулювання без участі оператора і зупинки обладнання. Блок ідентифікації проводить ідентифікацію об'єкта, який функціонує в умовах невизначеності.

1.2 Критерії експлуатації систем клімат-контролю для суден різного типу

Підтримка в приміщеннях судна в літній і зимовий час найбільш сприятливого клімату є завданням вельми важливим, так як забезпечує поліпшення умов праці і відпочинку екіпажу і пасажирів. Повітря, яким ми дихаємо, містить 23,5% (по масі) кисню і 76,5% азоту та інших газів [6]. Життя людини в першу чергу залежить від того, чи достатньо він отримує кисню. При зниженні вмісту кисню до 17,5% людина не зможе прожити і кілька хвилин. Тому важливим для самопочут-

тя людей є газовий склад і чистота повітря. Людський організм також безперервно виробляє тепло і для нормального протікання фізіологічних процесів воно повинно передаватися навколишньому середовищу. Порушення тепловологісної рівноваги між людиною і навколишнім середовищем призводить до переохолодження та перегрівання тіла. Допустимий перепад температур зовнішнього повітря і повітря в приміщенні показаний на рис. 1.7.

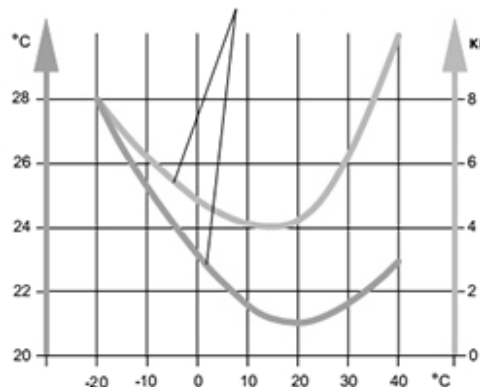


Рис. 1.7. Допустимий перепад температур зовнішнього повітря і в приміщенні

Наприклад, при температурі зовнішнього повітря 36°C , в приміщенні можна підтримувати температуру близько 23°C . Отже, при високій температурі зовнішнього повітря температура в приміщенні не настільки низька, щоб забезпечити відведення значної частини тепла сухим шляхом, тепловиділення буде здійснюватися в значній мірі випаровуванням поту з поверхні шкіри. Тому дуже важливо, щоб стан повітря в приміщенні допускав подальше насичення повітря водяними парами, які виділяються в приміщенні людьми, інакше кажучи в повітрі повинен існувати дефіцит вологи, тобто воно не повинне бути насиченим. Якщо вологість повітря велика, то воно не може повністю поглинати виділену вологу, виникає рясне потовиділення, дихання стає важким, людина швидко стомлюється і відчуває спрагу. Повітря з дуже низькою вологістю надає зворотну дію – шкіра стає сухою, шорсткою і може розтріскуватися від напруги. Те ж відбувається зі слизовими оболонками носа, рота і горла, в зв'язку з чим підвищується сприйнятливність організму до простудних захворювань. Таким чином, завданням сучасних систем кондиціонування повітря є підтримка в приміщеннях найбільш сприятливих, так

званих комфортних умов. Ці умови визначаються в першу чергу температурою і вологістю повітря, але в поєднанні зі швидкістю його руху, а також певним хімічним складом повітря і очищенням його від шкідливих домішок.

В процесі експлуатації судна температура і тиск повітря в приміщеннях змінюються, він насичується різними парами, газами, вологою, пилом. Щоб забезпечити нормальні умови для роботи та відпочинку суднового екіпажу і пасажирів, в житлових і службових приміщеннях судна необхідно підтримувати постійним якісний склад (кондицію) повітря. Подачу свіжого повітря в приміщення і видалення з них забрудненого на більшості суден забезпечують системи вентиляції. Однак на думку дисертанта температуру, вологість, чистоту, рухливість і тиск повітря в оптимальних межах на судах найкращим чином можуть підтримувати тільки «розумні» суднові системи комфортного мікроклімату – ССКМ. За призначенням їх поділяють на комфортні, що регулюють параметри повітря в житлових приміщеннях судна, і технічні, що регулюють параметри повітря в службових приміщеннях і вантажних відсіках. Вміст кисню в повітряному середовищі суднових приміщень змінюється незначно і практично не впливає на самопочуття людей. Забруднення ж повітря пилом та іншими шкідливими речовинами, а також зміна температури повітря несприятливо впливають на людину. Проведені дослідження показують, що межами комфортних зон в приміщеннях є повітря з відносною вологістю 40-60% при температурі 19-23 °C для зимових і 23-27 °C для літніх умов [9].

Аналіз публікацій ряду вчених в області проектування і експлуатації СКВ, дозволяє дисертанту виділити наступні ключові критерії що впливають на ефективну роботу суднових ССКМ [8, 12, 13, 16, 145, 151]:

Температура навколишнього середовища. Обслуговування і тип судна вимагає правильного обліку зовнішньої температури. Деякі комфортабельні лайнери здійснюють часті круїзи, де їм доводиться зіткнутися з більш жорсткими навантаженнями по холоду і теплу. Облік навколишніх умов повинен бути прийнятий на основі переважаючих температур під час рейсу. Зазвичай, для охолоджуючого циклу, зовнішні умови для північної атлантики становлять +25.5 °C, для субтропі-

чного клімату $+26.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ і для тропічного $+28\text{ }^{\circ}\text{C}$. Для опалювального циклу зазвичай розраховуються температура $-18\text{ }^{\circ}\text{C}$, якщо тільки судно не функціонує постійно в умовах більш високих температур. Розрахункова температура морської води $+29\text{ }^{\circ}\text{C}$ влітку і $-2\text{ }^{\circ}\text{C}$ взимку [6].

Внутрішня температура. Оптимальна температура (ЕТ) від $+21.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+23\text{ }^{\circ}\text{C}$ зазвичай вибирається як температура внутрішніх умов для комерційних торгових суден. Діапазон внутрішньої температури від $+24.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+27\text{ }^{\circ}\text{C}$ і близько 50% відносної вологості влітку і від $+18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $+24\text{ }^{\circ}\text{C}$ взимку. Комфортабельні умови в приміщеннях повинні прийматися до уваги для конкретного періоду зовнішнього середовища. Якісні системи розраховуються для надання оптимального комфорту при зовнішніх умовах від $18\text{ }^{\circ}\text{C}$ до $24\text{ }^{\circ}\text{C}$ і 90-100% вологості й також гарантується правильна підтримка температурного режиму та режиму вологості в період, коли явні навантаження невеликі.

Вимоги до вентиляції. У місцях скупчення людей (їдальні, вітальні) надається біля $0,15\text{ м}^2/\text{с}$ свіжого повітря на людину або 3 повітрообміну в годину. В інших приміщеннях як мінімум $0,8\text{ м}^2/\text{с}$ зовнішнього повітря або 2 повітрообміну в годину. Максимальний обсяг зовнішнього повітря $0,25\text{ м}^2/\text{с}$ на людину. Розрахунок обсягу припливного повітря ведеться на основі необхідного повітрообміну або з розрахунку компенсації теплонадлишків. Мінімальна кількість повітря по приміщенню становить $0,15\text{ м}^2/\text{с}$ на людину або $0,18\text{ м}^2/\text{с}$ на робоче місце. Припливна вентиляція повинна бути збалансована з витяжною [9].

Гігієнічні основи визначення допустимих відхилень параметрів в приміщенні. Відхилення від оптимальної температури в обидві сторони призводять до різному гігієнічному ефекту: переохолодження організму при зниженні температури і перегріву при підвищенні. При рівній величині відхилень ефект впливу різний, найбільш відчутно зниження температури. До теперішнього часу створена методика нормування перевищення і допустимого зниження температури [9]. В її основі лежить введене В. Н. Тетеревніковим і Л. В. Павлухіним поняття про так званої «лінії застуди» як деякому поєднанні температури і рухливості повітря, що приводить до відчутного переохолодження організму. Можливість застуди оціню-

ється поєднанням мінімальної температури і максимальної рухливості поблизу відкритих частин тіла людини. Метод визначення допустимого відхилення температури може бути пояснений за допомогою рис. 1.8. На графіку в координатах рухливості ω_v - температура повітря t_v - на робочому місці нанесена лінія оптимальних поєднань параметрів (лінія 3) та лінія «застуди» (лінія 2). Лінія допустимих поєднань параметрів 1, показана на рис. 1.8, розташовується значно вище лінії оптимальних параметрів. Якщо точка, що характеризує стан повітря, піднімається вгору до лінії допустимих параметрів, то відбувається перегрів організму, а якщо опускається вниз до лінії застуди, то відбувається переохолодження організму.

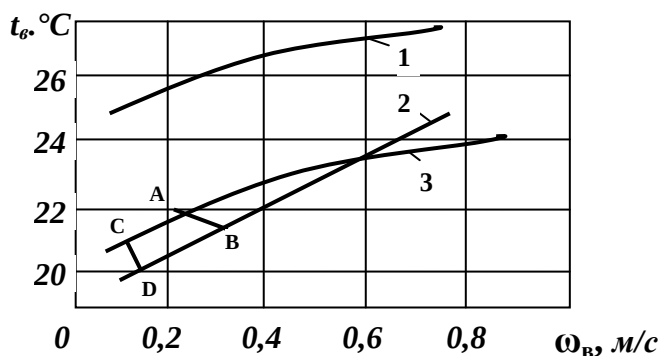


Рис. 0.8. Графік для визначення допустимої зміни температури

Розглянемо, як на основі даних про оптимальні параметри і лінії застуди можна визначити допустиме відхилення (зниження) температури. Нехай середні значення температури і рухливості в робочій зоні визначають положення точки А поблизу лінії оптимальних параметрів. За відомою середньої рухливості можна знайти максимальну на основі даних рекомендацій. Знаючи максимальну рухливість, визначають положення точки В на лінії застуди. Різниця температур $t_A - t_B$ відповідає допустимому зниженню температури.

Середні параметри повітря в робочій зоні приміщення $t_{v,ср} = 21^\circ\text{C}$, $\omega_{v,ср} = 0,1$ м/с (точка С). Як бачимо можемо знайти допустиме зниження температури, якщо робочі місця знаходяться по відношенню до припливних струменів на основній ділянці і в зворотному потоці. За експертними даними і рекомендаціями при підтримці оптимальних параметрів і при робочих місцях на основній ділянці струменя

і в зворотному потоці $\omega_{в.мах}/\omega_{в.сп.} = 1,2$. Тому $\omega_{в.мах}=1,2 \cdot 0,1$ м/с. На перетині лінії застуди з лінією $\omega_{в.мах}=0,12$ м/с ставимо точку D. Допустиме зниження температури в цих умовах дорівнює $t_c - t_D = 1^\circ\text{C}$. Допустиме підвищення температури визначається як різниця максимального допустимого і заданого значень. За такою методикою можна створювати математичні моделі та програмувати контролери базами експертних даних сучасних ССКМ.

Гігієнічні дослідження дозволяють в першому наближенні вважати, що допустимі великі чисельні значення відхилення при меншій тривалості і навпаки. Ефект відхилення температури в часі можна враховувати імпульсом відхилення (годино-градуси), який з часом може бути нормований для різних видів трудової діяльності. Допустимі відхилення відносної вологості нормувати складніше, так як при середніх значеннях вологості повітря реакції людини на її відхилення виражені значно слабше, ніж на відхилення температури і рухливості повітря. У нормах проектування [54] вказується, що допустимими відхиленнями, якщо немає спеціальних технологічних вимог, є значення $+10^\circ\text{C}$ по температурі і $\pm 7\%$ по відносній вологості в місці установки датчика, тобто відхилення регламентується як статичні в часі. Слід зазначити, що в суднових системах дана методика застосовується рідко, що призводить до збільшення ризику захворювань членів екіпажів суден. Виходячи з актуальності дисертантом пропонується можливість обліку допустимих відхилень в автоматизованій системі управління ССКМ з урахуванням швидкості руху повітря в приміщенні, або швидкості відхилення температури від заданого значення, що на думку автора істотно підвищить рівень комфортності.

Аналіз наукових джерел [70-85], дозволяє виявити ряд ключових факторів, що впливають на ефективність експлуатації ССКМ, і потребують врахування при створенні математичних моделей, проектуванні та налаштуванні сучасних розумних систем обладнання і автоматики:

- сонячна радіація та теплопередача через основний корпус, палуби, перебірки
- розсіювання тепла (прихованого і явного) людей та надходження від освітлення
- розсіювання тепла (прихованого і явного) припливного повітря
- тепло від двигунів та іншого електрообладнання, від трубопроводів і машин

- тепловтрати через палуби і перебірки
- вентиляцію повітря, інфільтрацію, коефіцієнти теплопередачі
- теплопостачання від внутрішніх джерел.

Слід зазначити, що рівень, на якому знаходиться поширення тепла і вологості від людей залежить від рівня їх активності і зовнішньої температури. Значення, які можуть бути використані як відповідні 27°C сухого термометра, наведені у довідниках. У житлових і вантажних приміщеннях морських суден, оснащених ССКМ, повинні забезпечуватися розрахункові умови мікроклімату відповідно до норм, що істотно не відрізняються у всіх морських державах. Складають результуючу температуру окремі компоненти мікроклімату – відносна вологість повітря, швидкість руху повітря, показник, що характеризує середню радіаційну температуру (алгебраїчну різницю між температурою повітря приміщень і середньої радіаційної температурою огорожень) тощо, в залежності від допустимих відхилень. У свою чергу ці компоненти залежать від інших, наприклад, показник середньої температури огорож потрібно брати з розрахунків теплоізоляції приміщень. Свої математичні моделі існують і для обсягів зовнішнього повітря і його рециркуляції.

Управління роботою кондиціонерів на судах проводиться за допомогою приладів ручного та автоматичного керування, контролюючих і регулюючих показники температури і вологості внутрішнього і зовнішнього повітря, що передається на ходовий місток. В умовах рейсу момент початку вентиляції визначають при постійному контролі й зіставленні температури і вологості зовнішнього і трюмного повітря, температур вантажу і забортної води.

Незважаючи на те, що ССКМ - одні з перших суднових енергетичних установок, які були автоматизовані, до нашого часу виникають проблеми з швидкодією і точністю регулювання цих систем. Обслуговуючий персонал змушений часто вручну коригувати автоматичну систему регулювання (АСР) ССКМ, а люди в обслуговуваних приміщеннях зазнавати тимчасові незручності і навіть ризик захворіти через перепади температур. До сих пір деякі вчені ставлять під

сумнів не тільки адекватність роботи АСР ССКМ для деяких застосувань, але і аналізують можливість автоматичного управління ССКМ в цілому [44-48].

Завдання ускладнене тим, що ССКМ, як об'єкт управління, схильна до впливу численних збурень, нелінійно змінюються в часі: температура заборотної води, сонячна активність, швидкість і температура повітряних потоків, мінливі температурні умови всередині приміщень тощо. Крім того, останнім часом істотно зростають вимоги до систем мікроклімату на судах для підвищення продуктивності праці моряків, тому що на тлі погіршення екологічних параметрів навколишнього середовища в цілому, шкідливих виробництв поблизу районів плавання, аварійної небезпеки, шкідливих вантажів, що перевозяться, вірусної та мікробіологічної небезпеки тощо, якість повітряного середовища в приміщеннях, контроль його складу і швидкі заходи з нормалізації виходять на перший план. Комп'ютеризація та оснащення суден дорогими приладами, точна і безвідмовна робота яких можлива тільки за певних температур і вологості повітря, строгі параметри для багатьох вантажів також сильно ускладнюють завдання ССКМ. В наш час поняття автоматизації суден стало містити в собі не тільки контроль відразу декількох параметрів повітря, а набагато більший реєстр компонентів для математичних моделей і тому на думку автора правильно говорити про складні «розумні» судові системи кліматичного контролю або комфортного мікроклімату - ССКМ. Актуальність завдань забезпечення більш високих показників швидкодії, якості, енергоємності та надійності ССКМ очевидна. Вони в свою чергу зводяться в першу чергу до правильного вибору математичної моделі та програмного забезпечення регуляторів і режимів їхньої роботи [99-112].

Провівши аналіз стану проблеми можна прийти до висновків, що в наш час більшість традиційних регуляторів (П, ПІ, ПІД) при проведенні пусконалагоджувальних або режимних робіт доводиться донастроювати вручну. Саме такі регулятори використовуються в основному на більшості суден. І хоча на сучасних судах, оснащених комп'ютерними системами управління, процедура адаптації зводиться до переустановлення програмного забезпечення з новими параметрами алгоритму управління, її все ж потрібно виконати вручну, що пов'язано з

Температура приточного повітря на виході з повітроводу контролюється термоперетворювачем опору Т. Управління триходовим седельчатим клапаном здійснюється виконавчим механізмом з керуючим сигналом постійного струму і робочим діапазоном 2-10 В, номінальним ходом 20 мм і часом повного ходу штока 150 с. Як регулятор може бути застосований аналоговий або мікропроцесорний вимірювач-регулятор, що дозволяє роботу з термоопором типу ТС100П (точність $\pm 0,5\%$) і забезпечує на виході уніфікований аналоговий сигнал 0-10 В. На систему подається одиничний скачок у вигляді швидкої зміни положення триходового клапана. Криві розгону отримані за результатами експерименту представлені на рис. 1.10.

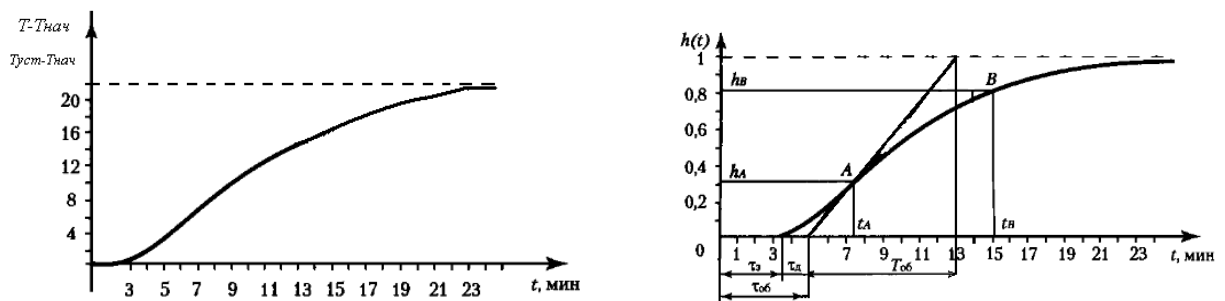


Рис. 1.10. Усереднена крива розгону і перехідна характеристика об'єкта

Визначаємо параметри об'єкта:

$$k_{об} = \frac{|T_{уст} - T_{нач}|}{\Delta U_p} = \frac{22}{4} = 5,5 \text{ } ^\circ\text{C/V};$$

$$T_{об} = 8 \text{ мин}; \quad \tau_{об} = \tau_z + \tau_{доп} = 5 \text{ мин}.$$

За отриманими характеристиками об'єкта, наприклад, для ПІ-регулятора і процесу регулювання з 20% перерегулюванням знаходять параметри налаштування регулятора [55]:

$$k_p = \frac{0,7}{k_{об} \frac{\tau_{об}}{T_{об}}} = 0,20;$$

$$T_{и} = 0,7 T_{об} = 5,6 \text{ мин}.$$

Ці ж параметри, визначені за методом із застосуванням номограм [79] рівні:

$$k_p = 0,18; \quad T_{и} = 5,9 \text{ мин}.$$

Основним елементом ССКМ є обслуговуване приміщення, в якому постійно відбувається перехід повітря з одного стану в інший. Для підтримки заданих параметрів в нього подається приточне повітря з параметрами, відмінними від параметрів всередині приміщення. Перемішуючись з внутрішнім повітрям і витісняючи його, це повітря асимілює надлишкове тепло і вологу або підігріває і зволожує повітря приміщення. Обслуговуване приміщення характеризується розосередженими показниками повітря. Облік розосереджених характеристик утруднений, тому приміщення при вирішенні задач автоматичного регулювання розглядається як об'єкт із зосередженими параметрами, тобто температура і вологість повітря визначаються в найбільш типовій (робочій) зоні. Саме в такій зоні повинні бути встановлені датчики регульованих параметрів. Управління температурою приміщення за допомогою зміни витрат приточного і повітря, що видаляється (кількісне регулювання), не дивлячись на переваги, пов'язані з економією теплоти, води і електроенергії, реалізується рідко. Це пов'язано з відносно високими капітальними витратами і складністю управління, особливо в багатозональних системах. Тому найбільш поширеними є системи стабілізації температури в приміщенні по каналу зміни температури припливного повітря (якісне управління). Такі системи найбільш повно досліджені як об'єкти автоматизації: виведені аналітично та експериментально підтверджені передавальні функції, значення коефіцієнтів передач і постійних часу [140-146].

Динамічні властивості приміщення залежать від кратності повітрообміну K_v , узагальненого розміру приміщення l_v (відношення обсягу приміщення $V_{\text{пом}}$ до площі поверхні огорожень F), коефіцієнтів теплопередачі огорожень $K_{\text{огр}}$ і постійної часу огорожі $T_{\text{огр}}$ [87]. Аналітично передавальна функція по каналу температури приточного повітря отримана у вигляді:

$$W_{\text{tmp}}(s) = \frac{T_{\text{огр}} \cdot s + 1}{T_{\text{пом}} \cdot s + 1} K_{\text{пом}} \quad (1.3)$$

де коефіцієнт передачі приміщення $K_{\text{пом}}$ й $T_{\text{огр}}$ можуть бути визначені за показниками K_v , l_v , $K_{\text{огр}}$, теплопровідності c_v і щільності ρ_v повітря; $T_{\text{пом}}$ - постійна

часу приміщення, $T_{\text{пом}} \approx K_{\text{в}} - 1$. Аналіз кривих перехідного процесу, побудованих на підставі наведеної передавальної функції і експериментальних даних, показує, що процес зміни температури в приміщенні має дві виражених ділянки (рис. 1.11).

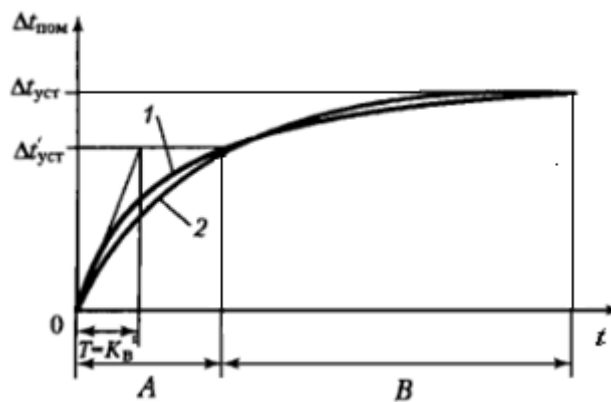


Рис. 1.11. Процес зміни температури в приміщенні
(1 – експеримент, 2 – розрахунок)

На першому (А) - процес зміни температури відбувається швидко, швидкість зміни температури при цьому залежить від кратності повітрообміну $K_{\text{в}}$. За експертними даними цей відрізок часу становить $(3-4) K_{\text{в}} - 1$. У міру поглинання теплоти огорожею і обладнанням швидкість зміни температури повітря сповільнюється (ділянка В), проявляється інерційність огорожень ($T_{\text{огр}}$ може складати близько десятка годин). Тому, теоретичний кінець перехідного процесу може бути досягнутий через кілька діб. З огляду на, що для приміщень характерні періоди зміни складових теплового навантаження від декількох хвилин до годин, в задачах з такими періодами коливань можна знехтувати інерційністю огорож і уявити приміщення аперіодичною ланкою першого порядку з передавальної функцією

$$W_{\text{пом}}(s) = \frac{K_{\text{пом}}}{T_{\text{пом}} \cdot s + 1} = \frac{5,5}{8s + 1} \quad (1.4)$$

Другим типовим для установок кондиціювання повітря об'єктом, що вимагає аналітичного підходу, є теплообмінний апарат (рис. 1. 12). У поверхневих теплообмінниках типу «повітря-рідина», «повітря-холодоагент» в

якості впливів, що збурюють виступають температура рідини на вході t_{WBX} , витрата повітря G_B , температура повітря на вході t_{BX} (рис. 1.12). Керуючими впливами можуть бути витрата рідини G_W , температура рідини t_{WBX} , витрата повітря G_B , а регульований параметр t_{BIX} .

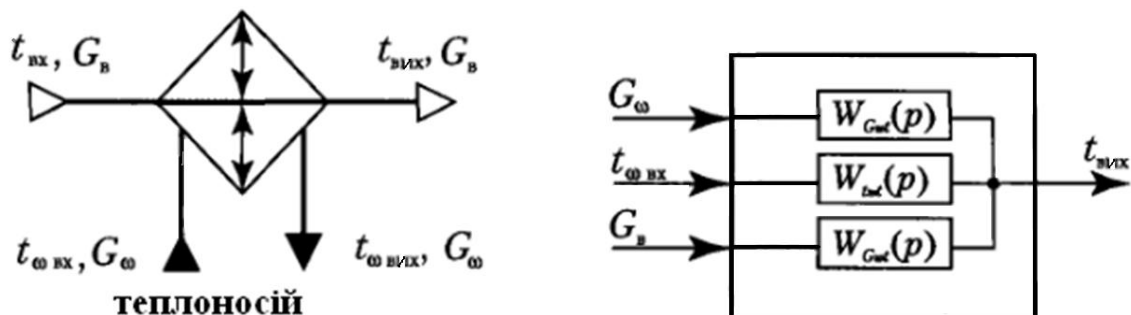


Рис.1.12. Функціональна та структурна схеми теплообмінника типу «повітря-рідина»

Численні теоретичні та експериментальні дослідження [12,56,79] показали, що в першому наближенні передавальна функція такого апарату незалежно від каналу управління описується типовою аперіодичною ланкою першого порядку виду:

$$W(s) = \frac{K}{T_{\text{то}} \cdot s + 1} = \frac{0,5}{3s + 1} \quad (1.5)$$

де K – статичний коефіцієнт передачі апарату;

$T_{\text{то}}$ – постійна часу теплообмінного апарату.

При цьому виявилось, що при різних збуреннях постійна часу для такого виду апаратів не залежить від виду збурення і визначається тільки витратами середовищ. Для багатьох промислових об'єктів управління проведення вимірювань статичних і динамічних характеристик кошовно й складно. У цьому випадку використовують експериментальні або адаптивні методи настройки, при яких налагодчика, як правило, не цікавить тип об'єкта управління і його характеристики.

Таким чином, можна проводити деякі експерименти з аналізу впливу зміни налаштувань регулятора на динаміку системи. Найпростішим методом налашту-

вання в цьому випадку є метод послідовної зміни налаштувань при фіксації форми характеристики перехідного процесу [95]. Наприклад, для ПІ-регулятора при максимальному значенні T_n в кілька прийомів збільшують k_p . І при кожному новому значенні k_p аналізується крива перехідного процесу за обраним критерієм якості. При зафіксованому k_p , відповідному оптимальному критерію в цій серії дослідів, починають змінювати T_i і визначають її значення, відповідне найкращій формі перехідного процесу за обраним критерієм. Процедуру повторюють до тих пір, поки будь-яка зміна (збільшення або зменшення) k_p і T_i не буде призводити до погіршення форми перехідного процесу. Однак, як бачимо, кількість таких операцій велика, що робить таку настройку трудомісткою і малоефективною в виробничих умовах. Тому більш актуальним є метод незатухаючих коливань (Циглера-Нікольса) [96]. В цьому випадку вимикаються інтегральна і диференціальна складові регулятора ($T_i = \infty$, $T_d = 0$), тобто система переводиться в П-закон регулювання і регульована величина реєструється одним з описаних вище способів. Шляхом послідовного збільшення k_p з одночасною подачею невеликого стрибкоподібного зміни сигналу завдання домагаються виникнення в системі незатухаючих коливань з періодом $T_{кр}$. При цьому фіксується $k_{кр}$ і за певними $k_{кр}$ і $T_{кр}$ розраховуються параметри налаштування регулятора.

Налаштування систем автоматичного регулювання ССКМ зводиться до забезпечення необхідної за проектом точності вимірювань параметрів технологічного процесу і підтримці заданих значень кліматичних параметрів в установленому діапазоні. Аналіз наукових досліджень [43-52], і комп'ютерні експерименти проведені дисертантом дозволяють зробити висновок, що настройка АСР ССКМ в більшості випадків є трудомістким завданням, що вимагає детального аналізу основних характеристик і властивостей контрольованих і збурюючих параметрів. Також, провівши аналіз і апробацію традиційних методів знаходження математичних моделей і обчислення за ними налаштувань регулятора можна зробити висновок, що більшість з них дуже трудомісткі і ненадійні, вимагають багато часу і не враховують багато збурюючих факторів, тому останнім часом для управління системами кондиціонування повітря активно розвиваються принципово нові закони

регулювання, які отримали назву «нейротехнологія і нечітка логіка» (Neuro & Fuzzy logic) [52]. Даний підхід використовує досвід експертів АСР [63].

Апробація типового методу і його порівняльну характеристику з експертним підстроюванням ПІ-регулятора, при впливі на АСР зовнішніх і внутрішніх параметричних збурень, проводилася в програмі MatLab Simulink (рис. 1.13-1.14).

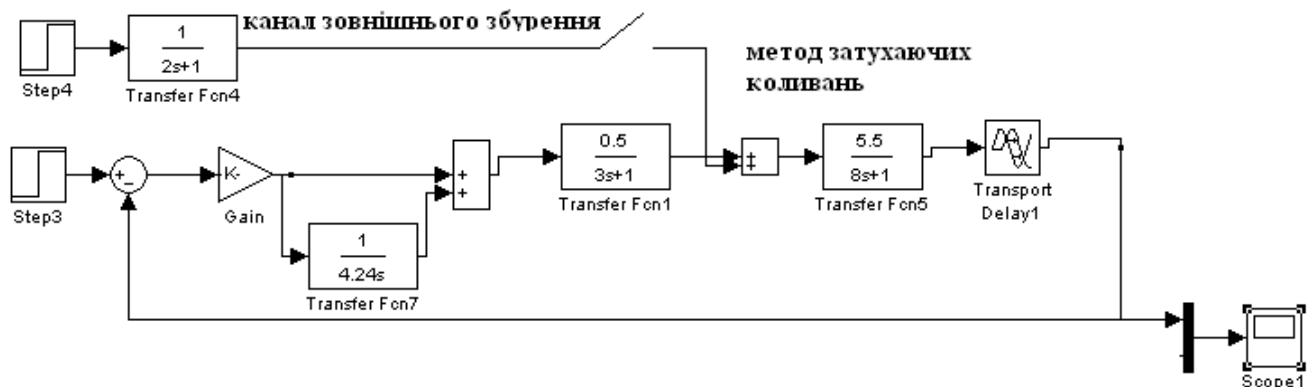


Рис .1.13. Моделювання АСР ССКМ

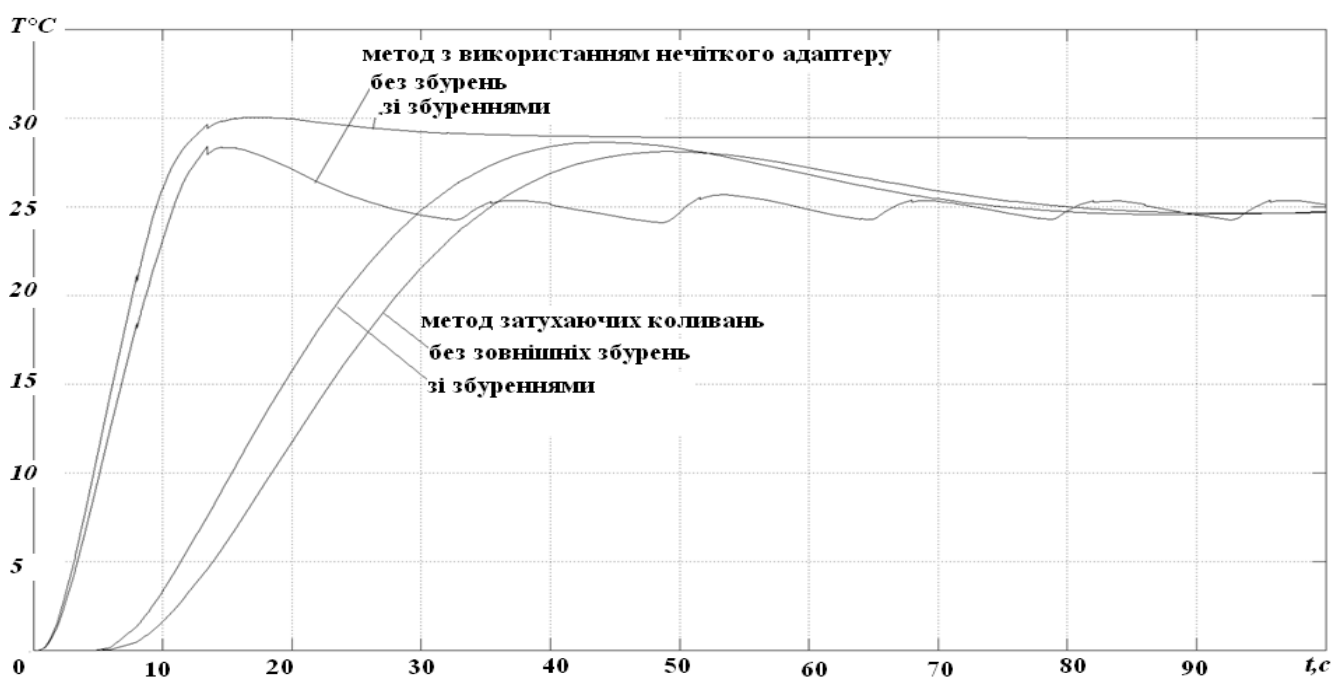


Рис. 1.14. Перехідні процеси моделювання АСР ССКМ методом затухаючих коливань при дії зовнішнього збурення й експертного підстроювання.

Як видно з перехідних характеристик (рис. 1.14), класичний метод показав у даному застосуванні більший у 3 рази час регулювання в порівнянні з експертни-

ми. Також поставлений експеримент показав, що настройка ПІ - регулятора, при дії АСР в умовах невизначеності, досить складний процес, який потребує удосконалення алгоритмів і великого обсягу експертних знань. Як бачимо, при зовнішніх збуреннях, АСР з типовим налаштуванням за методом незатухаючих коливань видає залишкову помилку регулювання і відрізняється значними коливаннями температури, що на практиці вирішується зміною завдання регулятору. Виходячи з цього, можна зробити висновки про подальше удосконалення АСР ССКМ, а саме пошуку і апробації більш перспективних алгоритмів в типових контролерах і використання баз знань з експертним підстроюванням значень параметрів регуляторів при впливі на об'єкт глибоких зовнішніх і внутрішніх збурень, викликаних навігаційною обстановкою.

Тепер розглянемо варіант роботи адаптивної системи при знаходженні судна в чотирьох точках до зовнішньої температури повітря 10, 15, 30 і 35 °С, нехтуючи іншими збуреннями і не змінюючи параметри передавальної функції приміщення $T_{\text{пом}} = 4$ години, $\tau_{\text{пом}} = 0,5$ години.

Розрахуємо значення параметрів налаштувань регуляторів K_p , T_i і T_d за заданими формулами (див. табл. 1.1) табличного методу для об'єктів з самовирівнюванням, з метою отримання найкращого перехідного процесу в ССКМ.

Прийmemo, що АСР реалізує аперіодичний тип перехідного процесу. Тоді, виконавши відповідні розрахунки, отримаємо значення K_p , T_i і T_d налаштувань регулятора для блоку адаптації. Для аналізу запропонованого методу проведемо комп'ютерний експеримент, вважаючи, що необхідно підтримати оптимальну для життєдіяльності моряків температуру повітря $t = 20$ °С при різних місцях плавання судна. Для вибору оптимальних налаштувань регулятора, що вносяться до табличного алгоритму адаптації, за допомогою програми MathLab (Simulink) [126] змодельємо АСР (рис.1.15).

Формули для визначення оптимальних налаштувань методом Копеловича

Закон регулювання	Аперіодичний перехідний процес	Процес з 20%-ним перерегулюванням	$\min \int x^2 dt$ – мінімальний інтегральний критерій якості
I	$K_{p1} = \frac{1}{4,5K_{об}T_{об}}$	$K_{p1} = \frac{1}{1,7K_{об}T_{об}}$	$K_{p1} = \frac{1}{4,5K_{об}T_{об}}$
П	$K_p = \frac{0,7T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$	$K_p = \frac{0,7T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$	$K_p = \frac{0,9T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$
ПІ	$K_p = \frac{0,6T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 0,6T_{об}$	$K_p = \frac{0,7T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 0,7T_{об}$	$K_p = \frac{T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = T_{об}$
ПІД	$K_p = \frac{0,95T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 2,4\tau_{об};$ $T_d = 0,4\tau_{об}$	$K_p = \frac{1,2T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 2,0\tau_{об};$ $T_d = 0,4\tau_{об}$	$K_p = \frac{1,4T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_i = 1,3\tau_{об};$ $T_d = 0,5\tau_{об}$

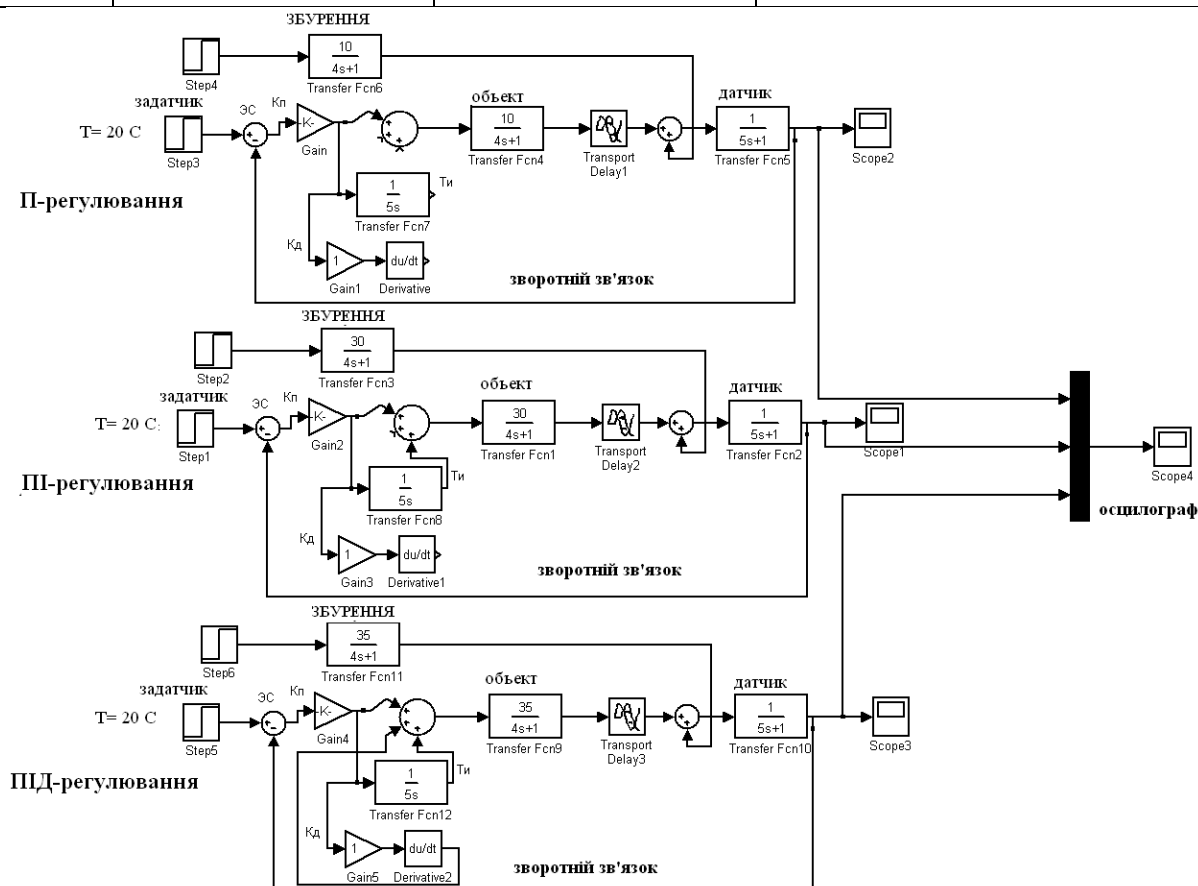


Рис. 1.15. Комп'ютерна модель АСР приміщення судна з трьома типами регуляторів

Як видно з рис. 1.15, модель містить схеми з трьома типами регулювання - П, ІІ і ІІД, враховує вплив зовнішнього збурення і транспортну затримку. Для зручності дослідження прийнято, що приміщення до регулювання приймає температуру зовнішнього середовища за каналом збурення. Осцилограф показав перехідні процеси, показані на рис.1.16. Їх аналіз показав, що при використанні налаштувань за табличним методом адаптації ІІ і ІІД регулювання продемонструвало процес що розходиться при всіх температурних режимах, а ІІ-регулятор досяг затухаючого процесу із залишковою помилкою (див. рис. 1.16). Таким чином, використання даного методу не є ефективним і вимагає пошуку нових наукових підходів.

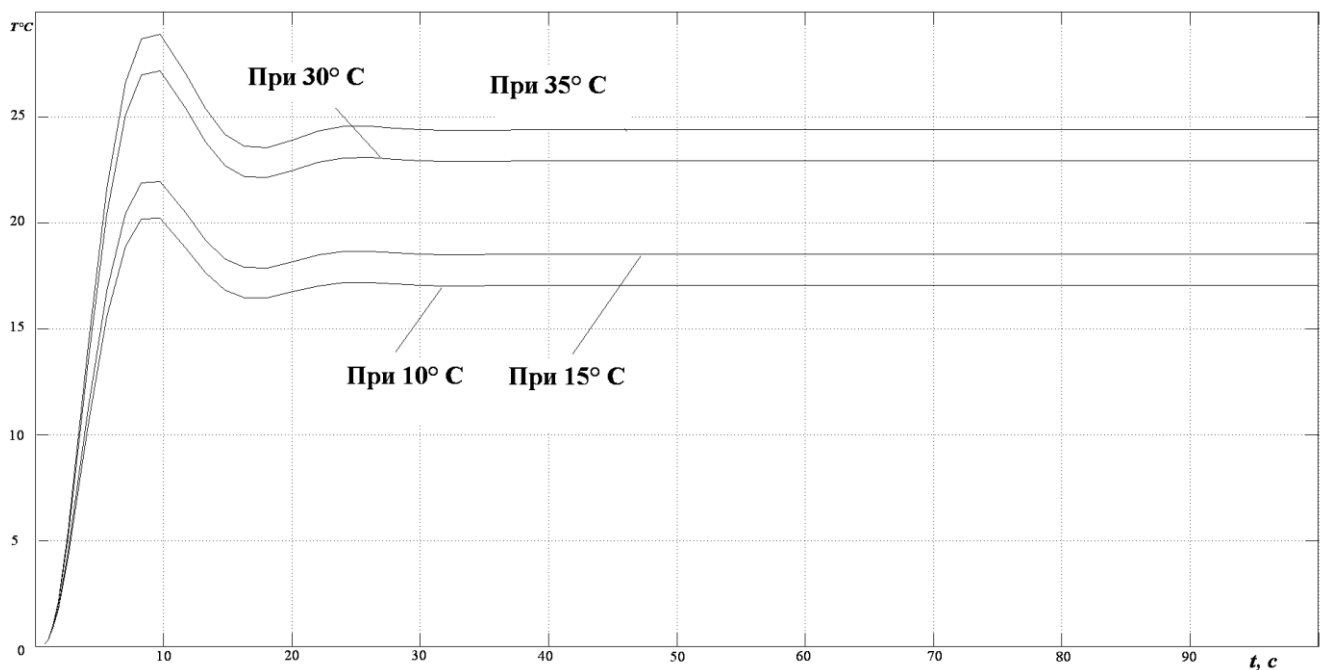


Рис. 1.16. Перехідні процеси АСР з формульними настройками ІІ-регулятора

Аналіз широко використовуваного в адаптивних САУ методу Зіглер-Ніколса, також продемонстрував свою неефективність, показавши процеси що розходяться при всіх температурах.

Виходячи з отриманих результатів, передбачається розглянути експертні методи адаптації. Відомо, що досвідчені експерти-наладчики в процесі ручного налаштування АСР досягають якісних результатів, виходячи з аналізу перехідної характеристики. Використовуючи експертні рекомендації при коригуванні на-

лаштувань T_i і T_d (наприклад при 30°) отримаємо перехідні процеси, представлені на рис. 1.17.

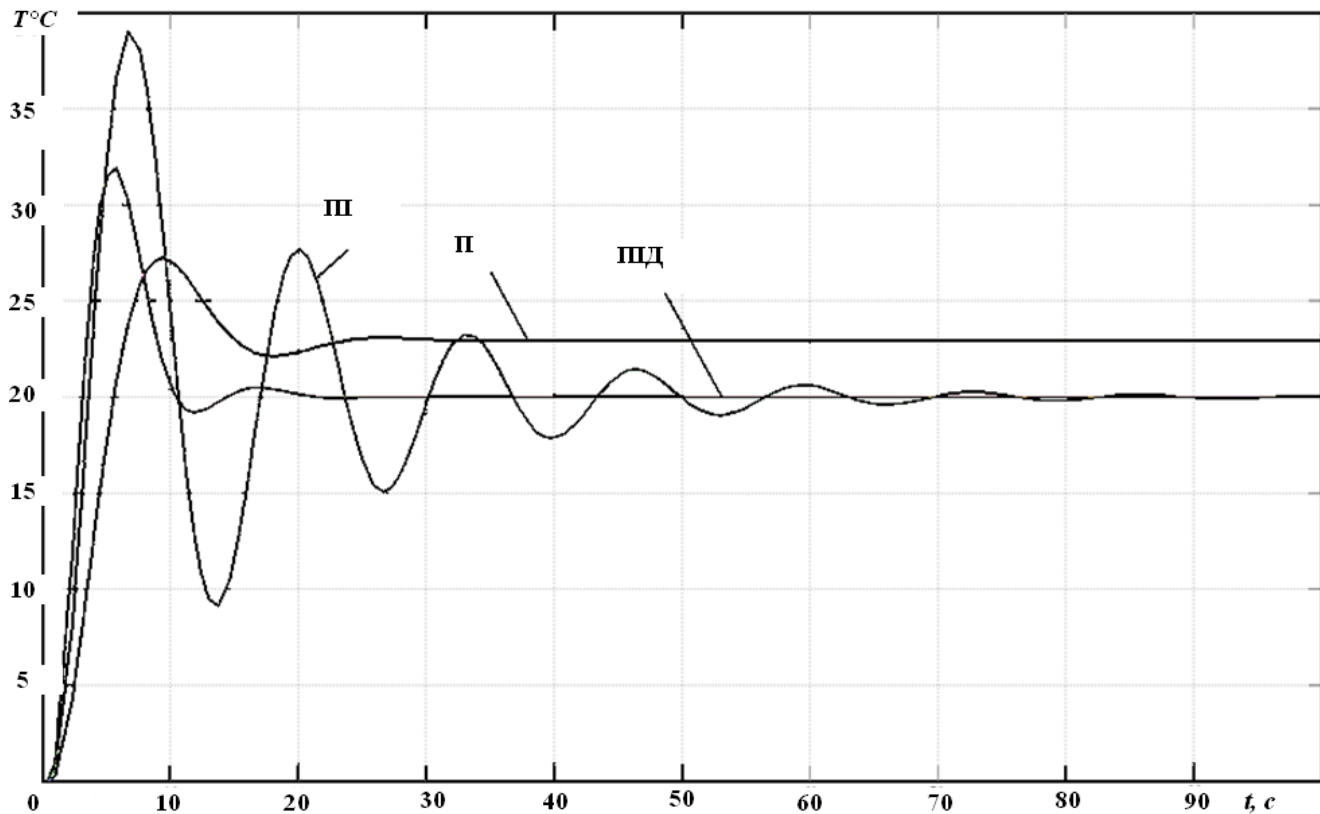


Рис. 1.17. Перехідні процеси АСР з ручним підстроюванням регуляторів

Перехідні процеси на рис.1.17, отримані за табличним методом демонструють переваги П-регулятора, що показує загасаючий процес, з часом регулювання $T_p = 13\text{с}$. Підстановка інших значень передавальних функцій об'єкта управління, виходячи з впливу зовнішніх збурень, також вказує на ефективність П-регулятора в порівнянні з ПІ і ПД в процесі регулювання температури. Однак при експертному ручному налаштуванні можна домогтися поліпшення роботи цих типів регуляторів (рис.1.17), але перехідні процеси будуть мати більший T_p і коливальність. Для зменшення залишкової помилки в П-регуляторі рекомендується ввести в адаптері функцію зміни завдання температури.

В результаті експерименту встановлено, що на основі аналізу перехідних процесів, можна зробити висновок про бажане коригування табличного методу адаптації та пошуку нових, більш ефективних методів регулювання, наприклад, з використанням досвіду експерта. Перевірка цього твердження (проведене моде-

лювання) показало можливість формування таблиці правил адаптації з оптимальним рекомендованим варіантом значень параметрів адаптивного регулятора для приміщення ходового містка судна з урахуванням досвіду експертів (табл. 1.2). В результаті запропонована адаптивна автоматизована система регулювання АСР ССКМ приміщення.

Таким чином, проведений огляд і аналіз сучасних тенденцій в розробках АСР ССКМ спільно з проведеними дослідженнями роблять очевидним той факт, що використання адаптивного регулювання в системі контролю клімату суднових приміщень дає можливість:

- скоротити час налаштування контурів регулювання температури і вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу - електромеханіків;
- гарантувати найкращу якість управління ССКМ в будь момент часу і в будь-якому місцезнаходження широкого класу суден;
- забезпечити безперервний процес підстроювання параметрів регулятора під мінливі властивості приміщень.

Таблиця 1.2.

Експертні параметри типових регуляторів в ССКМ

Закон регулювання	Тип перехідного процесу		
	Аперіодичний	З 20%-ним перерегулюванням	$\min \int x^2 dt$ – мінімальний інтегральний критерій якості
I	$K_{p1} = \frac{1}{6,5K_{об}T_{об}}$	$K_{p1} = \frac{1}{0,7K_{об}T_{об}}$	$K_{p1} = \frac{1}{5,5K_{об}T_{об}}$
II	$K_p = \frac{0,25T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$	$K_p = \frac{1,6T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$	$K_p = \frac{1,9T_{об}}{K_{об}\tau_{об}}$
III	$K_p = \frac{0,65T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_{и} = 0,6T_{об}$	$K_p = \frac{1,8T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_{и} = 0,7T_{об}$	$K_p = \frac{5,5T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_{и} = T_{об}$
ПД	$K_p = \frac{1,95T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_{и} = 2,4\tau_{об};$ $T_{д} = 0,85\tau_{об}$	$K_p = \frac{4,2T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_{и} = 0,2\tau_{об};$ $T_{д} = 2,4\tau_{об}$	$K_p = \frac{2,4T_{об}}{K_{об}\tau_{об}};$ $T_{и} = 0,3\tau_{об};$ $T_{д} = 2,5\tau_{об}$

Як показує практика, адаптивні регулятори дозволяють економити до 15% енергоресурсів у порівнянні з ручним керуванням або близько 5% в порівнянні з не оптимально налаштованим класичним ПІД регулятором. Крім того, застосування адаптивного регулювання веде до скорочення термінів і вартості пусконаладжувальних робіт. Так як сучасна електроніка володіє величезними апаратними ресурсами, в залежності від вимог до САР, можна передбачити алгоритм роботи блоку адаптації з автоматичним прорахунком регулювальних характеристик і доповнити його всіма відомими методами синтезу регуляторів, від традиційних (Ротача, АФХ, Зіглер-Ніколса, Л.І. Кона, метод незатухаючих коливань) до суперсучасних на основі нечіткої логіки, нейронних мереж і генетичних алгоритмів. Завдяки таблиці оптимальних налаштувань блок адаптації запропонованого варіанту побудови САР визначає найкращий варіант роботи ССКМ.

1.4 Висновки за першим розділом

Навантаження на систему мікроклімату навіть в межах одного рейсу сучасного океанського судна варіюються в широкому діапазоні за короткий період. Не тільки обладнання ССКМ має бути здатне витримати такі змінні навантаження, але і органи управління (автоматика) також повинні бути пристосовані до несподіваних кліматичних змін. Часто в таких цілях використовують центральне автоматичне керування. Однак, в низько швидкісних системах вентиляції повітря, ручне управління призводить до того, що виникає прагнення до збалансованості стану повітря в усіх обслуговуваних приміщеннях, що негативно впливає на процес енерговитрат і швидкість стабілізації температури і вологості.

Детальний аналіз принципів роботи АСР ССКМ демонструє, що традиційні регулятори реалізують, як правило, позиційний, П або ПІ - закони управління, а також принципи каскадного і комбінованого управління. Разом з тим, в силу впливу на обладнання ССКМ і об'єкти регулювання (приміщення судна) значної кількості неконтрольованих і випадкових збурень і перешкод, якість процесів регулювання є неоптимальним за низкою критеріїв (часу регулювання, перерегулю-

вання, закидання). Що сприяє перевитраті енергоресурсів судна. Аналіз збурюючих факторів дозволяє зробити висновок, що діючі АСР ССКМ також потребують частішої адаптації своїх налаштувальних параметрів. Однак, процес ручного налаштування типових регуляторів часто залежить від досвіду і знань суднових механіків і електромеханіків, і вимагає тривалого часу, що також знижує якість перехідних процесів експлуатації.

Таким чином, сучасні суднові ССКМ не залежно від принципу їх роботи та обладнання потребують інтелектуальних гібридних автоматичних АСР. Тут виникає актуальне наукове завдання порівняльного аналізу найбільш поширених методів адаптивного управління та їх удосконалення. Для ефективної експлуатації АСР ССКМ необхідний пошук нових шляхів й удосконалення математичних моделей, методів і алгоритмів управління. У першому розділі роботи виконано:

1. Виконано аналіз систем кондиціонування і вентиляції які використовуються на морських судах. Показано, що в розглянутих системах знаходять широке застосування різні методи автоматичного регулювання.

2. Розглянуто принципи та особливості побудови основних пристроїв, що входять до складу типових кондиціонування і вентиляції. Показані приклади використання сучасних інтелектуальних систем при обслуговуванні в пристроях вентиляції, кондиціонування, клімат-контролю і мікроклімату, прийнято поняття судової системи комфортного мікроклімату - ССКМ.

3. Розглянуто особливості схеми технічної реалізації та режимів роботи ССКМ.

4. Показано, що використання в якості базових параметрів - налаштувальних параметрів основних регуляторів дозволяє з єдиних позицій виконати оцінку основних параметрів перехідних процесів в енергетичній частині обладнання.

5. Розглянуто особливості побудови ССКМ інтелектуальної структури. Показано, що гібридний принцип управління дозволяє створювати більш ефективні ССКМ за рахунок зменшення часу регулювання і підвищення якості повітряної суміші.

6. Розглянуто особливості дослідження і проектування систем мікроклімату. Обґрунтовано необхідність проведення досліджень показників якості та енергетичних параметрів від режиму роботи, числа приміщень, різних коефіцієнтів і співвідношень температури і складу повітря на вході і виході ССКМ.

7. Розглянуто існуючі методи дослідження ССКМ. Обґрунтовано використання спеціалізованого програмного забезпечення (універсальної програми і бібліотеки) для проведення досліджень систем мікроклімату.

8. Розглянуто відомі методи аналізу перехідних процесів в аналогічних системах. Обґрунтовано використання методу аналізу перехідних процесів на основі виборі в якості базових параметрів – параметрів регуляторів коефіцієнтів показників якості повітряної суміші.

9. Обрані методи дослідження, програмне забезпечення та методи аналізу дозволяють провести дослідження, необхідні для проектування ССКМ при менших витратах часу.

РОЗДІЛ 2.

АНАЛІЗ І РОЗРОБКА МАТЕМАТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ДЛЯ ВПРОВАДЖЕННЯ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

2.1 Експериментальне та аналітичне моделювання процесів в об'єктах

Методи дослідження дисертаційної роботи.

Технологічну карту методологічного забезпечення дослідження за темою дисертації представлено на рис. 1.18, яка представляє схему застосування методів системного підходу для вирішення головного завдання дисертаційної роботи.

Сучасними запитами практики є створення комфортних умов мікроклімату в суднових приміщеннях за умови зменшення аварійності, енерговитратності та підвищення соціальної екологічної безпеки.

Метою дисертаційного дослідження є удосконалення якості, а відповідно і соціальної екологічної безпеки судноплавства, шляхом забезпечення належної експлуатації систем мікроклімату за рахунок оптимізації ергатичного управління даних систем.

Прийнято гіпотезу про можливість створення оптимально-комфортних умов мікроклімату в приміщеннях судна за допомогою гібридних інтелектуальних методів управління і експлуатації суднових засобів вентиляції та кондиціювання.

Головне завдання дослідження полягало в дослідженні ГІМ і розробці гібридної інтелектуальної моделі, що дозволить забезпечити виконання комфортних умов життєдіяльності екіпажу та пасажирів морських суден за різних умов експлуатації морського судна.

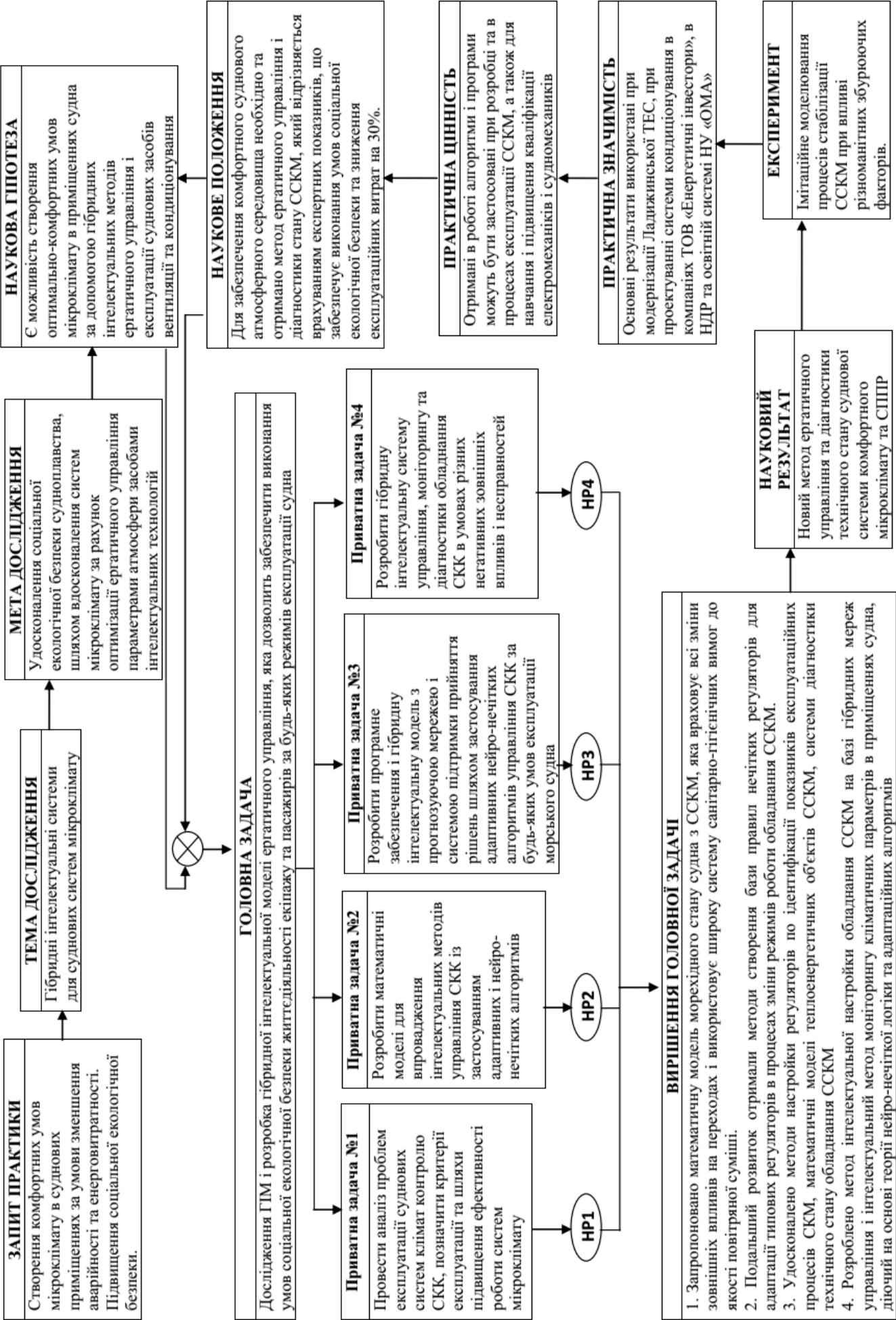


Рис. 2.1 Технологічна карта дисертації

Рішення головної задачі дисертації було отримано за допомогою її декомпозиції на окремі складові задачі, які були отримані за допомогою методів теорії дослідження операцій. Проведений аналіз показав, що головну задачу дисертаційного дослідження доцільно розділити на наступні чотири часткові складові задачі:

1. Провести аналіз проблем експлуатації суднових систем комфортного мікроклімату ССКМ, позначити критерії експлуатації та шляхи підвищення ефективності роботи систем мікроклімату.

2. Розробити математичні моделі для впровадження інтелектуальних методів управління ССКМ із застосуванням адаптивних, нейро-нечітких і генетичних систем алгоритмів.

3. Розробити програмне забезпечення і гібридну інтелектуальну модель з прогнозуючої мережею і системою підтримки прийняття рішень шляхом застосування адаптивних нейро-нечітких і генетичних алгоритмів управління ССКМ в будь-яких режимах експлуатації судна.

4. Розробити гібридну інтелектуальну систему управління, моніторингу та діагностики обладнання ССКМ в умовах різних негативних зовнішніх впливів і несправностей

Рішенням кожної із складових незалежних задач є відповідний науковий результат (НР1, НР2 НР3 та НР4):

- науковим результатом першої складової задачі НР1 є запропонована математична модель морехідного стану судна з ССКМ, яка враховує всі зміни зовнішніх впливів на переходах і використовує широку систему санітарно-гігієнічних вимог до якості повітряної суміші

- отримані методи створення бази правил нечітких регуляторів для адаптації типових регуляторів в процесах зміни режимів роботи обладнання ССКМ є науковим результатом НР2 другої складової задачі;

- удосконалення методів настройки регуляторів по ідентифікації показників експлуатаційних процесів ССКМ, створення математичних моделей теплоенерге-

тичних об'єктів ССКМ, систем діагностики технічного стану обладнання ССКМ є науковим результатом НР3 третьої складової задачі.

Розроблений метод інтелектуальної настройки обладнання ССКМ на базі гібридних мереж управління і інтелектуальний метод моніторингу кліматичних параметрів в приміщеннях судна, чинний на основі теорії нейро-нечіткої логіки та генетичних алгоритмів є науковим результатом НР4 четвертої складової задачі.

На виході ми отримали новий метод оптимального налаштування обладнання ССКМ.

В роботі проводилося комп'ютерне імітаційне моделювання основних результатів дисертаційного дослідження. Отримані в дисертаційній роботі теоретичні результати та імітаційне моделювання підтвердили прийняту наукову гіпотезу

Практична значимість проведеного дисертаційного дослідження полягає в тому, що отримані в роботі алгоритми і програми можуть бути застосовані на судах в процесі експлуатації ССКМ, розробниками суднових систем мікроклімату та при навчанні та підвищенні кваліфікації електромеханіків і судномеханіків.

Отримані в дисертаційному дослідженні наукові результати та результати проведеного імітаційного моделювання визначають наукове положення дисертаційної роботи, яке формулюється в такий спосіб:

Отримано метод оптимального налаштування обладнання ССКМ, який відрізняється урахуванням особливостей санітарно-гігієнічних норм і різких змін зовнішніх впливів на обладнання, що забезпечує вибір оптимальної стратегії експлуатаційних параметрів обладнання.

Аналіз представлений в попередньому розділі дозволяє отримати універсальні математичні моделі для експлуатації ССКМ. Дисертантом на основі досліджених критеріїв та особливостей роботи даних систем, визначено ряд математичних моделей об'єктів ССКМ, використання яких дозволяє провести в САПР MatLab Simulink достовірне імітаційне моделювання ергатичної системи експлуатації та управління ССКМ, наприклад як за моделлю рис. 2.2 з отриманими перехідним процесом рис. 2.3.

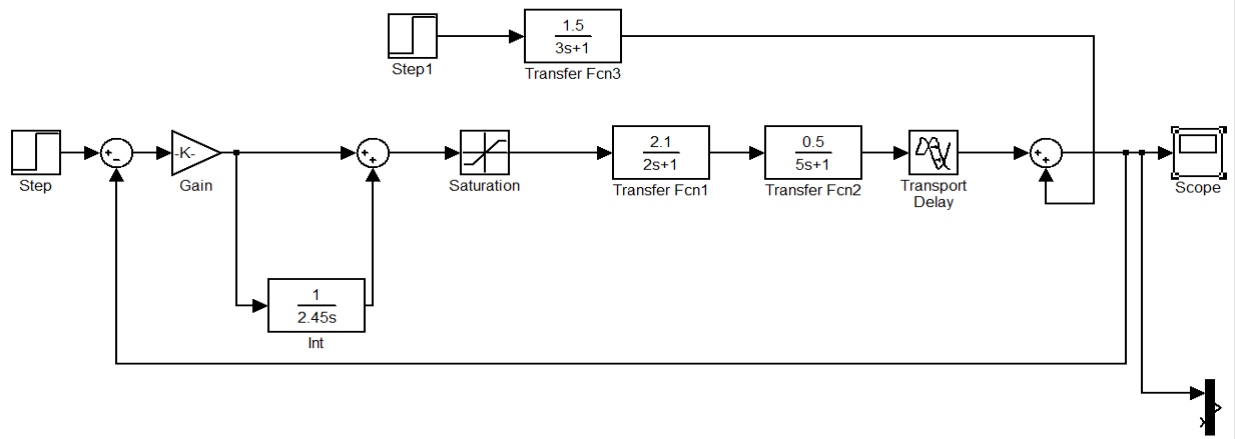


Рис. 2.2. Імітаційне моделювання АСР ССКМ за визначенням ефективності запропонованої моделі об'єкта регулювання

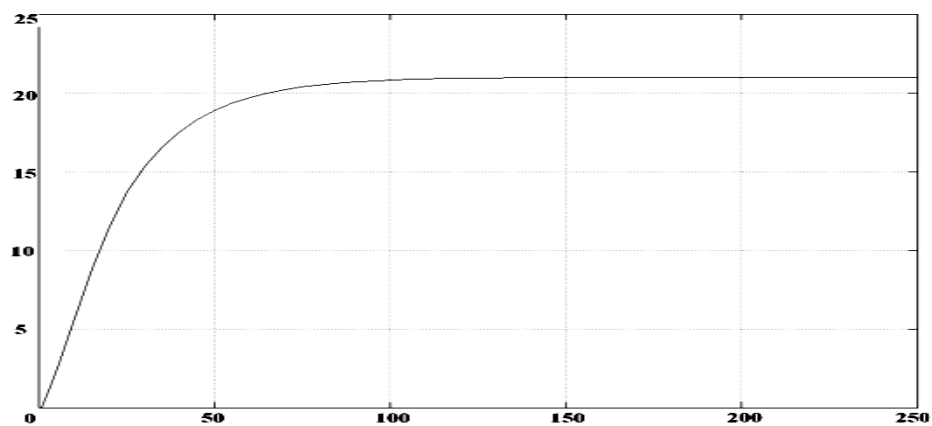


Рис. 2.3. Перехідний процес АСР ССКМ

Аналіз показників якості АСР ССКМ демонструє аперіодичний перехідний процес без помилки регулювання і часом регулювання 2 хвилини, що відповідає вимогам морського регістра.

Система кондиціонування повітря являє собою динамічну систему, тому опис зв'язків між основними змінними має відображати як сталі в часі процеси (статика), так і несталі процеси переходу в часі від одного стану до іншого (динаміка). За цією ознакою математичні моделі можна поділити на статичні і динамічні. Статична модель об'єкта з зосередженими параметрами являє собою систему алгебраїчних рівнянь, що описують термодинамічну сутність що відбуваються в об'єкті процесів без урахування зміни змінних стану в часі. Статична модель об'єкта складається в координатах вхід-вихід (зв'язок між вхідними і вихідними змінними стану протікає в об'єкті процесу) з урахуванням граничних умов протікання процесів. Статична модель розробляється з урахуванням всіх можливих реалізацій

технологічних режимів роботи апарату або пристрою. В даному випадку процес моделювання зводиться до встановлення виду математичної залежності між що спостерігаються вихідними і керуючими або збурюючими вхідними змінними стану процесу в системі (або підсистемі), тобто залежністю виду $Y=F(X,U,f)$.

Істотною умовою адекватності статичної моделі системи є опис взаємозв'язків змінних стану не тільки для номінального (розрахункового) режиму роботи ССКМ, але і для всіх стаціонарних технологічних режимів роботи системи, можливих в діапазоні розрахункових станів зима - літо.

Динамічна модель об'єкта являє собою систему диференціальних рівнянь виду $Y=F(X,\dot{X},...,U,\dot{U},...,f,\dot{f},...,)$. Упорядкування динамічної моделі зводиться до опису динамічних характеристик процесу що протікає в об'єкті, тобто до встановлення зв'язків між його основними змінними при їх зміні в часі.

Таким чином, статична математична модель включає опис зв'язків між основними змінними стану в сталих режимах, а динамічна математична модель — зв'язків у часі при переході від одного режиму до іншого.

Крім перерахованих методів математичних моделей слід розрізняти жорстку і вірогідну математичну моделі. Математичні моделі окремих технологічних апаратів і пристроїв системи кондиціювання повітря є жорсткими. Ці моделі зазвичай описують детерміновані процеси без застосування статистично імовірнісних розподілів. Але з цього не обов'язково випливає, що лежать в основі цих об'єктів явища не мають статистичного характеру. Просто в даному випадку оперують із середніми значеннями, а не з розподілами величин.

Ймовірнісною математичною моделлю є математична модель зовнішнього клімату, тобто модель функціональної ланки. Процеси зміни і формування змінних стану зовнішнього повітря описуються за допомогою статистично імовірнісних методів. Модель зовнішнього повітря описують стохастичні процеси.

Наявність математичної моделі системи кондиціювання повітря дозволяє застосувати машинні методи моделювання [99]. У свою чергу машинне моделювання ССКМ дозволяє уникнути традиційних методів проектування АСР. Відомо, що традиційними методами вдається розрахувати лише обмежене число варіантів.

Через значну структурну і функціональну складність систем кондиціювання повітря математичне моделювання доцільно здійснювати поетапно і по окремих ділянках. Крім того, поетапне моделювання обґрунтовано поділом на дві послідовні частини загального завдання розробки АСР ССКМ. В обсязі вирішення цього завдання проводиться спочатку синтез програми управління в річному циклі квазістаціонарних режимів роботи, потім синтез законів керування в добовому циклі нестационарних режимів роботи системи.

У зв'язку з цим на першому етапі розробляється статична модель, що описує зв'язки між основними змінними процесів в сталих режимах, на другому етапі - динамічна модель, яка визначає залежності змінних стану в часі при переході від одного режиму до іншого [127].

Статична модель системи кондиціювання повітря являє собою сукупність рівнянь виду:

$$\left. \begin{aligned} f_T(Q_T; Q_X; t_H; t_{II}; t; t_y; d_H; d_{II}; d; d_y; G_H; G_{p.ц}; \gamma_T; \gamma_X; Q_{OP}) &= 0; \\ f_w(G_w; t_H; t_{II}; t; t_y; d_H; d_{II}; d; d_y; G_H; G_{p.ц}; \mu; W_{OP}) &= 0; \\ f_{в.с}(N_B; G_H; G_{p.цI}; G_{p.цII}; \alpha_{KB_H}; \alpha_{KB_I}; r_B; \alpha_{KB_{II}}; r_B) &= 0; \\ f_{г.с.}(N_{Hj}; G_w; \gamma_T; \gamma_X; r_{Hj}) &= 0, \end{aligned} \right\} \quad (2.1)$$

де f_T - сукупність рівнянь по балансу тепла і теплопередачі; f_w - вологи і масообміну; $f_{в.с.}$ - вентиляційної мережі; $f_{г.с.}$ - гідравлічної мережі.

Розмірність системи рівнянь (2.1) визначається структурою системи кондиціювання повітря, обов'язковими елементами якої є обслуговуване приміщення і установка кондиціювання повітря, до складу якої входять тепломасообмінні апарати. Вони являють собою сукупність повітронагрівачів або повітроохолоджувачів, камери зрошення тощо.

Таким чином, система кондиціювання повітря може бути представлена у вигляді послідовності агрегованих функціональних вузлів. Агреговані структури і їх математичні моделі розробляють так, щоб виходи однієї були входами іншої і щоб в них були представлені параметри і змінні стану, що підлягають дослідженню на основі використання принципу субоптимізації [134].

Основним об'єктом управління в системі кондиціювання повітря є вентиляційний процес в приміщенні, що обслуговується. У цьому процесі постійно відбувається перехід з одного стану в інший. Для підтримки заданих параметрів мікроклімату в обслуговуване приміщення подається приточне повітря, яке має параметри, відмінні від параметрів повітря в приміщенні. Завдяки цьому воно, змішуючись з повітрям приміщення і витісняючи його, асимілює надлишкове тепло і вологу або підігріває і зволожує повітря приміщення. Управління вентиляційним процесом полягає в підтримці заданих параметрів мікроклімату в приміщенні шляхом подачі в нього необхідної за умовами вентиляційного процесу кількості припливного повітря з відповідною температурою і вологістю.

Вентиляційний процес математично описується для обслуговування приміщення як ланка з зосередженими параметрами. При цьому надлишки явного $Q_{\text{я}}$ і прихованого $Q_{\text{пр}}$ тепла, а також вологовиділення в приміщенні розглядаються як зосереджені, які відбуваються в обмеженій зоні, іменованій робочою зоною, і позначаються $Q_{\text{рз}}$ і $W_{\text{рз}}$. Значення $Q_{\text{рз}}$ і $W_{\text{рз}}$ є еквівалентними сумарними тепло- і вологовиділення в приміщенні, зміною яких в просторі всього приміщення в даному випадку допустимо знехтувати. У той же час очевидно, що $Q_{\text{рз}}$ і $W_{\text{рз}}$ включають характерні локальні складові для даної зони або частини приміщення. Подібний підхід виправданий прагненням привести математичну модель розглянутого ланки системи автоматичного управління, а таким є обслуговуване приміщення, до вигляду, придатного для подальших досліджень системи в цілому. Крім того, слід мати на увазі, що математична модель приміщення розробляється для проведення аналізу системи автоматичного регулювання, а не для дослідження, наприклад, повітряного режиму приміщення. Аналіз системи регулювання в першу чергу включає дослідження стійкості та якості процесу автоматичної стабілізації вихідних змінних - температури і вологості повітря. Стабілізація температури і вологості повітря в більшості випадків ведеться по відхиленню їх поточних значень від необхідних в одній конкретній точці приміщення. Такою точкою є представницька точка приміщення, в якій встановлюються датчики температури і вологості повітря. Це означає, що розробка зосередженої моделі ланки - обслуго-

вуване приміщення - обумовлена також тим, що за характером реалізації вихідні змінні спостерігаються в одній представницькій точці.

Рівняння балансу тепла в робочій зоні приміщення має вигляд

$$Q_{II} + Q_{p.з} - Q_y = 0. \quad (2.2)$$

Вважаючи параметри повітря, що виходить з даної зосередженої області, рівними параметрам повітря в робочій зоні при виконанні умови балансу за кількістю вентилязованого повітря, тобто $G_{II} = G_Y = G_B$, рівняння (2.2) приводимо до виду

$$G_B I_{II} + Q_{p.з} - G_B I = 0. \quad (2.3)$$

Виразивши значення ентальпій припливного повітря в робочій зоні через відому залежність:

$$I = c_{CB}t + (l + c_{II}t)d$$

і провівши в рівнянні низку нескладних перетворень, запишемо вираз для $Q_{p.з}$:

$$Q_{p.з} = G_B I - G_B I_{II} = G_B [c_{C.B.}(t - t_{II}) + l(d - d_{II}) + c_{II}(td - t_{II}d_{II})]. \quad (2.4)$$

Нехтуючи третім доданком виразу (2.4), отримуємо

$$Q_{p.з} = c_{C.B.} G_B (t - t_{II}) + l G_B (d - d_{II}). \quad (2.5)$$

Враховуючі що $G_B(t - t_{II}) = W_{p.з.}$, запишемо

$$t - t_{II} = \frac{Q_{p.з.}}{c_{C.B.} G_B} - \frac{l W_{p.з.}}{c_{C.B.} G_B}. \quad (2.6)$$

Позначивши $1/c_{C.B.} = k_1$ й $l/c_{C.B.} = k_2$, отримаємо рівняння температури повітря в робочій зоні приміщення, що обслуговується:

$$t = t_{II} + k_1 \frac{Q_{p.з.}}{G_B} - k_2 \frac{W_{p.з.}}{G_B}$$

Аналогічно з рівняння балансу вологи в робочій зоні приміщення

$$W_{p.з.} + G_B d_{II} - G_B d_Y = 0$$

отримуємо рівняння зв'язку вмісту вологи повітря в робочій зоні приміщення з вхідними змінними

$$d = d_{II} + W_{p.з.} / G_B. \quad (2.7)$$

Отримані вирази є рівняннями зв'язку номінальних значень вхідних і вихідних змінних в сталому режимі. У той же час дослідження процесів управління до-

цільно вести з використанням вираженого зв'язку, наведеного до рівнянь в при-
рошеннях або варіаціях змінних станів. Для цього проводиться їх лінеаризація.

Лінеаризацію зробимо за допомогою формули Тейлора, яка дозволяє розк-
ласти нелінійну функцію декількох змінних за ступенями малих збільшень цих
змінних. При лінеаризації обмежуються лише членами першого порядку малості,
нехтуючи наступними членами розкладання.

Для номінального режиму рівняння (2.6) має вигляд

$$t_0 = t_0 + k_1 \frac{1}{G_{B_0}} Q_{p.z_0} - k_2 \frac{1}{G_{B_0}} W_{p.z_0}. \quad (2.8)$$

У процесі регулювання мають місце зміни змінних:

$$\Delta t = t - t_0, \text{ або } t = t_0 + \Delta t;$$

$$\Delta t_{II} = t_{II} - t_{II_0}, \text{ або } t_{II} = t_{II_0} + \Delta t_{II};$$

$$\Delta Q_{p.z.} = Q_{p.z.} - Q_{p.z_0};$$

$$\Delta W_{p.z.} = W_{p.z.} - W_{p.z_0};$$

$$\Delta G_B = G_B - G_{B_0}.$$

Підставимо нові значення t Δt_{II} в рівняння (2.8). Друге і третє доданок як фу-
нкції двох змінних розкладемо по формулі Тейлора. Після нескладних перетво-
рень одержуємо

$$t_0 + \Delta t = t_{II_0} + \Delta t_{II} + k_1 \left(\frac{Q_{p.z_0}}{G_{B_0}} + \frac{1}{G_{B_0}} \Delta Q_{p.z.} - \frac{Q_{p.z_0}}{G_{B_0}^2} \Delta G_B \right) - k_2 \left(\frac{W_{p.z_0}}{G_{B_0}} + \frac{1}{G_{B_0}} \Delta W_{p.z.} - \frac{W_{p.z_0}}{G_{B_0}^2} \Delta G_B \right) \quad (2.9)$$

Віднімаючи з рівняння (2.9) рівняння (2.8), отримаємо лінеаризоване рівняння
для відхилення температури повітря в робочій зоні приміщення, вираженої через
відхилення вхідних змінних:

$$\Delta t = \Delta t_{II} + k_1 \frac{1}{G_{B_0}} \Delta Q_{p.z.} - k_2 \frac{1}{G_{B_0}} \Delta W_{p.z.} - \frac{k_1 Q_{p.z_0} - k_2 W_{p.z_0}}{G_{B_0}^2} \Delta G_B \quad (2.10)$$

Враховуючі відомі рівняння статички зв'язків вихідних і вхідних змінних
стану в одній з ланок системи кондиціювання повітря - обслуговуваному примі-
щенні [33], для отримання рівнянь, що відображають динаміку цих зв'язків, пове-

рнемося до вихідного рівняння балансу тепла (2.2) при $\Delta t_{II} = \text{var}$, $\Delta d_{II} = \text{const}$ й $\Delta G_{II} = \text{const}$ врахуванням виразів (2.2) и (2.10) можливо записати

$$Q_{p.3} = cG_B \Delta t - cG_B \Delta t_{II}. \quad (2.11)$$

У такому випадку рівняння балансу тепла в приміщенні, що обслуговується має вигляд $Q_{p.3} = Q_{B.П.} + \Delta Q_{OGR}$,

де $Q_{B.П.} = -cV_{B.П.}(d\Delta t / d\tau)$ - зміна теплоємності повітря в обсязі приміщення яке обслуговується (тут $V_{B.П.}$ - обсяг повітря в приміщенні); ΔQ_{OGR} - зміна теплоємності огорожувальних конструкцій і устаткування.

Величина ΔQ_{OGR} знаходиться з виразу

$$\Delta Q_{OGR} = \sum_{i=1}^i \alpha_{OGR_i} F_{OGR_i} (\Delta t_{OGR} - \Delta t) = - \sum_{i=1}^i c_{OGR_i} M_{OGR_i} \frac{d\Delta t_{OGR_i}}{d\tau},$$

де α_{OGR_i} - коефіцієнт тепловіддачі від повітря робочої зони до і-ой поверхні

F_{OGR_i} огорожі або обладнання; Δt_{OGR_i} - температура поверхні; M – маса і-ої річі.

Рівняння балансу тепла набуває вигляду

$$cG_B \Delta t - cG_B \Delta t_{II} + cV_{B.П.} \frac{d\Delta t}{d\tau} - \sum_{i=1}^i \alpha_{OGR_i} F_{OGR_i} (\Delta t_{OGR} - \Delta t) = 0. \quad (2.12)$$

Ввівши поняття еквівалентної конструкції, що обгороджує, можна записати рівняння зв'язку зміни температури еквівалентної поверхні зі зміною температури повітря в робочій зоні приміщення:

$$\frac{c_{OGR} M_{OGR}}{\alpha_{OGR} F_{OGR}} \frac{d\Delta t_{OGR}}{d\tau} + \Delta t_{OGR} = \Delta t. \quad (2.13)$$

Позначивши

$$\frac{c_{OGR} M_{OGR}}{\alpha_{OGR} F_{OGR}} = T_{OGR}$$

і перейшовши до операторної формі, рівняння (2.13) запишемо у вигляді

$$(T_{OGR} p + 1) \Delta t_{OGR} = \Delta t.$$

Тоді рівняння (2.12) може бути приведене до вигляду

$$cG_B \Delta t - cG_B \Delta t_{II} + cV_{B.П.} p \Delta t = \alpha_{OGR} F_{OGR} \frac{T_{OGR} p}{T_{OGR} p + 1} \Delta t. \quad (2.14)$$

Позначивши: $T_B = (cV_{B.П.})/(cG_B)$ – постійна часу перехідного процесу нагріву або охолодження повітря в об'ємі приміщення; $k_{OGR} = (\alpha_{OGR}F_{OGR})/(cG_B)$ – коефіцієнт, що враховує вплив еквівалентних показників огорожувальних конструкцій і устаткування на температуру повітря в робочій зоні приміщення.

Після нескладних перетворень з урахуванням прийнятих позначень рівняння (2.14) приймає вигляд

$$(T_B p + 1)\Delta t = \Delta t_{II} - k_{OGR} \frac{T_{OGR} p}{T_{OGR} p + 1} \Delta t.$$

Отримане рівняння описує обслуговуване приміщення як ланка системи автоматичного регулювання. Дана ланка охоплена динамічним зворотним зв'язком, який характеризується параметрами k_{OGR} й T_{OGR} . Зворотним зв'язком охоплено ланку, що апроксимує теплоємність повітря в обсязі приміщення, що обслуговується. Ця ланка має передавальну функцію

$$W_{B.П.}(p) = \frac{1}{T_B p + 1}. \quad (2.15)$$

Ланка зворотного зв'язку є реальною диференціюючою ланкою з передавальною функцією

$$W_{OGR}(p) = k_{OGR} \frac{T_{OGR} p}{T_{OGR} p + 1}. \quad (2.16)$$

Параметри цієї ланки визначаються конструктивними і теплофізичними характеристиками конструкцій та обладнання. Адекватність подібної моделі приміщення що обслуговується підтверджується теоретичними дослідженнями проф. П. Ф. Участкіна, канд. техн. наук М. Б. Халамейзера, а також експериментальними дослідженнями, виконаними канд. техн. наук С. І. Аксельрод [115].

Запропонована модель має задовільний фізичний сенс. Дійсно, при зміні температури приточного повітря в тому ж напрямку, але з інерційністю, що дорівнює T_B , змінюється температура повітря в приміщенні. У той же час огорожувальні конструкції і устаткування прагнуть зменшити величину цієї зміни температури повітря робочої зони. Подібний процес характеризується передавальним коефіцієнтом k_{OGR} та інерційністю T_{OGR} .

Зміни надходжень і стоків тепла через огорожувальні конструкції носять гармонійний характер з періодом, рівним декільком годинам, а теплова інерція стін і обладнання значно більше теплової інерції повітря в обсязі, тому є правомірним апроксимація процесів, що відбуваються в приміщенні, більш простою ланкою. В даному випадку рівняння приміщення що обслуговується як ланки системи автоматичної стабілізації температури повітря в робочій зоні може бути представлено як

$$(T_{оп}p + 1)\Delta t = k_{оп}\Delta t_{п},$$

де

$$T_{оп} = T_B / (1 + k_{огр}); \quad k_{оп} = 1 / (1 + k_{огр}).$$

Представлена модель приміщення і її параметри добре кореспондуються з інженерної методикою розрахунку, розробленої проф. В. Н. Богословським і к.т.н С. А. Шелкуновою при дослідженні режимів регулювання мікроклімату [112].

При наявності декількох складних ланок, що утворюють об'єкт регулювання, порядок системи диференціальних рівнянь, що описують перехідний процес, виявляється досить високим. Це є серйозний перешкодою для вибору налаштувань автоматичного регулятора, який заснований на тому, що об'єкт наближено описується аперіодичною ланкою першого порядку з запізненням K_0, T_0, τ_0 . Для зниження порядку системи існує низка методів, різних за складністю і точністю результату. Опишемо коротко один з можливих, запропонованих Шаламоном і Стрейц [23] який відрізняється простотою і точністю (близько 5% за амплітудно-частотною характеристикою).

Нехай в об'єкті є два послідовних ланки, одне з яких характеризується коефіцієнтами K_1, T_1 і τ_1 , а інше - K_2 і T_2 . Це відповідає системі диференціальних рівнянь другого порядку. Знизимо порядок цієї системи до першого і замінімо дві послідовних ланки одною - K_0, T_0 і τ_0 . Коефіцієнт передачі визначається множенням відповідних коефіцієнтів передачі ланок: $K_0 = K_1 K_2$. Для визначення характеристик перехідного процесу (T_0 і τ_0) попередньо знайдемо відношення меншої з величин T_1 й T_2 до більшої $m = \min(T_1; T_2) / \max(T_1; T_2)$.

За відомим параметром m і кривим $f_1(m)$ і $f_2(m)$ за спеціальними графіками

при апроксимації двох послідовних ланок одною апериодичною ланкою першого порядку з запізненням знаходять шукані функції f_1 і f_2 .

Це слід робити в декількох точках діапазону регулювання. Запізнення в об'єкті з двох ланок знаходять так:

$$\tau_0 = \tau_1 + \max(T_1; T_2) f_1(m)/f_2(m).$$

$$\tau_0 = \tau_1 + \max(T_1; T_2) f_1(m)/f_2(m).$$

а постійну часу об'єкту

$$T_0 = \tau_0 / [f_1(m) + \tau_1 f_0(m) / \max(T_1; T_2)].$$

Застосуємо методику апроксимації об'єкта регулювання.

За результатами експерименту, необхідно апроксимувати об'єкт стабілізації температури повітря приміщення судна в точці, що відповідає розрахунковому режиму, ланкою першого порядку з запізненням. В об'єкт входять наступні ланки: водяний клапан при розрахунковій витраті теплоносія гарячої води $G_\omega = 1900$ кг/год; однорядний повітронагрівач при $L_v = 40$ тис м³/ч; $K_{\omega \text{расч.}} = 0,10$; $K_{L \text{расч.}} = 0,73$; $t_{\omega \text{и}} = 60^\circ \text{C}$; $t_{\text{и}} = 10^\circ \text{C}$; $\omega_{\omega \text{расч.}} = 0,36$ м/с; приточний ізольований повітропровод $l = 50$ м; $\omega_3 = 8$ м/с; приміщення з визначальним розміром $l_v = 0.7$ м; кратністю повітрообміну $K_p = 10$ ч⁻¹; $\alpha_0 = 5$ Вт/(м² °C). $K_{\text{огр}} = 0.5$; $M_{\text{огр}} = \alpha_0 / (0,34 l_v K_p) = 5 / (0,34 * 0,7 * 10) = 2.1$, датчик температури (за своїми динамічними характеристиками відноситься до об'єкту) для зниження інерційності встановлений в витяжному отворі, де швидкість повітря $\omega_n = 5$ м/с.

Проаналізуємо властивості окремих ланок, що утворюють об'єкт регулювання, і обчислимо їх статичні і динамічні характеристики. Водяний клапан є безінерційною (підсилювальною) ланкою, яка є лінійною при виборі лінійного плунжера. Коефіцієнт передачі $K_{\text{кл}} = G_{\omega \text{max}} / 100 = 1900 / 100 = 19$ (кг/ч)%. Повітронагрівач будемо розглядати як апериодичну ланку першого порядку; запізнювання при управлінні витратою води відсутнє. Для обчислення коефіцієнта передачі знайдемо припущення величин K_n й K_ω на лінії залежності $K_\omega = f(K_n, G_v, n)$ додаток 2 [14]. При цьому ж витраті повітря $K_{n2} = 0,12$, тоді $K_{\omega 2} = 0,60$; зміна кінцевої температури повітря дорівнюватиме $\Delta f_k = (K_{v1} - K_{v, \text{расч.}}) (t - t_n) = (0,12 - 0,10) (60 - 10) =$

1^0C . Зміна витрати теплоносія гарячої води дорівнює: $\Delta G_\omega = c_p \rho_\omega L_b (K_{n2}/K_{\omega 2} - K_{n\text{расч.}}/K_{\omega\text{расч.}})/c = 1 \cdot 1,2 \cdot 400000 (0,12/0,60 - 0,10/0,73)/4,19 = 720 \text{ кг/Г}$; коефіцієнт передачі повітронагрівача при керуючому впливі - витраті води $K_{\text{зи}} = \Delta t_k \Delta G_\omega = 1/720 = 0,0014^0\text{C(кг/Г)}$. Постійна часу повітронагрівача визначається формулою або, що простіше, оцінюється за графіком при швидкості води $\omega_\omega = 0,36 \text{ м/с}$ й дорівнює близько $T_{\text{вн}} = 0,015 \text{ г}$. Повітропровід при довжині $l = 50 \text{ м}$ і швидкості $\omega_3 = 8 \text{ м/с}$ в першому приближенні можна не враховувати.

Так, за експериментом, коефіцієнт передачі повітроводу близький до одиниці ($K_{\text{вд}} = 0,97$). Транспортне запізнювання в повітроводі теж дуже мале ($\tau_0 = 1/\omega_\epsilon = 50/8 \approx 6 \text{ с}$). Приміщення в умовах замкнутої АСР і високочастотних коливань (в порівнянні з часом, при якому $F_0 = \alpha \tau / h^2 = 0,2$) можна розглядати як аперіодичну ланку першого порядку. Коефіцієнт передачі приміщення по каналу температура приточного повітря - температура повітря в приміщенні дорівнює: $K_{\text{ном}} = 1 + M (1 - K_{\text{опр}})^{-1} = [1 + 2,1 (1 - 0,5)]^{-1} = 0,5$. Постійна часу зворотно-пропорційна кратності повітрообміну: $T_{\text{ном}} = 1/K_p = 1/10 = 0,1 \text{ с}^{-1}$. Врахуємо транспортне запізнювання від припливу до витяжки величиною $\tau_{\text{ном}} = 0,005 \text{ г}$. Постійна часу датчика за швидкості повітря $\omega_\epsilon = 5 \text{ м/с}$ може бути оцінена величиною $T_\delta = 20 \text{ с} = 0,005 \text{ г}$.

Спочатку визначимо коефіцієнт передачі об'єкта як добуток коефіцієнтів передачі всіх ланок: $K_0 = K_{\text{уд}} K_{\text{нн}} K_{\text{вд}} K_{\text{ном}} = 19 \cdot 0,0014 \cdot 0,97 \cdot 0,5 = 0,013^0\text{C/\%}$.

Апроксимуємо динамічні характеристики двох ланок, замінивши їх одним. Розглянемо повітронагрівач ($T_{\text{вн}} = 0,015 \text{ г}$) та приміщення ($T_{\text{ном}} = 0,1 \text{ ч}$; $\tau_{\text{ном}} = 0,005 \text{ г}$). Обчислимо відношення меншої постійної часу до більшої $m = T_{\text{вн}}/T_{\text{ном}} = 0,015/0,1 = 0,15$. За графіком при $m = 0,15$ знайдемо $f_1(m) = 0,15$ і $f_2(m) = 0,75$. Обчислимо запізнення $\tau_0 = 0,005 + 0,1 \cdot 0,15/0,75 = 0,025$ та постійну часу $T_0 = 0,025/(0,15 + 0,005 \cdot 0,75/0,1) = 0,13 \text{ г}$. Порівнюючи результуючу постійної часу $T_0 = 0,13$ з постійною часу датчика, встановленого в повітропроводі ($T_\delta = 0,005 \text{ г}$), робимо висновок, що останньою можна знехтувати. Так, $m = 0,005/0,13 \approx 0,04$.

В результаті об'єкт регулювання можна апроксимувати аперіодичною ланкою першого порядку з запізненням: $K_0 = 0,013^0\text{C/\%}$; $T_0 = 0,13 \text{ г}$; $\tau_0 = 0,025 \text{ г}$.

За такою методикою шляхом нескладних перетворень можна знайти апроксимуючі характеристики об'єкта. На практиці в об'єкт регулювання може входити більше двох аперіодичних ланок. Послідовність апроксимації в цьому випадку зберігається: спочатку дві послідовних ланки замінюються одною еквівалентною, яка розглядається потім спільно з третьою і так далі.

При аналітичному дослідженні динаміки найбільш важко скласти диференціальне рівняння, яке при достатній простоті співвідношень між досліджуваними величинами (відхиленнями) і їх похідними забезпечувало б прийнятну точність кінцевого результату. Це вимагає відомих навичок і часто великих витрат часу. У практиці експлуатації поширені менш трудомісткі експериментальні методи вивчення динамічних властивостей розімкнутих АСР ССКМ. Дані методи отримали широке застосування в принципах роботи адаптивних систем [88-94].

2.2 Аналіз та комп'ютерне моделювання класичних методів управління та експлуатації систем мікроклімату

Відомо, що складні об'єкти управління мають низку характеристик, які істотно ускладнюють створення їх математичних моделей [99-101, 132-149]. Аналіз наукових публікацій в області АСР складних об'єктів показує, що найкращим є застосування адаптивних і інтелектуальних методів управління [13-19]. Однак питання вибору оптимальної методики і її синтезу на діючому об'єкті залишається відкритим. У зв'язку з цим процес автоматизації ССКМ є трудомістким завданням, що вимагає детального аналізу основних характеристик. Як аналізувалося у першому розділі для підтримки заданих значень багатьох систем клімат-контролю використовуються АСР, де часто застосовуються типові регулятори, налаштування яких проводять використовуючи класичні методи аналізу. Для вирішення цих задач автором пропонується доповнення інтелектуальної гібридної системи керування ССКМ впровадженням адаптивних АСР. Був проведений аналіз адаптивного підходу. При наявності процесу автоматизованої адаптації

настройка може виконуватися відповідно до класичної структури за схемою, представленою на рисунку 2.4.

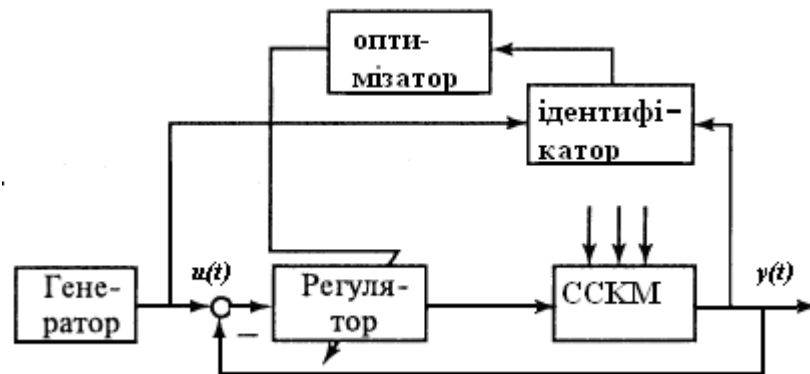


Рис. 2.4. Структурна схема системи активної адаптації ССКМ

Структура включає ідентифікатор, який аналізує модель об'єкта, і оптимізатор, в якому проводиться розрахунок настройки регулятора на черговому кроці руху до оптимуму і відповідна установка в регуляторі. Під час процедури адаптації на вхід регулятора від генератора подається ступеневий зовнішній ідентифікований вплив у вигляді ступінчастої функції часу $u(t)$ і реєструється зміна регульованої величини. Реакція на цей вплив (зміна в часі регульованої величини $y(t)$) буде з точністю до амплітуди вхідного впливу являти собою відповідну перехідну характеристику замкнутої системи. З неї при відомому алгоритмі функціонування регулятора може бути отримана передавальна функція або комплексна частотна характеристика (КЧХ) об'єкта. Розраховуючи таку математичну модель об'єкта, можна зробити розрахунок оптимальних параметрів настройки ПІ або ПІД-регулятора. Слід зазначити, що оцінка перехідної характеристики замкнутого контуру в реальних умовах роботи систем регулювання зазвичай володіє відносно нестабільним характером, тобто якщо експеримент повторювати кілька разів, то будуть виходити результати що сильно різняться, це вплине на адекватність моделі об'єкту. Однак, якщо характеристика має коливальний характер, то по ній можна оцінити ступінь загасання коливань і їх період. У зв'язку з цим було проведено аналіз методу адаптації, при якому динаміка контуру оцінювалася цими параметрами перехідної характеристики контуру, тому що ана-

логічний підхід використовується в багатьох адаптивних мікроконтролерах різних компаній, що спеціалізуються в області автоматизації [144, 148].

Проведемо дослідження і доповнення математичних моделей адаптивними компонентами. Типовий вид експериментальної коливальної перехідної характеристики представлений на рис. 2.5.

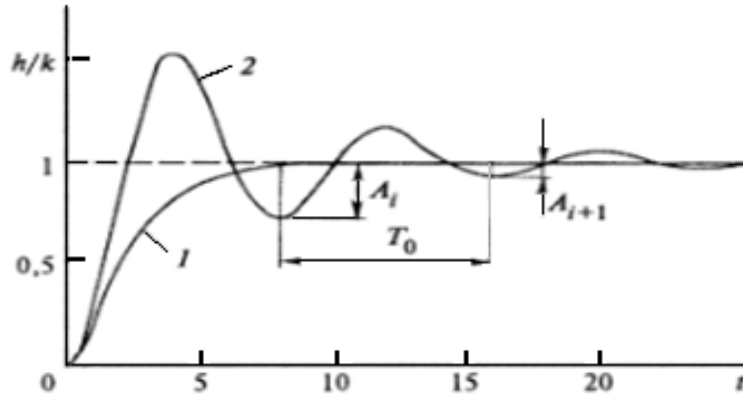


Рис. 2.5. Перехідний процес САР

1 – крива розгону, 2 – коливальний процес регулювання.

За даною характеристикою визначається період коливань T і значення двох послідовно спрямованих в одну сторону амплітуд коливання A_i, A_{i+1} . Це дозволяє обчислити ступінь затухання $\Psi = (A_i - A_{i+1})/A_i$. Якщо припустити, що отриманий коливальний процес формується в основному парою найближчих до уявної осі сполучено-комплексних домінуючих коренів характеристичного рівняння системи, то може бути знайдено значення показника коливальності m , $\Psi = 1 - e^{-2\pi m}$.

Умова існування перехідного процесу виражається залежністю для розширених КЧХ регулятора і моделі об'єкта:

$$W_{\text{мод}}(-m + j\omega) \cdot W_p(-m + j\omega) = -1$$

Структурою передавальної функції моделі об'єкта необхідно задатися. Виберемо її у вигляді $v(s) = 1/[(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_n s + 1)]$ для об'єктів з самовирівнюванням або $v(s) = 1/[(T_1s + 1)(T_2s + 1)(T_n s + 1)s]$, для об'єктів без самовирівнювання, виділивши коефіцієнт передачі, аналогічно представимо і передавальну функцію ПІ-

регулятора (що стосується такого регулятора будуть конкретизовані всі наступні викладки):

$$\begin{aligned} W_{mod}(s) &= k_{mod} V(s) \exp(-\tau_{mod} s) \\ W_p(s) &= k_n R(s) \end{aligned} \quad (2.17)$$

де k_{mod} , k_n , τ_{mod} – коефіцієнти передачі та час запізнювання; $V(s)$ – дрібно-раціональна функція; $R(s) = 1 + 1/T_u s$

Тоді рівняння (2.17), переписане таким чином:

$$\begin{aligned} k_{mod} k_n |V(-m + j\omega)| |R(-m\omega + j\omega)| e^{m\omega\tau} - 1 &= 0 \\ T_{u.onm} = I_{onm} \tau_{mod}; k_{n.onm} = K_{onm} / (k_{mod} \tau_{mod}) \end{aligned} \quad (2.18)$$

або можна представити у вигляді двох рівнянь для аргументів і модулів:

$$|V(-m\omega + j\omega)| - \tau_{mod} \omega + \arg |R(-m\omega + j\omega)| + \pi = 0 \quad (2.19)$$

$$k_{mod} k_n |V(-m + j\omega)| |R(-m\omega + j\omega)| e^{m\omega\tau} - 1 = 0$$

де

$$|R(-m\omega + j\omega)| = A_p(\omega) = \frac{1}{T_u \omega (1 + m^2)} \sqrt{1 + [T_u \omega (1 + m^2) - m]^2} \quad (2.20)$$

$$\arg(R(-m\omega + j\omega)) = \phi_p(m, j\omega) = \arctg\left(\frac{-1}{T_u \omega (1 + m^2) - m}\right)$$

Перше рівняння не залежить від коефіцієнтів передачі. Таким чином, за отриманими з експерименту значенням m і ω шляхом вирішення першого рівняння знаходиться запізнювання τ_{mod} , після чого за другою формулою визначається значення коефіцієнта передачі моделі. Очевидно, що чисельні значення параметрів моделі яка настроює можуть змінюватися в процесі руху до оптимуму настройки регулятора. Вони перестають змінюватися і встановлюються на деякому стабільному значенні після закінчення цієї процедури. Якість моделі об'єкта залежить не тільки від того, наскільки близька її структура до структури реального об'єкта, але і від того, наскільки вдало обраний їх критерій наближення. Також при отриманні моделі об'єкта перед початком проектування АСР ця проблема вже виникала і існувала. В цьому і полягало основне системне протиріччя

побудови моделі об'єкта. При адаптації вже включеної в роботу системи це протиріччя знімається застосуванням процесу послідовного наближення до оптимуму [103]. В даному випадку контролюється критерій оптимальності управління, відповідно до якого здійснюється і вибір параметрів моделі об'єкта що настроює. Після закінчення процедури налаштування апроксимація моделі виявиться виконаною оптимальним способом в області істотних для системи частот, тому структура моделі що настроює може бути простіше тієї структури, яка потрібна перед проектуванням системи.

Під час налаштування систем, об'єкти яких або взагалі позбавлені самовирівнювання, або воно виражено відносно слабо, прийнятною моделлю, яка має два коефіцієнта, є інтегруюча ланка з запізненням. Передавальна функція такої моделі при рівних нулю постійних часу має вигляд:

$$W_{\text{мод}}(s) = \frac{k_{\text{мод}}}{s} \exp(-\tau_{\text{мод}} s) \quad (2.21)$$

У цьому випадку

$$V(s) = 1/s \text{ и } |V(-m\omega + j\omega)| = \frac{1}{\omega\sqrt{1+m^2}}; \quad (2.22)$$

$$\arg -\tau_{\text{мод}}\omega + \arg |V(-m\omega + j\omega)| = \arctg(1/m) - \pi$$

Після підстановки цих виразів в (5.4) отримаємо:

$$\tau_{\text{мод}} = \frac{1}{\omega} (\arctg \frac{1}{m} + \varphi_p(m, \omega))$$

$$k_{\text{мод}} = \frac{\omega}{A_p(m, \omega)} \sqrt{1+m^2} \exp(-m \tau_{\text{мод}} \omega) \quad (2.23)$$

Визначення коефіцієнтів об'єкта моделі що настроюється дозволяє звичайним порядком знайти оптимальні параметри налаштування типового регулятора. Потім вони встановлюються в регуляторі, і проводиться повторний експеримент за оцінкою перехідної характеристики системи і визначення з неї нових значень ступеня загасання і періоду коливань. Це дозволяє уточнити оптимальні параметри налаштування регулятора, провести відповідні їх зміни в регуляторі і знову повернутися до оцінки параметрів перехідної характеристики (ідентифікації).

Таким чином, утворюється ітераційна багатокрокова процедура руху до оптимальної настройки, який буде досягнутий тоді, коли наступний результат розрахунку оптимальної настройки не буде відрізнятися від попереднього.

Розрахунок оптимальних параметрів регулятора в процесі адаптації можна спростити, якщо перейти до безрозмірних параметрів настройки, оптимальні значення яких можна розрахувати заздалегідь. Так, передавальна функція розімкнутого контуру системи з ПІ-регулятором і моделлю об'єкта (2.24) може бути переходом до безрозмірної змінної $s = \tau_{\text{мод}}\omega$:

$$W_{\text{мод}}(s) = \frac{k_{\text{мод}}}{s} \exp(-\tau_{\text{мод}}s) k_i \left(1 + \frac{1}{T_u s}\right) \quad (2.24)$$

$$W(S) = K \left(1 + \frac{1}{IS}\right) \frac{1}{S} \exp(-S)$$

$$K = k_p k_{\text{мод}} \tau_{\text{мод}}; I = T_u / \tau_{\text{мод}}$$

Отже, завдання зводиться до визначення оптимальних безрозмірних параметрів ПІ-регулятора (в якому роль постійної інтегрування грає безрозмірний коефіцієнт I , а роль коефіцієнта передачі - коефіцієнт K) для об'єкта з безрозмірною функцією передачі (інтегральна ланка з запізненням) виду:

$$W_{\text{мод}}(s) = \frac{1}{5s} \exp(-s) \quad (2.25)$$

Слід зафіксувати і безрозмірну домінуючу частоту при оптимумі налаштування:

$$\Omega_{\text{дом}} = \tau_{\text{мод}} \omega_{\text{дом}} \quad (2.26)$$

Розрахунок безрозмірних параметрів настройки регулятора за моделлю об'єкта з передатною функцією (2.25) наведено на рис. 2.6. Результат розрахунку для $m = 0,366$ (це значення кореневого показника коливальності) буде прийняте у всіх подальших прикладах розрахунків:

$$I_{\text{опт}} = 2.84; K_{\text{опт}} = 3.34; \Omega = 0.79.$$

Таким чином, розрахунок оптимальних параметрів настройки регулятора і очікуваної частоти власних коливань на наступному кроці процедури пошуку можна виконувати за формулами:

$$T_{u.onm} = I_{onm} \tau_{mod}; k_{n.onm} = K_{onm} / (k_{mod} \tau_{mod}) \quad \Omega_{dom} = \tau_{mod} \omega_{dom} \quad (2.27)$$

Розрахунок безрозмірних параметрів ПІ регулятора для моделі об'єкта яка настрює. Введення кореневого показника коливальності, безрозмірною передавальної функції моделі об'єкта: $\underline{m} := 0,366$; $\underline{S}(\Omega) := -m\Omega + \Omega j$; $\underline{W}(\Omega) := \frac{e^{-S(\Omega)}}{5S(\Omega)}$.

Введення діапазону частот й число точок:

$$\Omega_{end} := 1,5; n := 500; \Delta\Omega := \frac{\Omega_{end}}{n}; \Omega := \Delta\Omega \cdot 0,2 \cdot \Delta\Omega \dots \Omega_{end}; K_i(\Omega) := \frac{-\ln\left(\frac{1}{\underline{W}(\Omega)}\right)}{\ln\left(\frac{1}{\underline{S}(\Omega)}\right)}.$$

Визначення максимуму $K_i(\Omega)$:

$$\Omega := 0,8; \text{ Given } \Omega > 0,5; \Omega < 1; \Omega_{dom} := \text{Maximize } (K_i, \Omega); \Omega_{dom} = 0,788; K_i(\Omega_{dom}) = 1,176.$$

$$\text{Оптимальні безрозмірні параметри регулятора: } k_{opt} := \text{Re}\left(\frac{-1}{\underline{W}(\Omega_{dom})}\right) - \text{Re}\left(\frac{K_i(\Omega_{dom})}{\underline{S}(\Omega_{dom})}\right); k_{opt} = 0,66; I_{opt} := \frac{K_{opt}}{K_i(\Omega_{dom})}; I_{opt} = 2,838.$$

$$\text{Оптимальне співвідношення періоду коливань і постійної інтегрування регулятора: } E_{opt} := \frac{2 \cdot \pi}{\Omega_{dom} \cdot I_{opt}}; E_{opt} = 2,808.$$

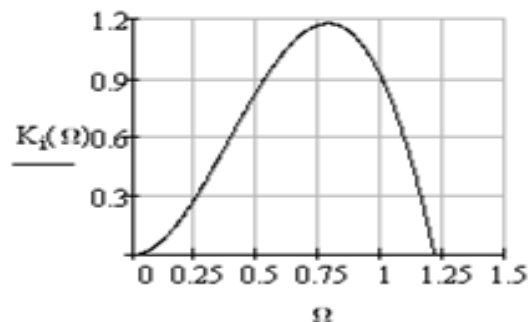


Рис. 2.6. Програмний розрахунок оптимальних параметрів ПІ - регулятора

При використанні представленого методу настройка регулятора починається з того, що він включається в роботу при параметрах настройки, свідомо га-

рантуючих стійку роботу системи. Для ПІ-регулятора початкове значення постійної часу інтегрування (T_i) обирається досить великим, а початкове значення коефіцієнта передачі досить малим (можна починати просто з нульового значення). Після цього шляхом поступового збільшення коефіцієнта передачі слід домогтися, щоб в контурі системи виникли коливання з ступенем загасання який чітко реєструється. Зокрема, можна домогтися виникнення незатухаючих коливань. У цьому випадку значення $T_i > \infty$ (коли регулятор приймає П - алгоритм функціонування) формули для параметрів настроює моделі об'єкта (2.28) приймають такий вигляд:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{мод}} &= \pi / (2\omega_{\text{кр}}); k_{\text{мод}} = \omega_{\text{кр}} / k_{\text{р кр}} \\ T_{\text{и.опт}} &= I_{\text{опт}} \pi / (2\omega_{\text{кр}}); k_{\text{н.опт}} = 2K_{\text{опт}} k_{\text{н.кр}} / (\pi\omega_{\text{кр}}) \\ T_{\text{и.опт}} &= 0,71T_{\text{кр}}; k_{\text{р.опт}} = 0,54k_{\text{н.кр}} \end{aligned} \quad (2.28)$$

де $\omega_{\text{кр}}$, $k_{\text{кр}}$ – частота незатухаючих коливань і коефіцієнт передачі регулятора, при якому вони виникли. Після підстановки їх у (2.28) і після переходу до періоду незгасаючих коливань отримаємо:

$$T_{\text{и.опт}} = 0,71T_{\text{кр}}; k_{\text{р.опт}} = 0,54k_{\text{н.кр}} \quad (2.29)$$

Також, якщо обмежитися одним кроком ітераційної процедури пошуку, буде отримано відомий метод Циглера-Нікольса, в якому рекомендується визначати оптимальні параметри за емпіричними формулами:

$$T_{\text{и.опт}} = 0,83T_{\text{кр}}; k_{\text{р.опт}} = 0,45k_{\text{н.кр}} \quad (2.30)$$

Підіб'ємо підсумки за результатами комп'ютерного експерименту.

Провівши комп'ютерний експеримент з аналізу представлених методів з об'єктом і використовуючи вирази (2.26 - 2.30) в програмі MatLab (Simulink) і визначивши $K_{\text{кр}} = 15.5$, $T_{\text{кр}} = 1$ отримали наступні перехідні процеси (рис. 2.7).

Аналіз показників якості перехідних процесів (рис.2.7) $T_{\text{р}}$, G_1 вказує на перевагу методу Циглера - Ніколса в порівнянні з двома іншими типовими методами адаптації.

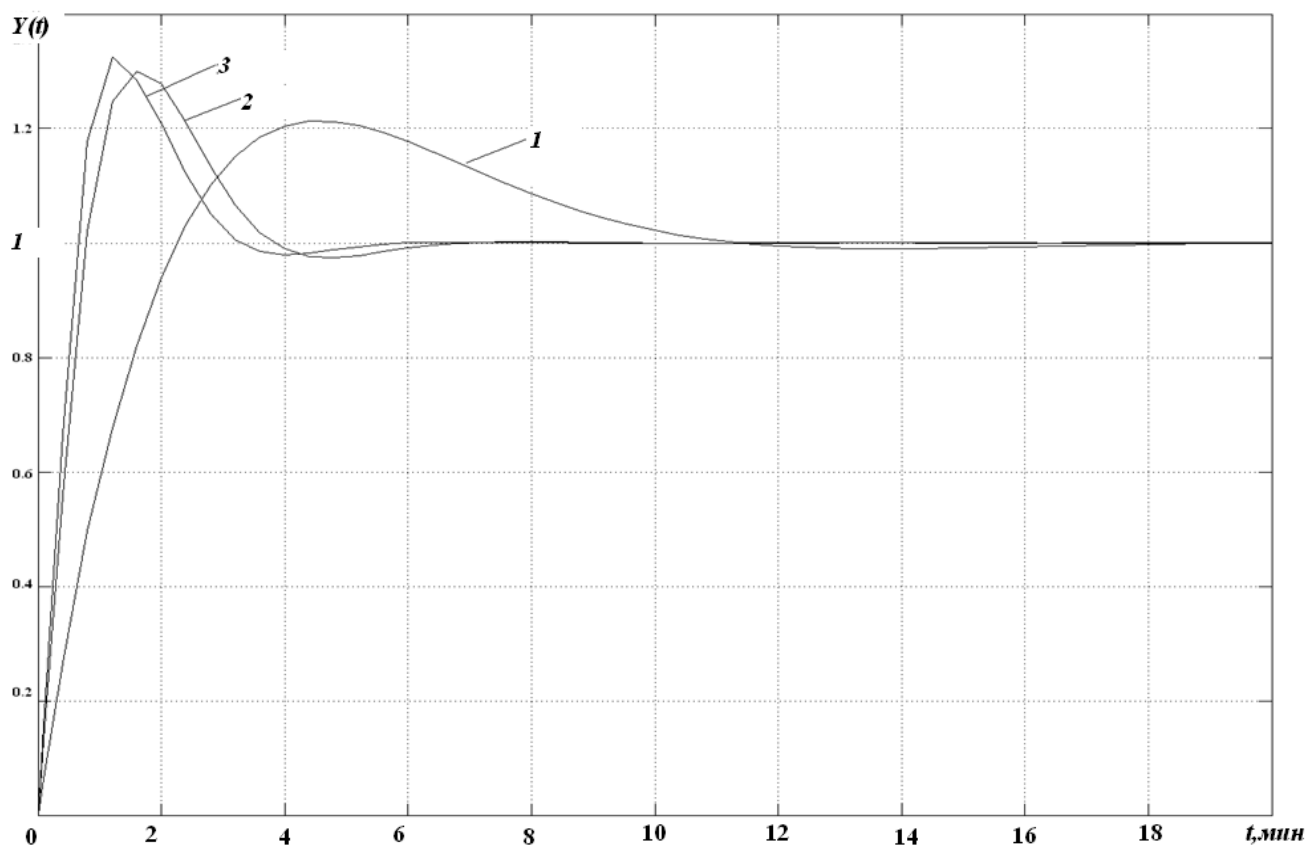


Рис. 2.7. Перехідні процеси адаптивної АСР за каналом завдання: 1 - метод оптимальної настройки, 2 - метод Циглера-Ніколса, 3 - метод незатухаючих коливань.

Зазначені методи адаптивної настройки є найбільш поширеними, і широко використовуються в контролерах типу «Реміконт», «Протар», українського «Мікрол», німецької компанії «Сіменс» та інших, однак застосовувати їх, на думку автора, слід тільки з детермінованими об'єктами управління, тому вони недостатньо ефективні для складних багато режимних об'єктів зі строгими умовами експлуатації, що не допускають автоколивальних режимів. Також, якщо перехідний процес в ході початкового налаштування регулятора буде мати аперіодичний характер, тобто ступінь загасання $\Psi = 0$, і період коливань $T = 0$, з великим (неприпустимим) часом регулювання, то методи виявляться непридатними для розрахунків і адаптацію не можна буде здійснити в автоматичному режимі без участі налагодчика. Також, для об'єкта другого і більшого порядку з малим запізненням, отримана за допомогою методів адаптації постійна інтегрування регулятора, виявиться близькою до нуля і регулятор буде здійснювати П - закон із залишковою помилкою. В цьому випадку можна рекомендувати зміну завдання, але даний си-

гнальний вплив може мати негативний щодо якості перехідного процесу. Можна стверджувати, що в процесі адаптації, при виникненні випадкового глибокого збурення, автоколивальний процес може вийти за допустимий діапазон, що може привести до аварійної ситуації і зупинки технологічного процесу.

Відзначимо, що представлені методики припускають, що оптимальна настройка регулятора може вважатися здійсненою і процес послідовних наближень припинений, якщо значення параметрів настройки на черговому кроці виявляються близькими до їх значень на попередньому кроці, але такий пошук може перевищити допустимий часовий діапазон. Останнім часом починають застосовуватися автоматичні системи каскадно-зв'язаного регулювання, в яких для поліпшення якості регулювання влаштовуються додаткові зв'язки між каскадами (контурами). Однак, разом з перевагами, каскадні системи мають і низку недоліків. Одним з них є складність настройки такої системи і відсутністю стандартних методик по розрахунку параметрів для головного та допоміжного ПІ - регуляторів. Також можна відзначити, що при зміні значень параметрів об'єкта вибрані настройки не задовольняють якості перехідного процесу і потребують адаптації.

Таким чином, відомі традиційні методи [99, 106-109] потребують удосконалення та завдання пошуку оптимальних процесів адаптивного управління залишається відкритою. Тому автором запропоновано новий підхід для доповнення гібридної системи що розробляється в автоматизації АСР ССКМ судна - метод нечіткої адаптації. Доведено, що використання нечіткого (фазі) управління продуктивністю компресора холодильної установки ССКМ дозволяє домогтися зниження енергоспоживання і забезпечити підтримку комфортних параметрів повітря в приміщеннях із кондиціонерами [56]. Виходячи з вищевикладеного, пропонується використовувати нечітку систему регулювання з одним фазі-контролером і введенням в нього інформації по двох каналах: з виходу об'єкта і з проміжної точки об'єкта. Таке управління є найбільш досконалим. Система з нечітким мікропроцесором реалізує оптимальне (програмоване) управління по нечіткій моделі і раціонально використовує всі можливості системи. Дані системи з високою точністю підтримують регульовані параметри на заданому рівні.

2.3 Адаптивні методи при експлуатації систем мікроклімату, їх аналіз та комп'ютерне моделювання

У низці досліджень [1,45,78, 146] відзначається, що можна обирати початковий крок ітераційної процедури оптимізації настройки при параметрах настройки регулятора, які забезпечують виникнення коливань з незгасаючої амплітудою. Отримана таким чином функція розглядалася як перехідна характеристика системи. Можна, проаналізувати і іншу точку зору, розглядаючи такий коливальний процес, як сталий процес, що виникає в системі на межі стійкості. Відповідно до критерію стійкості Найквіста [118], система знаходиться на межі стійкості, якщо КЧХ розімкнутого контуру системи проходить через точку $1, j_0$. Вектор КЧХ об'єкта для частоти ω виниклих в контурі коливань визначено виразом:

$$W_{\mu}(j\omega) = -\frac{1}{W_p(j\omega)}, \quad (2.31)$$

за умови, що вектор КЧХ регулятора $W_p(j\omega)$ відомий. Для АСР з ПІ - регулятором формула (2.31) буде мати вигляд:

$$W_{\mu}(j\omega) = -\frac{1}{K_p} \cdot \frac{jT_u \omega}{1 + jT_u \omega} \quad (2.32)$$

При проведенні низки подібних експериментів для різних значень постійної інтегрування, буде отримана ділянка КЧХ об'єкта, за якою відомими методами [67-85] можна визначити оптимум настройки регулятора. Подібний спосіб активної ідентифікації об'єкта називається параметричним. Дисертантом пропонується проаналізувати його. Так при виконанні ідентифікації в складі загальної процедури адаптації необхідно провести розрахунок оптимальних параметрів регулятора. Таким чином, у традиційній адаптивної АСР процедури ідентифікації та оптимізації взаємопов'язані і при некоректній ідентифікації АСР буде неефективна. Наприклад, під час налаштування ПІ - регулятора вже після першого виведення системи на межу стійкості проводиться апроксимація КЧХ реального об'єкта характеристикою моделі об'єкта яка настраює з заздалегідь обраною структурою, через яку проводиться розрахунок оптимуму настройки регулятора. Певне оптимальне

значення постійної інтегрування встановлюється в регуляторі і шляхом зміни його коефіцієнта система знову виводиться на межу стійкості. Якщо постійна інтегрування регулятора виявилася відмінною від початкової, коливання що виникли будуть мати нову частоту. Це дозволяє уточнити коефіцієнти моделі об'єкта і зробити ще один розрахунок оптимуму настройки. Дана ітераційна процедура виконується до тих пір, поки не будуть отримані на чергових кроках результати що збігаються. На думку дисертанта, ця процедура також супроводжується втратами часу на адаптацію і наявністю помилки регулювання, що погіршує якість і ефективність АСР. До того ж, на думку ряду дослідників [23, 145, 280], вивід працюючої системи на межу стійкості являє собою досить складну і небезпечну для технологічного процесу операцію. Пов'язані з цим труднощі можуть бути усунені шляхом включення в контур регулювання на час проведення настройки двохпозиційного реле (рис. 2.8). Включення реле призведе до виникнення в отриманому в такий спосіб в нелінійному контурі стійких незатухаючих автоколивань. А аналіз автоколивань в замкнутому контурі може бути зроблений методом гармонійного балансу [67]. У методі гармонійного балансу поведінка нелінійного елемента описується еквівалентною КАЧХ. Як і в разі лінійних елементів, еквівалентні КАЧХ визначають сталу реакцію нелінійного елемента на синусоїдальний вхідний вплив, тільки тепер розглядається лише перша гармоніка цієї реакції.

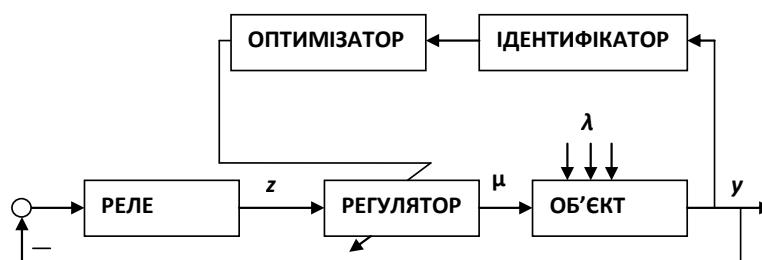


Рис. 2.8. Адаптивна АСР діюча за методом автоколивань

У дослідженні [56], була одержана еквівалентна КАЧХ двохпозиційного реле, яка визначається формулою $W_{\text{нз}}(A_y) = 4c / (\pi A_y)$,

де c – абсолютне значення сигналу на виході реле. Умова виникнення автоколивань в контурі АСР визначається виразом $W_{\text{нз}}(A_y)W_p(j\omega)W_\mu(j\omega) = -1$

Нехай в контурі системи регулювання після включення реле виникли автоколивання з частотою ω і амплітудою вихідного сигналу A_y . Поведінка контуру може бути визначено двома речовими аргументами для модулів і аргументів:

$$\begin{aligned} \arg[V(j\omega)] + \arg[R(j\omega)] - \tau_{\text{мод}}\omega &= -\pi; \\ k_{\text{мод}}k_p |V(j\omega)R(j\omega)|W_{\text{нз}}(A_y) &= 1 \end{aligned} \quad (2.33)$$

З (2.33) при відомих початкових характеристиках регулятора визначаються параметри моделі об'єкта. Зокрема, якщо модель яка настрює обрана експертом у вигляді інтегруючої ланки з запізненням, то АЧХ і ФЧХ будуть визначатися:

$$\begin{aligned} |V(j\omega)| &= 1/\omega \\ \arg[V(j\omega)] &= -\pi/2 \end{aligned}$$

При підстановці їх в (2.33) одержимо:

$$\begin{aligned} -\frac{\pi}{2} - \tau_{\text{мод}}\omega + \arg[R(j\omega)] &= -\pi; \\ \frac{k_{\text{мод}}}{\omega} &= \frac{1}{W_{\text{нз}}(A_y)|R(j\omega)|k_p} \end{aligned}$$

З першого рівняння визначають запізнювання, а з другого - коефіцієнт передачі моделі що настрює:

$$\begin{aligned} \tau_{\text{мод}} &= \frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \arg(R(j\omega)) \right); \\ k_{\text{мод}} &= \frac{\omega}{W_{\text{нз}}(A_y)|R(j\omega)|k_p} \end{aligned}$$

У разі якщо еталонна модель обрана у вигляді інерційної ланки з запізненням, (найбільш часто прийнятий вираз при настройці теплоенергетичних АСР), то час запізнювання знаходиться з рівняння:

$$\arctg(\beta\tau_{\text{мод}}\omega) - \tau_{\text{мод}}\omega + \arg[R(j\omega)] = -\pi$$

а коефіцієнт передачі (посилення) моделі обчислюється за формулою

$$k_{\text{мод}} = \frac{(\beta^2\tau_{\text{мод}}^2\omega^2 + 1)^{0,5n}}{W_{\text{нз}}(A_y)|R(j\omega)|k_p} \quad (2.34)$$

За формулами при інтегральній ланці або інерційній ланці:

$T_{\text{и.опт}} = I\tau_{\text{мод}}; k_{\text{р.опт}} = K_{\text{опт}} / k_{\text{мод}}; \omega = \Omega_{\text{оом}} / \tau_{\text{мод}}$ можна визначити оптимальні параметри настройки адаптивного ПІ - регулятора. Вони встановлюються в регуляторі, що

призводить до зміни частоти і амплітуди автоколивань. Проводиться повторна оцінка параметрів моделі яка настрює і уточнення настройки регулятора. Таким чином, утворюється ітераційна багатокрокова процедура руху до оптимуму настройки, який досягається тоді, коли черговий результат розрахунку оптимальної настройки не буде відрізнятися від попереднього. Частота автоколивань в розглянутому методі встановлюється самою системою автоматично і дорівнює частоті перетину КЧХ розімкнутої системи негативною реальною пів вісі комплексної площині, тобто при фазовому зсуві, рівному $-\pi$. З точки зору точності отримання кінцевого результату, система повинна генерувати автоколивання на частоті близької до резонансної [56]. Однак, ця частота може виявитися занадто високою для роботи деяких виконавчих механізмів, які можуть не встигати сформувати рух регулюючих органів з необхідною швидкістю [13]. Тому доцільно в структурі системи настройки передбачити спосіб зменшення частоти автоколивань. Можна вказати на два способи реалізації цієї вимоги. Перший полягає в тому, що в характеристику реле вводиться зона повернення, другий в контур регулювання перед реле включається додаткова лінійна ланка фазозсуваючого фільтру. Розглянемо другий спосіб, перевагою якого є згладжування ступеневого сигналу від реле, що перешкоджає виходу адаптивного регулятора з нормального режиму функціонування. Фазозсуваючий фільтр можна вибрати у вигляді аперіодичної ланки з передавальною функцією виду [56]:

$$W_{\phi}(s) = \frac{1}{T_{\phi}s + 1},$$

де T_{ϕ} - постійна часу фільтра. В цьому випадку структура ускладнюється:

$$\begin{aligned} W_{нз}(A_y)W_p(j\omega)W_{\phi}(j\omega)W_{\mu}(j\omega) &= -1 \text{ або} \\ \arg[V(j\omega)] + \arg[R(j\omega)] - \tau_{мод}\omega + \arg[W_{\phi}(j\omega)] &= -\pi; \\ k_{мод}k_p |V(j\omega)R(j\omega)|W_{нз}(A_y)|W_{\phi}(j\omega)| &= 1 \end{aligned} \quad (2.35)$$

Чим більшою обрана постійна часу фазозсуваючого фільтра, тим менше частота автоколивань. Постійну часу доцільно обмежити значенням, при якому частота автоколивань виявиться рівною частоті резонансних коливань при оптимальному налаштуванні регулятора. Хоча процес пошуку настройки типового регуля-

тора, орієнтований на цю частоту потребує більше часу, ніж при налаштуванні по частоті перетину КЧХ з негативною дійсною віссю (через більший період автоколиваний), однак це може дозволити отримати більш точний кінцевий результат. Зв'язок постійної часу фільтра з постійною інтегрування ПІ - регулятора виражається за допомогою відповідного коефіцієнта:

$$f = \frac{T_\phi}{T_u} \quad (2.36)$$

Для визначення значення коефіцієнта $f = f_{рез}$, при якому адаптація буде відбуватися на частоті резонансу, в (2.32) слід ввести: $\omega = \omega_{рез}$, $T_i = T_i^{опт}$, тоді

$$f = \frac{1}{T_u^{опт} \omega_{рез}} \left(\operatorname{tg}(\pi + \arg(V(j\omega_{рез}))) - \operatorname{artg}\left(\frac{1}{T_u^{опт} \omega_{рез}}\right) - \tau_{мод} \omega_{рез} \right) \quad (2.37)$$

Для моделі яка настроює у вигляді інтегруючої ланки з запізненням:

$$f = \frac{1}{T_u^{опт} \omega_{рез}} \left(\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \operatorname{artg}\left(\frac{1}{T_u^{опт} \omega_{рез}}\right) - \tau_{мод} \omega_{рез}\right) \right) \quad (2.38)$$

Враховуючи $\Omega_{дi} = \tau_{дi} \omega_{дi}$ вираз (2.38) можна представити таким чином:

$$f_{рез} = \frac{1}{I^{опт} \Omega_{рез}} \left(\operatorname{tg}\left(\frac{\pi}{2} - \Omega_{рез} - \operatorname{artg}\left(\frac{1}{I^{опт} \Omega_{рез}}\right)\right) \right) \quad (2.39)$$

Обчислення параметрів моделі об'єкта автоматизації з урахуванням (2.39) проводиться по виразах:

$$\begin{aligned} \tau_{мод} &= \frac{1}{\omega} \left(\frac{\pi}{2} + \arg(R(j\omega)) + \arg(W_\phi(j\omega)) \right); \\ k_{мод} &= \frac{A_y \pi}{4c} \frac{\omega}{k_p |R(j\omega)W_\phi(j\omega)|} \end{aligned} \quad (2.40)$$

Оптимальні параметри налаштування адаптивного ПІ - регулятора на кожному кроці обчислюються за формулами для інтегральної ланки або при інерційній ланці:

$$T_{u.опт} = I \tau_{мод}; k_{p.опт} = K_{опт} / k_{мод}; \omega = \Omega_{дом} / \tau_{мод}$$

Розглянемо приклад адаптації АСР представленим методом при виведенні контуру регулювання в режим автоколиваний. Еталонну модель об'єкта оберемо у вигляді інерційної ланки з запізненням. Як показав процес комп'ютерного моде-

лювання при початковій настройці регулятора і реле $K_n=0,5$; $T_n = 12$, $c = 1,5$, яке дало наступний результат: $T = 23,6$, $A_y = 0,36$ (рис. 2.9).

Введення параметрів об'єкта, регулятора, реле: $k_\mu := 0,55$; $T_\mu := 1,5$; $\tau := 0,52$; $k_p := 0,5$; $T_i := 12$; $T_f := 0,147 \cdot T_i$; $c := 1,5$.

Введення діапазону часу, числа точок: $t_{\text{end}} := 50$; $n := 10000$; $\Delta t := \frac{t_{\text{end}}}{n}$.

Дискретне запізнювання: $\tau_d := \text{floor} \cdot \left(\frac{\tau}{\Delta t} \right)$.

Початкові умови: $y_{\tau_d}^1 := 0$; $y_0^2 := 0$; $y_0 := 0$; $u_0 := 0$; $u_{i0} := 0$; $u_{p0} := 0$; $z := 0$;
 $y_0^3 := 0$; $y_{f0} := 0$; $y_0 := 0$; $a := \frac{\Delta t}{T_u}$; $b := 1 - a$; $a_f := \frac{\Delta t}{T_f}$; $b_f := 1 - a_f$; $i := 0 \dots n$;

$$t_i := i \cdot \Delta t; \begin{pmatrix} y_{i+1+\tau_d}^1 \\ y_{i+1}^2 \\ y_{i+1}^3 \\ y_{i+1}^f \\ y_{i+1} \\ u_{i+1} \\ u_{p_{i+1}} \\ u_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} a \cdot k_\mu \cdot (1 - u_i) + b \cdot y_{i+\tau_d}^1 \\ a \cdot y_i^1 + b \cdot y_i^2 \\ a \cdot y_i^2 + b \cdot y_i^3 \\ \text{if}(y_i^3 \geq 0, c, -c) \\ a_f \cdot y_i^f + b_f \cdot y_i \\ k_p \cdot \frac{\Delta t}{T_i} \cdot y_i \cdot u_i \\ k_p \cdot y_i \\ u_i + u_i \end{bmatrix}.$$

Параметри автоколивань: $t_1 := 12,0$; $t_3 := 35,6$; $T := t_3 - t_1$; $T = 23,6$; $\omega := \frac{2 \cdot \pi}{T}$;

$\omega = 0,266$; $A_1 := 0,358$; $A_2 := 0,356$; $\underline{A} := \frac{A_1 + A_2}{2}$; $A = 0,357$.

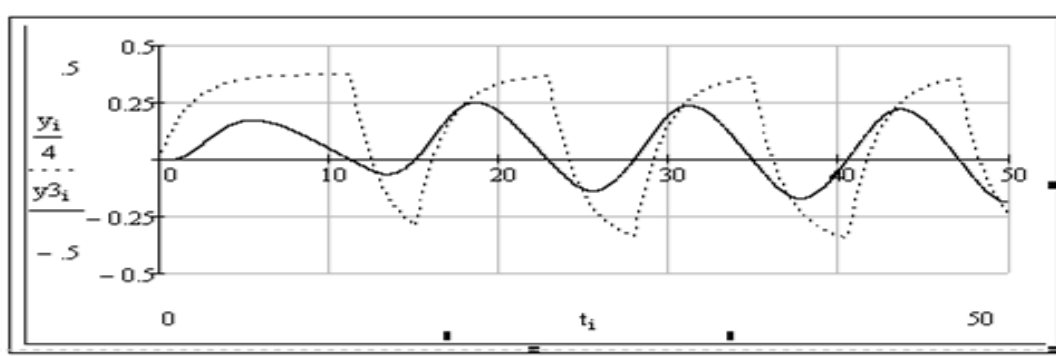


Рис. 2.9. Моделювання процесу автоколивань в адаптивній АСР з реле

Розрахунок параметрів математичної моделі об'єкта і оптимальних значень параметрів адаптивного регулятора в програмі (рис. 2.10) дозволив отримати наступні результати: $K_{\text{мод}} = 1,56$; $\tau_{\text{мод}} = 4,08$; $K_n^{\text{опт}} = 1,41$; $T_n^{\text{опт}} = 8,71$. Результати по-

вторного моделювання автоколивань з новими налаштуваннями дозволили отримати наступні значення автоколивань: $A^2 = 0,67$; $T^2 = 12$. З урахуванням розрахованих параметрів (наступного кроку адаптації) - визначено адаптивні оптимальні настройки ПІ - регулятора $K_{\pi} = 1,99$; $T_{\pi} = 4,21$. Перехідний процес адаптивної АСР за каналом збурення показаний на рис. 2.11.

Розрахунок параметрів регулятора методом автоколивань; модель - інерційний ланка з запізненням

Введення установок автоколивань, параметрів регулятора і реле, коефіцієнта зв'язку параметрів моделі що настроює об'єкта: $T := 23,6$; $A := 0,36$; $k_p := 0,5$; $T_i := 12$; $c := 1,5$; $\beta := 3,5$; $T_f := 0,147 \cdot T_i$; $\omega := \frac{2 \cdot \pi}{T}$; $(\omega, \tau) := \frac{1}{\beta \cdot \tau \cdot \omega \cdot j + 1}$; $W_r(\omega) := k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot \omega \cdot j}\right)$; $W_f(\omega) := \frac{1}{T_f \cdot \omega \cdot j + 1}$.

Введення оптимальних безрозмірних параметрів регулятора: $K_{opt} := 2,194$; $I_{opt} := 2,134$.

Наближене визначення часу запізнювання за графіком функції: $F(\omega, x) := \arg(V(\omega, x)) + \arg(W_r(\omega)) + \arg(W_f(\omega)) - x \cdot \omega + \pi$; $x := 0,01, 0,02 \dots 4$. $x := 2,7$; $\tau_{mod} := \text{root}(F(\omega, x), x)$; $\tau_{mod} := 4.078$

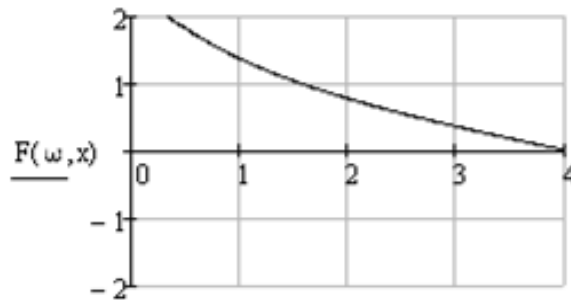


Рис. 2.10. Розрахунок параметрів адаптивного регулятора методом автоколивань

Коефіцієнт передачі моделі:

$$k_{mod} := \frac{\pi \cdot A}{|V(\omega, \tau_{mod}) \cdot W_r(\omega) \cdot W_f(\omega)| \cdot 4 \cdot c}; \quad k_{mod} := 1,562.$$

Розрахунок оптимальних параметрів регулятора:

$$k_{p.opt} := \frac{k_{opt}}{k_{mod}};$$

$$T_{i.opt} := I_{opt} \cdot \tau_{mod};$$

$$k_{p,opt} = 1,405; T_{i,opt} = 8,702.$$

Перехідна характеристика адаптивної АСР за каналом збурення

Параметри об'єкта: $k_\mu := 0,55$; $T_\mu := 1,5$; $\tau := 0,52$. Діапазон часу, число точок: $t_{end} := 30$; $n := 3000$. Інтервал дискретності: $\Delta t := \frac{t_{end}}{n}$; запізнення: $\tau_d := \text{floor} \cdot \left(\frac{\tau}{\Delta t}\right)$; $a := \frac{\Delta t}{T_\mu}$. Початкові умови: $y_{\tau_d}^1 := 0$; $y_0^2 := 0$; $y_0 := 0$; $u_0 := 0$; $u_{i0} := 0$; $u_{p0} := 0$; $i := 0 \dots n$; $t_i := I \cdot \Delta t$. Параметри регулятора: $k_p := 0,5$; $T_i := 12$;

$$\begin{pmatrix} y_{i+1+\tau_d}^1 \\ y_{i+1}^2 \\ y_{i+1} \\ u_{i+1} \\ u_{p,i+1} \\ u_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} a \cdot k_\mu \cdot (1 - u_i) + b \cdot y_{i+\tau_d}^1 \\ a \cdot y_i^1 + b \cdot y_i^2 \\ a \cdot y_i^2 + b \cdot y_i \\ k_p \cdot \frac{\Delta t}{T_i} \cdot y_i \cdot u_i \\ k_p \cdot y_i \\ u_{p,i} + u_i \end{bmatrix}.$$

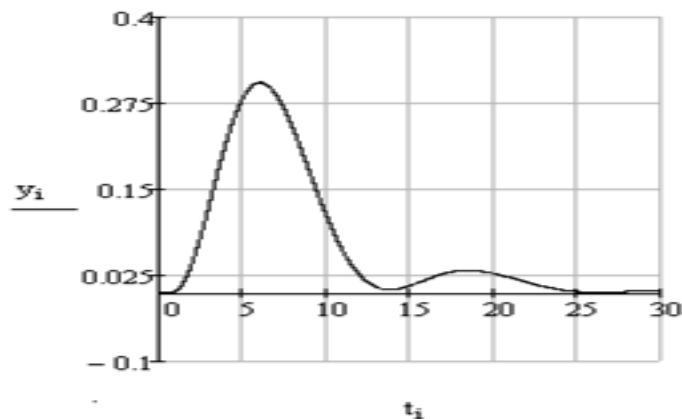


Рис. 2.11. Перехідний процес адаптивної АСР за каналом збурення

До недоліків даного методу адаптації, на думку дисертанта, можна віднести погіршення регулюючих властивостей регулятора на час налаштування. Типовий адаптивний ПІ або ПІД - регулятор стає двохпозиційним, що істотно впливає на якість процесу управління всією АСР в цілому. На думку проф. В. Я. Ротача [99-103] такий метод можна застосовувати тільки тоді, коли на об'єкт в процесі налаштування практично не діють збурення. Можна відзначити, що в виробничих умовах компенсувати всі збурення для проведення адаптації неможливо, тому, на мою думку, використання досліджуваного методу можливо стосовно тільки до класу детермінованих об'єктів, навантаження або завдання яких змінюється в ма-

лому діапазоні. На думку ряду вчених [86, 97, 102, 104-110] більш прийнятним є метод, при якому регулятор продовжує працювати в своєму нормальному режимі, а збудження автоколивань здійснюється шляхом охоплення всієї системи регулювання додатковим нелінійним зворотним зв'язком (рис.2.12 (а-б)). Нелінійний зворотний зв'язок складається з реле з фазозсувуючим фільтром, а умова гармонійного балансу визначається рівнянням:

$$W_{н.з}(A_y)\Phi_{yu}(j\omega) = 1 \quad (2.41)$$

де $\Phi_{yu}(j\omega)$ - КЧХ замкнутого контуру системи.

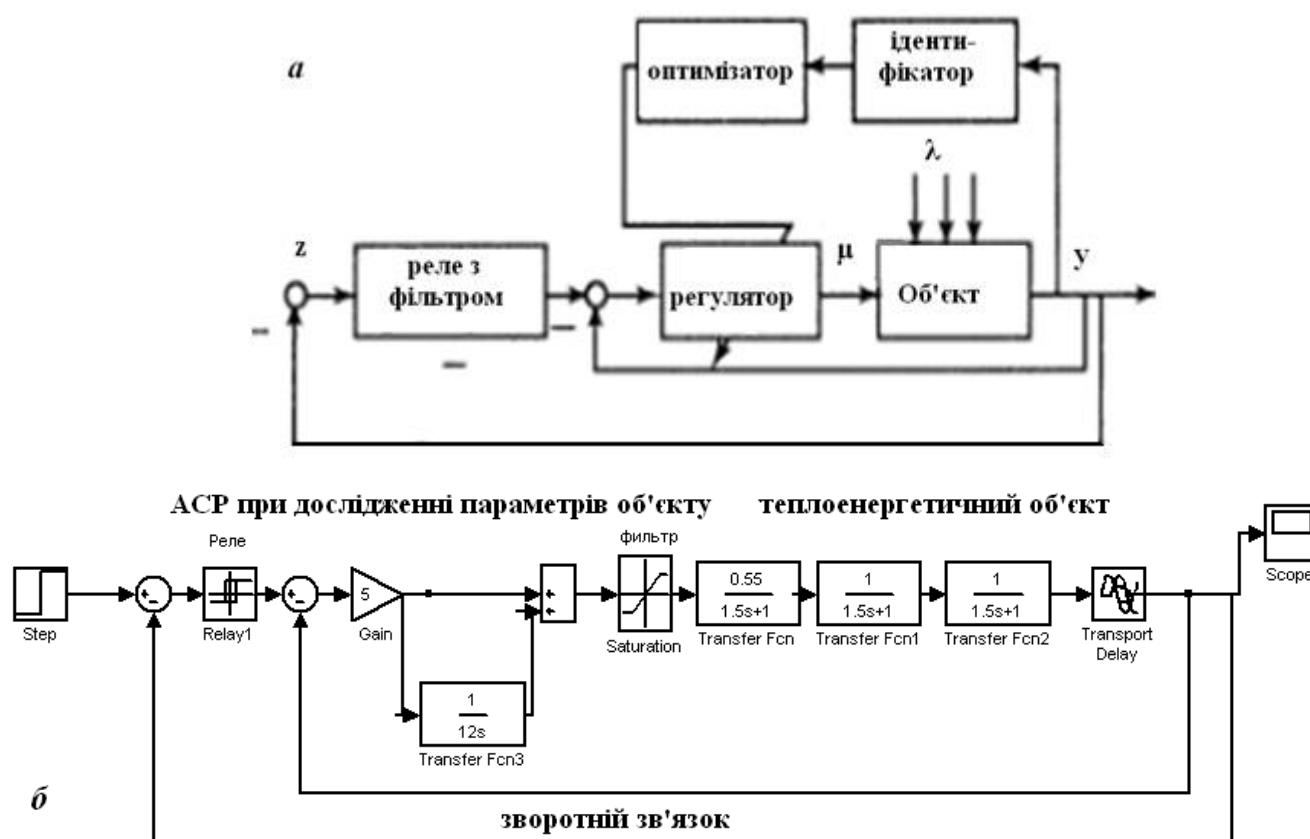


Рис. 2.12. а) адаптивна АСР с нелінійним зворотним зв'язком б) моделювання адаптивної АСР в середовищі MatLab

Процедура настройки відрізняється від розглянутої вище тільки тим, що в результаті комп'ютерного експерименту виходить вектор частотної характеристи-

ки замкнутого контуру і відповідний вектор КЧХ об'єкта доводиться знаходити з цього вектора шляхом додаткового розрахунку за формулою:

$$W_{\mu}(j\omega) = \frac{1}{W_p(j\omega)} \cdot \frac{\Phi_{yu}(j\omega)}{1 - \Phi_{yu}(j\omega)} \quad (2.42)$$

Недолік цього методу, на думку автора, полягає в тому, що початкова настройка регулятора повинна бути спеціально обрана з міркування стійкості контуру регулювання. Також, до недоліків методу автоколивань можна віднести, що резонансна частота в низці випадків викликає паразитний шум, спотворення сигналу, і навіть може пошкодити електронні компоненти. Також в процесі функціонування АСР, що містить цифровий фільтр, виникає завдання оперативної зміни характеристик фільтра до змін вхідного сигналу (завдання), наприклад, коефіцієнта посилення, частоти зрізу, смуги пропускання. В цьому випадку частотна характеристика фільтра повинна автоматично регулюватися, забезпечуючи задані властивості системи. Однак, при створенні фільтрів що перенастроюються зазвичай використовують нерекурсивні фільтри високого порядку, що ускладнює їх реалізацію і підстроювання. Це обумовлено тим, що у нерекурсивних фільтрів відсутня проблема стійкості передавальної функції [12, 36]. Застосування адаптивних алгоритмів для перебудови характеристик рекурсивних фільтрів має ряд обмежень. Перш за все, це проблеми стійкості передавальної функції і обмеження діапазону зміни керованого параметра, а також лінійність управління [34, 146]. Також наявність додаткового контура зворотного зв'язку може призвести до виникнення ряду електромагнітних завад і впливу зовнішніх збурень від інших контурів суміжних АСР. Можна вказати, що економічна складова функціонування такої АСР збільшується через наявність додаткового коштовного обладнання, ліній зв'язку та необхідністю додаткового обслуговуючого персоналу.

Дисертантом проведений аналіз методу адаптації на основі вивчення САР де об'єкт - пароперегрівач парового котла за каналом «зміщення регулюючого органу витрати охолоджуючої води на пароохолоджувач» – «зміна температури перегрітої пари» за допомогою генератору синусоїдальних коливань (ГСК). Виходячи з рекомендацій [23, 133] приймемо структуру моделі об'єкта що настроює

у вигляді ланки з запізненням при $\beta = 3,5$. Початок процедури адаптації виконаємо першим із зазначених способів, скориставшись отриманим раніше результатом виведення контуру системи в коливальний режим. Вибравши первинне налаштування регулятора $K_n = 0,5$; $T_i = 12$ хв., що забезпечує АСР запас стійкості (перехідний процес загасаючий) здійснимо подачу від ГСК сигналу з періодом $T = 10$ хв і амплітудою $A_x = 1$. Моделювання коливань на вході і виході контуру в програмі MatCad (Demo) показано на рис. 2.13. З розгляду отриманих графіків (рис. 2.14) випливає, що коливання на виході практично стабілізувалися після трьох періодів коливань і, отже, в програмі можна вибрати $m = 4$. Оскільки в розглянутому прикладі випадкові перешкоди не введені, досить оцінювати значення коефіцієнтів першої гармоніки коливань вихідної величини тільки на одному періоді. Співвідношення амплітуд і зсув по фазі синусоїдальних коливань на виході і вході системи обчислене за допомогою формул (2.41) і (2.42) для четвертого періоду коливань, виявилися наступними: $A = 0,118$; $\varphi = -2,7$.

Програма на рис. 2.13 обчислює за цими даними модуль і фазу вектора моделі об'єкта для частоти експерименту, а також відповідні їй параметри налаштування регулятора і нову частоту ідентифікації: $k_n = 2,29$; 1 и $T_i = 4,3$; $\omega = 0,394$. У разі якщо перехідний процес не оптимальний, отримані результати вводяться в адаптивний ПІ-регулятор, і експеримент повторюється при новому значенні частоти ГСК. Досліджуючи отримані настройки в програмі MatLab (Demo) і моделюючи ДПС по каналу регулювання (рис. 2.15) автором отримані наступні перехідні процеси (рис. 2.16). У розглянутому випадку на прикладі для теплоенергетичного об'єкта стабілізація параметрів настройки сталася після другого кроку, давши наступний результат: $k_{\text{опт}} = 2,29$ $T_{\text{іопт}} = 4,3$

Оцінка вектора КЧХ системи за допомогою ГСК

Введення установок об'єкта, регулятора, реле: $k_\mu := 0,55$; $T_\mu := 1,5$; $k_p := 0,5$; $T_i := 12$. Період і амплітуда коливань ГСК: $T = 10$; $\omega := \frac{2\pi}{T}$; $\omega = 0,628$. Введення числа періодів і числа точок на періоді: $m := 4$; $g := 1000$; $\Delta t := \frac{T}{g}$. Дискретне запізнення: $\tau_d := \text{floor} \cdot \left(\frac{\tau}{\Delta t} \right)$; $A_x := 1$. Початкові умови: $y^1_{\tau_d} := 0$; $y^2_0 := 0$; y_0

$:= 0; u_0 := 0; ui_0 := 0; up_0 := 0; \varepsilon_0 := 0; n := m \cdot g; i := 0 \dots n; t_i := \Delta t \cdot i; x_i := Ax \cdot \sin(\omega \cdot \Delta t \cdot i);$

$$a := \frac{\Delta t}{T_\mu}; \quad b := 1 - a;$$

$$\begin{pmatrix} y_{i+1+\tau d}^1 \\ y_{i+1}^2 \\ y_{i+1} \\ \varepsilon_{i+1} \\ ui_{i+1} \\ up_{i+1} \\ u_{i+1} \end{pmatrix} := \begin{bmatrix} a \cdot k_\mu \cdot (1 - u_i) + b \cdot y_{i+\tau d}^1 \\ a \cdot y_i^1 + b \cdot y_i^2 \\ a \cdot y_i^2 + b \cdot y_i^3 \\ x_i + y_i \\ k_p \cdot \frac{\Delta t}{T_i} \cdot \varepsilon_i \cdot ui_i \\ k_p \cdot \varepsilon_i \\ up_i + ui_i \end{bmatrix}.$$

Виділення останнього періоду: $m_{out} := m - 1; k_{min} := m_{out} \cdot g; \quad \underline{a} := \frac{2}{g} \cdot$

$$\sum_{i=k_{min}}^{k_{min}+g} \left(y_i \cdot \sin\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{g}\right) \right); \quad a = -0,107; \quad \underline{b} := \frac{2}{g} \cdot \sum_{i=k_{min}}^{k_{min}+g} \left(y_i \cdot \cos\left(\frac{2 \cdot \pi \cdot i}{g}\right) \right); \quad b = -0,051;$$

$\underline{\Phi} := \frac{a+b \cdot j}{A_x}; \quad \underline{A} := |\Phi|; \quad \gamma := a_{\tan}\left(\frac{b}{a}\right); \quad \Phi := \text{if}(a > 0, \gamma, \gamma - \pi).$ Значення модуля і фазового зсуву вектора КЧХ: $\underline{A} = 0,118; \Phi = -2,7.$

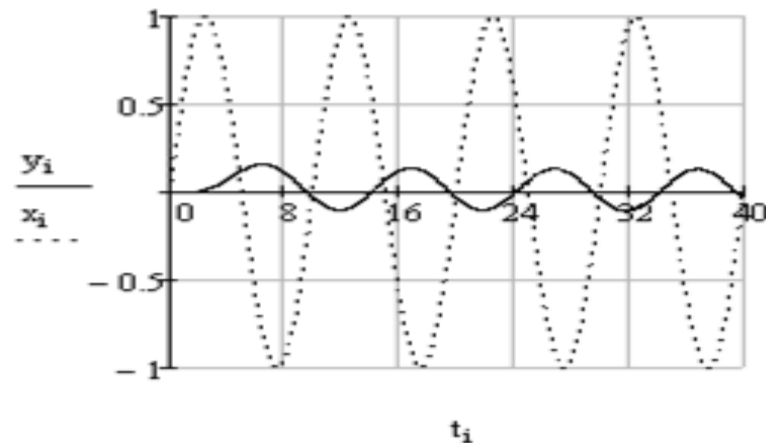


Рис. 2.13. Моделювання синусоїдальних автоколивань за допомогою ГСК

Розрахунок оптимальних параметрів регулятора при налаштуванні за допомогою ГСК, модель – інерційна ланка з запізненням

Введення модуля і фази КЧХ системи, параметрів регулятора, частоти: $\underline{A} = 0,118; \Phi = -2,7; k_p := 0,5; T_i := 12; \omega = 0,628.$

Введення безрозмірних резонансної частоти і параметрів настройки регулятора: $\Omega_{res} := 0,794; I_{opt} := 2,134; K_{opt} := 2,194.$

Обчислення вектора КЧХ об'єкта: $\Phi := A \cdot e^{\Phi \cdot j}$; $W_r := k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot \omega \cdot j}\right)$;
 $W_\mu := \frac{\Phi}{1 - \Phi} \cdot \frac{1}{W_r}$; $p := \text{Re}(W_\mu)$; $q := \text{Im}(W_\mu)$; $A_\mu := |W_\mu|$; $A_\mu := 0,211$; $\gamma_\mu := \text{atan}\left(\frac{q}{p}\right)$;
 $\Phi_\mu := \text{if}(p \geq 0, \gamma_\mu, \gamma_\mu - \pi)$; $\Phi_\mu = -2,614$.

Наближена оцінка запізнювання моделі за графіком $\tau_{\text{end}} := 3$; $n := 100$;
 $\Delta\tau := \frac{\tau_{\text{end}}}{n}$; $\tau := \Delta\tau \cdot 0,2 \cdot \Delta\tau \dots \tau_{\text{end}}$; $\beta := 3,5$; $F(\tau) := -\tau \cdot \omega - \text{atan}(\beta \cdot \tau \cdot \omega) - \Phi_\mu$. Точне
 рішення: $\tau := 2,5$; $\tau_{\text{mod}} := \text{root}(F(\tau), \tau)$; $\tau_{\text{mod}} = 2,014$; $k_{\text{mod}} := A_\mu \cdot [1 + (\beta \cdot \tau_{\text{mod}} \cdot \omega)^2]^5$; $k_{\text{mod}} = 0,959$.

Обчислення параметрів регулятора і частоти ГСК на черговому кроці:
 $k_{p,\text{opt}} := \frac{K_{\text{opt}}}{k_{\text{mod}}}$; $T_{i,\text{opt}} := I_{\text{opt}} \cdot \tau_{\text{mod}}$; $\omega_{\text{opt}} := \frac{\Omega_{\text{res}}}{\tau_{\text{mod}}}$; $\omega_{\text{opt}} = 0,394$; $k_{p,\text{opt}} = 2,289$; $T_{i,\text{opt}} = 4,298$.

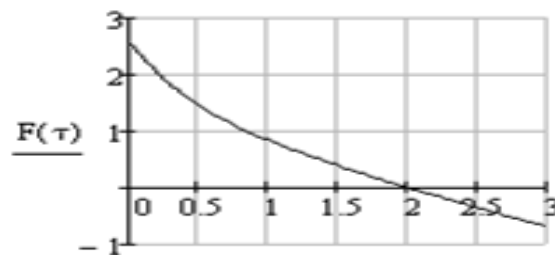


Рис. 2.14. Програма розрахунку параметрів ПІ – регулятора за допомогою ГСК

Одержуваний за такої настройки процес регулювання продемонстрував наступні показники якості при впливі на об'єкт параметричних збурень по внутрішньому і зовнішньому каналах: $T_p = 60$ сек, $G = 49\%$ на рис. 2.16 (3). Тобто при номінальному режимі АСР ефективна (рис. 2. 16 (2)), але метод неефективний при впливі глибоких збурень тому значення перерегулювання не відповідає рекомендованому до 25%. Таким чином, можна зробити висновок, що АСР потребує чергової процедури адаптації.

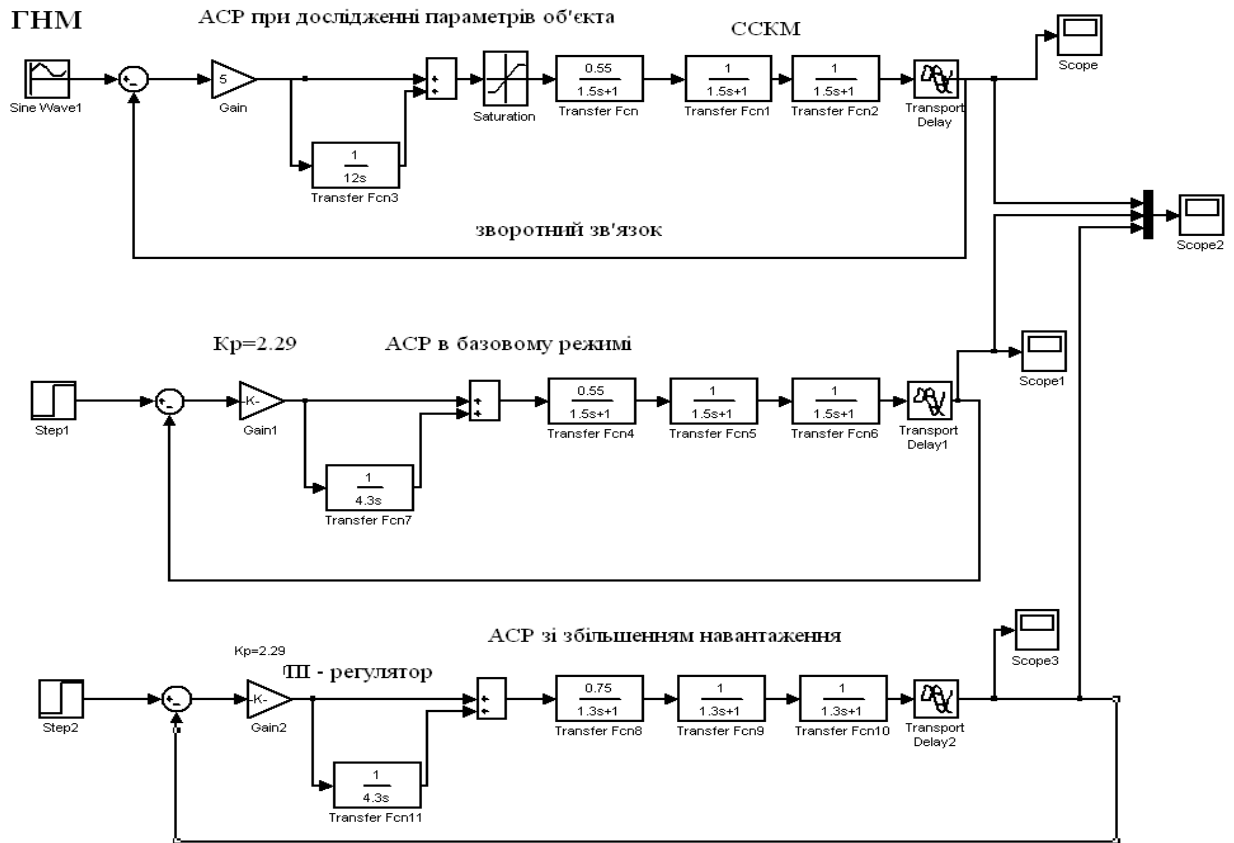


Рис. 2.15. Моделювання АСР при впливі параметричного збурення

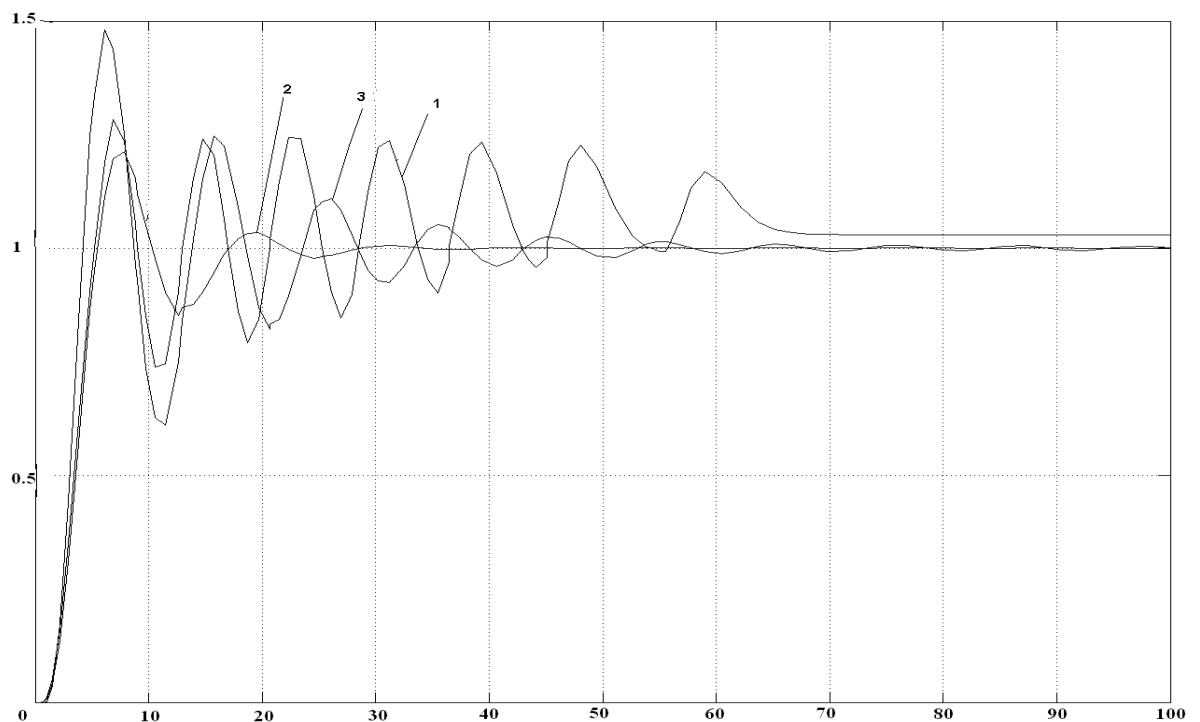


Рис. 2.16. Перехідні процеси по каналу завдання адаптивної АСР діючої за

допомогою ГСК: 1 - автоколивальний процес з ідентифікацією

2 - процес отриманий за оптимальними налаштуваннями, 3 - процес при оптимальних налаштуваннях і впливі параметричного збурення

Відомі методи визначення частотних характеристик засновані на застосуванні синусоїдальних сигналів, сигналів апроксимуючих синусоїдальні, або полігармонічних сигналів [90-94].

Ці методи набули великого поширення при дослідженні складних промислових об'єктів. Розрізняють прямі детерміновані частотні методи, засновані на безпосередньому вимірі амплітуди і фази вихідного сигналу, і статистичні частотні методи [99]. Є і низка інших методів, які не отримали широкого застосування на практиці [123]. Виходячи з аналізу наукової літератури [90, 99, 135-142] і імітаційних експериментів дисертації, можна зробити висновок, що прямі методи визначення частотних характеристик мають ряд переваг: велика точність, так як гармонійні вхідні сигнали ортогональні в різних точках вимірювання, таким чином, кожна точка частотних характеристик визначається незалежно від інших; проста обробки та можливість проведення вимірювань в замкнутій системі; малий вплив шумів; велика надлишковість інформації.

Однак їм притаманна і низка недоліків: складність обладнання для проведення вимірювань на низьких частотах (генератор); великий час вимірювання; необхідність перетворення сигналів; велика кількість обладнання; умови вимірювання і параметри досліджуваного об'єкта встигають змінитися за спостереження.

При обробці амплітуду вихідного сигналу для кожної частоти зменшують в $\pi / 4$ рази, тобто приблизно на 27%. Вимірювання починають проводити з найвищих частот, і, так як промислові об'єкти є інерційними, на вищих частотах вихідний сигнал є синусоїдальним. На нижчих частотах вводять корекцію по 3, 5 і 7-й гармоніки. Цей метод був досліджений на деяких промислових об'єктах [111-123]. При рівні шумів $q \approx 10$ дБ метод показав хороші результати. Слід зазначити, що метод відрізняється тривалістю і чутливістю до зовнішніх збурень. Також якщо об'єкт має істотні нелінійні властивостями то при його ідентифікації рекомендується скористатися науковими розробками Н. Вінера. Вчений показав [151], що оптимальним пробним сигналом, яким є гармонійний сигнал для дослідження лінійних систем, при дослідженні нелінійних систем служить білий шум. Так як білий шум фізично не реалізується, практично реалізують де-

яку модель білого шуму, що має постійну спектральну щільність в діапазоні робочих частот об'єкта, і дисперсію, що перевищує діапазон зміни потужності робочого вхідного сигналу об'єкта. Однак, процес ідентифікації носить тривалий, складний і дорогий характер на увазі необхідності використання спеціальної сигнальної апаратури і навченого персоналу.

Ідентифікація об'єкта і розрахунок оптимальних параметрів ПІ - регулятора. Для визначення значень чотирьох параметрів об'єкта (K , T , τ , n), пропонується використовувати генератор синусоїдальних коливань, який проводить оцінку КЧХ об'єкта на двох різних частотах, що належать до суттєвого діапазону. З урахуванням дійсних рівнянь:

$$\left. \begin{aligned} A_1 &= \frac{K}{(\beta^2 \tau^2 \omega_1^2 + 1)^{0,5n}} ; \\ A_2 &= \frac{K}{(\beta^2 \tau^2 \omega_2^2 + 1)^{0,5n}} ; \\ \varphi_1 &= -\arctg(\beta \tau \omega_1) - \tau \omega_1 ; \\ \varphi_2 &= -\arctg(\beta \tau \omega_2) - \tau \omega_2 \end{aligned} \right\} \quad (2.43)$$

вирішення яких при відомих амплітудах, частотах і фазових зсувах: A_1 , A_2 , ω_1 , ω_2 , φ_1 , φ_2 дозволяє знайти значення параметрів передавальної функції об'єкта. При цьому постійна часу: $T = \beta \tau$. Приймалося допущення, що ідентифікатор визначив такі значення параметрів передавальної функції досліджуваного об'єкта по каналу регулювання: $W(s) = \frac{8,27}{(3,05s + 1)^3} e^{-0,93}$. У програмі MathCAD проведено розрахунок

оптимальних значень параметрів ПІ-регулятора (рис. 2.17).

Слід зазначити, що розраховані за представленим методом налаштування ПІ регулятора потребували ручного коригування тому ряд отриманих загасаючих перехідних процесів не відповідав заданим критеріям (першому відхиленню і часу регулювання). Для отримання тестової вибірки (матриці навчання нейро-нечіткої мережі) значень оптимальних параметрів ПІ-регулятора каскадної АСР, був проведений комп'ютерний експеримент в програмі MatLab (Simulink) з ручним коригуванням значень налаштувань K_p та T_i , значення параметрів передавальної функ-

ції об'єкта змінювалися з урахуванням різних режимів роботи парового котла (номінального, економного, пуску, зупинки, регулювального, пікового) Результати експерименту представлені в табл. 2.1.

Таблиця 2.1.

Оптимальні настройки ПІ-регулятора при $n = 3$ і дії на об'єкт параметричного збурення (зміні навантаження)

Коб	0,5	1	5	15	5	12	4,43	7,05	11,9	13,7
Тоб	1,5	3	4	4	1,5	1,5	2,48	1,5	1,5	3,4
τ	0,5	1	1,5	1	0,5	0,5	0,92	0,5	0,5	0,7
Кр	1,34	0,99	0,49	0,146	0,135	0,031	0,22	1,92	0,031	0,021
Ti	1,91	5,55	40,63	20,4	1,92	1,58	6,61	0,1	1,58	3,55

Розрахунок настройки ПІ-регулятора за допоміжною функцією

Введення показника коливальності: $M := 1,55$.

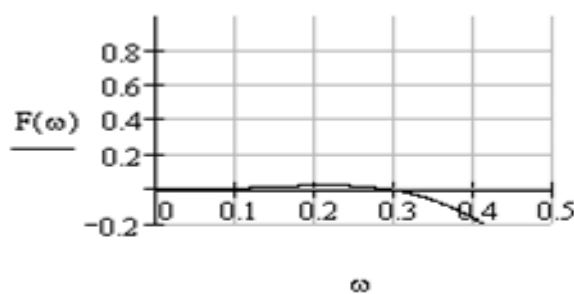
Введення параметрів об'єкта: $k_\mu := 8,27$; $T_\mu := 3,05$; $\tau := 0,93$;

$$W_\mu(\omega) := \frac{k_\mu \cdot e^{-\tau\omega j}}{(T_\mu \cdot j \cdot \omega + 1)^3}.$$

Побудова графіка допоміжної функції: $\omega_{\text{end}} := 0,5$; $n := 500$; $\Delta\omega := \frac{\omega_{\text{end}}}{n}$;

$\omega := \Delta\omega, 2 \cdot \Delta\omega \dots \omega_{\text{end}}$; $\Phi_\mu(\omega) := \arg(W_\mu(\omega))$; $A_\mu(\omega) := |W_\mu(\omega)|$; $F(\omega) :=$

$$\frac{-\omega \cdot M}{A_\mu(\omega) \cdot (M^2 - 1)} \cdot (M \cdot \sin(\Phi_\mu(\omega)) + 1).$$



Визначення частоти максимуму допоміжної функції: $\omega := 0,35$; Given $\omega \geq 0,2$; $\omega \leq 0,4$; $\omega_{\text{res}} := \text{Maximize}(F, \omega)$; $\omega_{\text{res}} = 0,213$; $F(\omega_{\text{res}}) = 0,022$.

Визначення оптимальних параметрів регулятора і побудова АЧХ замкнутого контуру: $A_{\text{res}} := A_\mu(\omega_{\text{res}})$; $k_p := -M^2 \cdot \frac{\cos(\Phi_\mu(\omega_{\text{res}}))}{(M^2 - 1)A_{\text{res}}}$; $T_i := \frac{k_p}{F(\omega_{\text{res}})}$; $W_r(\omega) :=$

$k_p \cdot \left(1 + \frac{1}{T_i \cdot \omega \cdot j}\right)$; $W(\omega) := W_\mu(\omega) \cdot W_r(\omega)$; $\Phi(\omega) := \frac{W(\omega)}{1+W(\omega)}$; $A(\omega) := |\Phi(\omega)|$; $\omega_{\text{end}} := 2$; $\Delta\omega := \frac{\omega_{\text{end}}}{n}$; $\omega := \Delta\omega, 2 \cdot \Delta\omega \dots \omega_{\text{end}}$.

Оптимальні значення: $k_p = 0,124$; $T_i = 5,649$.

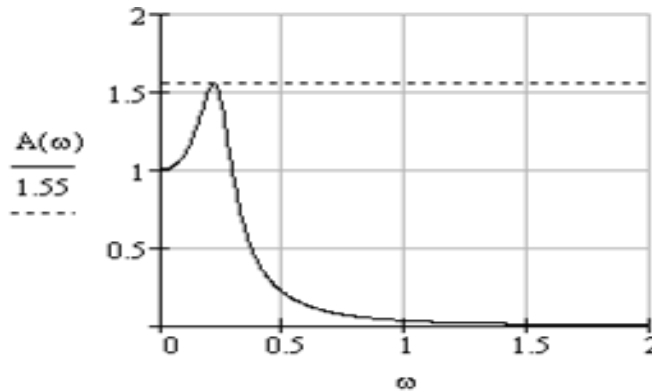


Рис. 2.17. Розрахунок оптимальних значень настройок ПІ-регулятора

2.4 Висновки за другим розділом

1. Отримано нові математичні моделі для розрахунку параметрів перехідних енергетичних процесів в ССКМ з включенням адаптивної АСР регуляторів при різних режимах функціонування обладнання.

2. Отриманні математичні моделі дозволяють визначати:

- параметри перехідних процесів обладнанні ССКМ (тривалості часових інтервалів регулювання, постійні інтегрування і диференціювання, запізнювання);
- миттєві значення показників в елементах системи, на вході і виході обладнання;
- максимальні, середні та діючі значення показників якості елементів в системі і в обладнанні цілому; показники якості (абсолютні пульсації, коефіцієнти посилення пропорційної, інтегруючої і диференціюючої складових регулятора відповідно) на вході і виході ССКМ; енергетичні параметри (величину потужності втрат, ККД) ССКМ і енергетичного обладнання в цілому.

3. Одержав подальший розвиток метод аналізу енергетичних перехідних процесів в ССКМ, заснований на розбитті сумарного енергетичного процесу на групи і виборі в якості базових параметрів кількості показників якості, що об'єднуються в групи в залежності від початкових умов і вимог до ССКМ. При викори-

станні даного методу аналізу отримані співвідношення, що дозволяють обчислити мінімальні і максимальні значення параметрів перехідних процесів для визначення показників якості ССКМ.

4. Математичні моделі дозволяють визначати (досліджувати) енергетичні процеси в ССКМ при зміні різних параметрів: співвідношення вхідних і вихідних параметрів, стрибків, зовнішніх збурень, кількості обслуговуваних приміщень з різними вимогами за складом і характеристикам повітряної суміші, коефіцієнтів регулювання, враховуючі зміни параметрів (режим роботи, потужність тощо).

Отримані математичні моделі для дослідження і побудови моделей і обладнання ССКМ будь-якої структури з різними принципами складають обчислювальну основу для ефективного розрахунку і регулювання за допомогою ЕОМ (зменшення витрат часу в 1,5 - 2 рази), дозволяють проводити аналіз енергетичних процесів, показників якості та параметрів, виявляти вплив параметрів елементів і параметрів сигналів управління на характер перехідних процесів в системах управління, складають основу інженерного розрахунку при проектуванні пристроїв і систем ССКМ. Проведений аналіз сучасних тенденцій в розробках АСР ССКМ дозволяє стверджувати, що використання адаптивного регулювання в системі контролю клімату суднових приміщень дає можливість:

- скоротити час налаштування контурів регулювання температури і вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу;
- гарантувати найкращу якість управління ССКМ в будь-який момент часу і в будь-якому місцезнаходженні широкого класу суден;
- забезпечити безперервний процес підстроювання параметрів регулятора під властивості приміщень що постійно змінюються;

Як показують комп'ютерні експерименти, адаптивні регулятори дозволяють економити до 25% енергоресурсів у порівнянні з ручним керуванням або близько 10% в порівнянні з не оптимально налаштованим класичними регуляторами. Крім того, застосування адаптивного регулювання веде до скорочення термінів і вартості пуско-налагоджувальних робіт. Так як сучасна електроніка володіє величезними апаратними ресурсами, в залежності від вимог до АСР можна передбачити

алгоритм роботи блоку адаптації з автоматичним прорахунком регулювальних характеристик і доповнити його експертними настройками. Завдяки таблиці експертних даних блок адаптації запропонованого варіанту побудови АСР визначає найкращий варіант роботи системи ССКМ за оптимальних критеріїв.

Разом з тим, застосування в ССКМ спеціальних пристроїв ідентифікації та блоків адаптації призведе до подорожчання устаткування автоматики і складністю в його обслуговуванні, а також наявності додаткових внутрішніх збурень (тестових імпульсів) по каналу регулювання. Таким чином, пропонується розглянути в якості альтернативного наукового підходу та як доповнення для розробки інтелектуальної гібридної системи – теорію нечіткої логіки, нейро-нечіткі системи та генетичні алгоритми, динамічно-підключаємі бібліотеки, що дозволяє враховувати інтуїцію, знання і досвід експертів з налагодження та експлуатації ССКМ.

РОЗДІЛ 3.

РОЗРОБКА АЛГОРИТМІВ ПРОГРАМНИХ МОДУЛІВ ТА ГІБРИДНИХ
ІНТЕЛЕКТУАЛЬНИХ МЕТОДІВ ЕКСПЛУАТАЦІЇ

Отримані в розділі 2 математичні моделі дозволяють визначити необхідні перехідні енергетичні характеристики та показники якості ССКМ. Було обґрунтовано, що використання спеціалізованого програмного забезпечення з використанням експертних систем підтримки прийняття рішень (СППР) і динамічно підключаємих бібліотек для моделювання та дослідження настроюючих перехідних процесів систем вентиляції та кондиціювання, дозволяє подолати недоліки, які виникають при використанні відомих САПР [123-145]. Спеціалізоване програмне забезпечення являє собою програмний комплекс у вигляді універсальної програми для досліджень й динамічно-підключаємої бібліотеки в якій реалізована математична модель.

Метою даного розділу є розробка методик і алгоритмів програмних модулів для дослідження ССКМ з використанням отриманої в розділі 2 математичної моделі на прикладі розробленого програмного забезпечення.

3.1 Розробка алгоритмів та програмного забезпечення для дослідження роботи системи в процесі експлуатації

Функції з управління обладнанням ССКМ поділяються між групою судномеханіків, електромеханіків і дистанційною автоматизованою системою управління (ДАСУ). Особа що приймає рішення (ОПР) впливає на технологічний процес за допомогою зміни положення регулюючих органів, керованих дистанційно з ЦПУ (центрального поста управління) або місцевого поста (МП). Однак, в умовах експлуатації обладнання ССКМ судна, часто виникають ситуації, коли зазначені в режимних картах параметри складно або неможливо витримувати [13]. Вони, як правило, трапляються в перехідних режимах, в умовах неполадок, зміни характеристик погодних умов тощо. І ефективність процесів управління в даних випадках

багато в чому залежить від досвіду і знань експертів. Досвідчені офіцери - судно-механіки можуть успішно вирішувати складні завдання управління тому добре знають всю сукупність процесів повітрообміну, взаємозв'язку контрольованих параметрів і їх вплив на окремі режимні фактори. У всіх випадках експерту необхідно оперативно орієнтуватися в ситуації і кваліфіковано приймати рішення щодо вибору керуючих впливів з урахуванням усіх обмежень.

Кваліфікований оператор – ОПР досить добре управляє такими об'єктами, користуючись показаннями приладів і накопиченим досвідом. Оскільки інформація, отримана від оператора, виражена словесно, для її використання в нечітких регуляторах застосовують лінгвістичні змінні і апарат теорії нечітких множин, який був розроблений Л. Заде в 1965 році [29, 30, 140]. У 1974 році Мамдані [150] показав можливість застосування ідей нечіткої логіки для побудови системи управління динамічним об'єктом, в публікації, в якій Мамдані описувався нечіткий регулятор і його застосування для управління парогенератором. З тих пір область застосування нечітких регуляторів постійно розширюється, збільшується різноманітність їх структур і виконуваних функцій [104-117].

Нечітке управління (управління на основі методів теорії нечітких множин) використовується при недостатньому знанні математичної моделі складного нелінійного об'єкта управління ідентифікація якого занадто трудомістка, але наявності досвіду управління ним, а також у випадках, коли за умовою експлуатації необхідно використовувати знання експерта [115-119].

Досвідчений оператор при дистанційному управлінні обладнанням енергоблоку, як правило, виконує пропорційно-інтегральний закон регулювання. Можна відзначити, що чинниками, що зумовили широке поширення традиційних законів управління, стали їх простота для розуміння обслуговуючим персоналом. ПІ і ПІД-регулятори проектуються на основі класичної теорії і встановлення зв'язку між параметрами об'єкта і управлінням здійснюватися інженерами-практиками та операторами без суттєвих ускладнень. Крім того, за останні десятиліття розроблено десятки методів настройки ПІ і ПІД-регуляторів. Найбільш відома і часто використовувана методика Зіглер (Ziegler) і Нікольса (Nichols) [143-146] запропо-

нована на заснований на даних про реакцію на одиничний поетапний вплив. На її основі Такахаші (Takahashi) запропонував метод настройки для ПІ і ПІД-контролерів з дискретним часом [120]. Більш сучасний метод автоматичної настройки ПІ і ПІД-контролерів був запропонований Нішікава (Nishikawa) [144]. Він вимагає подачі вхідного випробувального сигналу для оцінки параметрів процесу. На пострадянському просторі успішно зарекомендували себе методи Солодовнікова, Копеловіча, Ротача, Денисенко та інших вчених [143,45,130,18]. Однак, поряд з вищевказаними достоїнствами, представлені методи розрахунку параметрів ПІ- і ПІД-регуляторів мають і ряд недоліків. Так, наприклад, якщо робоча точка керованого процесу змінюється через збурення, параметри контролера потрібно перенастроювати вручну, щоб отримати нову оптимальну настройку. Налаштування повинне виконуватися досвідченим оператором.

Для систем з взаємодіючими контурами ця процедура може бути складною і займати багато часу. Крім того, для процесів зі змінними параметрами, часовими затримками, істотними нелінійностями і значними перешкодами використання ПІ і ПІД-регуляторів може не забезпечити оптимальних характеристик. Традиційні активні адаптивні методи настройки ПІ і ПІД-контролерів також мають ряд недоліків. Наприклад, той же метод Зіглера-Нікольса (Ziegler - Nichols) [133] чутливий до збурень, так як розроблений на основі експериментів з роз'єднаними системами. У методі настройки, запропонованому Нішікава (Nishikawa) і іншими [144], потрібна людино-машинна взаємодія, в ході якого оператор повинен генерувати вхідні сигнали кожного разу, коли потрібна зміна параметрів з метою адаптації до зміни динаміки процесу, що не виключає помилки у зв'язку з людським фактом тощо. Низка методів адаптації виводять АСР на межу стійкості, що не завжди допустимо [100-102]. Також відсутні критерії пов'язані з тривалістю адаптації та частотою її проведення тощо.

Таким чином, аналіз сучасних традиційних систем управління дозволяє зробити висновок, що найбільш перспективним в області синтезу АСР ССКМ є використання інтелектуальних методів і алгоритмів управління.

Разом з тим, ряд дослідників трактують теорію нечіткого управління як доповнення теорії ймовірності, оперуючи тим, що знання набуті експертом носять ймовірнісний характер, а функцію приналежності можна наближено трактувати як ймовірність того, що даний елемент належить множині [130-133], однак на нашу думку, така інтерпретація, не є математично строгою, оскільки теорія нечітких множин оперує логічними операціями, а не апаратом математичної статистики. Передумовою розробки теорії нечітких множин є принцип несумісності, згідно з яким складність системи і точність, з якою її можна описати традиційними математичними методами, за своєю суттю суперечливі один одному. А ефективність застосування апарату нечіткої логіки базується на ряді теорем, згідно з якими система створена на основі алгоритму нечіткого виведення, при виконанні певних, не надто жорстких умов, є універсальним апроксиматором.

Нечіткий регулятор або контролер може мати кілька параметрів, які налаштовуються для отримання найкращої якості регулювання, проте, переважну частину інформації, необхідної для управління він отримує апіорно. Істотним недоліком НР є те, що набір постуліруємих правил формується експертом-людиною і може виявитися неповним або навіть суперечливим, вид і параметри функції приналежності вибираються також суб'єктивно і можуть виявитися не цілком відображають реальну дійсність. Зазначені обставини призводять до того, що розглядаються нечіткі регулятори в ряді випадків не дозволяють отримати задовільної якості управління. Разом з тим розвиток даного наукового напрямку дає поштовх до появи різних методів, іноді суперечливих, спрямованих на поліпшення динамічних властивостей нечітких систем управління [31,129,133].

Постановка наукової задачі у вигляді нечіткого опису.

В результаті аналізу отримано безліч класів F_i стану об'єкта регулювання (приміщення судна):

$$F = \{\tilde{F}_i\}, \quad i = 1, \dots, r,$$

відображається у вигляді нечіткої множини з відповідними функціями належності μ_i :

$$\tilde{F}_i = \sum \mu_i^F / F_i.$$

Тоді стан об'єкта управління представляється декартовим добутком просторів входу і виходу

$$C \subset X \times Y,$$

де X - безліч вхідних значень параметрів в об'єкт $\{x_i\}$; Y - безліч вихідних значень параметрів з об'єкта $\{y_j\}$; x, y - параметри стану об'єкта. При наявності невизначеності в знаннях про об'єкт його модель відобразимо нечітким рівнянням у співвідношеннях виду:

$$B = A \circ R,$$

де $\tilde{A} = \sum \mu(\alpha) / \alpha$ - нечітка множина входу,

$$\tilde{B} = \sum \mu(\beta) / \beta - \text{нечітка множина виходу,}$$

задані в формі лінгвістичних змінних з потужністю множин, лінгвістичних змінних. $\tilde{A} \subset A \subset X$ è $\tilde{B} \subset B \subset Y$ - нечіткі підмножини $\tilde{A}, \tilde{B}$ включені в чіткі підмножини A, B базових множин X, Y ; $\tilde{A} \subset X, \tilde{B} \subset Y$ - нечіткі підмножини, кінцеві вхідного і вихідного просторів об'єкта моделювання; α, β - елементи терм-множин лінгвістичних змінних; $\mu(\alpha), \mu(\beta)$ - відповідні функції приналежності; $\circ$ - символ максимінної композиції Заде; R - нечітке співвідношення $X \times Y$ в вигляді управляючого правила

“A : ЯКЩО ..., ТО ...,”

На мові функцій приналежності рівняння має вигляд:

$$\mu(\alpha, \beta) = \max_{\alpha} \min_{\beta} \{ \mu(\alpha), \mu(\alpha, \beta) \} \quad (3.1)$$

Знання експертів, виражені у вигляді лінгвістичних правил використовуються для реалізації інтелектуальних (нечітких) регуляторів. Проаналізуємо найбільш рекомендовані методи і операції з реалізації нечітких моделей в нечітких контролерів (НК) або регуляторах (НР) з метою виявлення найбільш значущих для процесу моделювання нечіткої АСР ССКМ.

Алгоритм функціонування нечіткого контролера [87] описується наступною системою рівнянь:

$$\{R_i\}_{i=1}^k = \begin{cases} R_1 : A_1 \circ r_1 = A_1 \circ (A_{11} \rightarrow A_{21}) = B_1 \\ R_2 : A_2 \circ r_2 = A_2 \circ (A_{12} \rightarrow A_{22}) = B_2 \\ \dots \\ R_k : A_k \circ r_k = A_k \circ (A_{1k} \rightarrow A_{2k}) = B_k, \end{cases}$$

$$B = \bigcup_{i=1}^k B_i, \quad z = dfzB, \quad (3.2)$$

де « $\circ$ » - композиція нечітких співвідношень; « $\rightarrow$ » - нечітка імплікація; $B_i (i = \overline{1, k})$ - локальний висновок з правила R_i ; B - загальний висновок з бази правил $\{R_i\}_{i=1}^k$; $A_i = (i = \overline{1, k}) = fuzz(x_i)$; $A_{ji} = fuzz(x_j, x_i)$; $fuzz$ - операція фазифікації; $\bigcup$ - операція об'єднання; dfz - операція дефазифікації. Як видно з (3.2) ключовими елементами, що впливають на ефективність НК, є процедури фазифікації, дефазифікації і операції системи нечіткого виведення [56].

Дисертантом пропонується використання нечітких методів в СППР при налагодженні і адаптації параметрів регуляторів в ССКМ. СППР (Decision Support System, DSS) - комп'ютерна система, метою якої є видача рад особам які приймають рішення (ОПР) в складних виробничих або економічних умовах [21]. Для аналізу і виробу пропозицій при створенні СППР використовують різні наукові підходи: системний аналіз, експертні та нечіткі системи, нейронні мережі тощо. Ряд даних підходів широко використовуються в теорії систем штучного інтелекту. Інтелектуальні системи підтримки прийняття рішень ІСППР - являють собою один з видів прогресивних технологій, актуальні останнім часом у зв'язку з розвитком систем штучного інтелекту. На сьогоднішній день термін «система підтримки прийняття рішень» не знайшов у розробників єдиного загальновизнаного визначення [3]. Автори найбільш точним вважають визначення, що ІСППР - це інформаційна система реалізує теорію штучного інтелекту і об'єднує в собі комплекс програмно-апаратних засобів автоматизації потоків інформації в процесі прийняття рішень, що допомагає особі що приймає рішення (ОПР) в управлінні об'єктом або процесом. Подібні системи успішно використовуються для підготов-

ки рішень в управлінні складними процесами або об'єктами функціонуючими в умовах невизначеності [1].

На мою думку, область використання подібних технологій має величезні перспективи на судах будь-яких типів, тому що сучасне судно є складним нелінійним об'єктом на якому активно впроваджуються інтегровані системи, в комплексі вирішують завдання управління судновими технічними засобами - системи навігації, попередження зіткнень, управління рухом, забезпечення радіозв'язку, безпеки та ін. Незважаючи на великий інтерес до цих технологій і науковим напрацюванням в даній області стосовно суден [9, 10-16], даний напрямок все ще залишається слабо розвиненим, і в багатьох складних підсистемах судна управління здійснюється традиційними методами, в більшості випадків не забезпечуючи належної якості та надійності.

Традиційні підходи в розробці СППР засновані на низці теорій таких як - системний аналіз, теорія ігор, теорія ризику, теорія ймовірності і т.д. Експертні системи (ЕС) - лежать в основі таких СППР мають ряд недоліків пов'язаних з неможливістю враховувати досвід, знання і інтуїцію людини - штурмана, механіка, лоцмана, тобто експерта в даній області.

Останнім часом широке застосування і актуальність в «інтелектуальних» ІСППР отримують нечіткі експертні системи [4,5] які імітують міркування експерта у вигляді словесних або лінгвістичних припущень, що використовують апарат теорії нечітких множин. Наприклад, логіка міркувань лоцмана може бути такою: якщо зустрічний вітер "сильний", то швидкість ходу судна повинна бути «високої», а при «слабкому» вітрі швидкість судна повинна бути «середньої» або «малої» з метою уникнути втрат часу, або в ССКМ якщо температура повітря «висока», то температуру в системах кондиціонування необхідно зробити «нижче» і тому подібне. Це приклади нечіткої логіки - логіки, властивій людському мисленню.

З цих причин можна зробити висновок про те, що в ІСППР багатьох суднових автоматизованих підсистем подібні технології, засновані на нечіткій логіці, будуть дуже актуальні і можуть отримати велике поширення. Вони здатні працювати з якісною інформацією, перетворюючи і обробляючи її в чисельній формі.

Основна суть таких систем полягає в формуванні кількісного рішення на базі продукційних правил. Крім того, на відміну від класичної математики і логіки, в апараті нечіткої логіки є проміжні оцінки, що багато в чому відповідає природним процесам. Проаналізувавши різні варіанти побудови систем управління [15, 24, 90] пропонується наступний вигляд структури ІСППР ССКМ на суднах (рис.3.1)

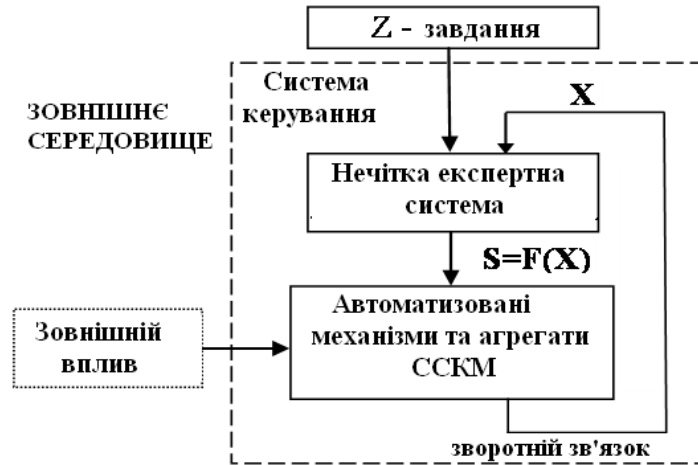


Рис. 3.1. Структурна схема ІСППР ССКМ судна

На цьому малюнку Z - це задана інформація від підсистем судна які входять в комплекс інтелектуального управління з адаптивними нечіткими ЕС (АНЕС). АНЕС в свою чергу виробляє сигнал для ОПР у вигляді ради S_i є функцією бази знань F від контрольованих параметрів X_j які приходять в ходовий місток по зворотному зв'язку. А функцію адаптації в АНЕС виконують нейронні мережі, здатні до самонавчання. Можна відзначити, що проведений аналіз методів інтелектуального управління стосовно до СППР судна дозволяє зробити висновок про перспективність використання нейро-нечіткої логіки для підвищення якості управління судновими автоматизованими системами. Такі інтелектуальні системи володіють властивостями самонавчання і здатністю змінюватися в залежності від обставин.

У ІСППР, на відміну від традиційних методів, наприклад, методу аналізу ієрархій (МАІ), зручно використовувати експертні міркування у вигляді неформальних або словесних побажань. Також ІСППР здатні до самонавчання або адаптації, що важливо в умовах невизначеності, коли вихідними даними не можна встановити точні вагові коефіцієнти [22]. Однак, на мою думку, ІСППР можуть бути

успішно застосовані і в умовах визначеності. Для підтвердження нашого затвердження проведемо порівняльний аналіз МАІ і ІСППР діючої на основі нечіткої експертної системи.

Автором пропонується рішення практичного завдання вибору закону регулювання для типового регулятора при настройці ССКМ на новий режим роботи за допомогою ІССПР. Експерт сформулював два критерії вибору одного з трьох законів (ПІ, ПІД, П - закон) - (А, В, С): відсутність помилки (Е), закид (Е). При цьому, за бажанням ОПР $E > M$ в 3 разів (важливіше). Визначивши значення Е і М і використовуючи МАІ отримаємо наступну ієрархію з ваговими коефіцієнтами (рис. 3.2)

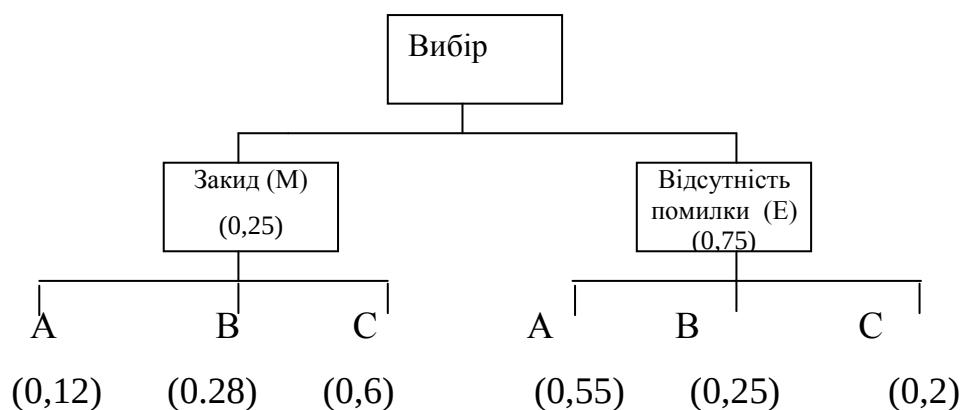


Рис. 3.2. Ієрархія прийняття рішень

Оцінка трьох законів регулювання в АСР заснована на обчисленні комбінованого вагового коефіцієнта для кожного з них:

$$A = 0,25 \times 0,12 + 0,75 \times 0,55 = 0,42$$

$$B = 0,25 \times 0,28 + 0,75 \times 0,25 = 0,26$$

$$C = 0,25 \times 0,6 + 0,75 \times 0,2 = 0,3$$

Результати показують, що закон А (ПІ) отримав максимальну вагу і є оптимальним для вибору ОПР.

Розглянемо рішення цієї задачі за допомогою теорії нечіткої логіки. Ресудження ОПР можна представити у вигляді продукційних правил виду:

ЯКЩО М низьке І Е низька ТО вага закону високий;

ЯКЩО М середнє І Е велика ТО вага закону низький і так далі.

Скориставшись програмою MatLab яка реалізує алгоритм Мамдані [1] і провівши етапи фазифікації і створення бази знань (рис. 3.3), отримаємо наступний результат (рис.3.4)

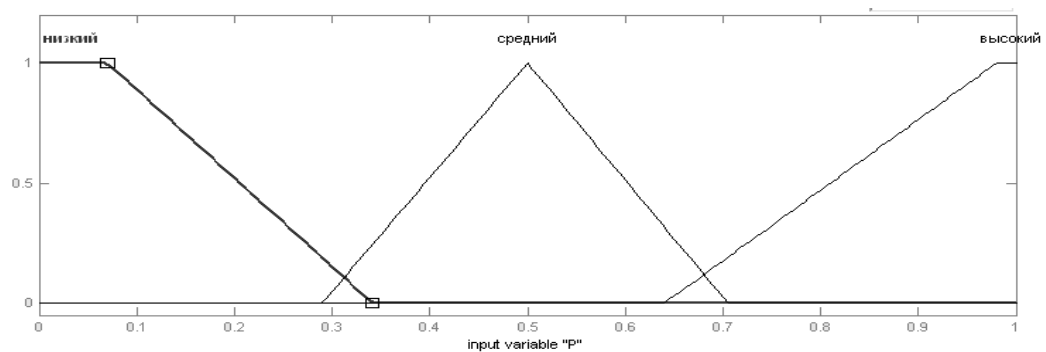


Рис. 3.3. Функції приналежності помилки «Е»

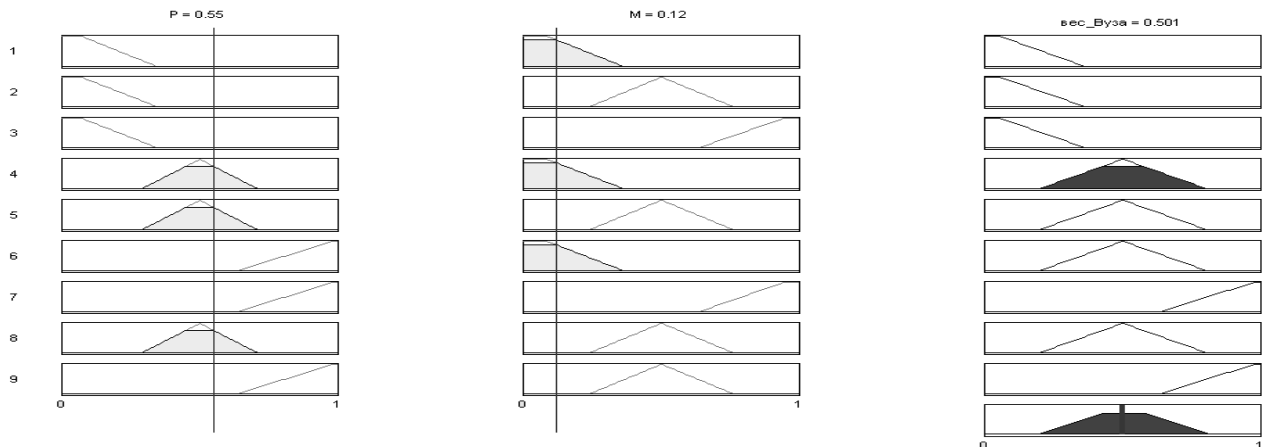


Рис. 3.4. Результат роботи нечіткої системи

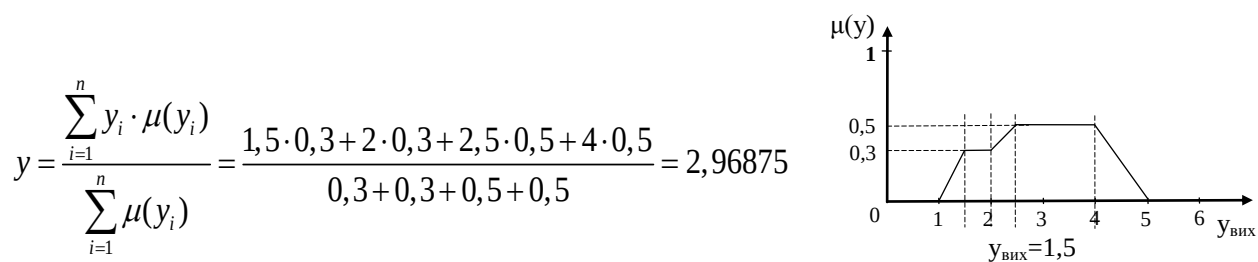
Підставивши вихідні дані (ваги), отримуємо результат аналогічний МАІ, таким чином, апарат нечіткої логіки можна вважати універсальним засобом в ІСППР і маючим перевагу перед традиційними методами в плані врахування думок або інтуїції експертів.

Проведемо порівняльний аналіз методів дефазифікації в системі нечіткого виведення ІСППР з ССКМ. Дефазифікація в системах нечіткого виведення являє собою процедуру або процес знаходження звичайного (не нечіткого) значення для кожної з вихідних лінгвістичних змінних безлічі $W = \{\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_s\}$. Мета дефазифікації полягає в тому, щоб, використовуючи результати акумуляції всіх вихідних лінгвістичних змінних, отримати звичайне кількісне значення (crisp value) кожної

з вихідних змінних, яке може бути використане спеціальними пристроями, які не належать до системи нечіткого виведення.

Часто в процесі доопрацювання нечіткої моделі експерту необхідно скористуватися вибором адекватного методу дефазифікації для отримання бажаного керуючого значення або кінцевого (чіткого) значення відповідно очікуваної мети. Для визначення методу (агрегування) і дефазифікації можна скористатися відомими традиційним методами, проте в низці випадків і ці методи не дають очікуваного результату. Якщо тип функції приналежності, універсум і база правил відповідають думці експерта, то необхідно шукати або обирати метод. Порівняльний аналіз відомих методів, демонструє як їх схожість так і відмінність, тому часто для підтвердження отриманого результату рекомендується скористатися низкою методів.

Метою цього дослідження є порівняльний аналіз традиційних методів дефазифікації і пропозиція нових, раніше не використаних. Існує велика кількість методів дефазифікації [12, 34, 67] використовуваних для корекції або настройки нечіткої моделі управління, зокрема широко відомий метод центру тяжіння для одноточкових множин (рис 3.5).



а також методи лівого і правого модального значення

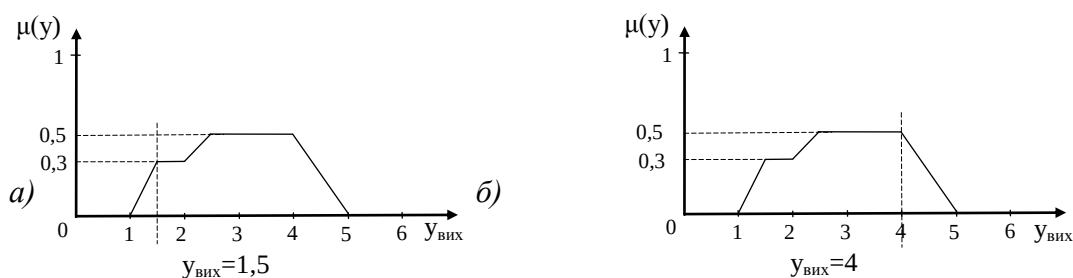


Рис. 3.5. Методи лівого (а) і правого (б) модального значення

Для удосконалення традиційних методів дефазифікації пропонуються нові методи - «модального середнього» і «метод медіан для універсумів» (рис. 3.6).

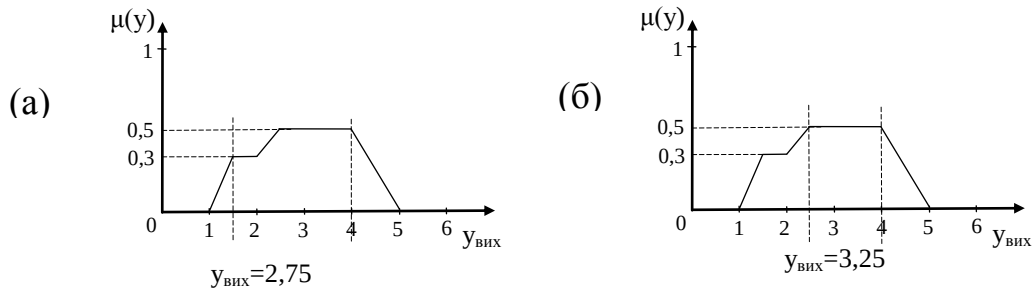


Рис. 3.6. Приклад дефазифікації вихідної лінгвістичної змінної методами модального середнього (а) і медіан для універсумів (б)

$$\text{де (а) } y = \frac{y_{вих}^{лів} + y_{вих}^{прав}}{2} = \frac{1,5 + 4}{2} = 2,75; \text{ (б) } y = \frac{y_{вих}^{сер.лів} + y_{вих}^{сер.прав}}{2} = \frac{2,5 + 4}{2} = 3,25. \quad (3.3)$$

При корекції нечітких моделей пропонується використовувати одночасно кілька методів дефазифікації для отримання найкращого вихідного значення.

3.2 Синтез нечітких регуляторів для системи управління

При розробці нечіткої моделі для АСР ССКМ в середовищі MatLab (рис. 3.7) приймемо в якості допущення два входи - «помилка E», «похідна помилки E'» і вихід - «керуючий вплив». Функції приналежності використовуються Z і S - образного виду [81]. Визначено безлічі і універсум вхідних і вихідних параметрів, нечіткі множини описані за допомогою лінгвістичних змінних (ЛЗ) і виражені аналітичним методом за такими формулами Z і S-образних функцій відповідно:

$$f_{\downarrow}(x, a, b) = \begin{cases} 1, & x \leq a \\ \frac{b-x}{b-a}, & a < x < b \\ 0, & b \leq x \end{cases}, \quad f_{\uparrow}(x, a, b) = \begin{cases} 0, & x \leq a \\ \frac{x-a}{b-a}, & a < x < b \\ 1, & b \leq x \end{cases} \quad (3.4)$$

де a и b – деякі числові параметри, які беруть певні дійсні значення і впорядковані співвідношенням $a > b$. В якості методу дефазифікації обраний метод

центру тяжіння:

$$U = \frac{\sum_{i=1}^n U_i \mu(U_i)}{\sum_{i=1}^n \mu(U_i)} \quad (3.5)$$

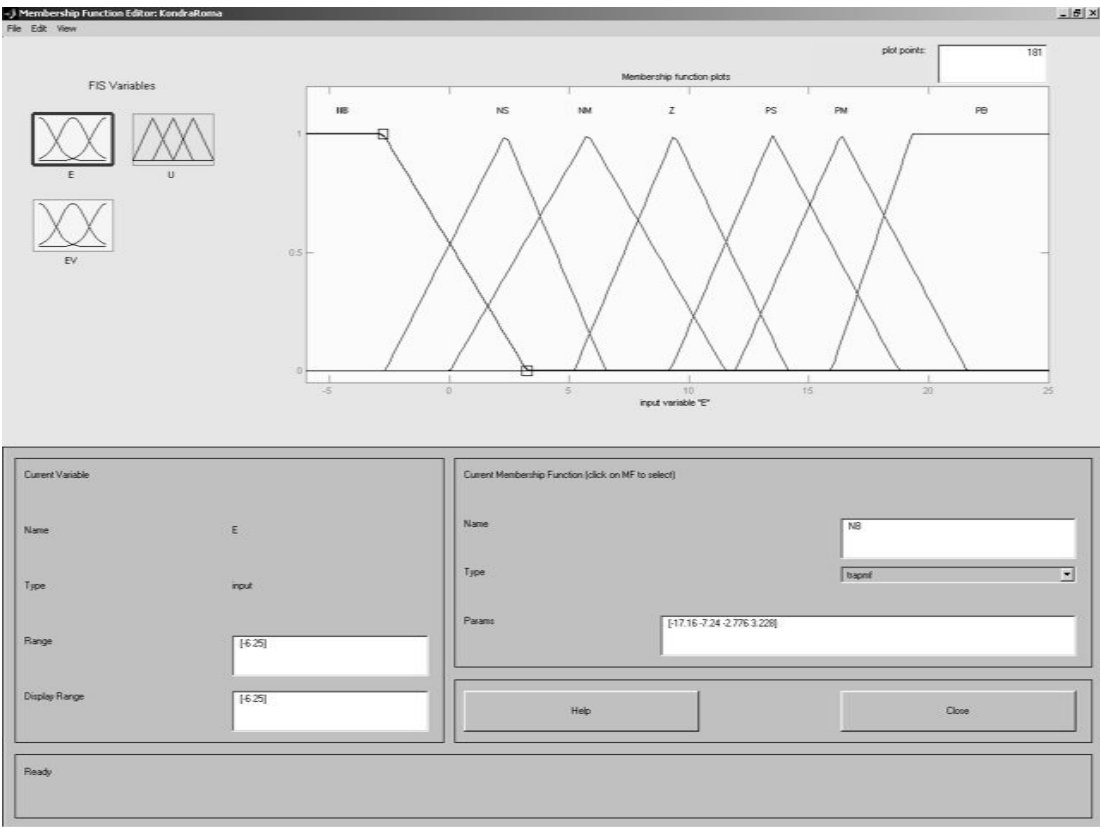


Рис. 3.7. Синтез нечіткої моделі в САПР MatLab (FLT)

База знань, розроблена на підставі експериментальних досліджень і рекомендацій [81] в програмі MatLab, представлена в табл.3.2.

Таблиця 3.2.

База знань нечіткого контролера

Помилка $e(t)$	Похідна помилки, $e'(t)$						
	NB	NS	NM	Z	PM	PS	PB
	$U(t)$ - управління						
NB	NB	NB	NB	OS	Z	PM	PS
NS	NS	NS	NS	NM	PM	PM	PS
NM	NS	NM	NM	Z	Z	PM	PS
Z	NS	NM	NM	Z	PM	PM	PS
PM	NM	NM	Z	Z	PM	PM	PS
PS	NM	NM	Z	PM	PS	PS	PS
PB	NS	NM	Z	PS	PS	PB	PB

Кожен запис відповідає своєму нечіткому правилу. Наприклад, якщо різниця температур (помилка) негативно середня (NS), а швидкість зміни позитивно велика (PB), то керуючий вплив у вигляді зміни положення клапана має бути позитивно середньої (PS) тощо. ССКМ з нечіткою логікою працює за наступним принципом: сигнали від датчиків будуть фазифіковані, оброблені, дефазифіковані, і отримані дані у вигляді сигналів надійдуть на двигун клапана, положення якого (а, отже, і продуктивність) будуть змінюватися відповідно до значення функції приналежності і алгоритму Мамдані (рис.3.8).

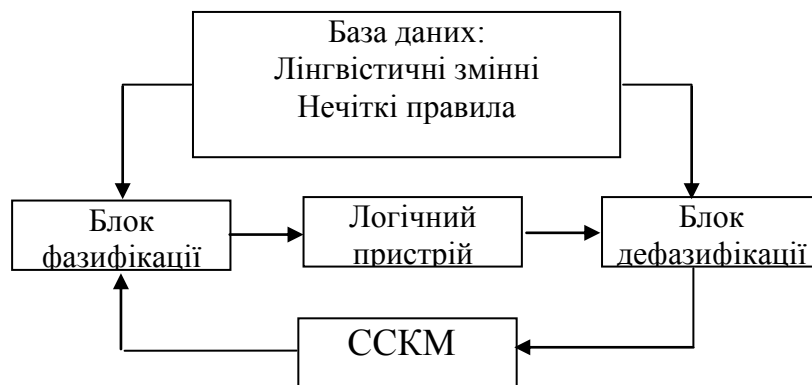


Рис. 3.8. Блок схема контролера що реалізує нечітку логіку Мамдані

З аналізу виду перехідних характеристик які отримані комп'ютерними експериментами, можна зробити висновок, що АСР діюча на основі нечіткої логіки більш ефективна. А класичний метод згасаючих коливань показав в даному застосуванні більший час регулювання, закид, а також наявність значних коливань, що призводять до перевитрати енергоресурсів, в порівнянні з нечіткою АСР. Однак, поставлений експеримент показав, що настройка нечіткого регулятора досить складний процес, який для отримання очікуваних переваг потребує удосконалення алгоритмів і як можна більшої кількості експертних знань. Але навіть при мінімальному заповненні бази знань (три правила) регулятор, що працює по непевному алгоритму, показав при низці режимів роботи АСР з параметричними збуреннями що значно змінюються, особливо зовнішніми, велику гнучкість (менший час регулювання, робастність) ніж класичний регулятор. Виходячи з цього, можна зробити рекомендації щодо подальшого удосконалення нечітких АСР ССКМ, а

саме пошук і апробацію більш ефективних алгоритмів та використання в базах знань нечітких регуляторів класичних методів з експертним або адаптивним підстроюванням значень параметрів. Очевидно, що експлуатація ССКМ із застосуванням нечітких логічних регуляторів забезпечить ряд переваг, таких як:

- зміну температури відповідно до санітарних норм (відсутність різкого перепаду, підтримку допустимої швидкості потоку повітря тощо;
- установку необхідної холодопродуктивності;
- вибір режиму роботи і уставку температури, виходячи з температури і вологості;
- вибір оптимального (комфортного) розподілу і інтенсивності потоку повітря;
- мінімальний час виходу на заданий режим роботи.

Вищенаведені переваги використання запропонованого автором методу регулювання ССКМ в кінцевому підсумку призведуть до самого вагомого і актуального досягнення даного застосування в технологічному процесі – зменшенню витрат електроенергії за попередніми оцінками на 20-40%.

3.3 Розробка програмного забезпечення з використанням нейро-нечітких алгоритмів для адаптивної інтелектуальної системи

У зв'язку зі змінами кліматичних зон знаходження судна і різних вимог що залежать від його типу і класу, все більш актуальним стає врахування індивідуальних характеристик людини при формуванні значень комфортних умов (КУ) [6, 12-23]. В роботі, в якості параметрів для забезпечення КУ, були обрані температура повітря всередині приміщення і відносна вологість, як два основних параметри, зміна яких істотно впливає на тепловий комфорт людини знаходить всередині приміщення. Вирішувалося завдання визначення параметрів індивідуального відчуття комфорту з урахуванням ряду особливостей, таких як режим людської діяльності, вид одягу, вік, кліматичний період. Слід зазначити, що всі ці особливості мають певну "нечіткість". Так, наприклад, "режим людської діяльності", може бути оцінений кількістю енергії, що витрачається, однак, наприклад, при фізичній праці, неможливо з точністю сказати, що людиною витрачається 150 Вт

енергії [6, 8]. У результаті чого в даній роботі, для вибору значень температури і відносної вологості повітря, при забезпеченні КУ в жиллому приміщенні, розроблено нечітку модель. Дана модель складається з чотирьох вхідних лінгвістичних змінних (d , o , v , k) і двох вихідних - (t , h), де d - режим людської діяльності, o - вид одягу, v зовнішня температура, k - вологість зовнішнього повітря, t - температура всередині приміщення і h відносна вологість в приміщенні судна (рис. 3.9).

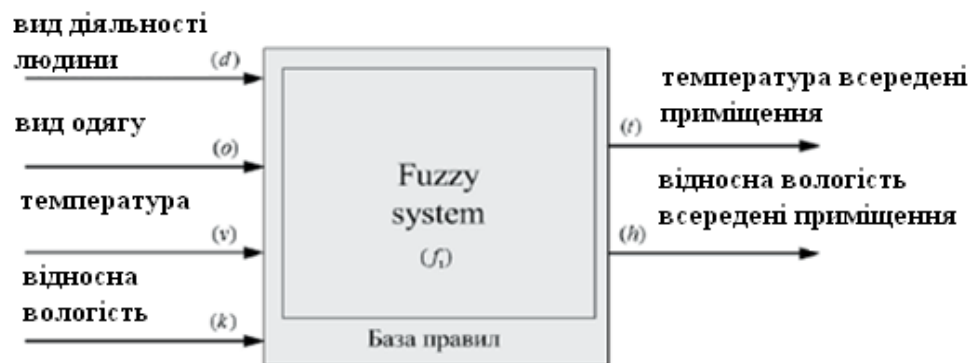


Рис. 3.9. Нечітка модель для визначення комфортних параметрів повітряного середовища в приміщеннях судна

На першому етапі механізму нечіткого логічного висновку необхідно виконати фазифікацію, привести значення до нечіткості, для чого була проведена експертна оцінка вхідних змінних і визначено по три лінгвістичних терма (ЛТ) для кожної. Автором був проведений відповідний аналіз. У практиці проектування систем кондиціювання, для того, щоб визначити кількість тепла, що виділяється організмом людини при різних видах діяльності, вводиться спеціальний показник, який отримав назву "Met" (від "метаболізм" - виділення тепла всередині організму). При спокійному (нейтральному) стані людини він дорівнює величині 58 Вт/м^2 . У табл. 3.2 наведені показники "Met" при основних видах діяльності, їх використовують при оцінці кількості тепла і при оцінці умов комфортного стану. На основі значень з табл. 3. 3 були визначені значення для лінгвістичних термів і відповідна функція приналежності (рис. 3.10).

Таблиця. 3.3.

Показники «Met» при різних видах діяльності

Вид діяльності	Вт/м ²	«Met»
«Сон»	10-60	0,1-0,8
«Легка праця»	50-150	0,7-1,7
«Важка праця»	135-270	1,5-3,3

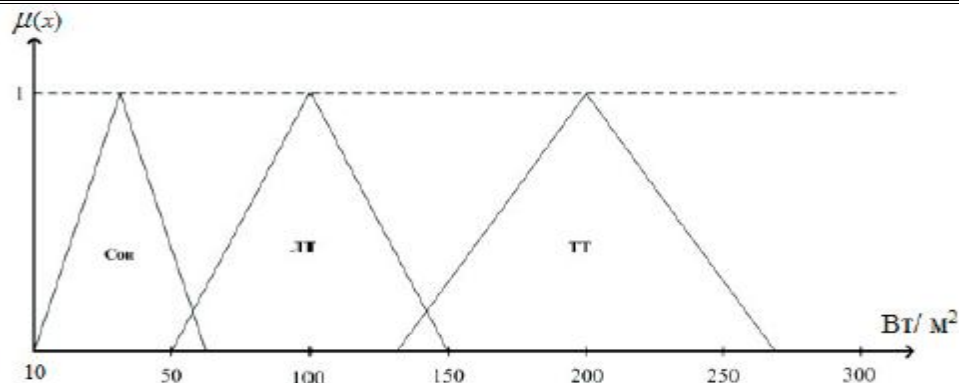


Рис. 3.10. Функції приналежності ЛП «вид діяльності»

Також дисертантом проведено етап фазифікації вхідних параметрів - температури зовнішнього повітря і його вологості (рис. 3.11-3.12)

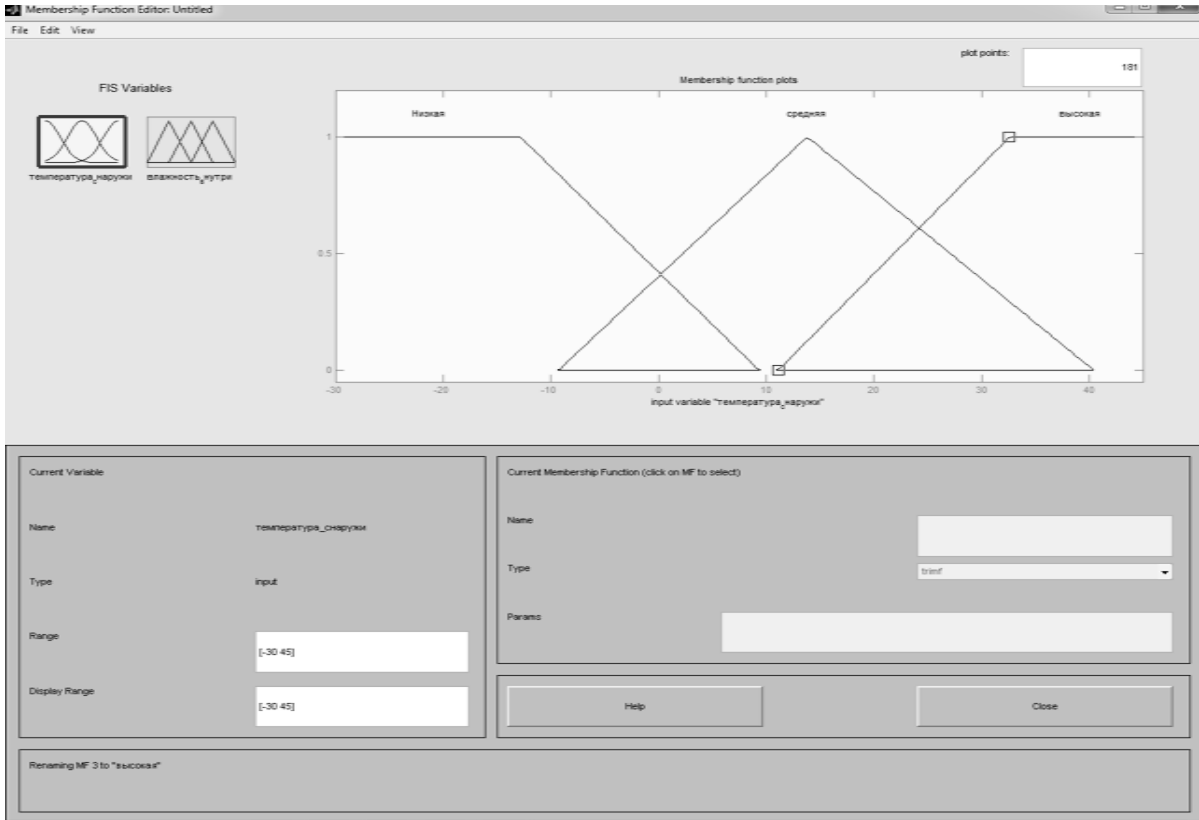


Рис. 3.11. Функції приналежності ЛП «зовнішня температура»

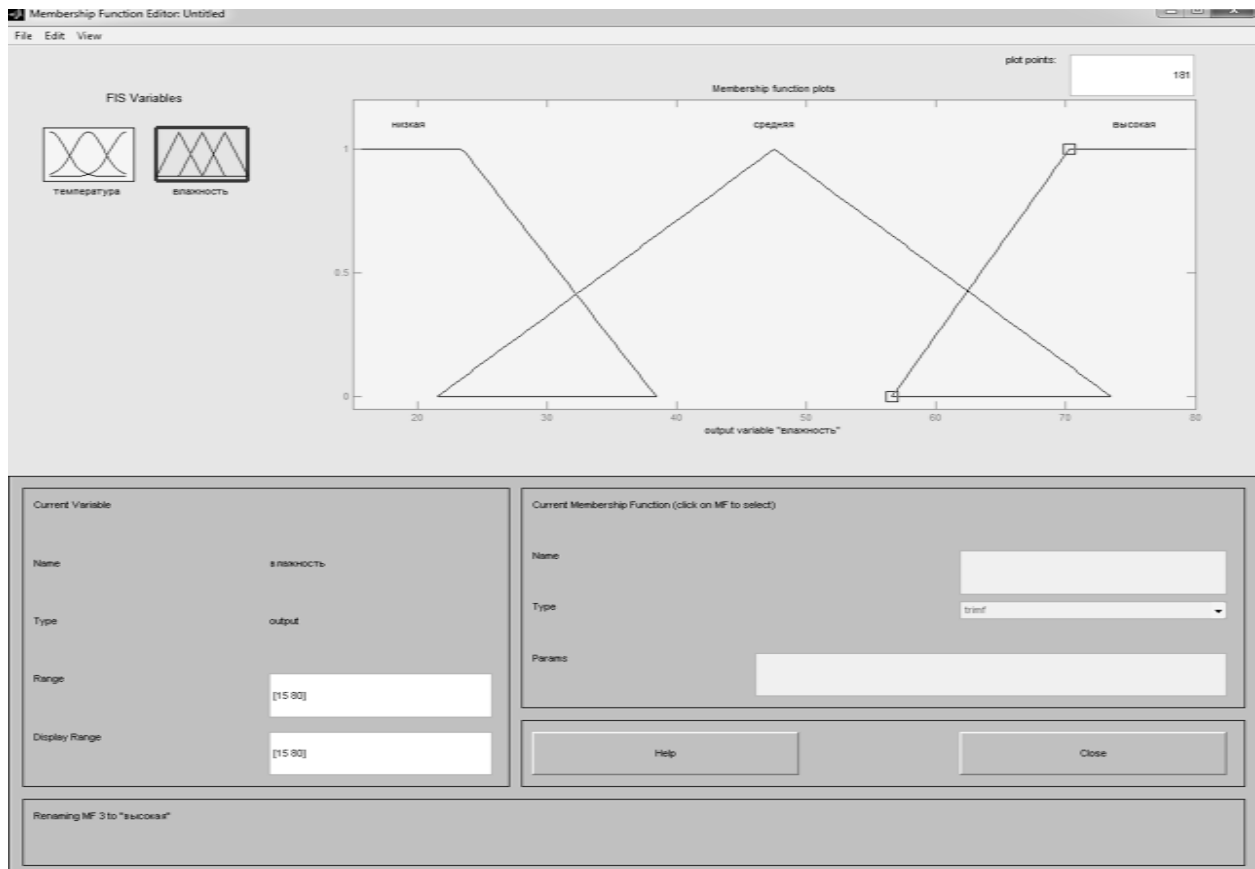


Рис. 3.12. Функції приналежності ЛП «вологість зовнішнього повітря»

Так як алгоритм Мамдані найбільш поширений спосіб логічного висновку в нечітких системах, в ньому використовується мінімаксна композиція нечітких множин. База правил сформована на основі нечітких висловлювань у формі "Якщо - То" і функції приналежності для відповідних лінгвістичних термів. База правил має 21 правило виду:

R_1 : ЯКЩО x_1 це A_{11} ... І ... x_k це A_{1n} , ТО y_j це B_1

R_i : ЯКЩО x_1 це A_{i1} ... І ... x_k це A_{in} , ТО y_j це B_i

R_m : ЯКЩО x_1 це A_{m1} ... І ... x_k це A_{mn} , ТО y_j це B_m ,

де x_k , $k = 1..n$ - вхідні змінні; y_j , $j = 1..n$ - вихідні змінні; A_{ik} - задані нечіткі множини з функціями належності.

Результатом нечіткого висновку є чітке значення змінних i на основі заданих чітких значень X_k , $k = 1 \dots n$.

Далі по нечіткій базі знань був виконаний логічний висновок по алгоритму Мамдані:

$$\bigcup_{p=1}^{k_j} \left(\bigcup_{i=1}^n x_i = a_{i,jp} \text{ свесом } w_{jp} \right) \rightarrow y_n = d_j, \quad j = \overline{1, m}, \quad (3,6)$$

в якому значення вхідних і вихідних змінних задані нечіткими множинами. Введемо наступні позначення: $\mu_{jp}(x_i)$ – функція приналежності входу x_i нечіткому терму $a_{i,jp}$, тобто

$$a_{i,jp} = \int_{\underline{x_i}}^{\overline{x_i}} \frac{\mu_{jp}(x_i)}{x_i}, \quad x_i \in [\underline{x_i}, \overline{x_i}], \quad (3,7)$$

де $\mu_{dj}(y_i)$ – функція приналежності входу y_i нечіткому терму, тобто

$$d_j = \int_{\underline{y_i}}^{\overline{y_i}} \frac{\mu_{dj}(y_i)}{y_i}, \quad y_i \in [\underline{y_i}, \overline{y_i}]. \quad (3,8)$$

Ступені приналежності вхідного вектора $x^* = (d, o, v, k)$ нечітким термам d_j з бази знань розраховуються наступним чином:

$$\mu_{dj}(x^*) = \bigcup_{p=1, k_j} w_{jp} \cdot \bigcup_{i=1, n} [\mu_{dj}(x_i^*)], \quad (3,9)$$

де $\bigcup(\cap)$ – операція з s-норми (t-норми), тобто з множини реалізацій логічної операції АБО (І).

В результаті чого значення виходів t, h , відповідні вхідному вектору x^* , визначаються в результаті останнього етапу, а саме дефазифікації за методом центра ваги:

$$y = \frac{\int_{\underline{y}}^{\overline{y}} y \cdot \mu_{\tilde{y}}(y) dy}{\int_{\underline{y}}^{\overline{y}} \mu_{\tilde{y}}(y) dy}. \quad (3,10)$$

Після проведення дефазифікації була отримана нечітка модель для вибору комфортних умов всередині жилого приміщення на підставі врахування індивідуальних характеристик людини. СППР для оператора ССКМ або АСР діюча на основі нечіткого виведення представлена в табл. 3.4.

Таблиця 3.4.

Приклад вибірки варіантів значень індивідуальних параметрів

Вхідні нечіткі змінні				Вихідні нечіткі змінні	
Режим роботи Вт	Вид одягу мКВт	Вік (років)	клімат зовнішній °C	температура °C	відносна вологість %
35,8	0,0714	17,5	8,75	25,3	43,6
35,8	0,0714	17,5	30,2	19,5	56,8
42,1	0,183	31,6	32,3	19,4	56,9
103	0,0774	17	20,8	22	50,5
90,5	0,0654	21,7	31,5	19,9	55,8
75,8	0,103	35,8	9,01	25,3	43,7
75,8	0,103	64,5	10,3	25,4	44
82,1	0,124	57,2	31,2	22	50,5
94,7	0,178	61,9	5,88	22,1	50,5
94,7	0,178	64	29,9	19,4	57
202	0,0579	33,7	7,71	25,3	43,7
202	0,0579	33,7	31,2	19,5	56,6
107	0,0714	18	31,5	19,5	56,8
107	0,0714	33,2	19,5	22,1	50,5
107	0,0699	65,6	5,88	25,5	43,2
171	0,178	38,4	9,01	25,3	43,7
171	0,178	31,6	31	19,4	56,9

Приклад роботи СППР або БЗ нечіткого адаптера представлена на рис. 3.13

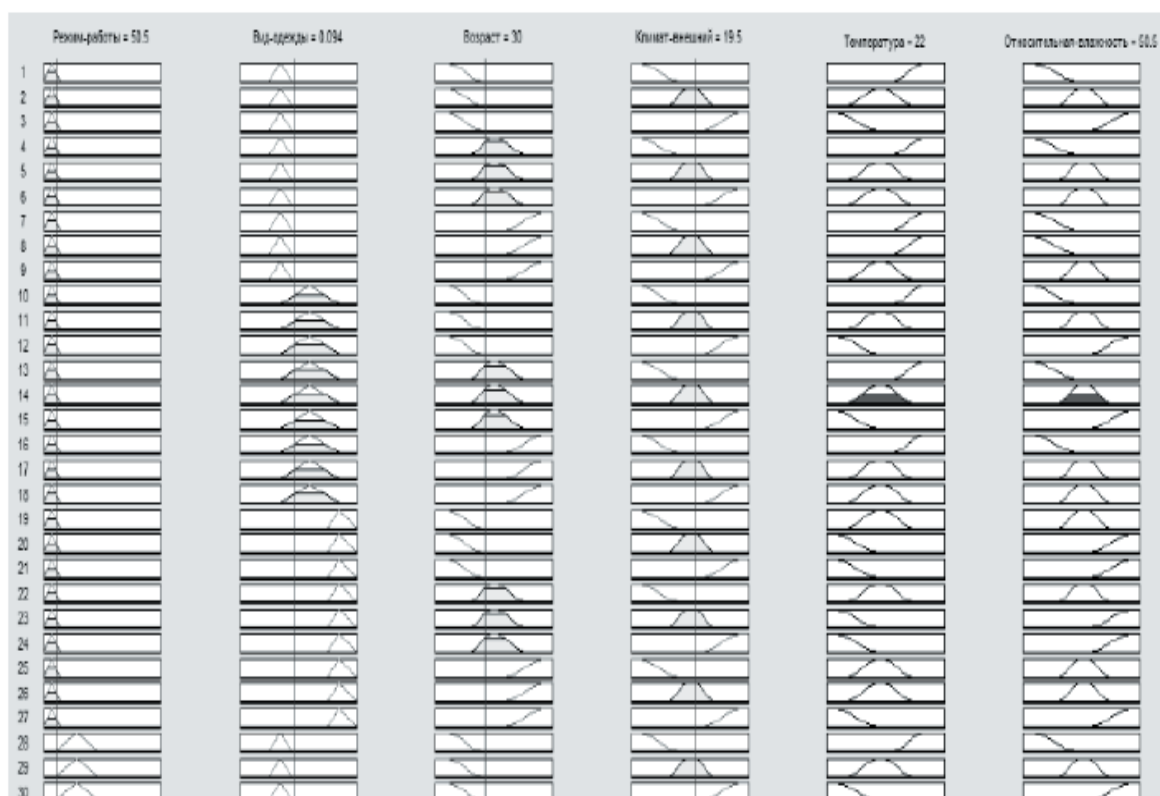


Рис. 3.13. Програмний модуль для визначення чітких значень температури і відносної вологості на основі нечіткої моделі

Результати роботи програми показують, що динаміка змін температури коливається в межах $6\text{ }^{\circ}\text{C}$ при комфортній відносній вологості від 40 до 60%. А так як зміна температури навіть на $2\text{ }^{\circ}\text{C}$ вимагає чималих витрат електроенергії, то знаючи необхідні параметри можна не тільки підвищити рівень комфортності в приміщенні, але і значно економити електроенергію. Рівень коливань теж залежить абсолютно від різних комбінацій значень індивідуальних параметрів, то це підтверджує актуальність використання розробленої нечіткої моделі. Застосування розробленої нечіткої моделі на початкових етапах проектування дозволяє значно підвищити рівень якості проектних робіт, а саме формування технічної документації об'єктів проектування. Підвищення якості обумовлено повнотою інформації про оцінку, вибір і підтримку КУ в жилу приміщенні, як одного з головних етапів при проектуванні систем кондиціонування і зволоження повітря в населених приміщеннях.

3.4 Розробка нечіткої експертної інтелектуальної моделі

Метою дослідження є розробка нечіткої експертної системи яка реалізує алгоритм Такагі-Сугено [149] і призначеної для визначення оптимальних параметрів ПІ-регулятора в ССКМ. На рис. 3.14 представлена адаптивна автоматизована система регулювання (ААСР ССКМ).

У завдання блоку ідентифікації об'єкта (БІО) входить спостереження і оцінка значень параметрів об'єкта регулювання. Нечітка експертна система (НЕС) отримуючи дані значення, самостійно проводить розрахунок нових налаштувань регулятора ускладнюючи його алгоритм (П, ПІ, ПІД) і здійснює автонастройку. Наявність НЕС дозволить стабілізувати процес регулювання без участі оператора і зупинки обладнання. Блок ідентифікації проводить пасивну ідентифікацію об'єкта, який функціонує в умовах невизначеності.

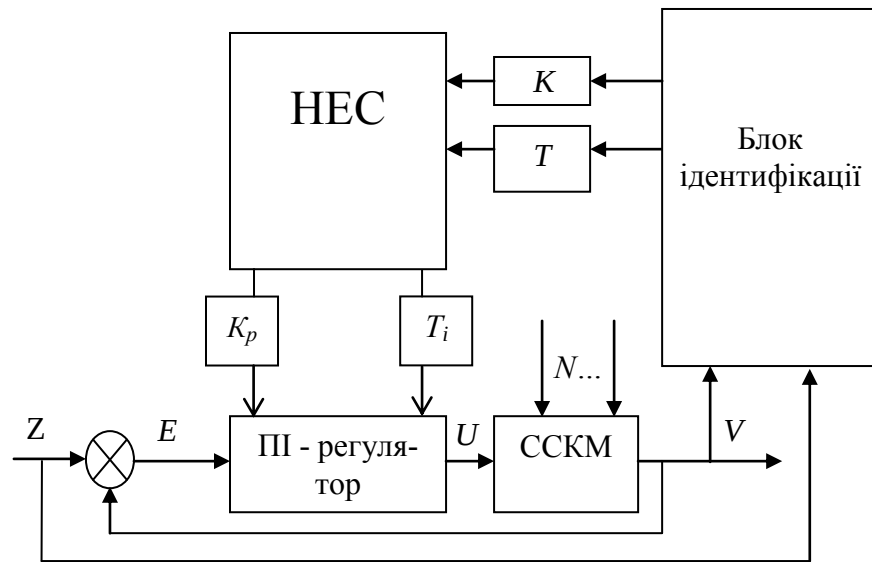


Рис. 3.14. Структура адаптивного нечіткого ПІ – регулятора з об'єктом управління. E – помилка, K – коефіцієнт підсилення, T – постійна часу об'єкта, τ – запізнення, Z – завдання, V – вихідне значення, N – збурення, U – управляючий вплив, K_p, T_i – настройки ПІ – регулятора.

Відомо, що в складних і динамічних системах в ряді ситуацій визначення властивостей об'єкта або виділення його ключових ознак може виробляти експерт-наладчик АСР ССКМ. Але у випадку застосування системи на суднах, особливо в умовах навігації, відповідальний за дане обладнання моряк має бути по максимуму обмежений від ручного налаштування складної апаратури. Тому у комплексі автоматизації ССКМ слід застосовувати СППР. В них на мою думку доцільно використовувати апарат нечіткої логіки. В такому випадку експерту зручніше формалізувати свою думку у вигляді міркувань: запізнювання середнє, коефіцієнт посилення високий і тощо. А для врахування думки експерта, значення параметрів об'єкта повинні бути фазифіковані. Наприклад, постійна часу T , коефіцієнт посилення K , лежать в діапазонах (малі (М), середні (S), великі (В)). Наприклад, знаючи розміри приміщення, температуру зовнішнього повітря і інші властивості об'єкта, експерт може стверджувати про великий інерційності (T) і значному коефіцієнті посилення об'єкта (K) тощо.

Розробка нечіткої експертної системи для СППР наладчика ССКМ

Принцип дії алгоритм Такагі-Сугено детально проаналізовано в роботі [120] і полягає в розгляді правил продукції виду **ЯКЩО** TO або (IF ... THEN) тільки по

одній нечіткості. Тобто застосовувані в ньому правила нечіткі тільки в частині IF, тоді як в THEN присутні функціональні залежності:

$$R^{(1)} : \text{IF } (x_1 \text{ є } A_1^1 \text{ AND } x_2 \text{ є } A_2^1 \dots \text{ AND } x_n \text{ є } A_n^1) \text{ THEN } y_1 = f^{(1)}(x_1, x_2, \dots, x_n),$$

$$R^{(N)} : \text{IF } (x_1 \text{ є } A_1^N \text{ AND } x_2 \text{ є } A_2^N \dots \text{ AND } x_n \text{ є } A_n^N) \text{ THEN } y_N = f^{(N)}(x_1, x_2, \dots, x_n).$$

де A_n -терм-множини. Припустимо, що на вхід НЕС подається сигнал $\bar{x} = (\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$, який є вектором значень параметрів об'єкта визначених БІО, тобто. $\bar{x} = f(T_i, K_k, \tau_j)$. Визначимо вихідний сигнал НЕС $\bar{y} = f(K_{pi}, T_{ij}, K_{dn})$. Для правила $R^{(1)}$ розрахуємо:

$$\begin{cases} \mu_{A_1^1}(\bar{x}_1), \mu_{A_2^1}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_n^1}(\bar{x}_n), \\ \min(\mu_{A_1^1}(\bar{x}_1), \mu_{A_2^1}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_n^1}(\bar{x}_n)), \\ w^1 = \text{або} \\ \mu_{A_1^1}(\bar{x}_1), \mu_{A_2^1}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_n^1}(\bar{x}_n), \end{cases}$$

На наступному етапі розраховується $\bar{y}_1 = f^{(1)}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n)$.

Розглянемо розрахунки для інших правил $R^{(k)}$, $k=2, \dots, N$. Для правила $R^{(N)}$ отримаємо:

$$\begin{cases} \mu_{A_1^N}(\bar{x}_1), \mu_{A_2^N}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_n^N}(\bar{x}_n), \\ \min(\mu_{A_1^N}(\bar{x}_1), \mu_{A_2^N}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_n^N}(\bar{x}_n)), \\ w^N = \text{або} \\ \mu_{A_1^N}(\bar{x}_1), \mu_{A_2^N}(\bar{x}_2), \dots, \mu_{A_n^N}(\bar{x}_n), \\ \bar{y}_N = f^{(N)}(\bar{x}_1, \bar{x}_2, \dots, \bar{x}_n). \end{cases} \quad (3.11)$$

Вихідний сигнал НЕС Такагі-Сугено являє собою нормалізовану зважену суму окремих виходів $\bar{y}_1, \dots, \bar{y}_N$. тобто

$$\bar{y} = \frac{\sum_{k=1}^N w^k \bar{y}_k}{\sum_{k=1}^N w^k}$$

В лінійному випадку базу правил НЕС запишемо у вигляді:

$R^{(k)} : IF(x_1 \text{ є } A_1^k \text{ AND } x_2 \text{ є } A_2^k \dots \text{ AND } x_n \text{ є } A_n^k)$ де c_n – коефіцієнти рівняння.
 THEN $y_k = c_0^{(k)} + c_1^{(k)}x_1 + \dots + c_n^{(k)}x_n$

Припустимо, що у об'єкта в ході функціонування, відбувається зміна значень параметрів K , T , τ на деякому діапазоні. І для забезпечення прийнятних показників якості необхідна перенастройка регулятора. Наладчик АСР при неможливості точного вимірювання всіх параметрів об'єкта проведе розрахунок параметрів регулятора виходячи зі свого досвіду, орієнтуючись на значення вихідної величини температури повітря. Як приклад розглянемо НЕС з двома правилами, що моделюють міркування експерта - наладчика АСР ССКВ.

$R^{(1)} : \text{ЯКЩО } (T \in \text{мале} \text{ I } K \in \text{мале} \text{ I } \tau \in \text{мале}) \text{ ТО } K_{p1} = 0,6/K(\tau/T), T_{i1} = 0,6T$,
 $R^{(2)} : \text{ЯКЩО } (T \in \text{середнє} \text{ I } K \in \text{високе} \text{ I } \tau \in \text{середнє}) \text{ ТО } K_{p2} = 0,7/K(\tau/T), T_{i2} = \tau + 0,7T$. Розрахунок налаштувань ПІ - регулятора здійснюється за формульним методом з урахуванням рекомендацій [151].

Визначимо значення вихідних налаштувань ПІ-регулятора для довільних значень $T = 10$ с, $K = 2,5$; $\tau = 4$ с.

З урахуванням функцій приналежності, вигляд яких взято з рекомендацій [111], отримуємо (рис. 3.15-3.16).

Фазифікації вхідних параметрів:

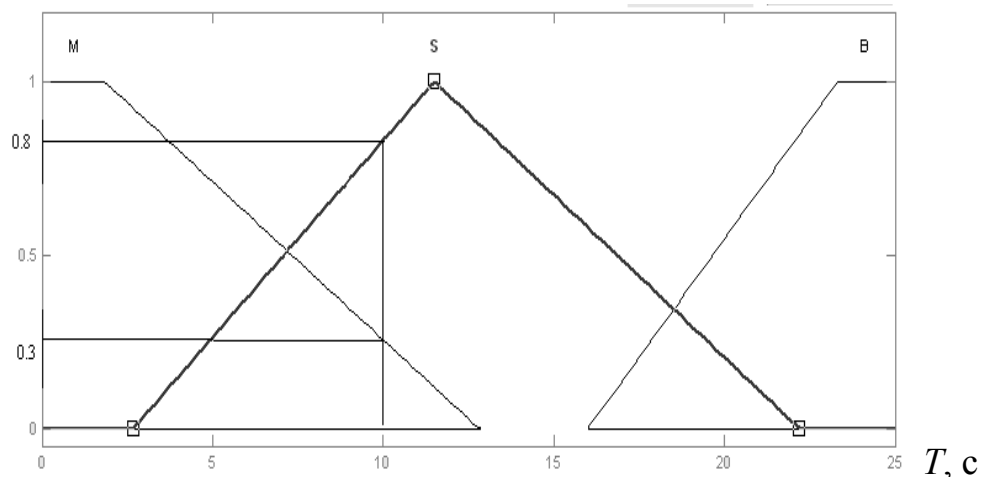


Рис. 3.15. Функції приналежності лінгвістичної змінної (ЛП) «постійна часу»

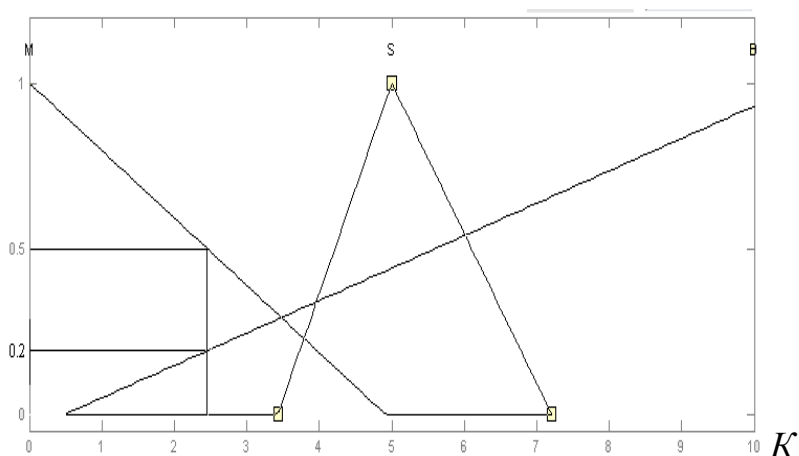


Рис. 3.16. Функції приналежності ЛП «коефіцієнт посилення»

Ступені істинності по кожному правилу складуть:

$$R^{(1)} : \mu_{T1}^1(10) = 0,3; \mu_{K1}^1(2,5) = 0,5; \mu_{\tau 1}^1(4) = 0,4,$$

$$R^{(2)} : \mu_{T1}^2(10) = 0,8; \mu_{K1}^2(2,5) = 0,2; \mu_{\tau 1}^2(4) = 0,6.$$

З урахуванням того, що зважені значення ступенів істинності w^k ($k=1,2$) розраховується за (3.11), отримаємо $w^1 = \min(0,3; 0,5; 0,4) = 0,4$; $w^2 = \min(0,8; 0,2; 0,6) = 0,2$.

Також згідно (3) і $R^{(1, 2)}$, $K_p^1 = f(10; 2,5; 4) = 0,6$; $T_i^1 = f(10) = 6$; $K_p^2 = f(10; 2,5; 4) = 0,7$; $T_i^2 = f(10) = 11$. З урахуванням (3.4) адаптивні значення налаштувань ПІ - регулятора складуть $K_p = 0,63$; $T_i = 8,14$. Таким чином, можна вказати, що представлена модель є одним з варіантів нечіткого ПІ - регулятора.

Комп'ютерний експеримент. Для перевірки ефективності нечітких адаптивних і типових формульних методів налаштувань, за допомогою програми MatLab (Simulink) [80] проводиться комп'ютерний експеримент (рис. 3.17). Щоб отримати установки для типового регулятора ПІ-1 розраховані по $R^{(1)}$ й складають $K_p = 0,6$, $T_i = 6$. Перехідні процеси регулювання представлені на рис. 3.18.

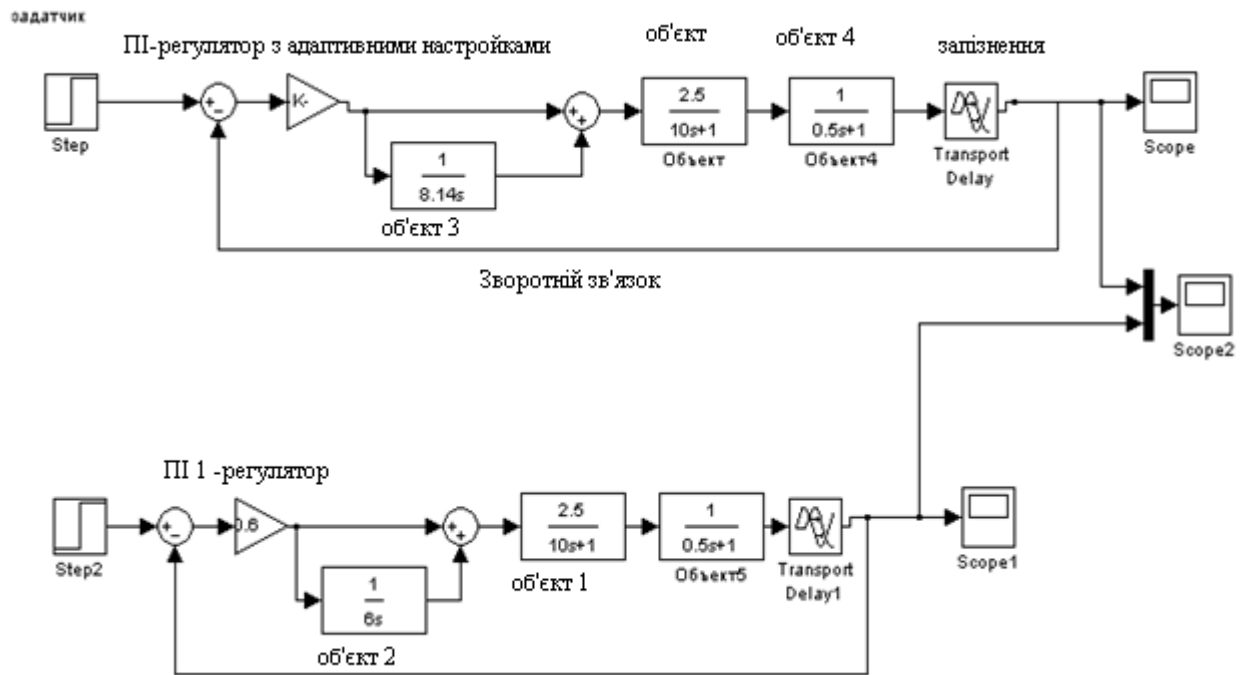


Рис. 3.17. АСР з ПІ – регулятором і об'єктом першого порядку з запізненням по каналу завдання

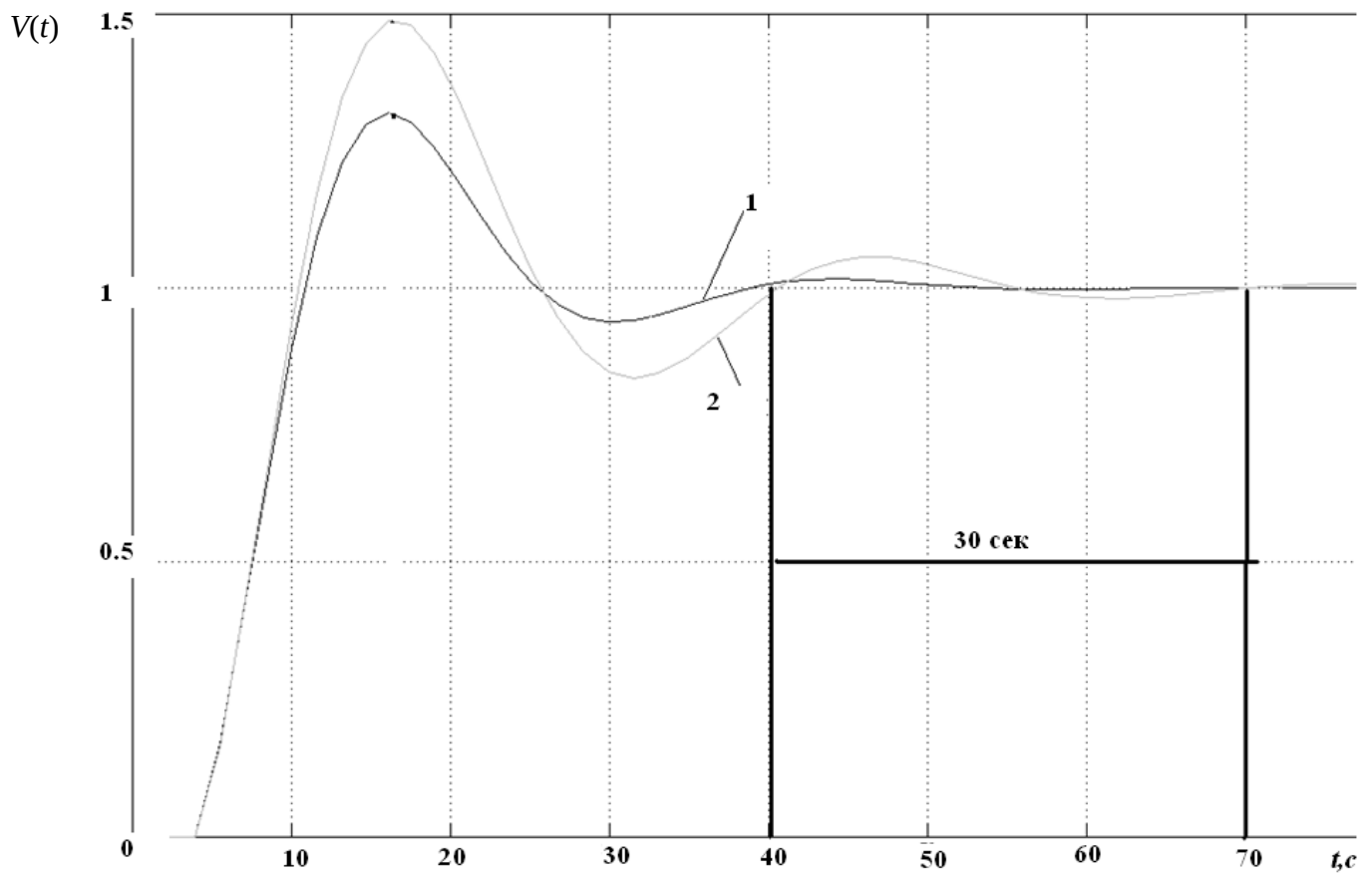


Рис. 3.18. Перехідні процеси: 1 – метод нечітких адаптивних настройок, 2 – формульних по каналу завдання (одиничний стрибок)

Як видно з аналізу рис. 3.18, адаптивні настройки дозволяють зменшити час регулювання на 30 секунд в порівнянні з табличними, що в виробничих умовах сприяє економії енергоресурсів при роботі виконавчих механізмів. Також перерегулювання при використанні нечіткого і формульного підходів становить відповідно $g^H = 23\%$, $g^F = 33,3\%$. Таким чином, використання нечіткої АСР є виправданим і економічно вигідним умовою підвищення ефективності суднової енергетичної установки в цілому.

3.5 Висновки за третім розділом

1. Розроблено програмне забезпечення для налаштування ССКМ інтелектуальної структури при будь-яких режимах функціонування.

2. Розроблено методики, алгоритми та програмні модулі для настройки, дослідження і проектування ССКМ, що дозволяє здійснити:

- розрахунок базових параметрів регуляторів ССКМ;
- дослідження та корекцію перехідних процесів ССКМ;
- дослідження та поліпшення показників якості ССКМ.
- дослідження ергатичних та енергетичних параметрів ССКМ.

3. Розроблене програмне забезпечення дозволяє виконати необхідний комплекс розрахунків, при цьому суттєво скоротити часові витрати, в порівнянні з використанням існуючих САПР для аналогічних досліджень ССКМ.

4. Розроблене програмне забезпечення може бути інтегровано до складу більшості САПР для дослідження ССКМ.

З аналізу виду експериментальних перехідних характеристик АСР ССКМ, можна зробити висновок, що запропонована експертна АСР діюча на основі нечіткої логіки більш ефективна в порівнянні з традиційними. Класичні методи, наприклад, метод згасаючих коливань показав більший час регулювання, занедбаність, а також наявність значних коливань, що призводять до перевитрати енергоресурсів, в порівнянні з нечіткою АСР. Адаптивні нечіткі настройки в СППР дозволяють зменшити час регулювання в діапазоні від 30 до 60 секунд в порівнянні

з табличними, що в виробничих умовах сприяє економії енергоресурсів при роботі виконавчих механізмів. Можна відзначити, що використання нечіткого алгоритму може бути застосовано і для автонастройок ПД - регуляторів. Таким чином, спільне використання табличного і нечіткого наукових підходів при розробці адаптивних АСР дозволить враховувати досвід і знання фахівців - наладчиків, а також спростити модернізацію типових систем регулювання на сучасних суднах. Також запропонована нечітка експертна інтелектуальна модель визначення рівня комфортності для членів екіпажу та пасажирів судна і враховує індивідуальні особливості (вид роботи, одяг і тощо) дозволяє досягти високого рівня самопочуття людей і зниження захворюваності членів екіпажу.

РОЗДІЛ 4.

РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ МОНІТОРИНГУ ТА ДІАГНОСТИКИ РОБОТИ СИСТЕМИ

Поставлено завдання розробити програмне забезпечення для ССКМ, яке дозволяє провести необхідні дослідження і встановити ряд властивостей регуляторів, розмістити їх за принципами модульної структури з N каналів з різними принципами регулювання за для покращення характеристик при будь-якому режимі функціонування.

У загальному випадку при налаштуванні, дослідженні та проектуванні регуляторів модульної структури, з різноманітним принципом регулювання, виникають наступні завдання:

1. Дослідження перехідних процесів - часових діаграм регуляторів у вхідних і вихідних колах ССКМ.

2. Дослідження показників якості: абсолютних пульсацій на вході і виході; коефіцієнтів пульсацій вхідних і вихідних; коефіцієнтів згладжування; коефіцієнтів згладжування модульної структури.

3. Дослідження залежностей показників якості від кількості N регуляторів;

4. Дослідження енергетичних параметрів (потужності втрат, ККД);

Дослідження часових діаграм дозволяє виявити особливості перехідних процесів в регуляторах, у вхідних і вихідних колах ССКМ, а також визначити їх залежність від: вхідних параметрів повітряної суміші, коефіцієнта пропорційності, коефіцієнта інтегрування і диференціювання, числа регуляторів, при різних режимах роботи ССКМ (стабілізація і стеження). Це необхідно для вибору елементної бази ССКМ (контролерів, регуляторів, енергетичного обладнання датчиків). Залежності показників якості дозволяють виявити можливість зменшення масогабаритних показників елементів, які займають основну частину маси і об'єму.

Наприклад, в режимі стабілізації при зміні K_p , викликаного впливом дестабілізуючих факторів (зміна зовнішніх впливів), для підтримки необхідного значення температури або вологості на виході обладнання, показники якості ССКМ

можуть погіршуватися, і навпаки поліпшуватися. Знаючи діапазон зміни K_p , який визначається діапазоном дії дестабілізуючих факторів (наприклад, допустиме відхилення початкових налаштувань), можливо підібрати такий набір коефіцієнтів, щоб при мінімальному обсязі забезпечити допустимий рівень пульсацій.

Вибір елементів обумовлений допустимими коефіцієнтами пульсацій, які можна визначити, знаючи значення абсолютних змін на вході і виході ССКМ. При побудові ССКМ з N модулів, необхідно вибрати необхідну кількість регуляторів для забезпечення необхідної потужності. Для цього необхідно провести дослідження залежності показників якості ССКМ від їх кількості.

Для вирішення завдань, пов'язаних з підвищенням ККД ССКМ, необхідно знати енергетичні параметри. До енергетичних параметрів належать втрати потужності в елементах. Для визначення енергетичних параметрів необхідно розрахувати діючі значення першої гармоніки при різних режимах роботи ССКМ.

Метою даного розділу є: дослідження перехідних процесів, показників якості та енергетичних параметрів в ССКМ модульної структури в режимі стабілізації при різних режимах функціонування і розробка на базі отриманих результатів системи автоматизованої діагностики та моніторингу роботи ССКМ.

Для розкриття змісту етапів проектування необхідно виявити характер зміни параметрів перехідних процесів ССКМ, оцінити вплив режимів роботи регуляторів і параметрів елементів на показники якості перехідних процесів і енергетичні параметри ССКМ.

4.1 Експлуатація системи в умовах несправності обладнання

Аналіз аварій на морському флоті свідчить про те, що близько 80% з них відбувається через помилкові і неправильні дії суднових і берегових фахівців. Безпека мореплавання суден, поряд з іншими факторами, залежить від надійності дії суднових систем "людина-машина" і повинна розглядатися на основі сучасних методів інженерної психології. При поступовій відмові одного з вузлів ССКМ механік може, вибираючи режим роботи або приймаючи завчасні заходи, забезпечи-

ти роботу резервного устаткування і не допустити аварії. Для запобігання раптових відмов необхідно використовувати різні методи і засоби технічного діагностування. Разом з тим, в даний час, проблема діагностування роботи суднових систем і устаткування повністю не вирішена. Існуючі системи діагностики, зважаючи на недостатність і неоднозначності інформації, не вказують на несправність, а тільки фіксують її прояв [32]. Один з можливих шляхів подальшого удосконалення систем діагностики - застосування теорії нечітких множин і нечіткої логіки. Вона дозволить створювати експертні системи, що працюють в режимі "порадника", які використовують знання, досвід і інтуїцію експертів - операторів при діагностуванні суднового устаткування. В якості можливого використання апарату нечітких систем в діагностики суднового устаткування, автором пропонується методика реалізації нечіткої експертної системи яка дозволяє проводити контроль роботи обладнання ССКМ в супервізорному режимі або режимі "порадника".

Система віддаленого моніторингу експлуатаційних показників ССКМ на базі SCADA - систем [62] (рис. 4.1) дозволяє обійтися без програмної розробки інтерфейсу, в той же час забезпечуючи широкі можливості для створення людино-машинного інтерфейсу. У свою чергу, SCADA SoftLogic - системи, орієнтовані на створення комплексних рішень автоматизації складних виробничих процесів, надають гнучкі засоби для розробки людино-машинного інтерфейсу. Збір даних і централізоване управління з ЦПУ є основним і залишається найбільш перспективним способом автоматизованого управління складними динамічними системами (процесами) в життєво важливих і критичних (з точки зору надійності і безпеки) ситуаціях. Оснащення суднових SCADA SoftLogic - систем (систем моніторингу) програмним додатком, які реалізують НЕС або СППР діагностики несправності обладнання є актуальною науковою задачею.

При розробці нечіткої експертної системи (НЕС) створено нечітке відношення, яке змістовно описує одну з ситуацій пошуку несправності вентилятора в системі ССКМ. З цією метою в якості першого універсуму розглядається безліч передумов чи причин несправності $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4\}$, де x_1 -«поломка крильчатки», x_2 -«несправність підшипника», x_3 - «несправність системи змащення», x_4 - «відмо-

ва системи електропостачання». В якості другого універсуму розглядається безліч проявів несправності $Y = \{y_1, y_2, y_3\}$, в якому y_1 - «вентилятор не запускається», y_2 - «вентилятор працює нестійко», y_3 - «вентилятор не розвиває повної потужності».

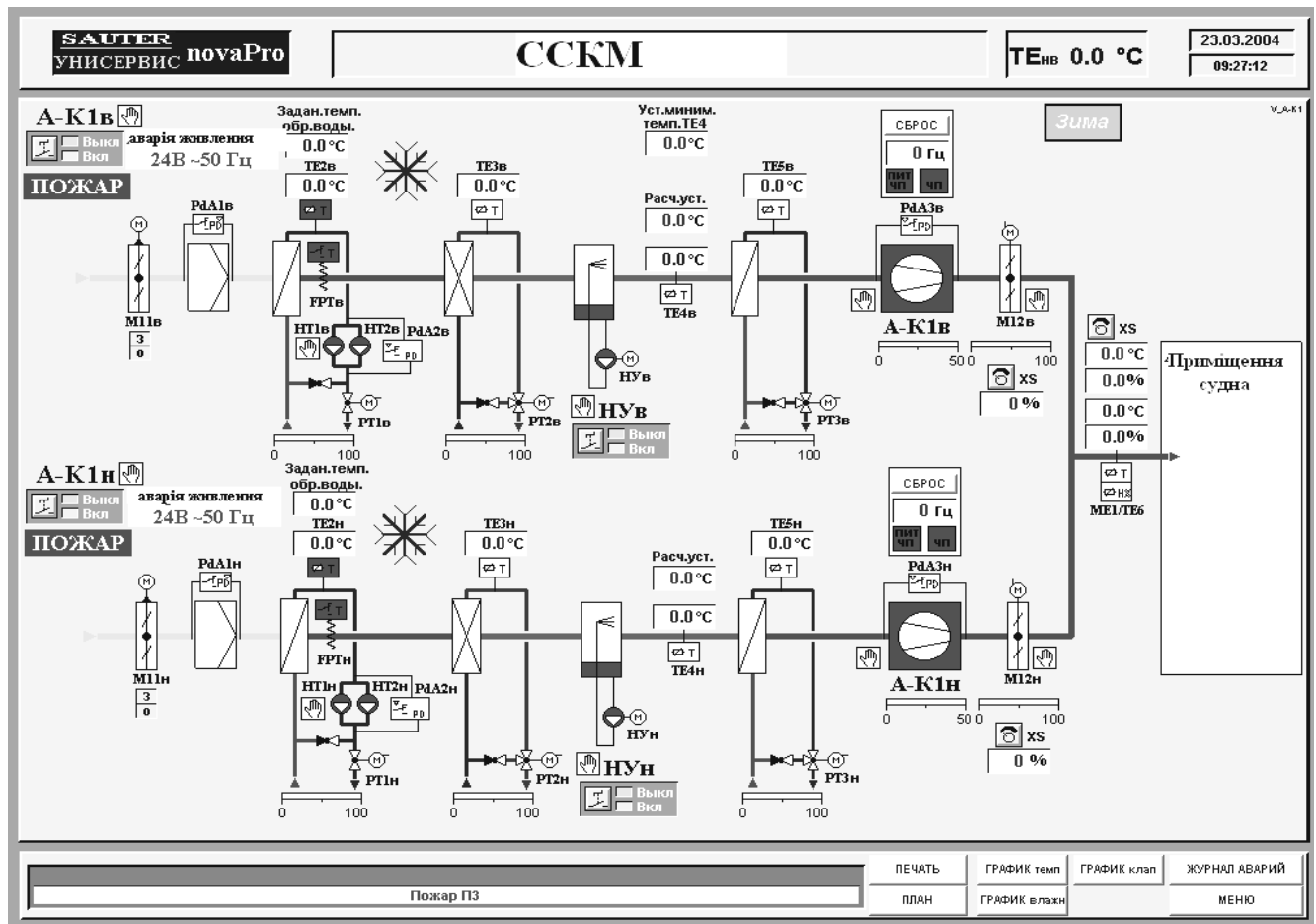


Рис. 4.1. Головний екран панелі управління ССКМ

При цьому між кожним елементом безлічі передумов і кожним елементом безлічі наслідків існує деякий причинний взаємозв'язок. Виходячи із суб'єктивного досвіду конкретного механіка, марки двигуна, умов його експлуатації та обліку інших чинників цей причинний взаємозв'язок найбільш адекватно може бути представлено у вигляді бінарного нечіткого співвідношення $P = \{(x_i, y_j), \mu_P(x_i, y_j)\}$, заданого на базисних множинах X і Y . У цьому випадку функція приналежності $\mu_\Omega(x_i, y_i)$ цього бінарного нечіткого співвідношення кількісно описує ступінь впевненості в тому, що та чи інша причина несправності може привести до того чи іншого наслідку. Оскільки нечітке відношення Ω бінарне і кінцеве, воно може бути представлено у формі табл. 4.1.

Нечітке співвідношення діагностики несправності ССКМ

Множини	Y_1	Y_2	Y_3
X_1	0,1	0,2	0,5
X_2	0,1	0,1	0,8
X_3	0,7	1	0,7
X_4	0,8	0,9	1

У до поставленій задачі, характерною для задач технічної діагностики, визначається нечітка множина:

$$A = \{[x_1, \mu_A(x_1)], [x_2, \mu_A(x_2)], [x_3, \mu_A(x_3)], [x_4, \mu_A(x_4)]\},$$

яка відповідала б нечіткій множині В. З цією метою представимо нечітку множину В у формі вектора $b = (0,1 \ 0,2 \ 0,9)$, компоненти якого дорівнюють значенням функції приналежності відповідних елементів, що визначаються експертом. Нечітку безліч А також представимо у формі вектора $a = (a_1 \ a_2 \ a_3 \ a_4)$, компоненти якого невідомі і потрібно визначити. Базовою передумовою для вирішення цього завдання є припущення про те, що компоненти вектора а повинні задовольняти наступні умови:

$$a \otimes M_p = b, \quad (4.1)$$

де $\otimes$ – знак композиції, відповідний методу max-min-композиції, тому вираз (4.1) перетворюється в наступну систему так званих нечітких рівнянь:

$$\begin{aligned} (0,1 \wedge a_1) \vee (0,1 \wedge a_2) \vee (0,7 \wedge a_3) \vee (0,8 \wedge a_4) &= 0,5; \\ (0,2 \wedge a_1) \vee (0,1 \wedge a_2) \vee (1 \wedge a_3) \vee (0,9 \wedge a_4) &= 0,5; \\ (0,5 \wedge a_1) \vee (0,8 \wedge a_2) \vee (0,7 \wedge a_3) \vee (1 \wedge a_4) &= 0,8. \end{aligned} \quad (4.2)$$

Тут зв'язка « $\vee$ » використовується для скорочення запису операції max, а зв'язка « $\wedge$ » - для скорочення запису операції min. Необхідно вирішити цю систему рівнянь, тобто знайти такі значення a_1, a_2, a_3, a_4 , які б задовольняли системі нечітких рівнянь. У ситуації, що розглядається система вказує на поломку підшипника. Впровадження даної методики, на думку автора, дозволить прискорити процес прийняття рішень і підвищити достовірність причини відмови обладнання.

4.2 Проектування модулю діагностики експлуатаційних характеристик та настройки параметрів електронних компонентів

Механік в ЦПУ в своїй роботі, пов'язаної з контролем і дистанційним керуванням обладнання ССКМ, керується знанням, досвідом і посадовими інструкціями. Для отримання адекватного механізму висновку та перевірки ефективності порад ЕС, складена база правил нечітких продукцій у вигляді нечіткої мережі Петрі (НМП) типу $C_f = (N, f, \lambda, m_0)$ з низкою умов (P_i), що виникають в умовах експлуатації обладнання:

- P_1 – «Навантаження електроживлення в електромережі судна стабільне»;
- P_2 – «Тиск води (теплоносія) в системі ССКМ зменшується»;
- P_3 – «Механік використовує сучасні комп'ютерні засоби моніторингу та автоматизації»;
- P_4 – «Тиск води в системі ССКМ стабільний»;
- P_5 – «В ЦПУ багато засобів вимірювання»;
- P_6 – «Оператор вмикає підживлюючий насос»;
- P_7 – «Оператор не вмикає підживлюючий насос»;
- P_8 – «Оператор відчуває почуття втоми»;
- P_9 – «Виключена можливість аварійної ситуації»;
- P_{10} – «Не виключена можливість аварійної ситуації».

Кожне з правил нечітких продукцій має деяку вагу або коефіцієнт визначеності F_i визначає значимість правила або впевненість в ступені істинності висновку, одержуваного за окремим правилом.

Припустимо, що в процесі експлуатації склалася наступна поточна ситуація: «Тиск води зменшується», ступінь істинності нечіткого висловлювання ($T = 0.8$), «Напруга в електромережі стабільно» ($T = 0.6$), «В ЦПУ багато приладів» ($T = 0.85$), «Пост оснащений сучасними засобами автоматизації» ($T = 0.5$). Завдання НЕС полягає в оцінці ситуації оцінці істинності нечіткого висновку «про неможливість аварійної ситуації в системі» і видачі рекомендації щодо підвищення ефективності роботи оператора ЦПУ.

Розглянемо один з можливих способів вирішення даного завдання за допомогою прямого методу виведення (fuzzy modus ponens), правила max-min-композиції:

$$(\mu_b(y) = \max \{ \min \{ \mu_a(x), \mu_Q(x, y) \} \}, \quad \text{логічної кон'юнкції:}$$

$T(A \wedge B) = \min \{ T(A), T(B) \}$, і логічного заперечення: $T(\neg A) = 1 - T(A)$.

Розглянемо всі правила для отримання нечітких висновків. Правило 1 дозволяє отримати висновок про те, що «оператор включає підживлюючий насос» зі ступенем істинності $T = \min(0.8, 0.9) = 0.8$. Правило 2: $T = \min(1 - 0.8, 1.0) = 0.2$ - «оператор не включає підживлюючий насос», правило 3: $T = \min(1 - 0.6, 0.8) = 0.4$ - «не виключена аварійна зупинка насоса», правило 4: $T = 0.6$ - «Оператор відчуває почуття втоми», правило 5: $T = \min(0.6, 0.7) = 0.6$ - «не виключена можливість аварійної ситуації», правило 6: $T = \min(\min(0.8, 0.8), 0.95) = 0.8$ - «виключена можливість аварійної ситуації», правило 7: $T = \min(\min(0.8, 0.5), 0.95) = 0.5$ - «виключена можливість аварійної ситуації». Ключове нечітке висловлювання «виключена можливість аварійної ситуації» є наслідком правил 6 і 7. Ступінь істинності якого становить: $T = \max(0.8, 0.5) = 0.8$. Для об'єктивного аналізу слід розглянути ситуацію «не виключена можливість аварійної ситуації», правила 3, 5:

$$T = \max(0.4, 0.6) = 0.6.$$

Аналіз отриманих значень означає, що ситуація, що склалася характеризується високим рівнем невизначеності і вимагає вжиття додаткових заходів. Зокрема, НЕС може рекомендувати «своєчасну заміну операторів, з метою запобігання їх втоми». Дане рішення засноване на тому, що висока ступінь істинності (0.6) укладення «не виключена можливість аварійної ситуації» отримана при використанні правила 5. Таким чином, система правил нечітких продукцій дозволяє не тільки знайти оптимальне рішення, але і менш суворо ставиться до суперечливості та неповноти інформації.

Створення НМП: Для отримання адекватного механізму укладення та перевірки ефективності порад ЕС, уявімо базу правил нечітких продукцій у вигляді нечіткої мережі Петрі (НМП) типу $C_f = (N, f, \lambda, m_0)$ [2]. Кожен з переходів відповідає окремому правилу нечіткої продукції: t_1 - правил 1; t_2 - правилу 2; t_3 - правилу 4; t_4 - правилу 6; t_5 - правилу 7; t_6 - правилу 3; t_7 - правилу 5. Для перевірки успіш-

ності НЕС за допомогою НМП, припустимо, що на диспетчерському пункті склалася ситуація аналогічна попередній. Таким чином, задається вектор початкової маркування $m_0 = (0.6, 0.8, 0.5, 0.2, 0.5, 0, 0, 0, 0, 0)$. Дана ситуація відповідає НМП представлений на рис.4.3.

Завдання полягає в оцінці наявності маркера в позиціях P_9 і P_{10} . З цією метою послідовно розглядаються всі активні переходи і результати їх нечіткого спрацьовування (рис. 4.2 - 4.3). Так спрацьовування активного при початковому маркуванні переходу t_1 призводить до зміни маркування в позиції P_6 яка стає рівною $m_6 = 0.8$. Спрацьовування переходу t_2 в позиції P_7 яка стає рівною $m_7 = 0.2$. І спрацьовування переходу t_3 до зміни маркування в позиції P_8 яка стає рівною $m_8 = 0.5$.

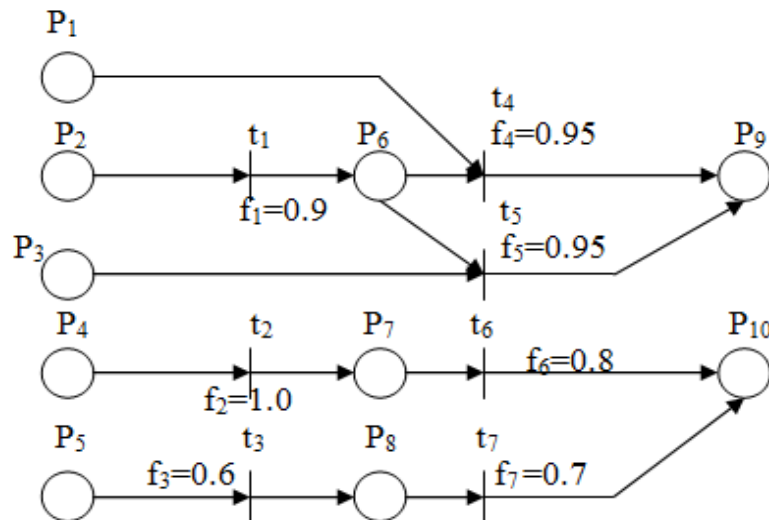


Рис. 4.2. Структура НМП для представлення бази правил нечітких продукцій

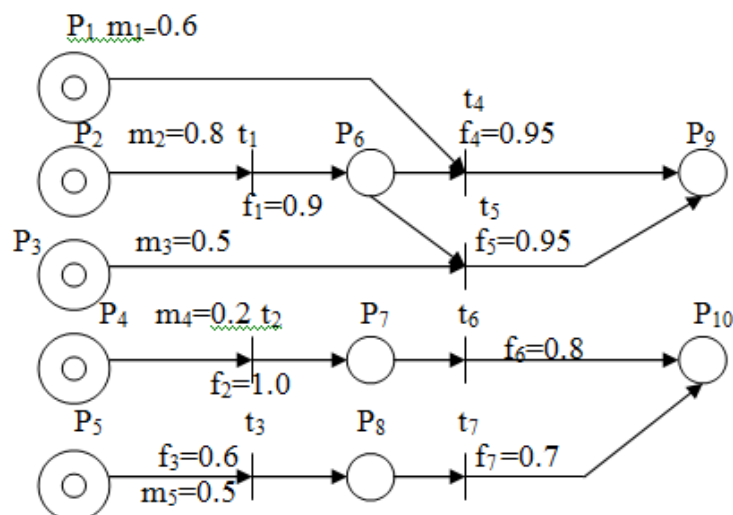


Рис. 4.3. НМП що описує поточну ситуацію

Нові значення маркувань призводять до активності інших переходів. Спрацьовування активного переходу t_4 до зміни маркування в позиції P_9 яка стає рівною $m_9 = 0.6$. Спрацьовування активного переходу t_5 веде до зміни маркування в позиції P_9 яка стає рівною $m_9 = 0.5$. Спрацьовування активного переходу t_6 до зміни маркування в позиції P_{10} яка стає рівною $m_{10} = 0.2$, а спрацьовування активного переходу t_7 до зміни маркування в позиції P_{10} яка стає рівною $m_{10} = 0.5$. Таким чином, визначено нове маркування НМП $m = (0.6, 0.8, 0.5, 0.2, 0.5, 0.8, 0.2, 0.5, 0.6, 0.5)$. Ступінь істинності нечіткого висловлювання «виключена можливість аварійної ситуації» становить $m_9 = 0.6$, а зворотного $m_{10} = 0.5$. На підставі даного висновку, система моніторингу пропонує рекомендації по збільшенню m_9 . Достовірність отриманого рішення була підтверджена за допомогою імітаційного моделювання в середовищі MatLab, що реалізує метод прямого вибору правил нечітких продукцій. Можна відзначити, що безперечною перевагою уявлення бази правил у формі НМП є наочність і візуалізація всіх проміжних результатів. Спільне використання НЕС і НМП дозволяє отримати ефективну систему підтримки прийняття рішень з управління обладнанням ССКМ з функцією самодіагностики, з'ясувати рівень адекватності прийнятої моделі і розрахункових показників надійності. Це в свою чергу стало поштовхом за для створення та реалізації автором ідеї об'єднання кількох розроблених інтелектуальних модулів в одну систему.

4.3 Розробка програмного комплексу моніторингу технічного стану ССКМ

Розроблена структурна схема програмного комплексу для дослідження ССКМ, яка складається з універсальної програми і динамічно-підключаємої бібліотеки показана на рис. 4.4.

Універсальна програма [123] містить модулі відображення і редагування вихідних даних і результатів розрахунку, графічний модуль для побудови графіків, а також модулі експорту результатів в буфер обміну операційної системи.

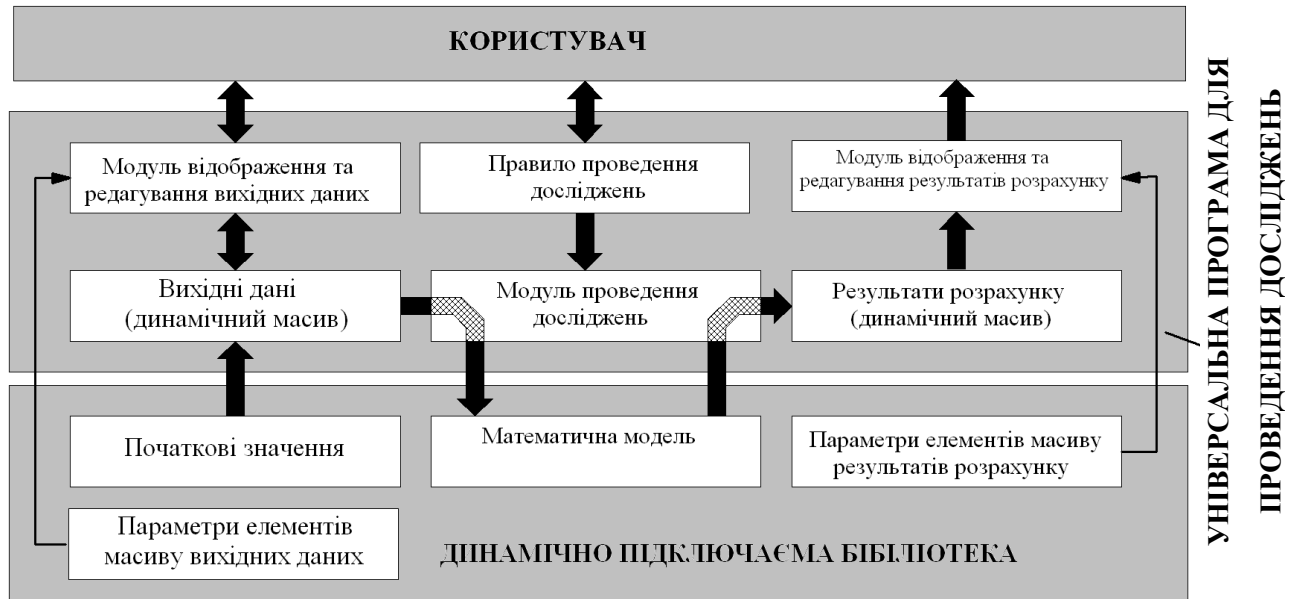


Рис. 4.4. Структура універсальної програми для дослідження ССКМ

Основною частиною універсальної програми для дослідження є масив вихідних експертних даних, модуль проведення досліджень і масив результатів розрахунку. Ці масиви є динамічними, кількість їх елементів залежить від конкретної математичної моделі і передаються в універсальну програму відповідними функціями динамічно-підключаємої бібліотеки.

Модуль проведення досліджень модифікує елементи масиву вихідних даних згідно з правилами проведення дослідження, встановленими користувачем, і передає його в головну функцію розрахунку, яка знаходиться в бібліотеці і містить математичну модель. Результати розрахунку передаються в модуль проведення досліджень, який з них формує двовимірну таблицю результатів. Результати дослідження можуть відображатися, як в вигляді таблиць, так і у вигляді графіків, які потім через буфер обміну можуть бути передані в графічні редактори для подальшої обробки. Вихідні дані і параметри проведення дослідження можуть бути збережені в файлі [125].

Динамічно-підключаєма бібліотека являє собою програмне забезпечення, яке містить, в загальному випадку, набір процедур і функцій, які можуть бути доступні, як тільки всередині бібліотеки, так і у зовнішній програмі що викликаєть-

ся. Динамічно-спільні бібліотеки, описані у відомій літературі [138-146] і реалізуються стандартними програмними засобами розробки.

Розглянутий алгоритм роботи з програмним комплексом дозволяє проводити весь комплекс досліджень, необхідних для вирішення завдань поставлених в дисертації.

При дослідженні перехідних процесів, як X обираються час роботи регулятора t (табл. 3.1) в якості Y будь-який з параметрів, що залежать від часу, наприклад час регулювання, одиничний стрибок тощо.

При дослідженні показників якості, як X може бути обраний будь-який з параметрів управління, наприклад коефіцієнт передачі, коефіцієнт пропорційності тощо. В якості Y може бути обраний будь-який з досліджуваних параметрів, наприклад K_p , τ . У таблиці 4.2 показаний лише приклад проведення досліджень.

Таблиця 4.2.

Приклад вибору параметрів при проведенні досліджень

Вид досліджень	X	$X_{\min}$	$X_{\max}$	Кількість точок	Y
Часова діаграма	t	0	1	1000	$T_n(t), T_d(t), \dots$
Регулювальні характеристики	K_n	0	1	1000	K_p

Алгоритм роботи з програмним комплексом для дослідження ССКМ представлений на рис. 4.5. Після початку роботи програми (бл. 1 алгоритму) (рис. 4.5), в бл. 2 встановлюються вихідні дані "за замовчуванням", значення яких заздалегідь визначені в динамічно-підключаємій бібліотеці. Список вхідних даних представлений в табл. 3.1. Вхідні дані можуть бути модифіковані користувачем в блоці 4 відповідно до конкретного дослідження. Вони також можуть бути збережені в файл (блок 5) або завантажені з файлу (блок 3). У блоці 6 користувачем здійснюється вибір параметра що змінюється X , його мінімальне $X_{\min}$, максимальне $X_{\max}$ значення, а також крок зміни ΔX . У якості X може виступати будь-який елемент вхідних даних (табл. 4.2), наприклад: час роботи, вихідні параметри, завдання, коефіцієнт передачі тощо.

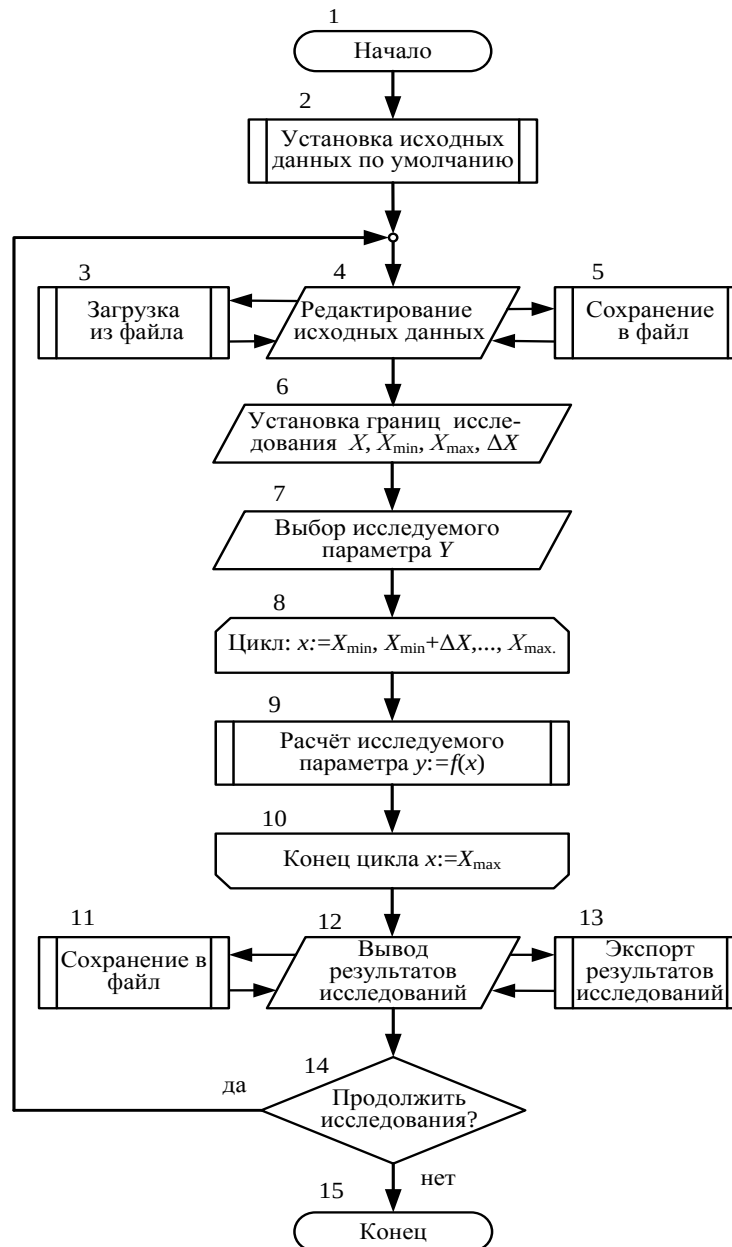


Рис. 4.5. Алгоритм роботи з програмним комплексом для дослідження ССКМ

У бл. 7 здійснюється вибір досліджуваного параметра Y . Як Y може виступати будь-який елемент – показники якості, енергетичні параметри тощо.

Обрані в бл. 6, параметри $X_{\min}$, $X_{\max}$ і ΔX використовуються в циклі (бл. 8 - бл. 10), для розрахунків значень обраного досліджуваного параметра (бл. 9). Розрахунок значень досліджуваного параметра $y: = f(x)$ (бл. 9) виконується в програмному модулі, розташованому в динамічно-підключаємій бібліотеці, алгоритм якого показаний на рис. 4.5).

Результати досліджень в блоці 12 можуть виводитися, як у вигляді таблиць, так і у вигляді графіків, які потім можуть бути збережені в файл (бл. 11), або через буфер обміну передані в графічні редактори у вигляді зображень (бл. 13).

Після завершення дослідження здійснюється перехід до блоку 14, де користувачем приймається рішення про виконання подальших досліджень при цьому випадку здійснюється перехід до блоку 4 або завершення роботи з програмою, в цьому випадку здійснюється перехід до блоку 15.

Алгоритм програмного модуля розрахунку досліджуваного параметра Y , (бл. 9, рис. 4.5) показаний на рис. 4.6.

Першим етапом розрахунку є розрахунок базових параметрів (бл. 2) в програмному модулі "Розрахунок базових параметрів", методика і алгоритм котрих приведені в п. 3.2. На другому етапі в бл. 3 (рис. 4.6), відповідно до обраного типу досліджень, здійснюється перехід до відповідного програмного модулю: ПМ Розрахунку перехідних процесів (бл.18) для розрахунку часових залежностей в елементах ССКМ, у вхідних і вихідних колах ССКМ, методика і алгоритм, якого описані в п. 3.3; ПМ Розрахунку показників якості (бл. 4, 6, 8, 10, 12, 14, 16, 17) для розрахунку величин абсолютних пульсацій (бл. 4, 6), коефіцієнтів пульсацій (бл. 8, 10), коефіцієнтів згладжування (бл. 12, 14), коефіцієнтів модульності (бл. 16, 17), методика і алгоритм, якого описані в п. 3.4; ПМ Розрахунку енергетичних параметрів (бл. 5, 7, 9, 11, 13, 15) для визначення діючих значень (бл. 5), потужності втрат в елементах ССКМ (бл. 7), потужності втрат в одному каналі (бл. 9), і в цілому в регуляторі (бл. 11), а також коефіцієнтів корисної дії ССКМ (бл. 13) і ККД ССКМ (бл. 15) методика і алгоритм якого описані в п. 3.5.

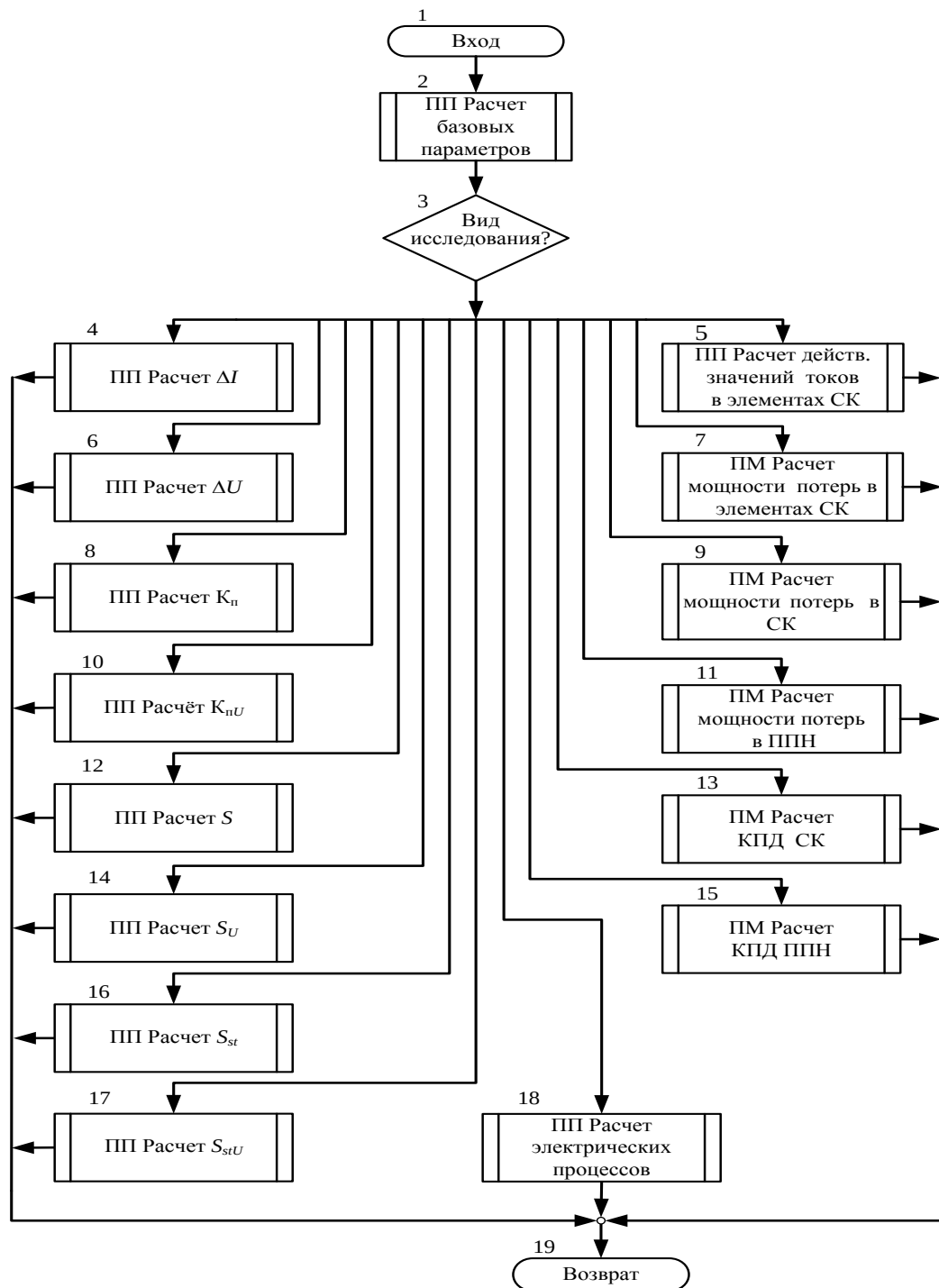


Рис. 4.6. Алгоритм программного модуля для розрахунку параметрів ССКМ

За допомогою розробленого програмного комплексу також було досліджено показники ККД ССКМ при варіанті роботи на одному та декількох регуляторах, яке показало що потужність, що розсіюється регулятором у всьому діапазоні регулювання не залежить від їх числа N і типу режиму перетворення. Тут можна

зробити висновок, що втрати потужності зберігаються незмінними, рівними втра-
там потужності одного регулятора і не залежать від їх кількості.

4.4 Методика автоматизованого проектування апаратної частини

На сьогоднішній день математичні моделі перехідних процесів, результати моделювання, методики дослідження і проектування ССКМ з ПД-регулюванням, регулятори яких працюють в одному режимі [123] є найбільш дослідженими.

Однак для одного з перспективних напрямків ССКМ, регулятори яких працюють в різних режимах, у тому числі гібридних інтелектуальних мереж, подібні результати відсутні, що стримує широке їх використання на практиці.

Посилення вимог до якості повітряної суміші обумовлюють наявність в структурі ССКМ великогабаритних енергетичних елементів. Енергетичні втрати, у вигляді теплових виділень супроводжують процес регулювання, призводять до необхідності застосовувати пристрої охолодження, за рахунок яких збільшується обсяг і маса ССКМ. Ці особливості ускладнюють мініатюризацію ССКМ. Рішення завдання мініатюризації означає, що необхідно виконувати оптимізацію розробляється обладнання ССКМ, за основний критерій якої прийнятий обсяг $V(c, s)$ [123]:

$$V_{\text{опт}} = \min V(c, s), s \in S \quad (4.3)$$

де $c = \{c_1, \dots, c_l\}$ – вектор констант, елементи котрого не змінюються в процесі оптимізації пристрою; $s = \{s_1, \dots, s_m\}$ – вектор управління, елементи якого – параметри пристрою, що визначаються в процесі його оптимізації.

Вектор констант c визначається вимогами технічного завдання (ТЗ) до параметрів конструкції розроблюваного ССКМ (наприклад, потужність навантаження P_n , пульсації вихідного сигналу тощо). Вектор управління s формується з параметрів розроблюваного ССКМ, не обумовлених в ТЗ (наприклад, кількість регуляторів N). Для нього існує деяка область допустимих рішень S , в просторі якої визначено вектор s , що задовольняє мінімуму $V(c, s)$.

Забезпечення заданих характеристик при проектуванні ССКМ в більшості випадків здійснюється їх силовою частиною - регуляторами [45].

З урахуванням вищенаведених зауважень, завдання оптимізації ССКМ за критерієм мінімального об'єму - співвідношення (4.3), розділяється на два процеси: 1- оптимізація ССКМ за критерієм мінімального об'єму з урахуванням обмежень, обумовлених реалізованими регуляторами функцій; 2 - структурний і параметричний синтез несилової частини ССКМ - схеми управління (СУ), що реалізує максимальне число функцій, для виконання вимог до параметрів ССКМ [89].

У даній роботі розглянуто рішення першої частини завдання - мініатюризація регуляторів ССКМ в просторі параметрів силових елементів. Параметри ССКМ можна розділити на: енергетичні, диференціальні, динамічні і конструктивні [157]. Енергетичні параметри характеризують економічність процесу перетворення повітряної суміші. Відносними енергетичними параметрами є ККД $\eta_{\text{ппн}}$ – співвідношення (4.3) і коефіцієнт використання напівпровідникових приладів по потужності. Абсолютними - втрати потужності $P_{\text{ппн}}$, які визначаються потужностями розсіювання в елементах регуляторів - співвідношення (4.4). Площа поверхні тепловідведення S_T і теплової об'єм V_T ССКМ в значній мірі визначають енергетичні показники. При сучасних методах конструювання, коли роль радіатора охолодження виконує корпус виробу, це визначає безпосередню залежність обсягу і маси пристрою від енергетичних параметрів ССКМ. Тепловідвідна поверхня S_T пов'язана з енергетичними показниками наступним чином:

$$S_T = S_{\text{то}} P_H (1 - \eta_{\text{ппн}}) / \eta_{\text{ппн}}, \quad (4.4)$$

де $S_{\text{то}}$ – питома поверхня тепловідведення на 1 Вт потужності, що розсіюється; P_H – потужність навантаження ССКМ.

З урахуванням співвідношення (4.4) можна записати:

$$S_T = S_{\text{то}} P_{\text{ппн}}, \quad (4.5)$$

Якщо при зміні потужності P_H навантаження або умов охолодження необхідно змінити всі три розміри корпусу регулятора (а- ширина, б- глибина, с - ви-

сота), то при обраних пропорціях ($k_b=b/a$, $k_c=c/a$) базовий розмір ССКМ визначається співвідношенням (4.6):

$$a = [S_T / (K_{\text{эф}} (k_b + k_c + k_b k_c))]^{1/2} = \{S_{\text{то}} P_{\text{н}} (1 - \eta_{\text{ппн}}) / [K_{\text{эф}} (k_b + k_c + k_b k_c) \eta_{\text{ппн}}]\}^{1/2}, \quad (4.6)$$

де $K_{\text{эф}}$ – коефіцієнт ефективності поверхні тепловідведення ССКМ (при рівномірному тепловідводі $K_{\text{эф}}=2$) [].

З урахуванням співвідношення (4.6) обсяг конструкції корпусу, який визначається поверхнею тепловідводу:

$$V_T = k_b k_c [S_{\text{то}} P_{\text{н}} / (K_{\text{эф}} (k_b + k_c + k_b k_c))]^{3/2} [(1 - \eta_{\text{ппн}}) / \eta_{\text{ппн}}]^{3/2} = k_b k_c [S_T / (K_{\text{эф}} (k_b + k_c + k_b k_c))]^{3/2}. \quad (4.7)$$

З (4.7) випливає, що обсяг ССКМ безпосередньо залежить від енергетичних параметрів і зі збільшенням ККД зменшується.

Диференціальні показники дозволяють оцінити вплив зміни зовнішніх впливів, що збурюють на зміни режиму роботи окремих елементів і всього пристрою в цілому. До них відносяться: коефіцієнт передачі збурюючого впливу в замкнутій системі, диференціальні вхідний і вихідний опори, коефіцієнт частотних спотворень, коефіцієнт нелінійних спотворень тощо. Також розглядаються в даній роботі показники якості ССКМ.

Динамічні показники характеризують стійкість процесу перетворення, і зміни вихідної змінної в часі в перехідному процесі. До них відносяться: час закінчення перехідного процесу, точність регулювання тощо.

Питання забезпечення диференціальних і динамічних показників докладно досліджені в [68], в даній роботі вони не розглядалися.

Конструктивні показники характеризують обсяг і масу ССКМ, необхідні для реалізації пристрою з заданими параметрами. Вони можуть бути представлені в абсолютній формі - маса M , об'єм V , і у відносній формі - питомі потужності по масі $P_M = P_{\text{н}}/M$ і за об'ємом $P_V = P_{\text{н}}/V$, питомі обсяг $V_P = V/P_{\text{н}}$ і маса $M_P = M/p_{\text{н}}$ по потужності.

Всі основні групи показників безпосередньо пов'язані з конструктивними параметрами, за якими оптимізується ССКМ.

Диференціальні і динамічні показники визначають габарити пристрою і масу елементів АСР, а, отже, геометричний обсяг V_r [111]. Для АСР модульної структури, що складається з N регуляторів, геометричний об'єм:

$$V_r = NV_k + V_{cy}, \quad (4.8)$$

де $V_k = V_{Lk} + V_{Cп} + V_{Cн} + V_{S1} + V_{VD1} + V_{доп}$ – об'єм одного регулятора; V_{Lk} , $V_{Cп}$, $V_{Cн}$, V_{S1} , V_{VD1} , $V_{доп}$ – об'єми корпусу, фільтрів (вхідного і вихідного), силового ключа $S1$, додаткових допоміжних вузлів (датчики температури, вологості); V_{cy} – об'єм схеми управління.

Проблема мінімізації обсягу має енергетичний, структурний, конструктивно-технологічний, системний аспекти. Це визначає два напрямки вирішення завдання оптимізації: по критерію мінімального об'єму V_{min} : «мінімального теплового обсягу – V_T » і охоплює сукупність засобів, що зменшують необхідну поверхню тепловідведення S_T , а значить, й V_T , й «мінімального геометричного об'єму – V_r ». охоплює сукупність засобів, що сприяють зменшенню геометричних розмірів елементів і вузлів, а значить, і V_r . Тому в загальному випадку задача оптимізації ССКМ має вигляд:

$$V_{min}(c, s) = \begin{cases} V_T(c, s), & \text{при } V_r < V_T, \\ V_r(c, s), & \text{при } V_r > V_T. \end{cases} \quad (4.9)$$

Якщо V_T й V_r представити у вигляді приватних критеріїв оптимізації, то геометрично оптимальне рішення визначається областю Парето [129], що представляє собою лінію на кордоні допустимих рішень (рис. 4.7). Мінімізація показника якості $V_{min}(c, s)$ АСР визначається конкретними умовами розробки АСР. При активному охолодженні ССКМ і відсутності теплового контакту з іншими агрегатами системи $V_{min}(c, s)$ визначаються точкою $V_T = V_r$.

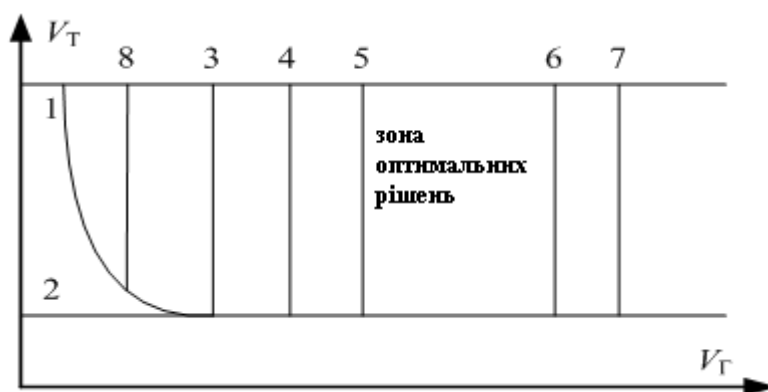


Рис. 4.7. Область допустимих рішень задачі оптимізації

Обмеження на цільову функцію пов'язані або з V_T , або з $V_Г$, або з V_T й $V_Г$ одночасно. Вимоги до ККД, коли $\eta_{ППН} > \eta_{ППН\text{доп}}$, до коефіцієнта використання за потужністю обмежують V_T , тобто обмежують область допустимих рішень зверху - лінія 1 (рис. 4.7). Реально досяжні значення ККД обмежують допустиму область знизу - лінія 2, (рис. 4.7). Вимоги до частотним спотворень, вхідного і вихідного опорів, обмежують $V_Г$, тобто допустиму область зліва - лінії 3, 4, 5 (рис. 4.7). Вимоги до коефіцієнта згладжування пульсацій на частоті комутації силового ключа, до параметрів перехідного процесу, зменшення нелінійностей АСР одночасно накладають обмеження і на V_T , й на $V_Г$ - лінії 6, 7, 8 (Рис. 4.).

Забезпечення рівномірного зсуву перехідних процесів в АСР дозволяє істотно скоротити розміри і масу силових елементів. При цьому, як показав проведений аналіз і результати досліджень, викладені в даному розділі, величина змінної складової в колах живлення і навантаження АСР ССКМ істотно зменшується, а частота збільшується в N .

Відповідно до [56] в ССКМ доцільно провести оптимізацію обсягу окремо взятого регулятора, враховуючи в його вихідних даних особливості АСР. З викладеного випливає, що при оптимізації значень технічних параметрів ССКМ як змінних параметрів доцільно вибрати коефіцієнти L_k , число регуляторів N , частоту перетворення f , які найбільш ефектно впливають на мініатюризацію ССКМ.

Виходячи зі сказаного, методика проектування містить наступні основні етапи:

1. Формування бази даних елементів - довідкових електричних і конструктивних (масогабаритних) параметрів елементів ССКМ. У базу даних повинні також входити нормативні обмеження на електричні характеристики елементів схеми, які обумовлені в технічних умовах на елементи.

2. Вибір параметрів і розрахунок показників якості перехідних процесів. На цьому етапі, зокрема, визначаються параметри для знаходження оптимального (мінімально необхідного) значення числа регуляторів N - початкове, кінцеве значення і крок зміни їх числа.

Для будь-якого режиму роботи (при $0 < \kappa_n < 1$) на вході (виході) АСР можна забезпечити малий рівень змінної складової, яка прагне до нуля. Тобто забезпечується можливість отримання нульових рівнів змінних складових в силових колах, що сприяє розширенню можливостей мініатюризації ССКМ.

3. Розрахунок геометричного обсягу корпусу V_r , необхідного для розміщення елементів. Геометричний обсяг V_r визначається відповідно до (4.8). Відзначимо, що при зменшенні L_k збільшується пульсація на вході і виході ССКМ. Пульсації визначаються за допомогою співвідношень математичної моделі (розділ 2), задаються в якості вихідних даних. Вхідні пульсації необхідно розрахувати.

4. Аналіз параметрів перехідних процесів, енергетичних і масогабаритних показників ССКМ при заданих вхідних і вихідних параметрах, відомих параметрах елементної бази, частоті комутації, параметрах фільтрів тощо.

5. Визначення теплового обсягу ССКМ V_t , що складається з N регуляторів, з урахуванням (4.9):

$$V_{t \text{ мин}} = k_b k_c \{ NS_T / [K_{эф} (k_b + k_c + k_b k_c)] \}^{3/2} \quad (4.10)$$

6. Порівняння температурного V_{tc} геометричним V_r об'ємом і вибір мінімального - співвідношення (4.10).

Отже, наведені вище вирази (4.3) - (4.10) і результати досліджень дозволяють провести, використовуючи ЕОМ, аналіз залежності обсягів V_{ti} V_r ССКМ від змін коефіцієнтів L_k , частоти перетворення f , числа паралельно працюючих регуляторів N .

Запропонований порядок проектування (методика) відображає логіку взаємодії окремих завдань проектування ССКМ модульної структури. На рис. 4.8 представлений алгоритм проектування АСР за критерієм мінімуму обсягу $V_{\min}$.

Крок 1. Введення вихідних даних (блок 2): діапазон зміни напруги на вході $U_{\min} \div U_{\max}$; напруга на навантаженні U_n ; допустимі пульсації напруги на навантаженні АСР ΔU_n ; струм навантаження АСР I_n ; початкова робоча частота $f_{\min}$ й крок зміни частоти Δf ; початкова кількість регуляторів $N_{\min}$ й крок зміни ΔN ; кількість точок розрахунку зміни збурення n ; тип регулятора «у»; наперед задане максимальне значення об'єму $V_{\max}$, який мав би бути перевищено; параметри елементної бази.

Для порівняння одержуваного (на кожному кроці зміни індуктивності, кількості силових каналів і частоти) поточного обсягу V з значеннями, отриманими на попередніх кроках - відповідно V_L , V_N , V_f - в блоці 3 виконуються відповідні початкові установки (привласнення).

Крок 2. Організація зовнішнього циклу (по умовному переходу) зміни поточного значення робочої частоти F , на якій визначаються параметри АСР (блок 4). При цьому початкове (мінімальне) значення $F_{\min}$ задається в блоці 3. Відзначимо, що $F_{\min}$ і крок зміни ΔF робочої частоти вибираються з урахуванням обмежень сучасної елементної бази.

Крок 3. Організація внутрішнього циклу (по умовному переходу) зміни кількості регуляторів N (блок 5). При цьому початкове значення їх кількості, крок зміни визначаються (оцінюються) за результатами дослідження (знання діапазону зміни коефіцієнта накопичення k_n). При цьому, що зі збільшенням кількості регуляторів N в АСР рівень пульсацій зменшується.

Крок 4. У блоці 6 для поточних значень f і N розраховуються мінімальне $L_{k\min}$ і максимальне $L_{k\max}$ значення коефіцієнтів регулятора відповідно до умов (4.10). Також визначається крок зміни ΔL_k як

$$\Delta L_k = (L_{k\max} - L_{k\min})/n. \quad (4.11)$$

Поточному значенню L_k присвоюється значення L_{kmax} ,

Крок 5. Далі в блоці 7 відбувається організація циклу (по умовному переходу) зміни L_k на кожному кроці ітерації - її зменшення на величину ΔL_k .

Крок 6. У блоці 8, відповідно до алгоритмів розділу 3 в програмному модулі (ПМ) «Розрахунок базових параметрів» визначаються основні параметри ССКМ, параметри силових комутуючих елементів - ключа $S1$ і діода $VD1$ регулятора АСР, на підставі яких з банку елементної бази вибирається необхідні елементи $S1$ і $VD1$.

Крок 7. У ПМ «часові залежності» визначаються часові показники, такі, як: час зсуву - t_{ck} , тривалість інтервалів накопичення - t_n і повернення - t_b .

Далі в ПМ «Показники якості» (блок 10), визначаються абсолютні вхідні і вихідні пульсації, відхилення на вході і виході АСР $\Delta I_{n(n)}$, необхідні для розрахунку.

Крок 8. У програмному модулі «Енергетичні параметри» (блок 12), для поточних значень L_k , N , f розраховуються ККД, статичні і динамічні втрати потужності.

Крок 9. Визначення поточних значень геометричного обсягу V_r

Крок 10. Визначення поточного обсягу V - залежно від результату умови блоку 14, - блок 15 (або 16).

Крок 11. На кожному кроці зміни L_k значення об'єму V визначається з умови (4.11) і порівнюється з його значенням V_L в попередній точці (блок 17). При зменшенні V , значення V_L змінюється на нове - $V_L = V$ (блок 18).

Крок 12. Зміна L_k (блок 7) відбувається до тих пір, поки воно призводить до зменшення обсягу. Якщо при досягненні значення L_{kmin} (блок 19) цього не відбувається, виконуються порівняння розрахованого обсягу V_L з його значенням V_N , отриманим для того ж значення L_k , але при попередній кількості регуляторів N (блок 20). Якщо відбувається зменшення V_L , то значення V_N змінюється на нове - $V_N = V_L$ (блок 22).

Крок 13. Зміна числа N регуляторів відбувається до тих пір, поки воно призводить до зменшення обсягу ($V_L < V_N$). Якщо ж цього не відбувається, то зміню-

ється робоча частота F і розрахунок повторюється до тих пір, поки зміна частоти призводить до зменшення обсягу ($V_L < V_F$) - блоки 21, 22.

Розрахунок закінчується, коли збільшення частоти F призводить до збільшення обсягу АСР V_F . Далі йде висновок на друк результатів розрахунку, відповідних результатів (блок 29).

Таким чином, в модульних АСР виявляються додаткові в порівнянні з іншими можливості підвищення енергетичних показників, що створює умови для більш повного вирішення проблем мініатюризації.

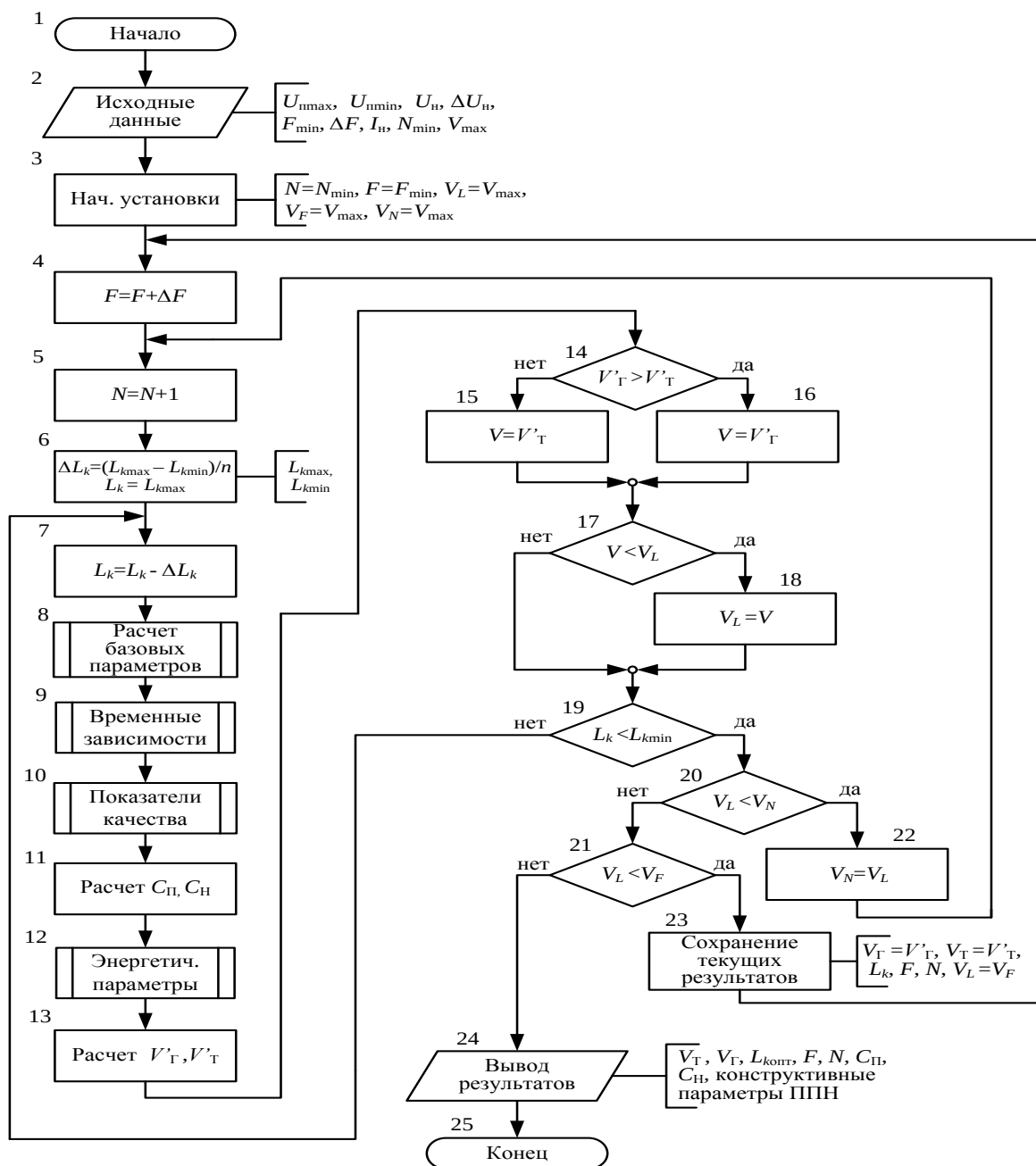


Рис. 4.8. Алгоритм пошуку проектування за критерієм мінімуму об'єму

4.5 Висновки за четвертим розділом

В розділі розглянуто можливість використання САПР MatLAB з точки зору застосування до дослідження перехідних процесів в каналах АСР - визначено межі (рамки) використання даної САПР для дослідження ССКМ, виявлені її недоліки і обмеження:

- 1) неможливість дослідження залежностей відносних показників якості АСР (коефіцієнтів пульсацій, коефіцієнтів згладжування);
- 2) трудомісткість вирішення завдань дослідження енергетичних параметрів (статичних, динамічних втрат потужності в силових елементах і регуляторах);
- 3) труднощі узгодження з іншим ПЗ (імпортування результати розрахунків).

Зазначені обмеження по моделюванню і дослідженню перехідних процесів, що відбуваються в АСР ССКМ, підтверджують необхідність в розробці спеціалізованого математичного апарату і програмного забезпечення.

В розділі виконано:

1. Дослідження основних параметрів АСР модульної структури з регуляторами інтелектуального типу, проведена порівняльна оцінка показників якості регуляторів з різними принципами функціонування; виявлено їх специфічні особливості при функціонуванні.

2. Розглянуто особливості процесів регулювання в АСР з інтелектуальним регулюванням. Показано, що використання модульного принципу перетворення має переваги перед варіантом з одним типом регулятора і дозволяє реалізувати ефект придушення змінних складових без збільшення частоти перетворення, параметрів фільтрів або інших спеціальних заходів.

3. Розглянуто особливості мініатюризації ССКМ. Запропоновано методика автоматизованого проектування за критерієм мінімального об'єму при забезпеченні заданої якості вихідних параметрів, яка базується на результатах досліджень, представлених в розділі 4. На базі запропонованої методики розроблено програмний алгоритм, компактний і зручний для реалізації на ЕОМ.

Дисертантом вдосконалена система моніторингу і діагностики параметрів АСР ССКМ з функцією самодіагностики. В основі принципу дії системи закладений механізм нечіткої продукційної ЕС і проведення аналізу її адекватності в умовах невизначеності за допомогою НМП. Як об'єкт дослідження проаналізовано діяльність механіка при управлінні ССКМ дистанційно. Достовірність отриманого рішення була підтверджена за допомогою імітаційного моделювання в середовищі MatLab, що реалізує метод прямого вибору правил нечітких продукцій. Можна відзначити, що безперечною перевагою уявлення бази правил у формі НМП є наочність і візуалізація всіх проміжних результатів. Спільне використання НЕС і НМП дозволяє отримати ефективну СППР з управління обладнанням ССКМ з функцією самодіагностики, з'ясувати рівень адекватності прийнятої моделі і розрахункових показників надійності.

Також автором запропонована СППР яка розраховує залишковий ресурс роботи технологічного обладнання ССКМ, і діюча на основі нечіткої логіки. Імітаційні експерименти підтвердили високу адекватність діючої нечіткої апроксимуючої моделі розрахунку.

На основі використання результатів проведених досліджень ССКМ модульної структури з регуляторами інтелектуального типу розроблена методика автоматизованого проектування за критерієм мінімального об'єму при забезпеченні заданої якості вихідного повітряного потоку. Методика сприяє практичній реалізації пристроїв даного класу з поліпшеними масогабаритними показниками.

Запропонована система діагностики технічного стану обладнання ССКМ, діюча на основі НМП, відрізняється функцією обліку досвіду експлуатаційного персоналу і можливістю одночасного розрахунку показників надійності за двома моделями (мережі Петрі і нечіткої бази знань), що підвищує ступінь достовірності результатів.

РОЗДІЛ 5.

РОЗРОБКА ГІБРИДНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ МЕРЕЖІ ДЛЯ ЕКСПЛУАТАЦІЇ СИСТЕМ МІКРОКЛІМАТУ

5.1. Аналіз наукових підходів в розробці інтелектуальних мереж

Як було сказано раніше, в процесі експлуатації ССКМ піддаються періодичному впливу внутрішніх та зовнішніх збурень, викликаних змінами навантаження і режимів роботи, новим завданням, наявністю дефектів і зносів, впливу додаткових контурів регулювання тощо. Ці фактори призводять до зміни значень параметрів, появи нових властивостей, посилення нелінійності, інерційності та запізнювання. В силу цього, їх схеми управління з регуляторами, розрахованими на основі проектних аналітичних рішень, доповнені базами даних динамічно підключаємих бібліотек і працюючих на основі апарату нечіткої логіки, все одно потребують адаптації своїх настроювальних параметрів. Для отримання нових значень параметрів типових регуляторів необхідне знання математичної моделі об'єкта управління. Однак, створення нових аналітичних моделей в виробничих умовах це трудомісткий і витратний процес, при якому отримана модель буде мати спрощений характер в силу ідеалізації ряду основних параметрів і неврахування другорядних [154]. Це зумовлює необхідність проведення експериментальних досліджень і отримання досвідчених даних безпосередньо на діючому об'єкті управління. На запропонованій схемі (рис.5.1) ідентифікація об'єкта в АСР відбувається після подачі одиничного збурення по каналу регулювання. Ідентифікатор у вигляді навченої нейронної нечіткої мережі (ННМ) налаштований на визначення значень параметрів об'єкта дослідження (навчальна вибірка сімейства значень параметрів кривих розгону або передавальних функцій інерційних ланок із запізненням). Наявність ННМ дозволяє провести ідентифікацію перешкоди сигналу кривої розгону з мінімальним часом і без повторних експериментів. Далі інформація про математичну модель об'єкта надходить в адаптер, що обчислює за значеннями передавальних функцій, оптимальні настройки ПІ і

ПД - регуляторів за критерієм мінімального часу регулювання. Оператор або особа, яка приймає рішення (ОПР) отримує інформацію від ідентифікатора і адаптера і може здійснити корекцію алгоритму навчання ННМ, навчальної вибірки параметрів сімейства кривих розгону або значень передавальних функцій.

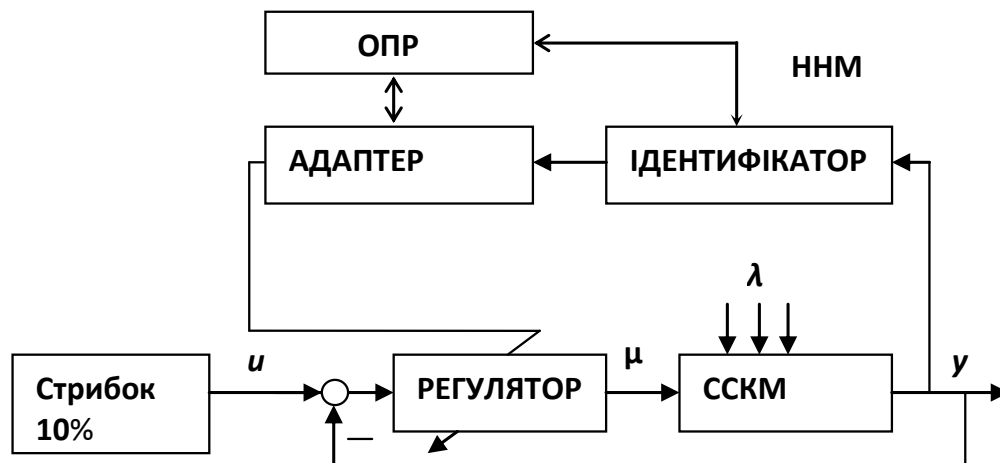


Рис. 5.1. Структура нейро-нечіткої системи ідентифікації і адаптації ССКМ

Система інтелектуальної ідентифікації представлена на рис. 5.1 складається з ідентифікатора, що виробляє апроксимацію перехідної характеристики (криву розгону), і адаптера, в якому проводиться розрахунок значень настрайовувальних параметрів регулятора. Разом з тим, часто при пуско-налагоджувальних роботах процес ідентифікації здійснює оперативний персонал за допомогою спостереження реакції системи на поетапний вплив, що здійснюється регулюючим органом. Фіксуючи вид перехідної характеристики і маючи з досвіду уявлення про характер впливу параметрів збурення (λ) на вид процесу, виробляють відповідні поступки значень параметрів об'єкта. Слід зазначити, що оцінка перехідною характеристики замкнутого контуру в реальних умовах роботи систем регулювання має, як правило, нестабільний характер. Якщо експеримент повторювати кілька разів, то будуть виходити результати які досить сильно відрізняються, що може призвести до неадекватної математичної моделі об'єкта і, як наслідок, до незадовільних показників якості. Для удосконалення структури на рис. 5.1, пропонується ввести супервізорного супроводу, тобто оператора. Оператор або ОПР проводить стеження за значеннями ідентифікатора і адаптера і здійснює

коригування їх алгоритмів. Для полегшення процесу налаштування ідентифікатора і адаптера і можливості введення адаптації всього процесу управління, рекомендується скористатися математичним апаратом інтелектуальних систем.

Як приклад реалізації запропонованої структури інтелектуальної ідентифікації та адаптації, приймається об'єкт управління - пароперегрівач, що працює на морському судні. Контрольованим параметром АСР є температура пари, що надходить в суднову паротурбінну установку і на нагрів палива.

Виходячи з експериментальних характеристик пропонується створення ННМ, що враховує думку експертів, здатну до апроксимації параметрів для всіх можливих режимів навантаження, екстраполяції даних, а також до самонавчання на основі досвіду експертів і алгоритму зворотного поширення помилки.

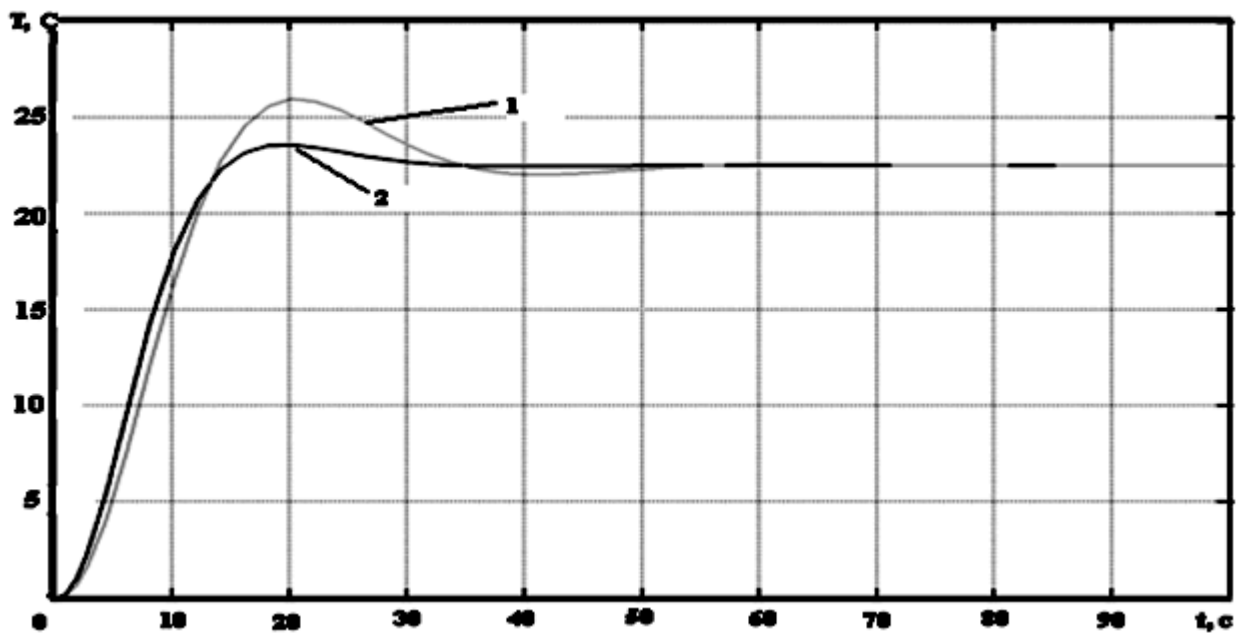


Рис. 5.2 Перехідні процеси АСР по каналу завдання

1 – діюча АСР, 2 – запропонована адаптивна АСР

ННМ, що діє на основі алгоритму Сугено, створюється виходячи з виконання ряду етапів. Ключовим етапом є створення нечіткої бази знань, яка описує властивості об'єкта управління виходячи з досвіду і знань експерта-технолога.

Структура ННМ виду ANFIS реалізована на основі навчальної вибірки.

У пакеті Matlab (Simulink) проведено імітаційний експеримент порівняння запропонованої і діючої систем регулювання. Очікуваний аперіодичний перехід-

ний процес запропонованої АСР показано на рис. 5.2, процес 2.

Апробована запропонована структура динамічної ідентифікації складних об'єктів управління, на прикладі парогенератора. Порівняльний аналіз показників якості перехідних процесів діючої АСР і запропонованої системи, продемонстрував в 2 рази менший час регулювання і в 6 разів менше значення закидання у нейромережевої системи. Можна вказати, що інтелектуальна система ідентифікації здатна до самонавчання на відміну від традиційних методів апроксимації [122], що також сприяє її успішної адаптації в виробничих умовах.

Запропоновано структуру нейро-нечіткої системи (ANFIS) параметричної ідентифікації та адаптації настроювальних параметрів ПІ - регулятора. Реалізована в спеціалізованому пакеті Matlab, нейро-нечітка мережа дозволила розрахувати параметри передавальних функцій об'єкта по каналу управління при різних навантажувальних характеристиках об'єкта. Апробація запропонованої структури в середовищі Simulink дозволила отримати очікуваний аперіодичний перехідний процес з мінімальним часом регулювання.

Використання апарату нейронних мереж, в яких висновки виробляються на основі теорії нечітких множин, дозволяє успішно провести ідентифікацію ССКМ, що функціонують навіть в динамічних режимах, властивих маневруванням судна або впливу несприятливої навігаційної обстановки.

5.2 Розробка системи мікроклімату з використанням нейро-нечіткої мережі

Багато з сучасних мікрокліматичних систем включають невизначені і нелінійні характеристики, складні для моделювання динамічні елементи, неконтрольовані шуми і перешкоди, безліч зворотних зв'язків та інші фактори, що ускладнюють реалізацію ССКМ. За останні два десятиліття нові методи управління розвивалися на основі сучасної та класичних теорій управління [98]. Як сучасна (зокрема, технології адаптивного і оптимального управління), так і класична теорія управління в значній мірі ґрунтувалися на ідеї лінеаризації систем. Однак, практично прийнятними до впровадження без подальшої адаптації можуть бути

тільки моделі з низькою чутливістю по параметрам. Забезпечити належну якість для нелінійних і складних невизначених об'єктів управління досить складно.

Останнім часом в АСР все ширше почали застосовуватися нейронні мережі (НМ) [116-130]. Відомо, що нейронні мережі здібні навчатися на основі співвідношень «вхід-вихід», виробляти успішну апроксимацію і екстраполяцію і вони можуть забезпечити більш прості рішення для складних завдань управління. Крім того, нейронні мережі в своїй основі є нелінійними системами, придатними для вирішення завдань управління, принципово пов'язаних з наявністю нелінійних характеристик [135]. Традиційні методи управління не забезпечують вирішення подібних завдань. Таким чином, останнім часом інтелектуальне управління що реалізує апарат нейронних мереж, стало досить ефективним для вирішення поставлених завдань [5, 26].

В інженерному контексті інтелектуальне управління повинно мати наступні властивості: здатність до навчання і адаптивність; живучість; простий алгоритм управління і «дружній до користувача» людино-машинний інтерфейс; здатність до включення нових компонентів, що забезпечують найкращі рішення в умовах обмежень, що накладаються технічними засобами і процесами.

Можливо, дані переваги нейронних мереж можна вважати найбільш важливими з точки зору теорії управління.

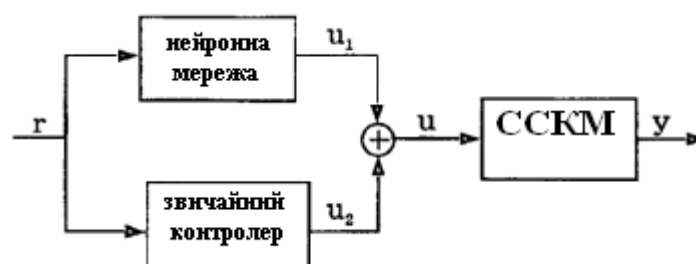


Рис. 5.3. Паралельна схема нейроконтролера

З вище наведених експериментів випливає, що навіть якщо вдається розробити хорошу загальну стратегію управління, може виникнути необхідність в її перенастроюванні з метою отримання кращих практичних результатів. Виходячи з цього, актуальним стає дослідження паралельних нейроконтролерів.

Паралельна архітектура нейронного управління показана на рис. 5.3, де в якості контролера використовується ПД-контролер. Прикладом такої схеми нейронного управління є метод навчання помилково зворотного зв'язку, запропонований Кавато (Kawato) та інших в роботах [134-143]. Нейроконтролери паралельного типу використовуються для настройки керуючого вхідного сигналу u_1 , який є вихідним сигналом звичайного контролера. Налаштування виконується таким чином, щоб вихідний сигнал об'єкта управління y якомога точніше відповідав заданому опорному сигналу r . Завдання нейроконтролера паралельного типу полягає в тому, щоб відкоригувати керуючий вплив u_2 за допомогою сигналу u_1 , якщо він не забезпечує очікуваного результату тобто провести адаптацію.

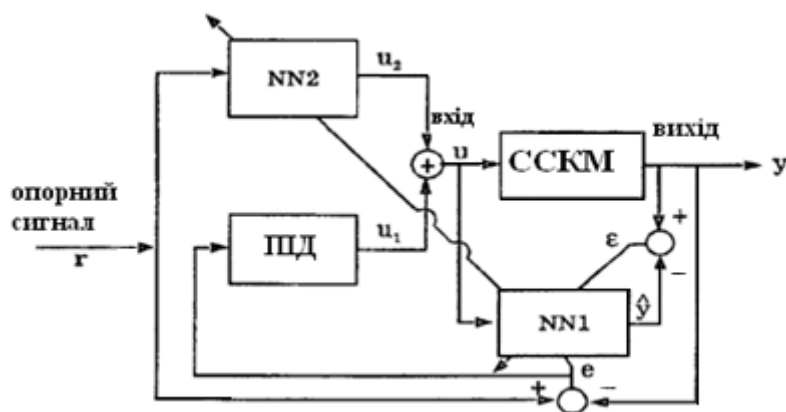


Рис. 5.4. Нейроконтролер паралельного типу з ПД - регулятором

Загальна конфігурація управління для нейроконтролера паралельного типу показана на рис. 5.4. На цій схемі блок NN 1 являє собою нейронну мережу для об'єкта управління, яка проводить оцінку $\hat{y}$ вихідної координати об'єкта управління y . Керуючий сигнал u_2 , що представляє собою вихідний сигнал нейронної мережі NN2, використовується для корекції сигналу u_1 , створюваного звичайним контролером, тобто NN2 виконує функції адаптера, а NN1 - ідентифікатора.

Корекція виконується таким чином, щоб забезпечити мінімізацію неузгодженості між опорним сигналом і виходом об'єкта управління. Таким чином, блок NN1 використовується для емуляції якобіана системи, необхідного для отримання еквівалентної помилки на виході блоку NN2.

Позначимо через e неузгодженість (помилку) між опорним сигналом r і фактичним вихідним сигналом об'єкта управління y . Необхідно навчити мережу NN2 таким чином, щоб вона могла мінімізувати середньоквадратичну помилку. Позначимо її через E і визначимо у вигляді:

$$E = \frac{1}{2}(r - y)^2 \quad (5.1)$$

На рис. 5.4. u_2 означає вихід блока NN2. Припустимо, що використовується тришарова нейронна мережа, на вхід якої надходить сигнал $r_i(t)$, а на виході з'являється сигнал $O_k(t)$.

$$E = \frac{1}{2}(y)^2 \quad (5.2)$$

Щоб отримати алгоритм навчання, застосуємо метод найшвидшого спуску для мінімізації помилки E . Одержимо

$$\Delta w_j(t+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_j} + \alpha \Delta w_j(t), \quad (5.3)$$

$$\Delta w_i(t+1) = -\eta \frac{\partial E}{\partial w_i} + \alpha \Delta w_i(t), \quad (5.4)$$

де η і α — швидкість навчання і миттєвий член відповідно. Через w_j позначений вага зв'язку між j -м нейроном прихованого шару і вихідним нейроном вихідного шару, а через w_i — вага зв'язку між вихідним нейроном вихідного шару і i -м нейроном прихованого шару. Через Δw позначено приріст ваги зв'язку, що задається виразом

$$net. = \sum_j w_j O_j + \theta., \quad (5.5)$$

Використовуючи сигмовидну функцію, відношення «вхід-вихід» для нейрона запишемо в такій формі:

$$O.(t) = f(net), \quad f(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}}, \quad (5.6)$$

На підставі поданого вище алгоритму було розроблено НМ паралельного типу і проведені комп'ютерні експерименти (рис. 5.2) за визначенням її ефектив-

ності, в умовах впливу глибоких зовнішніх і внутрішніх збурень, при управлінні ССКМ, з передавальною функцією виду:

$$W_{z-y}(s) = \frac{1.5}{65s+1} e^{-5s} \quad (5.7)$$

Навчання нейро-мережевого контролера НМК і емулятора проводилося на моделі адаптивного ПІД - регулятора з ручним коригуванням його параметрів (рис. 5.5)

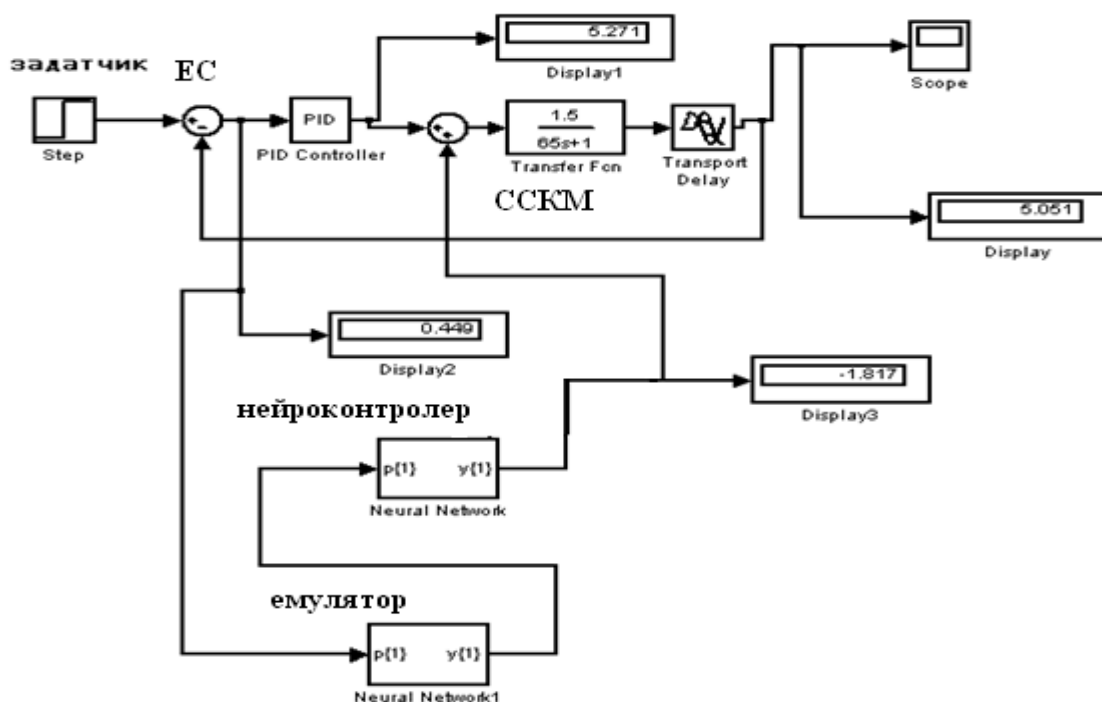


Рис. 5.5 Схема нейромережевого управління з емулятором і ПІД - регулятором

Перехідний процес на виході об'єкта управління показаний на рис. 5.6.

Час регулювання $T_p = 200$ с, процес аперіодичний і задовольняє вимогам до технологічних процесів ССКМ. Дослідження показали, що при зменшенні $T_{об} < 35$ с, і виникненні автоколивань, НМК відключається і в контурі залишається тільки ПІД - регулятор (рис. 5.5) успішно компенсує параметричні збурення $T_{об}$ в діапазоні (5-35 с) на відміну від НМК послідовного типу. Перехідний процес ПІД - системи регулювання показаний на рис. 5.6. Процес аперіодичний $T_p = 150$ с. Таким чином, ПІД - регулятор успішно компенсує недоліки НМК. Також як і НМК ефективний у випадках значних збільшень параметрів об'єкта управління.

На мою думку як навчальні вибірки також можуть бути використані значення параметрів показників якості процесу регулювання, наприклад, часу регулювання або перерегулювання. Тоді НМК при значній навчальній вибірці може управляти об'єктами другого порядку або об'єктами без самовирівнювання, а також успішно компенсувати вплив зовнішніх збурень. Розглянемо це твердження.

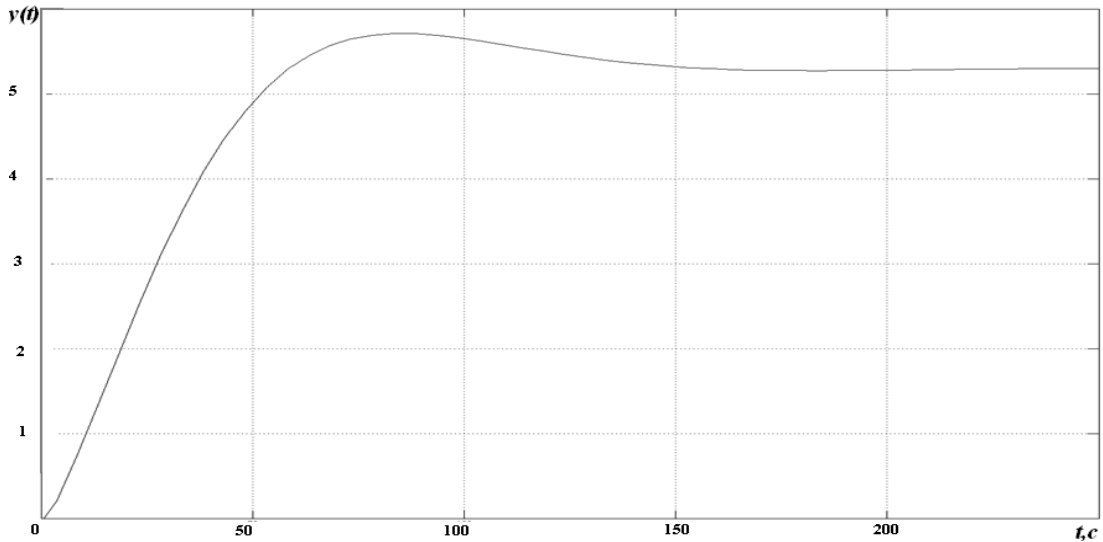


Рис. 5.6 Перехідний процес ПІД системи регулювання
з об'єктом $W(s) = 1.5/(25s+1)e^{-1.5s}$

Ускладнимо об'єкт управління, додавши в схему другого інерційну ланку (структурну невизначеність) і канал зовнішнього збурення (рис. 5.7)

Провівши комп'ютерний експеримент по варіюванню значень параметрів об'єкта випадковим чином по каналах завдання і збурення (сигнальні, параметричні і зовнішні збурення) отримали наступну вибірку (табл. 5.1)

Таблиця 5.1.

Навчальна вибірка для НМК

Параметри об'єкта	$T_1 = 45$ $T_2 = 15$ Коб= 1.5	$T_1 = 65$ $T_2 = 25$ Коб= 1	$T_1 = 95$ $T_2 = 45$ Коб= 2.5	$T_1 = 25$ $T_2 = 5$ Коб= 0.5	$T_1 = 5$ $T_2 = 2$ Коб= 3	Коб=3.5 $T_1 = 5$ $T_2 = 2$	$T_N=15$ $K_N=3$	$K_N=2$ $T_N = 5$
Помилка (e)	-0.0083	-0.0022	-0.28	-0.018	-0.0014	0.0039	0.0038	0.0017
Управління u)	-4.93	-4.94	-3.77	-6.24	-4.93	-2.087	-2.11	-3.83

Початкові параметри ПІД - регулятора склали: $K_p = 3.2$; $T_i = 0.05$; $K_6 = 39$. Надалі для отримання оптимальних перехідних процесів була проведена адаптація з використанням методу синусоїдальних коливань з ручним - експертним коригуванням. Аналіз експериментів [5] дозволяє стверджувати, що навчена НМ компенсує збурення на всьому діапазоні зміни значень параметрів об'єкта, а також при значних передавальних функцій по каналах управління і збурення виходять за діапазон вибірки табл. 5.1, (до 25%), що вказує на успішні апроксимуючі і екстраполюючі властивості НМК. Приклад аперіодичного перехідного процесу НМК з $T_p = 40$ с, при випадкових значеннях параметрів об'єкта по різних каналах представлений на рис. 5.7. На думку автора, ПІД - регулятор може виконувати функції резервного елемента налаштованого на найбільш несприятливі збурення в локальній структурі нейромережевої ССКМ.

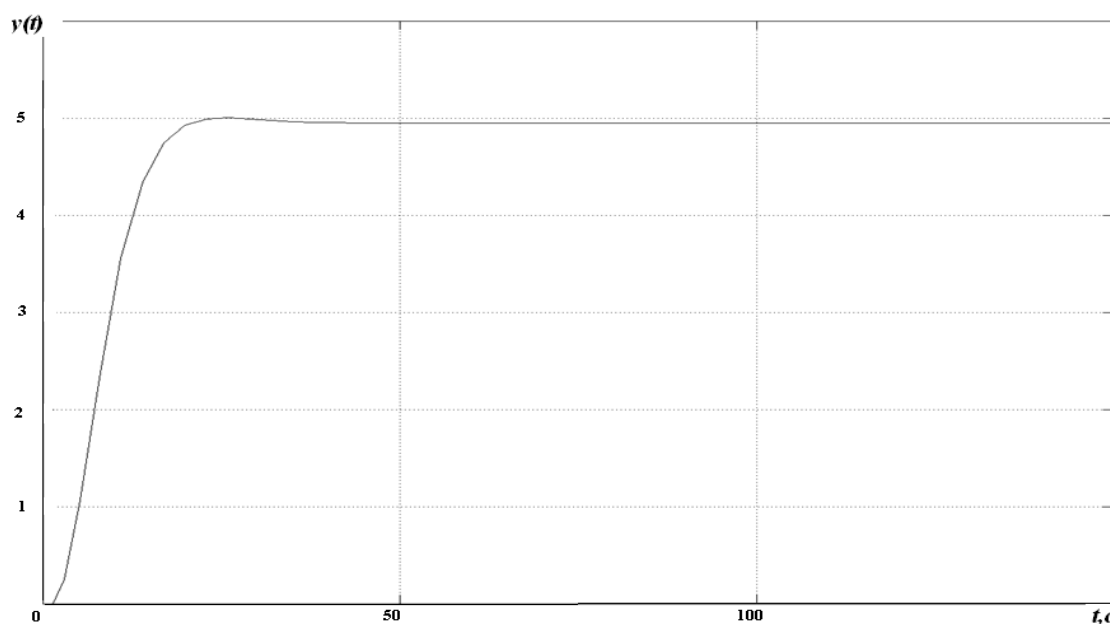


Рис. 5.7 Перехідний процес за каналом завдання з об'єктом: $W_{z-u}(s) = (1.5/5s+1)(1/5s+1)e^{-1.5s}$ при дії каналу зовнішнього збурення: $W(s)_{N-u} = 2/(15s+1)$

Слід зазначити, що незважаючи на досягнуті успіхи, можливості нейромережевої АСР також обмежені в виробничому плані в силу складності її налаштування і навчання механіком, особливо в умовах обмеженого часу на судні в навігаційних умовах. Виходячи з цього, пропонується розглянути перспективну задачу наукового дослідження - аналіз ефективності спільної (паралельної роботи)

НМК і нечіткого регулятора. Розглянемо особливості даної роботи докладніше. Відомо, що фазі-контролери успішно зарекомендували себе при роботі з об'єктами в умовах невизначеності. Проведемо навчання НМ на основі моделювання фазі-контролера. Зазначимо, що дана задача розглядається в області інтелектуального управління вперше.

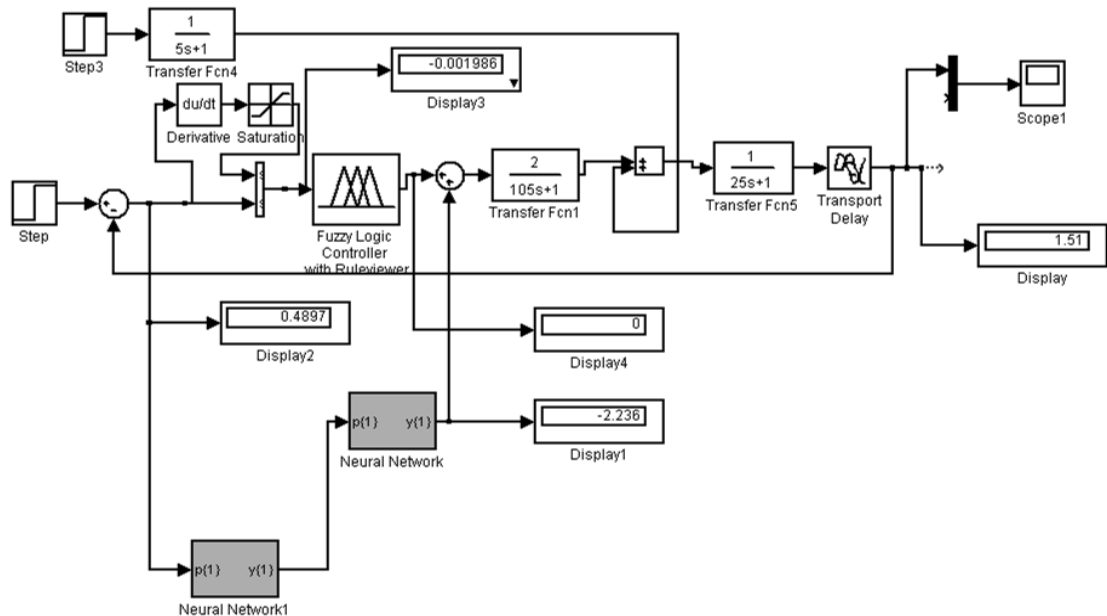


Рис. 5.8. Комп'ютерна модель спільної роботи НМК і НР (фазі – нейромережева комбінована система)

З метою вимірювання вхідних і вихідних сигналів в середовищі Simulink проводиться експеримент зі зміни значень функції приналежності ФП об'єкта і відповідної підстроюванням нечіткого регулятора (НР) для отримання задовільної характеристики перехідного процесу регулювання. При настройці НР параметрами що підлягають варіюванню є: універсум ФП, тип ФП, метод дефазифікації. Комп'ютерна модель НМК і НР представлена на рис. 5.8.

Налагоджена НМК за прикладом роботи адаптивного ПІД - регулятора спільно з НР при впливі випадкових параметричних, сигнальних і структурних збурень демонструє наступний перехідний процес (рис. 5.9). Аперіодичний процес з $T_p = 110$ с, показаний при змінах значень передавальних функцій об'єкта по каналах завдання і збурення. Слід зазначити, що окремо працюючий НР демон-

струє також аперіодичний процес, але з великим часом регулювання і залишковою помилкою.

Проведемо порівняльний аналіз роботи нейронних паралельних систем з ПІД - регулятором і нечітким регулятором при впливі глибокого параметричного збурення по каналу завдання (рис. 5.9). Відзначимо, що значення параметрів передавальної функції об'єкта по каналу завдання значно виходять за діапазон навчальної вибірки НМК (табл. 5.2). Даний експеримент слід вважати перевіркою на стійкість АСР ССКМ при мінімальному піковому навантаженні (аварійний режим роботи).

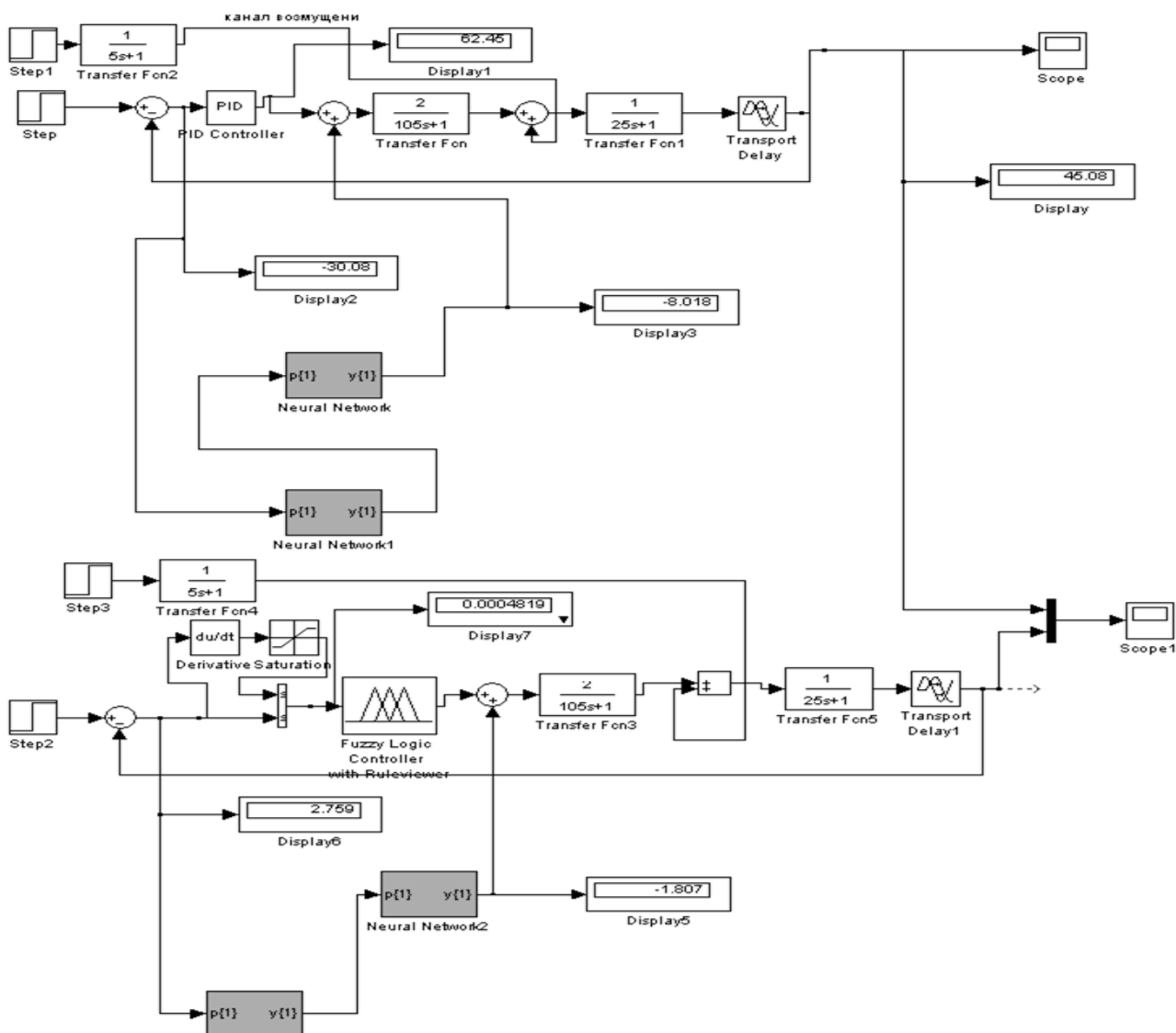


Рис. 5.9 Комп'ютерні моделі НМК з ПІД і нечіткими регуляторами

Перехідні процеси нейромережових систем управління по каналу завдання з об'єктом виду: $W_{z-y}(s) = \frac{2}{105s+1} \cdot \frac{1}{25s+1} \cdot e^{-7s}$ показані на рис. 5.10.

Аналіз виду перехідних процесів (рис. 5.10) демонструє перевагу НМК що працює в парі з нечітким регулятором, що можна пояснити, на мою думку, наявністю універсумів функцій приналежності нелінійного виду, а також базою знань з 49 правилами продукцій, які детально описують відхилення помилки регулювання і її похідною на значному діапазоні. Аперіодичний процес НМК з НР володіє має час регулювання: $T_p = 100$ с, нейросистема з ПД також є стійкою, але має значне перше відхилення $\Delta Y_1 = 2$, і $T_p = 250$ с. Таким чином, для технологічних об'єктів схильних до впливу частих і глибоких збурень можна рекомендувати систему НМК з НР. Експерименти продемонстрували успішність запропонованої системи управління із самоорганізацією.

Відомо, що в самоорганізованих системах в процесі функціонування відбувається формування алгоритму управління (його структури і параметрів), що дозволяє оптимізувати систему з точки зору поставленої мети управління або показників якості перехідного процесу. Такого роду завдання виникає, наприклад, в умовах зміни структури і параметрів об'єкта управління в залежності від режиму функціонування, коли апіорної інформації недостатньо для визначення поточного режиму. При широкому класі можливих структур об'єкта важко забезпечити оптимальний вибір єдиної структури алгоритму управління, здатної забезпечити замкнутій системі досягнення цілей у всіх режимах функціонування. Таким чином, мова йде про синтез вільної структури регулятора. Очевидна складність постановки завдання не дозволяє сподіватися на прості алгоритми її вирішення, а отже, і на широке впровадження в даний час таких систем в практику. Однак, незважаючи на скептичний погляд ряду вчених [99-117], мною пропонується адаптивна інтелектуальна система паралельного типу що самоорганізується. Два паралельно працюючих регулятора (НР і НМК) успішно компенсують зміни параметрів об'єкта в діапазоні невизначеною апіорної інформації.

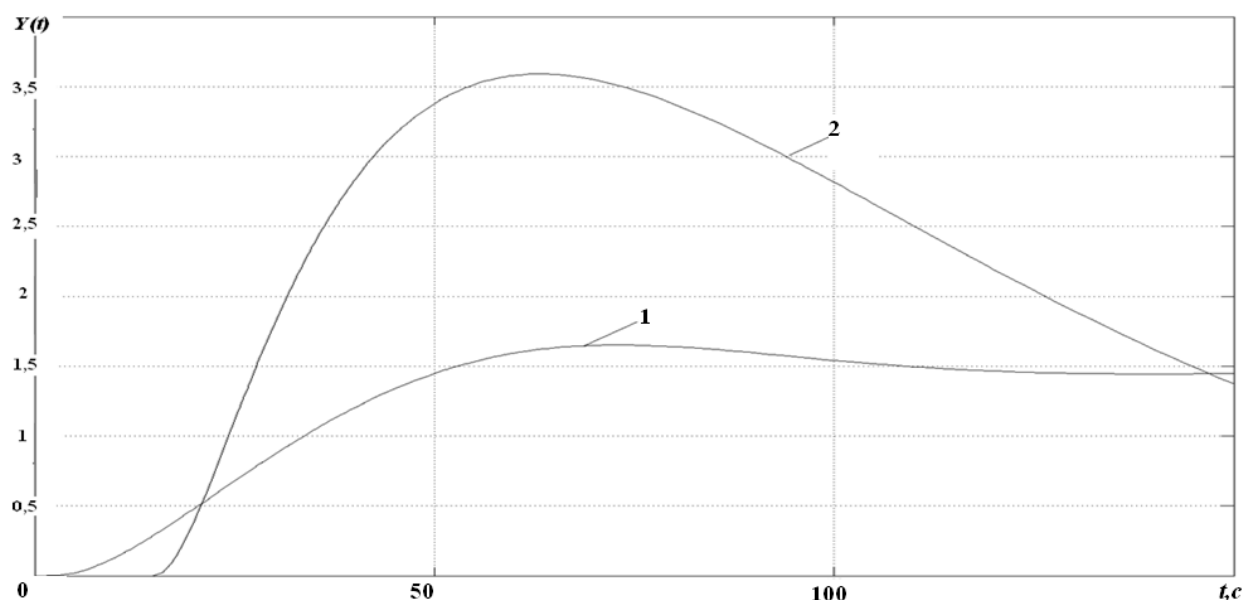


Рис. 5.10. Перехідні процеси по каналу завдання 1- процес:
НМК з ПІД і НР, 2 - процес НМК з ПІД

5.3 Вдосконалення та навчання розробленої гібридної структури для використання на судні

5.3.1 Розробка алгоритму функціонування адаптивної системи

Розробимо нечітку модель для ССКМ.

Таблиця 5.2

База правил нечіткого контролера

Помилка $e(t)$	Похідна від відхилення, $e'(t)$						
	NB	NS	NM	Z	PM	PS	PB
	$U(t)$ - управління						
NB	NB	NB	NB	OS	Z	PM	PS
NS	NS	NS	NS	NM	PM	PM	PS
NM	NS	NM	NM	Z	Z	PM	PS
Z	NS	NM	NM	Z	PM	PM	PS
PM	NM	NM	Z	Z	PM	PM	PS
PS	NM	NM	Z	PM	PS	PS	PS
PB	NS	NM	Z	PS	PS	PB	PB

При розробці нечіткої моделі визначені нечіткі множини помилки $e(t)$, швидкості її зміни $e'(t)$ і керуючого впливу $u(t)$; вищевказані нечіткі множини описані за допомогою лінгвістичної мови, де лінгвістичні змінні (ЛЗ) наступні: NB - негативно велике, NS - негативно середнє, NM - негативно мале, Z - нульо-

ве, PS - позитивно середнє, PM - позитивно мале, PB - позитивно велике [6]. Продукційна база правил виду: $\text{ЯКЩО } e(t) = \text{NS I } e'(t) = \text{Z TO } u(t) = \text{NM}$ представлена у вигляді таблиці 5.2. Для апробації запропонованої нечіткої каскадної системи управління ССКМ і проведення аналізу ефективності її роботи у порівнянні з традиційною, що складається з двох послідовно включених ПІ - регуляторів, були проведені віртуальні експерименти в середовищі Matlab (рис. 5.5). Об'єкт 3-го порядку з запізненням у вигляді інерційних ланок є моделі двох калориферів, камери зрошення і вентилятора.

Підводячи підсумки експерименту можна зробити висновки, що перехідні процеси з виходу об'єкта, отримані на осцилографі (рис. 5.12), демонструють перевагу фазі-системи (аперіодичний процес; $T_r = 65$ с) (крив. 1) в порівнянні з типовою АСР ($\Delta T_1 = 0,3$; $T_p = 75$ с) крив.2. Таким чином, запропонована нечітка система управління успішно підтримує задані параметри повітря і може бути використана при управлінні ССКМ морського судна

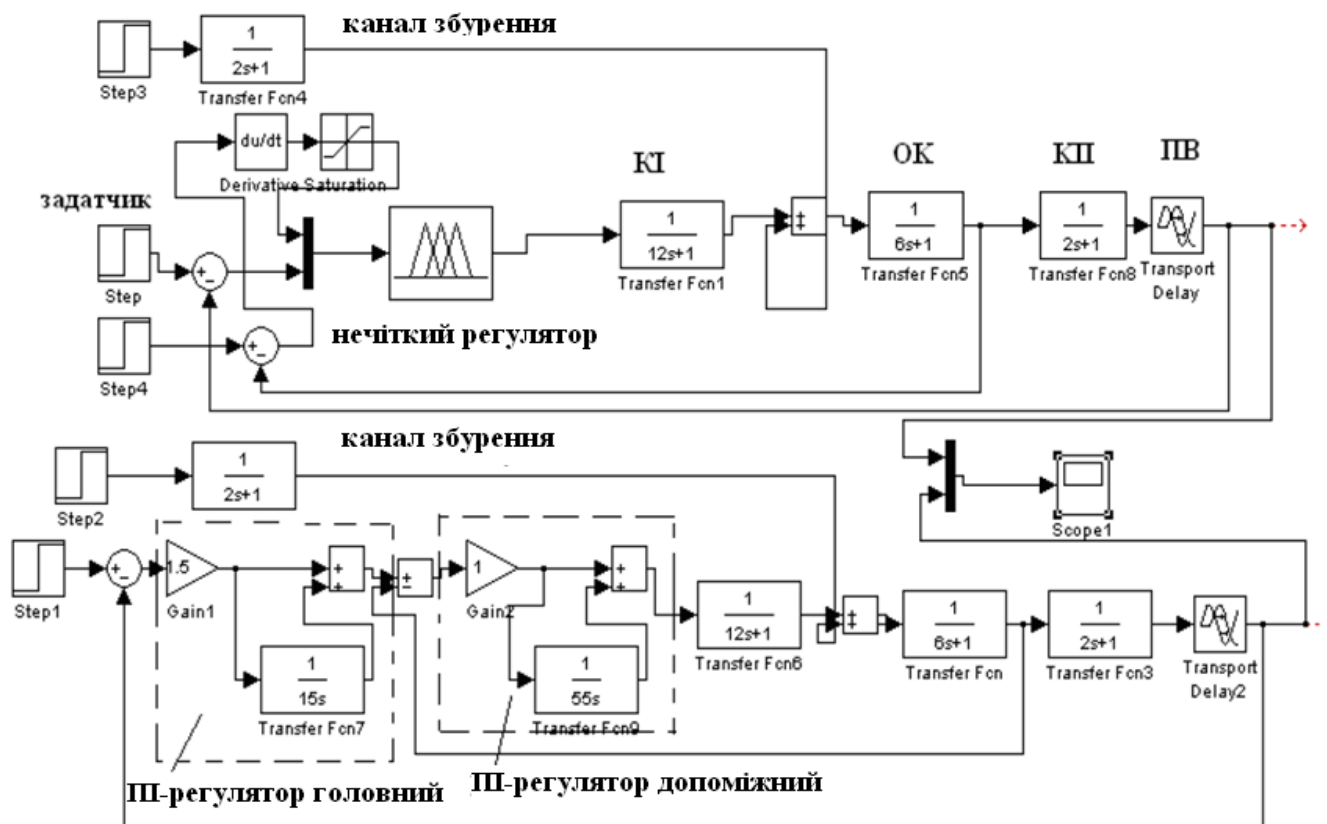


Рис. 5.11 Структурні схеми нечіткої і типової каскадних АСР ССКМ по каналу завдання при дії каналу збурення

Коротко систематизуючи все вищевикладене, можна відзначити основні переваги запропонованого нового виду управління ССКМ в порівнянні з традиційною адаптацією: простота настройки фазі - регулятора (доступність для розуміння обслуговуючому персоналу), відсутність необхідності в побудові складних математичних моделей, відсутність необхідності в спеціальних пристроях для адаптації (генераторах, пробних перегонах тощо), дешевизна обладнання, економія електроенергії за рахунок зменшення часу регулювання T_p , а також висока точність підтримки заданих параметрів.

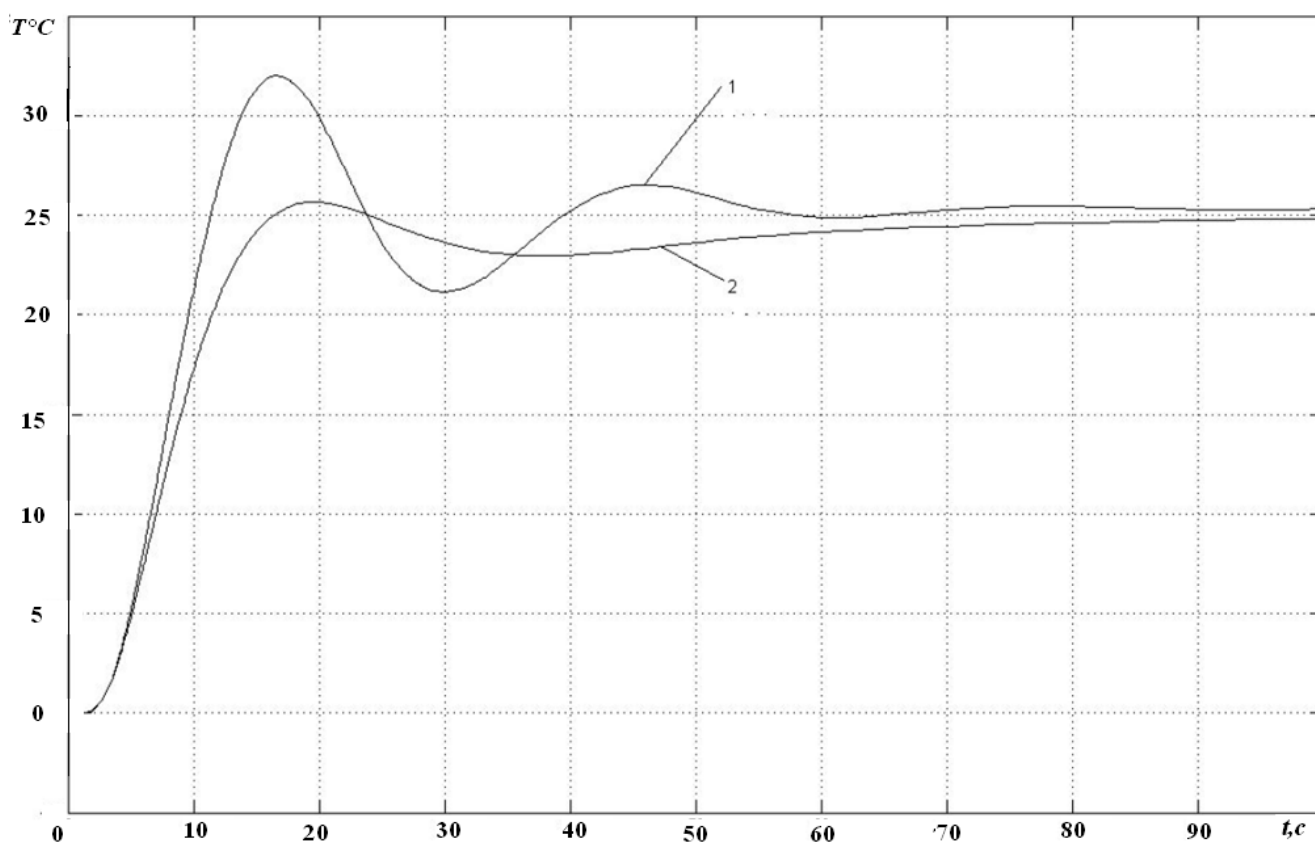


Рис. 5.12. Перехідні процеси АСР ССКМ:

1 – каскадна з ПІ – регуляторами; 2 – нечітка адаптивна

Запропонована нечітка система регулювання була вдосконалена шляхом розробки і використання нових алгоритмів, а також розширення функціональних можливостей системи (регулювання повітрообміну, вологості, хіміко-біологічного складу повітря тощо) і в результаті виявилось можливим розробити систему підтримки прийняття рішень (СППР). Також перспективним в цій галузі може бути застосування інтелектуально-адаптивних АСР на базі нейронних ме-

реж (НМ) і генетичних алгоритмів і їх спільного застосування у вигляді гібридних мереж (ГС). Є ряд робіт, що показують, що використання апарату гібридних мереж, в яких висновки виробляються на основі теорії нечітких множин, успішно дозволяють провести ідентифікацію об'єктів навіть функціонують в умовах невизначеності. Також можна відзначити, що проведений аналіз методів інтелектуального управління стосовно до СППР судна дозволяє зробити висновок про перспективність використання нейро-нечіткої логіки для підвищення якості управління судновими автоматизованими системами. Такі інтелектуальні системи володіють властивостями самонавчання і здатністю змінюватися в залежності від обставин. Наукова задача пошуку нових, більш ефективних методів адаптивного регулювання з використанням досвіду експерта АСР залишається відкритою. Була запропонована структура гібридної адаптивної системи регулювання (рис. 5.13). На малюнку введено такі позначення: K - коефіцієнт передачі об'єкта, T - постійна часу об'єкта, τ - запізнювання, n - порядок об'єкта, y - вихідний параметр.

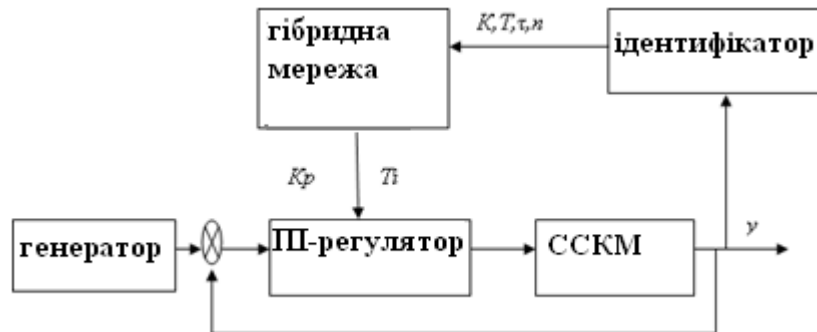


Рис. 5.13 Структура гібридної АСР ССКМ

Структура адаптивної настройки ПІ-регулятора, заснована на використанні активних частотних методів ідентифікації та визначенні оптимальних параметрів ПІ-регулятора гібридною мережею. Застосування частотних методів дозволило забезпечити перешкодозахищеність алгоритму та раціонально організувати активний експеримент на діючій системі в плані підтримки області стійкості. Ідентифікація здійснювалася шляхом подачі на вхід системи двох синусоїдальних сигналів від генератора на розрізняються між собою частотах, що належать до

суттєвого діапазону [7]. Структура передавальної функції об'єкта складається з декількох інерційних ланок із запізненням виду: $W(s) = \frac{K}{(T(s)+1)^n} e^{-\tau(s)}$ зі значеннями, що змінюються протягом часу у певному діапазоні в залежності від виду навантаження або режиму роботи ССКМ. Ідентифікатор визначає значення параметрів об'єкта і його порядок. Надалі дані значення використовуються оптимізатором у вигляді нейро-нечіткої мережі, що діє за алгоритмом Сугено для пошуку оптимальних значень параметрів ПІ-регулятора (K_p , T_i). Навчання гібридної мережі повинно проводитися з урахуванням думки експертів - наладчиків.

5.3.2 Розробка нейро-нечіткої системи

Нейро-нечітка мережа (ННМ) або гібридна мережа (ГМ) є багатошаровою нейронною мережею без зворотних зв'язків. У такій мережі входи (K , T , τ) представлені у вигляді лінгвістичних змінних (мале значення, середнє, велике). У програмі Matlab (ANFIS) був проведений процес побудови адаптивної системи нейро-нечіткого виводу (рис.5.14) для апроксимації залежності що представляє причинно-наслідковий зв'язок між K , T , τ , K_p , T_i . Виходячи з рекомендацій і комп'ютерних експериментів у середовищі MatLab (Fuzzy Logic Toolbox) був обраний і тип функцій приналежності (трапецеїдальний і трикутний), що описує вхідні значення. У процесі навчання було використано кількість циклів рівне 40 і обраний метод навчання - зворотного поширення помилки. Таким чином, гібридною мережею було реалізовано відображення параметрів ПІ-регулятора за характеристиками об'єкта регулювання: $S^k = f(x^k) = f(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k)$, $k = 1, 2, \dots, N$, за наявності навчальної множини $((x^1, y^1), \dots, (x^N, y^N))$ що знаходиться у табл.5.2.

Для моделювання невідомої функції f використовується алгоритм Сугено з базою знань наступного типу: P_i : ЯКЩО $x_1 \in A_{i1}$ І $x_2 \in A_{i2}$ І $x_1 \in A_{in}$, ТО $T_i = S_i$, $i=1, 2, \dots, m$, де A_{ij} – нечіткі множини трикутної форми описують висловлювання експерта (мале (М), середнє (С), велика (Б)), S_i - вихідні значення об'єкта. Ступінь істинності μ правила i визначається за допомогою операції кон'юнкції. Вихід не-

чіткої системи визначався методом центру ваги: $T_{ик} = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i}$.

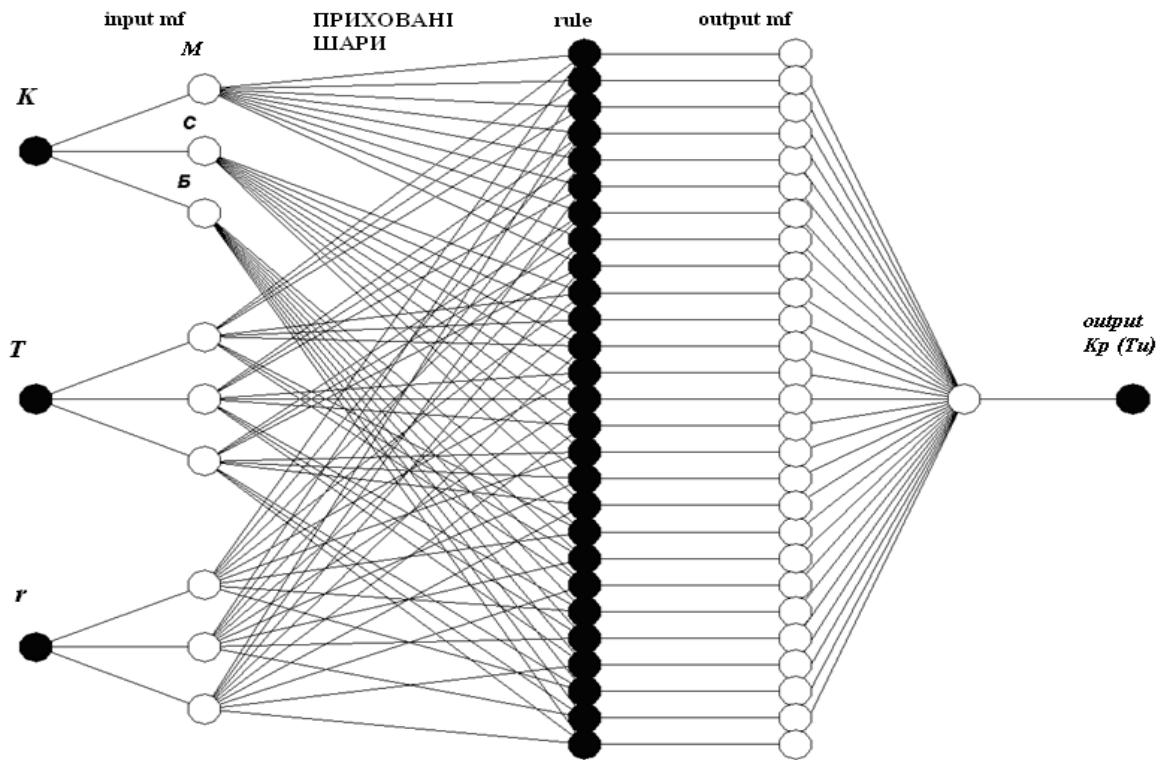


Рис. 5.14. Структура запропонованої гібридної мережі

Після навчання ГМ і подачі на її вхід значень параметрів об'єкта ($K_{об} = 8,27$; $T_{об} = 3,05$; $\tau = 0.928$) відсутніх в тестовій вибірці (табл.5.2) і визначених у результаті активної ідентифікації, мережа рекомендувала значення настрійок ПІ-регулятора: $T_i = 5,15$; $K_p = 0,12$, а традиційний метод КЧХ (рис.5.15) $K_p = 0,21$, $T_i = 5,649$. Комп'ютерні експерименти з апробації значень настроювань адаптивного ПІ-регулятора проводилися за допомогою структури наведених на рис. 5.15.

У програмі MatLab (Simulink) були розроблені моделі каскадних АСР з ПІ-регуляторами і інерційними об'єктами третього порядку з запізненням (модель по каналу регулювання) з нелінійним елементом (обмеження на керуючий вплив) (рис. 5.15). На вхід системи подавався одиничний стрибок. При зміні значень параметрів передавальної функції об'єкта у випадках переходу на піковий або пусковий режим (моделюванні дії параметричного збурення) та встановленні нових значень параметрів об'єкта $K_{об} = 13,7$; $T_{об} = 5,4$; $\tau = 1.1$, ГМ рекомендувала

настройки: $K_p = 0,81$; $T_i = 6,33$, а традиційний частотний метод за допоміжною функцією: $K_p=0,021$; $T_i = 3,55$. Підстановка цих значень у схему програми Simulink дозволила отримати наступні перехідні процеси (рис.5.16).

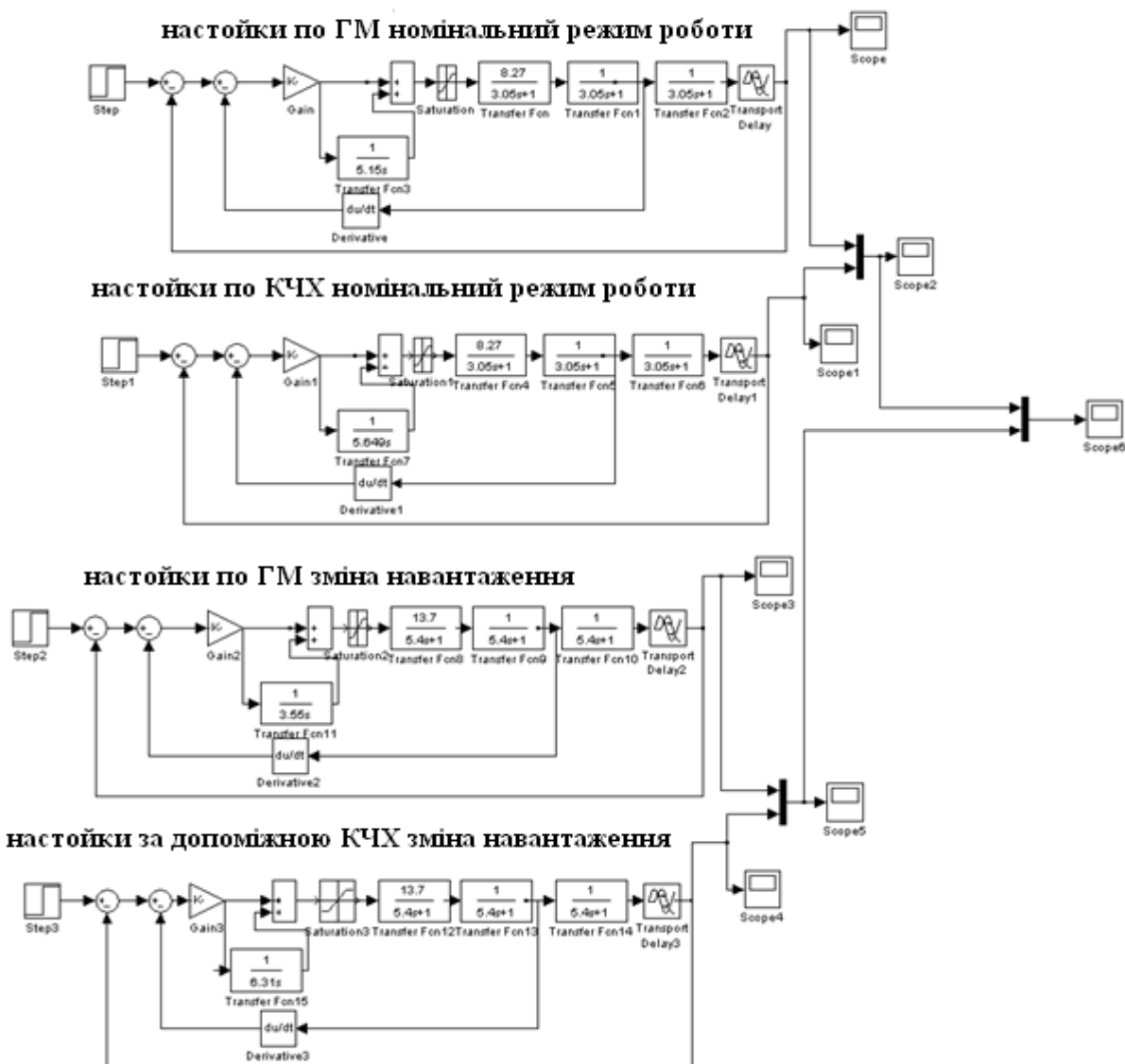


Рис. 5.15 Схема адаптивних АСР з ПІ-регуляторами
і нелінійними елементами (Saturation)

З аналізу перехідних процесів рис. 5.16 (1,2) можна зробити висновок, що при номінальному або стабільному режимі роботи об'єкта, гібридний і традиційний ПІ-регулятори демонстрували однакові показники якості (час регулювання $T_r = 45c$), однак при впливі параметричного збурення (3, 4) гібридна система володіє меншим часом регулювання ($T_{r1} = 138c$), в порівнянні з традиційною адаптивною АСР ($T_{r2} = 173c$), також перерегулювання гібридної АСР $G^{rp} = 28\%$, тра-

диційної $G^{TP} = 50\%$, ступінь загасання гібридної $\Psi^{TP} = 0,91$, традиційної $\Psi^{TP} = 0,68$, тобто запропонована гібридна АСР є оптимальною і енергоекономною, а традиційна каскадна АСР вимагає додаткової адаптації.

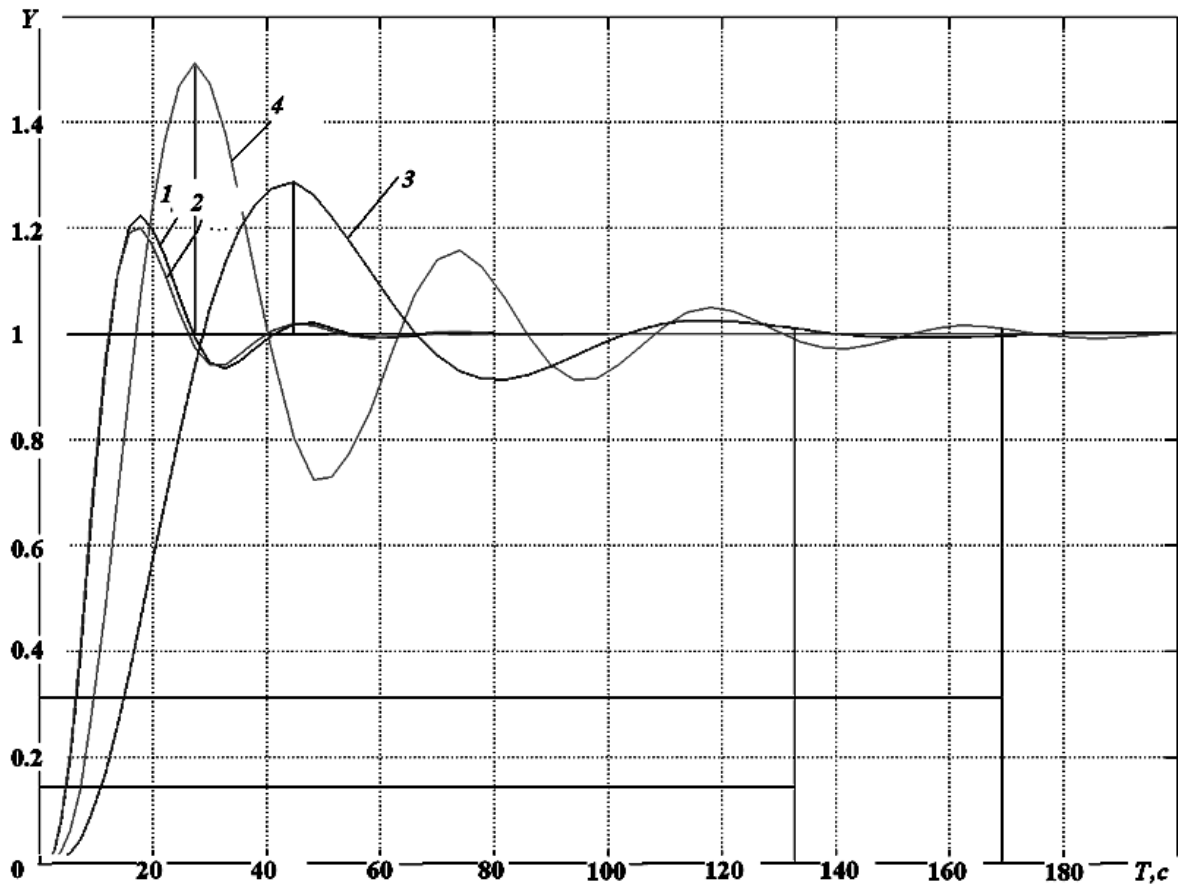


Рис. 5.16 Перехідні процеси по каналу регулювання: 1 – традиційної і 2 – нейро-нечіткої АСР (при номінальному навантаженні), 3 - нейро-нечіткої і 4 – традиційної АСР (при зміні навантаження).

Комп'ютерні експерименти в програмі MatLab (Simulink) з варіюванням значень параметрів передавальної функції об'єкта продемонстрували в низці випадків неефективність традиційного адаптивного підходу (АСР була не ефективною) на відміну від алгоритму ГМ, перехідні процеси якої були оптимальними. Виходячи з отриманих результатів можна зробити висновок, що запропонована інтелектуально-адаптивна АСР температури має наступні переваги в порівнянні з традиційними методами адаптації за КЧХ і автоколивань що використовуються в даний час в АСР [79-89]:

швидкістю руху знаходження оптимальних налаштувань ПІ-регулятора кас-

кадної АСР з можливістю їх апроксимації та екстраполяції і при дії невизначених збурень;

меншим першим відхиленням і часом перехідного процесу регулювання;
можливістю оптимального функціонування каскадної АСР у всіх режимах;
можливістю використання в процесах адаптації різних АСР з ПД і ПІД-регуляторами в ССКМ.

5.3.3 Впровадження гібридної мережі системи мікроклімату як підсистеми підтримки прийняття рішень

Розділ присвячений аналізу використання адаптивних мереж з нейронечітким висновком при ідентифікації об'єктів управління. Використання гібридних мереж дозволяє провести настройку ідентифікатора і оптимізатора, використовуючи досвід і інтуїцію експерта, а також ідентифікувати складний об'єкт управління. Ідентифікація об'єкта, тобто експериментальний пошук його математичної моделі, є важливим етапом в розробці інтелектуальних систем управління. Наукові дослідження показали [109-144], що застосування пасивних методів ідентифікації не завжди ефективно, тому практично у всіх реально працюючих інтелектуальних системах управління використовуються методи активної ідентифікації. Застосування подібних методів пов'язано з певним погіршенням точності управління під час проведення процедур ідентифікації та адаптації. Відповідно виникає наукова проблема оптимізації самої процедури ідентифікації, що зводиться до підвищення ступеня адекватності отриманої математичної моделі [88].

Для вирішення поставленого завдання пропонується застосувати апробований науковий підхід - теорію гібридних мереж (адаптивних мереж з нейронечітким висновком), наявність в ній нечіткої логіки, реалізованої алгоритмом Сугено, дозволить ОПР проводити настройку ідентифікатора і оптимізатора, використовуючи досвід і інтуїцію в прогнозуванні траєкторії перехідного процесу (кривій розгону) [30].

Для апробації запропонованого підходу застосовується редактор ANFIS програми MatLab. При наявності навчальної вибірки значення вихідного параметра об'єкта регулювання (y) за часом (t) представлені на рис. 5.18.

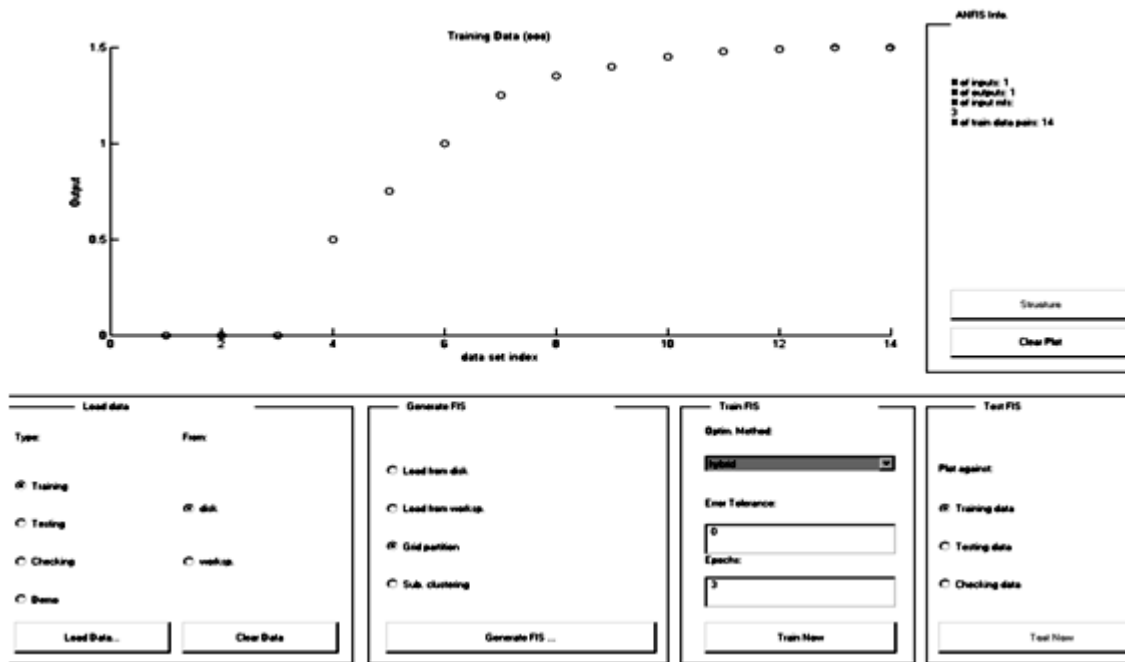


Рис. 5.18 - Крива розгону в інтерфейсі ANFIS

Як навчальної вибірки (тестові дані) в ідентифікаторі може перебувати база зі значеннями кривих розгону інерційних об'єктів з запізненням різних порядків (еталони). Таким чином ГМ буде ефективним апроксиматором.

Припустимо, що мережею має бути реалізовано невідоме відображення перехідної характеристики об'єкта:

$$y^k = f(x^k) = f(x_1^k, x_2^k, \dots, x_n^k), k = 1, 2, \dots, N$$

за наявності навчальної множини $((x^1, y^1), \dots, (x^N, y^N))$.

Для моделювання невідомої функції f використовується алгоритм Сугено з базою знань наступного типу:

Π_i : ЕСЛИ x_1 есть A_{i1} И x_2 есть A_{i2} И x_1 есть A_{in} , ТО $y = S_i, i = 1, 2, \dots, m$, де A_{ij} , - нечіткі множини трикутної форми що описують висловлювання ОПР (дуже мале значення (ОМ), мале (М), середнє (С), більше середнього (БС), велика (Б)), S_i - вихідні значення (див. рис. 5.19). Ступінь істинності μ правила i визначається за допомогою операції множення (Larsen):

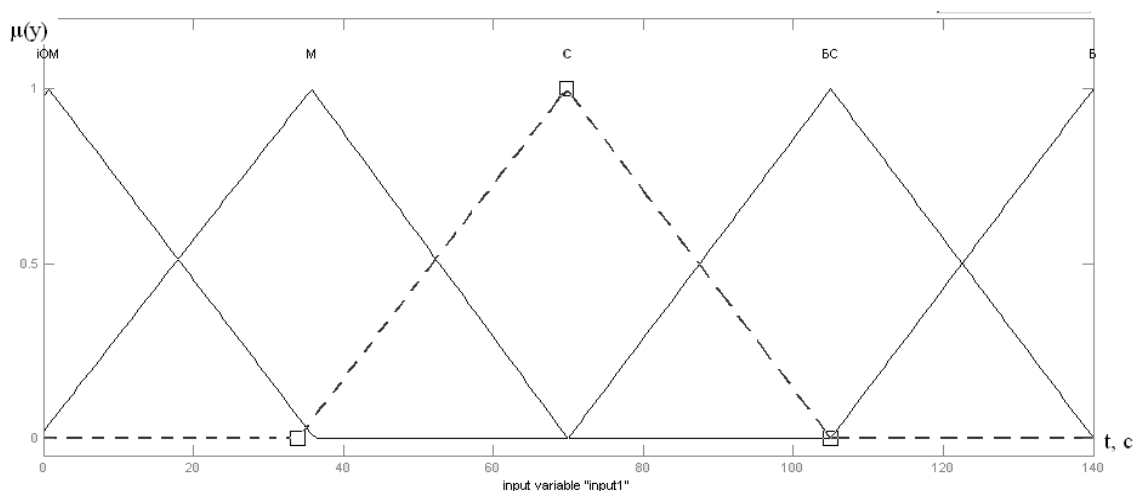


Рис. 5.19. - Функції приналежності лінгвістичної змінної «вихідна величина об'єкта»

$$\mu_i = \prod_{j=1}^n A_{ij}(x^k_j), \quad (5.8)$$

Можна використовувати й інші уявлення для моделювання логічного оператора «І», вихід нечіткої системи визначається методом центра ваги:

$$G^k = \frac{\sum_{i=1}^m \mu_i S_i}{\sum_{i=1}^m \mu_i}. \quad (5.9)$$

Функція помилки для k-го пред'явленого значення виду: $E_k = 0.5 (G^k - y^k)^2$ дозволяє, далі, як в звичайних нейронних мережах використовувати градієнтний метод для підстроювання параметрів заданих предикатних правил. Так, величину S_i можна коригувати за співвідношенням:

$$S_i := S_i - \eta (G^k - y^k) \frac{\mu_i}{\mu_i + \mu_2 + \dots + \mu_m} \quad i=1,2, \dots, m, \quad (5.10)$$

де η – константа, характеризує швидкість навчання ГМ. Результат роботи ГМ представлений на рис. 5.20 і демонструє повний збіг навчаючого і вихідного значень.

Таким чином, використання апарату гібридних мереж, в яких висновки виробляються на основі теорії нечітких множин, успішно дозволяють провести ідентифікацію об'єктів навіть які функціонують в умовах невизначеності. Як подаліше дослідження можна запропонувати реалізацію оптимізатора також на основі апарату ГМ. Інтелектуальний оптимізатор буде виробляти підстроювання регулятора. Регулятор, в свою чергу, може використовувати як типові закони (ПІ, ПІД), так і нейронну мережу або нечіткий алгоритм Мамдані.

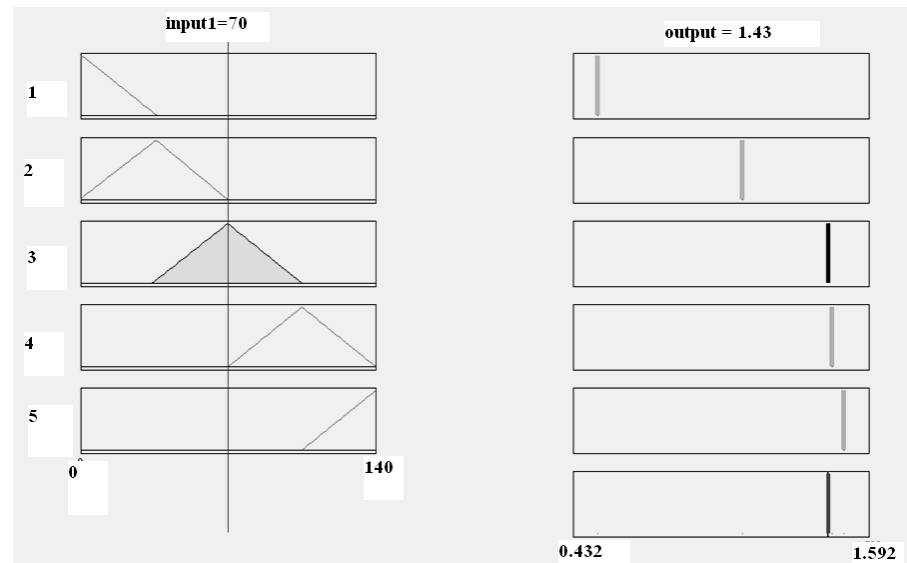


Рис. 5.20 - Вікно виводу результату визначення значень кривої розгону

5.4 Синтез адаптивного нечіткого регулятора з прогнозуючою нейро-нечіткою мережею

Для ССКМ можна синтезувати адаптивний нечіткий регулятор, діючий на основі розробленої прогнозуючої нейро-нечіткої мережі.

Відомо, що для АСР складними об'єктами традиційним є наявність залежності, яка реалізується зворотним зв'язком між вхідними та вихідними змінними (завданням і виходом об'єкта) [31]. При цьому виявлення цієї залежності в аналітичному вигляді не завжди представляється можливим через брак інформації про моделі проблемної області або в зв'язку зі складним урахуванням різноманітності факторів, що впливають на об'єкт управління. Для успішного вирішення подібних завдань скористаємося ННМ. Перевагою моделей управління складни-

ми об'єктами, створених на основі даного апарату, є можливість отримання нової інформації, наприклад, про характер перехідного процесу регулювання, в формі деякого прогнозу. При цьому розробка нейронної мережі здійснюється за допомогою її навчання, на основі інформації отриманої від експерта, засобів вимірювання або комп'ютерних експериментів. Ще одним перспективним науковим напрямком для вирішення складно структурованих задач управління в даний час є теорія гібридних нейронних мереж або нечітких мереж. Нечіткі нейронні мережі об'єднують в собі переваги нейронних мереж і систем нечіткого виводу, що дозволяє представляти моделі прийняття рішень шляхом використання правил нечіткої продукції і успішно вирішувати поставлені завдання. Виходячи з цього, аналіз сучасного математичного апарату стосовно реалізації в адаптивних системах управління складними об'єктами є актуальним завданням.

В задачу ННМ або ГС буде входити спостереження за процесом управління та оцінка його показників якості, збір даних про процес і самонавчання з метою отримання прогнозу про якість управління при впливі на об'єкт неконтрольованих і глибоких збурень. Оператор або нечіткий регулятор, отримуючи такий прогноз, зможуть спрацювати на випередження до виникнення аварійної ситуації і погіршення процесу управління. За допомогою такого прогнозу експерт може зробити заміну правил в базі правил нечіткого регулятора, або блок адаптації самостійно зможе вибрати необхідні правила нечіткої продукції і стабілізувати процес регулювання без участі оператора технологічного процесу.

Відзначимо, що нейромережеві і нечіткі адаптивні системи управління були досліджені такими вченими як Алієв, Ротштейн, Тера і інші [27-62]. Але, на відміну від відомих структур нечітких адаптивних АСР, в роботі пропонується введення додаткового каналу адаптації з диференціатором, сигнал якого проходить з виходу об'єкта на базу правил адаптації з ГМ (рис.5.21). У структурі бази правил адаптації знаходиться ННМ типу ANFIS, призначенням якої є складання прогнозу про характер перехідних процесів управління і вибір нових правил P , для бази правил НР в разі якщо система управління буде прагнути до нестійкого стану або критерії якості будуть незадовільними. Для прискорення процесу адап-

тації пропонується керуючий вплив u^A подавати безпосередньо на вхід об'єкта, тобто на його виконавчі пристрої.

Синтез адаптивної АСР. Для розробки бази правил адаптації (БПА) або навчання ГМ проводилися етапи фазифікації входних лінгвістичних змінних визначаючих якість перехідного процесу (перше відхилення, час регулювання) (див. рис. 5.21). як об'єкт дослідження приймається тепловий об'єкт, описаний найбільш поширеною в теплоенергетиці інерційною ланкою з запізненням виду:

$$w(s) = \frac{1}{25s + 1} e^{-1.5s}$$

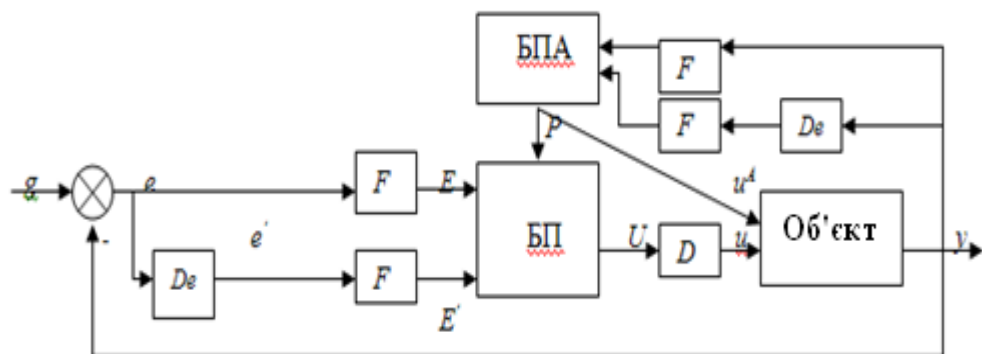


Рис. 5.21. Структура нейро-нечіткої адаптивної АСР: g – завдання, e – помилка, De – диференціатор, F – блок фазифікації, $БП$ – база правил, $БПА$ – база правил адаптації, P – адаптивне правило, U – управління, D – блок дефазифікації, u^A – адаптивне управління, y – вихід.

Використання НР в основному контурі більш ефективно в порівнянні з традиційними або робастними регуляторами при управлінні об'єктами з нелінійними властивостями і за впливу глибоких зовнішніх і внутрішніх збурень.

У програмі MatLab була розроблена структура ННМ де у процесі навчання використовувався гібридний метод з кількістю циклів 30. В умовах пуско-налагоджувальних робіт або супервізорної системи управління ГМ виробляє рекомендації щодо вибору нового правила адаптації налагоджування АСР. Так при першому відхиленні $G_1 = 1.13$ і часу регулювання $T_p = 80$ сек, ГМ рекомендує правило №3. База правил блоку адаптації розроблена автором представлена в табл. 5.3. Нечіткий регулятор налаштований відповідно до рекомендацій. Прави-

ла нечіткої продукції в базі правил адаптера складені в результаті комп'ютерних експериментів і мають такий вигляд: «Якщо перше відхилення мале І похідна часу регулювання середня ТО адаптивне управління середнє» ІНАКШЕ тощо. (див. табл. 5.3).

Таблиця 5.3

База правил нечіткого адаптера

	IF (G_1 is M) and (dT_p/dt is C) then (U_a is C)
	IF (G_1 is M) and (dT_p/dt is B) then (U_a is C)
	IF (G_1 is C) and (dT_p/dt is M) then (U_a is C)
	IF (G_1 is C) and (dT_p/dt is C) then (U_a is C)
	IF (G_1 is C) and (dT_p/dt is B) then (U_a is B)
	IF (G_1 is B) and (dT_p/dt is B) then (U_a is B)

Для вирішення завдання апроксимації математичної залежності, яка описує перехідний процес регулювання, з метою отримання прогнозу про якість протікання процесу пропонується використовувати НМ. Нейронна мережа виробляє запам'ятовування значень критеріїв якості процесу регулювання, відповідних впливу параметричних збурень (новим значенням передавальної функції об'єкта), наприклад, при зміні навантаження. Надалі НМ виробляє екстраполяцію показників якості тобто прогноз розвитку процесу управління, дозволяючи наладчику АСР запобігти аварійній ситуації.

Комп'ютерний експеримент

Для аналізу роботи запропонованої системи був проведений комп'ютерний експеримент. Для моделювання НР (Fuzzy Logic Controller) і проведення комп'ютерного експерименту в середовищі Matlab (Simulink) (рис. 5.22) використовувалися результати досліджень по розробці баз правил для нечіткого регулятора.

КАНАЛ ЗОВНІШНЬОГО ЗБУРЕННЯ

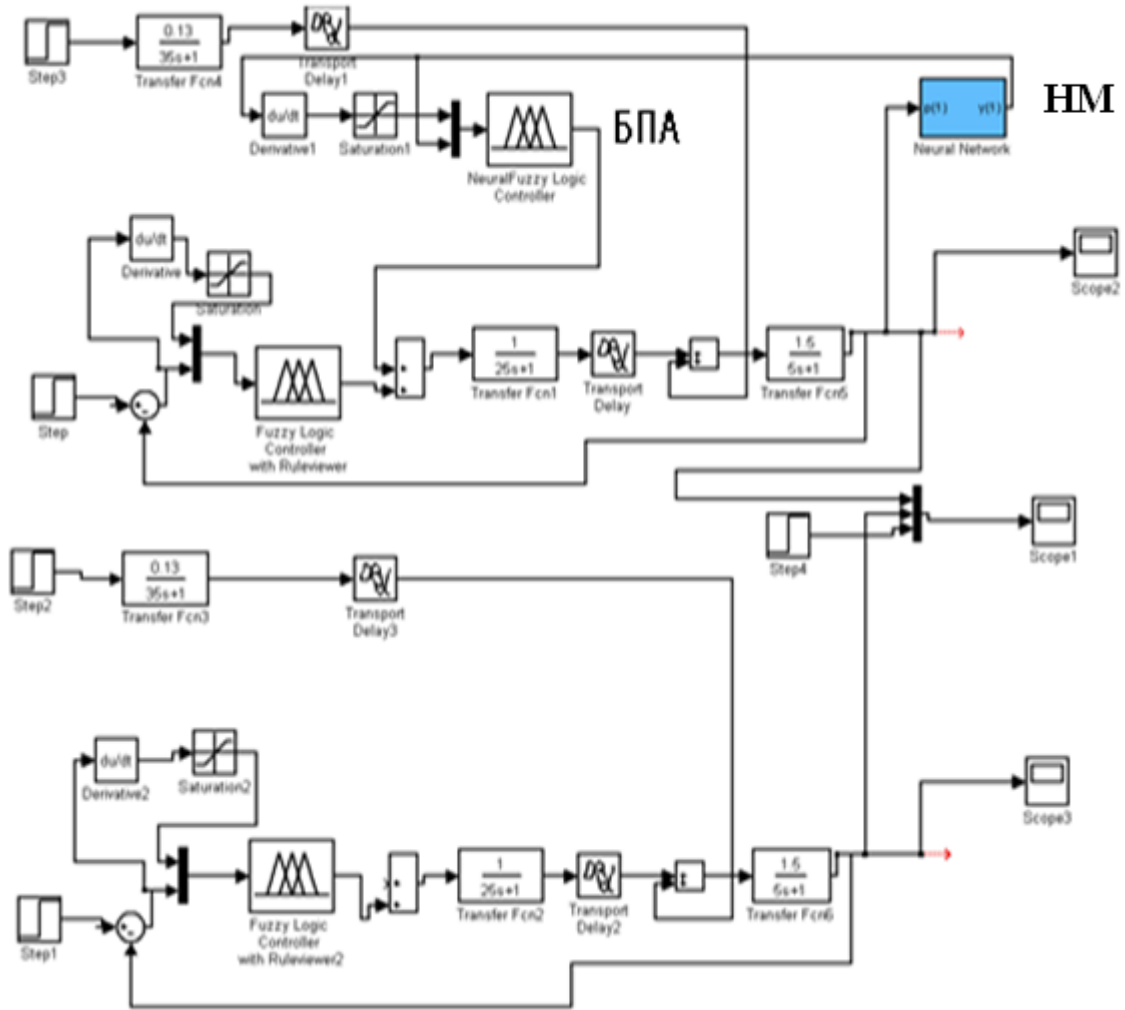


Рис.5.22 – Комп'ютерні моделі нейро-нечіткої адаптивної і типової нечіткої АСР реалізовані в Simulink

За структурою нечіткої адаптивної АСР з двома зворотними зв'язками на вхід НР подаються два сигнали (помилка (e); швидкість зміни помилки (e')). А на вхід блоку адаптації - сигнали про поточне значення вихідного впливу і його похідної. В процесі проведення комп'ютерного експерименту, що відображає схему рис. 5.28, були використані успішно реалізовані раніше кількість, тип функцій приналежностей і правила для бази правил нечіткого регулятора і бази правил адаптації. Адаптивна АСР діє по каналу завдання $g = 0.7$. Перехідні процеси з виходу нечіткої адаптивної АСР і типової нечіткої АСР без адаптера показані на рис. 5.23.

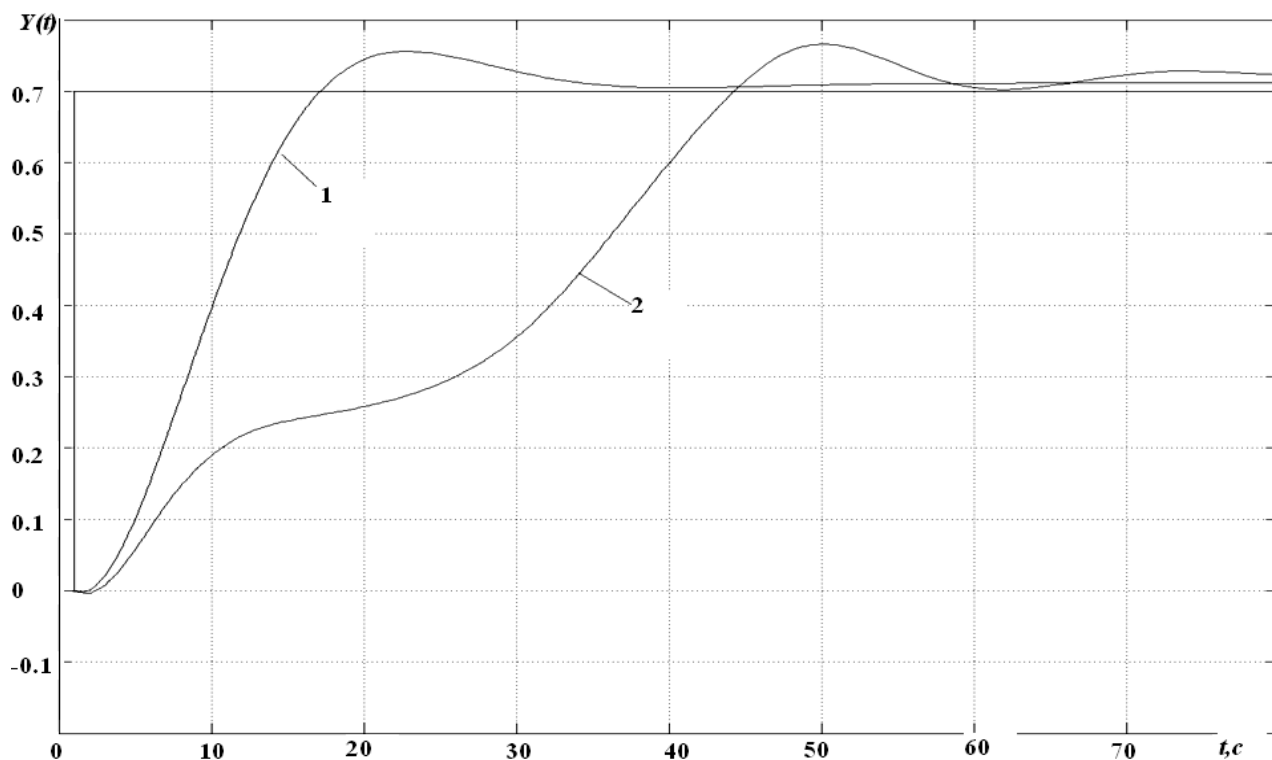


Рис. 5. 23 – Перехідні процеси по каналу завдання при впливі каналу зовнішніх збурень: 1 – адаптивна нейро-нечітка, 2 – типова нечітка АСР

Порівняльний аналіз аперіодичних перехідних процесів показав перевагу адаптивної системи з $T_p = 35$ сек, в порівнянні з типовою нечіткою АСР, час регулювання якої склав $T_p = 80$ сек. На схемі навчена НМ здійснює функцію розпізнавання значень T_p і G_1 , а також виробляє екстраполяцію даних значень. У виробничій АСР функцію визначення показників якості перехідного процесу виконує SCADA система за допомогою вбудованих функцій візуалізації перехідних процесів.

5.5. Висновки за п'ятим розділом

Аналіз основних проблем експлуатації, управління, і діагностики суднових систем кондиціонування визначив їх особливості і протиріччя, які зумовили доцільність застосування інтелектуального наукового підходу (теорії нечіткої логіки). Застосування нечітких моделей в процесах адаптації АСР ССКМ дозволило вирішити завдання статичної та динамічної оптимізації температурних процесів

за критеріями часу регулювання і коливальності. Дослідження діючих судових АСР функціонуючих за типовими законами регулювання, демонструє їх неефективність в експлуатаційних процесах, в умовах глибокої зміни зовнішніх і внутрішніх збурень. Комплекс цих завдань обґрунтовує необхідність модернізації систем ергатичного управління ССКМ з переходом на перспективні інтелектуальні технології, які успішно зарекомендували себе за кордоном.

На основі теорії нечіткої логіки запропоновано інтелектуальні системи управління температурою і вологістю повітря в приміщеннях судна. Імітаційні експерименти запропонованих моделей продемонстрували їх ефективність у порівнянні з традиційними адаптивними АСР в плані досягнення найкращих показників якості процесів експлуатації, і наявністю можливостей урахуванням особливостей та знань експертів, що пов'язане з економією фінансів.

Виходячи з аналізу проблем і протиріч експлуатації діючих АСР ССКМ, встановлені основні лінгвістичні ознаки процесів фазифікації, нечіткі логічні операції в алгоритмах нечіткого виведення і методи дефазифікації, що впливають на процеси експлуатації параметрів НР. Запропоновано метод настройки, діючий на основі системи нечіткого виведення, апробація якого при проведенні експериментів по впливу структурного і параметричного збурень продемонструвала очікувані експлуатаційні показники якості перехідних процесів ССКМ.

Проведена ідентифікація параметрів моделей об'єктів ССКМ на основі методу Калмана і отриманий широкий ряд передавальних функцій, що дозволяє проводити імітаційні експерименти з налаштування та аналізу ефективності запропонованих автором і діючих АСР ССКМ. Також використання алгоритмів Тагакі-Сугено та Мамдані дозволяє враховувати нелінійні властивості системи, проводити апроксимацію контрольованих параметрів, враховувати досвід експертів щодо впливу на параметри об'єкта факторів, що збурюють, а також досягати сприятливих комфортних умов. Розробка автоматизованої нечіткої системи для експлуатації об'єктів ССКМ дозволяє в автоматичному або супервізорному режимі, формувати завдання для локальних АСР, виводячи експлуатацію ССКМ судна на новий рівень комфорту і економити електроенергію.

ВИСНОВКИ

За результатами даної роботи можна виділити наступні висновки.

Проведено дослідження та виявлено специфічні особливості перехідних процесів ССКМ з експертними принципами перетворення з інтелектуальними регуляторами різного типу в різноманітних режимах функціонування:

Основні результати дисертаційної роботи такі:

1. Показано, що використання в ССКМ інтелектуальних регуляторів модульної структури експертного інтелектуального принципу обробки сигналу має перевагу перед іншими моделями з точки зору поліпшення якісних та масогабаритних показників, що сприяє їх застосуванню.

2. Обґрунтовано вибір узагальнених математичних моделей, що описують перехідні процеси ССКМ: одна - на основі використання часового, інша - спектрального методів аналізу. Моделі дозволяють проводити необхідний комплекс розрахунків при вирішенні завдань дослідження і проектування.

Розроблено математичні моделі, що описують перехідні процеси в регуляторах різних типів (П, ПІ, ПІД, нечітких, нейрон-нечітких та гібридного варіанту побудови) за різних режимів роботи в часовій області. Модель заснована на виборі в якості вихідних базових параметрів регуляторів запропонованих інтелектуальною експертною системою для окремо взятого регулятора розглянутих типів ССКМ, що дозволило виразити параметри перехідних процесів різних типів регуляторів через параметри перехідних процесів в них узагальненими до типу регулювання точними співвідношеннями. Модель дозволяє проводити розрахунки перехідних, енергетичних і конструктивних параметрів ССКМ.

Зазначені моделі використовувалися для розробки програмного забезпечення, призначеного для настройки, дослідження і проектування ССКМ.

3. Розроблено методики дослідження і алгоритми розрахунку перехідних процесів і енергетичних параметрів регуляторів ССКМ модульної структури, що складають обчислювальну основу для автоматизованого дослідження і проекту-

вання пристроїв і систем ССКМ із заданими показниками якості: визначення основних параметрів перехідних процесів регуляторів зазначеного типу, в тому числі при асиметрії; дослідження залежностей параметрів регулятора (показників якості, енергетичних параметрів), впливу числа регуляторів на параметри ССКМ.

4. Розроблено програмне забезпечення, що становить обчислювальну основу запропонованих методик дослідження ССКМ, відрізняється компактністю процедур, можливістю вирішувати різні завдання аналізу в рамках єдиного комплексу програмного забезпечення, можливістю реалізації автономних режимів роботи окремих програмних модулів комплексу. Програмне забезпечення передано інженерам-розробникам Ладижинської ТЕС та ТОВ «Енергетичні інвестори» для налаштувань, автоматизованого дослідження і проектування систем мікроклімату.

5. Виконано дослідження основних параметрів регуляторів модульної структури вказаних типів, проведена порівняльна оцінка їх показників якості за різними принципами функціонування: показано, що в ССКМ зі збільшенням числа регуляторів якісні властивості системи зростають.

6. Розроблено методику проектування ССКМ за критерієм мінімального об'єму при забезпеченні заданої якості вихідних параметрів повітряної суміші. Методика сприяє практичній реалізації обладнання даного класу з поліпшеними масогабаритними показниками.

Також в ході дисертаційного дослідження по вирішенню важливої науково-прикладної задачі підвищення ефективності експлуатації ССКМ були отримані наступні результати:

1. Аналіз основних проблем експлуатації, управління, і діагностики суднових систем кондиціонування визначив їх особливості і протиріччя, які зумовили доцільність застосування інтелектуального наукового підходу (теорії гібридних інтелектуальних мереж). Застосування нечітких моделей в процесах адаптації АСР ССКМ дозволило вирішити завдання статичної та динамічної оптимізації температурних процесів за критеріями часу регулювання і коливальності. Дослідження діючих суднових АСР функціонуючих за типовими законами регулювання, демонструє їх неефективність в експлуатаційних процесах, в умовах гли-

бокої зміни зовнішніх і внутрішніх збурень. Комплекс цих завдань обґрунтовує необхідність модернізації систем ергатичного управління ССКМ з переходом на перспективні гібридні інтелектуальні технології, успішно зарекомендували себе за кордоном.

2. На основі теорії нейро-нечіткої логіки та генетичних алгоритмів запропоновані інтелектуальні гібридні системи управління температурою, повітрообміном і вологістю повітря в приміщеннях судна. Імітаційні експерименти запропонованих моделей продемонстрували їх ефективність у порівнянні з традиційними адаптивними АСР в плані досягнення найкращих показників якості процесів експлуатації, і наявністю можливостей урахуванням особистих якостей та знань експертів, що пов'язане з економією фінансів.

3. Виходячи з аналізу проблем і протиріч експлуатації діючих АСР ССКМ, встановлені основні лінгвістичні ознаки процесів фазифікації, нечіткі логічні операції в алгоритмах нечіткого виведення і методи дефазифікації, що впливають на процеси експлуатації параметрів нечітких регуляторів. Запропоновано метод настройки, діючий на основі системи нечіткого виведення, типовий АСР з ПІ і ПД - регуляторами, апробація якого при проведенні експериментів по впливу на об'єкт управління структурного і параметричного збурень продемонструвала очікувані експлуатаційні показники якості перехідних процесів ССКМ.

4. Проведена ідентифікація параметрів моделей об'єктів ССКМ на основі методу Калмана і отриманий широкий ряд передавальних функцій, що дозволяє проводити імітаційні експерименти з налаштування та аналізу ефективності запропонованих автором і діючих АСР ССКМ. Також використання алгоритмів Тагакі-Сугено та Мамдані дозволяє враховувати нелінійні властивості системи, проводити апроксимацію контрольованих параметрів, а також враховувати досвід експертів щодо впливу на параметри об'єкта факторів, що збурюють, а також досягати сприятливих комфортних умов. Розробка автоматизованої нечіткої системи для експлуатації об'єктів ССКМ дозволяє в автоматичному або супервізорному режимі, формувати завдання для локальних АСР, виводячи експлуатацію ССКМ на новий рівень комфорту і економити електроенергію

5. Запропонована система діагностики технічного стану обладнання ССКМ, діюча на основі нечіткої мережі Петрі, що відрізняється функцією з урахуванням особистих якостей експлуатаційного персоналу і можливістю одночасного розрахунку показників надійності за двома моделями (мережі Петрі і нечіткої бази знань), що підвищує ступінь достовірності результату.

6. Практичне значення результатів дослідження підтверджується:

- розробкою програмного продукту в середовищі FuzzyTECH;
- впровадженням розроблених методів і алгоритмів в навчальні процеси вищих навчальних закладів;
- впровадженням в методику проведення пуско-налагоджувальних робіт та експлуатації систем мікроклімату ряду спеціалізованих компаній м. Одеси і планом модернізації Ладижинської ТЕС.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Михайлов С. А. Применение гибридных интеллектуальных сетей в судовых системах климат-контроля/ С. А. Михайлов Р. Ю. Харченко // Конференция «СИЭТ-2014» МНПК «Современные информационные и электронные технологии», – 2014. С 13.
2. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети для оптимизации режимов эксплуатации судовых систем комфортного микроклимата/ С. А. Михайлов Р. Ю. Харченко // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 36.–Одесса: НУ «ОМА», 2016. С. 24-32.
3. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети в судовых системах комфортного микроклимата/ С. А. Михайлов, Р. Ю. Харченко // Материалы V науч.практ. конференции ИУСТ Морской университет– Одеса: ОНМУ, 2016. С. 207-210.
4. Михайлов С. А., Гибридные интеллектуальные сети: монография/ С. А. Михайлов Р. Ю. Харченко // LAP LAMBERT Academic Publishing ISBN: 978-620-2-07416-2, 2017г. – 225 с.
5. Михайлов С. А. Гібридна інтелектуальна система комфортного мікроклімату судна/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // Материалы VII НПК. ІУСТ,– Одеса: ОНМУ, 2018. С. 182-185.
6. Голиков В. А. Научные основы управления микроклиматом судна/ В. А. Голиков // – Одесса: ОГМА, 1999. – 321 с.
7. Голиков В. А. Способы повышения надежности операторов судовых энергетических систем/ Голиков В. А., Капустин В. И. // Судовые энергетические установки. – 2010. – Вып. 25. – Одесса: ОНМА. – С. 49-60.
8. Голиков В. А. Математическое моделирование процессов теплообмена организма человека с окружающей средой/ Голиков В.А., Бурденко А.Ф., Цюпко Ю.М. // Судовые энергетические установки. – 2003. – Вып. 8. – Одесса: ОНМА. – С. 104-115.

9. Голиков В. А. Имитационное моделирование процесса стабилизации микроклимата в судовом помещении/ В. А. Голиков, К. В. Ходарина // Судовые энергетические установки: научно-технический сборник. Вып. 29. – Одесса: ОНМА, 2012. – С 15-22.
10. Вычужанин В. В. Повышение эффективности эксплуатации судового центрального кондиционера на промежуточных режимах: Дис. канд. техн. наук/ В.В. Вычужанин // ОНМУ. – Одесса, 1985. – 234 с.
11. Вычужанин В. В. Повышение эффективности эксплуатации судовой системы комфортного кондиционирования воздуха при переменных нагрузках: монография/ В. В. Вычужанин // Одесса : ОНМУ, 2009. — 206 с.
12. Вычужанин В. В. Теплофизические свойства обитаемого помещения судна при нестационарных нагрузках/ Вычужанин В. В. // Вестник международной академии холода, 2008 №4 С.15-19.
13. Вычужанин В. В. Математические модели нестационарных режимов воздухообработки в центральной СКВ/ Вычужанин В. В. // – Вісник Одеського нац. морського ун-ту: Зб. наук. праць.–Одеса: ОНМУ №23 2007г. С. 172-185.
14. Вычужанин В. В. Диагностика, контроль при эксплуатации и ремонте систем кондиционирования воздуха на основе гибридных нейро-нечетких экспертных систем/ Вычужанин В. В. // Вісник ОНМУ: Зб. наук. праць.–2010.–Вип. 30 С. 100-109.
15. Вичужанін В.В. Оцінка кліматичного комфорту в приміщеннях / В.В. Вичужанін // Холод. – 2006. – № 4. – С. 36-40.
16. Вычужанин В.В. Поддержание комфортных параметров кондиционируемого воздуха в судовых помещениях / В.В. Вычужанин // Вісник Одеського національного морського університету: Зб. наук. праць. – Одеса: ОНМУ. – 2004 . – Вип. 13. – С. 208-213.
17. Харченко Р. Ю. Анализ адаптивных методов настройки нечетких и ПИ – регуляторов в сложных объектах управления/ Р. Ю. Харченко, В. С. Михайленко // Научные труды ХПИ.– 2012. –№37.– С. 78-89.

18. Харченко Р. Ю. Методы адаптивного регулирования в системе климатического контроля судна/ Р. Ю. Харченко // Автоматизація суднових технічних засобів, Науково-технічний збірник ОНМА, випуск 17, 2011. С. 95-106.

19. Харченко Р. Ю. Анализ традиционных и новых методов вычислений в системах поддержки принятия решений/ Р. Ю. Харченко // Материалы научно-технической конференции «Энергетика судна: эксплуатация и ремонт», 05.04.2011 – 07.04.2011. – Одеса: ОНМА, 2011, – С. 308-310.

20. Харченко Р. Ю. Адаптивное регулирование в системах климатического контроля/ Р. Ю. Харченко // Десятая всеукраинская научно – техническая конференция «Математическое моделирование и информационные технологии» (ММИТ-2011), Одесса, ОГАХ. 23-25.10. – С. 81-82.

21. Харченко Р. Ю. Сравнительный анализ методов активной адаптации ПИ-регуляторов и нечетких регуляторов для систем кондиционирования и вентиляции (СКВ) морских судов/ Р. Ю. Харченко // Науковий вісник ХДМА. Науковий журнал. Херсонська державна морська академія. №2 (7) 2012 г. С. 276-286.

22. Харченко Р. Ю. Сравнительный анализ традиционных и нечетких методов регулирования в системах кондиционирования воздуха (СКВ)/ Р. Ю. Харченко // XII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих учених, аспірантів та студентів “Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій” 11-12 квітня 2012 р. Одеса, ОДАХ. С.38-40.

23. Харченко Р. Ю. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления/ Р. Ю. Харченко // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» Харківський національний університет радіоелектроніки 17 - 19 апреля 2012г. С. 33.

24. Харченко Р. Ю. Компьютерное моделирование системы кондиционирования и вентиляции судна с разными типами регуляторов/ Р. Ю. Харченко // Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки». – Одеса: ОНМА, 14.12.11 – 15.12.11, 2012. С. 36.

25. Харченко Р. Ю. Идентификация объектов в системах адаптивного управления с помощью нейро-нечетких сетей/ Р. Ю. Харченко // Матеріали науково-методичної конференції «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки». – Одеса: НУ «ОМА», 2016. С. 97-100.

26. Харченко Р. Ю. Впровадження гібридних інтелектуальних технологій при експлуатації суднових електронних систем/ Харченко Р.Ю., Шатілов Д.С., Кочетков О.В. // VII Всеукраїнська НПК студентів та молодих вчених «Проблеми і перспективи розвитку транспорту» Морський університет– Одеса: ОНМУ, 2018. С. 85-87.

27. Аракелян Э. К. Концепция построения математических моделей диагностики энергооборудования на базе нечеткой информации/ Э.К.Аракелян, Г. Д. Крохин, В. С. Мухин // Вестник МЭИ.–2005. –№ 5. – М: Изд-во МЭИ. – С. 28-33.

28. Аракелян Э. К. Концепция мягкого регулирования технического обслуживания энергоустановок СЭУ на основе интеллектуальной диагностики/ Э.К.Аракелян, Г.Д.Крохин, В.С. Мухин // Вестник МЭИ.–2008. –№ 1. – М: Изд-во МЭИ. – С. 14-20.

29. Бардик Е. И. Нечітке моделювання технічного стану високовольтних вимикачів енергосистем / Е.И. Бардик, М.В.Костерев, В.В.Литвинов// Наукові вісті НТУУ «КПІ». –2011. –№1. – С. 12-18.

30. Горб С. И. Настройка системы ДАУ "КаМеWa" на судах типа "SOCOL"// Автоматизация судовых технических средств. Выпуск 15. – 2009. – ОНМА, – С. 8-21.

31. Гостев В. И. Нечеткие регуляторы в системах автоматического управления/ В.И. Гостев // К.: Радиоматор, 2008.– 972 с.

32. Гостев В. И. Проектирование нечетких регуляторов для систем автоматического управления/ В. И. Гостев // СПб.: БХВ-Петербург, 2011. – 416 с.

33. Гостев В. И. Проектирование нечеткого регулятора при выходных колокообразных функциях принадлежности/ В. И. Гостев, О. Н.Ткаленко, О.В.Невдачина // Вестник ГУИКТ. – 2012. – № 1. – Т.10. – С. 19-23.

34. Деменков Н. П. Нечеткое управление в технических системах/ Н.П. Деменков.– М.: МГТУ им. Баумана, 2005. – 200 с.
35. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: вопросы реализации/ В.В. Денисенко // СТА. – 2007. – №4.–С. 86-97. – 2008.– №1.–С. 86-99.
36. Денисенко В. В. ПИД-регуляторы: принципы построения и модификации. Часть 1./ В. В. Денисенко // СТА.– 2006. – №4.– С. 45-50. Часть 2. – 2007. – №1.– С. 78-88.
37. Денисенко В. В. Разновидности ПИД-регуляторов/ В.В. Денисенко // Автоматизация в промышленности. – 2007.– №6.– С. 45-50.
38. Денисенко В. В. Непараметрическая модель объекта управления в ПИД регуляторах с автоматической настройкой/ В.В. Денисенко // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика.– 2009. – №6. – С. 9-13.
39. Дзюба Д. А. Применение метода контролируемого возмущения для модификации нейроконтроллеров в реальном времени/Д. А. Дзюба, А. Н.Чернодуб // Математичні машини і системи.– 2011. – № 1. – С. 20-28.
40. Дорф Р. Современные системы управления/ Р. Дорф, Р. Бишоп; пер.с англ. Б. И. Копылова. – М.: Лаборатория базовых знаний, 2002. – 832 с.
41. Дрёмин В. П. Анализ расходов топлива блоками СЭУ и возможностей их экономии при регулировании электропотребления/ В.П. Дрёмин, Г. П.Костенко, О. В. Згуровец // Проблемы общей энергетики. – 2008. – №17. – С. 25-37.
42. Еремин Е. Л. Автоматизированная система регулирования расхода топлива на ТЭЦ/ Е.Л.Еремин, Д.А. Телеченко // Автоматизированные системы и комплексы. – 2011. – № 2 (28), – С. 157-168.
43. Еремин Е. Л. Адаптивные алгоритмы для одного класса динамических объектов с запаздыванием по управлению/ Е.Л.Еремин, В. Ю.Косицын, Д. А.Теличенко // Информатика и системы управления.– 2010. – №4(26) – С. 137-149.
44. Жарков П. В. Оптимизация динамических процессов в котельном агрегате с использованием его нелинейной математической модели/ П. В. Жарков,

А. М. Клер // Научно-технические ведомости СПбГПУ.–2008. – № 1 (53). – С. 41–49.

45. Ибрагимов И. М. Использование систем искусственного интеллекта при эксплуатации энергетических объектов/ И. М. Ибрагимов // Надежность и безопасность энергетики. – 2008. – № 1. – С. 51-56.

46. Ицкович Э. Л. Современные алгоритмы автоматического регулирования и их использование на предприятиях/ Э. Л. Ицкович // Автоматизация в промышленности. – 2007. – №6. –С. 39-44.

47. Ицкович Э. Л. Конкурентоспособность российских производителей контроллеров на рынке средств автоматизации производства/ Э. Л. Ицкович // Промышленные контроллеры АСУ. – 2008. – №2. – С. 4-10.

48. Средства промышленной автоматизации. Промышленные компьютеры и контроллеры. Встраиваемые компьютерные системы [Каталог продукции фирмы А-ТЕХ]: - К.: А-ТЕХ, 2012. – 450 с.

49. Ковриго Ю. М. Метод построения самонастраивающихся регуляторов для промышленного применения/ Ю. М. Ковриго, А. П. Мовчан, И. А. Полищук // ААЭКС. – 2005. – № 1(15). – С. 152-157.

50. Ковриго Ю. М. Адаптивна система регулювання витрати палива/ Ю. М. Ковриго, Б. В. Фоменко, И. А. Полищук // ААЭКС. – 2007. – № (1)19. – С. 136-140.

51. Ковриго Ю. М. Адаптивное управление теплоэнергетическими процессами/ Ю. М. Ковриго, Б. В. Фоменко, И. А. Полищук // ААЭКС. – 2007. – № (2) 20. – С. 147-156.

52. Кондратенко Г. В. Синтез нечетких регуляторов на основе объектно-ориентированных технологий/ Г. В. Кондратенко Ю. П. Кондратенко, К. В. Мухторова // ААЭКС.– 2005. – №1 (15), – С. 140-147.

53. Кондратенко Ю. П. Синтез комп'ютерної системи розподіленого термометрування для автоматизації завдань діагностики теплових двигунів/ О. В. Коробко, Г.В. Кондратенко, Е.А. Швець // Вісник НТУ "ХПІ". Тематичний ви-

пуск: Інформатика і моделювання. – Харків: НТУ "ХПІ". – 2009. – № 43. – С. 92 – 101.

54. Козак Ю. А. Регулирование основных параметров судовых объектов на основе нечеткой логики/ Ю.А. Козак, В.С. Михайленко, В.М.Вишневская // Научно-технический сборник. Автоматизация судовых технических средств. Выпуск 11. ОНМА, 2006. – С. 86-92 .

55. Козак Ю. А. Нечеткая адаптивная система управления обжином клинкера во вращающейся печи/ Ю. А. Козак, В. С. Михайленко // Збірник наукових праць КНТУ. – 2006, Вип. 17. – С.114-122.

56. Коломейцева М. Б. Синтез адаптивной системы на базе нечеткого регулятора для многомерных систем/ М. Б. Коломейцева, Д. Л. Хо // Журнал «Приборы и системы управления». – 2002. – № 3. – С.34-37.

57. Круглов В. В. Устойчивость больших систем. Программные продукты и системы/ В. В. Круглов, А.А.Усков // Приложение к журналу Проблемы теории и практики управления. – 2007. – № 1. –С. 35-36.

58. Круглов В. В. Алгоритм самоорганизации системы нечеткого логического вывода/ В. В. Круглов, А. А. Усков // Вестник МЭИ. – 2002. – № 5. С. 104-105.

59. Крохин Г. Д. Нечеткие модели для интеллектуального промышленного регулятора в системе автоматического управления энергоблоком тепловой электростанции/ Г. Д. Крохин, Манусов В. З. // Научный вестник НГТУ. – 2004. – № 2(17) – .: Изд-во НГТУ. – С. 131-141.

60. Ладанюк А. П. Застосування адаптивних систем керування для нестационарних об'єктів технологічних комплексів неперервного типу/ А. П. Ладанюк, Н. А. Заец, Н. М. Луцка // ААЭКС. – 2005. – №1 (15). – С. 158-162.

61. Леоненков А. Ю. Нечеткое моделирование в среде Matlab и fuzzyTech / А. Ю. Леоненков. – СПб.: БХВ, 2003. – 720 с.

62. Лехциер О. Л. Интеллектуальная нечеткая система управления технологическим процессом обогащения угля/ О. Л. Лехциер, Усков А. А. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 10. – С. 8-11.

63. Лехциер О. Л. Датчик плотности угля в потоке для систем управления технологическими процессами обогащения/ О. Л. Лехциер, Усков А. А. // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 5. – С. 42-44.
64. Ложечников В. Ф. Аналитическая многорежимная модель динамики газовой души тракта барабанного котла/ В. Ф. Ложечников, В. С. Михайленко, И. Н. Максименко И. Н. // Автоматика. Автоматизация. Электрические комплексы и системы (ААЭКС). – 2007. – №2(20). – С. 29-34.
65. Мадоян А. А. Влияние участия энергоблоков СЭУ в регулировании мощности и частоты на эффективность их работы/ А. А. Мадоян, Э. К. Аракелян Э. К., В. А. Макарян // Теплоэнергетика. – 2005. – №4. – С. 39-43.
66. Медведев В. С. Нейронные сети/ В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – MatLab 6.М.: Диалог – МИФИ, 2002. – 496 с.
67. Егупова Н. Д. Методы робастного, нейро-нечеткого и адаптивного управления: учеб./ под ред. Н. Д. Егупова, изд. 2-е. – М.: Изд-во МГТУ им. Бауман, 2002. – 744 с.
68. Тодорцев Ю. К. Метод настройки адаптивного ПИД – регулятора, действующего на основе гибридной сети/ Ю. К. Тодорцев, В. С. Михайленко, В. Ф. Ложечников // Материалы 17-й Международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика -2010». (Харьков), Том 1. – С. 294-296.
69. Михайленко В. С. Сравнительный анализ робастной и нечеткой АСР действующих в условиях неопределенности/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Сборник научных трудов КНТУ. вып. 22 (часть 2). – 2011. – С. 198-206.
70. Михайленко В. С. Использование нечеткого алгоритма Такаги – Сугено в адаптивных системах управления сложными объектами/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Научно-теоретический журнал Искусственный интеллект. – 2011. – №2. – С. 53-59.
71. Михайленко В. С. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Электротехнические и компьютерные системы. – 2011. – № 4 (80). – С. 199-204.

72. Михайленко В. С. Сравнительный анализ теории принятия решений в условиях неопределенности и нечеткой логики на примере настройки ПИ – регулятора/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // АСУ и приборы автоматики. – 2011. – № 154. ХНУРЭ. – С. 76-83.

73. Михайленко В. С. Исследование гибридной сети при идентификации объекта управления/ В.С. Михайленко, Р. Ю.Харченко // Материалы 2-й международной научно – технической конференции «Компьютерные науки и технологии». – 2011. – БНТУ (Россия). – С. 268-272.

74. Михайленко В. С. Сравнительный анализ методов анализа иерархий и нечеткой логики в системе поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 15-й Международной конференции «Информационные интеллектуальные системы». – 2011. – Харьков. – С. 297-298.

75. Михайленко В. С. Методы дефаззификации в алгоритмах нечеткого вывода / В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 8-й региональной конференции молодых ученых «Информатика, информационные системы и технологии». – 2011. – Одесса. – ОГУ.- С.7-8.

76. Михайленко В. С. Застосування гібридних мереж в адаптивних системах управління теплоенергетичних об'єктів/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Наукові праці ВНТУ.– 2012Ю – № 1. – С.1-9.

77. Михайленко В. С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ – регулятора по идентификации переходного процесса/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Труды Одесского политехнического университета. – 2012. – № 1 (38). – С. 152-156.

78. Михайленко В.С.Синтез нейросетевой СППР нагрузки между энергоблоками СЭУ/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко //Материалы 8-й дистанционной международной научно-практической конференции «Системы поддержки принятия решений. Теория и практика. СППР 2012» (Киев). – С. 46-49.

79. Михайленко В. С. Нейро-нечеткие технологии в системах поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы междуна-

родной научно-практической интернет конференции «Advanced Information Systems and Technologies, AIST 2012» (Сумы). – С. 144-146.

80. Михайленко В. С. Синтез интеллектуальной системы автоматического управления процессом горения топлива в энергоблоках тепловых электростанций/ В. С. Михайленко, Р. Ю.Харченко // Промышленная теплотехника. – 2012. – № 5. – С. 45-52.

81. Михайленко В. С. Анализ научных подходов в теории нейросетевых систем управления сложными объектами/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Сборник трудов международной молодежной конференции «Прикладная математика, управление и информатика» Белгород (Россия).– 2012. – Том 2. – С. – 481-485.

82. Михайленко В. С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ-регулятора по идентификации переходного процесса/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 19-й Международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика-2012». (Киев), Том 1. – С. 117.

83. Михайленко В. С. Синтез нейро-мережевої системи автоматичного регулювання рівня води в барабані котла енергоблоку ТЕС/ В. С. Михайленко Р.Ю. Харченко // Наукові вісти НТУУ «КПІ», № 5, 2012. – С. 45-51

84. Михайленко В.С. Синтез адаптивного нечеткого регулятора с прогнозирующей нейро-нечеткой сетью/ В. С. Михайленко Р.Ю. Харченко // Вісник СумДУ. Серія “Технічні науки”, №3, 2012. – С. 30-37.

85. Михайленко В. С. Анализ метода оценки настраиваемой модели объекта в процессе адаптации САУ/ В. С. Михайленко Р.Ю. Харченко // Научный журнал: Сборник научных трудов SWorld. Вып. 4, Т.14 - Одесса, 2012 – С. 10-13.

86. Михайленко В. С. Анализ традиционных методов адаптации систем автоматического управления и их усовершенствование с использованием нейронных сетей/ В. С. Михайленко Р.Ю. Харченко // Радиоэлектронные и компьютерные системы № 4(56), 2012. – С. 50-56.

87. Михайленко В. С. Определение параметров математических моделей энергоблоков ТЭС на основе аппарата гибридных сетей/ В. С. Михайленко Р.Ю. Харченко // Информатика и математические методы в моделировании Т. 2, № 3, 2012. – С. 286-292.

88. V. S. Mikhailenko Analysis of traditional and neuro-fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators in TPS/ V. S. Mikhailenko, R. Yu. Kharchenko // Automatic Control and Computer Sciences, 2014, Riga Vol. 48, No. 6, pp. 334–344.

89. Михайленко В. С. Сравнительный анализ теорий принятия решений в условиях неопределенности и нечеткой логики на примере настройки ПИ-регулятора/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «АСУ и приборы автоматизации», 2011, Харьков, выпуск 154. С. 76-83.

90. Михайленко В. С. Использование интеллектуальных систем поддержки принятия решений в автоматизации процессов управления судном/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Третя Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2011» 23 – 25 травня 2011 р. Херсон. С. 59 1-й том.

91. Михайленко В. С. Постановка задачи синтеза интеллектуальной системы адаптивного управления/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Матеріалі XX міжнародної конференції по автоматическому управленню. НУК ім. Адмірала Макарова. Николаев. 25-27 сентября 2013г. С. 228-230.

92. Михайленко В. С. Решение задач идентификации и управления температурным контуром системы охлаждения судового дизеля/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Науковий вісник ХДМА. Науковий журнал. Херсонська державна морська академія. №2 (17) 2017 г. С. 69-77.

93. Медведев В. С. Нейронные сети. MATLAB 6/ В. С. Медведев, В. Г. Потемкин. – М.: ДИАЛОГ-МИФИ, 2002. – 496 с.

94. Олійник Я. І. Розробка державної програми розвитку електроенергетики західного регіону України/ Я.І.Олійник // Вісник ХНУ. – 2010. – № 2.- Т.3, – С. 169-173.

95. Омеляновский П. Експлуатація та налагодження енергетичного устаткування ТЕС ВАТ «Західенерго»/ П. Омеляновский, И. Мисака. – Львів: НВФ «Українські технології», 2005. – 412 с.

96. Писарев А. В. Сравнительные исследования расчетных методов определения параметров настроек промышленных ПИД – регуляторов/ А. В. Писарев С. И. Новиков // Энергетика и теплотехника. Сборник научных трудов. Вып. 11. – НГТУ, 2007. –С. 191-200.

97. Репин А. И. Идентификация и адаптация АСР с использованием эволюционных алгоритмов оптимизации/ А. И. Репин, Н. И.Смирнов, В. Р. Сабанин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2008. –№ 3. – С. 35-47.

98. Репин А. И. Математическое и программное обеспечение алгоритмов идентификации и адаптации АСР и их реализация в современных ПТК/ А. И. Репин, Н. И.Смирнов, В. Р. Сабанин, А. Н.Максимов, А. Н.Игнатенко // Сборник трудов конференции. – 2008. – М.: Издательство МЭИ, – С. 34-45.

99. Ротач В. Я. Теория автоматического управления/ В.Я. Ротач// М.: МЭИ, 2008.– 396 с.

100. Ротач В. Я. Настройка регуляторов модифицированным методом Циглера-Николса/ В.Я. Ротач // Промышленные контроллеры АСУ. – 2008. – №2. –С. 38-42.

101. Ротач В. Я. Об адаптивных системах управления с текущей идентификацией объекта/ В.Я. Ротач// Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – №5. – С. 21-28.

102. Ротач В. Я. К расчету оптимальных параметров реальных ПИД-регуляторов по экспертным критериям/ В. Я. Ротач // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2006. – №2. – С. 22-29.

103. Ротач В. Я. Настройка промышленных контроллеров по переходным характеристикам систем регулирования без их аппроксимации/ В. Я. Ротач, В. Ф. Кузицин, С. В. Петров // Теплоэнергетика. – 2010. – № 10. – С. 50-57.

104. Ротштейн А. П., Штовба С. Д. Влияние методов дефаззификации на скорость настройки нечеткой модели/ А. П. Ротштейн, С. Д. Штовба // Кибернетика и системный анализ. — 2002. — № 5. — С. 169–176.

105. Рутковская Д. Нейронные сети, генетические алгоритмы и нечеткие системы/ Д. Рутковская, М. Пилиньский, Л. Рутковский // М.: Горячая линия-Телеком, 2006. – 383 с.

106. Сабанин В. Р. Чувствительность и робастная настройка ПИД регуляторов с реальным дифференцированием/ В. Р. Сабанин // Теплоэнергетика. – 2007. – № 10. – С. 45-53.

107. Смирнов Н. И. О выборе критерия оптимальности в численных методах расчета АСР с ПИД регулятором/ Н. И. Смирнов, И. М. Шаровин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2010. – № 2.

108. Смирнов Н. И. О корректности настройки ПИД регулятора при аппроксимации переходной характеристики объекта регулирования апериодическим звеном с транспортным запаздыванием/ Н. И. Смирнов, В. Р. Сабанин, А. И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2007. – № 1.

109. Смирнов Н. И. Структурная и параметрическая оптимизация каскадных АСР с использованием эволюционных алгоритмов/ Н. И. Смирнов, В. Р. Сабанин, А. И. Репин // Автоматизация и ИТ в энергетике. – 2010. – М.: ООО "Амальгер". – №5(10). – С. 26-34.

110. Терехов В. А. Нейросетевые системы управления / В. А. Терехов, Д. В. Ефимов, И. Ю. Тюкин // М.: Изд. журнала "Радиотехника", 2002. – 480 с.

111. Усков А. А. Принципы построения систем управления с нечеткой логикой/ А.А. Усков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 6. – С. 7-13.

112. Усков А. А. Алгоритм синтеза нечетких логических регуляторов на основе самоорганизации/ А. А. Усков // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2004. – № 8. – С. 1-3.

113. Усков А. А. Системы управления с нечеткими супервизорными ПИД-регуляторами/ А. А. Усков, Е. В. Киселев // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2005. – № 9. С. 31-33.

114. Усков А. А. Нечеткий дополняющий алгоритм идентификации динамических объектов/ А. А. Усков, В. В. Круглов // Информационные технологии. – 2003. – № 3. – С. 32-34.

115. Усков А. А. Два подхода к самоорганизации базы правил системы нечеткого логического вывода/ А. А. Усков, В. В. Круглов // Информационные технологии. – 2006. – № 2. – С. 14-18.

116. Усков А. А. Устойчивость систем управления с гибридными (нечеткими) нейронными сетями/ А. А. Усков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2003. – № 3-4. – С. 23-26.

117. Усков А. А. Обобщенная модель динамического объекта на основе нечеткой нейронной сети/ А. А. Усков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2004. – № 5-6. – С. 12-16.

118. Усков А. А. Адаптивная система управления с нечетким инверсным контроллером/ А. А. Усков // Нейрокомпьютеры: разработка, применение. – 2004. – № 12. – С. 51-55.

119. Усков А. А. Гибридный нейросетевой алгоритм построения аппроксимационных моделей сложных систем/ А. А. Усков, С. А. Котельников // Программные продукты и системы. Приложение к журналу Проблемы теории и практики управления. – 2007. – № 3. – С. 63-64.

120. Хо Д. Л. Синтез адаптивных нечетких регуляторов для нелинейных динамических объектов с помощью нейросетевой технологии/ Д. Л. Хо //Деп. в ВИНТИ №349-В01. – М., 2001. – 9 С.

121. Хо Д. Л. Синтез нечетких регуляторов в следящих режимах для нелинейных динамических объектов/ Д. Л. Хо, И. Н.Дорохов // Математические ме-

тоды в технике и технологиях: Труды 14 Международной научной конференции. – Смоленск. – 2001. – С. 201-204.

122. Хо Д. Л. Применение генетического алгоритма для настройки нейронных сетей/ Д. Л. Хо, А. А. Ергин // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез.докл. междун. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М., 2001. – Т. 1. – С. 253.

123. Хо Д. Л. Нечеткая система как универсальный аппроксиматор/ Д.Л. Хо // Радиоэлектроника, электротехника и энергетика: Тез.докл. междун. науч.-техн. конф. студентов и аспирантов. – М., 2002. – Т.1. – С. 295-296.

124. Шаровин И. М. Применение искусственных нейронных сетей для адаптации АСУ в процессе их эксплуатации/ И. М. Шаровин, Н. И.Смирнов, А. И. Репин // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2012. – № 4. – С. 27-32.

125. Штейнберг Ш. Е. Проблемы создания и эксплуатации эффективных систем регулирования/ Ш. Е. Штейнберг, Л. П.Сережин, И. Е.Залуцкий, И. Г. Варламов // Промышленные АСУ и контроллеры. – 2004. – №7. – С. 1-7.

126. Штовба С. Д. Проектирование нечетких систем средствами MatLab/ С.Д. Штовба // М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 288 с.

127. Шубладзе А. М. Оптимальные автоматически настраивающиеся общепромышленные регуляторы/ С. Д. Штовба, С. В.Гуляев, А. А. Шубладзе // Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика. – 2002. – №10. – С. 30-33.

128. Abe N. Smith predictor control and internal model control/ N. Abe, K. Yamanaka // A tutorial SICE 2003 Annual Conference. – vol. 2, 4-6 Aug. – 2003. – P.1383-1387.

129. Aguero J. C. Virtual closed loop identification: a subspace approach/ J.C. Aguero, G.C.Goodwin // 43rd IEEE Conference on Decision and Control. – 2004. – CDC, Vol.1. – 14-17 Dec. –P. 364 – 369.

130. Ahn S. H. Smith predictor control for water pressure control system with time delay/ S. H. Ahn, B. S. Sim, D. Y. Chi, K. N.Park, C. Y.Lee, Y. J. Kim // 30th

Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON 2004, vol. 1, 2-6 Nov. – 2004. –P. 663-666.

131. Ang K. H. PID control system analysis, design, and technology/ K. H. Ang, G.Chong, Y. Li // IEEE Trans. on Control Syst. Tech., vol.13, No. 4, July 2005. –P. 559-576.

132. Aratani T. PID control system fed back along with squares of control error and its derivative-optimum design of nonlinear PID controller/ T. Aratani // Proceedings of the 41st SICE Annual Conference SICE 2002, vol. 4, 5-7 Aug. 2002. –P. 2628-2631.

133. Astrom K. J. Advanced PID control/ K. J. Astrom, T. Hagglund T. // ISA - The Instrumentation, Systems, and Automation Society.– 2006. – 460 p.

134. Astrom K. J. A new Smith predictor for controlling a process with an integrator and long dead-time/ K. J. Astrom, C. C. Hang, B. C. Lim // IEEE Transactions on Automatic Control, vol. 39, Issue 2, Feb 1994. –P. 343-345.

135. Azevedo, G. P. Control centers with open architectures/ G. P. Azevedo, A. L. Oliveira // IEEE Computer Applications in Power, vol. 14, No. 4. – Oct 2001. – P. 27-32.

136. Baba Y. Model-driven PID control system in single-loop controller/ Y. Baba, T. Shigemasa, M. Yukitomo, F. Kojima, M. Takahashi, E. Sasamura // SICE 2003. – Annual Conference. vol. 1, C 4-6.

137. Cao J. Y. Optimization of fractional order PID controllers based on genetic algorithms/ J. Y. Cao, J. Liang, B. Cao // Proceedings of 2005 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 9, 18-21 Aug. 2005. –P. 5686-5689.

138. Chen J. X. Application of fuzzy control PID algorithm in temperature controlling systems/ J. X. Chen, W. Li. // International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 4, 2-5 Nov. 2003. –P.2601-2604.

139. Escamilla–Ambrosio, P. J. A novel design and tuning procedure for PID type fuzzy logic controllers/ P. J. Escamilla–Ambrosio, N. Mort // First International IEEE Symposium on Intelligent Systems. – 2002, vol. 1. – P. 36-41.

140. Ho M. T. and PID Controller Design for Robust Performance/ M. T. Ho, C. Y. Lin. // IEEE Trans. on Automatic Control, v. 48, № 8, Aug. 2003. –P. 1404-1409.

141. Ho H.F. Adaptive PID controller for nonlinear system with tracking performance/ H. F. Ho, Y. K. Wong, A. B. Rad // Physics and Control. – 2003. Proceedings. International Conference. Vol. 4, 20-22 Aug. –P. 1315-1319.

142. Ho S. J. Optimizing fuzzy neural networks for tuning PID controllers using an orthogonal simulated annealing algorithm OSA/ S. J. Ho, L. S. Shu, S. Y. Ho // IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 14, Issue 3, June 2006. –P. 421-434.

143. Hu B. G. A systematic study of fuzzy PID controllers-function-based evaluation approach/ B. Hu, G. K. Mann, R. G. Gosine // IEEE Transactions on Fuzzy Systems, vol. 9, Issue 5, Oct 2001.– P. 699-712.

144. Huang Y. A general practical design method for fuzzy PID control from conventional PID control/ Y. Huang, S. Yasunobu // The Ninth IEEE International Conference on Fuzzy Systems, FUZZ IEEE 2000, vol. 2, 2000. –P. 969-972.

145. Jankowska A. Neural models of air pollutants emission in power units combustion processes/ A. Jankowska // Symp. On Methods of Artificial Intelligence, Gliwice, Poland, Nov. 5-7. – 2003. – P. 141-144.

146. Leva A. Model-based PID autotuning enhanced by neural structural identification/ A. Leva, L. Piroddi // Proceedings of the 2004 American Control Conference. – 2004, vol. 3, 30 June-2 July. – P. 2427-2432.

147. Li K. Neural networks and genetic algorithms can support human supervisory control to reduce fossil fuel power plant emissions/ K. Li, Thompson S., Wieringa P. A., Peng J., Duan G. R. // Cogn. Tech. Work. – 2003, vol. 5. – P. 107–126.

148. Sehgal R. Intelligent Optimization of Coal Burning to Meet Demanding Power Loads, Emission Requirements, and Cost Objectives/ R. Sehgal, P. J. Marolda // GE Power Systems GER-4198. – 2000.

149. Tang K. S. An optimal fuzzy PID controller/ K. S. Tang, K. F. Man, G. Chen, S. Kwong // IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 48, Issue 4, Aug 2001. –P. 757-765.

150. Visioli A. Model-based PID tuning for high-order processes: when to approximate/ A. Visioli // IEEE Conference on Decision and Control. – 2005 European Control Conference. CDC-ECC '05. 12-15 Dec. – P. 7127-7132.

151. Tan Wen. Comparison of some well-known PID tuning formulas/ Wen. Tan, Jizhen Liu, Tongwen Chen, Horacio, J. Marquez // Computers and Chemical. Engineering. – 2006. – № 30. – P. 1416-1423.

152. Xu J. Design of adaptive fuzzy PID tuner using optimization method/ J. Xu, X. Feng // Fifth World Congress on Intelligent Control and Automation. – 2004. – WCICA, vol. 3, 15-19 June. –P. 2454-2458.

153. Yang T. M. Neural network based online self-learning adaptive PID control for automatic ranging cutting height of shearer/ T. Yang, S. B. Xiong // Proc. 2002 International Conference on Machine Learning and Cybernetics, vol. 2, 02.– P. 857-859.

154. Yang Y. Simultaneous PID self-tuning and control/ Y. Yang, Y. Xue, J. Huang // Proceedings of the 2004 IEEE International Symposium on Intelligent Control, 2-4 Sept. 2004. –P. 363-367.

155. Yang Q. Stabilization and robust control of a class of processes with long time delay/ Q. Yang, Y. Xue, Q. Wu // 30th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics Society, IECON, vol. 2, 2-6 Nov. 2004. – P. 1304-1308.

156. Yesil E. Internal model control based fuzzy gain scheduling technique of pid controllers/ E. Yesil, M.Guzelkaya, I.Eksin // World Automation Congress. – 2004. – Proceedings. Vol. 17, 28 June - 1 July. –P. 501-506.

157. YongquanY. A PID neural network controller/ Y. Yongquan, H. Ying, Z. Bi // Proceedings of the International Joint Conference on Neural Networks, vol. 3, 20-24 July 2003. – P. 1933-1938.

158. Yongquan Y. To tune the dynamic parameters of neural PID controller by the intelligent learning algorithm/ Y. Yongquan, H. Ying, Z. Tao // IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, vol. 3, July Aug. 2005. –P. 1521-1526.

159. Yourui H. Optimization for Parameter of PID Based on DNA Genetic Algorithm/ H. Yourui, C. Xiuqiao, H. Yihua// International Conference on Neural Networks and Brain. – 2005. – ICNN&B '05, vol. 2, 13-15 Oct. –P.859-861.

ДОДАТОК А.

ВИХІДНИЙ КОД ОСНОВНОЇ ФУНКЦІЇ РОЗРАХУНКУ
ДИНАМІЧНО-ПІДКЛЮЧАЄМОЇ БІБЛІОТЕКИ

```

function CalculateOutputs(X: array of Double;
var Y: array of Double): Integer; stdcall;
var p1, p2, b1, b2, Fhy, Fby, w1, w2, In23min, In1p2min1, In1p2min2, In1p2min3,
In1p2min, In1p2max1, In1p2max2, In1p2max, Ip13max, Ip13min, In23max, Ipmin, Ipmax,
Inmin, Inmax: Double;
begin
    //Тестування вихідних даних
    Result:= TestInputArray(X, []);
    if Result <> ER_OK then exit;
    //Тестування комбінації вихідних даних
    Result:= TestInputCombination(X);
    if Result <> ER_OK then exit;
    //Тестування масива результатів розрахунку
    Result:= TestOutputArray(Y);
    if Result <> ER_OK then exit;
    //-----Коректировка вихідних даних -----
    //коефіцієнт структури ССКМ
    Fhy:=0; Fby:=0;
    begin
        if X[X_Y]=1 then Fhy:=1;
        if X[X_Y]=1 then Fby:=0;
        if X[X_Y]=2 then Fhy:=0;
        if X[X_Y]=2 then Fby:=1;
        if X[X_Y]=3 then Fhy:=0;
        if X[X_Y]=3 then Fby:=0;
    end;
    //ВИБІР ТИПУ РОЗРАХУНКУ (при Pk=const чи Pn=const)
    if X[X_Pn_MODE]=X_Pn_MODE_PN_CONST then
    // Тип розрахунку при Pk=const или Pn=const
    begin
        // Y[Y_L1]:=X[X_L1]*(X[X_N]/X[X_Nmax]);
        Y[Y_In]:=X[X_In];
        Y[Y_Ink]:=Y[Y_In]/X[X_N];
        Y[Y_Rn]:=X[X_Un]/Y[Y_In];
        Y[Y_Rnk]:=X[X_Un]/Y[Y_Ink];
    end;
    if X[X_Pn_MODE]=X_Pn_MODE_PNK_CONST then
    begin
        Y[Y_L1]:=X[X_L1];
        Y[Y_Ink]:=X[X_Ink];
        Y[Y_In]:=Y[Y_Ink]*X[X_N];
        Y[Y_Rn]:=X[X_Un]/Y[Y_In];
        Y[Y_Rnk]:=(X[X_Un]/Y[Y_Ink]);
    end;
    Y[Y_Pn]:=X[X_Un]*Y[Y_In];
    Y[Y_Pnk]:=Y[Y_Pn]/X[X_N];
    // Вибір типу розрахунку (якщо kP задається, Uротн розраховується або якщо Uротн
    задається, то kP розраховується)

```

```

if X[X_rejim_MODE]=X_rejim_Uotn_calc then
    begin
        //Коефіцієнт передачі
        Y[Y_kn]:=X[X_kn];
        Y[Y_Upotn]:=(1+Y[Y_kn]*(Fhy*X[X_n21]-1))/(Fby+Y[Y_kn]*(X[X_n21]-Fby));
        Y[Y_Up]:=X[X_Un]*Y[Y_Upotn]+1E-9;
    end;

    if X[X_rejim_MODE]=X_rejim_kn_calc then
    begin
        Y[Y_Upotn]:=X[X_Upotn];
        Y[Y_Up]:=X[X_Un]*Y[Y_Upotn]+1E-9;
        // коефіцієнт пропорційності
        Y[Y_kn]:=(X[X_Un]-Fby*Y[Y_Up])/(X[X_n21]*(Y[Y_Up]-Fhy*X[X_Un])+X[X_Un]-
        -Fby*Y[Y_Up]);
        end;
    //Початок рохрахунку
    //----- базові параметри -----
    //Відносна помилка
    Y[Y_Unotn]:=(Fby+Y[Y_kn]*(X[X_n21]-Fby))/(1+Y[Y_kn]*(Fhy*X[X_n21]-1));
    // коефіцієнт повернення
    Y[Y_Kv]:=1-Y[Y_Kn];
    // частота перетворення
    Y[Y_F]:=(Y[Y_Up]*Y[Y_Rnk]*(Y[Y_Up]*X[X_Un]-Fby*sqr(Y[Y_Up])-
    -Fhy*sqr(X[X_Un])))/(2*Y[Y_L1]*X[X_Un]*(Sqr(Y[Y_Up]*(X[X_n21]-Fby)+
    +X[X_Un]*(1-Fhy*X[X_n21]))));
    // період перетворення
    Y[Y_T]:=1/Y[Y_F];
    // час накопичення
    Y[Y_tn]:=Y[Y_Kn]*Y[Y_T];
    // час повернення
    Y[Y_tv]:=Y[Y_T]-Y[Y_tn];
    Y[Y_L2]:=Y[Y_L1]*Sqr(X[X_n21]);
    // Амплітуда пульсаций
    Y[Y_Im1]:=Y[Y_tn]*(Y[Y_Up]-X[X_Un]*Fhy)/Y[Y_L1];
    // Амплітуда пульсації Im2
    Y[Y_Im2]:=Y[Y_Im1]/X[X_n21];
    // РОЗРАХУНОК КОЕФІЦІЄНТІВ P1,P2,B1,B2
    p1:=Trunc(X[X_N]*Y[Y_Kn])+1;
    p2:=p1-1;
    b1:=X[X_N]-p1;
    b2:=X[X_N]-p2;
    //-----Розрахунок мінімальних і максимальних значень-----
    In23min:=Y[Y_Im2]*b1*(1-(b1+1)/(2*Y[Y_Kv]*X[X_N]));
    In1p2min1:=Y[Y_Im1]*p2*(p2+1)/(2*Y[Y_Kn]*X[X_N])+Y[Y_Im2]*(Sqr(b2)-
    -b2)/(2*Y[Y_Kv]*X[X_N]);
    In1p2min2:=Y[Y_Im1]*p1*(1-(p2/(2*Y[Y_Kn]*X[X_N])))+Y[Y_Im2]*b1*(1-
    -(b2/(2*Y[Y_Kv]*X[X_N])));
    In1p2min3:=Y[Y_Im1]*p1*(1-(p2/(2*Y[Y_Kn]*X[X_N])))+Y[Y_Im2]*b1*(1-

```

```

-(b2/(2*Y[Y_Kv]*X[X_N])))-Y[Y_Im1]+Y[Y_Im2];
  if (In1p2min1 <= In1p2min2) and (In1p2min1 < In1p2min3)
  then In1p2min:= In1p2min1;
  if (In1p2min2 <= In1p2min1) and (In1p2min2 < In1p2min3) then In1p2min:=
In1p2min2;
  if (In1p2min3 <= In1p2min1) and (In1p2min3 < In1p2min2) then In1p2min:=
In1p2min3;
  In1p2max1:=Y[Y_Im1]*p1*(1-((p1-1)/(2*Y[Y_Kn]*X[X_N])))+Y[Y_Im2]*b1*(1-
-((b1+1)/(2*Y[Y_Kv]*X[X_N])));
  In1p2max2:=In1p2max1+(Y[Y_Im2]-Y[Y_Im1]);
  begin
  if X[X_n21]>=1 then In1p2max:=In1p2max1;
  if X[X_n21]<1 then In1p2max:=In1p2max2;
end;
  Ip13max:=Y[Y_Im1]*p1*(1-((p1-1)/2*X[X_N]*Y[Y_Kn]));
  Ip13min:=Y[Y_Im1]*p1*(1-((p1-1)/2*X[X_N]*Y[Y_Kn]))-Y[Y_Im1];
  In23max:=In23min+Y[Y_Im2];
//----- Розрахунок пульсацій-----
// Амплітуда пульсації на вході
Y[Y_dIpoip]:=Max(Y[Y_Im1]*X[X_N]+1E-9,Y[Y_Im2]*Fby*X[X_N]);
// Амплітуда пульсації на виході (навантаженні) ССКМ
Y[Y_dInoip]:=Max(Y[Y_Im1]*Fhy*X[X_N],Y[Y_Im2]*X[X_N]+1E-9);
// Максимальна амплітуда на вході МІП
begin
  if X[X_Y]=2 then Ipmax:=In1p2max;
  if (X[X_Y]=1) or (X[X_Y]=3) then Ipmax:=Ip13max;
end;
// Мінімальна амплітуда на вході
begin
  if X[X_Y]=2 then Ipmin:=In1p2min;
  if (X[X_Y]=1) or (X[X_Y]=3) then Ipmin:=Ip13min;
end;
// Максимальна амплітуда на виході (навантаженні)
begin
  if X[X_Y]=1 then Inmax:=In1p2max;
  if (X[X_Y]=2) or (X[X_Y]=3) then Inmax:=In23max;
end;
// Мінімальна амплітуда на виході (навантаженні)
begin
  if X[X_Y]=1 then Inmin:=In1p2min;
  if (X[X_Y]=2) or (X[X_Y]=3) then Inmin:=In23min;
end;
// 38) Амплітуда пульсації на виході (навантаженні)
Y[Y_dInmip]:=Inmax-Inmin;
// Амплітуда пульсації на вході
Y[Y_dIpmip]:=Ipmax-Ipmin;
Y[Y_Ip]:=X[X_Un]*Y[Y_In]/Y[Y_Up];
// Кругова частота для

```

```

w1:=2*3.1415926*Y[Y_F];
// кругова частота для
w2:=2*3.1415926*Y[Y_F]*X[X_N];
Y[Y_Rp]:=Y[Y_Up]/Y[Y_Ip];
// вхідна потужність
Y[Y_Rp]:=Y[Y_Up]*Y[Y_Ip];
//----- Розрахунок пульсацій-----
// пульсації вхідні
Y[Y_dUpoip]:=Y[Y_dIpoip]*Y[Y_Rp]/Sqrt(Sqr(Y[Y_Rp])*Sqr(w1)*Sqr(X[X_Cp])
+1);
// пульсації вихідні
Y[Y_dUnoip]:=Y[Y_dInoip]*Y[Y_Rn]/Sqrt(Sqr(Y[Y_Rn])*Sqr(w1)*Sqr(X[X_Cn])+1);
// пульсації вхідної напруги
Y[Y_dUpmip]:=Y[Y_dIpmip]*Y[Y_Rp]/Sqrt(Sqr(Y[Y_Rp])*Sqr(w2)*Sqr(X[X_Cp])+1);
// пульсації напруги напруги
Y[Y_dUnmip]:=Y[Y_dInmip]*Y[Y_Rp]/Sqrt(Sqr(Y[Y_Rp])*Sqr(w2)*Sqr(X[X_Cn])+1);
//-----Розрахунок коефіцієнтів пульсацій -----
// коефіцієнт пульсації
Y[Y_kripmip]:=Y[Y_dIpmip]/(2*Y[Y_Ip]);
// коефіцієнт пульсації
Y[Y_kripoip]:=Y[Y_dIpoip]/(2*Y[Y_Ip]);
// коефіцієнт пульсації навантаження
Y[Y_krinmip]:=Y[Y_dInmip]/(2*Y[Y_In]);
// коефіцієнт пульсації
Y[Y_kriipoip]:=Y[Y_dInoip]/(2*Y[Y_In]);
// коефіцієнт пульсації напруги на вході
Y[Y_kripmip]:=Y[Y_dUpmip]/(2*Y[Y_Up]);
// коефіцієнт пульсації на вході
Y[Y_kriipoip]:=Y[Y_dUpoip]/(2*Y[Y_Up]);
// коефіцієнт пульсації
Y[Y_krinmip]:=Y[Y_dUnmip]/(2*X[X_Un]);
// коефіцієнт пульсації нагрузки
Y[Y_kriipoip]:=Y[Y_dUnoip]/(2*X[X_Un]);
//----- коефіцієнт сгладжування -----
// коефіцієнт сгладжування
Y[Y_Sioip]:=Y[Y_kriipoip]/Y[Y_kriipoip];
// коефіцієнт сгладжування
Y[Y_Simip]:=Y[Y_kripmip]/Y[Y_krinmip];
// коефіцієнт сгладжування за напругою
Y[Y_Suoip]:=Y[Y_kriipoip]/Y[Y_kriipoip];
// коефіцієнт сгладжування за напругою
Y[Y_Sumip]:=Y[Y_kripmip]/Y[Y_krinmip];
//----- коефіцієнт сгладжування структури -----
// коефіцієнт сгладжування структури на вході
Y[Y_Sstrip]:=Y[Y_kriipoip]/Y[Y_kripmip];
// коефіцієнт сгладжування структури на виході
Y[Y_Sstrin]:=Y[Y_kriipoip]/Y[Y_krinmip];
// коефіцієнт сгладжування структури за напругою на вході

```

```

Y[Y_Sstrup]:=Y[Y_кpupoip]/Y[Y_кpupmip];
// коефіцієнт сгладжування структури за напругою на виході
Y[Y_Sstrun]:=Y[Y_кpupoip]/Y[Y_кpupmip];
//----- Розрахунок енергетичних параметрів -----
//----- Розрахунок діючих струмів-----
// діюче значення струму навантаження
Y[Y_Ipod]:=X[X_N]*(SQRT(Y[Y_Kn]*(SQR(Y[Y_Im1])/3)+Y[Y_kv]*(Fby*SQR(Y[Y_Im2])-
-Fby*Y[Y_Im2]*Fby*Y[Y_Im2]+(SQR(Y[Y_Im2])*Fby)/3)));
// діюче значення струму нагрівки
Y[Y_Inod]:=X[X_N]*(SQRT(Y[Y_kv]*(SQR(Y[Y_Im2])-(Y[Y_Im2])*Y[Y_Im2]+
+SQR(Y[Y_Im2])/3)+Y[Y_Kn]*Fhy*(SQR(Y[Y_Im1])/3)));
// діюче значення струму навантаження
Y[Y_Ipmd]:=SQRT((SQR(Y[Y_Im1])/12)*Y[Y_Kn]+Y[Y_kv]*SQR(Y[Y_Ip]));
// діюче значення струму навантаження
Y[Y_Inmd]:=SQRT(Y[Y_Kn]*(SQR(Y[Y_Im1])/12)+Y[Y_kv]*(SQR(Y[Y_Im2])/12));
// діюче значення струму вхідного конденсатора для
Y[Y_ICpod]:=SQRT(Y[Y_Kn]*(SQR(Y[Y_Im1])/3-Y[Y_Im1]*Y[Y_Ip]+SQR(Y[Y_Ip]))+
+Y[Y_kv]*(SQR(Y[Y_Ip])-(Y[Y_Im2]*Fby))+Y[Y_Im2]*Fby*(Y[Y_Ip]-(Y[Y_Im2]*Fby))+
+(SQR(Y[Y_Im2])*SQR(Fby))/3));
// діюче значення струму вихідного конденсатора для
Y[Y_ICnod]:=SQRT(Y[Y_Kn]*((SQR(Y[Y_Im1])*Fhy)/3-Fhy*Y[Y_Im1]*Y[Y_In]+
+SQR(Y[Y_In]))+Y[Y_kv]*(SQR(Y[Y_Im2])-(Y[Y_In]))-(Y[Y_Im2]-
-Y[Y_In])*Y[Y_Im2]+SQR(Y[Y_Im2])/3));
// діюче значення струму вхідного регулятора
Y[Y_ICpmd]:= Y[Y_dIpmip]/(2*SQR(3));
// діюче значення струму вихідного регулятора
Y[Y_ICnmd]:= Y[Y_dInmip]/(2*SQR(3));
// діюче значення струму k-го СК
Y[Y_Iw1kd]:=X[X_n21]*(SQRT(Y[Y_Kn]*(SQR(Y[Y_Im2])/3)));
// діюче значення струму k-го СК
Y[Y_Iw2kd]:=SQRT(Y[Y_kv]*(SQR(Y[Y_Im2])/3));
// діюче значення струму w1 и w2 k-го СК
Y[Y_Iw12kd]:=SQRT((SQR(X[X_n21])*Y[Y_Kn]+Y[Y_kv]*(SQR(Y[Y_Im2])/3)));
// діюче значення струму в регуляторі S1 k-го СК
Y[Y_Is1kd]:=Y[Y_Iw1kd];
// діюче значення струму в ключі VD1 k-го регулятору
Y[Y_Ivd1kd]:=Y[Y_Iw2kd];
//----- Розрахунок втрат потужності-----
// Втрати потужності вхідного регулятора
Y[Y_PCpo]:=SQR(Y[Y_ICpod])*X[X_Rcp_otn];
// Втрати потужності вихідного регулятора
Y[Y_PCno]:=SQR(Y[Y_ICnod])*X[X_Rcn_otn];
// Втрати потужності входного регулятора
Y[Y_PCpm]:=SQR(Y[Y_ICpmd])*X[X_Rcp_otn];
// Втрати потужності в вихідному регуляторі
Y[Y_PCnm]:=SQR(Y[Y_ICnmd])*X[X_Rcp_otn];
// Сумарні Втрати потужності в входного і вихідного регулятора
Y[Y_PCo]:=Y[Y_PCpo]+Y[Y_PCno];

```

```

// Сумарні Втрати потужності входного і виходного регулятора
Y[Y_Pcm]:=Y[Y_PCpm]+Y[Y_PCnm];
// Втрати потужності в L1 k-го СК
Y[Y_PL1k]:=SQR(Y[Y_Iw1kd])*X[X_L_R_otn1]+SQR(Y[Y_Iw2kd])*X[X_L_R_otn2]+
+SQR(Y[Y_Iw12kd])*X[X_L_R_otn12];
// Статичні Втрати потужності в ключі S1 k-го СК
Y[Y_Ps1k_stat]:= SQR(Y[Y_Is1kd])*X[X_s1_R_otn]*X[X_Rout];
// Напруга на ключі S1 максимальна
Y[Y_Us1kmax]:=Y[Y_Up]*((X[X_n21]-Fby)/X[X_n21])+X[X_Un]*((1-
- Fhy*X[X_n21])/X[X_n21]);
// Динамічні Втрати потужності в ключі S1 k-го СК
Y[Y_Ps1k_din]:=(Y[Y_Us1kmax]*Y[Y_Im1]*X[X_s1_tper])/2;
// Суммарні Втрати потужності в ключі S1k k-го СК
Y[Y_Ps1k]:=Y[Y_Ps1k_stat]+Y[Y_Ps1k_din];
// Статичні Втрати потужності в ключі VD1 k-го СК
Y[Y_Pvd1k_stat]:=SQR(Y[Y_Ivd1kd])*X[X_vd1_R_otn]*X[X_Rout];
// Напруга на ключі VD1 максимальна
Y[Y_Uvd1kmax]:=Y[Y_Up]*(X[X_n21]-Fby)+X[X_Un]*(1-Fhy*X[X_n21]);
// Динамічні Втрати потужності в ключі VD1 k-го СК
Y[Y_Pvd1k_din]:=(Y[Y_Uvd1kmax]*Y[Y_Im2]*X[X_vd1_tper])/2;
// Сумарні Втрати потужності в ключі VD1 k-го СК
Y[Y_Pvd1k]:=Y[Y_Pvd1k_stat]+Y[Y_Pvd1k_din];
// Втрати потужності
Y[Y_Poip]:=X[X_N]*(Y[Y_PL1k]+Y[Y_Ps1k]+Y[Y_Pvd1k])+Y[Y_PCo];
// Втрати потужності
Y[Y_Pmip]:=X[X_N]*(Y[Y_PL1k]+Y[Y_Ps1k]+Y[Y_Pvd1k])+Y[Y_Pcm];
//----- Розрахунок ККД-----
// ККД k-го регулятора (Y[Y_kpd_oip])
Y[Y_kpd_oip]:=Y[Y_Pn]/(Y[Y_Pn]+Y[Y_Poip]);
// ККД ССКМ (Y[Y_kpd_mip])
Y[Y_kpd_mip]:=Y[Y_Pn]/(Y[Y_Pn]+Y[Y_Pmip]);
end;

```


ДОДАТОК В.

РОЗРОБКА ПРОГРАМИ ДЛЯ НЕЧІТКОГО КОНТРОЛЕРА В
СЕРЕДОВИЩІ FUZZY TECH.

Досвід використання суднових кондиціонерів показує, що процес охолодження або нагрівання повітря в приміщеннях має інерційність, тобто після включення режиму «холод» відбувається нагнітання холодного повітря, в зв'язку з чим, температура повітря в приміщенні поступово падає. При цьому в момент відключення цього режиму температура продовжує знижуватися протягом певного проміжку часу. Аналогічна ситуація спостерігається при включенні режиму «тепло». Щоб врахувати цю особливість процесу управління і виключити додаткові витрати, пов'язані з частим включенням і відключенням зазначених режимів, передбачається врахувати в якості контрольованого параметра не тільки температуру повітря в приміщенні, але і швидкість її зміни (рис. В.1).

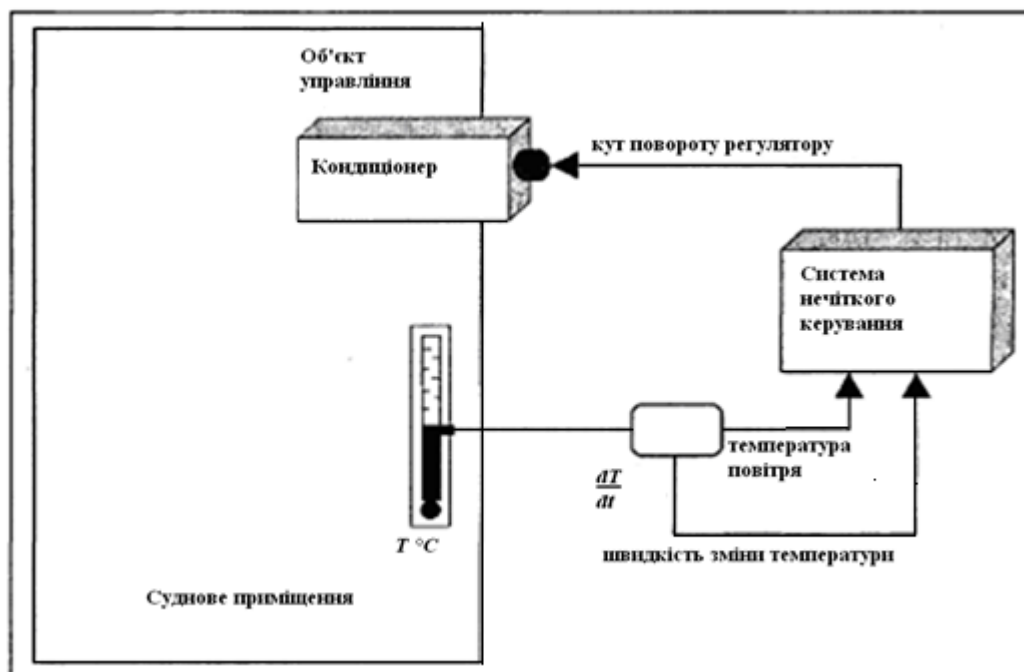


Рис. В.1. Ілюстрація моделі нечіткого управління кондиціонером повітря в приміщенні

Останнім часом для керування системами кондиціонування повітря активно розвиваються принципово нові закони регулювання, що одержали назву «нечітка логіка» (Fuzzy logic). Це нова технологія керування, у якій як модель використовується нечітка система. Система вимірює температуру в приміщенні й автоматично вибирає режим роботи. Вибір ґрунтується на практичному аналізі — за еталон беруться стандартні переваги людей, що користуються системою. Величини відби-

вають рівні різних факторів, від значення яких залежить комфорт людини: температура, вологість, інтенсивність повітряних потоків, тип одягу (літня/зимова) і ін. Приведемо приклад обліку впливу вологості на стан людини. Відчуття теплоти або прохолоді є наслідком не тільки температури повітря, але його вологості. Температура повітря 26 °C и вологість 50-60% вважаються комфортними влітку, тоді як температура 22 °C буде комфортної взимку. Однак навіть температура 25°C буде перебувати в зоні комфортності, якщо вологість становить 50 %, тоді як ця ж температура при вологості 70 % буде здаватися високою .

Такий підхід добре погодиться з логічною системою обробки інформації «нечітка логіка» (fuzzy logic), що застосовується в нечітких логічних регуляторах (НЛР). Нечітка логіка має переваги в порівнянні з використанням ПД - регуляторів при обробці дуже складних процесів, нелінійних процесів високих порядків, обробці експертних (лінгвістично сформульованих) даних. Нечітка логіка оперує не цифровими, а лінгвістичними поняттями. Ключовими поняттями нечіткої логіки є: фазифікація - перетворення множини значень аргументу (x) у деяку функцію приналежності $M(x)$, тобто переклад значень (x) у нечіткий формат; дефазифікація - процес зворотний фазифікації.

Розглянемо принцип керування холодопродуктивністю кондиціонера з використанням нечіткої логіки. Холодопродуктивність, що повинен забезпечити кондиціонер, визначається різницею між температурою в приміщенні й температурою, що ми хотіли б одержати (температура уставки). Ця змінна лінгвістично може бути сформульована як «різниця температур» і приймати значення «мала», «середня» й «більша». Природно, чим більше різниця температур у цей момент, тим більше повинна бути холодопродуктивність. Другий лінгвістичної змінної визначимо «швидкість зміни температури» у приміщенні, який також дамо лінгвістичні значення «мала», «середня» й «більша». Якщо швидкість зміни температури більша, то потрібно більша холодопродуктивність. У міру наближення температури в приміщенні до температури уставки швидкість зміни температури в приміщенні буде зменшуватися, а холодопродуктивність кондиціонера знижуватися. Холодопродуктивність є вихідний змінної, котрої привласнюються наступні тер-

ми: «дуже мала», «мала», «середня», «більша» й «дуже більша». Зв'язок між входом і виходом занесемо в таблицю нечітких правил. Кожен запис відповідає своєму нечіткому правилу.

Наприклад, якщо різниця температур середня, а швидкість зміни більша, те холодопродуктивність повинна бути більша. Кондиціонер з нечіткою логікою працює по наступному принципі: сигнали від датчиків будуть фазифіковані, оброблені, дефазифіковані й отримані дані у вигляді сигналів надійдуть на частотний регулятор двигуна компресора, швидкість обертання якого (а отже, і продуктивність) будуть мінятися у відповідності зі значенням функції приналежності. Результат спільного впливу двох функцій приналежності на значення вихідного параметра «холодопродуктивність» визначається відповідною програмою, закладеної в логічний пристрій. З огляду що холодопродуктивність пропорційно частоті обертання компресора, можна від частоти побудувати залежність результуючої функції приналежності обертання компресора, додавши лінгвістичним термам швидкість обертання компресора з рангом 1,0 наступні значення (рис. 8.3): мала - 20, середня — 50 Гц; більша — 75 Гц; дуже більша — 100 Гц. Після дефазифікації можна перейти до чіткого значення вихідного параметра - частоті обертання компресора або холодопродуктивність. В ПЧ (перетворювачі частоти) вхідна напруга 220/380В, с частотою 50 Гц перетворюється в вихідну імпульсну напругу за допомогою широтно-імпульсної модуляції (ШІМ), котра формує в обмотках двигуна синусоїдальний струм частотою від 0 до 400 Гц. Збільшенням частоти й амплітуди напруги, що подається на обмотки асинхронного двигуна, забезпечується плавне регулювання швидкості оберту вала електродвигуна.

Системи з нечіткою логікою функціонують по наступному принципі: показання вимірювальних приладів фазифікуються (переводяться в нечіткий формат), обробляються, дефазифікуються й потім у вигляді звичайних сигналів подаються на виконавчі пристрої. Ключовим елементом в нечіткій системі управління є нечіткий регулятор (рис. В.2).

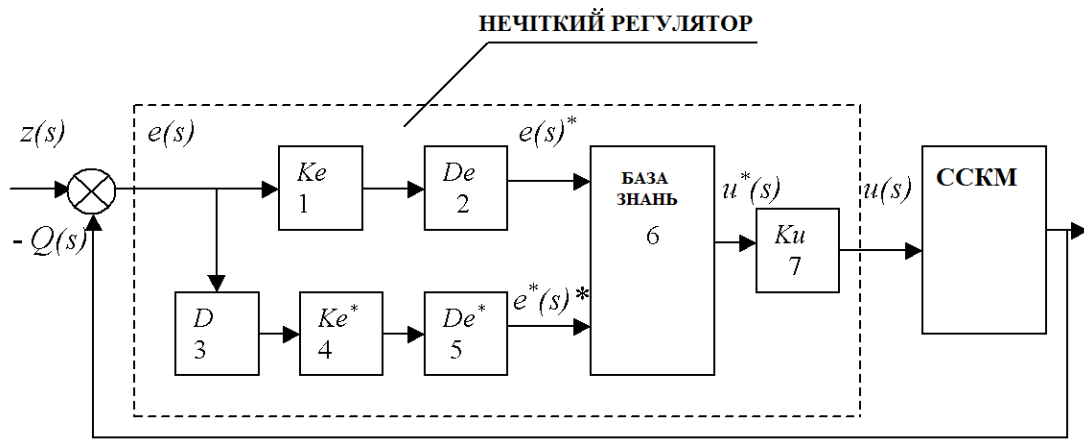


Рис. В. 2. Структура системи керування з нечітким регулятором

На рис. 2.1.4. вихідна змінна об'єкта регулювання технологічного процесу $yQ(s)$ рівняється із заданим значенням $z(s)$ і помилка неузгодженості $e(s) = Z(s) - Q(s)$ надходить у масштабний елемент 1 з коефіцієнтом K_e й у диференціатор 3, вхід якого множиться на K_e^* у масштабному елементі 4. Елементи 2, 5 призначені для перетворення поточних значень неузгодженості й похідній від неузгодженості (швидкості зміни неузгодженості) у їхні лінгвістичні значення (фазифікації). Нечіткі терми $e(s)^*$, $e^*(s)^*$ надходять у головний елемент нечіткого регулятора 6 - базу знань (БЗ). База знань (БЗ) будується на основі продукційної моделі знань, що має конструкцію виду **ЯКЩО...ТО...**

Знайдене лінгвістичне значення керування після множення на масштабний коефіцієнт K_u в елементі 7 і перетворення його в чітке значення $u(s)$ (етап дефазифікації) надходить на виконавчі пристрої об'єкта керування. Масштабні коефіцієнти K_e , K_e^* , K_u є параметрами універсальних безлічей E , E^* й U , на яких, виходячи з умов конкретного керованого об'єкта, визначаються нечіткі безлічі $e(s)_1^*$, $e^*(s)^*$, $u(s)^*$. Наприклад, якщо універсальною безліччю E є діапазон $(-10, -9, \dots, +9, +10)$ і потрібно, щоб неузгодженість у системі перебувало в діапазоні $(-1; +1)$, тоді K_e береться рівним 10,0, для того, щоб нечіткий регулятор міг використати всю універсальну безліч, на якому визначаються нечіткі безлічі.

Для нечіткого регулятора будь-яке правило в БЗ може бути представлене у вигляді: **ЯКЩО** $(e(s) \in e(s)_1^*)$ **І** $(e(s)^* \in e^*(s)_1^*)$ **ТО** $(u(s) \in u(s)_1^*)$,

де $e(s)$, $e(s)^*$, $u(s)$ - змінні; $e(s)_1^*$, $e^*(s)_1^*$, $u(s)_1^*$ - лінгвістичні значення змінних.

Згідно з методикою Алієва [5], база знань НР має табличний вигляд і в БЗ визначені нечіткі множини помилки $e(t)$, швидкості зміни $e'(t)$ і керуючого впливу $u(t)$, вищевказані нечіткі множини описані за допомогою лінгвістичного мови, де лінгвістичні змінні (ЛЗ) наступні: (NB - негативно велике, NS - негативно середнє, NM - негативно мале, Z - нульове, PS - позитивно середнє, PM - позитивно мале, PB - позитивно велике) [4]. Продукційна база правил виду **ЯКЩО** $e(t) = NS$ **І** $e'(t) = Z$ **ТО** $u(t) = NM$ представлена у вигляді таблиці 2.1.

Таблиця В.1

База правил нечіткого регулятора

Відхилення e	Похідна відхилення e'				
	NB	NM	Z	PM	PB
NB	NB	NB	NM	PM	PM
NM	NM	NM	Z	Z	PM
Z	NM	NM	Z	PM	PM
PM	NM	Z	Z	PM	PM
PB	NM	Z	PM	PB	PB

Графіки функції приналежності представлені на рис. В.3 – В.5.

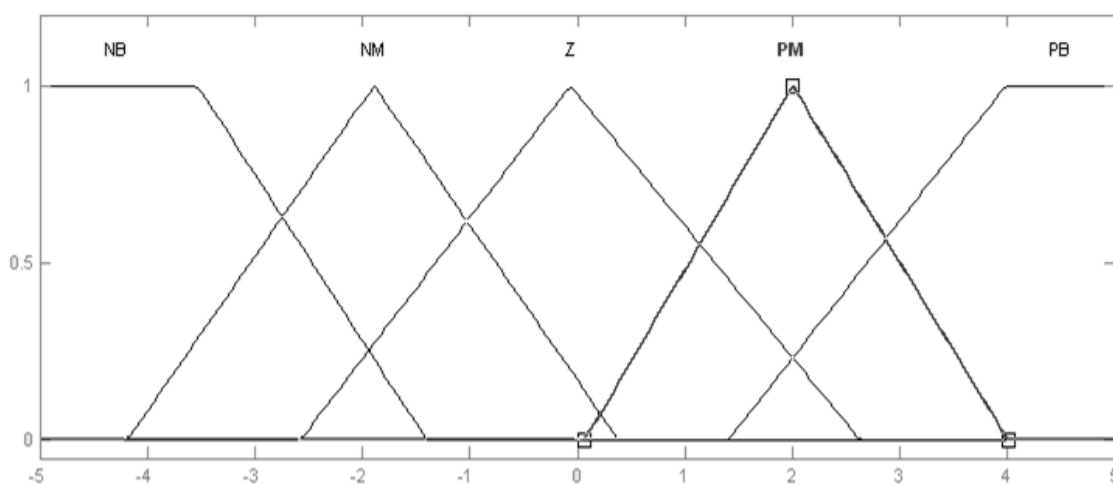


Рис. В. 3. Функції приналежності «помилка»

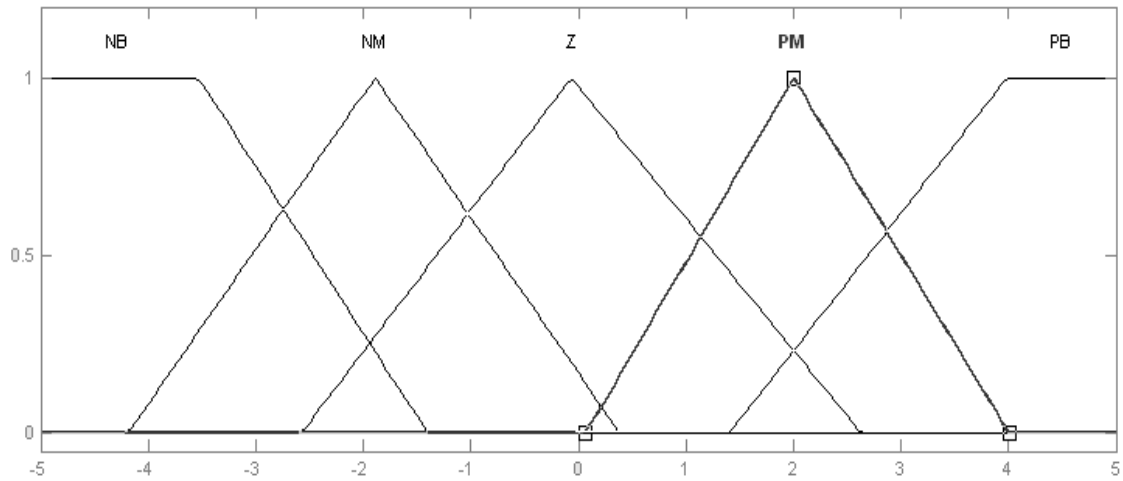


Рис. В. 4. Функції приналежності «похідна помилки»

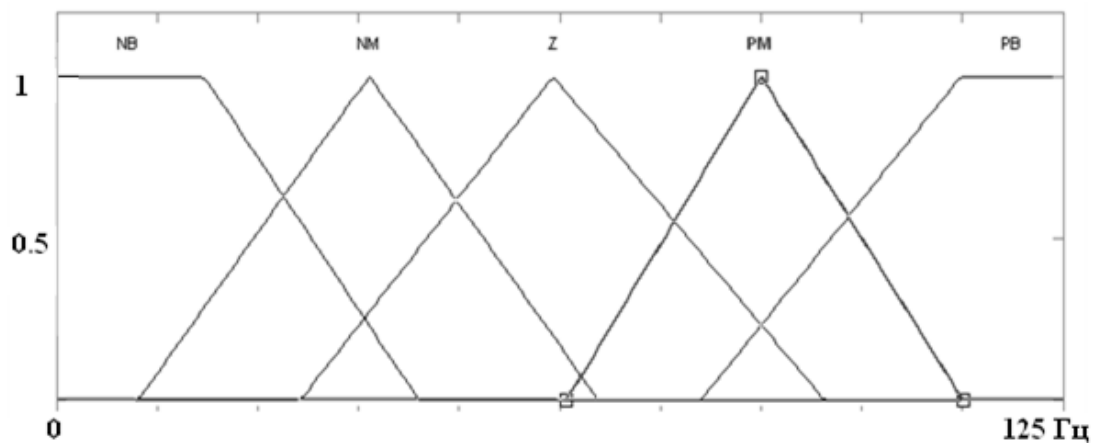


Рис. В. 5. Функції приналежності «управлючій вплив»

Етап дефазифікації, по першому каналу регулювання, проводиться методом

центра ваги:
$$H_c = \frac{\sum_{c=1}^7 H_c \cdot \mu(H_c)}{\sum_{c=1}^7 \mu(H_c)}$$

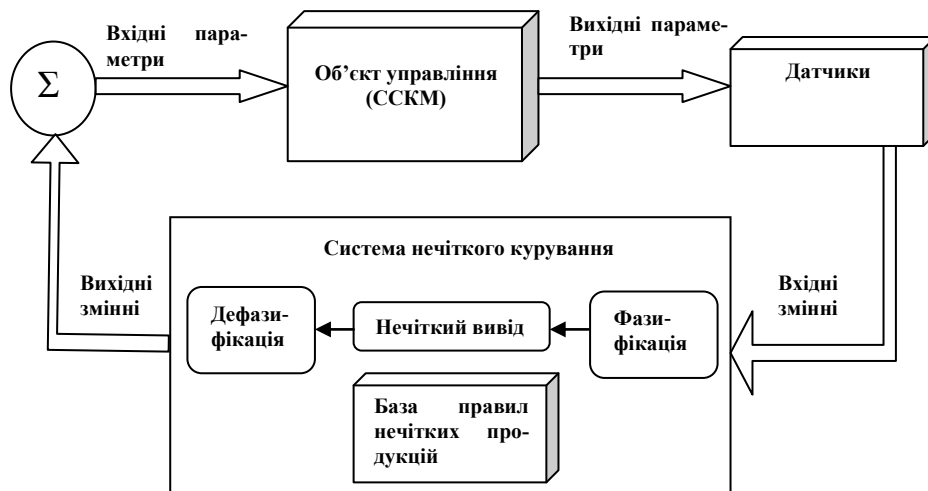


Рис. В. 6 Архітектура компонентів процесу нечіткого управління

Розробка нечіткої системи управління з допомогою програми fuzzyTech.

Дана програма призначена для рішення різних завдань нечіткого моделювання. На відміну від системи MatLab, fuzzyTECH є спеціалізованим засобом, що дозволяє розробляти й досліджувати різні нечіткі моделі в графічному режимі, а так само перетворювати їх у програмний код на одній з мов програмування з можливістю наступного виконання. Дана програма надає можливість створення клієнтського або серверного додатка для нечіткого керування вилученими об'єктами.

Загальна структура контролера, що використовує нечітку логіку, містить у своєму складі наступні складові частини :

- блок фазифікації; базу знань; блок рішень; блок дефазифікації.

Як реальні мікроконтролери, що підтримують нечітку логіку, виступають: 68HC11, 68HC12 фірми Motorola, MCS - 96 фірми Intel, а також деякі інші.

Апаратний мікропроцесор нечіткої логіки може приймати аналогові сигнали, переводити їх у нечіткий формат, а потім, застосовуючи відповідні правила, перетворювати результати у формат звичайної логіки й далі - в аналоговий виконавчий сигнал. Все це по можливості здійснюється без зовнішніх запам'ятовувальних пристроїв, перетворювачів і додаткового програмного забезпечення.

Реалізувати фаззи - контролер можна практично на будь-якому мікроконтролері, наприклад, Motorola 68HC11 або Intel MCS 96.

Існують мікроконтролери, у яких фаззі-команди інтегровані безпосередньо в асемблер. Наприклад, це кристали Motorola 68HC12 або STMicroelectronics ST52x301. У ядро цих мікросхем убудована апаратна підтримка базових фазі-операцій. Зокрема, мікроконтролер 68HC12 базується на ядрі з малим споживанням, що має розширений набір інструкцій 68HC11 на 16-розрядному рівні. Стік переривань і програмна модель повністю ідентичні 68HC11. Вісьмирозрядний мікроконтролер сімейства 68HC11 - один з найбільше широко використовуваних у світі електронних пристроїв. Архітектура, що стала промисловим стандартом, 68HC11 підтримується найбільшою кількістю налагоджувальних засобів, вільно розповсюджуваним програмним забезпеченням і численними прикладами застосування. Характерна риса сімейства 68HC11, що принципово відрізняє його від

HC05 і HC08, - це здатність функціонувати не тільки в однокристальному режимі, але й у розширеному, коли до контролера підключається зовнішня пам'ять. У складі контролерів 68HC11 є модулі аналого-цифрових перетворювачів, багатофункціональних таймерів, широтно-імпульсних модуляторів і послідовних інтерфейсів. Ядро контролера 68HC12 включає 64 нові інструкції, 20-розрядний арифметико-логічний пристрій, черга інструкцій і розширену індексну адресацію. Через нові інструкції й сторінкову адресацію пам'яті розроблювачі мають доступ до більш ніж чотирьох мегабайтів програмного коду й одному мегабайтові даних. Архітектура 68HC12 оптимізована для мов високого рівня, швидких математичних операцій і фазі-логіки.

1. Опис системи.

На цьому етапі за допомогою програмних засобів, пакета FuzzyTech, задання фазифікується. Тут описуються лінгвістичні змінні, використовувані в моделі, їхньої функції приналежності, розробляється стратегія керування за допомогою нечітких правил, що поєднується в єдину базу правил.

2. Off - line - оптимізація.

У цьому пункті перевіряється працездатність створеної моделі за допомогою засобів fuzzyTech. Використається створений програмний симулятор об'єкта керування. Виробляється аналіз його адекватності, працездатності й підтримки заданих параметрів.

3. On - line - оптимізація

На цьому етапі розроблювальна система керування й реальний об'єкт з'єднуються фізичною лінією зв'язку. Для зв'язку системи керування з моделлю використовується протокол зв'язку fTlink, в основу якого покладена концепція обміну повідомленнями Windows. Всі необхідні засоби для встановлення зв'язку об'єкта з моделлю перебувають у вихідних текстах програм поставляють із пакетом.

Даний вид налагодження дозволяє спостерігати поведінку системи в реальних умовах й, при необхідності, вносити зміни в систему керування.

4. Реалізація.

На цьому етапі необхідно одержати остаточний варіант коду для конкретного мікроконтролера. Основу програмного коду, що генерується пакетом fuzzyTech 5.5, становить апаратно – орієнтоване на конкретний тип процесора ядро. Поставляє з пакетом fuzzyTECH програмне ядро сумісне з такими контролерами, як, 8096 ВН, 8019МС, 80196 NT/NQ, 68HC12 й ін.

Пакет fuzzyTECH дозволяє створювати програму шляхом вибору необхідних блоків у меню. Останнім етапом є запуск програми й перегляд результатів керуючого впливу.

На першому етапі розробки програми вказуються кількість вхідних і вихідних змінних, а також кількість термів (нечітких множин) в кожній змінній (рис. В.7). Вікно редактора проекту представлено на рис. В.8.

Проводиться фазифікації помилки (Е) (рис. В.9) і її похідної (Е ') (рис. В.10) і керуючого впливу - частоти обертання двигуна компресора (рис. В. 11)

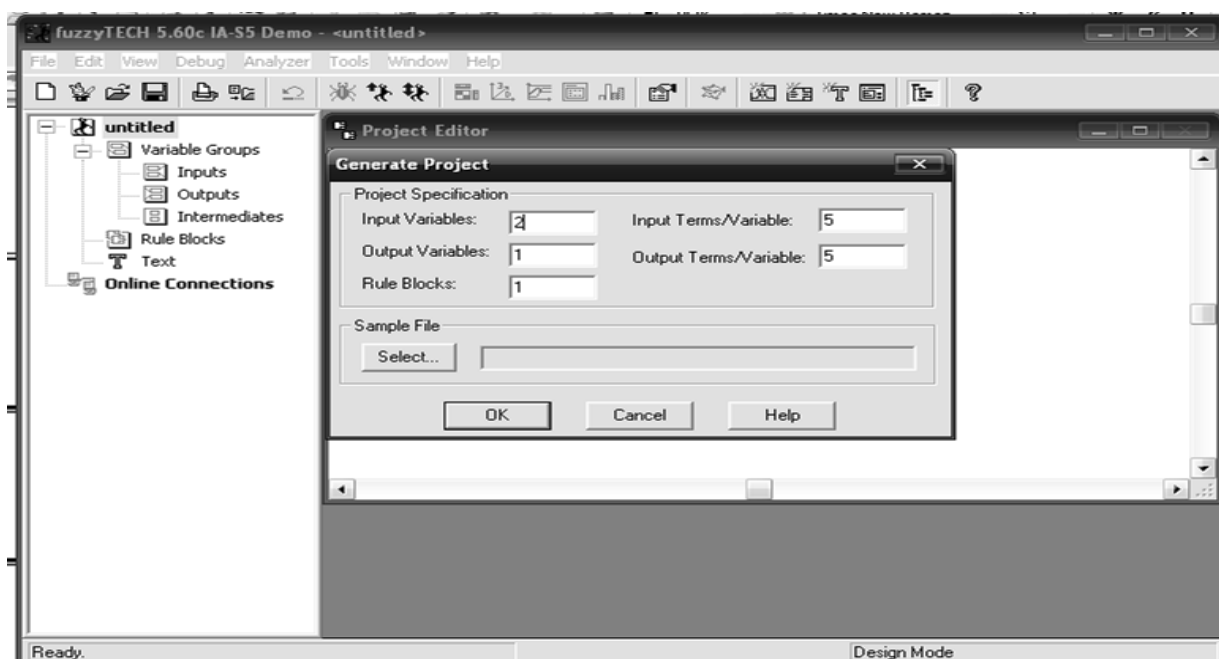


Рис. В.7 Вибір кількості вхідних - вихідних змінних й термів

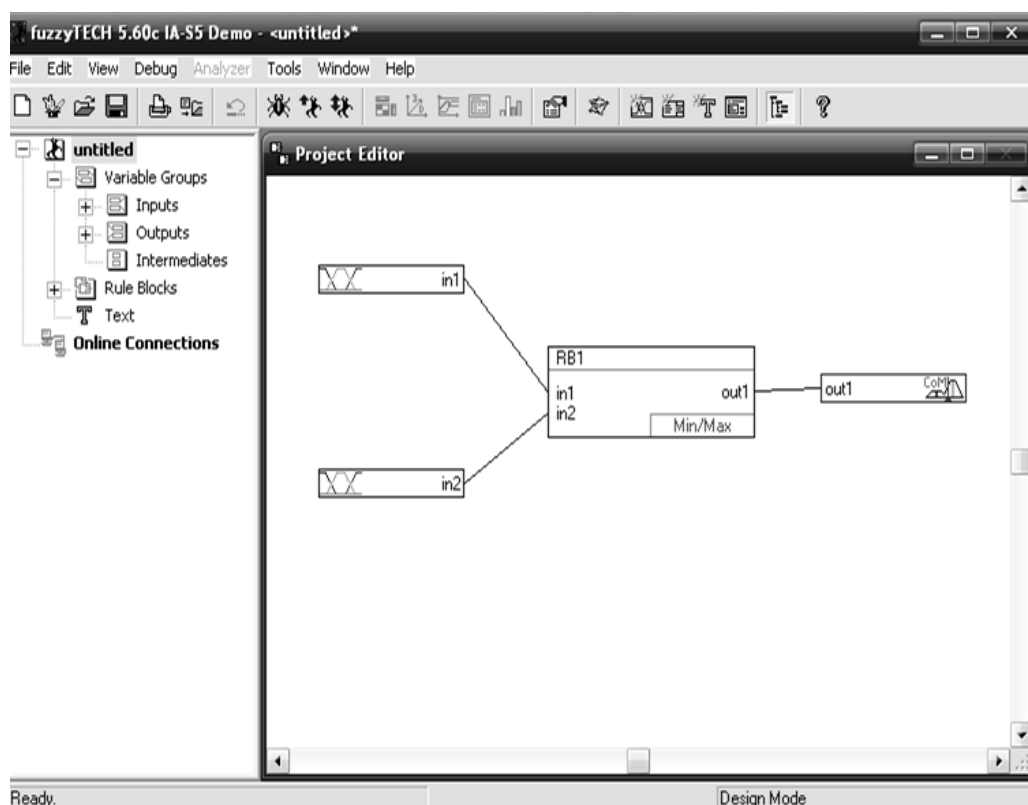


Рис. В.8. Редактор проекту програми

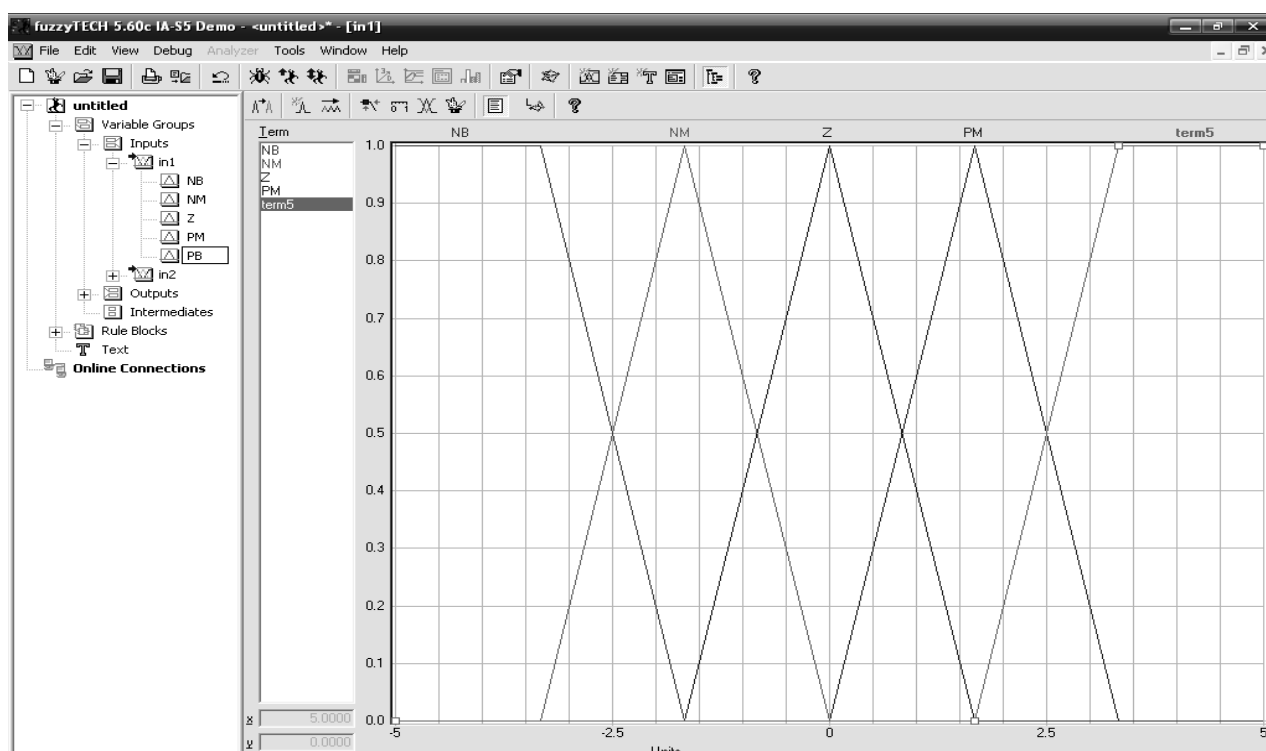


Рис. В. 9. Фазифікація вхідної змінної «помилка» у вікні проекту.

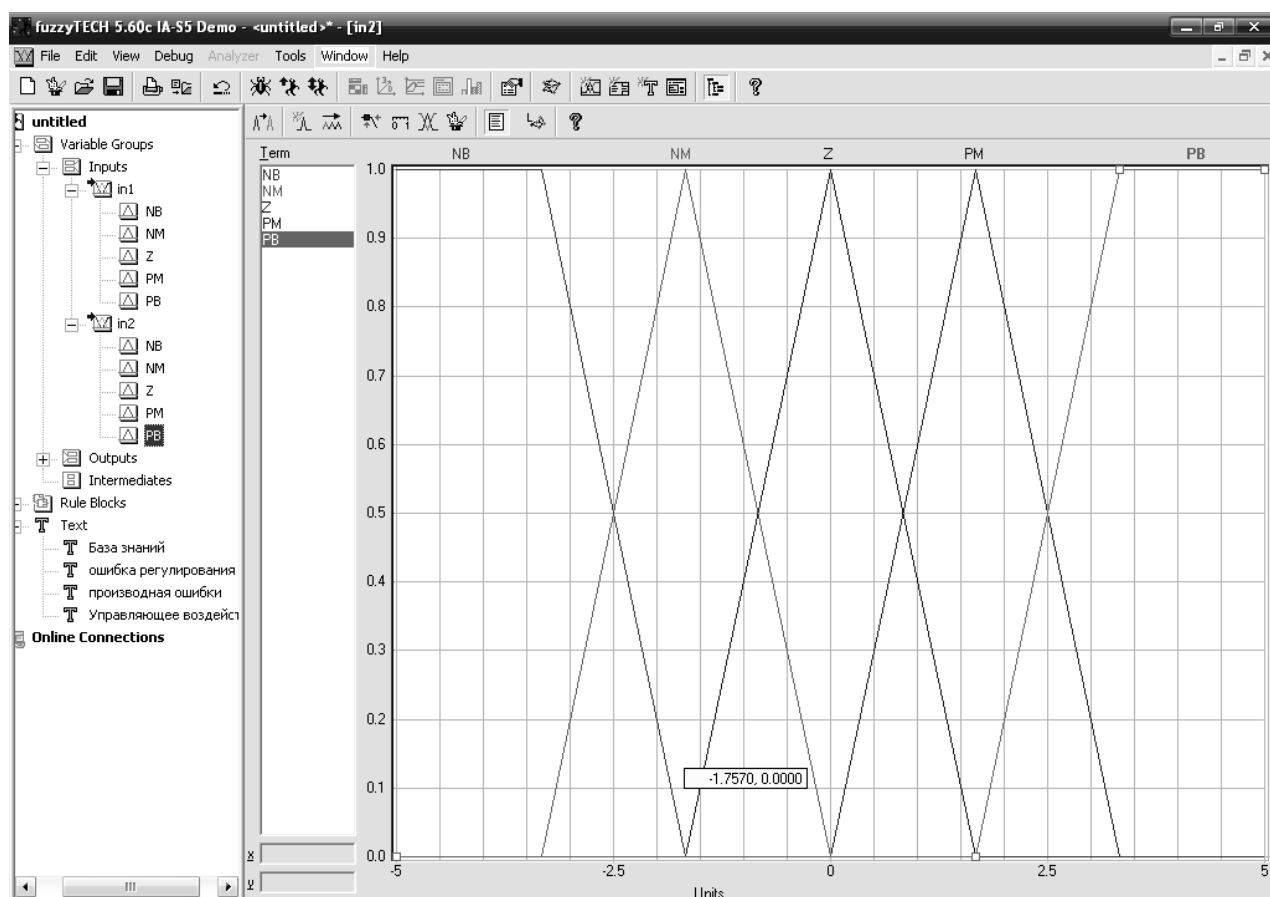


Рис. В. 10. Фазифікація входної змінної «похідна помилки» у вікні проекту

Рис. В.11. Вікно програми з функцією універсуму вихідної змінної

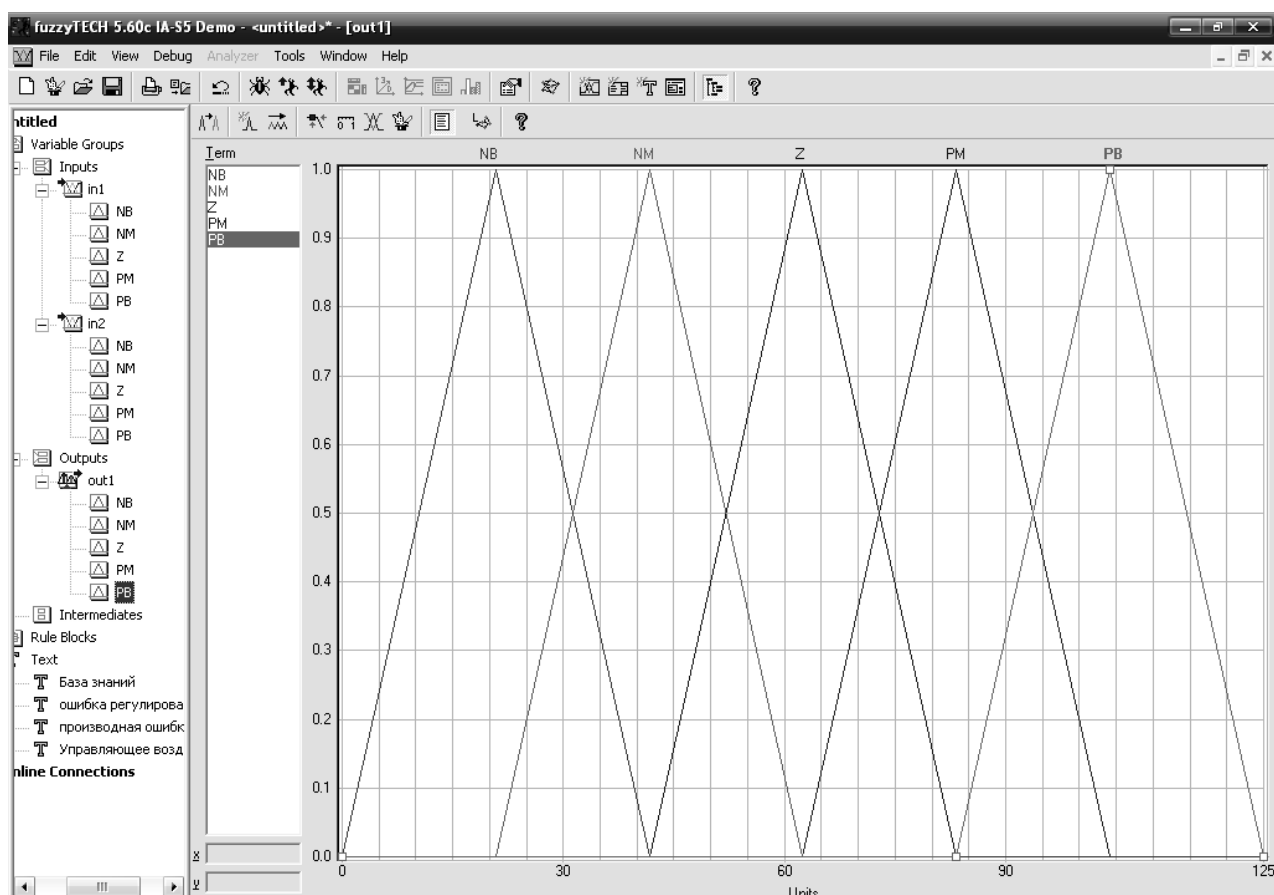


Рис. В.12. Вікно фазифікації вихідної змінної (управляючий вплив)

#	IF	THEN	DoS
1	NB	NB	1.00
2	NB	NM	1.00
3	NB	Z	1.00
4	NB	PM	1.00
5	NB	PB	1.00
6	NM	NB	1.00
7	NM	NM	1.00
8	NM	Z	1.00
9	NM	PM	1.00
10	NM	PB	1.00
11	Z	NB	1.00
12	Z	NM	1.00
13	Z	Z	1.00
14	Z	PM	1.00
15	Z	PB	1.00
16	PM	NB	1.00
17	PM	NM	1.00
18	PM	Z	1.00
19	PM	PM	1.00
20	PM	PB	1.00
21	PB	NB	1.00
22	PB	NM	1.00
23	PB	Z	1.00
24	PB	PM	1.00
25	PB	PB	1.00

Рис. В.13. Вікно табличного редактора бази правил нечітких продукцій

База правил має 25 правил нечітких продукцій виду: «ЯКЩО ...І...ТО»

fuzzyTECH 5.60c IA-S5 Demo - <untitled>* - [Spreadsheet Rule Editor - RB1]

File Edit View Debug Analyzer Tools Window Help

Variable Groups

- Inputs
 - dEdt
 - NB
 - NM
 - Z
 - PM
 - PB
 - E
 - NB
 - NM
 - Z
 - PM
 - PB
- Outputs
 - U
 - NB
 - NM
 - Z
 - PM
 - PB
- Intermediates
- Rule Blocks
- Text
 - База знань
 - ошибка регулirова
 - производная ошибк
 - Управляющее возд
- Online Connections

#	IF	THEN
	dEdt	E
1	NB	NB
2	NB	NM
3	NB	Z
4	NB	PM
5	NB	PB
6	NM	NB
7	NM	NM
8	NM	Z
9	NM	PM
10	NM	PB
11	Z	NB
12	Z	NM
13	Z	Z
14	Z	PM
15	Z	PB
16	PM	NB
17	PM	NM
18	PM	Z
19	PM	PM
20	PM	PB
21	PB	NB
22	PB	NM
23	PB	Z
24	PB	PM
25	PB	PB
26		

Рис. В.14. База правил нечітких продукцій

fuzzyTECH 5.60c IA-S5 Demo - <untitled>* - [Watch: Interactive Debug Mode]

File Edit View Debug Analyzer Tools Window Help

Variable Groups

- Inputs
 - dEdt
 - NB
 - NM
 - Z
 - PM
 - PB
 - E
 - NB
 - NM
 - Z
 - PM
 - PB
- Outputs
 - U
 - NB
 - NM
 - Z
 - PM
 - PB
- Intermediates
- Rule Blocks
- Text
 - База знань
 - ошибка регулirова
 - производная ошибк
 - Управляющее возд
- Online Connections

Inputs:

dEdt	0.9810
E	3.6230

Outputs:

U	95.6000
---	---------

Рис. В.15 Вікно перегляду результатів вибору управляючого значення

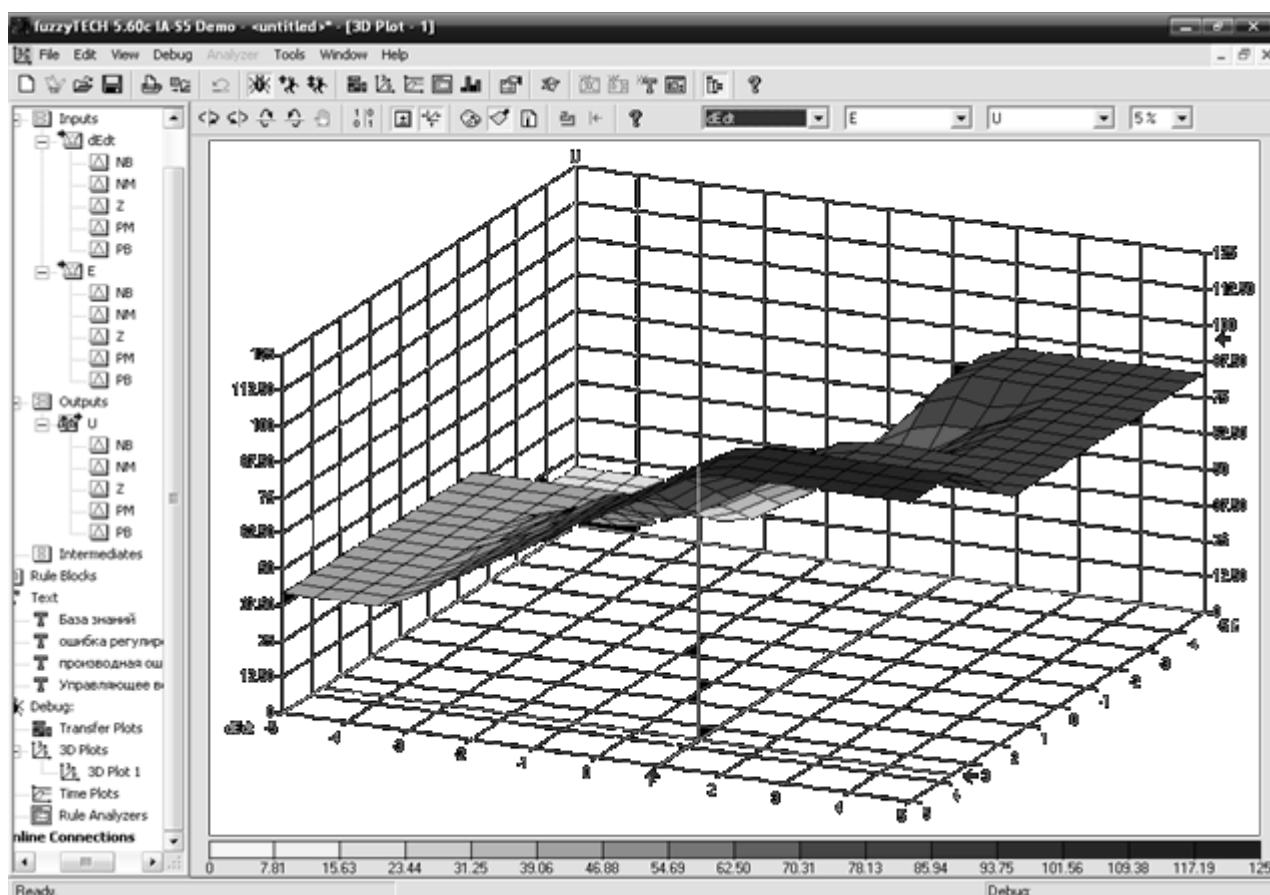


Рис. В.16. Вікно перегляду тривимірної поверхні системи нечіткого виводу
Для генерації коду програми для мікропроцесора є меню Tools (рис. В.17)

Останнім етапом є генерація програмного коду й програмування ППЗУ (постійний запам'ятовувальний пристрій). Даний пункт виконується за рахунок меню вибору протоколу зв'язку із зовнішнім контролером або типом процесора у випадку підключення контролера до ЕОМ через послідовний COM порт і передачу програми по локальній мережі (рис. В.18).

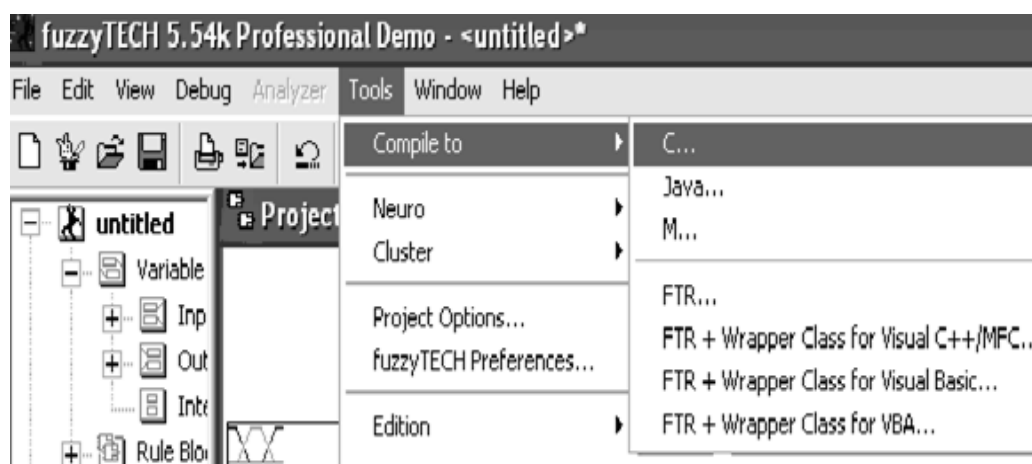


Рис. В.17. Генерація програмного коду

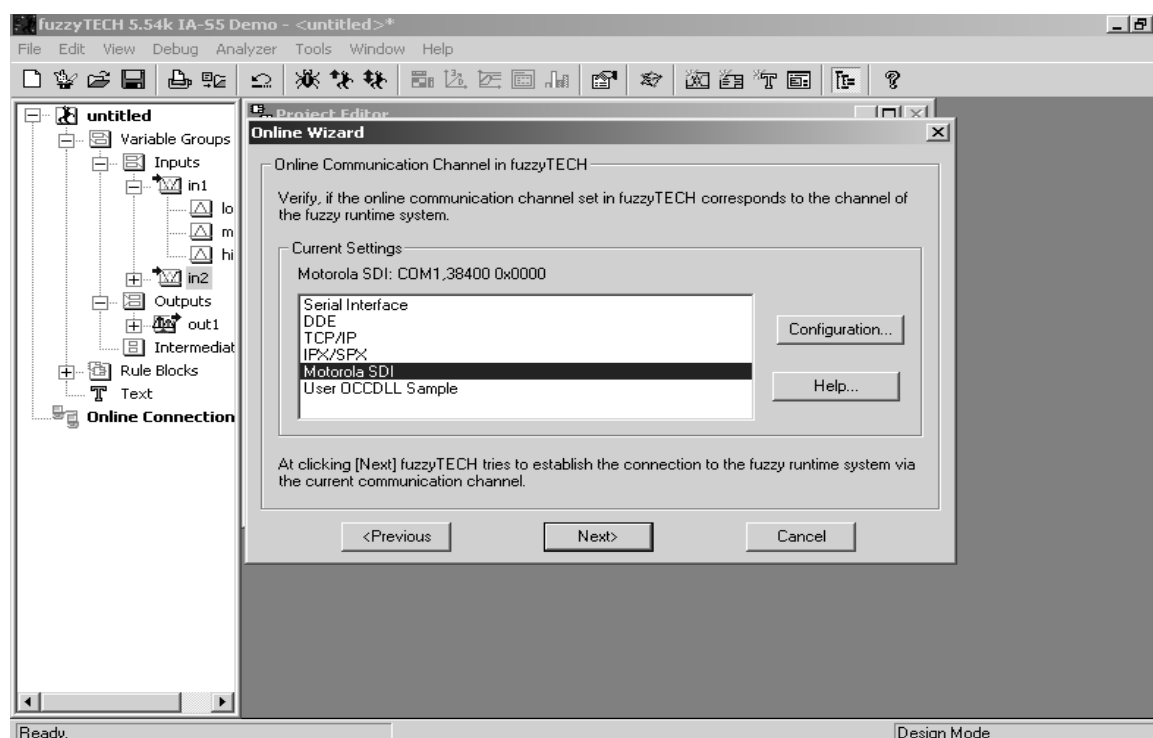


Рис. В.18 Передача програми по локальній мережі

Існуючі програмувальні контролери на платформі Motorola і д.р., а також спеціалізовані програмні пакети успішно дозволяють розробити нечітку модель керування технологічним процесом, апробувати її у віртуальному середовищі пакета й згенерувати програмний код для контролера. Підтримувана температура в приміщенні перебуває на рівні допуску, завдяки чому знижується енергоспоживання. Таким чином, керування кондиціонером із застосуванням нечітких логічних регуляторів забезпечує: зміну температури відповідно до санітарних норм (відсутність різкого перепаду температур у приміщенні, підтримка припустимої швидкості потоку повітря й ін.); установку необхідної холодопродуктивності; вибір режиму роботи й уставку температури, виходячи з температури й вологості в приміщенні; вибір комфортного розподілу й інтенсивності потоку повітря; мінімальний час виходу на заданий режим; зменшення витрати електроенергії на 10-25 %.

ДОДАТОК С.

РОЗРОБКА НЕЧІТКОЇ МОДЕЛІ КЕРУВАННЯ ЗАСУВКОЮ
ТЕПЛООБМІННОГО АПАРАТА

При дистанційному керуванні електрозасувкою теплообмінника (рис. D.1) для регулювання температури повітря вступника в приміщення, оператор використовує накопичений досвід і знання. Для практичного застосування даної інформації пропонується використати теорію нечіткої логіки [122]. Знання оператора можна виразити у вигляді наступних інструкцій:

1. ЯКЩО "температура повітря в приміщенні дуже низька" ТО "засувку відкрити повністю";
2. ЯКЩО "температура повітря в приміщенні низька" ТО "засувку відкрити";
3. ЯКЩО "температура повітря в приміщенні в нормі" ТО "засувку залишити без змін";
4. ЯКЩО "температура повітря в приміщенні висока" ТО "засувку прикрити";
5. ЯКЩО "температура повітря в приміщенні дуже висока" ТО "засувку повністю закрити".

Відповідно до алгоритму Мамдані [105], для створення нечіткої експертної системи (НЕС) проведемо ряд етапів:

На першому етапі проводиться фаззифікація вхідний і вихідний лінгвістичних змінних "Температура повітря в приміщенні", "Положення засувки".



Рисунок С.1. Зовнішній вигляд електрозасувки теплообмінника

Для розробки НЕС використовується програма MatLab з пакетом Fuzzy Logic Toolbox. Пакет Fuzzy Logic Toolbox підтримує всі стадії розробки нечітких сис-

тем: їх синтез, дослідження, проектування, моделювання, впровадження в режим реального часу. Убудовані GUI-модулі забезпечують зрозуміле середовище, із графічним інтерфейсом. Функції пакета реалізують більшість сучасних нечітких технологій, включаючи нечітких логічний висновок, нечітку кластеризацію й адаптивну нейро-нечітку систему (ANFIS). Fuzzy Logic Toolbox відкритий для користувача, можна переглянути алгоритми, переглянути вихідний код, додати власні функції належності або процедури дефазіфікації. Особливостями цього пакета є:

- реалізація алгоритмів нечіткого виводу Сугено й Мамдані;
- бібліотека функцій належності;
- налаштування функцій належності ANFIS-алгоритмом;
- можливість впровадження систем нечіткого виводу в Simulink через модуль Fuzzy Logic Controller;
- Сі-код алгоритмів, що дозволяє використати спроектовані система поза середовищем MATLAB;

Fuzzy Logic Toolbox містить функції які викликаються з робочої області програми(командний рядок) і кілька графічних модулів, що дозволяють набудувати систему візуально, у вигляді діалогів. Проведемо етапи фазіфікації ЛП "температура повітря", "положення засувки"

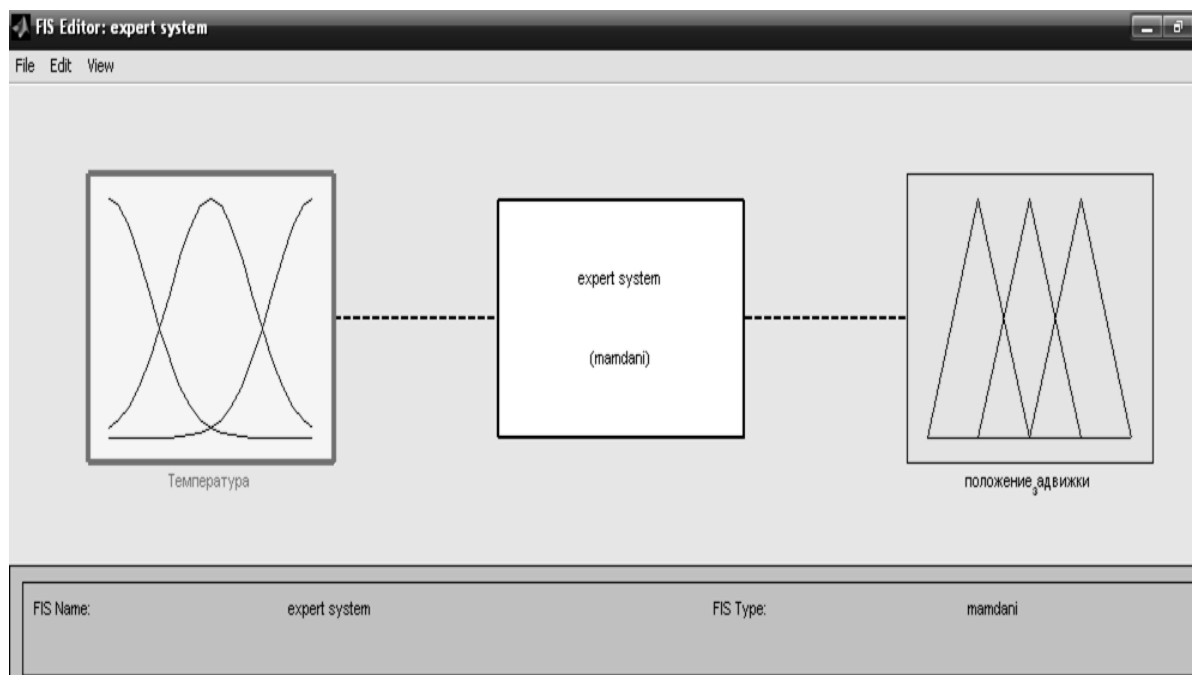


Рис. D. 2. Графічний інтерфейс редактора

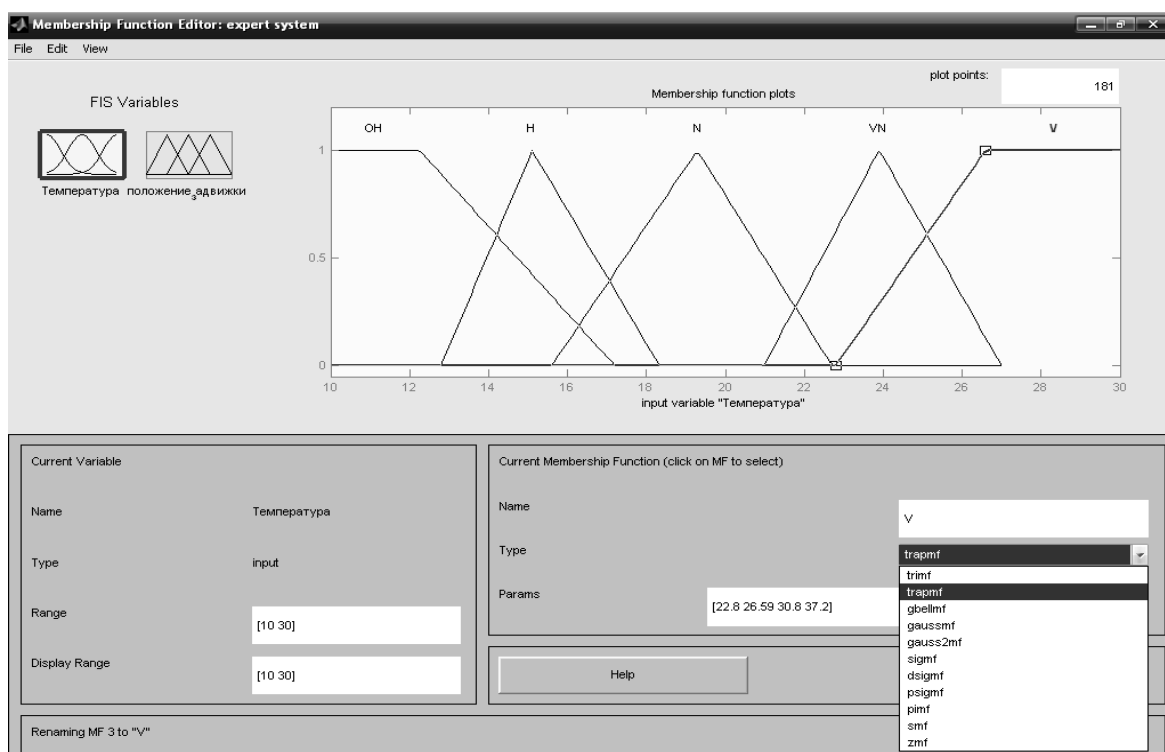


Рис. D.3 Вікно графічного редактора Membership Function Editor з функцією належності "температура повітря"

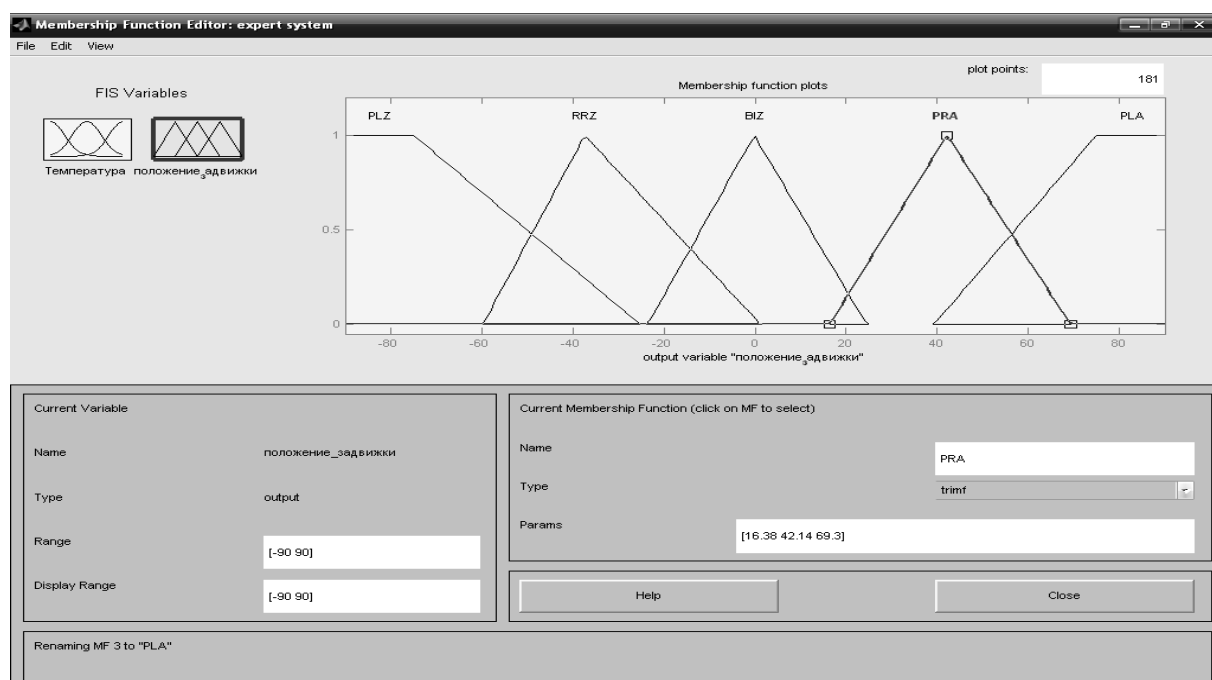


Рис. D.4 - Вікно графічного редактора Membership Function Editor з функцією приналежності "положення засувки"

Редактор бази знань (**Rule Editor**) (рис. D.5) призначений для формування й модифікації нечітких правил. Редактор бази знань може бути викликаний з будь-якого GUI-модуля, використовуюваного із системами нечіткого логічного виводу,

командою **Rule** меню **Edit** або натисканням клавіш **Ctrl+3**. В FIS-редакторі відкрити редактор бази знань можна також подвійним щигликом лівою кнопкою миші по прямокутнику з назвою системи нечіткого логічного виводу, розташованого в центрі графічного вікна. Загальний вид редактора бази знань із вказівкою функціонального призначення основних полів графічного вікна наведений на рис. D.7. У нижній частині графічного вікна розташовані кнопки **Help** й **Close**, які дозволяють викликати вікно довідки й закрити редактор, відповідно.

Розробка бази правил нечітких продукцій виду "ЯКЩО..ТО".

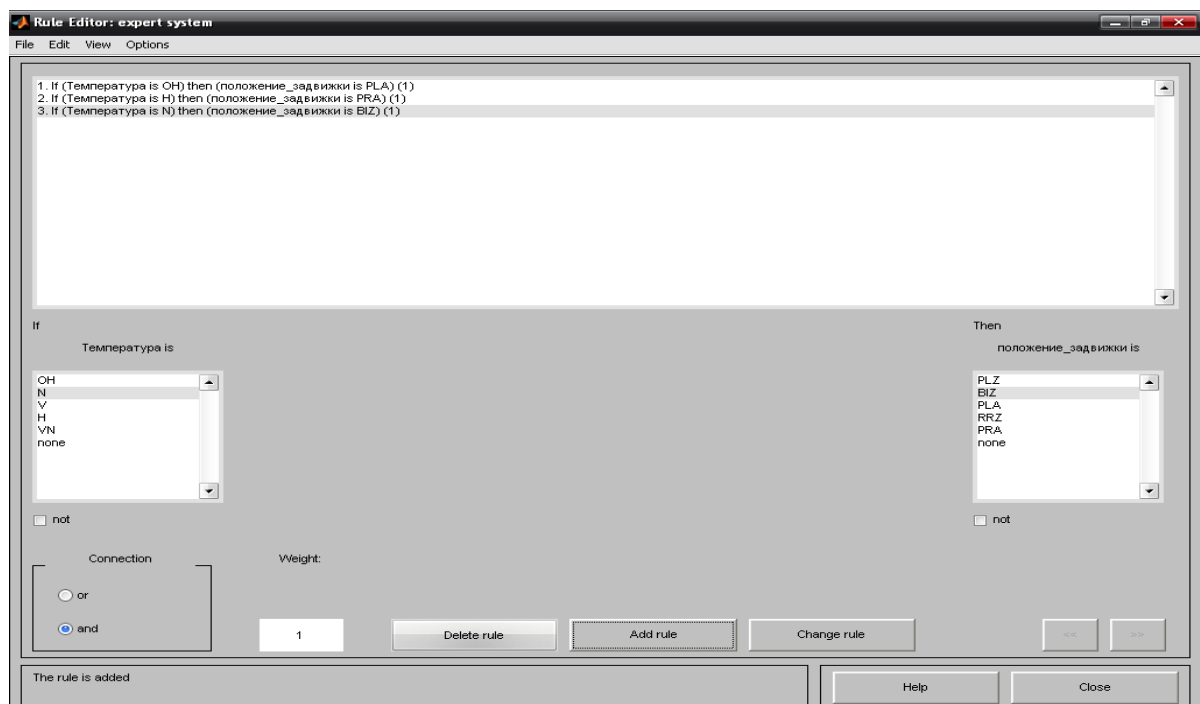


Рис. D.5 - Редактор правил БЗ

Правила формуються у вигляді: ЯКЩО $x_1 = \langle \text{терм1} \rangle$ І/АБО $x_2 = \langle \text{терм 2} \rangle$ ТЕ $Y = \langle \text{терм 3} \rangle$ для система нечіткого виводу Мамдани, або ЯКЩО $x_1 = \langle \text{терм1} \rangle$ І/АБО $x_2 = \langle \text{терм 2} \rangle$ ТО $Y = d_j$, де $d_j = b_0 + b_1 * x_1 + b_2 * x_2$... для системи нечіткого виводу Сугено [117].

Виконання операцій логічного І и АБО над нечіткою множиною, одержання результату в нечіткому виводі Мамдани (агрегація, дефазифікація) або Сугено (зважене середнє або зважена сума) задаються в першому вікні FIS EDITOR, що описано вище. Результат дії нечіткої експертної системи показано на рис. D.6.

У випадку оснащення робочого місця оператора комп'ютерно - інтегрованою системою, ОПР, спостерігаючи поточну інформацію у вікні перегляду, може за допомогою інтерфейсу здійснювати дистанційне керування встаткуванням (супервізорний режим) указуючи необхідне положення засувки.

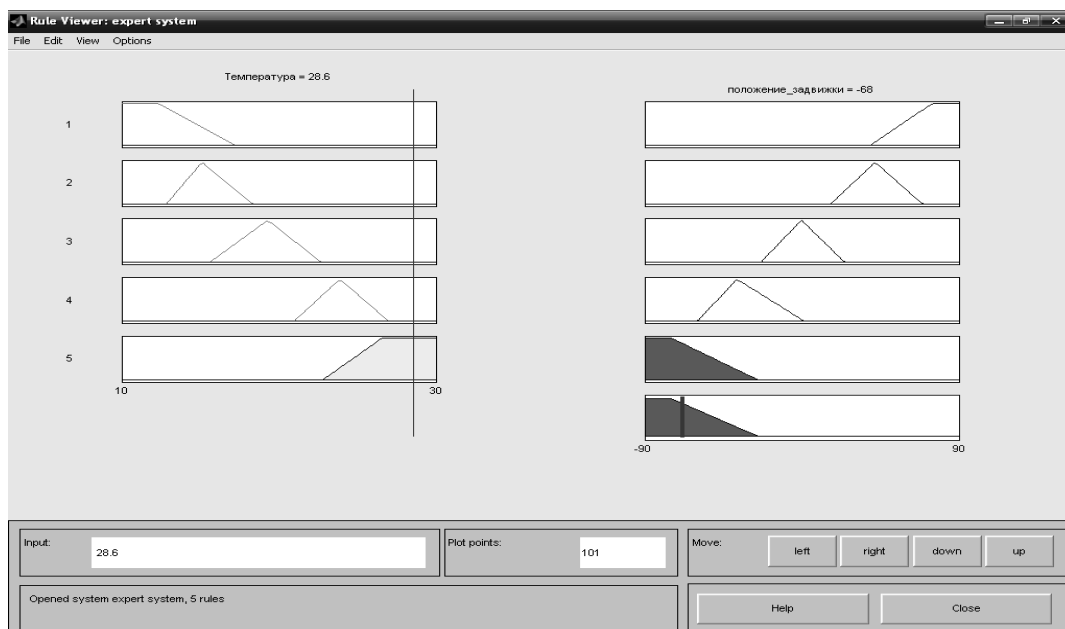


Рис. D.6 - Вікно перегляду результату дії ЕС (супервізорний режим)

Графік залежності вихідної змінної від вхідний $Y = f(T)$ для нечіткої моделі представлений на рис. D.7.

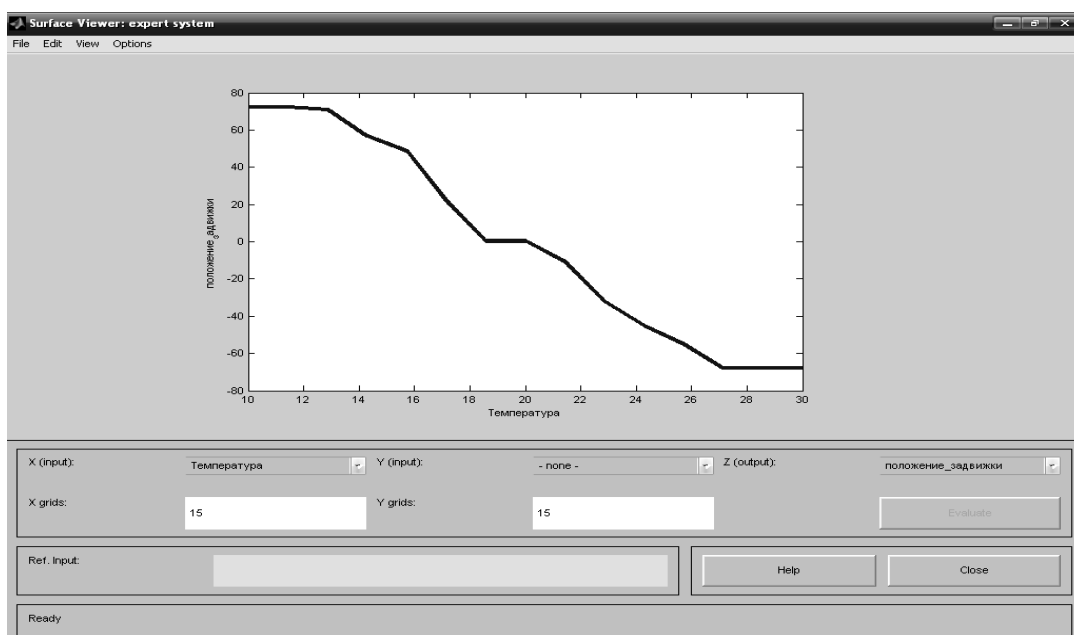


Рис. D.7 - Графік залежності вихідної змінної $Y = f(T)$ для нечіткої системи

ДОДАТОК D.

СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА ТА ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ
РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Журнали і збірники зі спеціального переліку ДАК МОН України:

1. Михайленко В. С. Сравнительный анализ робастной и нечеткой АСР действующих в условиях неопределенности/ В.С. Михайленко, Р.Ю.Харченко // Сборник научных трудов КНТУ. Вып. 22 (часть 2). – 2011. – С. 198-206.
2. Михайленко В. С. Использование нечеткого алгоритма Такаги – Сугено в адаптивных системах управления сложными объектами/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Научно-теоретический журнал Искусственный интеллект. – 2011. – №2. – С. 53-59.
3. Михайленко В. С. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Электротехнические и компьютерные системы.– 2011. – № 4 (80). – С. 199-204.
4. Михайленко В. С. Сравнительный анализ теории принятия решений в условиях неопределенности и нечеткой логики на примере настройки ПИ – регулятора/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // АСУ и приборы автоматики. – 2011. – № 154. ХНУРЭ. – С. 76-83.
5. Михайленко В. С. Застосування гібридних мереж в адаптивних системах управління теплоенергетичних об'єктів/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Наукові праці ВНТУ.– 2012. – № 1.– С.1-9.
6. Михайленко В. С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ – регулятора по идентификации переходного процесса/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Труды Одесского политехнического университета. – 2012. – № 1 (38). – С. 152-156.
7. Михайленко В. С. Синтез адаптивного нечеткого регулятора с прогнозирующей нейро-нечеткой сетью/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Вісник СумДУ. Серія “Технічні науки”, №3, 2012. – С. 30-37.
8. Михайленко В. С. Анализ традиционных методов адаптации систем автоматического управления и их усовершенствование с использованием нейронных сетей/ В. С. Михайленко, Р. Ю.Харченко // Радиоэлектронные и компьютерные системы № 4(56), 2012. – С. 50-56.

9. Харченко Р. Ю. Анализ адаптивных методов настройки нечетких и ПИ – регуляторов в сложных объектах управления/ Р. Ю. Харченко, В. С. Михайленко // Научные труды ХПИ.– 2012. –№37.– С. 78-89.
10. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети для оптимизации режимов эксплуатации судовых систем комфортного микроклимата/ С. А. Михайлов, Р. Ю. Харченко // Судовые энергетические установки: Науково-технічний збірник. Вип. 36.–Одеса: НУ «ОМА», 2016. С. 24-32.
11. Харченко Р. Ю. Методы адаптивного регулирования в системе климатического контроля судна/ Р. Ю. Харченко //Автоматизація судових технічних засобів, Науково-технічний збірник ОНМА. Вип. 17, 2011. С. 95-106.
12. Харченко Р. Ю. Сравнительный анализ методов активной адаптации ПИ-регуляторов и нечетких регуляторов для систем кондиционирования и вентиляции (СКВ) морских судов/ Р. Ю. Харченко // Науковий вісник ХДМА. Науковий журнал. Херсонська державна морська академія. №2 (7) 2012 г. С. 276-286.
13. Михайленко В.С. Определение параметров математических моделей энергоблоков ТЭС на основе аппарата гибридных сетей. Михайленко В.С., Харченко Р.Ю. // Информатика и математические методы в моделировании Т. 2, № 3, 2012. – С. 286-292.
14. Михайленко В. С. Синтез интеллектуальной системы автоматического управления процессом горения топлива в энергоблоках тепловых электростанций/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Промышленная теплотехника. – 2012. – № 5. – С. 45-52.
15. Михайленко В. С. Синтез нейро-мережевої системи автоматичного регулювання рівня води в барабані котла енергоблоку ТЕС/ В. С.Михайленко, Р. Ю. Харченко // Наукові вісти НТУУ «КПІ», № 5, 2012. – С. 45-51.
16. Михайленко В. С. Решение задач идентификации и управления температурным контуром системы охлаждения судового дизеля/ В. С.

Михайленко, Р. Ю. Харченко // Науковий вісник ХДМА. Науковий журнал. Херсонська державна морська академія. №2 (17) 2017г. С. 69-77.

Зарубіжні наукові профільні видання:

17. V. S. Mikhailenko Analysis of traditional and neuro-fuzzy adaptive system of controlling the primary steam temperature in the direct flow steam generators in TPS/ V. S. Mikhailenko, R. Yu. Kharchenko // Automatic Control and Computer Sciences, 2014, Riga Vol. 48, No. 6, pp. 334–344. (Scopus)
18. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети/ С. А. Михайлов, Р. Ю. Харченко // Монография, ISBN: 978-620-2-07416-2, издательство LAP LAMBERT Academic Publishing, Germany, 2017, 225 с.

Міжнарод, всеукраїнські і регіональні конференції:

19. Михайленко В. С. Исследование гибридной сети при идентификации объекта управления в системах поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Вторая Международная НТК «Компьютерные науки и технологии» КНиТ-2011. 3-5 октября 2011 г. Белгородский государственный национальный исследовательский университет. Белгород, Россия. С. 268-272.
20. Михайленко В. С. Сравнительный анализ методов анализа иерархий и нечеткой логики в системе поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 15-й Международной конференции «Информационные интеллектуальные системы». – 2011. – Харків. – С. 297-298.
21. Михайленко В. С. Методы дефаззификации в алгоритмах нечеткого вывода/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Материалы 8-й региональной конференции молодых ученых «Информатика, информационные системы и технологии». – 2011. – Одеса. – ОГУ. - С. 7-8.
22. Михайленко В. С. Сравнительный анализ теорий принятия решений в условиях неопределенности и нечеткой логики на примере настройки ПИ-регулятора/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Всеукраинский межведомственный научно-технический сборник «АСУ и приборы автоматизации», 2011, Харків, выпуск 154. С. 76-83.

23. Михайленко В. С. Синтез нейросетевой СППР нагрузки между энергоблоками СЭУ/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко //Материалы 8-й дистанционной международной НПК «Системы поддержки принятия решений. Теория и практика. СППР 2012» (Київ). – С. 46-49.
24. Михайленко В. С. Нейро-нечеткие технологии в системах поддержки принятия решений/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко //Материалы международной НПК интернет конференции «Advanced Information Systems and Technologies, AIST 2012» (Суми). – С. 144-146.
25. Михайленко В. С. Анализ научных подходов в теории нейросетевых систем управления сложными объектами/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко // Сборник трудов международной молодежной конференции «Прикладная математика, управление и информатика» Білгород (Росія).– 2012. – Том 2. – С. – 481-485.
26. Михайленко В. С. Адаптивная настройка нечеткого ПИ-регулятора по идентификации переходного процесса/ В. С. Михайленко, Р. Ю. Харченко //Материалы 19-й Международной конференции по автоматическому управлению «Автоматика-2012». (Київ), Том 1.– С. 117.
27. Михайленко В. С. Анализ метода оценки настраивающей модели объекта в процессе адаптации САУ/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Научный журнал: Сборник научных трудов SWorld. Вып. 4, Т.14 - Одеса, 2012 – С. 10-13.
28. Михайленко В. С. Использование интеллектуальных систем поддержки принятия решений в автоматизации процессов управления судном/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Третя Міжнародна науково-практична конференція «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті MINTT-2011» 23 – 25 травня 2011 р. Херсон. С. 59 1-й том.
29. Харченко Р. Ю. Анализ традиционных и новых методов вычислений в системах поддержки принятия решений/ Харченко Р. Ю. // Материалы НТК «Энергетика судна: эксплуатация и ремонт», 05.04.2011 – 07.04.2011. – Одеса: ОНМА, 2011, С. 308-310.

30. Харченко Р. Ю. Адаптивное регулирование в системах климатического контроля/ Харченко Р. Ю. // Десятая всеукраинская НТК «Математическое моделирование и информационные технологии»(ММИТ-2011), Одеса, ОДАХ. 23-25.10. С. 81-82.
31. Харченко Р. Ю. Сравнительный анализ традиционных и нечетких методов регулирования в системах кондиционирования воздуха (СКВ)/ Харченко Р. Ю. // XII Всеукраїнська НТК молодих учених, аспірантів та студентів “Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій” 11-12 квітня 2012 р. Одеса, ОДАХ. С.38-40.
32. Харченко Р. Ю. Влияние методов фаззификации и дефаззификации на качество переходных процессов в системах нечеткого управления/ Харченко Р. Ю. // 16-й Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» ХНУРЭ 17 – 19.04.12г. С. 33.
33. Харченко Р. Ю. Компьютерное моделирование системы кондиционирования и вентиляции судна с разными типами регуляторов/ Харченко Р. Ю. // Матеріали НМК. «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки». – Одеса: ОНМА, 14.12 – 15.12.12. С. –36.
34. Харченко Р. Ю. Идентификация объектов в системах адаптивного управления с помощью нейро-нечетких сетей/ Харченко Р. Ю. // Матеріали НМК «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки». – Одеса: НУ «ОМА», 2016. С. 97-100.
35. Михайленко В. С. Постановка задачи синтеза интеллектуальной системы адаптивного управления/ Михайленко В. С., Харченко Р. Ю. // Матеріалі XX міжнародної конференції по автоматичному управлінню. НУК ім. Адмірала Макарова. Миколаїв. 2013р. С. 228-230.
36. Михайлов С. А. Применение гибридных интеллектуальных сетей в судовых системах климат-контроля/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // конференція «СИЭТ-2014» МНПК «Современные информационные и электронные технологии», – 2014.– С. 13.

37. Михайлов С. А. Гибридные интеллектуальные сети в судовых системах комфортного микроклимата/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // Материалы V науч.практ. конф. «Інформаційні управляючі системи та технології» – Одеса: ОНМУ, 2016. С. 207-210.
38. Харченко Р. Ю. Впровадження гібридних інтелектуальних технологій при експлуатації суднових електронних систем/ Харченко Р.Ю., Шатілов Д.С., Кочетков О.В. // VII Всеукраїнська НПК студентів та молодих вчених «Проблеми і перспективи розвитку транспорту» – Одеса: ОНМУ, 2018. С. 85-87.
39. Михайлов С. А. Гібридна інтелектуальна система комфортного мікроклімату судна/ Михайлов С. А., Харченко Р. Ю. // Материалы VII НПК «Інформаційні управляючі системи та технології» – Одеса: ОНМУ, 2018. С. 182-185.

ВІДОМОСТІ ПРО АПРОБАЦІЮ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

Основні результати і положення роботи доповідалися, обговорювалися і були схвалені на міжнародних і всеукраїнських науково-практичних, науково-технічних і науковометодичних конференціях:

Міжнародних – 15-й Юбилейный Международный молодежный форум «Радиоэлектроника и молодежь в XXI веке» (Харків, 2011-12р.), II МНТК «Компьютерные науки и технологии» (Білгород, Росія, 2011р.), МНПК «Сучасні інформаційні системи та технології» (Суми, 2012р.), МНПК «Прикладная математика, управление и информатика» (Білгород, Росія, 2012р.), XIX МНПК з автоматичного управління «Автоматика» (Київ, 2012р.), МНПК «Современные проблемы и пути их решения в науке, транспорте, производстве и образовании» (Суми, 2012р.), XIII МНПК «Системы поддержки принятия решений. Теория и практика» (Київ, 2012р.), XX МНПК по автоматическому управлению (Миколаїв, 2013р.), МНПК «Современные информационные и электронные технологии» (Одеса, 2014р.).

Всеукраїнських та регіональних – НМК «Актуальні питання суднової електротехніки і радіотехніки» (Одеса, 2011-2016р.), НМК «Энергетика судна: эксплуатация и ремонт» (Одеса, 2011р.), VII Региональная конференция студентов и молодых ученых «Информатика, информационные системы и технологии» (Одеса, 2011р.), IX Всеукраинская НТК «Математическое моделирование и информационные технологии» (Одеса, 2011р.), XII Всеукраїнська НТК молодих учених, аспірантів та студентів “Стан, досягнення і перспективи інформаційних систем і технологій” (Одеса, 2012р.), «Сучасні інформаційні та інноваційні технології на транспорті» (Херсон, 2012р.), «Сучасні енергетичні установки на транспорті і технології та обладнання для їх обслуговування» (Херсон, 2012р.), VII Всеукраїнська НПК студентів та молодих вчених «Проблеми і перспективи розвитку транспорту» (Одеса, 2018), V та VII НПК «Інформаційні управляючі системи та технології» (Одеса, 2016-18р.).

ДОДАТОК Е

АКТИ ВПРОВАДЖЕННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДИСЕРТАЦІЇ

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Ладыжинской ТЭС

Данченко А.К.

«12» ноября 2012 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Харченко Р.Ю. по проектированию и разработке адаптивной интеллектуальной системы автоматического управления систем кондиционирования и вентиляции в работу по модернизации систем автоматического управления процессами воздухообработки в помещениях Ладыжинской ТЭС

Комиссия в составе:

председатель нач. ВТВ Сторожук В.А.

члены: нач. ЦТАИ Рокицкий В.И.

нач АСУ Березицкий Д.А.

Комиссия установила: предложенные рекомендации, выполненные аспирантом Харченко Р.Ю. в рамках его диссертационного исследования (кафедра морской электроники ОНМА) направлены на усовершенствование процедур настройки САУ оборудования систем кондиционирования и вентиляции СКВ, проведения этапов идентификации параметров объектов с целью получения точных математических моделей и в итоге создания системы поддержки принятия решений СППР для СКВ сложных объектов.

Использование предложенных интеллектуальных технологий и технических решений в САУ, учитывающих опыт и знания наладчиков СКВ, позволяет достичь существенной экономии энергоресурсов, повысить надежность работы оборудования, ускорить процесс пуска – наладочных работ и повысить комфортность пребывания человека находящегося на обслуживаемом данной системой объекте.

Предложенные методы и алгоритмы приняты к внедрению на Ладыжинской ТЭС, включены в проектно-монтажную документацию по САУ, обслуживающей вспомогательное энергетическое оборудование и СКВ.

председатель нач. ВТВ

Сторожук В.А.

члены: нач. ЦТАИ

Рокицкий В.И.

нач АСУ

Березицкий Д.А.

«УТВЕРЖДАЮ»



Директор Ладыжинской ТЭС

Данченко А.К.

«12» ноября 2012 г.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы Харченко Р.Ю. в методику модернизации систем автоматического управления теплоэнергетическими процессами энергоблоков и вспомогательного энергетического оборудования Ладыжинской ТЭС

Комиссия в составе:

председатель нач. ВТВ Сторожук В.А.

члены: нач. ЦТАИ Рокицкий В.И.

нач АСУ Березицкий Д.А.

Комиссия установила: предложенные Харченко Р.Ю. новые теоретические и практические решения по созданию и эксплуатации интеллектуальных САР ТП энергоблоков являются важным и актуальным направлением в области разработки, модернизации и построения новых энергоблоков и вспомогательного оборудования современных ТЭС. Разработанные методы и алгоритмы адаптивных нечетких автоматических систем управления технологическими процессами способствуют повышению технико-экономических показателей энергоблоков, работающих в базовых и регулировочных режимах, способствуют значительному энергоресурсосбережению в работе вспомогательного энергетического оборудования. Рассмотренная концепция интеллектуального управления является перспективной и будет применена при планировании и разработке технической документации для проведения процессов пуско-наладочных работ АСУ ТП, внедрена в разработку программно – технических комплексов ТЭС, освоена операторами по обслуживанию энергетических установок ТЭС и учтена в дальнейших регламентных работах на электростанции.

председатель нач. ВТВ

члены: нач. ЦТАИ

нач АСУ

Сторожук В.А.

Рокицкий В.И.

Березицкий Д.А.

«УТВЕРЖДАЮ»

Директор Ладыжинской ТЭС

Данченко А.К.

«12» нояб. 2012 г.

АКТ

**внедрения результатов диссертационной работы Харченко Р.Ю. в
работу по модернизации систем автоматического управления
теплоэнергетическими процессами энергоблоков и вспомогательного
энергетического оборудования Ладыжинской ТЭС**

Комиссия в составе:

председатель нач. ВТВ Сторожук В.А.

члены: нач. ЦТАИ Рокицкий В.И.

нач АСУ Березицкий Д.А.

Комиссия установила: предложенные Харченко Р.Ю. новые теоретические и практические решения по созданию и эксплуатации интеллектуальных САР ТП энергоблоков являются важным и актуальным направлением в области разработки, модернизации и построения новых энергоблоков и вспомогательного оборудования современных ТЭС. Разработанные методы и алгоритмы адаптивных нечетких автоматических систем управления технологическими процессами способствуют повышению технико-экономических показателей энергоблоков, работающих в базовых и регулировочных режимах, способствуют значительному энергоресурсосбережению в работе вспомогательного энергетического оборудования. Рассмотренная концепция интеллектуального управления является перспективной и будет применена при проведении процессов пуско-наладочных работ АСУ ТП, внедрена в программно – технических комплексах ТЭС, принята на вооружение в действиях операторов обслуживающих энергетические установки ТЭС и в дальнейших регламентных работах на электростанции.

председатель нач. ВТВ

члены: нач. ЦТАИ

нач АСУ

Сторожук В.А.

Рокицкий В.И.

Березицкий Д.А.

АКТ

внедрения результатов диссертационной работы ст.преп. ОНМА Харченко Р.Ю. по проектированию и разработке адаптивной интеллектуальной системы автоматического управления систем кондиционирования и вентиляции с применением регуляторов работающих на базе контроллеров с нечеткой логикой

Предложенные рекомендации, выполненные аспирантом Харченко Р.Ю. в рамках его диссертационного исследования (кафедра морской электроники ОНМА) направлены на усовершенствование процедур настройки САУ оборудования систем кондиционирования и вентиляции СКВ, проведения этапов идентификации параметров объектов с целью получения точных математических моделей и в итоге создания системы поддержки принятия решений СППР для СКВ сложных объектов.

Использование предложенных интеллектуальных технологий и технических решений в САУ, учитывающих опыт и знания наладчиков СКВ, позволяет достичь существенной экономии энергоресурсов, повысить надежность работы оборудования, ускорить процесс пуска – наладочных работ и повысить комфортность пребывания человека находящегося на обслуживаемом данной системой объекте.

Предложенные методы и алгоритмы включены в методику синтеза интеллектуальных САУ СКВ средней и большой мощности и приняты к внедрению в проектно – монтажной компании ООО «Энергетические Инвесторы» при составлении проектной документации по САУ, определении статистических и динамических характеристик объектов СКВ и оптимизации настроечных параметров ПИ и ПИД – регуляторов.

Директор



Савенко Д.А.

14.02.16г.



«ЗАТВЕРДЖУЮ»
Проректор по науковій роботі
Національного університету
«Одеська морська академія»
д.т.н., професор
В.А. Голіков

05 2018 р.

АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи Харченко Р. Ю. на тему «Гібридні інтелектуальні мережі для суднових систем мікроклімату» у наукових дослідженнях, які виконуються в університеті

Ми, що нижче підписалися, начальник науково-дослідної частини університету Савчук В. Д., фахівець НДЧ Яцик К. О., склали цей акт в тому, що результати дисертаційної роботи Харченко Р. Ю. увійшли складовою частиною до звіту по науково-дослідних роботах «Дослідження проблем надійності НВІС і розробка засобів її підвищення при переході до субмікронних технологій». № ДР 0109U001527 (2009-2011 рр.); «Підвищення якості програмованих користувачем НВІС (FPGA)» № ДР 0115U003578 10/994 (2012-2014 рр.); «Підвищення якості програмованих користувачем НВІС (FPGA) для систем захисту інформації» № ДР 0115U003578 10/994 (2015-2018рр).

Начальник науково-дослідної
частини НУ «ОМА»,
к.т.н., с.н.с., професор

В. Д. Савчук

Фахівець

К. О. Яцик



АКТ

про використання результатів дисертаційної роботи здобувача Харченко Романа Юрійовича на тему «Гібридні інтелектуальні мережі для суднових систем мікроклімату» у навчальному процесі університету

Ми, що нижче підписалися, начальник навчального відділу Пархоменко М. М., декан факультету електромеханіки та радіоелектроніки д.т.н., Бодашко В.В. і завідуючий кафедрою Морської електроніки д.т.н., професор Михайлов С.А. склали цей акт в тому, що результати кандидатської дисертації здобувача Харченко Романа Юрійовича на тему «Гібридні інтелектуальні мережі для суднових систем мікроклімату» впроваджені у навчальний процес на кафедрі Морської електроніки в розділах дисциплін «Програмне забезпечення вбудованих комп'ютерних систем», «Контроль і діагностика суднових електронних і електротехнічних систем» та «Електронні суднові системи».

Начальник навчального

відділу

Пархоменко М. М.

декан факультету електромеханіки

та радіоелектроніки, д.т.н.

Бодашко В.В.

завідуючий кафедрою Морської

електроніки, д.т.н. професор

Михайлов С.А.