

АВТОМАТИЗАЦІЯ ТЕХНОЛОГІЧНИХ ПРОЦЕСІВ

УДК 628.16:621.311.22:621.182.12

ЧУМАК М. О., ШАХНОВСЬКИЙ А. М., БОНДАРЕНКО С. Г., САНГІНОВА О. В.*
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського»

АЛГОРИТМИ ПІДТРИМКИ ПРИЙНЯТТЯ РІШЕНЬ З КЕРУВАННЯ ВОДНО-ХІМІЧНИМ РЕЖИМОМ АТОМНОЇ ЕЛЕКТРОСТАНЦІЇ

У роботі досліджено комплекс показників, що характеризують умови реалізації водно-хімічного режиму другого контуру вітчизняних атомних електростанцій із водо-водяними енергетичними реакторами типу ВВЕР-440 та ВВЕР-1000.

Розроблено для потреб комп'ютерних тренажерів з метою оцінки впливу відхилень водно-хімічного режиму та відпрацювання алгоритмів прийняття оперативним персоналом атомних електростанцій рішень у процесі керування водно-хімічним режимом. З метою використання в складі комп'ютерних тренажерів для навчання оперативного персоналу, виконано структурну та параметричну ідентифікацію математичних моделей показників функціонування водно-хімічного режиму в часі. Моделювання виконано насамперед за каналами «концентрація спеціальних агентів (гідразин-гідрату, морфоліну) – концентрація домішок (сполук феруму тощо) у теплоносії» (як такими, що найбільш тісно пов'язані з процесами корозії трубопроводів, основного та допоміжного обладнання другого контуру атомних електростанцій). Додатково, моделювання умов виникнення порушень водно-хімічного режиму другого контуру електростанцій виконано за такими показниками, як електропровідність, масова концентрація кисню, масова концентрація купруму, масова концентрація натрію. Проведено експериментально-статистичну перевірку зазначених моделей. На основі отриманого математичного опису (сімейства математичних моделей у вигляді звичайних диференціальних рівнянь) побудовано комп'ютерні моделі, які дають змогу спрогнозувати зміну показників функціонування досліджуваного процесу у часі.

Комп'ютерні моделі нестационарних процесів водно-хімічного режиму другого контуру атомної електростанції з реактором ВВЕР-1000, побудовані на основі ідентифікації множини промислових даних, дозволяють включити до складу комп'ютерного тренажера для навчання операторів нові підсистеми моделювання режимів керування складом теплоносія у другому контурі електростанції. Комп'ютерний розрахунок показав достатню точність запропонованих моделей в робочому діапазоні концентрацій.

Ключові слова: водно-хімічний режим, атомні електричні станції, водо-водяний реактор ВВЕР, алгоритм дії оперативного персоналу, прийняття рішень, математична модель, комп'ютерне моделювання

DOI: 10.20535/2617-9741.1.2025.325836

* Corresponding author: sanginova@xtf.kpi.ua

Received 25 December 2024; Accepted 22 January 2025

Постановка проблеми. Українська енергетична система функціонує в надзвичайно складних умовах, спричинених систематичними атаками супротивника на критичну інфраструктуру, що негативно впливає на кінцевих споживачів електроенергії.

З метою зменшення тривалості відновлення роботи енергосистеми необхідно планомірно вдосконалювати та розвивати систему навчання персоналу енергетичних об'єктів. Відповідно до Енергетичної стратегії України на період до 2035 року «Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність» [1], розвиток та навчання персоналу є ключовим елементом стратегії. У Стратегії розвитку ДП «НЕК «Укренерго» 2017-2026 [2] зазначено, що навчання персоналу має бути спрямовано на розвиток компетенцій та впровадження новітніх інструментів навчання.

Застосування повнофункціональних тренажерів у процесі навчання оперативного персоналу теплових та атомних електростанцій дозволяє системно планувати та оцінювати компетентності й результати навчання.

Важливими завданнями під час створення комп'ютерних тренажерів є створення бази знань, яка містить сценарії розвитку аварійних ситуацій та алгоритми керування в умовах «нетипових» ситуацій. Системне впровадження таких тренажерів на рівні держави забезпечуватиме ефективність системи підготовки кадрів для енергетичної галузі, і, отже, виступатиме однією зі складових стабільного функціонування енергетики України в умовах підвищених ризиків енергосистеми.

Аналіз попередніх досліджень і публікацій. Концепція «комп'ютерно-інтегрованого навчання» із використанням імітаційних віртуальних середовищ має великий потенціал з точки зору навчання [3-5]. Комп'ютерні тренажери покликані працювати в автоматизованому режимі в системі підвищення рівню кваліфікації й ліцензування персоналу (у контексті даного дослідження йдеться, насамперед, про підготовку операторів безперервних технологічних процесів). Метою таких тренажерів є забезпечити відпрацювання алгоритмів дій персоналу в ситуаціях відхилення від усталеного режиму функціонування обладнання, кваліфікації.

Гене́за комп'ютерних тренажерів пов'язана з проблемою математичного та комп'ютерного моделювання складних виробничих систем та процесів: щоб в подальшому успішно використовувати ту чи іншу технологію, її доцільно спочатку докладно розробити та випробувати в надійному, близькому до реального «теоретичному» середовищі. Прикладом комп'ютерного моделювання складних технологічних систем може бути хімічна технологія, інженерія та споріднені галузі. В цій галузі програмні продукти для моделювання технологічних процесів (у статичні та динамічні) пропонуються низкою розробників, зокрема, лідерами на ринку комп'ютерного моделювання процесів – Aspen Technology, Inc. (програмні пакети Aspen Plus та Aspen Hysys), Honeywell (пакет Unisim Design), ChemStations (програмний пакет ChemCAD) тощо. На основі таких програм може бути успішно здійснено задачі проектування та оптимізації технологічних підсистем водоспоживання та водоочищення [6], нестационарних процесів синтезу рідкого палива [7], поглинання вуглекислого газу з обробки димових газів теплової електростанції [8], газифікації твердих побутових відходів [9], а також технологічних процесів, пов'язаних з генеруванням електричного струму [10] тощо.

Проблемі розроблення і впровадження на виробництві комп'ютерних тренажерів для навчання операторів присвячено низку публікацій (див., зокрема, [11-13]). При цьому слід зауважити, що комп'ютерний тренажер інтегрує у собі різні аспекти навчання: технічні, технологічні, функціональні та методичні компоненти:

- адекватні в належному сенсі моделі технологічних процесів, базовані на фундаментальних принципах моделювання хімічних процесів і апаратів;
- апаратно-програмні засоби – навчальні платформи для точного відображення робочого середовища операторів;
- дидактичні методи комп'ютерного навчання з урахуванням потреб належної сегментації навчального матеріалу для комп'ютерної подачі, психологічних основ формування та закріплення навичок оператора, та багато інших елементів.

Подібний «синтетичний» характер комп'ютерних тренажерів зумовлює наявність великого колективу учасників-розробників на протязі життєвого циклу тренажера, і вимагає застосування декомпозиції задач створення тренажерів, системно-ієрархічного підходу до процесу їх проектування навчальних систем.

Однією із важливих віх під час руху в цьому напрямку є розробка складових частин комп'ютерних тренажерів для потреб атомних електростанцій, зокрема, для оцінки впливу нетипових ситуацій на водо-хімічний режим та відпрацювання дій персоналу для забезпечення безпечної експлуатації обладнання.

Мета та наукова новизна дослідження. Метою роботи є розроблення алгоритмів прийняття рішень оперативним персоналом АЕС у процесі керування водно-хімічним режимом (ВХР) другого контуру АЕС із водо-водяними енергетичними реакторами типу ВВЕР-440 та ВВЕР-1000. Відповідно до стратегії декомпозиції завдань опрацювання алгоритмів, було виділено наступні науково та практично значимі підзадачі:

- комп'ютерне моделювання процесів ВХР другого контуру;
- моделювання умов виникнення порушень ВХР другого контуру при експлуатації на енергетичних рівнях потужності.

Виклад основного матеріалу. Водно-хімічний режим другого контуру має забезпечувати такі умови експлуатації, які мінімізують корозійні та корозійно-ерозійні пошкодження основного та додаткового устаткування контуру [14]. Приймемо, що причиною порушення ВХР є відхилення діагностичних показників якості робочого середовища від нормативних значень. Перелік діагностичних показників, застосованих до моделювання умов виникнення порушень ВХР у даній роботі, наведено у Таблиці 1.

Таблиця 1 – Діагностичні показники якості робочого середовища другого конуру АЕС із ВВЕР

Показник, одиниці вимірювання	Допустиме значення	
Живильний тракт		
Питома електропровідність Н-катионованої проби, мкСм/см	< 0,3	
Масова концентрація кисню, мкг/дм ³	< 10	
рН при 25°С, од.	Гідразин-аміачний режим	Морфоліновий режим
	8,9-9,2	9,0-9,4
Масова концентрація феруму, мкг/дм ³	< 15	< 10
Масова концентрація міді, мкг/дм ³	< 5	< 3
Масова концентрація гідразин-гідрату, мкг/дм ³	>40	
Масова концентрація морфоліну мкг/дм ³	2,0-5,0	
Паровий тракт		
рН при 25°С, од.	Гідразин-аміачний	Морфоліновий
	8,0-9,2	8,5-9,4
Питома електропровідність Н-катионованої проби, мкСм/см	< 0,3	
Масова концентрація натрію, мкг/дм ³	< 300	
Масова концентрація хлоридів мкг/дм ³	< 100	
Масова концентрація сульфат-іонів мкг/дм ³	< 200	
Конденсатний тракт		
Питома електропровідність Н-катионованої проби, мкСм/см	< 0,3	
Масова концентрація натрію, мкг/дм ³	< 2,0	
Масова концентрація кисню, мкг/дм ³	< 10	

Моделювання умов виникнення порушень ВХР другого контуру виконано за такими показниками: питома електропровідність Н-катионованої проби, масова концентрація кисню, масова концентрація феруму, масова концентрація гідразин-гідрату, масова концентрація морфоліну, масова концентрація натрію. Результати моделювання на прикладі питомої електропровідності Н-катионованої проби представлено на Рис. 1, де по горизонтальній осі наведено відмітки модельного часу першої доби, потім другої доби і т.д.

Алгоритм дій оперативного персоналу в разі виявлення відхилення за двома показниками – значенням питомої електропровідності Н-катионованої проби та масовою концентрацією кисню у основному конденсаті – наведено на Рис. 2.

У разі виявлення відхилення значення питомої електропровідності Н-катионованої проби одночасно зі зниженням вмісту морфоліну у живильній воді, оперативний персонал має керуватись алгоритмом, наведеним на Рис. 3.

Усунення відхилень ВХР при зниженні вмісту гідразину у живильній воді конденсатно-живильного тракту другого контуру АЕС із ВВЕР відбувається за алгоритмом, поданим на Рис. 4, а при зниженні концентрації феруму – за алгоритмом, представленим на Рис. 5.

Алгоритм дій оператора у процесі ліквідації відхилення за значенням масової концентрації натрію у основному конденсаті подано на Рис. 6.

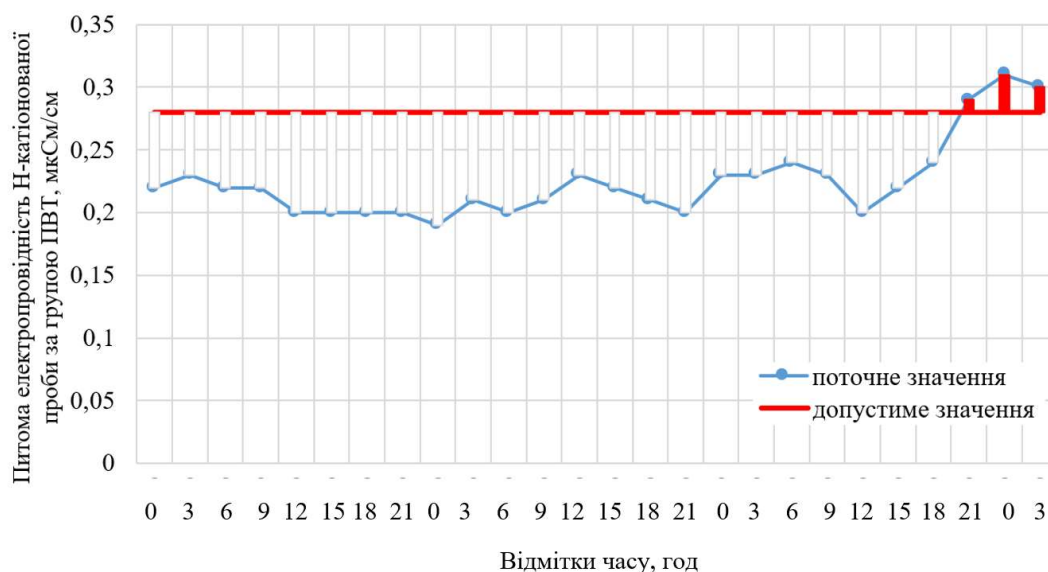


Рис. 1 – Приклад результату моделювання умов виникнення порушень ВХР другого контуру

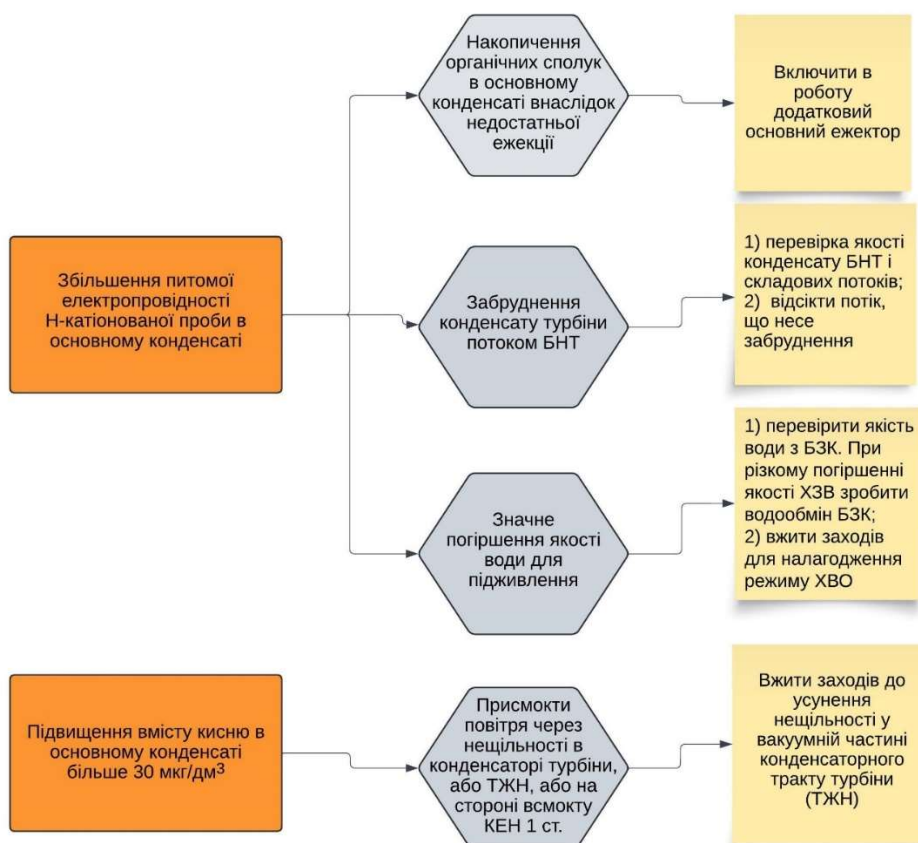


Рис. 2 – Алгоритм дій оперативного персоналу АЕС у процесі прийняття рішення при збільшенні значення питомої електропровідності Н-катионованої проби одночасно з підвищенням вмісту кисню в основному конденсаті

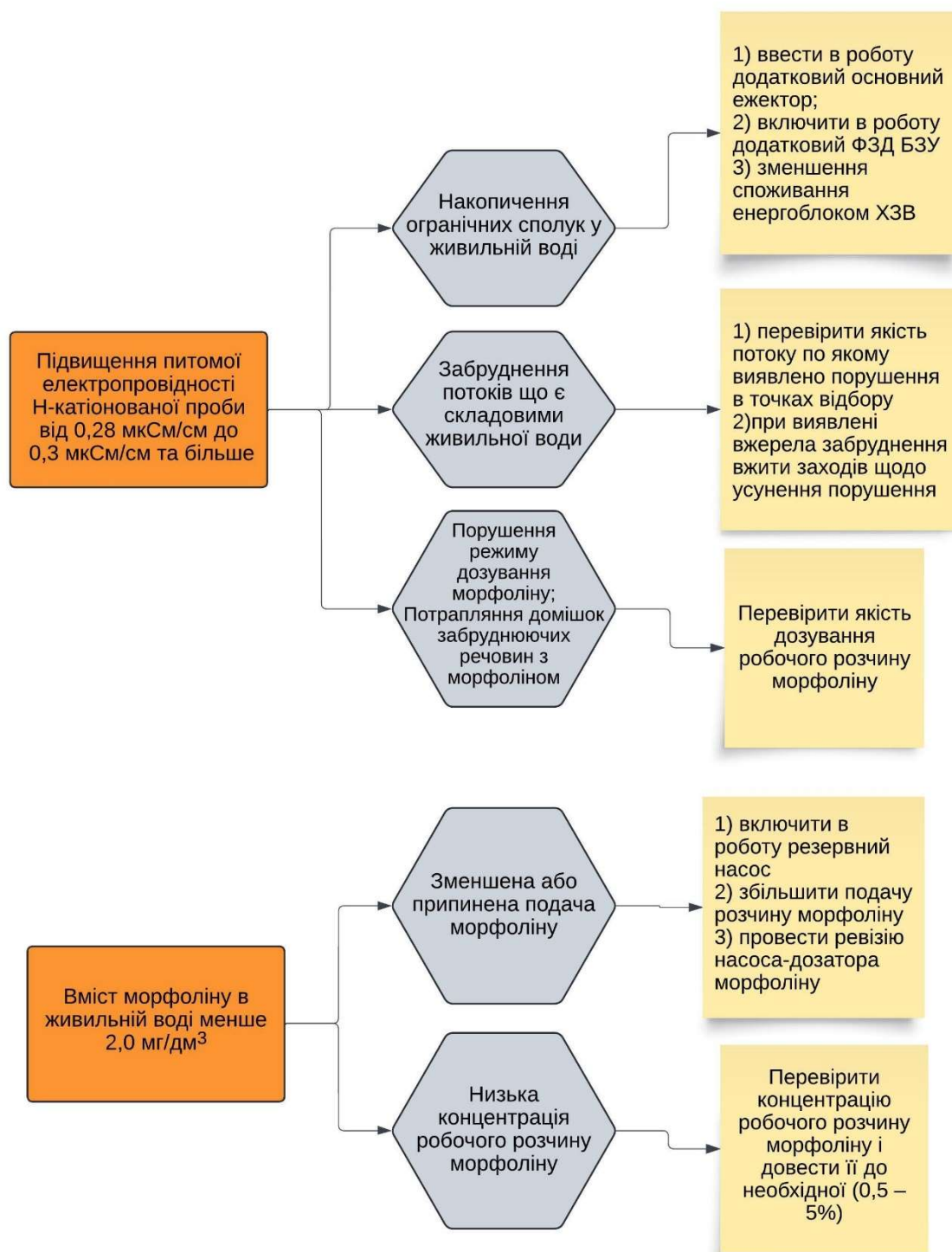


Рис. 3 – Алгоритм дій оперативного персоналу АЕС у процесі прийняття рішення при збільшенні значення питомої електропровідності Н-катионованої проби одночасно зі зниженням вмісту морфоліну у живильній воді



Рис. 4 – Алгоритм дій оперативного персоналу АЕС при зниженні вмісту гідразину у живильній воді

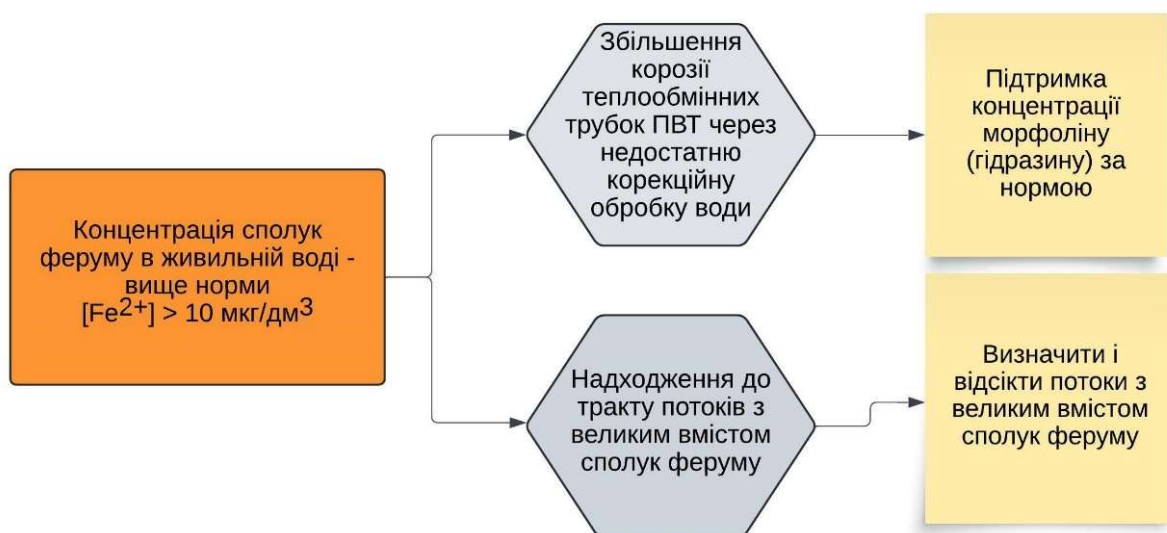


Рис. 5 – Алгоритм дій оперативного персоналу АЕС при виявленні відхилення за концентрацією феруму у живильній воді

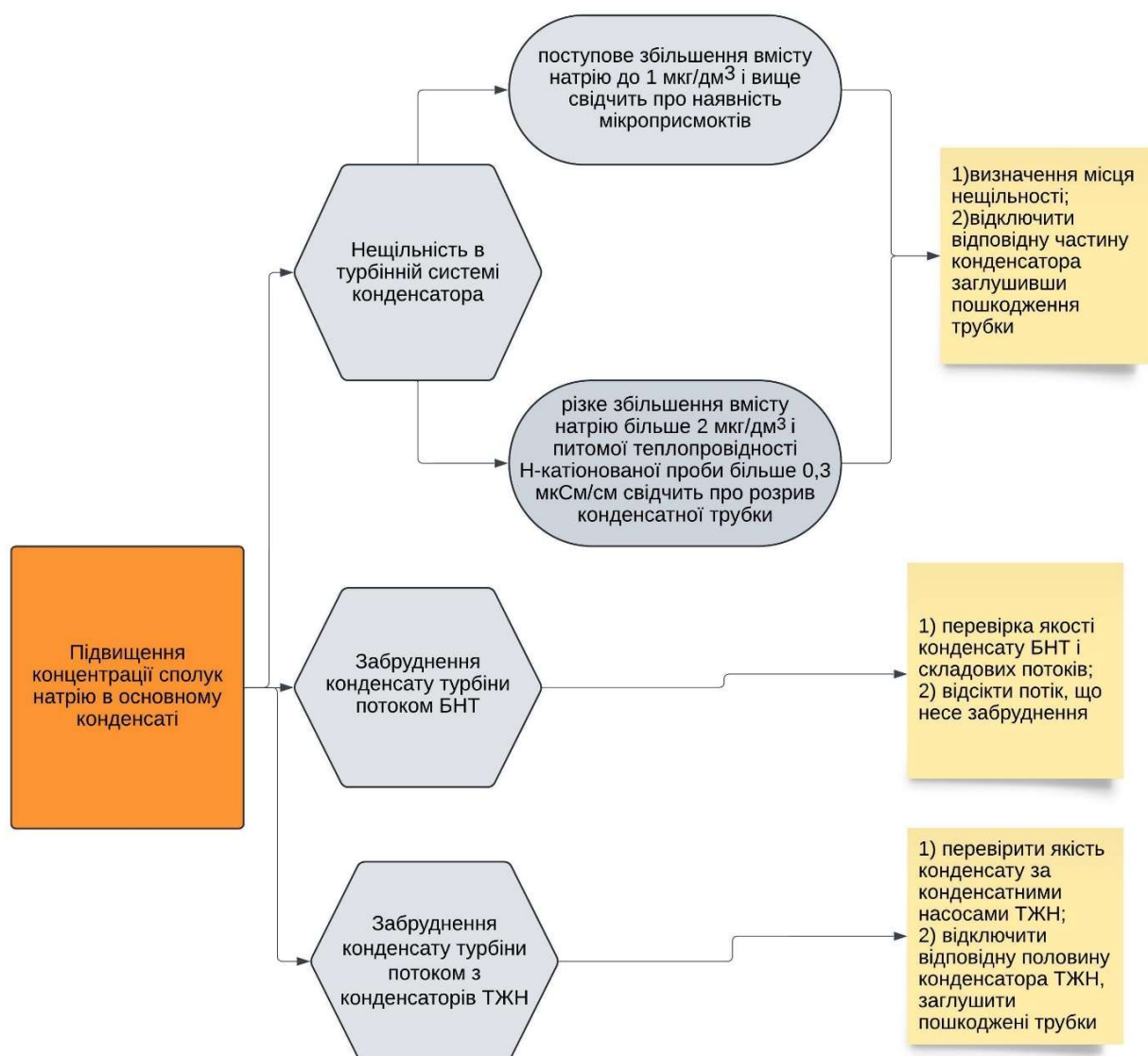


Рис. 6 – Алгоритм дій оперативного персоналу АЕС у процесі усунення відхилення за масовою концентрацією натрію в основному конденсаті

З метою використання в складі комп'ютерних тренажерів для навчання оперативного персоналу, розроблено математичні моделі, які дозволяють спрогнозувати зміну показників функціонування досліджуваного процесу у часі. Внаслідок структурної та параметричної ідентифікації математичного опису з точки зору зміни згаданих показників було отримано сімейство нестационарних математичних моделей. Зокрема, залежність концентрації морфоліну від концентрації сполук феруму за результатами досліджень представлена у вигляді наступного диференціального рівняння:

$$3,1127y' + y = 0,4745x(t - 1), \quad (1)$$

де $T=3,1127$ – стала часу об'єкта; $k=0,4745$ – коефіцієнт передачі за 50% номінального режиму; $\tau = 1$ – константа (час) запізнювання; y – концентрація морфоліну, мг/дм³; x – концентрація сполук феруму, мкг/дм³.

Математичний опис зміни у часі концентрації гідрозин-гідрату від концентрації сполук феруму було отримано у вигляді:

$$1,5265y' + y = 9,1201x(t - 3,8237), \quad (2)$$

де y – концентрація гідразина, $\text{мкг}/\text{дм}^3$; x – концентрація сполук феруму, $\text{мкг}/\text{дм}^3$; $T=1,5265$ – стала часу об'єкта; $k=9,1201$ – коефіцієнт передачі за 50% номінального режиму; $\tau = 3,8237$ – константа (час) запізнювання.

Адекватність отриманих моделей вихідним даним перевірено за F-критерієм.

На основі вищеописаних математичних моделей побудовано програмні модулі (комп'ютерні моделі), які дають змогу проводити імітаційне моделювання досліджуваних процесів за заданими показниками функціонування водно-хімічного режиму другого контуру АЕС. На рисунках 7 та 8 представлено комп'ютерного моделювання на основі наведених вище моделей: порівняння експериментальних (вихідних) значень концентрації відповідно гідразин-гідрату та морфоліну, із розрахованими значеннями.

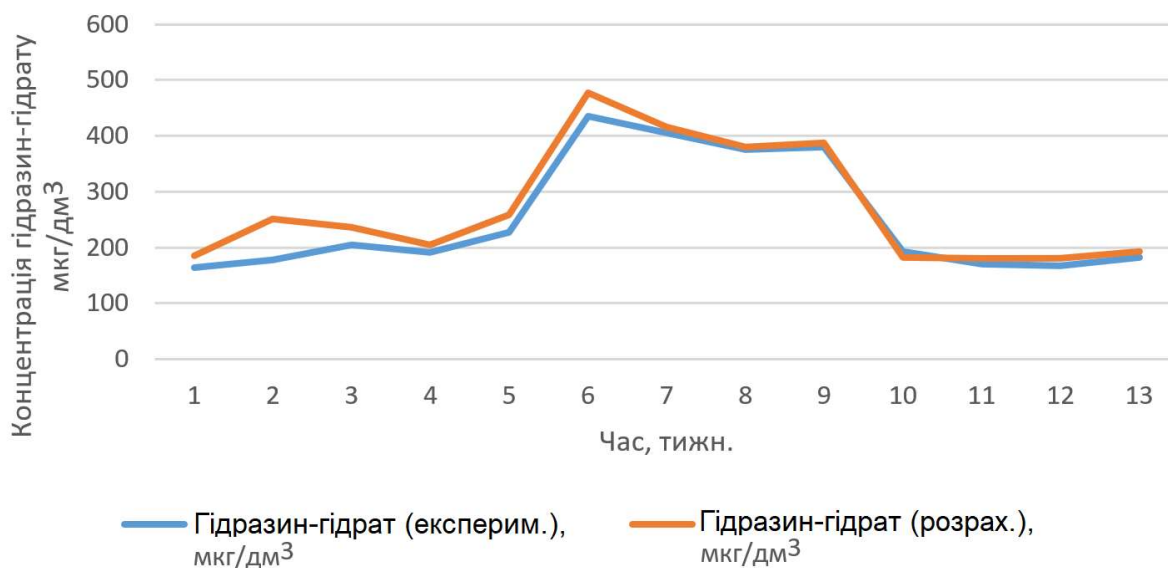


Рис. 7 – Залежність концентрації гідразин-гідрату від концентрації сполук феруму

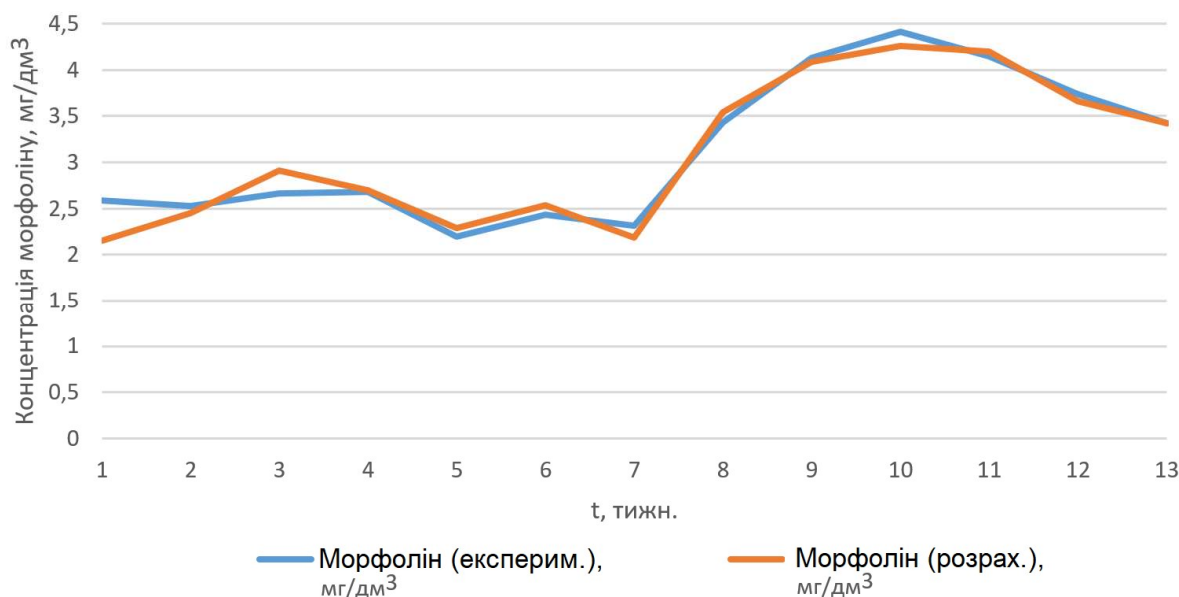


Рис. 8 – Графік порівняння експериментальних значень концентрації морфоліну із розрахованими

Як видно з рисунків, комп'ютерний розрахунок показав достатню точність запропонованих моделей в робочому діапазоні концентрацій. Адекватність отриманих моделей підтвердило також кількісне порівняння експериментальних значень концентрацій, із значеннями, отриманими за моделями, на основі значень середньоквадратичного відхилення.

Висновки. Комп'ютерні моделі нестационарних процесів водно-хімічного режиму другого контуру атомної електростанції з реактором ВВЕР-1000, побудовані на основі ідентифікації множини промислових даних, дозволяють включити до складу комп'ютерного тренажера для навчання операторів нові підсистеми моделювання режимів керування складом теплоносія у другому контурі електростанції.

Перспективи подальших досліджень полягають у розширенні набору компонентів комп'ютерного тренажера шляхом ідентифікації моделей складових парового, конденсатного та живильного трактив другого контуру атомної електростанції.

Представлене дослідження виконано в рамках науково-дослідної теми «Удосконалення технологій водоочищення промислових виробництв із застосуванням штучних нейромереж» (державний реєстраційний номер: 0124U001966).

Список використаної літератури

1. Про схвалення Енергетичної стратегії України на період до 2035 року “Безпека, енергоефективність, конкурентоспроможність” Розпорядження КМУ № 605-р., 18.08.2017. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/250250456> (дата звернення: 18.12.2024)
2. Стратегія розвитку ДП «НЕК «Укренерго» 2017-2026, 2017. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/04/170503-Ctrategiya.pdf> (дата звернення: 03.12.2024)
3. Harper B., Hedberg J. G., Wright R. Who benefit from virtuality? // *Computers and Education*. 2000. vol. 34. Pp. 163 – 176. DOI: [https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(99\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(99)00043-3)
4. Stone R. Virtual reality for interactive training: An industrial practitioner's viewpoint // *International Journal of Human-Computer Studies*. 2001. vol. 55. Pp. 699 – 711. DOI: <https://doi.org/10.1006/ijhc.2001.0497>
5. Strojny P., Dużmańska-Misiarczyk N. Measuring the effectiveness of virtual training: A systematic review // *Computers & Education: X Reality*. 2023. Vol. 2. 100006. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2022.100006>
6. Шахновський А.М., Єжовська А., Квітка О. О., Янишпольський В. В. Комп'ютерне моделювання процесів водоспоживання із використанням симуляторів // *Вісник Черкаського державного технологічного університету*. 2008. № 4. С. 67-71
7. Morales A., Leonard G. Simulation of a Fischer-Tropsch reactor for jet fuel production using Aspen Custom Modeler // *Computer Aided Chemical Engineering*. 2022. Vol. 51. Pp. 301-306 DOI: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50051-5>
8. Shen M.-T., Chen Y.-H., Chang H. Simulation of the Dynamics and Control Responses of the Carbon Dioxide Chemical Absorption Process using Aspen Custom Modeler // *Energy Procedia*. 2019. Vol. 158. Pp. 4915-4920. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.700>
9. Mehdi M., Taqvi S. A. A., et al. Aspen plus simulation model of municipal solid waste gasification of metropolitan city for syngas production // *Fuel*. 2023. Vol. 344. Article 128128. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128128>
10. Медведєв Р. Б., Сангінова О. В., Мердух С. Л. Моделювання парогенератора у складі АЕС із реактором типу ВВЕР-1000 засобами моделюючої системи UNISIM // *Комп'ютерне моделювання в хімії і технологіях та системах сталого розвитку – КМХТ-2012 : збірник наукових статей*. 2012. С. 66-69.
11. Wade H. L. A Survey of Vendor-Supported Tools for Real-Time Simulation. Present Availability and Future Needs // *Proc. of 19 Annual Control Conference*. Purdue University, USA. 1993. Pp. 25-38.

12. Dozortsev V. M. Development of computer-based training simulator for industrial operators: Main participants, their roles and communications // Automation and Remote Control. 2010. No. 71, pp. 1476–1480. DOI: <https://doi.org/10.1134/S0005117910070246>
13. Аветісян О. В., Гурєєв В. О., Сангінова О. В. Розробка та застосування віртуальних ієрархічних структур для моделювання режимів, навчання і тренажу персоналу // Вісник Вінницького політехнічного інституту. 2016. № 1. С. 101–107.
14. СОУ НАЕК 191:2020 Інженерна, наукова та технічна підтримка. Водно-хімічний режим ядерних енергетичних реакторів типу ВВЕР-1000. Технічні вимоги. Способи забезпечення якості. [Затв. наказом ДП «НАЕК «Енергоатом» від 23.09.2020 № 755]. Вид. офіц. Київ : «Енергоатом». 28 с.

Maksym Chumak, Arcady Shakhnovsky, Serhii Bondarenko, Olga Sanginova

DECISION SUPPORT ALGORITHMS FOR MANAGING THE WATER-CHEMICAL REGIME OF A NUCLEAR POWER PLANT

The study examines a set of indicators characterizing the conditions for implementing the water-chemical regime of the secondary circuit in domestic nuclear power plants equipped with VVER-440 / VVER-1000 water-water energetic reactors. The presented research results are intended for use in software complexes for personnel training, specifically computer simulators. The reliable operation of nuclear power plants in any country depends on the proper functioning of all plant systems and the qualification of personnel. The study aims to assess the impact of deviations in the water-chemical regime and to develop decision-making algorithms for operational personnel managing the water-chemical regime. As part of the computer simulators for training operational personnel, structural and parametric identification of mathematical models for the time-dependent performance indicators of the water-chemical regime was carried out. The modeling primarily focused on the channels "concentration of specific agents (hydrazine hydrate, morpholine) vs concentration of impurities (iron compounds, etc.) in the coolant", as these are closely associated with the corrosion processes of pipelines, primary, and auxiliary equipment in the secondary circuit of nuclear power plants. The study included modeling conditions for violations of the water-chemical regime in the secondary circuit using indicators such as electrical conductivity, mass concentration of oxygen, mass concentration of copper, and mass concentration of sodium. Experimental-statistical validation of the models was conducted, demonstrating that the developed mathematical models adequately describe the analyzed processes. Based on the obtained mathematical descriptions (a family of mathematical models in the form of ordinary differential equations), computer models were constructed. These models enable personnel to predict changes in the performance indicators of the investigated processes over time. Non-stationary process computer models for the water-chemical regime of the secondary circuit in nuclear power plants with VVER-1000 reactors, developed through the identification of extensive industrial data, facilitate the integration of new subsystems for modeling coolant composition management regimes into the computer simulator for operator training.

Keywords: water-chemical regime, nuclear power plants, VVER nuclear reactor, operational personnel algorithm, decision-making, mathematical model, computer modeling

References

1. Pro skhvalennya Enerhetychnoyi stratehiiy Ukrainy na period do 2035 roku "Bezpeka, enerhoefektyvnist, konkurentospromozhnist" [On approval of the Energy Strategy of Ukraine for the period until 2035 "Security, energy efficiency, competitiveness"] Resolution of the Cabinet of Ministers of Ukraine No. 605-r," 08/18/2017. URL: <https://www.kmu.gov.ua/ua/npas/250250456> (Accessed December 18, 2024) (Ukr.)

2. Stratehiya rozvytku DP “NEK «Ukrenerho»” [Development Strategy of the State Enterprise “NPC “Ukrenergo”], 2017-2026, 2017. URL: <https://ua.energy/wp-content/uploads/2017/04/170503-Ctrategiya.pdf> (Accessed December 03, 2024) (Ukr.)
3. Harper, B., Hedberg, J. G., Wright, R. (2000). Who benefit from virtuality? *Computers and Education*, vol. 34, pp. 163 – 176. doi: [https://doi.org/10.1016/S0360-1315\(99\)00043-3](https://doi.org/10.1016/S0360-1315(99)00043-3)
4. Stone, R. (2001). Virtual reality for interactive training: An industrial practitioner's viewpoint. *International Journal of Human-Computer Studies*, vol. 55, pp. 699 – 711. doi: <https://doi.org/10.1006/ijhc.2001.0497>
5. Strojny, P., Dużmańska-Misiarczyk, N. (2023). Measuring the effectiveness of virtual training: A systematic review. *Computers & Education: X Reality*, Vol. 2, article 100006. doi: <https://doi.org/10.1016/j.cexr.2022.100006>
6. Shakhnovsky, A.M., Yezhovska, A., et al. (2008). Komp'yuterne modelyuvannya protsesiv vodospozhyvannya iz vykorystannyam symulyatoriv [Computer modeling of water consumption processes using simulators]. *Bulletin of Cherkasy State Technological University*, no. 4, pp. 67-71 (Ukr.)
7. Morales, A., Leonard, G. (2022). Simulation of a Fischer-Tropsch reactor for jet fuel production using Aspen Custom Modeler. *Computer Aided Chemical Engineering*, vol. 51, pp. 301-306 doi: <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-95879-0.50051-5>
8. Shen, M.-T., Chen, Y.-H., Chang, H. (2019). Simulation of the Dynamics and Control Responses of the Carbon Dioxide Chemical Absorption Process using Aspen Custom Modeler. *Energy Procedia*, vol. 158, pp. 4915-4920. doi: <https://doi.org/10.1016/j.egypro.2019.01.700>
9. Mehdi, M., Taqvi, S. A. A., et al. (2023). Aspen plus simulation model of municipal solid waste gasification of metropolitan city for syngas production. *Fuel*, vol. 344, article 128128. doi: <https://doi.org/10.1016/j.fuel.2023.128128>
10. Medvedev, R. B., Sanginova, O. V., Merdukh, S. L. (2012). Modeling of a steam generator in a nuclear power plant with a VVER-1000 reactor using the UNISIM modeling system. *Computer modeling in chemistry and technologies and sustainable development systems – KMHT-2012: collection of scientific articles*, pp. 66-69. (Ukr.)
11. Wade, H. L. (1993). A Survey of Vendor-Supported Tools for Real-Time Simulation. Present Availability and Future Needs. *Proc. 19 Annual Control Conference*. Purdue University, W. Lafayette, IA, USA, pp. 25-38.
12. Dozortsev, V. M. (2010). Development of computer-based training simulator for industrial operators: Main participants, their roles and communications. *Autom. Remote Control*, vol. 71, pp. 1476–1480. doi: <https://doi.org/10.1134/S0005117910070246>
13. Avetisyan, O. V., Gureev, V. O., Sanginova, O. V. (2016). Rozrobka ta zastosuvannya virtual'nykh iyerarkhichnykh struktur dlya modelyuvannya rezhymiv, navchannya i trenazhu personalu [Development and application of virtual hierarchical structures for modeling regimes, training and training of personnel]. *Bulletin of Vinnytsia Polytechnic Institute*, no. 1, pp. 101–107 (Ukr.)
14. Standard of the Organization of Ukraine SOU NAEK 191:2020 (2020). Vodno-khimichnyy rezhym reaktoriv VVER-1000 [Water-chemical regime of VVER-1000 reactors], Kyiv: "Energoatom", 28 p. (Ukr.).