

Міністерство освіти і науки України
Національна металургійна академія України

ПОЛЯКОВ Михайло Олексійович



УДК 004.942:519.71:621.3

**ТЕОРЕТИКО-МНОЖИННІ МОДЕЛІ ФУНКЦІОНАЛЬНИХ СТРУКТУР
ІНТЕГРОВАНИХ І КОГНІТИВНИХ СИСТЕМ**

Спеціальність 01.05.02 — «Математичне моделювання та обчислювальні
методи»

Автореферат

дисертації на здобуття наукового ступеня

доктора технічних наук

Дніпро — 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Національному університеті «Запорізька політехніка» (м. Запоріжжя).

Науковий консультант:

доктор технічних наук, професор
Субботін Сергій Олександрович,
Національний університет
«Запорізька політехніка»,
завідувач кафедри програмних засобів

Офіційні опоненти:

доктор технічних наук, професор
Головко В'ячеслав Ілліч,
Національна металургійна академія України,
професор кафедри автоматизації виробничих
процесів

доктор технічних наук, професор
Атаманюк Ігор Петрович,
Миколаївський національний аграрний
університет,
завідувач кафедри вищої та прикладної
математики

доктор технічних наук, професор
Рудакова Ганна Володимирівна,
Херсонський національний технічний
університет,
професор кафедри автоматизації,
робототехніки і мехатроніки

Захист відбудеться 9 вересня 2021 р. о 14–00 годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.01 Національної металургійної академії України Міністерства освіти і науки України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

З дисертацією можна ознайомитися на сайті <http://nmetau.edu.ua> та в бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4.

Автореферат розісланий 7 серпня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.01

кандидат технічних наук, доцент



Тетяна СЕЛІВЬОРСТОВА

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми.

У процесі науково-технічної революції, що відбувається у світі, постійно розробляються принципово нові системи технічного призначення. Вони вимагають всебічного дослідження, зокрема методами математичного моделювання, що робить математичне моделювання невід'ємною складовою науково-технічного прогресу. Система на теоретико-множинному рівні моделюється кортежем множин елементів і відносин між ними. Якщо елементи описані на функціональному рівні, то відносини моделюють функціональну структуру системи.

У розроблення наукових основ моделювання процесів функціонування систем внесли істотний внесок такі вчені, як Л. фон Берталанфі, Н. Вінер, К. Шеннон, В. Р. Ешбі, Дж. фон Нейман, Д. Харел, Р. Беллман, Л. А. Заде, М. Месарович, В. М. Сагатовський, В. М. Глушков, М. М. Амосов, А. М. Колмогоров, А. І. Берг, П. К. Анохін, Л. А. Растрігін, Я. З. Ципкін, В. А. Бесекерський, М. П. Бусленко, Ю. Г. Карпов, О. В. Леоненков, Ю. І. Черняк, Д. О. Поспелов, Є. В. Бодянський, О. І. Міхальов та інші.

Разом з тим, розвиток техніки приводить до необхідності моделювання все більш складних об'єктів технічного призначення (наприклад, це «розумні» елементи енергосистем, засоби проектування систем, автономні роботи й інші), що відбивається у відомих математичних описах збільшенням потужностей множин функціональних елементів і їх відносин, а також появою нових типів елементів. Як наслідок, збільшується розмірність моделі, знижується її наочність.

Зазначену проблему вирішують введенням у модель системи ієрархії рівнів її функціональної структури. Але при цьому з'являється нова проблема зі складністю одночасного обліку функціональних залежностей на різних рівнях ієрархії, що знижує ефективність моделювання. Ця проблема пов'язана з інтегрованими системами — класом систем технічного призначення, у яких деякі з підсистем мають спільні елементи, які виконують різні функції в різних системах. Наприклад, функції керування як об'єктом, так і пристроєм (підсистемою) керування. Ці функції не розглядаються одночасно у відомих моделях систем, що обмежує їх функціональні можливості. Проблемою також є те, що відомі моделі елементів інтегрованих систем мають обмежені функціональні властивості, не відповідають вимогам (наприклад, наочності, керованості функціонуванням та адаптивністю) їх використання у складі інтегрованої системи та потребують удосконалення.

Розширення функціональних можливостей систем може бути досягнуто за рахунок розширення інформаційної бази для вибору впливів на об'єкт, вдосконалення системи формування впливів. Системи технічного призначення, в яких для цих цілей здобуваються та переробляються знання і які мають когнітивні здібності, називають штучними когнітивними системами (далі когнітивні системи).

Проблемою відомих моделей функціональних структур когнітивних систем є недостатній рівень узагальнення моделі відносно до операцій процесів її

діяльності, а також відсутність типової функціональної структури через те, що моделі не враховують їх інтегровану структуру, тобто наявність вкладених інтегрованих підсистем різних видів (наприклад, інформаційно-керувальних), які підвищують форму знань та деталізують вплив системи на об'єкт.

Таким чином розроблення математичних моделей функціональних структур інтегрованих і когнітивних систем із підвищенням інтегрованості їх підсистем та використанням вищих форм знань і, на підставі цього, розширення функціональних можливостей моделей таких систем і уніфікації функціональних структур та елементів таких систем є актуальною невирішеною науковою проблемою.

Зв'язок з науковими програмами, планами і темами.

Дисертаційна робота виконувалася в Національному університеті «Запорізька політехніка» у межах науково-дослідних робіт: «Дослідження систем прогнозування та покращення енергоефективності електромеханічних, електронних апаратів та обладнання енергоємних виробництв» (2015—2018 рр., держ. реєстр. номер 0119U001350), «Інтелектуальні інформаційні технології обробки даних» (2018—2021 рр., держ. реєстр. номер 0118U100063).

Метою роботи є вдосконалення математичних описів систем технічного призначення через урахування на теоретико-множинному рівні інтегрованих і когнітивних властивостей у їх функціональних структурах та розроблення методів моделювання таких систем.

Для досягнення поставленої мети в роботі було сформульовано такі завдання:

- проаналізувати властивості інтегрованих та когнітивних систем, що визначають вимоги до їх математичного моделювання, а також існуючі та перспективні методи моделювання;

- розробити теоретико-множинні моделі типових функціональних структур в цілому та їх компонентів щодо інтегрованих та когнітивних систем, використовуючи керувальні та операційні автомати для створення ієрархії в інтегрованій системі, а також піраміду форм знань з відповідними конверторами та піраміду форм діяльності на основі ієрархії керувальних автоматів і спеціального формалізму для функціонального опису підсистеми діяльності когнітивної системи;

- розробити методи моделювання керувальних автоматів інтегрованих та когнітивних систем технічного призначення, які мають властивості керованості функціонування, адаптації своєї структури, описують цю структуру у формі знань щодо причинно-наслідкових відносин у станах автомата та його контурах, мають розширені функції станів та забезпечують на цій основі моделювання більш складної поведінки та зменшення розмірності моделі системи;

- дослідити запропоновані моделі та методи на прикладах математичного опису інтегрованих систем віддалених лабораторій цифрових об'єктів, когнітивної системи планування ресурсу целюлозної ізоляції обмоток потужного трансформатора та систем керування температурою.

Об'єкт досліджень — процес моделювання ієрархічних систем технічного призначення, що об'єднують більше одного напрямку функціонування, мають адаптивні властивості стосовно зміни впливів зовнішнього середовища та цілей

функціонування, а також використовують знання та проявляють когнітивні здібності.

Предмет досліджень — математичні описи та методи моделювання функціональної структури інтегрованих та когнітивних технічних систем у цілому та на рівні елементів.

Методи досліджень. Роботу було виконано на основі системного підходу, при цьому використовувалися методи моделювання теорії ієрархічних багаторівневих систем, аналізу та синтезу складних систем, кібернетики, штучного інтелекту. При розробленні математичних моделей елементів систем використовувалися теорії множин, скінченних дискретних та гібридних автоматів, двійкової, тернарної логіки, нечіткої логіки, когнітивності та інші.

Наукова новизна отриманих результатів полягає в тому, що:

Вперше

1. Розроблено теоретико-множинну модель функціональної структури системи, яка відрізняється тим, що інтегрує її підсистеми за принципом взаємодії через спільний елемент, що дозволяє підвищити інтеоперабельність їх моделей через одночасне урахування впливів усіх підсистем на функціонування кінцевого об'єкта, що дозволяє зменшити час реагування на зміни та підвищити точність опису функціонування інтегрованої системи.

2. Розроблено теоретико-множинну модель небінарного скінченного автомата, яка відрізняється складом і небінарними властивостями елементів множин та описом функцій на рівні станів автомата, а саме, введенням множин керувань, функцій станів автомата, які задають умови активації стана, тип активності виходів та структуру переходів з активного стану та через це збільшують рівень узагальнення моделі відносно до операцій процесів діяльності системи, що дозволяє підвищити наочність моделі та за рахунок зменшення її розмірності — скоротити час створення моделі.

3. Розроблено семантичну модель скінченного автомата та метод її використання, яка відрізняється семантичною формою опису причинно-наслідкових відносин у автоматі та в його станах, введенням контурів діяльності та керування, які взаємопов'язані через стани автомата, що за рахунок розширення бази знань для прийняття коригувального рішення та використання засобів логічного висновку дозволяє підвищити адаптивність системи та зменшити витрати на діагностування системи.

4. Запропоновано модель когнітивної системи, яка відрізняється тим, що базується на принципі однорідності знань про систему, її зовнішнє середовище та кінцевий об'єкт і, на відміну від принципу фон Неймана для обчислюваних систем, характеризується розширенням об'єкта однорідності, теоретично обґрунтовує використання знань про систему при її адаптації та саморозвитку, що дозволяє збільшити прибуток від експлуатації кінцевого об'єкта, зменшити час реагування системи на збурювальні впливи.

5. Розроблено узагальнену теоретико-множинну модель функціональної структури когнітивної системи, яка відрізняється використанням інтегрованої коренеподібної ієрархії підсистем на рівнях безпосереднього, сигнального,

обчислювального, інформаційного, когнітивного (рівень знань), концептуального та цільового моделювання, які взаємодіють з базою знань у різних формах піраміди знань, що дозволяє будувати моделі систем різного призначення з уніфікованих елементів та зменшити на цій основі терміни їх створення.

Удосконалено

6. Теоретико-множинні моделі структур контурів дискретного, безперервного та гібридного керування, які відрізняються тим, що побудовані через агрегацію типових модулів керувальних автоматів та вхідних, вихідних і проміжних операційних автоматів із додатковими входами та виходами керування, що дозволяє будувати адаптивні підсистеми діяльності з уніфікованих модулів та зменшити на цій основі терміни їх створення.

7. Модель створення керуючих та операційних автоматів, яка відрізняється тим, що до формалізмів мови LD промислових контролерів стандарту МЕК 61131-3 додано конструкції автоматів, що дозволяє типізувати процес створення моделей автоматів та зменшити на цій основі трудомісткість їх синтезу.

8. Методи моделювання процесів у когнітивній системі на основі динамічного визначення комплексу цілей її функціонування, які відрізняються тим, що поточний комплекс цілей відповідає певному стану та виходу скінченного автомата цілей, а умови переходу до цього стану формуються конверторами та операційними автоматами підсистем пізнання та когнітивності через обрання стратегії роботи з цілями, оцінювання цілей та поточного стану їх досягнення за пропонованим комплексом показників, що дозволяє типізувати функціональну структуру підсистеми визначення цілей функціонування системи та зменшити на цій основі трудомісткість створення її моделі.

9. Модель підсистеми діяльності когнітивної системи, яка відрізняється тим, що побудована у вигляді ієрархії рівнів із керованими скінченими автоматами цілей, сценаріїв, поведінки та операцій, які пов'язані шинами, що дозволяє типізувати структуру підсистеми, розширити її адаптивні можливості, запобігти конфліктам цілей та зменшити на цій основі трудомісткість створення моделі підсистеми діяльності.

10. Модель функціональної структури віддаленої лабораторії для вивчення цифрових об'єктів, яка відрізняється тим, що подає її як інтегровану систему запропонованих кіберфізичних моделей об'єктів (фізичних, візуальних та віртуальних моделей об'єктів у робочому та аварійному режимах, моделей динаміки розвитку дефектів у досліджуваних елементах системи та динаміки зовнішніх впливів на систему), що дозволяє збільшити різноманіття експериментів та зменшити витрати через заміну коштовних фізичних моделей на більш дешеві та прості моделі з емуляцією можливостей складних моделей.

11. Теоретико-множинні моделі системи безперервного прогнозування параметрів складного технічного об'єкта (на прикладі потужного трансформатора), які відрізняються тим, що використовують запропоновані моделі функціональної структури когнітивних систем та спеціалізованих конверторів і керувальних автоматів, що дозволяє через використання нових форм знань для визначення та прогнозування динаміки стану та параметрів технічного

об'єкта, обрання та адаптації цілей функціонування системи розширити функціональні можливості системи прогнозування щодо збільшення терміну використання технічного об'єкта, підвищити на цій основі точність прогнозування, а також зменшити витрати на створення системи за рахунок використання типової структури систем та елементів.

Обґрунтованість і достовірність наукових положень, висновків і рекомендацій підтверджується через перевірки методом системного аналізу адекватності запропонованих математичних моделей системним вимогам щодо функціональної структури інтегрованих і когнітивних систем, використанням при моделюванні їх елементів фундаментальних методів теорій автоматів, множин, математичної логіки, порівнянням результатів аналітичних досліджень із результатами імітаційного моделювання та позитивними результатами дослідницько-промислової перевірки запропонованих рішень.

Наукове значення роботи полягає в тому, що розроблено комплекс математичних моделей для досліджень та синтезу функціональної структури перспективних ієрархічних і когнітивних систем, в тому числі віддалених лабораторій цифрових об'єктів та систем безперервного прогнозування параметрів витрат ресурсу об'єкту технічного призначення. Запропоновані моделі елементів систем — автоматів із небінарними елементами множин, семантичних автоматів та операційних автоматів, які мають розширену функціональність, що дозволило зменшити розмірність опису структури складної системи. Завдання моделювання адаптивного реагування системи щодо цілей функціонування, сценаріїв їх досягнення та поведінки у ході реалізації сценаріїв зведено до визначення траєкторії зміни станів у інтегрованій ієрархічній системі скінченних автоматів.

Практичне значення отриманих результатів полягає в тому, що розроблено:

- методику визначення моделей функціональної структури інтегрованих та когнітивних систем технічного призначення та моделей їх елементів через використання обмеженого набору типових елементів — операційних, керувальних автоматів, конверторів форм знань, що дозволяє зменшити затрати часу на створення математичної моделі системи;

- рекомендації щодо моделювання когнітивних систем безперервного прогнозування параметрів ресурсу ізоляції потужного трансформатора, що дозволяє збільшити точність прогнозування через розширення бази знань;

- рекомендації щодо моделювання функціональної структури віддалених лабораторій цифрових об'єктів, що дозволяють реалізувати нові види та збільшити різноманіття експериментів.

Розроблені методики моделювання функціональних структур інтегрованих та когнітивних систем було передано до закладу вищої освіти МОН України Національний університет «Запорізька політехніка» (2019, 2020 рр.) та використано у навчальному процесі підготовки магістрів при викладанні дисциплін "Методологія та інформатизація наукових досліджень електромеханічних пристроїв та систем», «Моделювання радіотехнічних систем» і при створенні навчального модуля «Системи керування електричними

машинами та апаратами» в рамках міжнародного проекту ІСо-ор «Промислове співробітництво та креативна інженерна освіта на основі дистанційного інженерного та віртуального інструментарію» (530278-TEMPUS-1-2012-1-DE-TEMPUS-JPHES) за програмою TEMPUS Європейської Комісії.

Рекомендації щодо моделювання систем безперервного прогнозування параметрів ресурсу ізоляції потужного трансформатора було передано до ТОВ «Енергоавтоматизація» (м. Запоріжжя, Україна) та використано при проектуванні систем моніторингу трансформаторів (2019 р.).

Рекомендації щодо моделювання інтегрованих систем за допомогою віддалених лабораторій було передано до Національного університету «Запорізька політехніка» та було використано при модернізації віддаленої лабораторії RELDES (REmote Laboratory for Embedded Systems Design) (2019 р.).

Рекомендації щодо моделювання когнітивних систем за допомогою віддалених лабораторій було передано до Технічного університету Ільменау (Німеччина) та використано при модернізації віддаленої лабораторії GOLDi (Grid of Online Lab Devices) (2020 р.).

Апробація результатів дисертаційної роботи. Основні положення роботи та результати досліджень доповідались на міжнародних науково-технічних конференціях “Remote Engineering and Virtual Instrumentation” (REV, 2016, Мадрид; 2017, Нью Йорк; 2019, Бангалор), “Interactive Mobile Communication Technologies and Learning” (IMCL, 2016, Сан-Дієго), “World Engineering Education Conference” (EDUNINE, 2018, Буенос-Айрес), “Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems” (IDAACS, 2017, Бухарест), “Dependable Systems, Services and Technologies” (DESSERT, 2018, Київ), “International Conference on Interactive Collaborative Learning” (ICL, 2018, Будапешт), “The Experience of Designing and Application of CAD Systems in Microelectronics” (CADSM, 2019, Поляна — Свалява, 2021, Львів), “Computer Modeling and Intelligent Systems” (CMIS, 2019, 2021, Запоріжжя), “Advances in Science & Engineering Technology” (ASET, 2020, Дубаї), “Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення” (АПІР, 2006, 2008–2013, Севастополь), “Інформаційні технології металургії та машинобудування” (ІТММ, 2009, 2012—2021, Дніпро), “Проблеми електроенергетики, електротехніки та електромеханіки” (SIEMA, 2002, 2006–2018, Харків), “Проблеми сучасної електротехніки” (ПСЕ, 2012, 2014, Київ) та інших.

Особистий внесок автора. Основні результати дисертаційної роботи, які виносяться на захист, отримані здобувачем одноосібно та опубліковані в 48 роботах. При цьому роботи [7—9, 14, 19, 20, 23, 24, 26, 28—30, 36, 38—42, 46] опубліковані в одноосібному авторстві. В роботах, опублікованих у співавторстві, здобувачеві належать такі результати: [1] — розроблено структуру функціональної організації контролера, моделі програмної реалізації скінченних автоматів мовою LD; [2] — запропоновано моделі доданої реальності для фізичних моделей об'єктів систем; [3] — розроблено моделі когнітивних IoT систем; [4] — розроблені показники якості та ефективності віддалених лабораторій; [5] — запропоновано гібридні моделі об'єктів вивчення систем; [6] — запропоновано використання тернарної логіки у процесах моделювання когнітивних систем; [10]

— запропоновані моделі гібридних автоматів; [11] — розроблено структури та моделі когнітивного керування; [12] — розроблено моделі скінченних автоматів із небінарними елементами множин; [13] — розроблено семантичні моделі скінченних автоматів керуючих блоків систем керування; [15] — запропоновані моделі прогнозування витрат ресурсу ізоляції обмоток трансформатора; [16] — розроблені моделі оцінювання остаточного ресурсу; [17] — розроблені показники інтегрованості інтегрованих систем; [18] — розроблена концепція трансляції моделей із середовища моделювання у додаток людино-машинного інтерфейсу; [21] — розроблено моделі складних електричних апаратів мовою UML; [22] — розроблено моделі систем складних електричних апаратів; [25] — розроблено методи та інформаційні технології оброблення даних моніторингу параметрів трансформатора; [27] — розроблено принципи моделювання в лабораторії з промисловими контролерами; [31] — запропоновано модель віддаленої лабораторії як інтегрованої системи; [32] — розроблено методи та моделі для тестування об'єктів вивчення; [33] — запропоновано структури віддаленої лабораторії для дослідження когнітивної системи; [34] — запропоновано моделі об'єктів вивчення як скінченних автоматів у чорній скриньці; [35] — розроблено ієрархічну структуру підсистеми діяльності когнітивної системи; [36] — розроблені моделі з нечіткими контролерами; [37] — розроблено перспективні структури лабораторій; [43] — розроблені моделі станів скінченного автомата; [44] — розроблено модель зношування ізоляції трансформатора та методика її використання; [45] — розроблено показники ефективності небінарних автоматів; [47] — розроблено моделі контурів причинності скінченних автоматів; [48] — запропоновано метод побудови моделі вологості ізоляції.

Публікації. Зміст дисертації викладено в 48 роботах, серед яких основні наукові результати викладено у 30 роботах, у тому числі індексовані в НМБ *Scopus* –7; робіт, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації – 17, у тому числі індексовані в НМБ *Scopus* – 10 робіт; одна робота, яка додатково відображає наукові результати й індексована в НМБ *WoS*.

Структура й обсяг роботи. Дисертація складається зі вступу, 6 розділів, висновків, списку використаних джерел із 165 найменувань і 4 додатків; містить 389 сторінок тексту, в тому числі 130 рисунків, 32 таблиці, 14 сторінок додатків. Основний текст дисертації викладено на 329 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У першому розділі проаналізовані загальні питання побудови та існуючі математичні моделі структур систем і методи їх моделювання. У підрозділі 1.1 розглянуто загальні питання побудови моделей систем, пов'язані з концепцією, категоріальним апаратом систем, технологічними укладами людства та перспективами технічної революції у світі, залежність рівнів моделювання від типу структури системи, належність систем до різних типів наукової раціональності: класичної (системи з регуляторами та автоматами), некласичної (інтегровані) та постнекласичної (когнітивні). Вони мають різні розуміння

причинності — від Лапласового детермінізму, далі ймовірної та циклічної причинності.

Класичною моделлю, що описує властивості причинності як Лапласового детермінізму є модель керувальних автоматів, як скінченних автоматів, що виконують функції перетворювачів інформації. Автомат визначається як кортеж:

$$A = \langle S, X, Y, s_0, \delta, \lambda \rangle, \quad (1)$$

де S — скінченна непорожня множина (станів); X — скінченна непорожня множина входів (вхідний алфавіт); Y — скінченна непорожня множина виходів (вихідний алфавіт); s_0 — початковий стан; $\delta: S \times X \rightarrow S$ — функція переходів; $\lambda: S \times X \rightarrow Y$, $\lambda: S \rightarrow Y$ — функції виходів автоматів Мілі та Мура, відповідно.

У цьому й інших відомих визначеннях скінченного автомата не описуються властивості елементів його множин. Іншими недоліками класичного автомата є відсутність у ньому засобів коригування режимів та структури, прив'язка часу активності виходів до часового інтервалу активності відповідного стану, невизначеність недетермінованої поведінки. У моделі скінченного автомата також не подані знання. Все це формує потребу вдосконалення моделей керувальних автоматів системи.

Системи, в яких дискретна й безперервна поведінка наявні одночасно, формалізують гібридними автоматами. Одна з інтерпретацій гібридного автомата H описується кортежем:

$$H = \langle W, X, M, F, T \rangle, \quad (2)$$

де $W = \{u, y\}$ — множина вхідних (u) і вихідних (y) зовнішніх змінних; X — визначає безперервний простір, у якому безперервні змінні стану x можуть набувати своїх значень; M — множина режимів безперервної поведінки, з яких тільки один режим активний у кожний момент часу; F — дискретна множина диференційно-алгебраїчних рівнянь (ДАР) першого порядку; T — множина переходів від одного режиму до іншого. Кожне ДАР-рівняння визначає взаємозв'язок між змінними стану (x), їх похідними за часом першого порядку (dx/dt) та входами (w):

$$f_m(x, dx/dt, w) = 0, m \in M. \quad (3)$$

При моделюванні гібридних автоматів виникає низка питань щодо їх функціональної структури та функціонування в ієрархічних структурах системи, які недостатньо висвітлені у відомих публікаціях. Відсутність таких моделей ускладнює створення систем на основі використання гібридних автоматів і є невирішеною науково-технічною проблемою.

У **підрозділі 1.2** проаналізовано функціональні елементи пристроїв системи. Ієрархічний характер існуючих систем наочно проявляється у системах, які мають у своєму складі вузли з обчислюваним ресурсом. На нижньому рівні моделювання таких систем перебуває об'єкт — агрегат або технічний процес. Далі подані апаратні засоби контролера, рівні моделювання системних операцій, типових операцій користувача, операцій керування та моделювання процесів адаптації. На основі аналізу робіт з моделювання процесів функціонування систем встановлено,

що відсутні моделі систем, які уніфікують вертикальні зв'язки в інтегрованій системі та не враховані когнітивні можливості та процеси в перспективних системах.

У підрозділі 1.3 проаналізовано шляхи підвищення якості системи за допомогою розширення її інформаційної бази та когнітивних здібностей. Когнітивна система використовує здібності, властиві людині, такі як сприйняття, міркування, планування, навчання, оцінка власних можливостей для реалізації довгострокових намірів системи через вибір раціональної діяльності на різних рівнях. Різні форми знань, які зберігаються у відповідних базах і використовуються в когнітивних системах, подані моделлю піраміди DIKUW (Дані — Інформація — Знання — Розуміння — Мудрість). Проведений аналіз показав, що недосліджені типові моделі функціональної структури, які забезпечують трансформацію знань в когнітивних системах та зв'язують форми знань і діяльності з елементами цієї структури, що ускладнює створення систем на основі використання вищих форм знань і діяльності, є невирішеною науково-технічною проблемою.

У підрозділі 1.4 як приклад багаторівневих систем технічного призначення, проаналізовано структуру, склад та моделі системи віддаленої лабораторії цифрових об'єктів. Типова структура такої лабораторії містить фізичні моделі кінцевих об'єктів та їх сервер, а також WEB-сервер та комп'ютери віддалених студентів. Аналіз виявив необхідність трансформації віддалених лабораторій з метою розширення їх функціональних можливостей та забезпечення використання в процесах дослідження когнітивних систем та відсутність моделей, що описують функціональну структуру таких систем.

Проаналізовано моделі систем із потужними трансформаторами. Вузли трансформатора, особливо целюлозна ізоляція обмоток, старіють та руйнуються в процесі експлуатації. Існуючі моделі системи з трансформаторами належать до моделей інформаційно-керувальних систем і не враховують можливості когнітивного моделювання. З урахуванням цих результатів аналізу, у **підрозділі 1.5** сформульовано завдання досліджень.

У другому розділі розглянуті питання моделювання інтегрованої системи та її елементів – операційних та керувальних автоматів. **У підрозділі 2.1** на основі деталізації функцій спільних елементів підсистем за принципом «об'єкт керування (ОК) – пристрій керування (ПК)» та структури ієрархічної системи розроблено теоретико-множинну модель функціональної структури інтегрованої системи, у якій ПК i -го рівня є ОК на іншому, як правило на $(i + 1)$ рівні ієрархії системи. З іншого боку, ОК i -го рівня є ПК на $(i-1)$ рівні ієрархії системи. На рис. 1 наведено приклад трирівневої системи, яка включає системи керування об'єктом (СКО), структурною (СКС) та функціями (СКФ). Основні елементи цих систем це об'єкт керування (ОК), та пристрої керування об'єктом (ПКО), структурою (ПКС) та функціями (ПКФ). Пристрої ПКО та ПКФ є спільними елементами відповідних систем і виконують у них різні функції. Так, ПКО є пристроєм керування у СКО та об'єктом керування у СКС. Зовнішні впливи діють на ОК (ЗВО), ПКО (ЗВК), ПКС (ЗВС) та ПКФ (ЗВФ).

ОК і ПКО обмінюються значеннями змінних об'єкта та керувальних впливів, ПКО і ПКС – значеннями змінних і параметрів адаптації структури ПКО, а ПКС і ПКФ – значеннями змінних функцій і параметрів їх корегування.

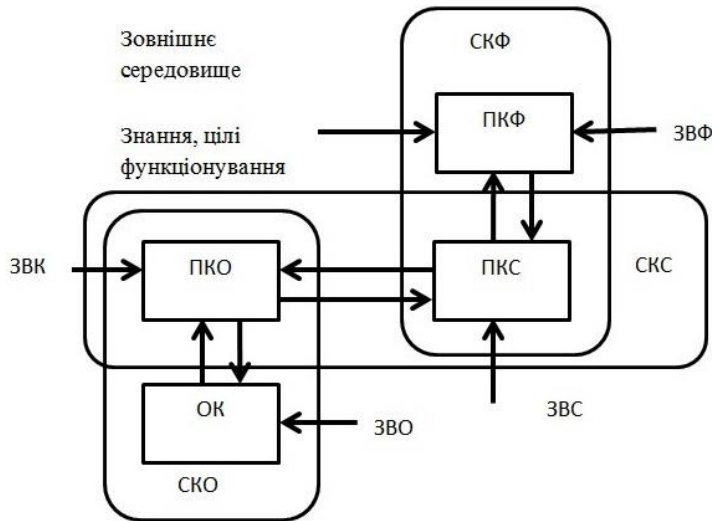


Рисунок 1 – Структура інтегрованої системи

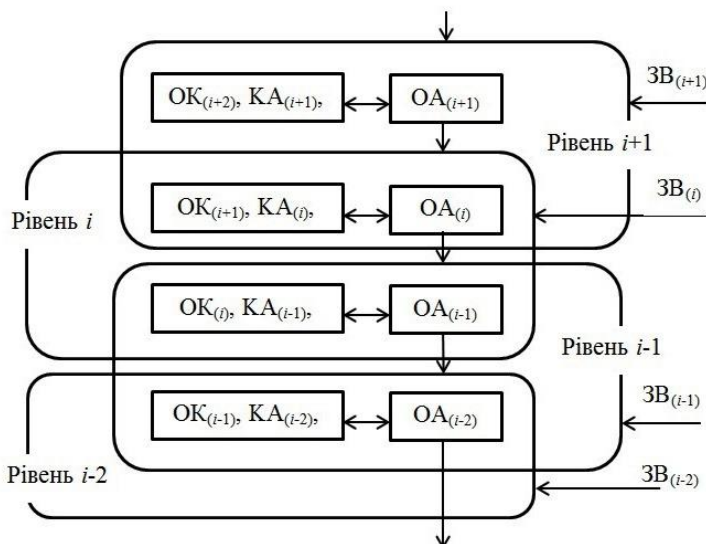


Рисунок 2 – Деталізована структура інтегрованої системи

Тобто у системі відбувається одночасне врахування впливів на різних рівнях ієрархії. На вид функціональної структури інтегрованої системи впливають такі структурні ознаки, як коефіцієнт розмноження систем нижчого рівня, кількість рівнів між керувальною та керованою системою; наявність та вид контурів зворотного зв'язку між системами у функціональній структурі. Відповідно, маємо стрічко- або пірамідоподібну структуру.

Структурну схему інтегрованої системи, внутрішні зв'язки якої деталізовані з урахуванням декомпозиції ПК на операційні та керувальні автомати наведено на рис. 2, а подальша деталізація системи, що враховує вхідні (ВхОА), вихідні (ВихОА) та проміжні (ПрОА) операційні автомати, – на рис. 3. Тобто типовими елементами структур цих систем є операційні та керувальні автомати.

Теоретико-множинна модель i -го рівня системи має вигляд:

$$M = \langle E, C_{int}, C_{ext} \rangle, E = \langle OA, KA/OK \rangle, C_{int} = \langle Zn, Pd, K \rangle,$$

$$C_{ext} = \langle K_{(i+1)}, K_{(i-1)}, ZB_i, Sm_{(i-1)} \rangle, \quad (4)$$

де E , C_{int} , C_{ext} – множини елементів, внутрішніх та зовнішніх зв'язків рівня системи, відповідно; OA – множина операційних автоматів; KA – керуючий автомат; OK – об'єкт керування; Zn – значення; Pd – події; K – команди; $K_{(i+1)}$ – команди від $(i+1)$ -го рівня; $K_{(i-1)}$ – команди до $(i-1)$ -го рівня; ZB_i – впливи зовнішнього середовища i -го рівня; $Sm_{(i-1)}$ – стан $(i-1)$ -го рівня; $Sm_{(i+1)}$ – стан $(i+1)$ -го рівня.

У підрозділі 2.2 розглянуто різновиди операційних автоматів як елементів

структури моделі системи, запропонована класифікація цих автоматів та їх теоретико-множинна модель, яка має вигляд: $OA \langle \text{Тип, Операція, Вхідні дані, Тип виходу, Вид керування} \rangle$ та визначає класифікаційні ознаки автоматів: за типом – ВхОА, ПрОА, ВихОА; за операцією – отримання, фільтрація, перетворення форми подання, одиниць виміру, формату даних, розрахунок, перетворення в інші дані, інформацію, операції з базою даних та інформації (збереження, видалення, пошук, сортування даних або інформації тощо), перевірка на діапазон, наявність тривоги, функціональне перетворення вхідних даних у події проміжні або вихідні дані, регулювання вихідних даних і моделювання (генерація) неспостережуваних даних; за вхідними даними – сигнали, дані, інформація, знання та інші; за типом виходу – події, значення, висловлення; за видом керування – некеровані, з керуванням активацією, параметрами, структурою.

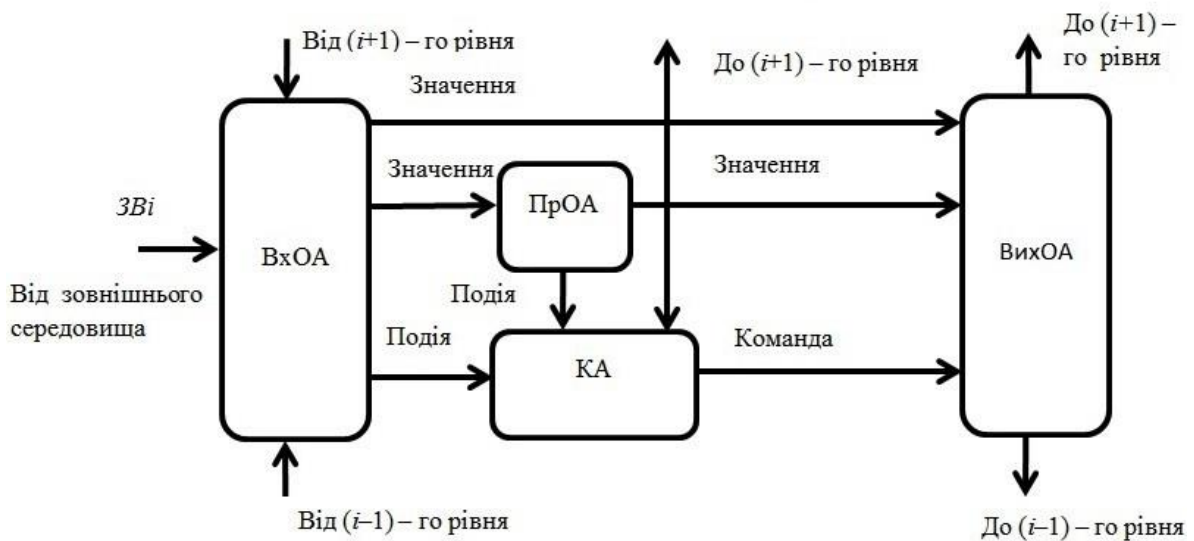


Рисунок 3 – Деталізована структура рівня інтегрованої системи

У підрозділі 2.3 запропонована семантична модель скінченного автомата – набір висловлювань характеризують семантичні відносини між визначеннями елементів (станів, подій, дій) автоматів, що містяться в назвах цих елементів. Запропоновано розглядати назву елемента автомата одночасно з позицій передісторії входів, поточного стану виходів і можливої постісторії стану та з урахуванням семантики процесу керування, типу автомата та причинно-наслідкових зв'язків у системі.

Особливістю інформаційних процесів у системі є наявність кільцевої причинності, тому що ПК і ОК з'єднані в контури. Тому в семантичній моделі автомата можуть бути як висловлювання типу «увімкнення виходу НАГРІВ ПК є причиною підвищення температури об'єкта, що фіксується на вході цього пристрою», так і «недостатня температура об'єкта на вході ПК є причиною увімкнення його виходу НАГРІВ».

Для побудови семантичної моделі керувального автомата необхідно мати моделі об'єкта, датчиків, виконавчих механізмів, операційних автоматів у вигляді висловлювань, що описують причинно-наслідкові зв'язки між входами та виходами цих елементів. Також необхідно визначати у графі автомата контури

діяльності та керування. Контури діяльності містять зв'язки станів автомата з об'єктом, а контури керування – зв'язки між станами. Таким чином стани зв'язують контури діяльності та керування. Для опису цих зв'язків визначимо такі елементи інтерфейсу стану: вхід (ECI), вихід (ECO) події у контурі керування; вихід діяльності (AO) і вхід реакції (RI) на ці дії в контурах діяльності. Між цими елементами зовнішнього інтерфейсу стану можливі такі види причинно-наслідкових відносин: $ECI \Leftarrow AO$ (діяльність є наслідком транзакції стану); $RI \Leftarrow ECO$ (транзакція є наслідком реакції). Для введення відносин $ECI1 \Leftarrow ECO2$ (транзакція 2 є наслідком транзакції 1) $RI \Leftarrow AO$ (діяльність є наслідком реакції) використовуємо зовнішню дугу графа автомата.

Стан, у якому не виконується оброблення вхідних подій, назвемо комутаційним, при логічному обробленні – комбінаційним. У разі залежності виходів стану від подій у попередні моменти часу стан назвемо автоматним. У «класичному» скінченному автоматі вихід (діяльність) не залежить від того, яким чином виконана активація стану. Тобто, якщо у такого стану більше однієї вхідної події, то це – комбінаційний стан з обробленням вхідних подій за логікою АБО стосовно виходу стану. А автоматний стан у таких автоматах подає автомат нижчого рівня ієрархії.

Стан S_i автомата можна описати кортежем:

$$S_i = \langle ECI, RI, ECO, AO, \mu_s, t_s \rangle, \quad (5)$$

де ECI – множина входів подій керування; RI – множина входів реакцій на діяльність; ECO – множина виходів подій керування; AO – множина виходів подій діяльності; μ_s, t_s – функції діяльності та транзакцій стану, відповідно.

Функція μ_s описує відображення множини входів ECI на множину виходів AO $\mu_s: ECI \times AO$, а функція t_s – відображення множини входів RI на множину виходів ECO $t_s: RI \times ECO$. Вид функцій μ_s, t_s залежить від виду стану. Для комутаційного стану досить перерахувати відносини. Для опису комбінаційного стану потрібно визначити функції виходів від входів. А в автоматному стані функції μ_s, t_s описують два автомати – діяльності й транзакцій, кожен з яких описується кортежем аналогічним кортежу (5).

Приклад графічної інтерпретації причинно-наслідкових відносин стану

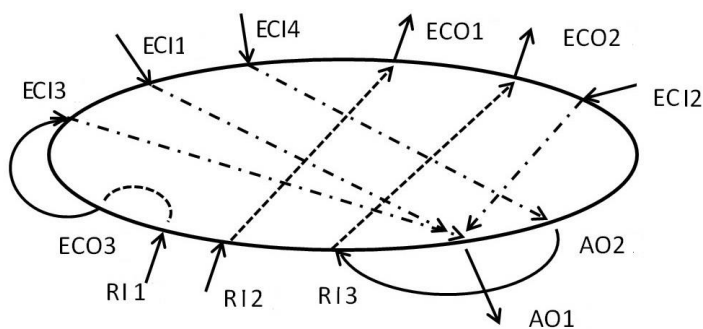


Рисунок 4 – Графічна інтерпретація причинно-наслідкових відносин простого стану автомата що керує

автомата, що керує, наведено на рис. 4. Функція діяльності цього стану включає відносини: $\mu_s = \{ESI1 \Leftarrow AO1, ESI2 \Leftarrow AO1, ESI3 \Leftarrow AO1, ESI4 \Leftarrow AO2\}$. А функція транзакцій стану представлена відносинами $t_s = \{ESO3 \Leftarrow RI1, ESO2 \Leftarrow RI1, ESO2 \Leftarrow RI3\}$. За наявності зовнішніх зв'язків реалізуються відношення $AO1 \Leftarrow ESI3 \Leftarrow ESO3 \Leftarrow RI1$, та $ECO2 \Leftarrow RI3 \Leftarrow AO2 \Leftarrow ESI4$.

Формальний опис семантичної моделі SMS автомата, що керує, це система кортежів:

$$SMS = \langle Sa, Sc \rangle; Si = \langle Ni, CDi, KBi \rangle; Nij = \langle Np, Npr, Nf \rangle;$$

$$KBij: IF CDi THEN Nik \leq Nim, \quad (6)$$

де Sa, Sc – множина контурів діяльності та керування, відповідно; Si – множина, що входить у множини Sa або Sc ; Nij – комплекс назв j -го елемента в i -му контурі; CDi – напрямок причинності в i -му контурі; KBi – база знань i -го контуру; Np, Npr, Nf – множина назв j -го елемента в i -му контурі в стилі попередньої історії, поточного вибору і можливої постісторії, відповідно; $KBij$ – елемент бази знань j -го елемента в i -му контурі. Вираз $Nik \leq Nim$ визначає той факт, що Nim є наслідком Nik , де Nik, Nim , – знання у формі назв для елементів k і m в i -му контурі. Для аналізу структури знань, представлених в семантичній моделі системи, можуть бути застосовані методи логічного висновку.

У **підрозділі 2.4** запропоновані моделі автоматів гібридних систем, які містять контури як безперервного, так і дискретного керування, що розширює функціональні можливості системи. Гібридна система, структура якої наведена на рис. 5, містить контури безперервного (Об'єкт – Датчики – ВхОА – ВихОА – Виконавчі механізми – Об'єкт) та дискретного (Об'єкт – Датчики – ВхОА – КА – ВихОА – Виконавчі механізми – Об'єкт) керування, які побудовані з типових елементів.

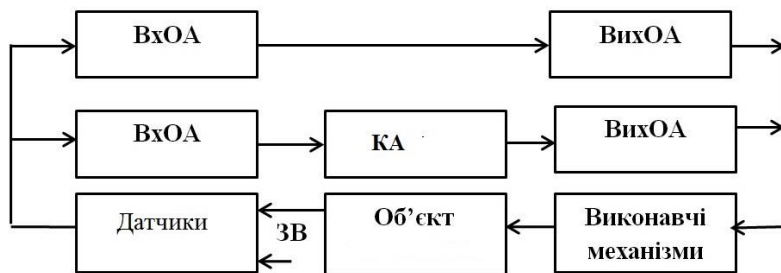


Рисунок 5 – Структура контурів гібридної системи

У контурі безперервного керування елемент ВихОА є регулятором, а елемент ВхОА – обчислює різницю між фактичним та еталонним значенням регульованої величини. Зовнішні впливи (ЗВ) також урахуються системою за допомогою датчиків. Для побудови адаптивної гібридної системи

запропонована дворівнева структура гібридного автомата, яку наведено на рис. 6.

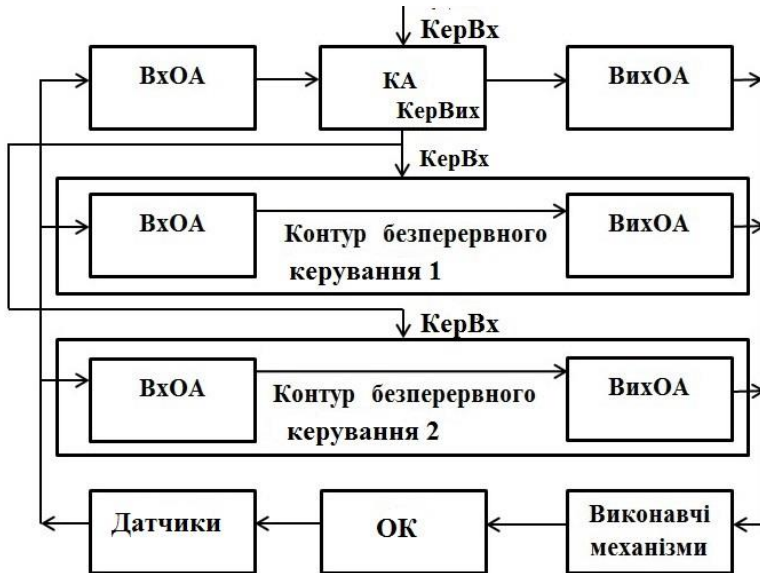
Для цього блоки системи повинні мати не тільки інформаційні, але й керувальні входи (КерВх) та виходи (КерВих). Верхній рівень містить автомат КА в контурі дискретного керування, а нижній – два контури безперервного керування, які описуються ДАР рівняннями. У наведеному прикладі контур дискретного керування є ініціатором змін у контурах безперервного керування. Запропоновані також структури гібридного автомата, в яких автомат ВихОА в контурі безперервного керування змінює поведінку блоків у контурі дискретного керування.

Теоретико-множинна модель гібридного автомата має вигляд;

$$ГА = \langle KB, KD, U, Y, Z \rangle, \quad (7)$$

де KB , $КД$ – множина контурів безперервного, дискретного керування; U – множина виходів датчиків, що спостерігаються автоматом; Y – множина входів виконавчих механізмів, що керуються автоматом; Z – множина взаємозв'язків контурів за керуванням та даними. Теоретико-множинна модель i -го контуру безперервного керування має вид:

$$KB_i = \langle M_{OA_i}, U_i, Y_i, L_i, F_i(C_k) \rangle \quad (8)$$



де M_{OA_i} – множина операційних автоматів i -го контуру; U_i – множина виходів датчиків, що спостерігаються у контурі, $U_i \subset U$; Y_i – множина входів виконавчих механізмів, що керуються у контурі, $Y_i \subset Y$; L_i – множина внутрішніх зв'язків у контурі; $F_i(C_k)$ – передавальна функція i -го контуру при k -му керуванні.

Рисунок 6 – Дворівнева структура гібридного автомата на основі блоків ВхОА, ВихОА та КА

ВИГЛЯД:

$$КД_j = \langle M_{OA_j}, A_j(C_m), U_j, Y_j, L_j \rangle, \quad (9)$$

де M_{OA_j} – множина операційних автоматів j -го контуру; A_j – керувальний автомат j -го контуру при m -му керуванні; U_j – множина виходів датчиків, що спостерігаються у контурі, $U_j \subset U$; Y_j – множина входів виконавчих механізмів, що керуються у контурі, $Y_j \subset Y$; L_j – множина внутрішніх зв'язків у контурі.

У підрозділі 2.5 запропоновано моделі скінченних автоматів із небінарними елементами множин. Елементи множин відомих автоматів охарактеризовані як бінарні елементи множин входів («актуальний (здійснився)»/«не актуальний») виходів («виконується»/ «не виконується») і станів («активний»/«пасивний») з поведінкою, в якій виходи здійснюються тільки в активному стані. Запропоновані автомати з тернарними елементами множин мають більше значень. Особливе здійснення виходу може бути реалізовано в неповному обсязі або в зміненому часовому інтервалі щодо інтервалу активності стану. Арність елементів різних множин одного автомата може бути різною. Теоретико-множинна модель автомата з небінарними елементами множин має вигляд:

$$A = \langle X, Y, S, s0, C, c0, F \rangle, \quad (10)$$

де C – множина керувань; $s0$ – початкове керування; F – множина функцій автомата в його станах. Елемент f_i множини F для i -го стану визначимо через функції цього стану $f_i = \langle \mu_i, \lambda_i, \sigma_i \rangle$, де $\mu_i, \lambda_i, \sigma_i$ – функціями активації, виходів і структури, відповідно. Функція активації μ встановлює логіку визначення значення станів в активному стані та його околицях залежно від значень деякої підмножини станів і поточних значень входів X . Значення i -го стану після активації визначимо за допомогою функції μ_i :

$$v_{si} = \mu_i(n_i, at, V_{xi}, V_{sj}, R_{ij}),$$

де n_i – кількість значень i -го стану; at – тип активації (за максимальним, пріоритетним значенням або зваженою сумою значень входів, що активують, з урахуванням або без урахування значень минулих станів); V_{xi} – множина значень входів що активують цей стан; V_{sj} – множина значень станів, які пов'язані з активальними входами. Функція виходів λ визначає значення виходів в i -му стані як номер підмножини Y_i виходів i -го стану, які виконуються під час знаходження автомата в цьому стані з урахуванням значення стану, повноти реалізації, типу та параметрів інтервалу активності виходів щодо інтервалу активності значення стану $v_{yi} = \delta_i(v_{si})$. Значення v_{yi} визначає варіант номенклатури $Y_{iv}(v_{yi})$ виконуваних виходів, повноту $B_i(v_{yi})$ та часовий інтервал $[t_{bi}(v_{yi}), t_{ei}(v_{yi})]$ їх реалізації. Номенклатура виконуваних виходів є підмножина $Y_{iv}(v_{yi}) \in Y_i$. Повнота реалізації B_i характеризує деякий параметр виходу (наприклад, амплітуду, потужність) щодо його граничного значення. Інтервал часу $[t_{bi}, t_{ei}]$ реалізації виходів задається часом початку t_{bi} й закінчення t_{ei} закінчення або зсувами щодо інтервалу активності значення поточного стану. Функція структури σ задає структуру переходів від одного активного стану до іншого. Вона встановлює підмножину входів автомата $X_{ic} = \sigma(v_i, c_i)$, які дозволені для переходу з i -го стану при його значенні v_i й керуванні c_i .

Основні положення використання функцій автомата є такі:

1. При ініціалізації автомату стану $s0$ присвоюється значення «активний», а іншим станам – «пасивний», автомат налаштовується на початкову структуру, відповідно до $s0$.

2. Функції активації й переходів виконуються тільки в активному стані, а функція виходів – в усіх неактивних станах.

3. Функція активації обчислює значення станів в активному стані і його околицях, тобто на деякій відстані від активного стану. У станах, що знаходяться за межами цієї околиці, встановлюється значення «пасивний».

У підрозділі 2.6 розглянуто структури керувальних автоматів із використанням fuzzy контролерів спільно з блоком пам'яті станів. Стани автомата на вході та виході fuzzy контролера описуються як нечіткі змінні з функціями належності типу "Singletons". Наведено приклад використання fuzzy контролера в системі керування світлофором. Запропоноване використання fuzzy контролерів для реалізації керувальних пристроїв відповідно до кортежів небінарних автоматів, у яких елементи множин автомата представлені нечіткими й лінгвістичними змінними, а обчислення значень залежних змінних проводиться за допомогою нечіткого контролера з відповідною базою знань у вигляді нечітких

продукції і пов'язаного з пам'яттю поточного та нового станів. Цей контролер розраховує: нечітке значення виходу автомата як функцію нечіткого поточного активного стану; значення нового (або підтвердження поточного) активного стану, як функцію актуальних в поточному стані входів і значення поточного стану.

У підрозділі 2.7 наведено висновки за розділом 2 щодо переваг та властивостей моделі функціональної структури інтегрованої системи та її елементів.

У третьому розділі розглянуті структури та моделі когнітивних систем, основні елементи цих систем. У підрозділі 3.1 розглянуті структури та теоретико-множинні моделі когнітивних систем. Узагальнена структура системи, в якій зберігаються та використовуються знання, містить об'єкт системи (ОК), пристрій керування (ПК) та базу знань (БЗ) які розташовані в зовнішньому середовищі (ЗС). Усередині ЗС протікають різні процеси та, можливо, є системи. ЗС обмінюється з системою сигналами та знаннями. У перспективних системах межі ЗС не є незмінними, а саме середовище може змінювати свою зовнішню межу. На етапі створення в систему вносяться знання творців, що визначають конструктивні, схемні та (або) програмні рішення, а в БЗ – знання про ОК, ЗС, ПК, які можуть бути корисні в процесі підтримки оптимального стану об'єкта і еволюції ПК. У процесі використання системи знання з БЗ переробляються спільно зі знаннями, отриманими від ОК і ЗС. Результати перероблення ініціюють діяльність ПК спрямовану на ОК, ЗС і на себе. Запропонована деталізація структури моделі системи до рівнів знань і діяльності наведена на рис. 7.

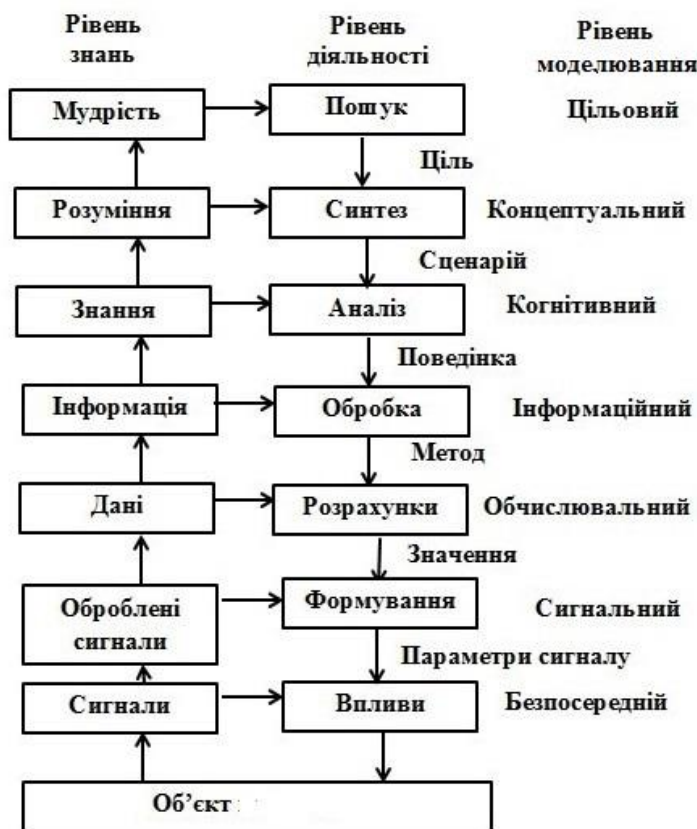


Рисунок 7 – Структура рівнів когнітивної системи

Узагальнена структура *i*-го рівня системи наведена на рис. 8. Вона містить базу знань та пристрій, що керує, який складається з конвертора форм знань, вхідного ОА знань, КА автомата та вихідного ОА діяльності.

Розглянуто пірамідальну структуру, яка описує когнітивну систему у вигляді ієрархії підсистем з урахуванням збільшення їх кількості на нижчих рівнях. Ці підсистеми утворюються на певних рівнях пірамід форм знань і діяльності когнітивної системи. При описі когнітивних систем треба визначити базу знань у формі, характерній для цього

рівня, мету та функції діяльності на цьому рівні. До систем кожного рівня застосуємо принцип однорідності знань, згідно з яким, знання про кінцевий об'єкт, що зберігаються в базі знань і знання, які є основою алгоритмів функціонування, можуть бути піддані обробленню.

У **підрозділі 3.2.** розглянуто конвертори форм знань підсистеми пізнання, які переробляють знання в напрямку від нижчих до вищих форм у піраміді форм знань DIKUW.

Перетворення сигналів у дані опишемо відображеннями:

$$M_{sign} \times P_{sign} \times T_{sys} \rightarrow D^+; D \times T_{sys} \rightarrow D^-, \quad (11)$$

де M_{sign} – множина сигналів від кінцевого об'єкта і зовнішнього середовища в певний відрізок часу; P_{sign} – множина параметрів перетворення сигналів у дані (параметри аналогової фільтрації, масштабу, точності, періоду дискретизації АЦП перетворення, формату коду даних та інші); T_{sys} – множина параметрів системного часу; D^+ – множина кодів значень і похибок даних і поточного часу, внесених у базу знань у поточний момент часу; D^- – множина кодів значень і похибок даних і поточного часу, що вилучається з бази знань у поточний момент часу.



Рисунок 8 – Узагальнена структура конвертора i -го рівня керування

Перетворення даних в інформацію опишемо відображеннями:

$$D \times P_{ID} \rightarrow I_1^+;$$

$$I_1 \times T_a \rightarrow I_1^-, \quad (12)$$

де D – дані в базі знань в поточний момент часу; P_{ID} – параметри перетворення первинних даних, включаючи відображення множини каналів, по яких надходять сигнали на

множину параметрів об'єкта системи та навколишнього середовища; I_1, I_1^+, I_1^- – придбана первинна інформація наявна, що додається та видається в поточний момент часу з бази знань, відповідно; T_a – множина параметрів астрономічного часу.

На рівні обчислювального моделювання окремі значення об'єднуються в масиви, упорядковуються, нормалізуються, виконується кластеризація екземплярів класів інформації. Далі визначаються такі вторинні характеристики величин в інформаційних масивах, як спектральні, статистичні та динамічні. Також проводиться: оцінка похибок вторинних параметрів; порівняння даних отриманих по різних каналах і різними методами; порівняння з результатами моделювання та (або) розрахунку.

На інформаційному рівні визначаються знання про приналежність елементів

інформаційних масивів діапазонами допустимих значень, рівням тривожної сигналізації; проводиться апроксимація послідовності значень стандартними функціями; визначення через інтерполяцію відсутніх елементів в інформаційних масивах; виявлення тенденцій у зміні значень. Також знаходяться кореляції змінних і параметри кореляції; апроксимації статистичних даних законами розподілу; виконується формування нечітких і лінгвістичних змінних, фаззифікація значень змінних, які зберігаються в базі інформації.

На рівні моделювання знань проводиться подальше вивчення об'єкта системи та навколишнього середовища і побудова їх моделей. У тому числі виконується перехід від знань про параметри до знань про стани кінцевого об'єкта і підсистеми, що підтримує його стани, витяг вторинних знань на основі фактів, що зберігаються в базі первинних знань; зв'язування отриманих знань про об'єкт з інформацією про операції підсистеми діяльності. Також виконується розроблення моделі прогнозу змін параметрів об'єкта та навколишнього середовища через екстраполяцію інформаційних масивів і використання нейрофаззи моделей взаємозв'язків трендів впливів на об'єкт і динаміки його параметрів.

На рівні моделювання розуміння виконується розрахунок результатів виконання відомих сценаріїв діяльності, виходячи зі знань про поточний стан об'єкта системи з визначенням його кінцевого стану і витрат на реалізацію сценарію. Ці знання необхідні для оцінки досяжності цілей функціонування системи. Далі ініціюється робота моделі, яка враховує наявні знання, поточні параметри, стан об'єкта й генерує дані про його неспостережувані й прогнозовані параметри. На рівні моделювання мудрості проводиться вибір поточної цілі функціонування, виходячи з пріоритетів цілей і знань.

У **підрозділі 3.3** розглянуто структури і моделі підсистем діяльності та когнітивності. На рівні цілей структура діяльності представлена дискретним автоматом цілей:

$$\langle X^p, Y^p, S^p, S_o^p, S_e^p, \mu^p, \delta^p \rangle, \quad (13)$$

де: X^p – множина подій цілей, що інформують про неможливість або недоцільність продовження деякого сценарію досягнення відповідної цілі; Y^p – множина сценаріїв діяльності; S^p – множина станів – цілей діяльності; S_o^p, S_e^p – початкова та кінцева мета діяльності; μ^p – функція сценаріїв, що задається відображенням $\mu^p: S^p \times X^p \rightarrow Y^p$; δ^p – функція транзакції цілей, що задається відображенням $\delta^p: S^p \times X^p \rightarrow S^p$. З активним станом пов'язана поточна ціль діяльності системи. Дією в активному стані S_i^p є активізація сценарію $Y_i^p \in Y^p$, що досягає поточну ціль найкращим способом.

На рівні сценаріїв та поведінки модель підсистеми діяльності представлена відповідними автоматами сценаріїв та поведінки. На рівні обчислювального моделювання діяльність системи полягає у визначенні даних D_i^c дій на основі актуальної на цей момент інформації про дії Y_i^b дискретного та значення функції F_i^b гібридного автомата. При цьому використовується відображення:

$$Y_i^b \times P_D \rightarrow D_i^c; F_i^b \times P_D \rightarrow D_i^c, \quad (14)$$

де P_D – множина параметрів дії або функції, наприклад спосіб кодування, адреса каналу зв'язку з об'єктом системи, час початку, тривалість дії та інші.

На рівні моделювання даних діяльність системи полягає у формуванні сигналів керування відповідно до даних D_i^c . Ці сигнали передаються до виконавчих механізмів і формують впливи на об'єкт системи.

Підсистема когнітивності складається з підсистем міркування, планування, навчання та сприйняття. Модель міркування представлена в теоретико-множинному вигляді як:

$$Re = \{Sub, Rea, Res\}, \quad (15)$$

де Sub — тема; Rea — доводи; Res — результат. Модель планування представлена у вигляді:

$$Pl = \{KM, OM, PM\}, \quad (16)$$

де KM — модель вхідних знань; OM — модель об'єкта або процесу планування; PM — модель результату планування. Модель блоку навчання представлена у вигляді:

$$Tr = \{MK, TT, TM\}, \quad (17)$$

де MK — результати моніторингу процесу функціонування — знання про динаміку його вхідних і вихідних параметрів; TT — засоби навчання TM — модель процесу що досліджується. Модель блоку сприйняття представлена у вигляді:

$$Pe = \{PSO, PT, CL\}, \quad (18)$$

де PSO — параметри множини об'єктів; PT — інструменти сприйняття; CL — кластер сприйманого об'єкта.

У підрозділі 3.4 розглянуто структури та моделі когнітивного функціонування на основі динамічного комплексу цілей. Описані характеристики цілей і процесів їх досягнення. Одиначна ціль описана з точки зору чіткості постановки, потреб у системних ресурсах, доходу від досягнення цілі та інших. Ціль у складі комплексу цілей описана перерахованими вище характеристиками одиначної цілі й має додаткові характеристики: пріоритет, вплив, незалежність, ресурси системи для досягнення цілей, ефективність. Стан процесів досягнення цілі характеризується можливістю досягнення, завершеністю, забезпеченістю процесу досягнення цілі системними ресурсами та ефективністю процесу досягнення цілі.

Теоретико-множинною моделлю i -ї цілі A_i назвемо кортеж виду $A_i = \langle F_i, M_i \rangle$, де F_i – формулювання i -ї цілі; M_i – множина параметрів i -ї цілі. Теоретико-множинною моделлю j -го комплексу цілей KA_j будемо називати кортеж виду $KA_j = \langle F_j, A_j \rangle$, де F_j – формулювання j -го комплексу цілей; A_j – множина моделей цілей, що належать до j -го комплексу цілей.

Етапу діяльності для досягнення заданих цілей повинен передувати етап визначення стратегії роботи з цілями. У ході цього етапу система визначає множину актуальних цілей, можливість паралельної діяльності для досягнення

актуальних цілей, стратегію розподілу системних ресурсів.

Стратегія вибору цілей може бути закладена в алгоритм функціонування системи (наприклад, у формі дерева цілей) або визначається системою самостійно залежно від поточних чинників процесу досягнення цілей. Можливі такі стратегії обрання цілей функціонування системи: розширення множини M_a активних (прийнятих до досягнення) цілей через включення найбільш ефективних цілей, або відмова від найбільш неефективних цілей.

Блок-схема алгоритму вибору однієї цілі наведена на рис.9. В описі алгоритму використані такі позначення: A_b – масив бази для вибору активних цілей; A_r – масив активних цілей, тобто цілей, які реалізуються або відібрані для реалізації; A_p – масив потенційних цілей, тобто цілей, які в поточний момент зняті з реалізації. У результаті виконання алгоритму (рис. 9) з масиву A_b у масив A_r переміщається одна ціль, яка ефективна та забезпечена ресурсами.

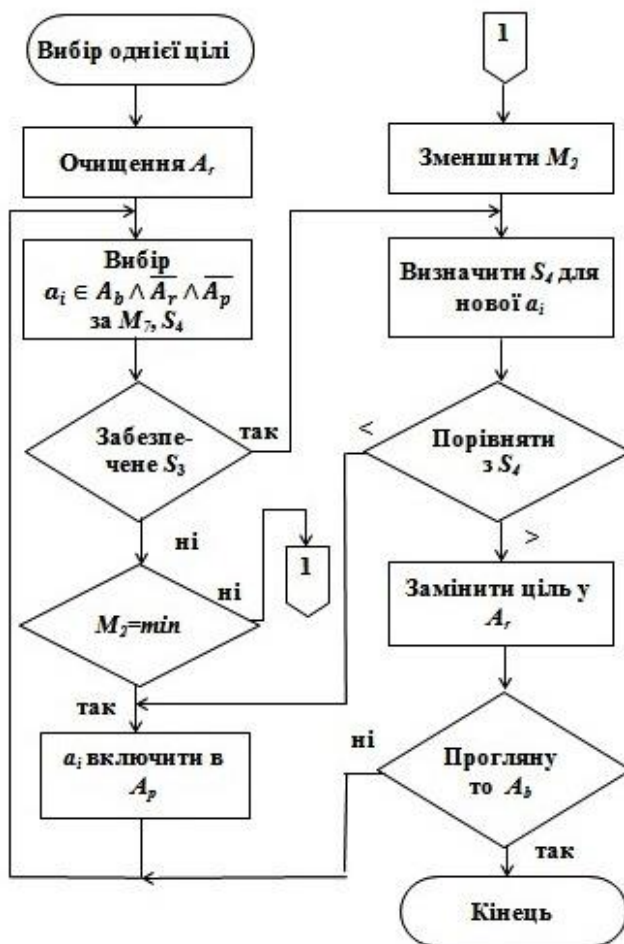


Рисунок 9 – Блок-схема алгоритму вибору однієї цілі

Вибір цілі проводиться за її пріоритетом M_7 і ефективністю процесу S_4 досягнення цілі. Внесок цілі в загальну оцінку враховується за допомогою коефіцієнтів, що масштабують, або з використанням нечіткого контролера. Структура цілепокладання наведена на рис. 10.

Вона включає вхідні (ВхОА), вихідні (ВихОА) операційні автомати й автомат, що керує (КА). Цей КА має виходи (КерВих), через які передаються команди корекції станів підлеглих підсистем. Вхід КА рівня стратегії обрання цілей у перспективі буде підключений до наступного рівня генерації цілей.

У підрозділі 3.5 наведено теоретико-множинні моделі ієрархічної системи діяльності, запропоновано формалізм багатоавтоматного комплексу з можливістю корегування режимів підлеглих автоматів, який описується наступними кортежами:

$$SA = \langle L \rangle; L_i = \langle A_i, R_i \rangle;$$

$$A_{ij} = \langle X_j, Y_j, YX_j, YC_j, S_j, M_j, \lambda_j, \delta_j, \mu_j, \theta_j \rangle;$$

$$R_{ik} = \langle T_i, N_i \rangle; N_b = \langle A_s, A_d, P, Q, M \rangle, \quad (19)$$

де SA – багато автоматний комплекс підсистеми діяльності; L – множина рівнів; R – множина шин рівня; L_i – формалізм i -го рівня; A_i – множина автоматів на i -му рівні; R_i – множина шин на i -му рівні; A_{ij} – j -й автомат на i -му рівні; X_j – множина входів j -го автомата; Y_j – множина виходів j -го автомата; YX_j – множина виходів j -го автомата, які трансформувалися в його входи; YC_j – множина виходів j -го автомата, які трансформувалися у виходи, які задають режими роботи підпорядкованих автоматів; S_j – множина станів режимів об'єкта цього рівня за допомогою j -го автомата; M_j – множина станів використання автомата для j -го скінченного автомата, наприклад, «Активний», «Зупинено», «скинуто в початковий стан», «Переведений в режим 1» і так далі; λ_j – функція виходів j -го автомата; δ_j – функція переходів j -го автомата; μ_j – функція виходів YX_j j -го автомата;

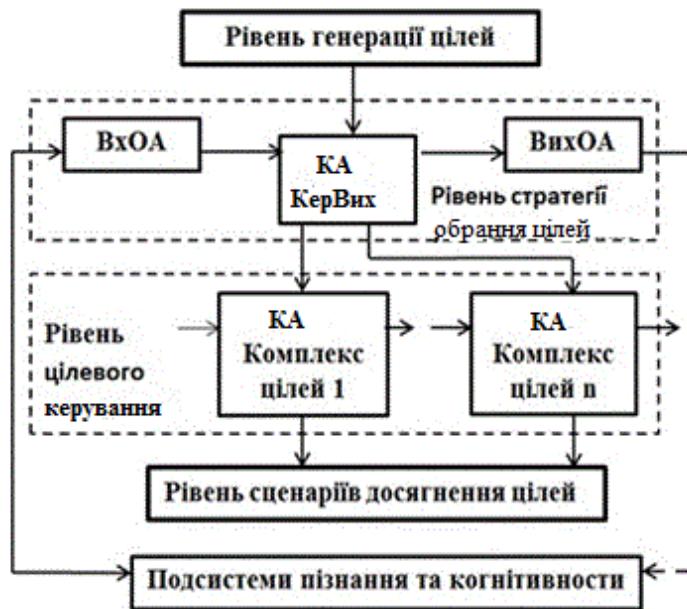


Рисунок 10 – Структура цілепокладання

Графічна інтерпретація формалізму цієї підсистеми наведена на рис. 11. Запропонований формалізм описує особливості побудови підсистеми діяльності. Це є багаторівнева структура, один рівень якої містить певну множину скінчених автоматів і вхідну, вихідну шини та шину команд. Наявність шин на кожному рівні обумовлена тим, що сигнали від різних джерел можуть конфліктувати між собою. Шини призначені для усунення цих конфліктів.

Структура, джерела та об'єкти дії входів, команд і виходів скінчених автоматів одного рівня наведені на рис. 12. Як можна бачити з цього рисунку, структура об'єктів дії автомата, що керує, дозволяє виконувати параметричну та структурну адаптацію операційних автоматів на своєму рівні та на підлеглих рівнях і сприймати команди від вищих рівнів. У **підрозділі 3.6** наведено висновки за розділом 3, у яких висвітлено типовий характер структури запропонованої когнітивної системи, її підсистем та елементів.

У **розділі 4** досліджені запропоновані математичні моделі елементів

θ_j – функція виходів Y_c j -го автомата; R_{ik} – k -та шина на i -му рівні; T_i – множина типів шин на i -му рівні, $T_i = \{TX, TY, TC\}$, де TX , TU , TC – тип входів, виходів і команд, відповідно; N_i – множина зв'язків автоматів із шиною; N_b – b -й зв'язок автомата; A_s – автомат – джерело зв'язку; A_d – автомат – призначення зв'язку; P – пріоритет сигналу, який використовується для вибору при одночасному надходженні декількох сигналів; Q – тип сумісності сигналу; M_j – множина команд, які використовуються для завдання станів j -го скінченного автомата.

інтегрованих та когнітивних систем. У підрозділі 4.1 досліджена ефективність моделей небінарних автоматів. Запропоновано відрізнити функціональну та технологічну поведінку керувального автомата. Перша визначається властивостями об'єкта системи та завданнями керування його станами та початковим станом. Друга відповідає на питання, як це зробити раціонально через використання значень подій (входів), форми активності станів та впливів (виходів) на об'єкт. Ефективність керувального автомата визначена через кількість варіантів технологічної поведінки, кількість станів або входів еквівалентного за функціями класичного автомата.

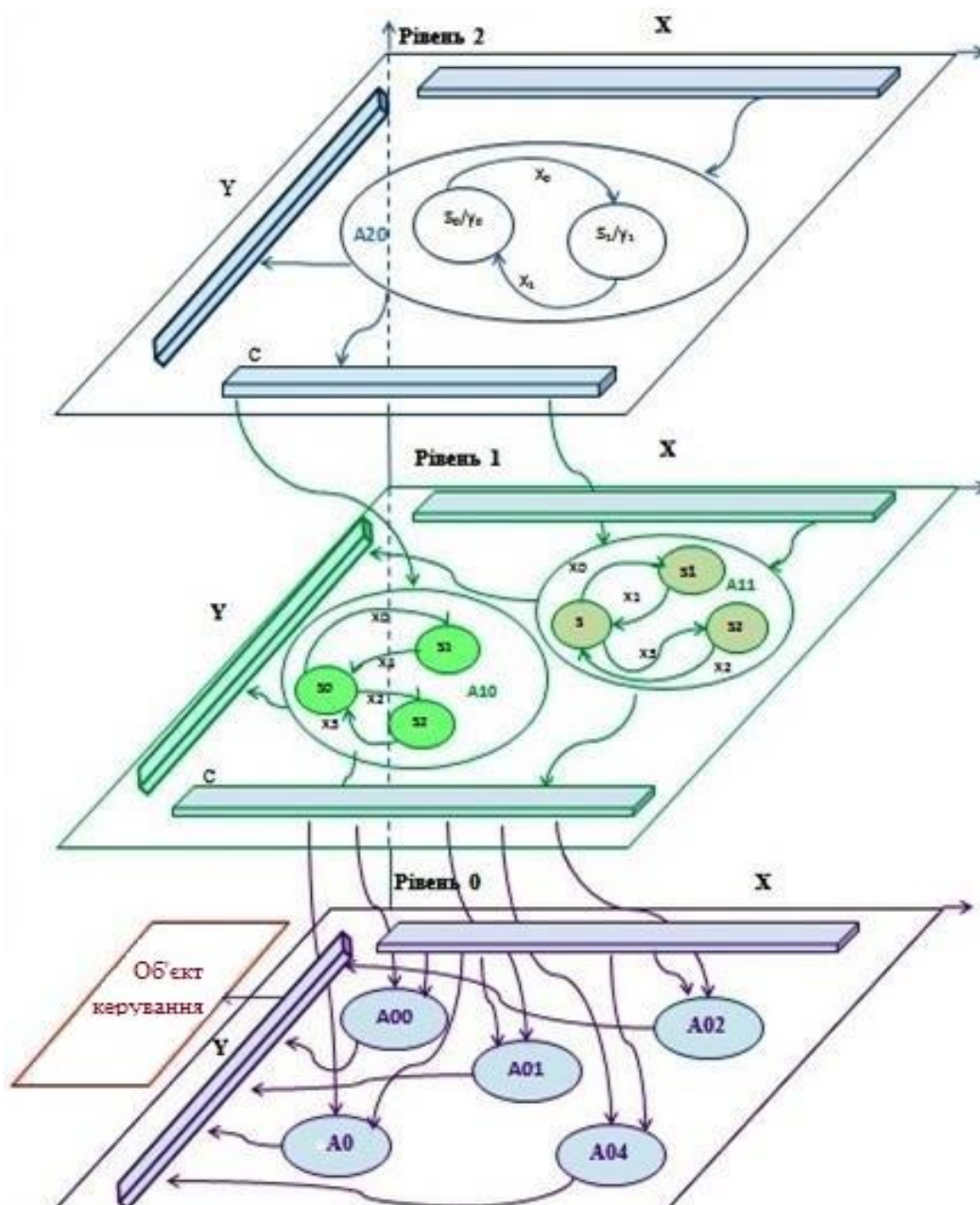


Рисунок 11 – Приклад структури багатоавтоматного комплексу підсистеми діяльності

Запропоновано критерії ефективності небінарних автоматів $E_b = B_{nb}/B_b > 1$ та $E_s = N_b/N_{nb} > 1$, де E_b – показник ефективності за поведінкою; B_{nb} , B_b – кількість реалізованих форм технологічної поведінки небінарного та бінарного автомата з еквівалентною структурою, відповідно; E_s – показник ефективності за структурою; N_b , N_{nb} – кількість станів або входів бінарних автоматів та небінарних автоматів із еквівалентною поведінкою, відповідно.

Для автоматизації експериментів із небінарними автоматами розроблено програмну реалізацію алгоритму симуляції тернарного автомата, у якій множини, функції автомата та потік входніх подій задаються текстовими файлами.

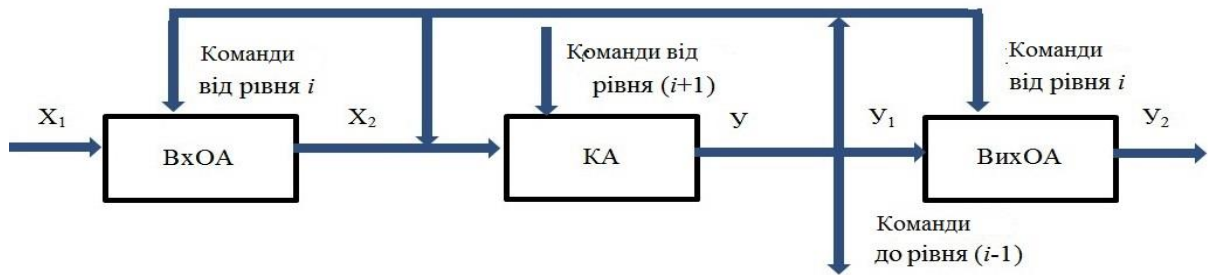


Рисунок 12. – Структура, джерела та об'єкти дії входів, команд і виходів КА i -го рівня

За алгоритмом симуляції дослідник вводить початкові дані структури автомата що досліджується. Далі за алгоритмом робиться початкова ініціалізація станів, розраховуються та документуються значення виходів, аналізуються нові входні сигнали та керування, з урахуванням яких обчислюються нові значення станів. Після цього цикл з розрахунком виходів та отриманням нових входів повторюється.

У результаті експериментів показано, що для тернарних автоматів кількість варіантів реалізованої поведінки збільшується в 16 разів, а кількість варіантів структур керованих автоматів збільшується (на прикладі в 15 разів) порівняно з бінарними некерованими автоматами. Для порівняння тернарних автоматів із бінарними автоматами були розроблені моделі бінарних автоматів з еквівалентними властивостями за допомогою програми JFLAP. На прикладі тернарного автомата кількість станів і входів зменшилась у 4 рази, що значно збільшило наочність моделі.

У **підрозділі 4.2** досліджена інтегрованість інтегрованих систем. Запропоновано використовувати керований скінченний автомат як модель типового елемента для реалізації інтегрованості систем. Структура цього типового елемента наведена на рис. 13. Вона містить входні (ВхОА), вихідні (ВихОА) операційні та керувальні (УА) автомати. Суть функціональної взаємодії у системі полягає у виборі керувальним автоматом УА2 варіанти поведінки C_1 керованого автомата УА1 з використанням інформації Y_{12} , наданої керованим автоматом через свої виходи.

У взаємодії керувального та керованого автоматів виділені такі типові цілі взаємодії: розширення / звуження функціональних можливостей керування об'єктом; розширення / звуження множини активних входів, тобто входів, які

використовуються в керуваному автоматі; мінімізація / максимізація довжини шляху в циклі керуваного автомата.

Таки цілі визначають типову поведінку в системі, яку назвемо поведінкою керування автоматом. А кількість варіантів поведінки автомата, кількість активних входів, довжина (число етапів) шляху в циклі керування є показниками рівня інтеперабельності. Для автоматизації експериментів із інтеперабельністю систем розроблено програмну реалізацію алгоритму симуляції взаємодії автоматів – середовище, у якому виконується типовий елемент інтеперабельності,

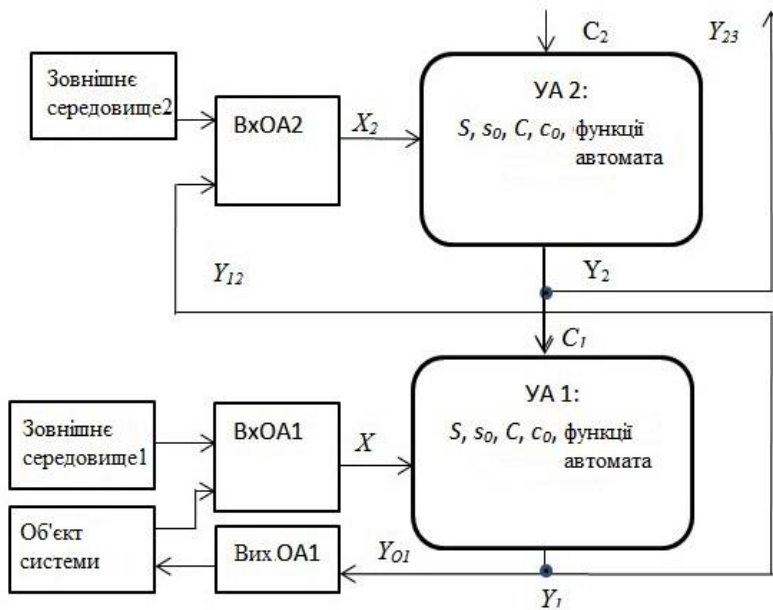


Рисунок 13 – Структура інтегрованої системи

структуру якого задає дослідник у вигляді файлів даних у текстовому форматі.

Із застосуванням розробленого алгоритму виконано моделювання 15 типів поведінки керування автоматом, яке підтвердило можливість і гнучкість функціональної взаємодії систем інтегрованої системи за допомогою запропонованого типового елемента.

У підрозділі 4.3 досліджені семантичні автомати на прикладі системи керування температурою об'єкту,

схема контурів якої наведена на рис. 14.

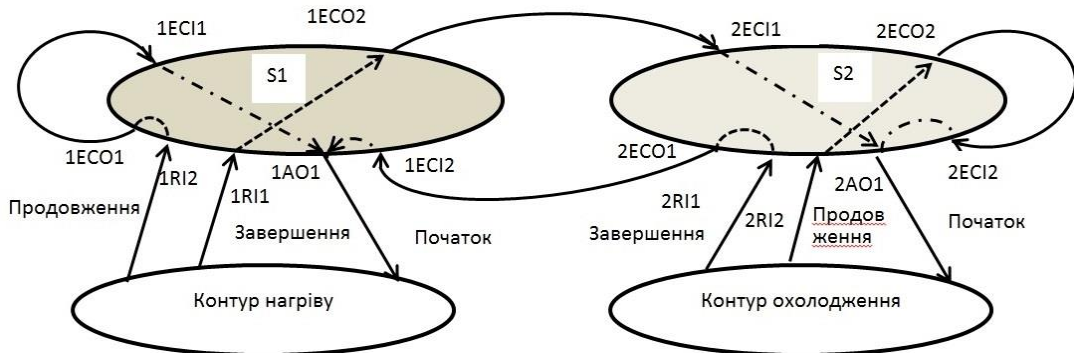


Рисунок 14 – Граф керувального автомата з узагальненими контурами діяльності та керування

Для цього розроблено базу знань про контури системи у вигляді фактів та

правил Пролог-програми версії SWI, які описують структуру причинно-наслідкових зв'язків у системі з урахуванням технічного стану її елементів. Відповіді програми на поставлені цілі містять діагностичні ознаки несправностей елементів системи, таких як об'єкт системи та операційні автомати пристрою керування. Для того щоб перевірити повноту поведінки автомата керування системою, була розроблена структура (рис. 15а) та база знань (рис. 15б) про причинно-наслідкові зв'язки у цьому автоматі, яка також реалізована як програма мовою Пролог версії SWI. Результати моделювання (рис. 15в) підтвердили повноту поведінки автомата керування системою регулювання температури. У **підрозділі 4.4** наведено висновки за розділом 4, які підтвердили ефективність запропонованих моделей елементів інтегрованих та когнітивних систем

У **розділі 5** розглянуто приклад використання запропонованих моделей інтегрованих систем при моделюванні віддалених лабораторій для дослідження цифрових об'єктів. У **підрозділі 5.1** розглянуто множину показників, пов'язаних з якістю лабораторії й ефективністю їх використання. Простір показників визначає модель тернарного відношення між параметрами фізичних та віртуальних об'єктів, можливостями лабораторії та характеристиками користувачів. Запропоновано показники, які оцінюють один елемент цих відносин щодо одного або двох інших за такими напрямками, як номенклатура, тривалість і якість експерименту. Різноманітність експериментів із моделями у віддаленій лабораторії є одним із показників її якості.

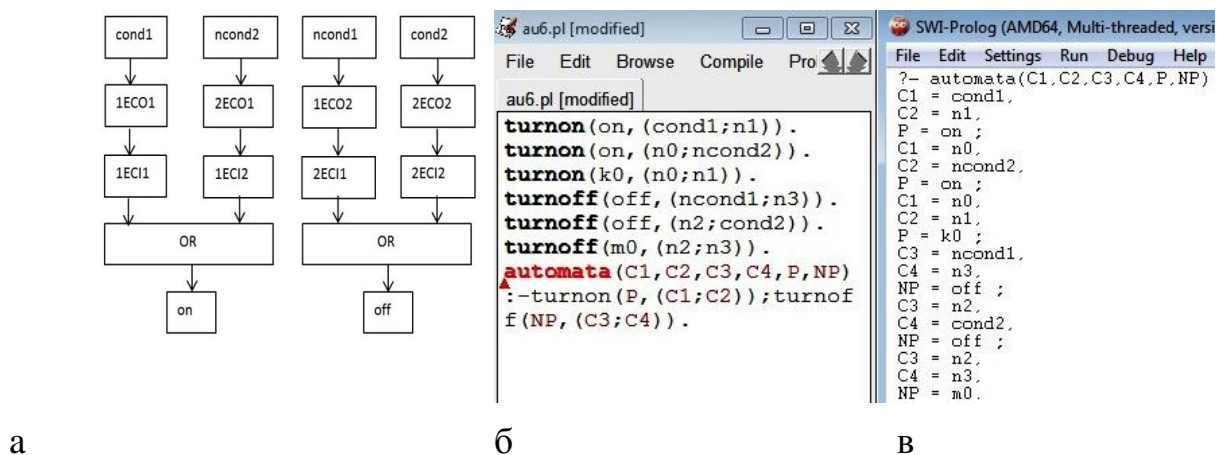


Рисунок 15 – Структура причинно-наслідкових зв'язків (а), Пролог-програма (б) та результати моделювання (в) автоматів керування

Основною умовою різноманітності експериментів із цифровими об'єктами є відмінності у застосовуваних пристроях керування (формалізм скінченного автомата, плата мікропроцесора, програмований логічний контролер, ПЛІС тощо) та структурах поведінки, що досліджується. Якщо обмежитися структурами рівня електромеханіки фізичних моделей, то кількість експериментів є невеликою.

У **підрозділі 5.2** з метою формалізації проектних рішень із розширення функціональних можливостей віддаленої лабораторії, запропонована її модель як системи інтегрованої за напрямками розширення функціональності базової

фізичної моделі об'єктів й ієрархії підсистем. З цією метою до базової системи експерименту з фізичною моделлю додано функціональність візуального експерименту, розширену функціональність кінцевого об'єкту, додаткову функціональність впливів команд користувача та зовнішніх впливів, які об'єднані у візуальні, віртуальні та функціональні підсистеми.

Структуру моделі віддаленої лабораторії, за винятком блоків, що відповідають за зв'язок із лабораторією через Інтернет і трансформують проєкт експерименту користувача в сигнали впливів на модель експерименту, наведено на рис.16. На цьому рисунку показано елементи двох типів: CO – моделі об'єктів та CU – моделі пристроїв. Ці елементи створюють такі моделі підсистем DS першого рівня:

1. Фізичного CO $DS1 = \{CO1, CU1\}$, де $CO1$ – фізична модель об'єкта експерименту, $CU1$ – пристрій взаємодії з електромеханікою фізичної моделі об'єкта. З точки зору $CU1$, об'єкт $CO1$ являє собою набір датчиків і виконавчих механізмів. Виходи датчиків O_{CO1} $CO1$ є входами I_{CU1} $CU1$, а входи I_{CO1} виконавчих механізмів з'єднані з виходами O_{CU1} . Пристрій $CU1$ обробляє інформацію I_{CU1} та теги подій команд користувача I_{CU3} і формує сигнали O_{CU1} впливів на фізичну модель $CO1$, теги датчиків і станів фізичної моделі O_{CU1} для використання іншими системами.

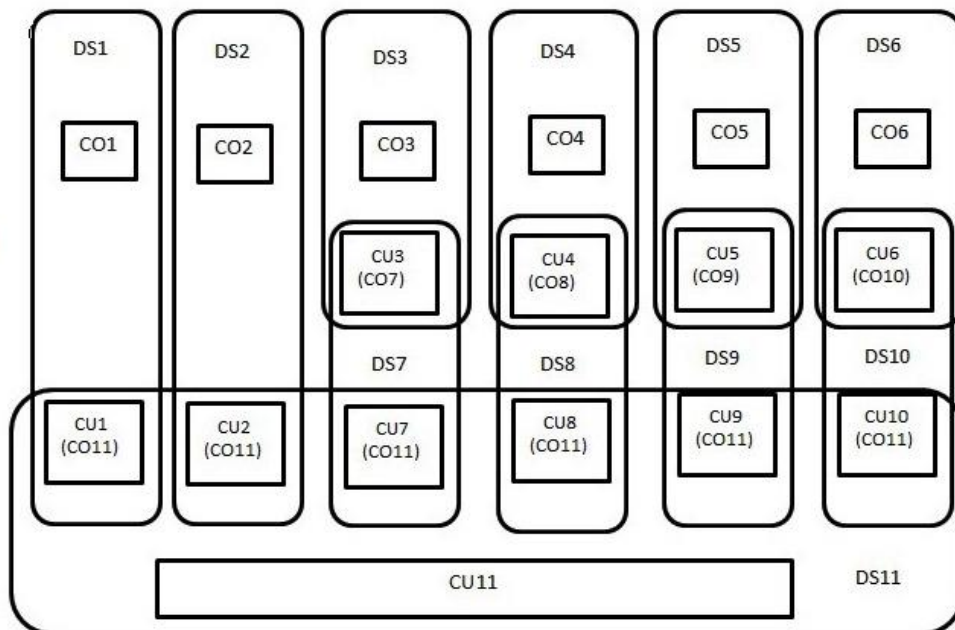


Рисунок 16 – Структурна модель віддаленої лабораторії як інтегрованої системи

2. Відеозображення CO $DS2 = \{CO2, CU2\}$, де: $CO2$ – засоби відеоспостереження; $CU2$ – пристрій керування засобами відеоспостереження. У засобах $CO2$ виділимо джерело відеозображення та пристрій зміни точки, ракурсу зйомки й освітлення, I_{CU2} – входи завдання точки, ракурсу зйомки й освітленості об'єкту, які надходять із виходів O_{CU3} системи $DS3$.

3. Візуального справного CO $DS3 = \{CO3, CU3\}$, де $CO3$ – візуальна модель

справного; $CU3$ – віртуальна модель візуального справного СО. Модель $CO3$ містить один або кілька графічних екранів, кожен з яких відповідає певному погляду на проєктовану систему. Екрани містять відеозображення фізичного СО або графічні об'єкти (ГО) та віртуальні елементи для вводу команд користувача й зображення елементів фізичної моделі об'єкта.

4. Візуального прихованого СО $DS4 = \{CO4, CU4\}$, де $CO4$ – візуальна модель прихованого СО; $CU4$ – віртуальна модель прихованого СО. За своєю структурою модель $CO4$ повторює модель $CO3$, відмінності полягають в її ГО, які відповідають прихованим елементам об'єкта, що активні в нештатних, аварійних або допоміжних режимах роботи об'єкта моделювання.

5. Візуалізація зовнішніх чинників СО $DS5 = \{CO5, CU5\}$, де $CO5$ – візуальна модель зовнішніх факторів СО; $CU5$ – віртуальна модель візуалізації зовнішніх чинників СО. Елементи моделі $CO5$ є ГО, які відображають поточні значення або динаміку зміни в часі (тренди) тегів зовнішніх факторів.

6. Візуалізація технічного стану СО $DS6 = \{CO6, CU6\}$, де $CO6$ – візуальна модель технічного стану СО; $CU6$ – віртуальна модель візуалізації технічного стану СО. Якщо за модель технічного стану прийнята автоматна модель, то елементами $CO6$ будуть ГО графа, який візуалізує поточний стан цього автомата – його вершини, дії та дуги.

На другому рівні декомпозиції віртуальні моделі систем $DS3 - DS6$ доповнюються пристроями що утворюють такі віртуальні моделі: справного СО $DS7 = \{CO7, CU7\}$; прихованого СО $DS8 = \{CO8, CU8\}$; зовнішніх чинників СО $DS9 = \{CO9, CU9\}$; технічного стану СО $DS10 = \{CO10, CU10\}$. На третьому рівні декомпозиції CU системи $DS1 - DS10$ утворюють систему визначення режиму лабораторії $DS11 = \{CO11, CU11\}$.

Більш детальні теоретико-множинні моделі враховують внутрішні та зовнішні зв'язки підсистем, множини входів і виходів елементів системи, подальшу деталізацію пристрою керування на входні, вихідні та проміжні операційні автомати, керувальні автомати, що моделюються як скінченні автомати.

На базі описаних моделей функціональної структури віддаленої лабораторії запропоновані нові напрями їх використання, наприклад, сценарії програмування поведінки об'єкта за його словесним описом, визначення структури та моделі поведінки системи через спостереження за її роботою й інші.

У **підрозділі 5.3** на базі моделей функціональної структури інтегрованої системи деталізовані поняття доданої реальності, функціональності та когнітивності.

Ці додання перетворюють електромеханічні фізичні моделі об'єктів віддалених лабораторій у кіберфізичні системи з розширеними функціональними можливостями та додатковими варіантами завдань для навчання. Так, для лабораторії GOLDi розроблено відповідні моделі диспетчеризації ліфтів, ідентифікації скінченних автоматів, спостереження портального крана за методом “автомат у чорній скриньці” й оптимізації розміщення вантажів на складі на базі відповідних електромеханічних моделей. Приклад доповненої візуальності у моделюванні ліфта в потоці заявок на обслуговування наведено на рис. 17.

При впровадженні запропонованого методу додавання в лабораторії GOLDi різноманіття експериментів збільшиться щонайменше у два рази. Відповідно, ефективність лабораторій за запропонованими показниками зросте щонайменше вдвічі. При визначенні функціональної структури віддаленої лабораторії з доданнями описані інтерфейси: фізичної, гібридної віртуальної моделі об'єкта вивчення, кінцевого користувача та відеокамери. Запропоновано метод доповнень до інтерфейсу кінцевого користувача, у якому використовуються попередньо записані відеофрагменти типових рухів фізичної моделі замість прямої трансляції з WEB-камери. При цьому досягнуто підвищення якості інтерфейсу без витрат на придбання та експлуатацію додаткових фізичних моделей.

У **підрозділі 5.4** розглянута проблема дистанційного вивчення когнітивних систем. У результаті аналізу було констатовано відсутність віддалених лабораторій когнітивних систем та обґрунтована модель функціональної структури когнітивної системи, що є перспективною для дослідження. Модель містить розглянуті в розділі 3 піраміди знань DIKUW та діяльностей.

У **підрозділі 5.5** наведено висновки за розділом 5, які розкривають корисність моделі інтегрованої системи для опису віддаленої лабораторії цифрових об'єктів та розширення на цій основі номенклатури експериментів.

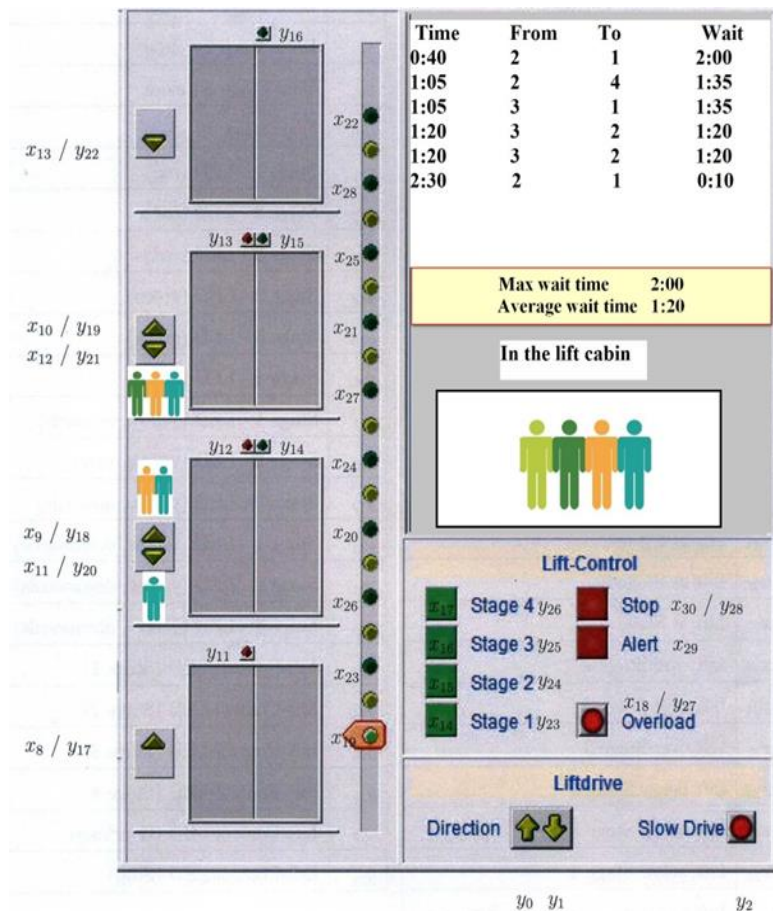


Рисунок 17. – Приклад доповненої візуальності, викликаної завданням роботи ліфта в потоці заявок на обслуговування

У **розділі 6** розглянуто використання запропонованих у попередніх розділах теоретико-множинних моделей когнітивних систем на прикладі систем безперервного планування ресурсу ізоляції обмоток потужного трансформатора. Для надання такій системі когнітивних властивостей вдосконалені існуючі математичні методи та моделі планування ресурсу ізоляції, розроблені моделі компонентів системи, принципи їх системної інтеграції та реалізації.

У **підрозділі 6.1** розглянуто математичні моделі, що пов'язують параметри процесів у трансформаторі з оцінкою залишкового ресурсу його ізоляції, такі як інтеграл

старіння, рівняння теплового балансу трансформатора. Запропонована пошарова модель розподілу температури та вологості в обмотці трансформатора, яка враховує різноспрямовану динаміку температури та вологості уздовж вертикальної осі обмотки, можливість міграції найбільш «ресурс-витратної» точки» целюлозної ізоляції обмотки і яка підвищує точність оцінки витрат ресурсу ізоляції (у прикладі на 18%).

Запропонована методика оцінювання залишкового ресурсу ізоляції силового трансформатора на основі врахування особливостей його життєвого циклу та імітаційного моделювання прогнозованих результатів впливів зовнішніх факторів на стан ізоляції. Точність прогнозування підвищена за рахунок одночасного обліку та врахування ймовірного характеру зміни чинників з різних часових діапазонів стрибків навантаження, добових, тижневих і сезонних циклів, довголітніх прогнозів навантаження та температури навколишнього середовища.

Запропонована функціональна структура системи безперервного планування ресурсу ізоляції обмоток потужного трансформатора на базі моделей когнітивної системи та її елементів, розглянутих у розділі 3. Це кортеж $\langle Si, MDB, K, C, A \rangle$, де Si – модель сигналів; MDB – модель бази даних; K, C, A – модель підсистеми пізнання, когнітивності та діяльності відповідно. У моделі Si міститься інформація про тип, напрямок передання та параметри сигналів. Модель MDB задає структуру баз даних на різних рівнях форм знань: $MDB = \{D, I, K, U, W\}$, де D – структура бази знань у формі даних; I, K, U, W – структура бази інформації, знань, розумінь і мудрості, відповідно. У цілому підсистема пізнання когнітивної системи планування зносу ізоляції обмоток трансформатора описується множиною конверторів, розглянутих у розділі 3, а конкретні приклади розглянуті далі у розділі 6. Теоретико-множинна модель підсистеми когнітивності містить моделі когнітивних здібностей: $C = \{Re, Pl, Tr, Pe\}$, де Re – міркування (reasoning); Pl – планування (planning); Tr – навчання (training); Pe – сприйняття (perception).

Предметом міркувань у когнітивній системі трансформатора є цілі її функціонування. Модель планування використовується для формування суджень щодо деяких подій у майбутньому. Вона містить моделі об'єкта системи та майбутніх зовнішніх впливів на нього. Завданням моделі навчання є формування нових знань щодо таких впливів і тенденцій у зміні технічного стану трансформатора за допомогою моделювання та нейронних мереж. Сприйняття розуміється як процес категоризації наявних у розпорядженні системи знань, тобто віднесення знань, що сприймаються, до того чи іншого класу (категорії) об'єктів. Модель блоку сприйняття включає множину вхідних доступних знань, інструменти сприйняття та множину кластерів об'єктів, що сприймаються. Модель підсистеми діяльності представлена ієрархічною структурою скінченних дискретних і гібридних автоматів. Наприклад, дискретного автомата цілей, стани якого відповідають наступним цілям: S_0 – максимально збільшити термін служби ізоляції; S_1 – збільшити термін служби ізоляції через поліпшення охолодження трансформатора, технічного обслуговування ізоляції та трансформаторної олії; S_2 – максимізувати дохід від експлуатації трансформатора; S_3 – забезпечити працездатність трансформатора за будь-яких значеннях струму навантаження,

ігноруючи підвищену витрату ресурсу ізоляції; S_4 – запобігти аварії трансформатора через пробій ізоляції. А події X визначають умови переходів від однієї цілі до іншої. Кожному стану відповідає один вихід, який активізує відповідний автомат сценарію досягнення мети.

У **підрозділі 6.2** запропоновані математичні методи та відповідні конвертори знань, що використовуються когнітивною системою для планування розходу ресурсу ізоляції та діагностування змін у технічному стані елементів когнітивної системи:

- Методи визначення параметрів цифрової фільтрації даних моніторингу параметрів трансформатора реалізовані як конвертори форм знань. Конвертор 1 типу I_12I_2 визначає частотний спектр коливань струму навантаження трансформатора на певному, наприклад, добовому інтервалі часу, які зберігаються у масиві спостережень. Конвертор 2 типу $I2K$ визначає параметри цифрового фільтра. Конвертор 3 типу I_12I_2 за допомогою цього фільтра формує масив відфільтрованих значень струмів навантаження.

- Методи обґрунтування горизонту та кореляційних параметрів короткострокового прогнозу навантаження. Прогнозування виконується за допомогою конвертора типу I_12I_2 з використанням кореляції прогнозованого значення зі значенням у аналогічний час аналогічної за статусом попередньої доби та відхилень поточної доби в певному інтервалі, що передує моменту часу, коли виконується прогнозування.

- Метод діагностування технічного стану системи охолодження за динамікою зміни теплових параметрів трансформатора. Діагностичною ознакою погіршення стану є збільшення теплового опору між трансформатором та навколишнім середовищем у певному режимі охолодження. Цій опір визначається у результаті виконання процедури ідентифікації теплових параметрів за допомогою термодинамічної моделі трансформатора та даних моніторингу його параметрів, яка являє собою конвертор типу I_12I_2 результатів вимірювань параметрів у масив значень теплового опору. Далі конвертор типу $I2K$ визначає тенденцію зміни цього опору за певний час, конвертор типу $K2U$ визначає розуміння наслідків цих тенденцій а конвертор типу $U2W$ обирає варіант мети функціонування та діяльності системи.

- Метод діагностування режиму навантаження трансформатора. Для оцінки тенденцій у зміні режимів навантаження запропоновані аналітичні показники, що визначають факт і тривалість перебування у цьому режимі та ступінь близькості до більш важкого режиму. Діагностичними ознаками погіршення режиму навантаження є факт переходу за цими показниками до більш важкого режиму, збільшення часу перебування в таких режимах і підвищення ступеня близькості до більш важкого режиму. Метод потребує конверторів типу I_12I_2 (для перетворення масивів значень параметрів моніторингу в масиви значень показників режимів навантаження), типу $I2K$ (для визначення тенденцій зміни цих показників) та типу $K2U$ (для визначення наслідків цих тенденцій).

- Метод діагностування струмів навантаження за допомогою вейвлет аналізу. Діагностичною ознакою погіршення режиму використання

трансформатора є збільшення коефіцієнтів діагностичних вейвлетів у результатах аналізу історичних трендів моніторингу параметрів трансформатора. На підставі цього робиться висновок про тенденції зміни режиму використання трансформатора та оцінюється результат впливу цих тенденцій на цілі функціонування системи, які формують керувальну подію для підсистеми діяльності. Запропоновано методіку конструювання вейвлетів для діагностування умов використання трансформатора. Форма такого вейвлета обирається через моделювання теплових процесів у трансформаторі. Вона є подібною до форми струму навантаження, при якому досягаються максимальні параметри критичного теплового процесу у трансформаторі.

У **підрозділі 6.3** розглянуто моделі елементів підсистем діяльності та когнітивності системи планування витрати ресурсу ізоляції. Так, у контурі охолодження запропоновано використовувати модель операційного автомата з функціями нечіткого регулятора із вхідними параметрами, що прогнозують зміну істотних для охолодження параметрів температури середовища та струму навантаження. Це дозволило реалізувати принцип випереджального реагування, скоротити час реакції на різкі відхилення у вхідних параметрах і зменшити витрату ресурсу ізоляції трансформатора на 7–9%.

Запропоновані також аналітичні показники технічної та економічної ефективності охолодження трансформатора та регулятори охолодження трансформатора зі зворотним зв'язком за цими показниками. Ці показники розраховуються конверторами типу I2K і увідповіднюють ефект зменшення витрат ресурсу ізоляції від роботи системи охолодження з часом її роботи, витратами енергії, вартістю зекономлених та витрачених ресурсів системи. Це дозволяє зменшити сумарні витрати на експлуатацію системи за рахунок оптимізації часу охолодження.

Визначено інформаційний базис, запропоновані структура та моделі автомата опису динаміки станів трансформатора з використанням UML діаграм станів. Активність станів цього автомата є знаннями, які визначають тенденції зміни станів трансформатора та дії системи, направлені на їх корекцію.

У **підрозділі 6.4** запропоновано методи реалізації елементів когнітивної системи, які функціонують у різних середовищах, зокрема запропоновані методи реалізації адаптивних керувальних та операційних автоматів підсистеми діяльності когнітивної системи трансформатора в програмному середовищі промислових контролерів та додатку людино-машинного інтерфейсу, а саме:

- Методи програмування скінченних автоматів Мура та Мілі мовою Ladder Diagram у середовищі промислових контролерів за принципами «усі вхідні» та «усі вихідні», що скорочує час програмування (на прикладах на 30-50 %).

- Методи використання засобів ММІ пропонують отримання зовнішньої інформації у вигляді значень потоку тегів приладів та команд оператора; реалізацію функцій операційних автоматів через обчислювання логічних і арифметичних виразів, виконання системних команд та скриптів; побудову керувальних автоматів через прив'язку дій до подій; реалізацію автоматної поведінки системи через заміну засобами системи файлів, що описують поведінку

системи. Все це скорочує час розроблення розміщеної у середовищі ММІ підсистеми керування (на прикладі на 20-30 %).

– Метод автоматизованого перенесення керувальних автоматів із середовища Simulink у додаток ММІ, що зменшує час перенесення автомата (на прикладі на 15%).

– Метод використання тернарної логіки для діагностування знань у когнітивній системі, що на прикладі операційного автомата діагностування даних моніторингу дозволило визначити несумісності комплекси даних, які надходять із системи пізнання.

У **підрозділі 6.5** описано приклади використання запропонованих методів та моделей структур інтегрованих та когнітивних систем у навчальному процесі підготовки магістрів у Національному університеті «Запорізька політехніка».

У **підрозділі 6.6** зроблено висновки за розділом 6 щодо ефективності математичного опису системи планування ресурсу потужного трансформатора за допомогою запропонованої моделі структури когнітивної системи.

ВИСНОВКИ

Дисертація є завершеною науково-дослідницькою роботою, в якій дано рішення актуальної наукової проблеми розроблення математичних моделей функціональних структур інтегрованих і когнітивних систем.

Основні наукові та практичні результати роботи зводяться до наступного:

1. Аналіз функціональних структур сучасних систем висвітлив існування класу систем, загальні властивості яких полягають у тому, що вони мають ієрархічну структуру, містять декілька підсистем, які мають спільні елементи, що виконують різні функції в різних підсистемах. Для опису таких систем використано термін «інтегровані системи». Визначені проблеми відомих математичних моделей інтегрованих систем зумовлені недостатньою інтегрованістю підсистем, недосконалістю їх елементів. Розглянуто також клас ієрархічних систем, які використовують у процесі функціонування різні форми знань та мають когнітивні властивості. Для опису таких систем введено термін «когнітивні системи», визначена відсутність моделей їх типової структури.

2. Запропоновані теоретико-множинні моделі інтегрованих систем, що визначають типовий склад та функції автоматів, контурів безперервного, гібридного керування та керування за подіями, керовані автомати, як типові елементи взаємодії підсистем, способи інтеграції елементів у ієрархічні структури та створення підсистем. Моделі інтегрованих систем базуються на принципі однорідності знань про систему, що дозволяє збільшити прибуток від експлуатації кінцевого об'єкта. Запропоновані визначення термінів «інтегрована система», «технологічна поведінка автомата», «поведінка керування підлеглим автоматом». Для дослідження запропонованих моделей розроблена програмна реалізація алгоритмів симуляції взаємодії систем. Дослідження підтвердило можливість і гнучкість функціональної взаємодії систем інтегрованої системи за допомогою запропонованого типового елемента, реалізації алгоритмів

керування з послідовним збільшенням (на прикладі 15 варіантів) функціональних можливостей, зменшенням довжини шляху (на прикладі зменшення на 25 відсотків) у циклі, зменшенням / збільшенням кількості використовуваних входів (на прикладі від 3 до 8) керованого автомата.

3. З метою моделювання більш складної поведінки системи запропоновано нове визначення керувального автомата у якому, крім відомих множин входів, виходів, станів, є множина керувань автоматом, початкове керування та множина функцій станів. Остання множина містить функції активації, виходів і структури переходів зі стану. Крім того, до опису скінченного автомата введено значення елементів множин що утворюють автомат. Запропоновано збільшити арність значень елементів множин автомата. Введення небінарності значень цих елементів та функції структури переходів дозволило збільшити кількість варіантів поведінки автомата, виконати його параметричну та структурну адаптацію, змістити логіку перероблення інформації на рівень стану, використовувати в одному автоматі різні схеми перероблення вхідної інформації. Показано, що для тернарних автоматів кількість варіантів реалізованої поведінки збільшена у 16 разів, а кількість варіантів структур керованих автоматів на прикладі – у 15 разів порівняно з бінарними автоматами. Дослідження ефективності проведено за допомогою розробленої програмної реалізації алгоритмів імітації поведінки автоматів. У результаті моделювання тернарних автоматів у режимах керування структурою, активності попереднього та наступного стану отримано на прикладі тернарного керованого автомата 15 варіантів його структур. Для порівняння властивостей тернарних і бінарних автоматів були розроблені за допомогою програми JFLAP моделі бінарних автоматів з еквівалентними властивостями. На прикладі тернарного автомата кількість станів і входів зменшилась у 4 рази, що значно збільшило наочність моделі.

4. З метою розширення бази знань, які використовуються в процесі функціонування системи, запропоновано семантичну модель скінченного автомата, що описує причинно-наслідкові відносини в ньому у формі висловів, які пов'язують назви елементів автомата та логіку оброблення знань у контурах керування та діяльності, які містять елементи керувального та операційних автоматів і об'єкт системи. Запропонована модель причинно-наслідкових відносин у станах скінченного автомата, та класифікація за характером цих відносин, станів автомата на комутаційні, комбінаційні та автоматні стани. Це дозволило моделювати більш складну поведінку станів у системі, наприклад, різні логіки взаємозв'язку входів та виходів у станах, ієрархію семантичних автоматів. База знань системи розширена через уведення в предикати причинно-наслідкових відносин елементів системи аргументів, пов'язаних з метою дослідження об'єкта системи. На прикладі дослідження працездатності системи за допомогою бази знань Пролог-програми отримані діагностичні ознаки несправностей елементів системи та підтверджена функціональна повнота керувального автомата.

5. Запропоновані теоретико-множинні моделі типової функціональної структури когнітивної системи, у яких відображені коренеподібний характер

структури системи зі збільшенням кількості підсистем на нижчих рівнях, вкладеність та інтегрованість підсистем на різних рівнях моделювання, структура знань у вигляді піраміди форм знань DIKUW, принцип однорідності знань у когнітивній системі, основні процеси в підсистемах пізнання та когнітивності, методи побудови типових конверторів форм знань, підсистема діяльності у вигляді ієрархії скінченних автоматів цілей, сценаріїв, поведінки, а також параметри та способи вибору комплексу цілей функціонування системи та формування керувальних впливів на об'єкт системи. Використання запропонованої структури когнітивної системи дозволяє будувати такі системи з уніфікованих елементів та зменшити на цій основі терміни їх створення.

6. Удосконалено методи моделювання процесів у когнітивній системі на основі динамічного визначення комплексу цілей її функціонування, які запропоновано пов'язати зі станами автомата цілей. При цьому перехід до іншого стану формується через обрання стратегії роботи з цілями, їх оцінювання за пропонуваним комплексом показників, що дозволяє типізувати функціональну структуру підсистеми визначення цілей функціонування системи та зменшити на цій основі трудомісткість створення її моделі. Запропоновано модель та формалізм автоматного комплексу підсистеми діяльності когнітивної системи, яка описує його як ієрархічну коренеподібну структуру скінченних автоматів цілей, сценаріїв, поведінки та операцій, керованих за допомогою деякої множини команд. Керувальний автомат розглядається при цьому як приймач команд від вищого автомата в ієрархії, джерело команд для конфігурування себе через свої входи, конфігурування операційних автоматів свого рівня, генерації команд до підлеглих автоматів та інші, що збільшує можливості моделювання процесів адаптації в системі. Формалізм містить на кожному рівні шини для врахування пріоритету сигналів від джерел і множину автоматів із входами та виходами керування, що дозволяє запобігти конфліктам за керувальними сигналами при використанні динамічного комплексу цілей та зменшити на цій основі трудомісткість створення моделі підсистеми діяльності.

7. Запропоновані математичні описи функціональної структури інтегрованих і когнітивних систем упроваджено та досліджено на прикладах віддалених лабораторій для вивчення цифрових об'єктів, систем планування ресурсу складного технічного об'єкта (на прикладі потужного трансформатора) та впроваджено у навчальний процес підготовки магістрів у Національному університеті «Запорізька політехніка». Це дозволило перетворити наявні електромеханічні фізичні моделі об'єктів досліджень віддалених лабораторій у кіберфізичні системи, реалізувати на цій основі нові види навчально-проектних експериментів у віддалених лабораторіях RELDES, GOLDi, наявних у Національному університеті «Запорізька політехніка» та Технічному університеті Ільменау (Німеччина) і збільшити різноманіття експериментів (на 20–100%). Запропоновані моделі впроваджено в рамках дослідної експлуатації, у виробництві ТОВ «Енергоавтоматизація» (м. Запоріжжя) систем неперервного контролю (моніторингу) автотрансформаторів для ПС 500 кВ «Нура» (Казахстан). При цьому внаслідок розширення бази знань підвищена

точність прогнозування ресурсу ізоляції обмоток до 15%, скорочено час синтезу функціональної структури системи на 20%. Використання у системі охолодження трансформатора запропонованого нечіткого регулятора що ураховує прогнози динаміки зовнішніх факторів дозволяє на 7—9% зменшити витрату ресурсу ізоляції обмоток.

ОСНОВНІ ПОЛОЖЕННЯ І РЕЗУЛЬТАТИ ДИСЕРТАЦІЇ ОПУБЛІКОВАНІ В ТАКИХ РОБОТАХ

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Поляков, М. О. Системи керування електричними машинами та апаратами / М. О. Поляков, Т. Ю. Ларіонова // Віддалений та віртуальний інструментарій в інжинірингу : монографія / за заг. ред. К. Хенке – Запоріжжя, 2015. – С. 87–153. ISBN 978-966-2752-74-8.

2. Poliakov, M. The Augmented Functionality of the Physical Models of Objects of Study for Remote Laboratories / M. Poliakov, K. Henke, H.-D. Wuttke // Online Engineering & Internet of Things. Lecture Notes in Networks and Systems. / ed. M. Auer, D. Zutin. – New York: Springer, 2018. – Vol. 22. – P. 151–159. ISSN: 2367-3370 (МНБ *WoS*, *Scopus*).

3. Poliakov, M. Prospects for Constructing Remote Laboratories to Study Cognitive IoT Systems / M. Poliakov, K. Henke, H.-D. Wuttke // Dependable IoT for Human and Industry: Modeling, Architecting, Implementation/ River Publishers Series in Information Science and Technology / ed. V. Kharchenko, A. L. Kor, A. Rucinski. – Denmark, Gistrup: River Publishers, 2018. – P. 503–514. ISBN: 9788770220149. (МНБ *WoS*, *Scopus*).

4. Poliakov, M. Quality and efficiency indicators of remote laboratories / M. Poliakov, K. Henke, H.-D. Wuttke // Cyber-physical Systems and Digital Twins /ed. M. E. Auer et al. – New York: Springer International Publishing, 2020. – LNNS 80. – P. 143–154. Series ISSN: 2367-3370 (*МНБ Scopus*).

5. Hybrid Models of Studied Objects Using Remote Laboratories for Teaching Design of Control Systems / [M. Poliakov, T. Larionova, G. Tabunshchyk et al.] // International Journal of Online Engineering (IJOE). – 2016. – Vol. 9. –P. 7–13. eISSN: 2626-8493 (*МНБ WoS*, *Scopus*).

6. Poliakov, M. Developing Students' Skill to Identify Properties of Cognitive Control Systems / M. Poliakov, С. Morshchavka, О. Lozovenko // International Journal of Engineering Pedagogy. – 2018. – Vol. 8. – No. 4. – P. 4–15. eISSN: 2192-4880 (*МНБ WoS*, *Scopus*).

7. Поляков, М. А. Теоретико-множественные модели функциональных структур когнитивного управления / М. А. Поляков // Системні технології : регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпро, 2017. – № 3 (110). – С. 16–23. ISSN: 1562-9945.

8. Поляков, М. А. Когнитивные системы управления: структуры и модели / М. А. Поляков // Електротехнічні та комп'ютерні системи. – 2017. –№ 25 (101). – С. 387–393. ISSN: 2221-3805.

9. Поляков, М. А. Когнитивное управление на основе динамического комплекса целей: структуры и модели / М. А. Поляков // *Електротехнічні та комп'ютерні системи*. – 2018. – № 28 (104). – С. 127–133. ISSN: 2221-3805.
10. Поляков, М. А. Теоретико-множественные модели функциональных структур гибридных автоматов систем управления / М. А. Поляков, И. А. Андрияс // *Системні технології*. – 2018. – № 3 (116). – С. 146–152. ISSN: 1562-9945.
11. Поляков, М. А. Когнитивное управление жизненным циклом изоляции обмоток маслонаполненного силового трансформатора / М. А. Поляков, И. А. Андрияс, С. П. Конограй, В. В. Василевский // *Вісник Національного технічного університету «ХПІ»*. Серія: "Електричні машини та електромеханічне перетворення енергії". – 2018. – № 5 (1281). – С. 90–96. ISSN: 2409-9295.
12. Поляков, М. А. Конечные автоматы с небинарными элементами множеств / М. А. Поляков, И. А. Андрияс // *Системні технології : регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – 2019. – № 2 (121). – С. 85–94. ISSN: 1562-9945.
13. Poliakov, M. Control System Control Unit FSM Semantic Models / M. Poliakov, S. Subbotin, I. Andrias // *Системні технології : регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – Дніпро, 2019. – № 5 (124). – С. 43 – 53. ISSN: 1562-9945.
14. Поляков, М. А. Конструирование и выбор вейвлетов для анализа тепловых процессов в силовом трансформаторе / М. А. Поляков // *Технічна електродинаміка*. – 2012. – № 3. – С. 119–120. ISSN: 1607-7970 (МНБ *Scopus*).
15. Polyakov, M. A. Prediction of wearing out of power transformer winding insulation / M. A. Polyakov, V. V. Vasilevskij // *Технічна електродинаміка*. – 2014. – № 5. – С. 65–67. ISSN: 1607-7970 (МНБ *Scopus*).
16. Поляков, М. А. Оценка остаточного ресурса изоляции на основе учета индивидуальных особенностей жизненного цикла силового трансформаторе / М. А. Поляков, В. В. Василевский // *Електротехніка і Електромеханіка*. 2014. – №3. – С38–41. ISSN: 2074-272X.
17. Poliakov, M. O. Interoperability of Integrated Hierarchical Systems / M. O. Poliakov, S. O. Subbotin, O. M. Poliakov // *Системні технології : регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – 2021. – Вип. 2 (133). – С. 68–78. ISSN: 1562-9945.
18. Поляков, М. А. Транслятор параметров модели конечного автомата из среды Матлаб в приложение человеко-машинного интерфейса / М. А. Поляков, А. П. Агибалов // *Радіоелектроніка, інформатика, управління*. – 2011. – № 2. – С. 34–37. ISSN: 1607-3274.
19. Поляков, М. А. Теоретико-множественная модель интегрированной контроллерной системы управления / М. А. Поляков // *Системні технології : регіональний міжвузівський збірник наукових праць*. – Дніпропетровськ, 2009. – № 4 (63). – С. 130–137. ISSN: 1562-9945.
20. Поляков, М. А. Теоретико-множественные модели элементов и структур интегрированных контроллерных систем управления / М. А. Поляков //

Системні технології: регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Дніпропетровськ, 2012. – № 2 (79). – С. 75—81. ISSN: 1562-9945.

21. Поляков, М. А. UML – модели сложных электрических аппаратов / М. А. Поляков, Т. Ю. Ларионова // Вісник Кременчуцького державного університету імені Михайла Остроградського. – 2010. – Вип. 3 (62). – Ч. 1. – С. 85–88. ISSN: 1995–0519.

22. Поляков, М. А. Модели систем и системные характеристики сложных электрических аппаратов. / М. А. Поляков, Т. Ю. Ларионова // Електротехніка та Електромеханіка. – 2010. – № 3. – С. 30–33. ISSN: 2074-272X.

23. Поляков, М. А. Логическое управление объектами электрических систем в среде приложения человеко-машинного интерфейса / М. А. Поляков // Наукові праці Донецького національного технічного університету. Серія: “Електротехніка і енергетика”. – 2009. – Вип. 9 (158). – С. 197–201. ISSN: 2074-2630.

24. Поляков, М. А. Идентификация тепловых параметров силового масляного трансформатора по данным мониторинга параметров / М. А. Поляков // Вісн. Східноукр. нац. ун-ту. – 2007. – № 11. – Ч. 1 (117). – С. 167 -173. ISSN: 1998-7927.

25. Поляков, М. А. Методы и информационные технологии обработки данных мониторинга параметров силового трансформатора // М. А. Поляков, С. И. Климов // Вісник національного університету «Львівська політехніка». – Львів, 2009. – № 637. – С. 70–74. ISSN: 2706-9982.

26. Поляков, М. А. Нечеткий регулятор охлаждения силового масляного трансформатора на основе прогноза изменения возмущающих факторов / М. А. Поляков // Електротехніка і електромеханіка. – 2007. – № 3. – С. 47–50. ISSN: 2074-272X.

27. Поляков, М. А. Опыт обучения контроллерным системам управления в учебно-научной лаборатории АСУ ТП Запорожского технического университета / М. А. Поляков, А. Н. Рассальский // Вісник національного технічного університету “ХПІ”. Проблеми удосконалення електричних машин і апаратів. Теорія і практика : темат. вип. – Харків, 2001. – Вип. 16. – С. 141. ISSN: 2079-3944.

28. Поляков, М. А. Определение и использование показателя режима нагрузки силового трансформатора в системе мониторинга и управления трансформатором / М. А. Поляков // Електротехніка і Електромеханіка. – 2009. – № 2. – С. 51–54. ISSN: 2074-272X.

29. Поляков, М. А. Управление охлаждением силового масляного трансформатора по критерию эффективности / М. А. Поляков // Електротехніка і електромеханіка. – 2008. – № 3. – С. 45–47. ISSN: 2074-272X.

30. Поляков, М. А. От мониторинга параметров – к мониторингу состояний силового трансформатора / М. А. Поляков // Електротехніка і Електромеханіка. – 2011. – № 1. – С. 49–52. ISSN: 2074-272X.

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

31. Remote laboratory for teaching of control systems design as an integrated system / [M. Poliakov, T. Larionova, G. Tabunshchyk et al.] // International Conference on Remote Engineering and Virtual Instrumentation, REV2016, Madrid, Spain, February 24-26, 2016. – P. 339–346 (МНБ *Scopus*, *WoS*).

32. Automated testing of physical models in remote laboratories by control event streams / M. Poliakov, T. Larionova, H.-D. Wuttke, K. Henke // IMCL 2016 : International Conference on Interactive Mobile Communication, Technologies and Learning, 17–19 October 2016, San Diego, CA, USA. – P. 10–13 (МНБ *Scopus*, *WoS*).

33. Poliakov, M. Prospects for Constructing Remote Laboratories for the Study of Cognitive Systems / M. Poliakov, K. Henke, H.-D. Wuttke // Proceedings of the 9 th IEEE International Conference on Intelligent Data Acquisition and Advanced Computing Systems : Technology and Applications, 21-23 September, 2017. – Bucharest, 2017. – P. 965–968 (МНБ *Scopus*, *WoS*).

34. Poliakov, M. FSM in the Black Box for the Remote Lab / M. Poliakov, K. Henke, H.-D. Wuttke // EDUNINE 2018 : Proceedings of the IEEE World Engineering Education Conference, Buenos Aires, from March, 11– 14, 2018. – P. 186–190. (МНБ *Scopus*, *WoS*).

35. Poliakov, M. Set-theoretical FSM Models Activity Subsystem for Cognitive Control Systems / M. Poliakov, S. Subbotin, O. Poliakov // CADSM 2019: IEEE 15th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems, Polyana, 26 Feb. – 2 March. 2019. – P. 1–4 (МНБ *Scopus*, *WoS*).

36. Poliakov, M. Implementing Automaton Behavior with Fuzzy Controllers [Electronic resource] / M. Poliakov // CMIS-2019 : Proceedings of the Second International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems. Zaporizhzhia, April 15–19, 2019. – P. 183–192. – CEUR Workshop Proceedings 2353, CEUR-WS.org 2019. (МНБ *Scopus*).

37. Poliakov, M. Remote laboratories for engineering education: status and prospects / M. Poliakov, I. Rida // ASET 2020 : Proceeding of Advances in Science & Engineering Technology multi-conferences, art. no. 9118221, April 09, 2020. – Dubai, 2020. – P. 1–6 (МНБ *Scopus*).

38. Поляков, М. А. Семантика состояний автоматов систем логического управления / М. А. Поляков // Дні науки – 2008 : зб. тез доповідей : в 3 т. Т.2. / Класичний приватний університет, Запоріжжя, 23–24 жовтня 2008. – Запоріжжя, 2008. – С. 200–201.

39. Поляков, М. А. Реализация автоматного поведения в приложении визуализации контроллерной системы управления / М. А. Поляков // Автоматизація : проблеми, ідеї, рішення : матеріали міжнародн. наук.–технічн. конф., Севастополь, 8–12 вересня 2008 р. / [редкол. : В. Я. Копп та ін.]. – Севастополь : СевНТУ, 2008. – С. 239–240.

40. Поляков, М. А. Операционные автоматы управляющих программ контроллерной системы управления / М. А. Поляков // «Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення» : матеріали междунар. науч. техн. конф. Севастополь, 7–12 вересня 2009 р. / [редкол.: В. Я. Копп та ін.]. – Севастополь : СевНТУ, 2009. – С. 284–285.

41. Поляков, М. А. Применение принципов фон Неймана в архитектуре информационно–управляющих систем / М. А. Поляков // Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення: матеріали міжнар. наук. - техн. конф.: Севастополь, 9–13 вересня 2013 р. / М-во освіти і науки України; Севастоп. нац. техн. ун-т; наук. ред. В. Я. Копп. – Севастополь : СевНТУ, 2013. – С. 198–200.

42. Поляков, М. А. Комплекс математических моделей функциональных элементов и структур интегрированных и когнитивных систем / М. А. Поляков // Материалы международной научно-технической конференции «Информационные технологии в металлургии и машиностроении» имени профессора Михалева А. И. (НМетАУ, 17–19 марта 2020 року). – Днепр, 2020. – С. 228–233.

43. Поляков, М. А. Модели состояний конечного автомата для его семантической модели / М. А. Поляков, А. М. Поляков // Сучасні проблеми і досягнення в галузі радіотехніки, телекомунікацій та інформаційних технологій : тези доповідей X Міжнародної науково-практичної конференції, 07–09 жовтня 2020 р., м. Запоріжжя. – Запоріжжя : НУ "Запорізька політехніка", 2020. – С. 86–87.

44. Poliakov, M. Layered Model of the Consumption of the Insulation Resource of the Windings of a Power Oil-Immersed Transformer / M. Poliakov, V. Vasilevskij, P. Andrienko // 2020 IEEE Problems of Automated Electrodrive. Theory and Practice (PAEP). – 2020. – P. 1–4 (МНБ *Scopus*).

45. Poliakov, M. Performance indicators of models of non-binary control automates / M. Poliakov, S. Subbotin, O. Poliakov // Proceeding of 2021 IEEE 16th International Conference on the Experience of Designing and Application of CAD Systems (CADSM) (22–26 February, 2021, Lviv, Ukraine). – P. 38–42 (МНБ *Scopus*).

46. Поляков, М. А. Представление знаний в конечных автоматах систем управления. Інформаційні технології в металургії та машинобудуванні / М. А. Поляков // ІТММ'2021 : тези доповідей міжнародної науково-практичної конференції (Дніпро, 16–18 березня 2021 р.) / Міністерство освіти і науки України, Національна металургійна академія України, Дніпропетровський національний університет імені О. Гончара, Дніпропетровський національний університет залізничного транспорту імені академіка В. Лазаряна та ін. – Дніпро: НМетАУ, 2021. – С. 181–184.

47. Poliakov, M. The contour of causality in control automata of systems [Electronic resource] / M. Poliakov, S. Subbotin, O. Poliakov // Proceedings of the Fourth International Workshop on Computer Modeling and Intelligent Systems (CMIS-2021). Zaporizhzhia, April 27, 2021 / ed.: S. Subbotin – Aachen : CEUR-WS, 2021. – P. 368–378. (МНБ *Scopus*).

Наукові праці, які додатково відображають наукові результати дисертації:

48. Poliakov, M. O. Reproducing of the humidity curve of power transformers oil using adaptive neuro-fuzzy systems / M. O. Poliakov, V. V. Vasilevskij // Electrical Engineering & Electromechanics. – 2021. – No. 1. – P. 10–14. ISSN: 2074-272X (МНБ *WoS*).

АНОТАЦІЯ

Поляков М.О. **Теоретико-множинні моделі функціональних структур інтегрованих і когнітивних систем.** — Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису. Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 01.05.02 — «Математичне моделювання та обчислювальні методи». — Національний університет «Запорізька політехніка», Запоріжжя, 2021, Національна металургійна академія України, Дніпро, 2021.

Дисертаційна робота висвітлює актуальну науково-технічну проблему вдосконалення моделей структур систем технічного призначення. Аналіз висвітлив недостатні інтероперабельність їх підсистем, уніфікованість структур, наочність відомих математичних описів функціональних структур інтегрованих та когнітивних систем унаслідок підвищення складності об'єктів систем та вимог до якості їх функціонування.

Запропоновано теоретико-множинні моделі функціональних структур інтегрованих систем, що описують їх як ієрархічну структуру, деякі підсистеми якої взаємодіють через спільні елементи. Розроблено нові моделі елементів системи — небінарних, семантичних і гібридних скінченних автоматів, що дозволило збільшити рівень узагальнення моделі відносно операцій процесів діяльності системи, розширити базу знань для прийняття керувального рішення та скоротити час створення моделі.

Запропоновано теоретико-множинні моделі типових функціональних структур когнітивних систем на базі пірамід форм знань та діяльності, що дозволяє будувати моделі систем різного призначення з уніфікованих елементів та зменшити на цій основі терміни їх створення. Визначені властивості конверторів форм знань, структура рівнів керування системи, параметри та методика динамічного визначення цілей функціонування системи, сформульовано принцип однорідності знань у когнітивній системі. Запропоновано формалізм автоматного комплексу підсистеми діяльності, який врахує пріоритети сигналів на входах її автоматів.

З використанням запропонованих моделей інтегрованих систем була промодельована система віддаленої лабораторії цифрових систем. На теоретико-множинному рівні вона подана як трирівнева структура візуальних, віртуальних і керувальних підсистем, які розроблені з використанням запропонованих методів формування добавленої функціональності й інтерфейсу для сприйняття експерименту, що дозволило перетворити фізичну модель кінцевого об'єкта в кіберфізичну зі збільшеним різноманіттям експериментів на існуючій базі фізичних моделей.

На прикладі силового трансформатора розроблені теоретико-множинні моделі функціональної структури й елементів когнітивної системи визначення ресурсу складного технічного об'єкта. Це дозволило розширити функціональні можливості системи щодо прогнозування збільшення терміну використання технічного об'єкту, підвищити на цій основі точність прогнозування та зменшити

витрати на створення системи за рахунок використання типової структури систем і елементів.

Ключові слова: теоретико-множинна модель, інтегрована та когнітивна система, операційний і керувальний автомат, небінарна та семантична модель скінченного автомата, піраміди форм знань і діяльності, конвертори знань, формалізм підсистеми діяльності, модель віддаленої лабораторії, додана функціональність, моделі когнітивної системи планування ресурсу целюлозної ізоляції потужного трансформатора.

THE SUMMARY

Poliakov M.O. Set-theoretic models of functional structures of integrated and cognitive systems – Qualification scientific work as a manuscript.

Thesis for scientific degree of Doctor of Technical Science on specialty 01.05.02 — "Mathematical modeling and computational methods" — "Zaporizhzhia Polytechnic" National University, Zaporizhzhia, 2021, National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2021.

The dissertation work is devoted to the actual scientific and technical problem of improving models of functional structures of systems for technical purposes. The analysis highlighted the insufficient interoperability of the models of their subsystems, the typification of the structures and the visibility of the known mathematical descriptions of the functional structures of integrated and cognitive systems due to the increase in the complexity of the objects of the systems and the requirements for the quality of their functioning.

The set-theoretic models of functional structures of integrated systems are proposed, describing them as a hierarchical structure, some subsystems of which interact through common elements. New models of system elements – non-binary, semantic and hybrid finite state machines – were developed, which made it possible to increase the level of generalization of the model in relation to the operations of the processes of the system's activity, expand the knowledge base for making a control decision and reduce the time for creating a model.

The set-theoretic models of typical functional structures of cognitive systems based on the pyramids of forms of knowledge and activity are proposed, which makes it possible to build models of systems for various purposes from unified elements and, on this basis, reduce the time of their creation. The properties of converters of forms of knowledge, the structure of the control levels of the system, parameters and methods of dynamic determination of the goals of the functioning of the system are determined; the principle of homogeneity of knowledge in the cognitive system is formulated. The formalism of the automaton complex of the activity subsystem is proposed, which takes into account the priorities of signals at the inputs of its automata.

Using the proposed models of integrated systems, the system of a remote laboratory of digital systems was simulated. At the set-theoretical level, it is presented as a three-level structure of visual, virtual and control subsystems, which are developed using the proposed methods for the formation of added functionality and an interface for the perception of an experiment, which made it possible to transform the physical model

of the research object into a cyber-physical one and, on this basis, to increase the variety of experiments on the existing one base of physical models.

On the example of a power transformer, set-theoretic models of the functional structure and elements of the cognitive system for determining the resource of a complex technical object have been developed. This made it possible to expand the functionality of the system with respect to predicting an increase in the term of use of a technical object, to increase the accuracy of forecasting on this basis, and also to reduce the cost of creating a system by using a typical structure of systems and elements.

Keywords: set-theoretic model, integrated and cognitive system, operating and control automata, notbinary and semantic finite state machine models, pyramids of knowledge and activity forms, knowledge converters, activity subsystem formalism, remote laboratory model, added functionality, cognitive system model for power transformer resource planning.