

Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет радіоелектроніки

КАЧУР СВІТЛАНА ОЛЕКСАНДРІВНА

УДК 621.039.515:532.5

**АВТОМАТИЗАЦІЯ ПРОЦЕСІВ КЕРУВАННЯ РЕАКТОРНИМИ
УСТАНОВКАМИ НА ОСНОВІ МЕРЕЖ ПЕТРІ**

05.13.07 – автоматизація процесів керування

Автореферат дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Харків – 2013

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана в Севастопольському національному університеті ядерної енергії та промисловості Міністерства енергетики і вугільної промисловості України.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор,
заслужений діяч науки та техніки
Копп Вадим Якович,
Севастопольський національний університет ядерної енергії
та промисловості, професор кафедри автоматизації
технологічних процесів і виробництв

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, професор
Михальов Олександр Ілліч,
Національна металургійна академія України,
МОН України, завідувач кафедри
інформаційних технологій та систем, м. Дніпропетровськ

доктор технічних наук, професор
Корсун Валерій Іванович,
ДВНЗ «Національний гірничий університет»,
МОН України, завідувач кафедри
метрології та інформаційно-вимірювальних технологій,
м. Дніпропетровськ

доктор технічних наук, доцент
Купін Андрій Іванович
ДВНЗ «Криворізький національний університет»,
МОН України, декан факультету
інформаційних технологій, завідувач кафедри
комп'ютерних систем та мереж, м. Кривий Ріг

Захист дисертації відбудеться " 18 " грудня 2013 р. о 14⁰⁰ годині
на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 64.052.08 Харківського національного
університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14

З дисертацією можна ознайомитись в бібліотеці Харківського національного
університету радіоелектроніки за адресою: 61166, м. Харків, пр. Леніна, 14

Автореферат розісланий " 14 " листопада 2013 р.

Учений секретар

І.П. Плїсс

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Безпека атомних електричних станцій (АЕС) є наріжним каменем розвитку атомної енергетики. Якщо загальні поняття теорії безпеки відомі, то питання аналізу і синтезу безпеки за різними критеріями, методи прогнозування, локалізації і запобігання аварійних ситуацій, узагальнення знань про конкретні аварії ще тільки формуються.

Згідно зі статистичними даними 12,4% аварій на АЕС були пов'язані з відмовами обладнання ядерних енергетичних установок, а також засобів контролю та систем безпеки. Окрім таких відмов, позаштатні ситуації на АЕС можуть бути викликані неправильними діями операторів (кількість аварій та зупинок з цієї причини досягає 80%).

На сьогодні в Україні розроблено державну комплексну програму робіт з аналізу безпеки для різних типів ядерних енергетичних установок (ЯЕУ). Роботи з реалізації цієї програми проводяться у інституті проблем безпеки ядерних станцій, державному підприємстві «Державний науково-технічний центр з ядерної та радіаційної безпеки» Державного комітету ядерного регулювання України, інституті технічної теплофізики НАН України і в ряді інших організацій, підприємств і вузів.

Одним з найбільш перспективних шляхів підвищення безпеки, що дозволяє забезпечити самоорганізацію і живучість АЕС, є створення систем керування на основі принципів штучного інтелекту. АЕС відносяться до класу систем зі змінною випадковою структурою на безлічі стохастичних елементів. Удосконалення опису такого класу систем є пов'язаним з використанням математичного апарату, відмінного від диференціальних, інтегральних чи функціональних рівнянь. Слід зазначити необхідність участі людини-оператора в ланках забезпечення працездатності таких систем. Це вимагає подальшого розвитку інтелектуальних моделей та методів, що засновані, зокрема, на використанні теорій штучних нейронних мереж та мереж Петрі.

Система інтелектуального керування складними стохастичними процесами, що є характерними для ЯЕУ, повинна мати високу моделюючу здатність. Відомо, що максимальна потужність моделювання властива машині Тьюрінга. Розширені мережі Петрі можуть бути еквівалентними машині Тьюрінга, однак недолік таких мереж полягає в обмежених можливостях їх структуризації. Тому доцільним є в такий спосіб удосконалити апарат мереж Петрі, щоб необхідність поточної зміни структури моделі була передбачена на рівні відповідних формалізованих процедур.

Для підвищення ефективності керування станом ядерного реактора має бути досліджена можливість виникнення умов, за яких відбуваються перевищення визначеного рівня потужності або перевищення швидкості розгону. Небезпека кризи теплообміну є пов'язаною з подальшою перевитратою захисної оболонки внаслідок різкого збільшення температури поверхні нагрівання оболонки твела та виходом продуктів розподілу до контуру. Фізичні особливості кризи кипіння досліджувалися в роботах Кутателадзе С.С., Смоліна В.І., Субботіна В.І., Борішанського В.М., Дорощука В.Є., Толубінського В.І., Орнатського А.П., Попова І.О. та інших відомих учених.

Опис функціонування реакторної установки за наявності локальних збурень як випадкового процесу, основними показниками якого в режимі граничних теплових навантажень є параметри поверхневого кипіння, а саме, тиск теплоносія, температура теплоносія в камері змішання, середній об'ємний паровміст, дозволяє отримати стохастичні моделі, необхідні для подальшого створення адаптивних систем керування ЯЕУ.

Тому, з одного боку, існує необхідність у створенні простих і ефективних моделей процесу теплообміну в технологічному каналі реакторів, що дозволяють на основі невеликої кількості параметрів робити висновок про порушення теплообміну на ранніх стадіях. З іншого боку, необхідна розробка швидкодіючих адаптивних систем керування, моделі яких урахували б стохастичний характер процесу теплообміну. Розв'язання даної задачі передбачає, зокрема, розробку структури інформаційної системи, обумовленої не тільки кількістю первинних перетворювачів, але й їх просторовим розташуванням. Крім того, можливість прийняття своєчасних правильних рішень в стресових передаварійних ситуаціях, залежить від рівня кваліфікації операторів. Це визначає необхідність створення сучасних тренажерів і систем тренінгу оперативного персоналу АЕС.

Таким чином, для підвищення безпеки керування ЯЕУ, зокрема, реакторними установками (РУ), є актуальною проблема розробки моделей об'єктів керування та пристроїв керування зі змінною випадковою структурою на безлічі стохастичних елементів, а також методів створення на їх основі автоматизованих систем керування, що характеризуються високою швидкістю прийняття правильних рішень в разі виникнення передаварійних або аварійних ситуацій.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Дисертаційна робота виконана в рамках Національної енергетичної програми «Основні напрямки розвитку енергетики України на період до 2010 року»; комплексної програми організаційно-технічних заходів щодо продовження строку експлуатації АЕС України на період 2003-2010 р.р. (ПМ-Д0.08, 178-04), затвердженої розпорядженням Кабінету Міністрів України 29 квітня 2004 р. №263 «Про затвердження програми робіт із продовження строку експлуатації діючих енергоблоків атомних електростанцій» та розпорядженням від 27.02.2001р. №42/2001-рп «Про розробку енергетичної стратегії України на період до 2030 року й подальшу перспективу», а також відповідно до плану науково-дослідних робіт СНУЯЕтаП з підвищення безпеки керування реакторними установками та створення перспективних методів вимірів у тепловій й ядерній енергетиці («Візуалізація джерел іонізуючого випромінювання з можливістю визначення їхньої просторової орієнтації в об'єктах зі складною геометрією» № ДР 0112U003049, «Розробка оптичної системи безконтактного моніторингу стану протяжних об'єктів» № ДР 0112U003050).

Мета та задачі дослідження. Метою роботи є автоматизація процесів керування реакторними установками на основі моделей мереж Петрі, що забезпечує необхідну швидкодію при локалізації та запобіганні аварійних ситуацій для підвищення безпеки експлуатації АЕС.

Для досягнення поставленої мети необхідно розв'язати такі наукові задачі:

- аналіз сучасних моделей та методів автоматизованого керування реакторними установками;

- розробка математичних моделей РУ та пристрою керування РУ, що описують імовірнісні з'єднання стохастичних систем на основі розширення мереж Петрі;

- розробка критерію керованості стохастичних систем, що описуються за допомогою розширених мереж Петрі;

- розробка моделі нейронного модуля змінного обсягу, який описується апаратом мереж Петрі як надпровідник зі змінним часом активзації, що дає можливість підвищити моделюючу здатність програмно реалізованих нейронних мереж;

- розробка методу інтелектуального керування РУ з використанням модульної нейронної мережі, що дає можливість підвищити швидкодію процесу прийняття рішень в аварійних ситуаціях для РУ;

- розробка математичної моделі процесу запарювання каналу активної зони реактора, яка дозволяє прогнозувати основні параметри процесу теплообміну та визначати параметри кризи теплообміну до початку поверхневого кипіння, що дає можливість одержання додаткового часу для прийняття рішення оператором АЕС та спрацьовування пристроїв системи захисту у випадку виникнення позаштатної ситуації;

- удосконалення математичного апарату мереж Петрі шляхом розробки розширення, яке об'єднує атрибути стохастичних і функціональних мереж Петрі, що дозволяє здійснювати більш обґрунтований вибір структури керованої системи;

- удосконалення методу ідентифікації внутрішньо-реакторних аномалій за показниками оптичних датчиків, що на основі ітеративного пошуку визначає канали, які відповідають максимумам просторового розподілу об'ємного паровмісту;

- подальший розвиток теоретико-імовірнісних методів оптимальних статистичних рішень для задач моделювання та і оптимізації структури та/або параметрів стохастичної керованої системи, які використовують запропоноване розширення мереж Петрі, зокрема, реакторними установками;

- розробка моделі системи адаптивного керування тепловою потужністю ядерного реактора на основі методу ідентифікації внутрішньо-реакторних аномалій та розширених мереж Петрі;

- розробка системи тренінгу операторів перевантажувальних машин для підвищення надійності оперативного персоналу АЕС на основі моделей мереж Петрі.

Об'єктом дослідження є процеси автоматизованого керування реакторними установками.

Предметом дослідження є моделі та методи автоматизованого керування реакторними установками на основі мереж Петрі.

Методи дослідження. Під час розв'язання поставлених задач у роботі використовувалися методи теорії автоматичного та адаптивного керування, що дозволили синтезувати моделі й методи ідентифікації та оптимізації технологічних процесів РУ; методи теорії керування ядерним реактором, що дали можливість визначити принципи побудови системи внутрішньо-реакторного контролю і системи інтелектуального керування, а також систем тренінгу оператора; імітаційне моделювання,

що дало можливість одержувати апіорні значення характеристик системи; методи побудови мереж Петрі, що дали можливість розробити клас моделей систем зі змінною випадковою структурою на безлічі стохастичних елементів; методи теорії штучного інтелекту, що дали можливість побудови нейронного модуля змінного обсягу, який описується апаратом мереж Петрі як надпровідник зі змінним часом активізації; методи теорії теплофізики та теплогідравліки, що дали можливість розрахувати параметри поверхневого тепловиділення в камері змішання реактора; методи прикладної термодинаміки, які дали можливість проаналізувати теплофізичні процеси в активній зоні реактора; методи прикладної статистики, що дали можливість автоматизованої обробки інформації від вимірювальних пристроїв РУ.

Наукова новизна результатів дисертаційної роботи. За результатами виконання дисертаційних досліджень теоретично узагальнено і отримано нове вирішення важливої науково-прикладної проблеми автоматизації керування реакторними установками за рахунок створення моделей об'єктів і пристроїв керування зі змінною випадковою структурою на безлічі стохастичних елементів, для яких набір структур є заздалегідь невизначеним, та розробки на їх основі методів побудови автоматизованих систем керування, які характеризуються високою швидкістю в аварійних ситуаціях. Основні результати, що визначають новизну дисертаційної роботи, полягають у тому, що:

- вперше запропоновано моделі РУ та пристрою керування РУ, які описані як імовірнісні з'єднання стохастичних систем на основі розширення мереж Петрі, що на відміну від існуючих описів на основі диференціальних рівнянь дають можливість зменшити розмірність моделі процесу та суттєво підвищити швидкість керування процесами теплообміну в активній зоні реактора;

- вперше запропоновано критерій керованості систем, що описані математичним апаратом мереж Петрі, який на відміну від існуючих алгебраїчних критеріїв дає можливість знизити розмірність завдання перевірки керованості об'єкта за рахунок можливостей апарата мереж Петрі та дозволяє підвищити швидкість визначення переходу ядерного реактора до некерованого стану;

- вперше запропоновано модель нейронного модуля змінного обсягу, який описується апаратом мереж Петрі як надпровідник зі змінним часом активізації та на відміну від атомарних елементів існуючих нейронних мереж являє собою функціонально цілісну сукупність взаємозалежних модулярних колонок, що дає можливість створення нової елементної бази для апаратної реалізації нейронних мереж і підвищення моделюючої здатності програмно реалізованих нейронних мереж;

- вперше запропоновано підхід до інтелектуального керування РУ з використанням модульної нейронної мережі (МНС), де на відміну від існуючих методів враховано імовірний зв'язок нейронних модулів, що дає можливість підвищити швидкість процесу ухвалення рішення в аварійних ситуаціях для РУ;

- вперше запропоновано математичну модель процесу запарювання каналу активної зони реактора, яка на відміну від існуючих теплофізичних моделей дозволяє для технологічного каналу прогнозувати основні параметри процесу теплообміну та визначати параметри кризи теплообміну до початку поверхневого кипіння, що

дає можливість одержання додаткового часу для прийняття рішення оператором АЕС та для спрацювання пристроїв системи захисту у випадку аварійної або по-заштатної ситуації;

- удосконалено математичний апарат мереж Петрі шляхом розробки розширення, який дозволяє виконувати перевірку на максимум імовірності передачі маркера за допомогою введення стримуючих подійових гіпердуг, додаткових атрибутів та об'єднання атрибутів стохастичних і функціональних мереж Петрі, що на відміну від існуючих мереж Петрі дозволяє робити вибір найбільш імовірної структури на рівні математичного апарату без перегляду різних варіантів структур та дає можливість підвищити швидкодію систем керування;

- удосконалено метод ідентифікації внутрішньо-реакторних аномалій за показниками оптичних датчиків, розташованих по периметру камери змішання, що на відміну від існуючих на основі ітеративного пошуку визначає канали, які відповідають максимумам просторового розподілу об'ємного паровмісту, що дає можливість знизити обсяг оброблюваної інформації та підвищити швидкодію систем діагностики;

- одержали подальший розвиток теоретико-імовірнісні методи оптимальних статистичних рішень для задач моделювання, фільтрації, ідентифікації і оптимізації структури та/або параметрів, які на відміну від існуючих у якості моделей процесів і пристроїв використовують запропоноване розширення мереж Петрі, що дає можливість підвищити швидкодію при розв'язанні цих завдань у процесі керування реакторними установками.

Практичне значення одержаних результатів. Розроблені в дисертаційній роботі способи опису об'єкта керування, способи ідентифікації об'єкта, побудови систем інтелектуального керування, система тренінгу людини-оператора дозволяє у різних аспектах підвищувати безпеку керування реакторною установкою та можуть бути використані на підприємствах ядерної енергетики.

Запропоновані методики показали свою ефективність при діагностиці стану активної зони ректора. Результати дисертаційної роботи використані у вигляді рекомендацій для вдосконалювання систем внутрішньо-реакторного контролю. Запропонований підхід дозволить удосконалити системи діагностики і захисту та забезпечити роботу устаткування у режимі, що щадить. Результати використані на підприємстві "Південноукраїнська атомна електрична станція" НАЕК "Енергоатом" Міністерства енергетики і вугільної промисловості України (акт від 02.03.2010р.).

Запропоновані способи показали свою ефективність при ухваленні рішення в аварійних ситуаціях. Результати дисертаційної роботи використані як рекомендації при розробці технічного завдання на проектування системи інтелектуального керування реакторною установкою. Запропонований підхід реалізується в рамках затверджених НАЕКом "Програми по вузловій заміні підсистем АСУ ТП енергоблоків ВВЕР-1000, ВВЕР-440", "Протоколу технічної наради по визначенню напрямків розвитку АСУ ТП у частині реконструкції СКУ" від 10.07.2000р., "Програми впровадження комплексної системи діагностики на АЕС України". Результати використані на підприємстві "Запорізька атомна електрична станція" НАЕК "Енергоатом" Міністерства енергетики і вугільної промисловості України (акт від 15.03.2010р.).

Крім того, запропоновані способи з підвищення безпеки керування РУ: спосіб прогнозу процесу запарювання каналу активної зони реактора; спосіб ідентифікації внутрішньо-реакторних аномалій на основі показань оптичної вимірювально-інформаційної системи; принципи створення системи адаптивного керування тепловою потужністю ядерного реактора на основі діагностики внутрішньо-реакторних аномалій з використанням МНГТ і мереж Петрі; способи фільтрації, ідентифікації й адаптивної оптимізації параметрів і структури складних систем на базі мереж Петрі як основа розробки систем адаптивного керування РУ та принципи побудови систем інтелектуального керування РУ на базі мереж Петрі. Результати впроваджено в навчально-учбово-науковому ядерному центрі "ИЯЦ-200" Севастопольського національного університету ядерної енергії й промисловості (акт від 28.01.2010р.).

На підставі виконаних досліджень розроблено методики: діагностики паротворення в активній зоні ВВЕР, прогнозу стану реактора при поверхневому кипінні, використання діалогової системи тренінгу операторів перевантажувальних машин, які дозволили внести зміни до робочих навчальних програми з дисциплін "Технічні засоби автоматизації", "Метрологія, технологічні вимірювання і прилади", "Експлуатація комплексних систем управління" (акт від 18.05.2009р.).

Особистий внесок здобувача. Усі наукові результати дисертаційної роботи, що виносяться на захист, отримані автором самостійно і опубліковані в роботах [1-22, 26-31, 33]. У наукових працях, опублікованих у співавторстві, здобувачу належать наступні результати: [23] – модель системи адаптивного керування оптичною вимірювально-інформаційною системою (ВІС) при ідентифікації внутрішньо-реакторних аномалій на основі МП і методу найбільш "гарячих" точок; [24] – метод ідентифікації внутрішньо-реакторних аномалій на основі показників оптичної ВІС (методу найбільш "гарячих" точок); [25] – ідея використання камери змішання для одержання інформації про дійсний паровміст у каналах активної зони реактора, [32] – прогнозувальна аналітична модель тенденції процесу запарювання каналу активної зони реактора та адаптивне керування процесом теплообміну на базі моделей МП.

Апробація результатів дисертації. Основні положення та результати дисертації представлені на таких конференціях: на 10-ій міжнародній конференції з автоматичного керування "Автоматика–2003", Севастополь, 15-19 вересня 2003; на 11-ій міжнародній конференції з автоматичного керування "Автоматика–2004", Київ, 27-30 вересня 2004; на 12-ій міжнародній конференції з автоматичного керування "Автоматика–2005", Харків, 30 травня - 3 червня 2005; на міжнародній науково-технічній конференції "Автоматизація: проблеми, ідеї, рішення", Севастополь, 14-17 вересня 2005; на 10-ій міжнародній науково-технічній конференції "Прогресивна техніка і технологія – 2009", Київ-Севастополь, 22-25 червня 2009; на 7-ій міжнародній науково-практичній конференції з проблем атомної енергетики (МНПК ПАЕ-7) "Безпека, ефективність, ресурс ЯЕУ", Севастополь, 22-27 вересня 2009; на 12-ій міжнародній науково-технічній конференції "Прогресивна техніка і технологія – 2011", Київ-Севастополь, 20-24 червня 2011; на 13-ій міжнародній науково-технічній конференції "Прогресивна техніка і технологія - 2012", Київ-Севастополь, 11-25 червня 2012; у повному обсязі дисертаційна робота доповідалася на науково-

методичному семінарі Харківського національного університету радіоелектроніки, м. Харків, 2010, 2012р., на науково-методичному семінарі Одеського політехнічного університету, м. Одеса, 2011р., і на регіональному семінарі наукової секції Придніпровського наукового центра НАН України "Сучасні проблеми керування й моделювання складних систем", м. Дніпропетровськ, 2013р.

Публікації. За результатами дисертаційних досліджень опубліковано 33 наукові праці: 24 статті у фахових виданнях України з технічних наук, з них 21 без співавторів (5 в міжнародних наукометричних базах); 1 стаття в іншому виданні; 2 патенти України; 6 публікацій матеріалів і тез доповідей на міжнародних науково-технічних конференціях.

Структура дисертації. Дисертація складається із вступу, шести розділів, висновків, п'яти додатків. Повний обсяг дисертації складає 361 сторінку, що включає 62 рисунки, з них 10 рисунків на окремих сторінках, 10 таблиць, з них 4 таблиці на окремих сторінках, список використаних джерел з 305 найменувань на 29 сторінках, 5 додатків на 53 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** обґрунтовано актуальність теми дисертації, сформульовано мету та визначено основні завдання досліджень, об'єкт і предмет дослідження, наукову новизну і практичну цінність роботи, особистий внесок здобувача в отриманні результати, представлено дані щодо їх апробації та впровадження.

У **першому** розділі зроблено аналіз стану автоматизації керування АЕС та питань підвищення їх безпеки.

Розгляд АЕС як складної системи, а також зарубіжний і вітчизняний досвід експлуатації АЕС, дали можливість визначити властивості АЕС, які не забезпечуються сучасними системами безпеки. Відсутність у сучасних АЕС таких властивостей, як самоорганізація і живучість, а також статистична інформація про надійність оперативного персоналу (ОП), підтверджують актуальність розробки науково-технічної бази створення систем керування АЕС на основі принципів штучного інтелекту і важливість застосування сучасних систем тренінгу при підготовці ОП АЕС. Аналіз аварій та інцидентів на АЕС дозволив визначити шляхи одержання персоналом АЕС більш повної і своєчасної інформації про стан РУ. У цьому зв'язку здається доцільним удосконалення існуючих систем внутрішньо-реакторного контролю (СВРК) за рахунок створення підсистем діагностики об'ємного паровмісту в робочій зоні реактора. Припущення про відсутність значимого поверхневого кипіння в активній зоні реакторів типу ВВЕР і його безпеки, для реакторів типу РБМК дозволило не розглядати параметр «об'ємний паровміст» як індикатор порушення теплообміну. За результатами аналізу моделей кризових явищ при кипінні у двофазному потоці для проведення дослідження процесу теплообміну в активній зоні реактора були обрані: емпірична модель визначення масового паротворення для різних стадій кипіння, запропонована З.Л. Миропольським, та емпіричні дослідження поверхневого кипіння в каналі дослідницького ядерного реактора ДР-100 І.О.Попова

(рис.1), які були використані в дисертації для розробки моделі, що прогнозує кризу теплообміну.

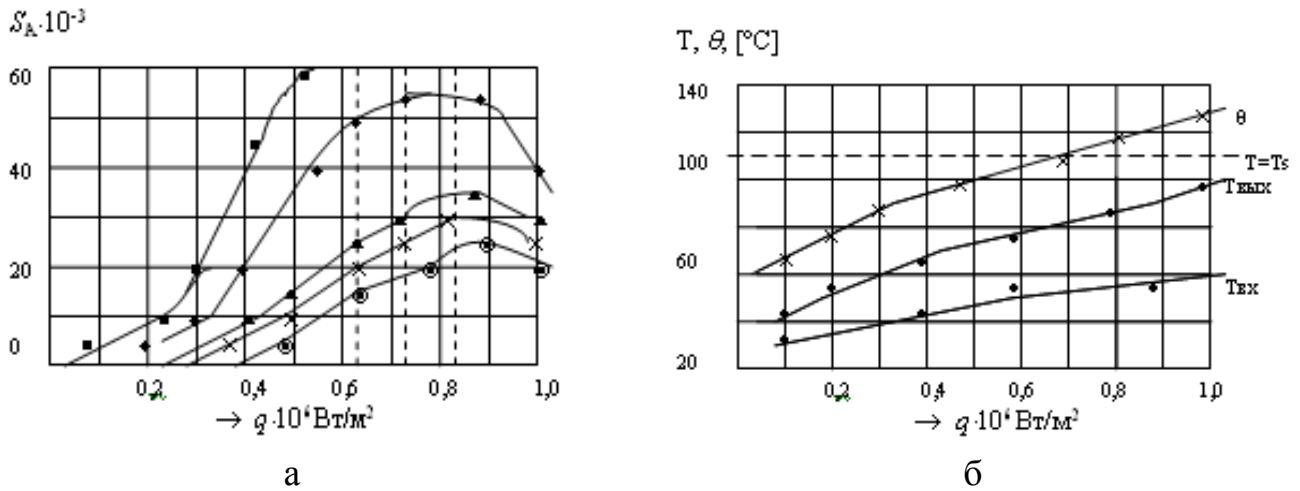


Рисунок 1 – Експериментальні дані, що характеризують температурний режим каналу (а); акустичні спектральні характеристики, де: $\blacksquare$ – $f=0 \dots 1$ кГц; $\blacklozenge$ – $f=1 \dots 2$ кГц; $\blacktriangle$ – $f=2 \dots 3$ кГц; $\times$ – $f=3 \dots 4$ кГц; $\odot$ – $f=4 \dots 5$ кГц (б)

З метою виміру дійсних характеристик двофазного потоку розглядається експериментальна установка з оптичною ВІС, створена І.О.Поповим. На основі оптичних ВІС у дисертаційній роботі пропонується здійснювати діагностику внутрішньо-реакторних аномалій активної зони реактора, пов'язаних з порушенням процесу теплообміну. Визначено фактори, що дозволяють розглядати АЕС як стохастичну систему зі змінною випадковою структурою, що немає певного набору (сукупності) детермінованих структур. Виходячи з мети дослідження і положення, що АЕС – специфічна складна система, одним з ланок якої є людина, виникла необхідність аналізу існуючих моделей нейронних мереж і проблем побудови системи інтелектуального керування (СІК), а також можливості застосування апарата нечіткої логіки в контексті адаптивного керування. Структура автоматизованої системи керування РУ на базі мереж Петрі (МП) включає оператора (ОП), систему керування і захисту реактора (СКЗ), пристрій вводу/виводу (ПВВ) і інтелектуальну вимірювально-інформаційну систему (ІВІС) та показана на рис.2.

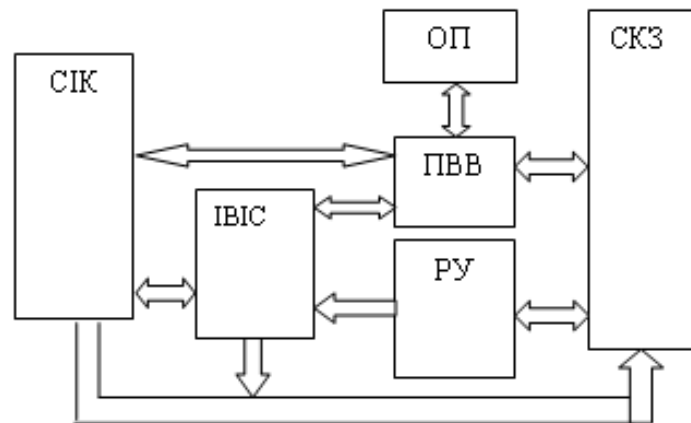


Рисунок 2 – Структура автоматизованої системи керування РУ на базі МП

Аналіз функцій, виконуваних штучними нейронними мережами (ШНС) застосовні для розв'язання цілого класу задач, свідчить про доцільність пошуку організаційного принципу, що забезпечив би можливість побудови систем керування на основі ШНС, доступних для експериментальної перевірки. Такий організаційний принцип був, зокрема, висунутий американським фізіологом В. Мауткаслем.

Концепція В. Мауткасла співзвучна теорії адаптивних систем керування, а опис процесів керування за цією концепцією здійснюється з використанням розширень МП. Для створення імітаційної моделі складних систем керування доцільно вибрати стохастичні і функціональні МП. Таке розширення дозволяє природно описувати невизначеність як нечітку, так і немонотонною логікою.

Використання апарата нечіткої логіки (НЛ) при створенні систем керування є перспективним в аспекті інтелектуалізації процесу керування, зокрема, забезпечення стійкого поведіння системи в ситуаціях з апіорною невизначеністю або неповною інформацією. Однак процес доказу в рамках неklasичних логік значно складніше піддається автоматизації, чим для традиційної логіки.

Останнім часом розвивається науково-технічний напрямок, пов'язаний з перспективами синтезу апарата МП і теорії нечітких множин для побудови систем керування.

Для розробки, реалізації і застосування систем інтелектуального керування (СІК) використовуються також нейромережні інформаційні технології. Залежно від способу реалізації нейронних мереж, виділяють чотири рівні СІК: 1) теоретико-алгоритмічний; 2) програмний; 3) програмно-апаратний; 4) апаратний.

У дисертаційній роботі пропонується принципово інша модель атомарного елемента нейросистеми, чим існуюча в сучасних ШНС. Основою такого атомарного елемента є модулярна колонка, запропонована в концепції В. Мауткасла. Положення цієї концепції дозволили розробити в ході виконання дисертації методи побудови на теоретико-алгоритмічному рівні СІК як адаптивної оптимальної САК.

Результати аналізу стану досліджуваної проблеми, наведені у першому розділі, обумовили зміст подальших розділів дисертаційної роботи.

У другому розділі розглянуті питання моделювання, фільтрації, ідентифікації для стохастичних систем та їх з'єднань на основі МП, що дозволяють розробити науково-технічну базу систем діагностики і керування РУ.

Для створення таких систем запропоновано метод імітаційного моделювання, що використовується при проектуванні складних стохастичних систем та їх з'єднань, з урахуванням динаміки поведінки в умовах невизначеності.

З метою опису дискретних процесів випадкової структури в умовах невизначеності пропонується розширення МП, що включає: узагальнення стохастичних і функціональних МП шляхом об'єднання підмножин атрибутів; внесення додаткових атрибутів; використання стримуючої подійової гіпердуги.

Для розглянутого об'єкта (з'єднання стохастичних систем) приймемо наступну інтерпретацію елементів МП: перехід – елемент системи (стохастичної підсистеми); позиція – набір виходів елемента системи; маркер – ознака наявності вектора сигналів на виході елемента; дуга – канал передачі сигналів; спрацьовування переходу означає включення елемента в поточну структуру.

Імовірність спрацювання переходу будемо розглядати як імовірність передачі з множини вхідних позицій даного переходу хоча б одного маркера і виконання множини обмежень (умов), зіставлених цьому переходу. Введення стримуючої подійової гіпердуги дозволяє, на відміну від звичайної стримуючої дуги, що здійснює перевірку на нуль, виконувати перевірку на максимум. Потреба в такому розширенні обумовлена наявністю наборів взаємовиключальних подій. Для розглянутого об'єкта подіями є передачі сигналів різним елементам системи. Стримуюча подійова гіпердуга охоплює звичайні дуги, одночасна передача маркера (вектора сигналів) на яких виключена.

Визначено критерій керованості для систем, описаних розширеними МП, на основі двох теорем.

Теорема 1. Ступінь керованості системи, описаної МП, визначається активністю цієї мережі.

Теорема 2. Система, описана розширенням МП, має ступінь керованості, що дорівнює чотирьом.

Таким чином, ступінь керованості співвідноситься з рівнем активності мережі Петрі.

Останнім часом задачу фільтрації процесів змінної структури розв'язують на основі байесовських критеріїв умовного ризику і визначенні апостеріорної щільності ймовірності оцінюваного сигналу за умови спостереження деякого іншого сигналу з гаусівськими перешкодами. Труднощі розв'язання цієї задачі пов'язані з одержанням апостеріорної щільності ймовірності, що може бути визначена двома шляхами: інтегральним і диференціальним. У випадку, коли процес не є марківським, другий шлях неприйнятний. Процеси немарковського типу характерні для імовірнісних з'єднань стохастичних систем, при цьому одержати аналітичне розв'язання для таких систем практично неможливо. Перспективним є шлях розробки наближених алгоритмів фільтрації, однак ці алгоритми також містять обмеження у вигляді умови марковості. Умовні марківські процеси в основному визначають і моделі різних методів стохастичного моделювання на ЕОМ. Зараз для розв'язання задачі фільтрації використовують нейронні мережі. На практиці проблема моделювання та фільтрації складних систем змінної структури пов'язана із задачею зниження розмірності моделі та обсягу обчислень. Для розв'язання даної задачі є ефективним використання мережних моделей стохастичних МП, моделювальні можливості яких значно вище, ніж для існуючих ІНС.

Застосування розширення стохастичних МП зі стримуючими подійовими гіпердугами дозволяє моделювати немарківські процеси імовірнісних з'єднань стохастичних систем. Мережна модель дозволяє звести роботу системи на інтервалі Δt до паралельного, незалежного функціонування всіх підключених елементів. Це збільшує потужність моделювання у випадку застосування мультипроцесорних систем. У процесі моделювання в момент часу визначаються такі характеристики поведінки системи в часі: 1) поточна структура системи; 2) частота появи кожної структури з множини структур, визначених у процесі моделювання; 3) значення вектора моде-

льних сигналів $X_{\text{mod}}(t)$ на виходах елементів; 4) вектор $\omega(X_{\text{mod}}, t)$ щільності розподілу вектора сигналу $X_{\text{mod}}(t)$.

Для організації зворотних зв'язків зручно ввести формальний поділ на вхідні й вихідні стани елемента. Як критерій оптимальної оцінки вектора вхідних сигналів $\hat{X}(t)$ передбачається використати критерій найбільш імовірної завади $\hat{N}(t)$.

Отримано рівняння фільтра для вектора $Z(t)$ спостережуваних сигналів в наступному вигляді

$$\hat{X}(t) = Z(t) - A\hat{N}(t - \Delta t) - \Delta\hat{N}(t - \Delta t), \quad (1)$$

$$A = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \Delta Z(t) \cdot \Delta Z(t - \Delta t) \geq 0 \\ 0, & \text{в іншому випадку} \end{cases}.$$

У рівнянні (1) відсутнє явне завдання матриць коваріацій сигналів. Використання МП дозволяє знизити обсяг обчислень за рахунок розгляду не всіх елементів системи, а лише активних. Це дає можливість змінювати розмірність коваріаційної матриці в часі залежно від числа активних елементів. Крім того, МП дозволяє при моделюванні здійснювати заміну значень змодельованих сигналів їх оцінками, що враховують сигнали спостереження, без додаткових перетворень та обчислень, пов'язаних зі зміною структури системи.

Запропоновано застосування методу оптимальної фільтрації на базі МП для одноканального і багатоканального квазиоптимальних фільтрів.

Ефективність розв'язання задачі ідентифікації багато в чому залежить від вибору мови опису об'єкта і структури моделі, які базуються на теоретичних апріорних передумовах. Складність сучасних об'єктів керування ускладнює розробку математичних моделей, у термінах яких має виконуватися ідентифікація. Використання імітаційних моделей дозволяє розглядати керовані об'єкти різної функціональної та структурної складності в процесі їх експлуатації за наявності випадкових перешкод. Одним зі шляхів опису таких об'єктів є застосування МП.

При параметричній ідентифікації в класі моделей з дискретним часом на основі МП оператор опису об'єкта Φ^M можна надати у формі

$$x_{\text{вих}}^M[k] = \Phi^M[x_{\text{вх}}^M[k], a[k], u[k], C[k], k], \quad x_{\text{вих}}^M \in X_{\text{вих}}^M, x_{\text{вх}}^M \in X_{\text{вх}}^M, \quad (2)$$

де $X_{\text{вх}}^M, X_{\text{вих}}^M$ – простори вхідних і вихідних сигналів; a – вектор випадкових параметрів; u – вектор керування; C – мережа Петрі; k – номер дискретного моменту часу.

При описі стохастичних об'єктів застосовуються стохастичні МП.

Перетворення Φ^M на основі розширення C_S стохастичної МП, до вигляду

$$x_{\text{вих}}^M[k] = \Phi^M[C_S[k], k] \quad (3)$$

вимагає опису параметрів мережею Петрі. Для цього необхідно виконати класифікацію переходів МП.

Пропонується виділити два види переходів: параметричний перехід для опису параметра; системний перехід для опису стохастичних підсистем. Дане розширення МП дозволяє здійснювати ідентифікацію параметрів на основі розв'язання задачі ідентифікації структури.

У цілому запропонований підхід дає можливість:

1) зіставити операторові Φ^M список входних позицій мережі C_S з відповідними їм значеннями входних сигналів (як ідентифіковувані входні сигнали виступають перешкоди із заданими імовірнісними характеристиками);

2) визначити значення параметрів при реалізації функцій, зіставлених параметричним переходам (рис .3);

3) за результатами ідентифікації структури визначити підмножини параметричних переходів, що відповідають змінюваним параметрам;

4) скоротити число ідентифікаційних експериментів, розглядаючи в кожен момент часу тільки фрагмент мережі C_S ;

5) обмежити умови спостереження векторами спостереження Z і керування u .

Крім реально існуючих стохастичних підсистем, кожний випадковий параметр є пов'язаним з переходом, якому відповідає стохастичне рівняння

$$\dot{a} = V'(t), \quad a(t_0) = a_0, \quad (4)$$

де a – вектор випадкових параметрів, $V'(t)$ – вектор центрованого білого шуму.

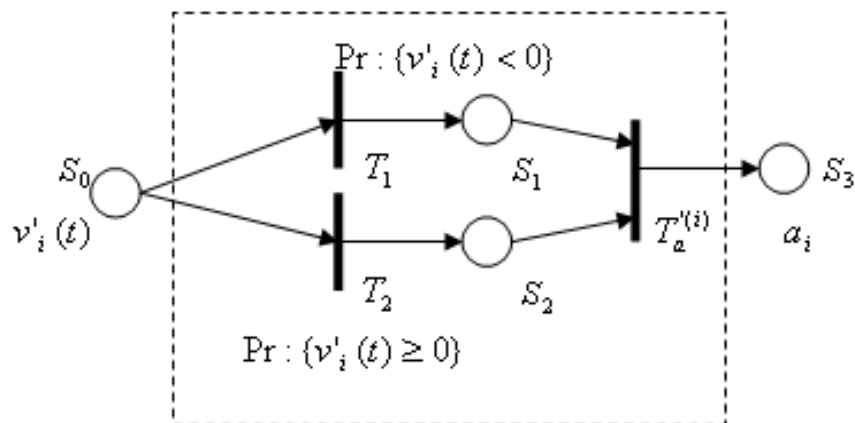


Рисунок 3 – Параметричний блок (перехід)

Як основу ідентифікації прийнято частотний метод у наступній інтерпретації. Будемо розглядати оцінку вектора $\hat{X}$ і вектора $\hat{W}(X, t)$ функцій щільності ймовірностей вихідних сигналів як вихідні дані для визначення за функціями щільності ймовірності параметрів (або входних випадкових впливів) значень цих параметрів

(або випадкових впливів). У випадку, коли вхідний сигнал є центрованим гауссівим білим шумом, коефіцієнт нелінійності в сучасний момент часу приймемо з відношення середнього квадратичного відхилення вхідного сигналу до середнього квадратичного відхилення вихідного сигналу, а фазу (зсуву) визначимо як математичне очікування вихідного сигналу.

На підготовчому етапі при одержанні інформації, використовуваної при ідентифікації структури і параметрів об'єкта, вирішують два підзавдання: 1) проведення статистичного експерименту; 2) проведення фільтрації.

Результати моделювання описуються за допомогою запропонованої матриці маркування. Матриця маркування – це таблиця, у якій кількість рядків визначається числом тактів моделювання, а кількість стовпців – числом позицій МП. Елемент матриці маркування є списком позицій, наявність маркерів у яких у попередньому $(i-1)$ такті моделювання викликало появу маркера в j -й позиції в поточному такті моделювання i . Кожному r -му елементу даного списку зіставлено вектор значень сигналів $VZS_r(t_i)$. Крім того, позиціям зіставлено рядок спостережуваних сигналів.

На першому етапі проводиться ідентифікація структури. Розв'язання задачі ідентифікації структури за наявними статистичними даними та оцінкою $\hat{X}(X \subseteq Y)$ зводиться до аналізу вектора оцінок щільності ймовірностей значень сигналів для кожної структури. Визначаючи значення $\hat{X}$, що зустрічаються найчастіше, знаходять найбільш імовірну структуру.

Запропоновано критерій оптимальної структури на інтервалі часу $[t-\tau; t]$:

$$IS_o = \max_l \min_i \hat{\omega}^{(l)}(x_i, t) \quad (5)$$

де x_i – i -й елемент вектора $\hat{X}$; $\hat{\omega}^{(l)}(x_i, t)$ – оцінка функції щільності розподілу сигналу x_i для структури l .

У випадку, коли критерію оптимальності відповідає кілька структур, вибирають найбільш близьку до структури, отриманої в попередньому експерименті, тобто структуру, апіорну для даного експерименту.

Уведено поняття міри близькості структур. Мірою близькості апіорної структури S_A та i -ї структури S_i експерименту або відстанню між структурами S_A і S_i назовемо величину d_i

$$d_i = \frac{d_1^{(i)}}{d_2^{(i)}}, \quad (6)$$

де $d_1^{(i)}$ – потужність множини $TS_1 = TS_A \cap TS_i$ (TS_A, TS_i – множини переходів, відповідно, структур S_A і S_i); $d_2^{(i)}$ – потужність множини $TS_2 = TS_A \cup TS_i - TS_1$.

Запропоновано критерій близькості:

$$ID_0 = \max_i d_i \quad (7)$$

Обрана структура є апостеріорною для теперішнього моменту часу t і апріорною – для наступного моменту $t+\tau$.

На другому етапі здійснюється ідентифікація параметрів. Розв'язання задачі ідентифікації параметрів полягає у визначенні для обраної оптимальної структури та оцінки вектора $\hat{X}$ найбільш імовірних значень вектора параметрів $\hat{a}' (a' \subseteq a)$. Переглянувши всі шляхи від параметричного переходу $T_a^{(i)}$, можна визначити для кожного параметра a_i множину $X_i' \subseteq X$ елементів вектора X , що залежать від параметра a_i . Знаючи щільності розподілу X і V' , можна приблизно визначити значення $\Delta a_i = v_i'$ за формулою

$$v_i' = \frac{1}{n} \sqrt{\sum_{x_j \in X_i'} \frac{\hat{\sigma}_{v_i'}^2}{\hat{\sigma}_{x_j}^2} (\hat{x}_j(t) - \hat{m}_{x_j})^2}, \quad (8)$$

де $\hat{\sigma}_{v_i'}^2, \hat{\sigma}_{x_j}^2$ – оцінки дисперсії v_i' і x_j ; $\hat{m}_{x_j}$ – оцінка математичного сподівання x_j ; $\hat{x}_j(t)$ – оцінка вихідного сигналу x_j , отримана в результаті фільтрації; n – потужність множини X_i' .

Оскільки передбачається, що збільшення випадкових параметрів розподілені за нормальним законом з нульовим математичним очікуванням, то виникає проблема визначення знаку збільшення кожного з параметрів. Для цього необхідно визначити умовні щільності $p(x_j / za_j'')$, де $a_j'' \subseteq a'$ – множина параметрів, що впливають на значення x_j ; za_j'' – знаки збільшень a_j'' . Розв'язання проблеми зводиться до розгляду в ході експерименту. Розв'язання МП, у якій зроблена заміна параметричного переходу структурним блоком, показано на рис. 3. Залежно від знаку генерованого в процесі моделювання шуму, здійснюється перевірка істинності предикату і вибір структури. Визначаючи по матриці маркування для кожного x_j структуру МП, для якої частота появи значення максимальна, знаходимо знаки параметрів.

У випадку, коли сигналам x_j і x_i відповідають різні структури, і перетин цих структур не дорівнює нулю, то можлива неоднозначність при визначенні знака параметра. Дана ситуація можлива при малих збільшеннях значення параметра. У цьому випадку апостеріорне значення параметру приймається рівним апріорному. Значення параметрів, дійсні в теперішній момент часу, є апріорними для наступного моменту часу спостереження. Передбачається, що параметри міняються повільно, в порівнянні із процесом спостереження.

У третьому розділі розглянуто задачу оптимізації параметрів і структури стохастичних систем і їх з'єднань на базі МП як основу створення методів і систем контролю і керування РУ.

Задачі синтезу оптимального керування в мультиструктурних системах становлять основну проблематику статистичної теорії оптимальних рішень. Для дослідження при цьому широко застосовується математичний опис процесів і динамічних систем у фазовому просторі станів і теоретико-імовірнісні методи оптимальних статистичних рішень. Однак наявність випадкової структури сигналів і систем приводить до ускладнення завдань керування й вимагає додаткового розвитку методів дослідження. Оскільки для підвищення швидкодії процесу керування РУ в роботі запропоновано використати опис стохастичних систем або їх з'єднань на основі розширення МП з використанням існуючих методів оптимального керування.

Розглянуто задачі оптимізації структури і (або) параметрів стохастичних систем та їх з'єднань за квадратичним критерієм з обмеженнями на керування. З використанням моделі об'єкта на базі МП розроблено відповідні алгоритми розв'язання цих задач для двох варіантів керування: термінального і нетермінального.

Задачі оптимального керування в системі випадкової структури полягають у визначенні припустимої, фізично реалізованої кусочно-безперервної векторної функції u , що задовольняє обмеженням, і відповідного вектора стану $Y(t)$, щоб зміна стану або кінцевий стан задовольняли певному заданому критерію оптимальності.

В розділі розглядається керування на основі як термінального, так і нетермінального критеріїв. Нетермінальний критерій використовується, коли необхідно оптимізувати у системі перехідні процеси поза залежністю від часу їх збудження та мінімізувати похибки керування в поточний момент часу. Розв'язано задачу оптимізації параметрів стохастичних систем на базі МП, що полягає у визначенні вектора UA значень параметрів на інтервалі часу $[t_1; t_2]$, що задовольняє заданому нетермінальному критерію оптимальності за наявністю обмеження на керування.

Елементи r -мірного вектору UA можуть приймати значення з множини $\{ua^{(i)}, x\}$, де $ua^{(i)}$ – конкретне значення i -о параметра, x – невизначене значення.

Критерій мінімуму середнього квадрата помилки для найбільш імовірної структури при заданих обмеженнях має вигляд:

$$I_o = \min_{UA} M[(\hat{Y}(t_2) - Y_T(t_2))^T (\hat{Y}(t_2) - Y_T(t_2)) | UA(t_2), Z(t_1), SA, l(t_2), t_1 < t_2], \quad (9)$$

де $Y_T(t_2)$ – прогнозований теоретичний необхідний вектор станів для структури $l(t_2)$; $\hat{Y}(t_2)$ – прогнозований вектор станів для структури $l(t_2)$; $Z(t)$ – вектор спостережень; $UA(t_2)$ – прогнозований вектор параметрів; SA – система обмежень на параметри.

Необхідно визначити для структури, імовірність появи якої в момент t_2 максимальна, вектор параметрів UA_{opt} , що відповідає заданому критерію.

Вихідними даними для оптимізації параметрів є: результати ідентифікації значень параметрів $\hat{a}' (a' \subseteq a)$, зовнішніх випадкових впливів $\hat{V}'' (V'' \subseteq V)$, структури l_0 ; отримані в результаті прогнозу значення $\hat{V}''_{prog}$; необхідний теоретичний вектор $Y_T(t_2)$. Передбачається, що значення вектора $\hat{V}''_{prog}$ на інтервалі $[t_1; t_2]$ постійне, і $(\tau = t_1 - t_2) \gg \Delta t$, де Δt – такт моделювання.

Запропонований підхід для нетермінального керування може бути використаний як основа алгоритму термінального керування. Задача термінального керування полягає у визначенні послідовності векторів $UA_{omm}(t)$ ($t_0 < t \leq t_K$) на інтервалі часу $[t_0; t_K]$ зі змінним кроком h , що задовольняє критерію оптимальності.

Запропонований підхід дозволяє виконати зміни параметрів при заданих обмеженнях в умовах структурної невизначеності при наявності випадкових зовнішніх впливів, використовуючи можливості нечіткої логіки. Застосування моделей на базі МП дозволяє знизити складність алгоритму, що визначається тимчасовими і ємнісними витратами в найгіршому випадку як функція від розмірності задачі (моделі).

Розв'язано задачу оптимізації структури стохастичних систем на базі МП, що полягає у визначенні вектора US , який характеризує клас структур $s \in S$ на інтервалі часу $[t_1; t_2]$ і задовольняє заданому критерію оптимальності. Вектор керування US визначається як d -вимірний вектор (d – кількість вихідних дуг переходів МП), елементи якого можуть приймати значення з множини $\{0, 1, x\}$, де 0 – керована дуга заборонена (канал передачі відключено), тобто щільність імовірності передачі інформації з каналу має математичне очікування $m=0$ і $\sigma^2=0$ дисперсію; 1 – керована дуга дозволена, тобто $m=1$ і $\sigma^2=0$; x – дуга не є керованою, щільність імовірності передачі інформації визначається в процесі моделювання. У процесі моделювання системи мережею Петрі керованим дугам зіставляють ймовірності передачі інформації, рівні 0,5 ($m=0,5$; $\sigma^2=0$). Обмеження на керування задається стримуючими подійовими дугами. Керовані дуги, одночасне підключення яких не допускається, охоплюються стримуючою подійовою гіпердугою.

Розглянуто оптимізацію структури за критерієм мінімуму середнього квадрата помилки

$$I_o = \min_{US(t_2)} M[(Y(t_2) - Y_T(t_2))^T (Y(t_2) - Y_T(t_2)) | US(t_2), Z(t_1), t_1 < t_2] \quad (10)$$

де $Y(t_2)$ – прогнозований вектор стану системи; $Y_T(t_2)$ – прогнозований теоретичний необхідний вектор стану системи; $Z(t_1)$ – вектор спостереження; $US(t_2)$ – прогнозований вектор керування.

Використовуючи результати експерименту, можна записати критерій у наступному виді

$$I_o = \min_{s(t) \in S(t)} \sum_{l \in s(t)} \left| \hat{\sigma}^{*(l)}(Y, t) \right| \hat{p}^{(l)}(s, t), \quad t_1 \leq t \leq t_2 \quad (11)$$

де $\hat{\sigma}^{*(l)}(Y, t)$ – центрований відносно $Y_T(t_2)$ вектор оцінок середніх квадратичних відхилень вихідних сигналів для l -ї структури; $\hat{p}^{(l)}(s, t)$ – оцінки ймовірності l -ї структури всередині класу структур $s(t) \in S(t)$.

Далі розглянуто задачу термінального керування, що полягає у визначенні найбільш імовірної послідовності структур на інтервалі часу $[t_0; t_K]$, для яких виконується нетермінальний критерій оптимальності на інтервалах, що задають зміною класів структур. Розв'язано задачу оптимізації структури та/або параметрів стохастичних систем та їх з'єднань на основі МП, що зводиться до визначення двох паралельних у часі послідовностей значень векторів UA і US на інтервалі часу $[t_0; t_K]$.

Запропонований підхід до оптимізації стохастичних систем може бути основою для визначення режимів роботи СІК РУ.

Розроблено модель та алгоритм оптимізації структури і параметрів на основі мереж Петрі для сукупності вимірювальних систем із загальним каналом спостереження.

У четвертому розділі розглядається можливість удосконалення СВРК на основі моделей і методів діагностики і прогнозування процесу кипіння.

Відповідно до «Правил ядерної безпеки реакторних установок ядерних станцій» (ПБЯ РУ АС-89, ПНАЕ Г4-024-90), принципи незалежності, різноманітності і резервування є фундаментальними принципами підвищення надійності, згідно з якими системи безпеки мають проектуватися так, щоб вплив вихідних подій, відмов, дефектів устаткування, помилок персоналу і відмов із загальної причини на працездатність систем був мінімальним.

Відповідно до принципу різноманітності, створення або удосконалення підсистем СВРК, оснований на нових моделях і методах ідентифікації стану реактора, складають один з напрямків підвищення безпеки експлуатації АС.

Використовуючи інформацію, отриману при експериментальному дослідженні поверхневого кипіння в кільцевому каналі, вмонтованому в центральний експериментальний канал дослідницького ядерного реактора ДР-100, були розроблені: метод ідентифікації внутрішньо-реакторних аномалій на основі показів інформаційно-вимірювальної оптичної системи – метод найбільш гарячих точок (МНГТ); графоаналітична модель тенденції процесу запарювання каналу активної зони реактора; моделі системи адаптивного керування тепловою потужністю ядерного реактора на основі діагностики внутрішньо-реакторних аномалій з використанням МП.

Задача ідентифікації стану активної зони реактора за допомогою оптичної ВІС включає дві взаємозалежні підзадачі:

- ідентифікація структури S , тобто розташування точок поверхневого і/або об'ємного кипіння в каналах у результаті ітеративного пошуку найбільше "гарячих" точок (НГТ) – максимумів просторового розподілу об'ємного паровмісту α ;

- ідентифікація вектору параметрів x_{ex} об'єкта, тобто визначення об'ємного паровмісту α в визначених структурою S точках із зазначенням стадії процесу кипіння для кожної точки (I – відсутність кипіння, II – поверхневе кипіння, III – об'ємне кипіння, IV – критичний процес кипіння).

Розв'язання цих підзадач одержано у класі моделей з дискретним часом як перетворення

$$[x_{ex}, S[k]] = \Phi(S[k-1], x_{ex}[k], M, a, C, k), \quad (12)$$

де Φ – перетворення на основі методу найбільше "гарячих" точок (МНГТ) і розширення стохастичної МП; S – структура схеми виміру по площі активної зони реактора; x_{ex} – вектор вхідних параметрів процесу; x_{eux} – вектор вихідних параметрів, отриманий у результаті вимірів профілю паротворення в комірках; M – статистична модель стану в локальній точці; a – параметри статистичної моделі; C – мережа Петрі; k номер дискретного моменту часу.

Наведемо етапи методу МНГТ.

1. На першому кроці ітерації ($I=1$) визначаємо початкову схему вимірів і множину T її точок.

2. Визначаємо об'ємний паровміст на I -му кроці ітерацій, розв'язуючи систему лінійних алгебраїчних рівнянь вигляду

$$\begin{cases} b_{11}\alpha_1 + b_{12}\alpha_2 + \dots + b_{1m}\alpha_m = z_1 \\ b_{21}\alpha_1 + b_{22}\alpha_2 + \dots + b_{2m}\alpha_m = z_2 \\ \vdots \\ b_{l1}\alpha_1 + b_{l2}\alpha_2 + \dots + b_{lm}\alpha_m = z_l \end{cases}, \quad (13)$$

де m – загальне число розглянутих точок; b_{ji} – коефіцієнт, що приймає значення з множини $\{0;1\}$; α_i – значення параметра в i -й точці; z_j – вимір, що відображає j -й датчик ($j = \overline{1,l}; l=m$) за обраним напрямком.

3. Знаходимо множину $M_{\max(1)}$ НГТ, для яких об'ємний паровміст α_i не попадає в діапазон $\bar{\alpha} \pm 3\sigma_\alpha$,

$$\sigma_\alpha = \frac{(\alpha^{\text{don}} - \bar{\alpha})}{3} \left[1 + \frac{f_{H_2O}}{\ln p(\bar{\alpha})} \right]. \quad (14)$$

4. Визначаємо множину $M_{\max}$ НГТ на I -му кроці ітерацій, розв'язуючи таблицю покриттів.

Для схеми виміру будуємо таблицю B покриттів, j -й стовпець ($j = \overline{1,m}$) якої відповідає j -й точці на лінії спостереження, останній ($m+1$)-й стовпець – максимальному значенню параметра d_i (середні значення діаметра пухирця пари, розраховане за показами оптичної ВІС) у спостережуваних секторах, i -й рядок ($i = \overline{1,l}; l=m$) – множини M_i спостережуваних i -м датчиком точок. Останній ($l+1$)-й рядок відображає ймовірності, розраховані в результаті вимірів. Елемент b_{ij} таблиці покриттів, що перебуває на перетині i -го рядка і j -го стовпця, приймає значення з множини $\{0, 1\}$

$$b_{ij} = \begin{cases} 0, & \text{якщо } b_{ij} \notin M_i \\ 1, & \text{якщо } b_{ij} \in M_i \end{cases}. \quad (15)$$

5. Знаходимо множину $M_{\max(2)}$ НГТ, для яких параметр d_i не попадає в діапазон $\bar{d} \pm 3\sigma_d$,

$$\sigma_d = \frac{\bar{d}}{3} \cdot \frac{(\alpha^{don} - \alpha_i)}{\alpha_i} \left[1 + \frac{f_{H_2O}}{\ln p(\alpha_i)} \right]. \quad (16)$$

6. Для всієї множини НГТ $M = M_{max(1)} \cup M_{max(2)}$ зіставляємо одиничні ймовірності pp_i виходу з-під контролю процесу паротворення. Для кожної j -ї точки множини $T \setminus M$ за функцією щільності розподілу параметра $\bar{\alpha}$ знаходимо ймовірність p_j появи значення α_j , визначаємо $pp_j = 1 - p_j$. Ймовірностям pp_j зіставляємо колірний аналог від червоного до фіолетового за ступенем зменшення небезпеки. Розраховані величини і координати відображають на картограмі активної зони реактора.

7. Якщо не всі задані схеми вимірів переглянуто, то п.2.

8. Якщо $((I < 3) \& (M \neq \emptyset))$, то $I := I + 1$, визначаємо множину схем вимірів (кількість схем не повинне перевищувати потужності множини M , кожна схема задає множину T точок виміру) і переходимо до п.2.

9. Для кожної НГТ із множини M виміряють два ортогональних профілі паротворення. За максимумами цих профілів визначають координати НГТ каналів.

10. Розраховані величини і координати відображають на картограмі активної зони реактора.

Опишемо процес створення прогнозної моделі тенденції процесу запарювання каналу активної зони реактора.

1. Аналіз взаємозв'язку між питомою ентропією s із системи та експериментальними акустичними спектральними характеристиками. Із графіків рис.1 видно, що в діапазоні частот $f = 2 \div 5$ кГц до початку поверхневого кипіння ($q \leq 0,6 \cdot 10^6$ Вт/м²) при відповідному нормуванні всі характеристики мають один нахил, що визначає значення коефіцієнта

$$B = \frac{\Delta q}{\Delta A} \cdot k_{norm} = \frac{\Delta q}{\Delta T}, \quad (17)$$

$$\Delta s = \frac{\Delta q}{T} = \frac{\Delta \alpha}{1 - \alpha} B, \quad (18)$$

де ΔA – зміна S_A спектральної щільності флуктуації акустичного шуму при зміні питомої щільності теплового потоку Δq ; ΔT – зміна температури теплоносія на виході каналу при зміні Δq ; k_{norm} – коефіцієнт нормування, що залежить від конструктивних особливостей конкретного реактора; q – питома щільність теплового потоку; T – температури теплоносія на виході каналу; α – об'ємний паровміст.

Максимальна зміна питомої ентропії $\Delta s_{max} = B$.

2. Визначення температури T_{HK} початку поверхневого кипіння при поточних значеннях температури теплоносія T , з огляду на функціональну залежність температури кипіння від тиску $T_s = f(P)$ і температури палива T_Γ ,

$$\Delta T = T_\Gamma - T_s, \quad T_{HK} = T + \Delta T. \quad (19)$$

3. Побудова робочої прямої на T - s діаграмі (рис. 4).

Рівняння робочої прямої, проведеної через точки А и D (рис. 4), має вигляд

$$T(s) = \frac{T_{KK} - T_{HK}}{s_{KK} - s_{HK}} (s - s_{HK}) + T_{HK} . \quad (20)$$

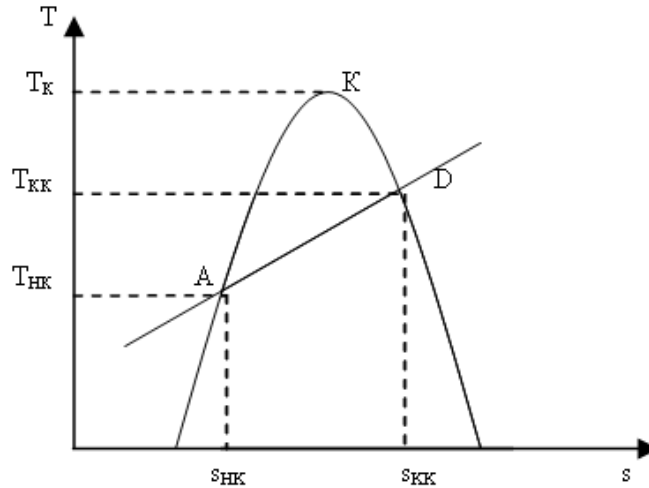


Рисунок 4 – Побудова робочої прямої на T - s діаграмі

4. Прогнозування об'ємного паровмісту α при поверхневому кипінні ($T_{HK} < T < T_s$) у випадку зміни температури теплоносія ΔT .

$$\alpha = \frac{\alpha_{HK} + \frac{\Delta s}{B}}{1 + \frac{\Delta s}{B}} , \quad (21)$$

де $\alpha_{HK} = 1,17 q^{0,35} / p^{0,15} (\rho w)^{0,15}$, p – тиск у першому контурі; ρw – масова швидкість.

5. Прогнозування масового паровмісту у випадку зміни температури теплоносія ΔT для області поверхневого кипіння ($x_0 < x < 0$, $T_{HK} < T < T_s$),

$$x = x_{HK} \left(1 - \frac{\alpha^{0,74}}{\alpha_{HK}} \right) . \quad (22)$$

6. Прогнозування питомої щільності теплового потоку $q_{прог}$ при поверхневому кипінні ($T_{HK} < T < T_s$) у випадку зміни температури теплоносія на ΔT . На підставі поточної інформації про значення q і T по робочій прямій на T - s діаграмі визначаємо $\Delta q = \Delta s(T + \Delta T)$ і розраховуємо прогнозне значення

$$q_{прог} = q + \Delta s(T + \Delta T) . \quad (23)$$

Фізичний зміст робочої прямої на $T-s$ діаграмі може бути визначений у такий спосіб. Для газів процес підведення теплоти може бути наближений до ізотермічного, якщо він буде складатися із ізобаричного процесу підведення тепла й адіабатичного розширення, що чергуються в невеликому інтервалі тисків (рис.5(а)). Чим більше таких щаблів і чим менше розширення в кожному із щаблів, тим ближче крива процесу, що представляє собою пилкоподібну лінію, до ізотерми. Для активної зони реактора у випадку неконтрольованого підведення тепла (несвоєчасному відводі пари й газів) у позаштатних ситуаціях процес може бути представлений рис.5(б).

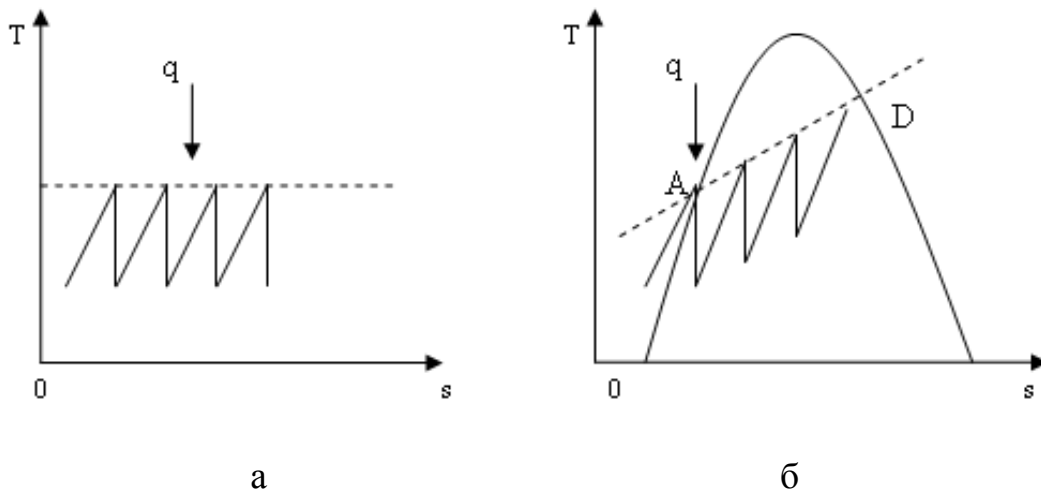


Рисунок 5 – Ізобарно-адіабатичний процес підведення тепла для теплового двигуна або ядерного реактора в проектному режимі (а); процес підведення тепла для ядерного реактора в позаштатних ситуаціях (б)

Відповідно до робочої прямої AD (рис. 6(а)), точка K , що визначає критичну температуру, зміщується в точку K' з координатами $s'_{K'} = s_{HK} + \Delta s_{max}/2$ ($\Delta s_{max} = B$) і $T'_{K'}$.

Для знаходження критичної точки C , що визначає $q_{кр}$ критичну щільність теплового потоку, виділимо два класи станів активної зони реактора у випадку виникнення поверхневого кипіння: 1) криза теплообміну відсутня 2) наявність кризи теплообміну. Як параметр стану системи приймемо ентропію. У припущенні, що розподіл усередині класів показника s описується нормальним законом з математичним очікуванням s_{HK} для першого і $s'_{K'}$ для другого класу і однаковою дисперсією σ^2 . На рис. 6(б) показані функції щільності розподілу ентропії для цих класів. Точка $s_{кр}$ перетину функцій щільності розподілу відповідає ентропії системи в стані, для якого ймовірності кризи теплообміну і його відсутності рівні, тобто визначає $q_{кр}$.

Координати точки C (рис. 6(а)) на робочій прямій

$$s_{кр} = (s_{HK} + s'_{K'})/2 = s_{HK} + B/4 \quad (24)$$

і $T_{кр}$ ($\Delta s = B/4$, $q = q_{HK}$, $\Delta T = T_{кр} - T_{HK}$) дозволяють розрахувати $\alpha_{кр}$, $x_{кр}$, $q_{кр}$ за формулами (21, 22, 23).

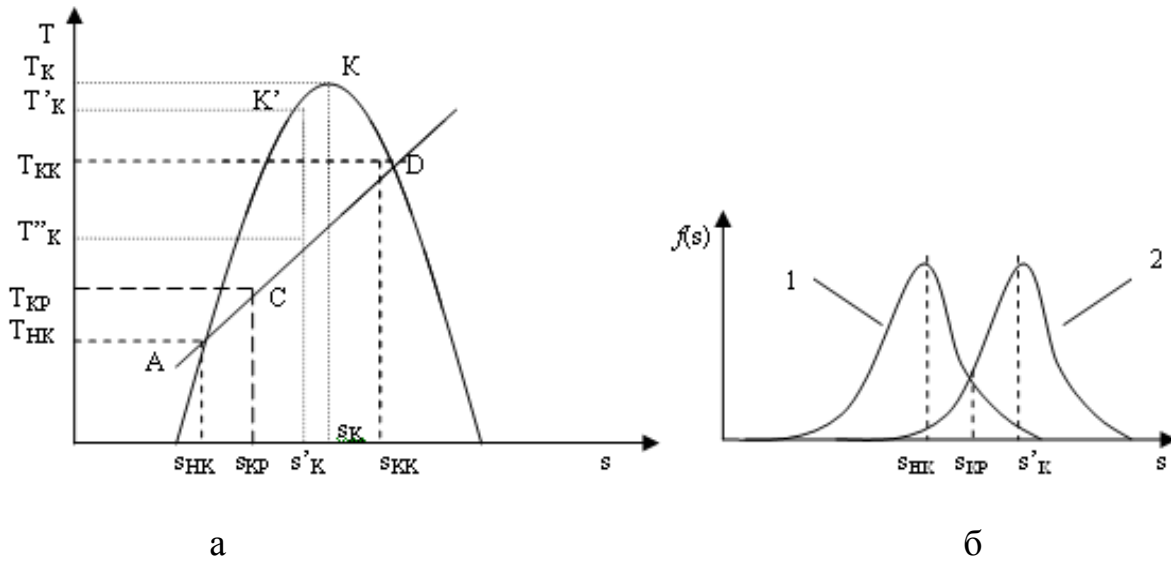


Рисунок 6 – Криза теплообміну: побудова критичної точки C на робочій прямій T–s діаграми (а); функції щільності розподілу ентропії для наступних класів ситуацій: крива 1– криза теплообміну відсутня, крива 2 – криза теплообміну присутня (б)

Для одержання інформації про стан каналів активної зони реактора запропоновано застосовувати оптичну систему спостереження з використанням волоконно-оптичних датчиків (ВОП-датчиків). При побудові схеми активізації оптичної системи спостереження виникає задача визначення вектора $U\mathcal{G}=(u\varphi_1, u\varphi_2, \dots, u\varphi_k)$ керуючого впливу для ВОП-датчиків у класі моделей з дискретним часом як перетворення

$$U\mathcal{G}=F(SA[k], SA[k-1], C, k), \quad (25)$$

де F – перетворення на основі розширення стохастичної МП; SA – вектор стану реактора, що описує розподіл об'ємного паровмісту $SA=(\alpha_1, \alpha_2, \dots, \alpha_m)$; C – мережу Петрі; k – номер дискретного моменту часу.

Оскільки ВОП-датчики стаціонарні, то елементи керуючого вектора $U\mathcal{G}$ приймають значення з множини $\{0;1\}$ (0 – вимір не проводиться, 1 – вимір проводиться).

Задача нетермінального керування тепловою потужністю ядерного реактора як стохастичної системи, описуваної МП, полягає у визначенні вектора $UX(SA, sp, U)$ координат найбільш "гарячих" точок значень параметрів на інтервалі часу $[t_1; t_2]$ і переміщенні компенсаційних стрижнів у відповідності отриманими координатами, що задовольняє заданому критерію оптимальності при наявності обмеження на керування.

Критерій мінімуму середнього квадрата помилки при заданих обмеженнях має вигляд:

$$I_o = \min_{UX(t_2)} M[(\hat{Q}(t_2) - Q_T(t_2))^T (\hat{Q}(t_2) - Q_T(t_2)) | UX(t_2), SA(t_1), t_1 < t_2] \quad (26)$$

де $\hat{Q}(t_2)$ – прогнозований вектор стану системи (вектор теплової потужності каналів активної зони); $Q_T(t_2)$ – теоретичний необхідний вектор стану системи; $SA(t_1)$ – вектор спостереження; $UX(t_2)$ прогнозований вектор керування для стрижнів системи компенсації надлишкової реактивності (КС).

Для керування оптичною вимірювальною системою пропонується два критерії:

– мінімізація ризику R виникнення кризи теплообміну при заданому (номінальному) рівні теплової потужності $Q_p^{ном}$

$$R = \max_i p_i \rightarrow \min, \quad (27)$$

$$p_i = \begin{cases} 1, & \text{якщо } \Delta\alpha_i / \alpha_i > b \\ z \cdot \Delta\alpha_i / \alpha_i, & \text{якщо } 0 < \Delta\alpha_i / \alpha_i \leq b \\ 0, & \text{якщо } \alpha_i = 0 \end{cases} \quad (28)$$

де p_i – імовірність появи кипіння в комірці ZH_i ; α_i – об'ємний паровміст в комірці ZH_i ; $\Delta\alpha_i$ – зміна α_i за інтервал часу $\Delta\tau$ (крок моделювання); z – заданий коефіцієнт; b – задана межа.

– мінімізація кількості циклів вимірів N ВОП-датчиками з метою одержання інформації, достатньої для ідентифікації стану кипіння в активній зоні реактора, за умови, що кількість датчиків значно менше числа комірок ($k \ll m$). Завдання кожного циклу полягає у вимірі α_i для максимального числа комірок активної зони з урахуванням їх ранжирування за ймовірністю p_j

$$\sum_{j=1}^{N_n} p_j^{(n)} w_j^{(n)} \rightarrow \max, \quad p_j^{(n)} \in SZH^{(n)} \quad (29)$$

де $SZH^{(n)}$ – множина спостережуваних комірок у n -му циклі; N_n – потужність множини $SZH^{(n)}$; $p_j^{(n)}$ – імовірність появи кипіння в j -й комірці множини $SZH^{(n)}$; $w_j^{(n)}$ – коефіцієнт використання j -й комірки множини $SZH^{(n)}$ у попередніх циклах керування.

Розроблено схему адаптивної системи керування тепловою потужністю ядерного реактора (ЯР) (рис.7) і відповідну їй модель на основі МНГТ і розширення МП, що дозволяє враховувати стохастичний характер процесу теплообміну. Здійснено порівняльний аналіз діагностики внутрішньо-реакторних аномалій, пов'язаних з порушенням теплообміну, існуючими ВІС і ВІС із адаптивним керуванням на базі МНГТ і МП, на основі якого зроблено висновок, що використання пропонованої адаптивної системи керування оптичною ВІС дозволяє приблизно в 10÷20 разів підвищити швидкодію СВРК. Зокрема, для 900 технологічних каналів при часі обробки інформації від оптичного датчика 0,02с і швидкодії програми керування оптичною системою не більше 0,02с сумарний час обробки інформації становить 1,82с на відміну від 36с для

існуючих СВРК. Розроблено методики «Експлуатація ядерного реактора ВВЕР. Метод ідентифікації внутрішньо-реакторних аномалій на основі показів оптичної вимірювальної системи» і «Експлуатація ядерного реактора ВВЕР. Модель прогнозування тенденції процесу запарювання каналу активної зони ядерного реактора».

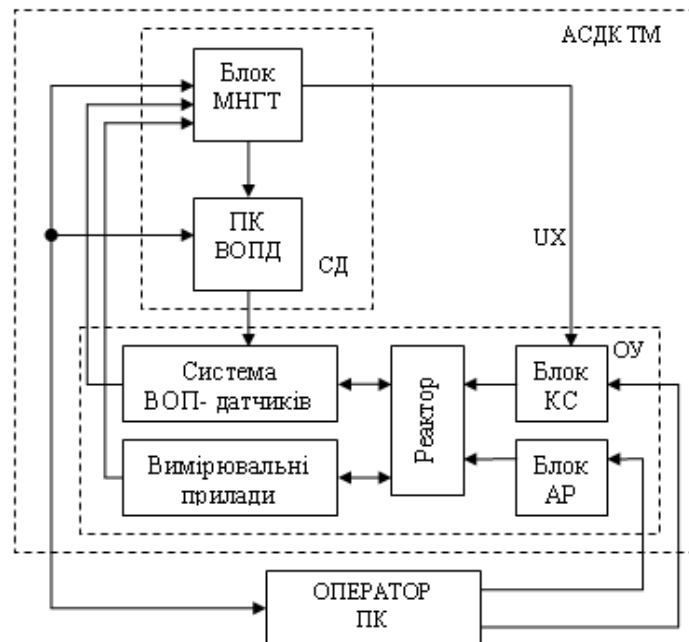


Рисунок 7 – Узагальнена схема адаптивної системи керування тепловою потужністю ЯР

У п'ятому розділі наведено методологію побудови автоматизованих систем контролю і керування реакторною установкою на базі МП.

Використання розширених МП дозволяє одночасно з моделюванням випадкових процесів моделювати невизначеність, при цьому застосовуючи різні алгоритми навчання нейромережної моделі об'єкта керування. Таким чином, реалізується самонавчання СІК в процесі керування об'єктом при збільшенні потужності моделювання. У роботі пропонується ввести п'ять рівнів абстракції моделі СІК РУ: 0) СІК як адаптивна оптимальна система автоматичного керування (АОСАК), об'єктом керування якої є нейронна мережа; 1) рівень взаємозв'язку режимів роботи СІК; 2) режими роботи СІК; 3) блок нейронної мережі; 4) модуль нейронів як неподільний елемент системи. Відповідно до ієрархії моделі визначено такі типи алгоритмів: 1) алгоритми роботи з декларативною пам'яттю; 2) алгоритми обробки результатів виконання третього типу алгоритмів; 3) адаптивні алгоритми оптимізації параметрів і структури; 4) алгоритми функціонування нейронного модуля, в основі опису якого лежить система диференціальних рівнянь.

Запропоновано структуру опису СІК як АОСАК на базі МП (рис.8) з використанням ієрархії алгоритмів на основі адаптивних алгоритмів. Позначення на рис.8: БЗК – блок зорової кори; БАП – блок архівної пам'яті; БПТР – блок ухвалення поточного рішення; БК – блок координації; БМДП (УУ) – блок медіаторної і декларативної пам'яті. Така СІК дозволяє побудувати гнучку без порушення цілісності функціонування функціонально-структурну модель СІК різного цільового призначення. Наведено приклади опису МП можливих режимів роботи і схема їх взаємозв'язку.

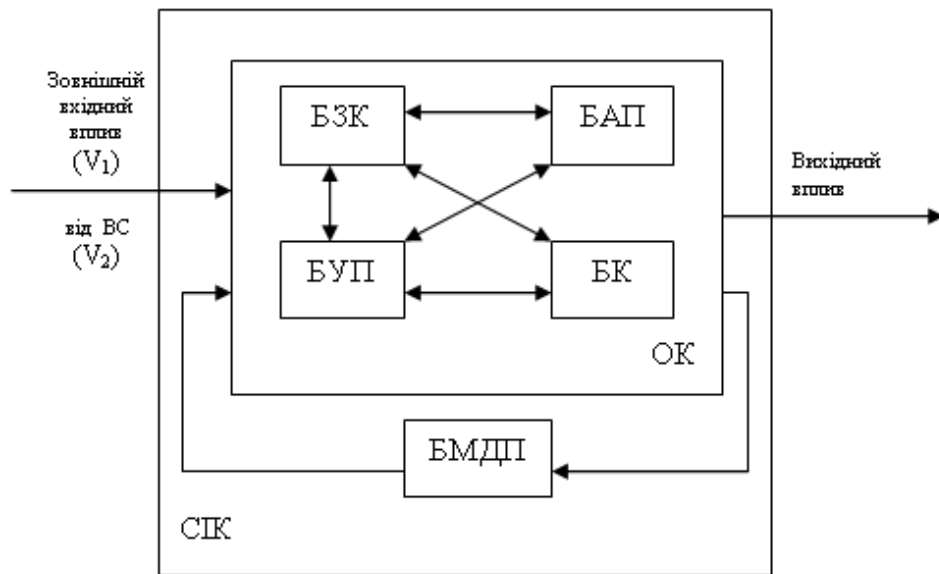


Рисунок 8 – Функціональна схема СТК як АОСАР

Розроблено модель нейронного модуля як атомарного елемента нейронної мережі, описаної математичним апаратом розширення МП. Модель побудована на основі концепції організації свідомості Маунткласа. Перехід МП, якому зіставлений нейронний модуль із вхідними та вихідними позиціями наведено на рис. 9, де використано наступні позначення: $z_i (i = \overline{1, m})$ – сигнали від вимірювальної системи (датчиків); G_0, G – центрований білий гаусів шум для задавання випадкового параметра (розміру нейронного модуля) і випадкового зовнішнього впливу; $y_i (j = \overline{1, n})$ – сигнали з виходів інших нейронних модулів.

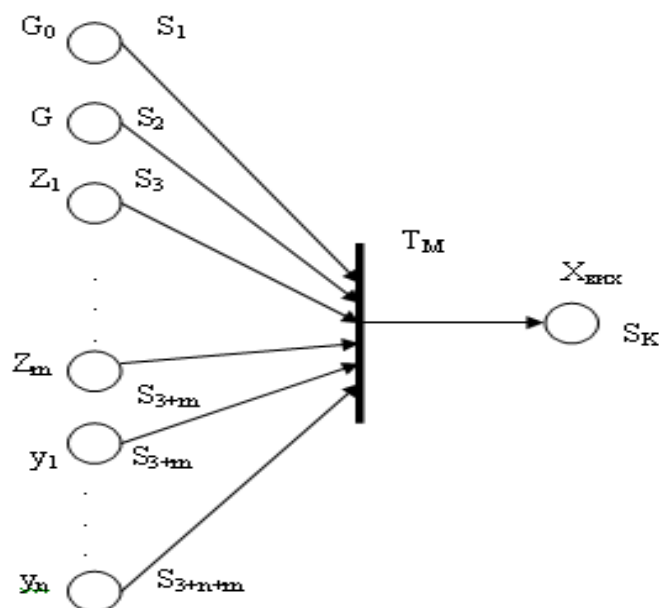


Рисунок 9 – Складений перехід МП у моделі нейронної мережі

Нейронний модуль будемо розглядати як надпровідника зі змінним часом активізації $T_a(X, V_0)$ – часом настання явища надпровідності, що залежить від відносного сумарного вхідного впливу та розміру нейронного модуля V_0 .

Модель описують наступними математичними залежностями:

– відносний сумарний вхідний вплив при граничному значенні вхідного сигналу X_{np}^{Bx} :

$$X = \left(\sum_{i=1}^m z_i + \sum_{j=1}^n y_j \right) / X_{np}^{Bx}; \quad (30)$$

– час активізації

$$T_a(X, V_0) = \begin{cases} T_0 \frac{V_0}{X} e^{-\frac{V_0}{X}}, & \text{якщо } X \geq 1, \\ \infty, & \text{якщо } X < 1 \end{cases}; \quad (31)$$

– період функціонування нейронного модуля $T_0 = T_H(1 + \ln(V_0))$, де T_H – період функціонування нейрона;

– час активізації одного нейрона, відповідно $T_a = T_H e^{-1}$.

Визначено три фази функціонування нейронного модуля з параметрами:

1) фаза росту активізації (РА)

– тривалість фази $T_{PA} = T_a$;

– кількість активних нейронів до моменту часу T_a

$$V_a^{(1)}(t) = V_0(1 - e^{-\frac{t}{T_a}}) \quad (0 \leq t \leq T_a); \quad (32)$$

– кількість активних нейронів при явищі надпровідності, тобто при активізації приблизно двох третин обсягу модуля ($t = T_a$)

$$V_a^{(1)}(T_a) = V_0(1 - e^{-1}); \quad (33)$$

2) фаза повної активності (ПА) з параметрами:

– тривалість фази $T_{PA} = T_0 - 2T_a$;

– кількість активних нейронів постійно

$$V_a^{(2)}(t) = V_0 \quad (T_a \leq t \leq T_n, \quad T_n = T_0 - T_a); \quad (34)$$

3) фаза повного спокою (ПС)

– тривалість фази $T_{PII} = T_a$;

– кількість активних нейронів

$$V_a^{(3)}(t) = V_0(1 - e^{-\frac{T_0 - t}{T_a}}), \quad T_n \leq t \leq T_0. \quad (35)$$

Визначено залежність числа активних нейронів модуля в часі від фази функціонування (рис.10). Внутрішня енергія E_{BH} моделі нейронного модуля (рис.11) при повній його активності визначається співвідношенням

$$E_{BH}(t) = \frac{V_0 m_0 c^2}{2} + \int_{T_a}^{T_n} N(t) dt - F \int_{T_a}^{T_n} E_{BH}(t) k(t) dt, \quad (36)$$

$$k(t) = \frac{1}{\sigma \sqrt{2\pi}} e^{-\frac{(t-T_c-t_H)^2}{2\sigma^2}}, \quad E_{BH}(t) = E_n + E_{III}(t) - E_a(t), \quad (37)$$

$$T_c = \frac{T_0}{2}, \quad \sigma = \frac{T_0 - 2T_a}{6},$$

де V_0 – розмір нейронного модуля; m_0 – маса нейрона; c – швидкість світла; $N(t)$ – зовнішній вплив, що є джерелом енергії; F – максимальна частка активованої внутрішньої енергії ($F=e^{-1}$); $k(t)$ – функція щільності розподілу активної енергії на інтервалі часу $[T_a; T_n]$; T_a – час активізації; T_n – час спокою; E_n – потенційна енергія клітини; E_{III} – зовнішня енергія від джерела живлення; E_a – активна енергія; t_H – час активізації переходу T_M у системі.

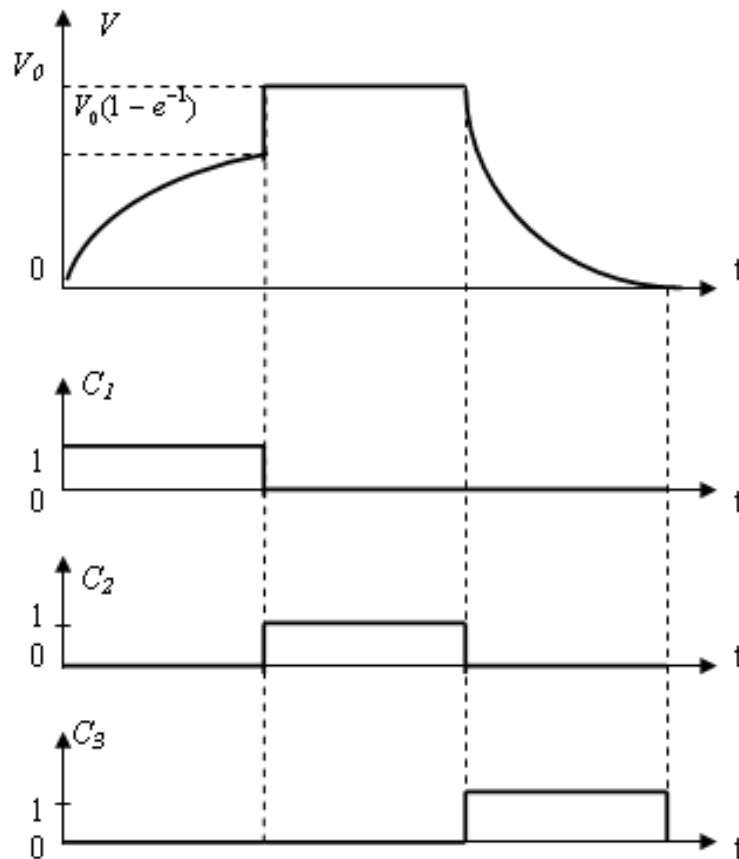


Рисунок 10 – Графік зміни числа V_0 активних нейронів модуля в часі і допоміжних сигналів фаз РА(C_1), ПА(C_2) і ПС(C_3)

Модель нейронного модуля, зіставлена складеному переходу T_M у мережі Петрі (рис.11), об'єднує наступні функції:

$$T_1: \quad \dot{N}(t) = G(t), \quad N(0) = sX_{np}^{Bux}, \quad (38)$$

$$s = \begin{cases} 1, & \text{якщо зовнішній вплив "заохочення"} \\ -1, & \text{якщо зовнішній вплив "покарання"}, \\ 0, & \text{зовнішній вплив "пасивний"} \end{cases}$$

$$T_2: \quad \dot{V}_0(t) = G_0(t), \quad V_0^{(i)}(0) = V_c / L, \quad i = \overline{1, L}, \quad (39)$$

де V_c – загальна кількість нейронів у системі; L – число модулів; $V_0^{(i)}$ – i -й елемент вектора V_0 .

$$T_3: \quad \dot{E}_{BH}(t) = N(t) - E_{BH}(t) \cdot F \cdot k(t), \quad E_{BH}(0) = \frac{V_0 m_0 c^2}{2}, \quad X_{eux} = \dot{E}_a = E_{BH}(t) \cdot F \cdot k(t). \quad (40)$$

$$T_4: \quad t_H := \infty.$$

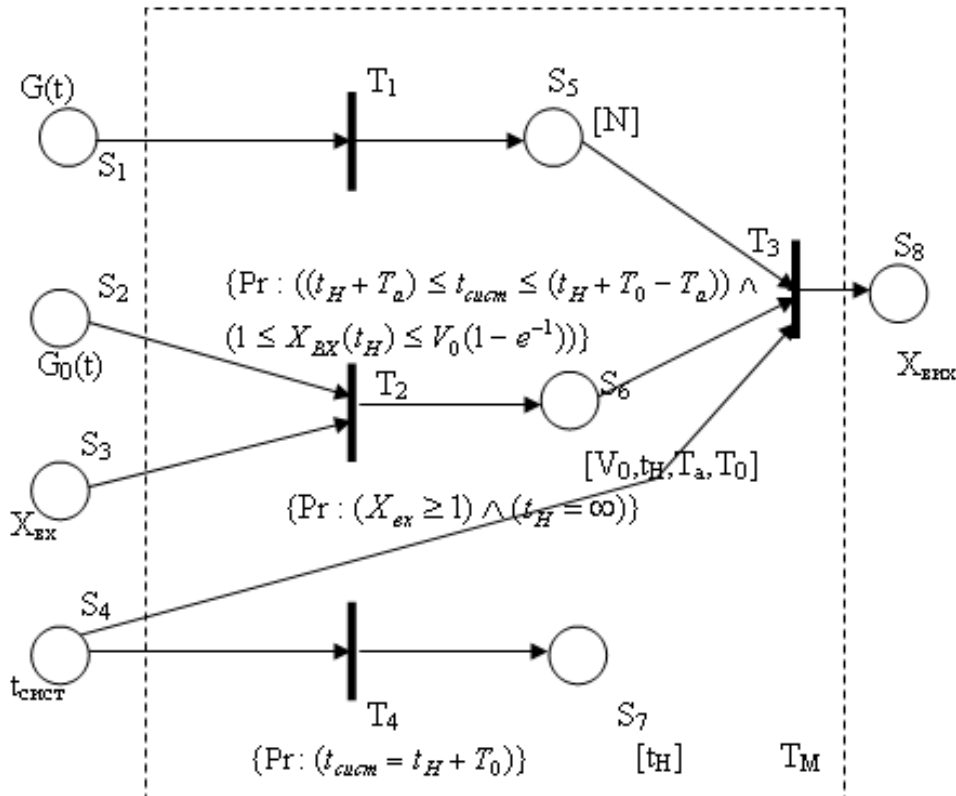


Рисунок 11 – Модель нейронного модуля, зіставлена складеному переходу T_M у мережі Петрі моделі нейронної мережі

Були зроблені наступні висновки про функціонування нейронних модулів: 1) швидкодія кори головного мозку значно перевищує сумарну швидкодію нейронів, що її утворюють; 2) збільшення швидкодії пов'язане не зі збільшенням вхідної енергії, а із зростанням розмірів модулів, усередині яких нейрони тісно взаємозалежні; 3) активізація модуля нейрона робиться малими вхідними впливами.

Процес навчання мережі нейронних модулів ґрунтується на використанні двох алгоритмів: адаптивного алгоритму параметричної оптимізації стохастичних систем та їх з'єднань на основі запропонованого розширення МП; адаптивного алгоритму структурної оптимізації стохастичних систем та їх з'єднань на основі запропонованої МП.

Вектор розмірів нейронних модулів є вектор випадкових параметрів

$$\dot{V} = G_0(t), \quad V(t_0) = V^{cp}, \quad (41)$$

де V – вектор розмірів нейронних модулів; G_0 – вектор шуму, для якого $\sum_i g_0^{(i)}(t) = 0$ ($g_0^{(i)}$ – i -й елемент вектора G_0 , що відповідає i -му нейронному модулю).

$$g_0^{(i)}(t) = g^{(i)}(t) - \frac{\sum_{i=1}^n g^{(i)}(t)}{n}, \quad (42)$$

де $g^{(i)}(t)$ – центрований гаусівський білий шум.

На вектор параметрів V накладається обмеження $V_H^{(i)} \leq V_i \leq V_B^{(i)}$, де $V_H^{(i)}, V_B^{(i)}$ – нижня і верхня границя V_i , відповідно.

Швидкодія пов'язана з розміром нейронного модуля $T_a^{(i)} = f(V_i)$.

Швидкодію (вектор T_a) можна розглядати як вектор стану системи. Середня швидкодія системи

$$T_c = \sum_l p_l \sum_{j \in l} \hat{m}_{T_a}^{(j)}, \quad (43)$$

де $\hat{m}_{T_a}^{(j)}$ – середня швидкодія j -го нейронного модуля l -ї структури МП, імовірність появи якої дорівнює p_l .

Теоретична необхідна середня швидкодія системи задана і дорівнює $T_c^{(T)}$, що становить частки секунди. Критерій параметричної оптимізації – мінімум середнього квадрата відхилення T_c від $T_c^{(T)}$ при векторі керування параметрами (розмірами нейронних модулів) UV .

При структурній оптимізації розміри нейронних модулів приймаються постійними, визначеними в результаті параметричної оптимізації. Як теоретично необхід-

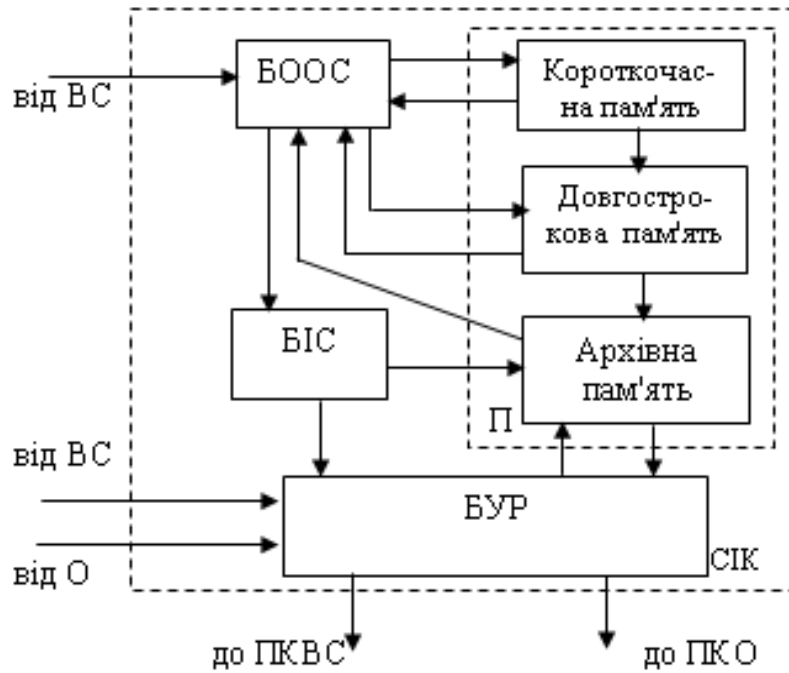


Рисунок 13 – Структура програмно реалізованого СІК на базі МП

Прийняті на рис.12, 13 позначення: СІК – система інтелектуального керування; ОС – навколишнє середовище; ВС – вимірювальна система; O_i , $i = \overline{1, n}$ – паралельно функціонуючі об'єкти; D_i , $i = \overline{1, n}$ – системи датчиків; $\Phi_1, \Phi_2, \Phi_3^{(i)}$, $i = \overline{1, n}$ – фільтри; $\hat{Y}_{TOi}^T$, $i = \overline{1, n}$ – поточні прогнозовані теоретичні вектори станів об'єктів; $ПКО_i$, $i = \overline{1, n}$ – пристрої керування об'єктами, що здійснюють адаптивне керування за заданими законами $\hat{Y}_{TOi}^T$ ($i = \overline{1, n}$) на інтервалі часу $[t_1; t_2]$; $\hat{Y}_{TIC}^T$ – поточний прогнозований теоретичний вектор станів; ПКВС – пристрої керування ВС; F, N, G_i ($i = \overline{1, n}$) – завади; БООС – блок опису образу ситуації; БІС – блок ідентифікації ситуації; БУР – блок ухвалення рішення; П – пам'ять.

Розроблені модель комплексу складних об'єктів керування на основі МП, що дозволяє знизити розмірність задачі, і адаптивний алгоритм ухвалення рішення.

Виконано порівняльний аналіз для теоретико-алгоритмічного рівня ШНМ на основі нейронів (НЕ), як елементів, та МНМ на базі МП.

При класифікації ШНМ по розмірності моделі на малі (МШНМ - $1 \div 10$ нейронів), середні (СШНМ - $10 \div 10^3$ нейронів), більші (БШНМ - $10^3 \div 10^5$ нейронів), надвеликі (СБШНМ - $10^5 \div 10^8$ нейронів), ультрабільші (УБШНМ - більше 10^8 нейронів) можна зробити наступні висновки: 1) для МШНМ і СШНМ застосування МНМ на базі МП або неможливо, або недоцільно; 2) для БШНМ застосування МНМ на базі МП дає зниження розмірності мережі в середньому на 4 порядки в порівнянні з ШНМ на основі НЕ при більшій високій алгоритмічній складності; 3) для СБШНМ використання МНМ на базі МП у порівнянні з ШНМ на основі НЕ приводить до

зниження розмірності моделі на 4-6 порядків і складності алгоритму до 4 разів; 4) для УБШНМ у цей час використання як атомарний елемент НЕ недоцільно, що визначає перспективність застосування МНС на базі МП.

У шостому розділі описано програмна система тренінгу оперативного персоналу перевантажувальних машин для реакторів типу ВВЕР на основі моделей МП.

На вибір системи наведення великий вплив робить конструкція активної зони реактора. У тих випадках, коли місце розташування кожного каналу є строго постійним, можна скласти точну картину розташування каналів. У цьому випадку вибір системи наведення не викликає скільки-небудь серйозних утруднень. Інша річ, коли положення каналів невідомо, і під дією теплових і фізичних напружень кожен канал відходить від свого початкового положення. При автоматичному наведенні перевантажувальної машини використання здатності моделей на базі МП до самонавчання дозволяє скоротити терміни робіт з перевантаження ядерного палива і, отже, підвищити безпеку цих робіт. У процесі функціонування перевантажувальної машини за рахунок зміни кроку дискретизації при навчанні МП автоматично підвищується точність наведення.

При дистанційному наведенні необхідно, щоб оператор швидко визначав крок і напрямок руху для виведення перевантажувальної машини в точку із заданими координатами в активній зоні або в сховищі відпрацьованих ТВЗ. Подібні навички розвиває запропонована програмна система тренінгу.

ВИСНОВКИ

Вирішено важливу науково-прикладну проблему проблеми автоматизації керування реакторними установками на основі створення моделей об'єктів і пристроїв керування зі змінною випадковою структурою на безлічі стохастичних елементів, для яких набір структур є заздалегідь невизначеним. Це дозволило розробити на базі запропонованих моделей методи для побудови систем інтелектуального керування високої швидкодії (до сотих і десятих часток секунд), які використовують принципи концепції організації свідомості Маунткасла, що визначають модульну структуру нейронної мережі, і властивість надпровідності нейронного модуля. Така швидкодія дає можливість забезпечити безпеку керування РУ в аварійних ситуаціях.

На основі проведених досліджень отримані такі наукові і практичні результати:

1. Удосконалено математичний апарат мереж Петрі шляхом розробки розширення, що дозволяє виконувати перевірку на максимум імовірності передачі маркера за допомогою введення стримуючих подійових гіпердуг, додаткових атрибутів й об'єднання атрибутів стохастичних і функціональних мереж Петрі, що дозволило розширити клас моделей об'єктів і пристроїв керування до стохастичних систем і їх з'єднань і, як наслідок, підвищити на порядок швидкодію керування РУ.

2. Запропоновано критерій керованості систем, що описані математичним апаратом мереж Петрі, який на відміну від існуючих критеріїв дає можливість знизити розмірність завдання перевірки керованості об'єкта за рахунок можливостей апарата

мереж Петрі та дозволяє підвищити швидкодію визначення переходу ядерного реактора до некерованого стану в 5-10 разів.

3. Запропоновано методи моделювання, фільтрації, структурної і параметричної ідентифікації стохастичних систем та їх з'єднань у термінах розробленого розширення МП, застосування яких дозволяє знизити витрати на обчислення за рахунок можливостей математичного апарата МП в 5-10 разів.

4. Удосконалено методи оптимізації параметрів та/або структури стохастичних систем та їх з'єднань на основі апарата мереж Петрі за квадратичним критерієм, що дозволило скоротити час рішення завдання термінального й нетермінального керування в 5-10 разів.

5. Розроблено моделі і методи побудови СІК на основі понять наступних сфер знань: фізіології людини; теорії автоматичного керування; штучного інтелекту; теорії мереж Петрі; теорії системного аналізу. Це дозволило розглядати системи штучного інтелекту як окремий випадок адаптивних оптимальних систем автоматичного керування і, як наслідок, підвищити ймовірність і скоротити час ухвалення правильного рішення в аварійній для РУ ситуації.

6. Розроблено модель нейронного модуля в рамках моделі стохастичної системи, яка виконана на основі розширення МП. Запропонована МНМ на базі МП із атомарним елементом – нейронним модулем, що має моделювальну здатність в $4\div 6$ разів вище при розмірі мережі $10^5\div 10^8$ нейронів, чим у сучасних ІНС на НЕ. Запропонована модульна нейронна мережа дозволяє моделювати мережі розмірністю $10^9\div 10^{12}$ нейронів зі швидкодією порівнянною з ІНС на НЕ розмірністю 10^5 .

7. Розроблено структуру системи керування АЕС як адаптивної оптимальної системи автоматичного керування (АОСАК) на базі СІК для комплексу складних об'єктів, що дозволяє підвищити швидкість ухвалення рішення в аварійній ситуації в 60-80 разів за умови, що загальне число параметрів 1000, а число параметрів, що змінили значення, не перевищує 10.

8. Розроблено математичну модель процесу запарювання каналу активної зони ядерного реактора ВВЕР, що дозволяє прогнозувати кризу теплообміну з урахуванням динаміки поведінки реакторної установки до початку поверхневого кипіння.

9. Розроблено метод ідентифікації внутрішньо-реакторних аномалій на основі вимірів оптичної інформаційно-вимірювальної системи, встановленої по периметру камери змішання – метод найбільш «гарячих» точок (МНГТ), що дозволяє оперативно одержувати інформацію про можливі порушення теплообміну в каналах активної зони реактора й підвищити швидкодію СВРК за рахунок зниження кількості вимірів параметрів в 10 разів.

10. Розроблено модель системи адаптивного керування тепловою потужністю ядерного реактора на основі діагностики внутрішньо-реакторних аномалій з використанням мереж Петрі і методу МНГТ, що дозволяє при порушенні теплообміну в активній зоні реактора підвищити швидкість одержання інформації в 10-20 разів у порівнянні з існуючими СВРК.

11. Розроблено діалогову систему тренінгу операторів перевантажувальних машин атомних станцій, використовуючи можливості математичного апарата розробле-

ного розширення МП, для учбово-наукового інституту атомної енергетики при СНУЯ-ЕтаП, що дозволяє підвищити швидкість операції дистанційного наведення в 2 рази.

Результати дослідження можуть бути використані при створенні систем діагностики і керування як РУ АЕС, так і різними видами транспортних РУ.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Качур С.А. Модель стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Проблемы управления и информатики. – 2002. – №1. – С.93-98.
2. Качур С.А. Структурная и параметрическая идентификация стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Проблемы управления и информатики. – 2003. – №3. – С.56-62.
3. Качур С.А. Структурная и параметрическая оптимизация на основе сетей Петри для совокупности измерительных систем с общим каналом наблюдения [Текст]/ С.А. Качур // УСиМ. – 2005. – №2 – С.13-16.
4. Качур С.А. Модель нейронного модуля как элемента стохастических систем на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2005. – №1. – С.125-129.
5. Качур С.А. Методология построения модели нейрокомпьютера на основе сетей Петри как адаптивной системы управления [Текст]/ С.А. Качур // Радіоелектроніка. Інформатика. Управління. – 2005. – №2. – С.89-92.
6. Качур С.А. Параметрическая оптимизация стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Радиоэлектроника и информатика. – 2005. – №3. – С.83-87.
7. Качур С.А. Адаптивное управление структурой сложных стохастических систем на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Радиоэлектроника и информатика. – 2005. – №4. – С.38-41.
8. Качур С.А. Критерий управляемости систем на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Радиоэлектроника и информатика. – 2006. – №2. – С.47-49.
9. Качур С.А. Имитационное моделирование стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2002. – Вып.5. – С.127-131.
10. Качур С.А. Адаптивная оптимальная система автоматического управления на базе нейрокомпьютера с использованием сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2003. – Вып.6. – С.78-81.
11. Качур С.А. Модульная организация нейронной сети на основе сетей Петри для описания пространственной ситуации [Текст]/ С.А. Качур // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2004. – Вып.7. – С.173-178.
12. Качур С.А. Принятие решений в адаптивных системах на базе нейрокомпьютера с использованием сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Оптимизация производственных процессов: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2005. – Вып.8. – С.92-98.

13. Качур С.А. Одноканальный квазиоптимальный фильтр на основе сетей Петри для стохастических систем и их соединений [Текст]/ С.А. Качур // Вест. СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2002. – Вып.36. – С.94-99.

14. Качур С.А. Адаптивный алгоритм принятия решения для системы автоматического управления на базе нейрокомпьютера с использованием сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Вест.СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2003. – Вып.49. – С.101-106.

15. Качур С.А. Обобщенный адаптивный алгоритм параметрической и структурной оптимизации стохастических систем и их соединений на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Вест.СевНТУ. Автоматизация процессов и управление: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2004. – Вып.57. – С.131-138.

16. Качур С.А. Метод оптимальной фильтрации процессов случайной структуры на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Вест. СевНТУ. Информатика, электроника и связь: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2002. – Вып.41. – С.176-181.

17. Качур С.А. Алгоритм идентификации пространственных ситуаций в системе распознавания образов на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Вест.СевНТУ. Информатика, электроника и связь: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2003. – Вып.47. – С.49-51.

18. Качур С.А. Организация нейронной памяти на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Вест.СевНТУ. Информатика, электроника и связь: Сб. науч. тр. – Севастополь, 2004. – Вып.60. – С.20-25.

19. Качур С.А. Многоканальный квазиоптимальный фильтр на основе сетей Петри для стохастических систем и их соединений [Текст]/ С.А. Качур// Сб. науч. тр. – Вып.6. – Севастополь: СНУЯЭиП, 2002. – С.157-162.

20. Качур С.А. Принятие решения о траектории движения на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Сб. науч. тр. – Вып.13. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2004. – С.176-180.

21. Качур С.А. Адаптивное управление параметрами и структурой сложных стохастических систем на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Сб. науч. тр. – Вып.14. – Севастополь: СНИЯЭиП, 2005. – С.142-148.

22. Качур С.А. Прогнозирующая графоаналитическая модель процесса поверхностного кипения в активной зоне ВВЭР [Текст]/ С.А. Качур // 3б. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Вып.2(30). – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – С.18-25.

23. Попов И.А. Метод идентификации паросодержания в камере смешения ядерного реактора ВВЭР [Текст]/ И.А. Попов, С.А. Качур // 3б. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Вып.2(30). – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – С.36-43.

24. Попов И.А. Адаптивное управление процессом кипения ядерного реактора ВВЭР на основе моделей сетей Петри и метода наиболее «горячих» точек [Текст]/ И. А. Попов, С.А. Качур // 3б. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Вып.3(31). – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – С.40-48.

25. Попов И.А. Идентификация процесса поверхностного кипения теплоносителя в активной зоне АЭУ с ВВЭР [Текст]/ И. А. Попов, С.А. Качур // 3б. наук. пр. СНУЯЕтаП. – Вып.4(32). – Севастополь: СНУЯЭиП, 2009. – С.68-76.

26. Качур С.О. Спосіб ідентифікації процесу кипіння в активній зоні ядерного реактора / С.О. Качур // Деклараційний патент на корисну модель. №54907. Україна. – 2010. – Бюл. № 22.

27. Качур С.О. Спосіб діагностики кризового стану в активній зоні реактора [Текст]/ С.О. Качур // Деклараційний патент на корисну модель. №57947. Україна. – 2011. – Бюл. № 6.

28. Качур С.А. Адаптивные системы управления с моделями на базе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Автоматика: материалы 10-й международной конференции по автоматическому управлению, Севастополь, 15-19 сентября 2003. – т.1. – С.142-143.

29. Качур С.А. Адаптивное управление параметрами и структурой сложных стохастических систем на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Автоматика: материалы 11-й международной конференции по автоматическому управлению, Киев, 27-30 сентября 2004. – т.3. – С.52-53.

30. Качур С.А. Адаптивные системы автоматического управления с использованием моделей на базе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Автоматизация: проблемы, идеи, решения: материалы международной научно-технической конференции, Севастополь, 14-17 сентября 2005. – С.142-144.

31. Качур С.А. Адаптивное управление структурой сложных стохастических систем на основе сетей Петри [Текст]/ С.А. Качур // Автоматика: материалы 12-й международной конференции по автоматическому управлению, Харьков, 30 мая-3 июня 2005. – т.1. – С.57-58.

32. Попов И.А. Адаптивные системы управления на базе сетей Петри с прогнозирующей моделью реактора для атомных энергетических установок [Текст]/ И.А. Попов, С.А. Качур // Прогресивна техніка і технологія: матеріали Х міжнародної науково-технічної конференції, Київ-Севастополь, 22-25 июня 2009. – С.70.

33. Качур С.А. Графоаналитическая модель процесса кризисного состояния запаривания канала активной зоны реактора ВВЭР [Текст]/ С.А. Качур // Прогресивная техника и технология: тезисы XII международной научно-технической конференции. – Киев-Севастополь, 11-25 июня 2012. – С.32.

АНОТАЦІЯ

Качур С.О. Автоматизація процесів керування реакторними установками на основі мереж Петрі. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.07 – автоматизація процесів керування. – Харківський національний університет радіоелектроніки, Міністерство освіти і науки України, Харків, 2013.

Дисертаційна робота присвячена вирішенню важливої науково-технічної проблеми безпеки керування високотехнологічними об'єктами – атомними електростанціями (АЕС).

Вперше запропоновано: моделі об'єкту (реакторної установки - РУ) і пристрою керування РУ, що описані як імовірнісні з'єднання стохастичних систем на основі

розширення мереж Петрі; критерій керованості систем, описаних математичним апаратом мереж Петрі; модель нейронного модуля змінного обсягу, що описується апаратом мереж Петрі як надпровідник зі змінним часом активізації; підхід до інтелектуального керування РУ з використанням модульної нейронної мережі; математична модель процесу запарювання каналу активної зони реактора. Удосконалено: математичний апарат мереж Петрі шляхом розробки розширення; метод ідентифікації внутрішньо-реакторних аномалій. Одержали подальший розвиток теоретико-імовірнісні методи оптимальних статистичних рішень для задач моделювання, фільтрації, ідентифікації та оптимізації структури та/або параметрів.

Розроблені в дисертації моделі й методи дозволяють підвищувати безпеку керування реакторною установкою та можуть бути використані на підприємствах ядерної енергетики.

Ключові слова: автоматизована система керування, безпека АЕС, реакторна установка, поверхнєве кипіння, система інтелектуального керування, мережі Петрі, параметрична і структурна ідентифікація, фільтрація, адаптивне керування, діагностика, вимірювально-інформаційні системи

АННОТАЦИЯ

Качур С.А. Автоматизация процессов управления реакторными установками на основе сетей Петри. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание научной степени доктора технических наук по специальности 05.13.07 – автоматизация процессов управления. – Харьковский национальный университет радиоэлектроники, Министерство образования и науки Украины, Харьков, 2013.

Диссертационная работа посвящена важной научно-технической проблеме автоматизации управления реакторными установками за счет создания моделей объектов и устройств управления переменной случайной структуры на множестве стохастических элементов, для которых набор структур заранее не определен, разработке на их основе критериев управляемости и методов построения автоматизированных систем управления, которые характеризуются высоким быстродействием в аварийных ситуациях.

Впервые предложены модели объекта (РУ) и устройства управления РУ, описанные как вероятностные соединения стохастических систем на основе расширения сетей Петри в отличие от существующих описаний на основе дифференциальных уравнений, что дает возможность снизить размерность модели процесса и повысить на порядок быстродействие управления процессами теплообмена в активной зоне реактора.

Впервые предложен критерий управляемости систем, описанных математическим аппаратом сетей Петри в отличие от существующих алгебраических критериев, что дает возможность снизить размерность задачи проверки управляемости объекта за счет возможностей аппарата сетей Петри и, как следствие, повысить быстродействие определения перехода ядерного реактора в неуправляемое состояние.

Впервые предложена модель нейронного модуля переменного объема, описываемого аппаратом сетей Петри как сверхпроводник с переменным временем активизации, который в отличие от атомарных элементов существующих нейронных сетей представляет собой функционально целостную совокупность взаимозависимых модулярных колонок, что дает возможность создания новой элементной базы для аппаратной реализации нейронных сетей и повышения моделирующей способности программно реализованных нейронных сетей.

Впервые предложен подход к интеллектуальному управлению реакторной установкой с использованием модульной нейронной сети, в котором в отличие от существующих методов учтена возможная связь нейронных модулей, что дает возможность повысить быстродействие процесса принятия решения в аварийных ситуациях для РУ.

Впервые предложена математическая модель процесса запаривания канала активной зоны реактора, которая в отличие от существующих теплофизических моделей позволяет для технологического канала прогнозировать основные параметры процесса теплообмена и определять параметры кризиса теплообмена до начала поверхностного кипения, что дает возможность получения дополнительного времени для принятия решения оператору АЭС в случае аварийной ситуации или для срабатывания устройств системы защиты при нештатной ситуации.

Усовершенствован математический аппарат сетей Петри путем разработки расширения, позволяющего выполнять проверку на максимум вероятности передачи маркера посредством введения сдерживающих событийных гипердуг, дополнительных атрибутов и объединения атрибутов стохастических и функциональных сетей Петри, что в отличие от существующих сетей Петри позволяет производить выбор наиболее вероятной структуры на уровне математического аппарата без перебора различных вариантов структур, что дает возможность повысить быстродействие систем управления.

Усовершенствован метод идентификации внутриреакторных аномалий, который в отличие от существующих по показаниям оптических датчиков, расположенных по периметру камеры смещения, на основе итеративного поиска определяет каналы, соответствующие максимумам пространственного распределения объемного паросодержания, что дает возможность снизить объем обрабатываемой информации и повысить быстродействие систем диагностики.

Получили дальнейшее развитие теоретико-вероятностные методы оптимальных статистических решений для задач моделирования, фильтрации, идентификации и оптимизации структуры и/или параметров, которые в отличие от существующих в качестве моделей процессов и устройств используют предложенное расширение сетей Петри, что дает возможность повысить быстродействие при решении этих задач в процессе управления реакторными установками.

Разработанные в диссертации модели и методы позволяют повышать безопасность управления реакторной установкой и могут быть использованные на предприятиях ядерной энергетики.

Ключевые слова: автоматизированная система управления, безопасность АЭС, реакторная установка, поверхностное кипение, система интеллектуального управления, сети Петри, параметрическая и структурная идентификация, фильтрация, адаптивное управление, диагностика, измерительно-информационные системы

ABSTRACT

Kachur S.A. Control process automation of nuclear power installations based on Petri nets. – Manuscript.

A thesis for the doctor degree in technical sciences in the specialty 05.13.07 – control process automation. – Kharkov national university of radio electronics, Ministry of Education and Science Kharkiv, 2013.

An important scientific problem of hi-tech objects safety control is solved in the dissertation work especially control of nuclear power installations (NPI).

Object models (NPI) and control systems of nuclear power installations are offered for the first time. The latter ones are described as probabilistic connections of stochastic systems based on Petri nets. A controllability criterion of the proposed systems is described by Petri nets models. A neuron module model of variable quantity based on Petri nets is proposed where the module is described as a superconductor with variable time quantity of activation. An approach to intellectual control of nuclear power installations based on neuron module nets is proposed. A vaporization process model in a channel of a reactor active zone is proposed for the first time. Petri nets theory at the expense of expansion's development is improved. An anomaly authentication method in the reactor active zone is improved. Methods of optimum statistical decisions are improved for computer simulation tasks, filtering tasks, authentication tasks and tasks of structure and parameter optimization.

The proposed models and methods increase the safety rate of nuclear power installations and can be used at nuclear plants.

Key words: automated control's system, NPP's safety, nuclear power installations, superficial boiling, intellectual control's system, Petri nets, parametric and structural identification, the filtering, adaptive control, diagnostics, informational measuring systems.

Видавництво та друкарня
ТОВ "Рібест"

Свідоцтво про внесення суб'єкта видавничої справи
до Державного реєстру видавців, виготівників і
розповсюджувачів видавничої продукції
серія ДК № 190 від 20 вересня 2000 року

Підписано до друку 12.11.13.
Обсяг 2,4 др. арк. Ум. друк. арк. 2,3. Обл.-вид. арк. 1,9.
Тираж 100 пр. Зам. № 232.

99058, м. Севастополь, вул.. Б.Михайлова, 223
тел/факс (0692) 42-84-01