



DOI 10.28925/2663-4023.2024.26.673

УДК 004.4

Вінтенко Борис Юрійович

аспірант кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна
провідний інженер-програміст КБ АСУ ТП ПАТ «Науково-виробниче
підприємство «Радій», Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0009-0008-3748-0374
boris.vintenko@gmail.com

Миронець Ірина Валеріївна

к.т.н., доцент, доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії
Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна
ORCID ID: 0000-0003-2007-9943
i.myronets@chdtu.edu.ua

Смірнов Олексій Анатолійович

д.т.н., професор, завідувач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0001-9543-874X
dr.smirnova@gmail.com

Коваленко Анна Степанівна

к.т.н., доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0003-3610-9465
annasun911@gmail.com

Коноплицька-Слободенюк Оксана Костянтинівна

викладач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0001-9981-5194
ksuha80@gmail.com

Смірнова Тетяна Віталіївна

к.т.н., доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центрально український національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0001-6896-0612
sm.tetyana@gmail.com

Константинова Лілія Володимирівна

викладач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення
Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна
ORCID ID: 0000-0002-3305-2427
lilyashel1976@gmail.com

ДОСЛІДЖЕННЯ ЗАСТОСУВАННЯ СИСТЕМ ПІДТРИМКИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛУ ОБ'ЄКТУ КРИТИЧНОЇ ІНФРАСТРУКТУРИ ПРИ КЕРУВАННІ ЕНЕРГОБЛОКОМ АЕС З РЕАКТОРОМ ТИПУ ВВЕР-1000

Анотація. У цій роботі проведено дослідження застосування систем підтримки оперативного персоналу об'єкту критичної інфраструктури при керуванні енергоблоком АЕС з реактором типу ВВЕР-1000. Метою даної статті є дослідження актуальних напрямків застосування СПО на АЕС, аналіз досвіду застосування систем підтримки операторів на АЕС України та визначення актуальних напрямків проектування систем підтримки операторів на основі проведеного аналізу. Об'єктом дослідження є процес застосування системи підтримки операторів при керуванні енергоблоком АЕС. Предметом дослідження є класифікація систем



підтримки за різними ознаками, досвід використання СПО на АЕС України, актуальні задачі з проектування СПО на АЕС України. У даному дослідженні були розв'язані наступні завдання: Визначені типові види систем підтримки операторів та класифікувати їх за видом підтримки, обсягом та виконуваними функціями; Проаналізовані існуючі системи підтримки операторів, що використовуються на АЕС України; Визначені актуальні напрямки проектування систем підтримки операторів. Також визначено, що у напрямку подальших досліджень буде виконано розробку інформаційної технології, що дозволить створити СПО для підтримки ОП в режимах нормальної експлуатації, ліквідації порушень та ліквідації аварійних ситуацій.

Ключові слова: безпека критичної інфраструктури; атомні електростанції; інформаційно-керуючі системи; програмно-технічні комплекси; інформаційна модель; технологічний регламент; енергетика.

ВСТУП

Постановка завдання дослідження

Атомні електростанції є високотехнологічними підприємствами. Енергоблок АЕС містить велику кількість технологічних та інформаційно-керуючих підсистем. Для технологічних процесів, що протікають на енергоблоці, вимагається висока якість процесів керування з метою забезпечення безпеки та дотримання визначених технологічним регламентом меж експлуатації.

Постановка проблеми. Незважаючи на високу ступінь автоматизації, керування енергоблоком АЕС є складною задачею. По-перше, складність обумовлюється великою кількістю обладнання, в якому можуть виникнути відхилення або позаштатні ситуації, та необхідністю швидкої ідентифікації відхилення та вчинення дій коректування. По-друге, ціна помилки оператора при керуванні може спричинити тяжкі наслідки для безпеки. По-третє, велика кількість інформації, регламентів та інструкцій робить роботу операторів напруженою. При виникненні позаштатних ситуацій або під час перехідних процесів оператори в реальному часі має ідентифікувати стани систем енергоблоку за багатьма параметрами, приймати велику кількість рішень в обмеженому часі.

Діяльність операторів є складним процесом, що залежить від великої кількості вхідної інформації, технологічних процедур та органів керування. В попередній статті [1] було досліджено інформаційне забезпечення та технологічні регламенти, згідно з яким відбувається керування енергоблоком АЕС України з реактором типу ВВЕР-1000. Було визначено, що для прийняття рішень при керуванні енергоблоком оперативний персонал (ОП) використовує інформацію з двох основних джерел: інформаційної моделі енергоблоку та технологічних регламентів. Інформаційна модель енергоблоку складається з панелей блочного щита керування (БЩУ), де на одного оператора може приходиться від 16 (турбінне відділення) до 24 (реакторне відділення) панелей. На кожній панелі може бути розміщено до двох сотень індикаторів, табло та приладів та до сотні органів (ключів) керування). Технологічні регламенти являють собою набір нормативних документів, що містять визначення режимів роботи енергоблоку та його підсистем, межі та умови їх безпечної експлуатації, а також інструкції з ідентифікації та ліквідації порушень та аварійних ситуацій. Так, основний технологічний регламент безпечної експлуатації енергоблоку (ТРБЕ) є документом обсягом близько 300 сторінок з десятком таблиць з кількома десятками параметрів безпечної експлуатації реакторної установки та з описом умов безпечної експлуатації близько 50 підсистем. Інструкції з ліквідації порушень нормальної експлуатації (ІЛП) та з ліквідації аварійних ситуацій (ІЛА) є документами обсягом 300–500 сторінок, що містять до 50 описів порушень, в



яких кожне порушення може ідентифікуватися десятком параметрів та містити декілька десятків кроків для відновлення.

Великий обсяг інформації та документації є проблемою для ОП при керуванні енергоблоком. Для підвищення інформованості ОП, точності ідентифікації ситуації та оцінки стану технологічних систем, допомоги у плануванні дій з керування у відповідності до поточних умов та контролю за правильністю і результативністю виконання процедур керування актуальною задачею є створення різноманітних систем підтримки операторів (СПО).

У даному дослідженні необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Визначити типові види систем підтримки операторів та класифікувати їх за видом підтримки, обсягом та виконуваними функціями.
2. Проаналізувати існуючі системи підтримки операторів, що використовуються на АЕС України.
3. Визначити актуальні напрямки проектування систем підтримки операторів.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1], як було наведено вище, було досліджено інформаційне забезпечення та технологічні регламенти, згідно з яким відбувається керування енергоблоком АЕС України з реактором типу ВВЕР-1000. Робота [2] присвячена порівнянню головних диспетчерських станцій звичайних і цифрових атомних електростанцій: перспектива складності завдань. У роботах [3], [4] була наведено підходи до проектування та оцінки інтерфейсів людина-система для промислових підприємств, й проведена оцінка людського фактору в диспетчерських кімнатах атомної електростанції з використанням мобільної системи для підтримки спільного спостереження. Дизайн екологічного інтерфейсу в ядерній сфері: застосування до вторинних підсистем симулятора реакторної установки з киплячою водою розглянутий в роботі [5]. В роботі [6] розглянуто питання системного огляду атомних електростанцій зі штучним інтелектом в епоху індустрії 4.0: дизайн найвищого рівня та поточні застосування. В роботах [7], [8] розглянуті підходи, які використовуються на українських АЕС.

Метою статті є дослідження актуальних напрямків застосування СПО на АЕС, аналіз досвіду застосування систем підтримки операторів на АЕС України та визначення актуальних напрямків проектування систем підтримки операторів на основі проведеного аналізу.

Об'єктом дослідження є процес застосування системи підтримки операторів при керуванні енергоблоком АЕС.

Предметом дослідження є класифікація систем підтримки за різними ознаками, досвід використання СПО на АЕС України, актуальні задачі з проектування СПО на АЕС України.

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ДОСЛІДЖЕННЯ

Класифікація та види систем підтримки оператора АЕС

Як вже зазначалося в дослідженні інформаційної моделі та технологічних регламентів енергоблоку АЕС [1], енергоблок АЕС є складною системою, до якої входить велика кількість технологічних підсистем різного рівня, пов'язаних між собою. Декілька енергоблоків на одній АЕС утворюють цілий комплекс з вироблення електроенергії. СПО, як і будь-які інформаційно-керуючі системи, можуть бути впроваджені на різних рівнях та у різних межах. Класифікувати системи підтримки можна за **технологічним**

рівнем та системою: загальностанційні, загальноблочні, реакторного чи турбінного відділення, окремої системи тощо.

Задачі операторів під час керування енергоблоком можуть мати різний тип: контроль дотримання меж безпечної експлуатації, виконання перехідних процесів, усунення порушень нормальної експлуатації, ліквідація аварійних ситуацій, пошук несправностей, проведення випробовування обладнання тощо. Виходячи з цього, системи підтримки можуть бути реалізовані для підтримки певного типу задач та **класифіковані за типами задач: контроль параметрів, регулювання та виконання перехідних процесів, усунення порушень, пошук несправностей, випробовування обладнання** тощо. Крім того, в різних експлуатаційних режимах енергоблоку об'єм та зміст задач ОП змінюється, тому системи підтримки операторів можна такою класифікувати **за експлуатаційним режимом енергоблоку: нормальна експлуатація, реагування на відхилення, ліквідація аварійних ситуацій, випробовування та ремонт.**

Діяльність ОП під час керування енергоблоком складається з декількох фаз, що приведені на рис. 1. Після отримання (виявлення) задачі керування ОП має проаналізувати інформацію від технологічних систем та ідентифікувати їх стан. Після цього на основі технологічних регламентів проводиться планування дій для виконання задачі. В процесі виконання задачі використовуються інструкції, що відносяться до конкретних систем. Вірність дій, які виконуються ОП, мають контролюватися.

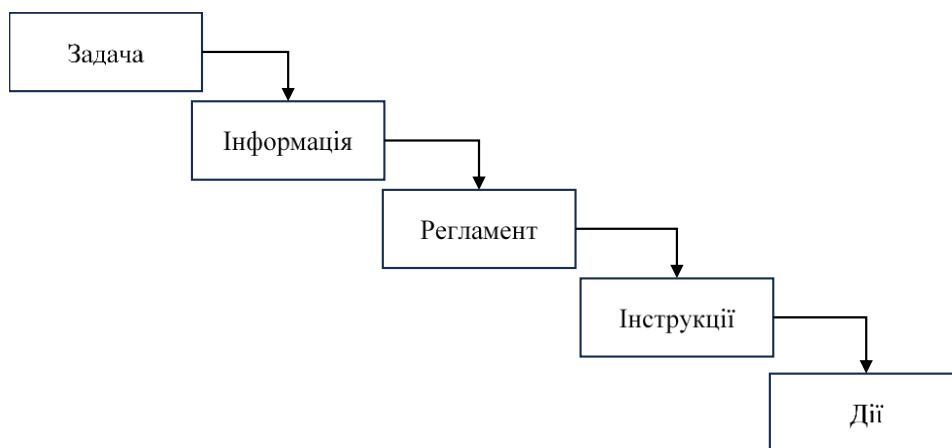


Рис. 1. Модель діяльності ОП при керуванні

Відповідно до поділу процесу керування на фази, системи підтримки оператора можуть бути реалізовані для підтримки як окремих фаз, так і їх комбінацій, і класифіковані **за фазою виконання задачі: виявлення задачі, оцінки стану обладнання, планування дій, виконання дій тощо.**

Підтримка оператора може здійснюватися різними способами. Одним з видів систем підтримки можна виділити **системи інформаційної підтримки**, що сприяють підвищенню повноти інформації, швидкості її отримання, зменшення об'єму та складності, виділення найважливіших показників. При цьому функції оцінки, планування дій та контролю їх виконання здійснюються інтелектуальною діяльністю людини. **Системи інтелектуальної підтримки** полегшують діяльність людини на даних етапах, тобто полегшують оцінку ситуації, пропонують план дій, контролюють виконання дій з метою попередження помилок.

Зведені категорії систем підтримки приведені в табл. 1.



Таблиця 1

Класифікація систем підтримки операторів АЕС

Вид класифікації	Приклади класифікації
За рівнем та системою	Загальностанційні, загальнооблочні, системи реакторного/турбінного відділення, окремої системи
За типами задач	Підтримка задач контролю, регулювання, виконання перехідних процесів, усунення порушень, пошуку несправностей, випробовувань
За режимом роботи енергоблоку	Режим нормальної експлуатації, реагування на відхилення, ліквідація аварійних ситуацій, режим випробовування, стан ремонту.
За фазою виконання задачі	Підтримка виявлення задачі, оцінки стану обладнання, планування дій, виконання дій
За видом підтримки	Інформаційна або інтелектуальна

В наступних двох підрозділах розглянемо системи інформаційної та інтелектуальної підтримки операторів більш детально.

Системи інформаційної підтримки

Інформаційний вид підтримки спрямований на полегшення швидкого розуміння ОП ситуації, що складається. З розвитком цифрових ІКС одночасно відбувається перехід від аналогової до цифрової інформаційної моделі енергоблоку. В [2], [3] проводиться дослідження ефективності, переваг та недоліків даного процесу.

Для інформаційної підтримки оператора використовуються цифрові дисплеї, що реалізують інтерфейси. В [4] виділяється три типи інформаційних інтерфейсів: інтерфейси, орієнтовані на задачу, функціонально-орієнтовані інтерфейси, та екологічні інтерфейси на екранах колективного користування.

Інтерфейс, орієнтований на задачу, призначений для підтримки оператора під час виконання конкретної задачі з визначеного списку. На один відеокادر цифрового дисплею при цьому збирається вся інформація, яка має відношення до виконання даної задачі. Ця інформація може надходити з різних інформаційно-керуючих систем та стосуватися різних технологічних підсистем. Такий вид інтерфейсу дозволяє оператору не перемикає відображення на інші відеокадри протягом всього часу виконання задачі.

Приклад відеокадру, орієнтованого на задачу розігріву та розхолодження, приведений на рис. 2. В ньому можна інформацію від різних вузлів — стан роботи ГЦН, температуру та рівні теплоносія в парогенераторах, температуру корпусу РУ тощо.

Функціонально-орієнтований інтерфейс призначений для відображення інформації про відображення певної технологічної функції. На відеокадрі відображається функціональна група певного обладнання. Увага оператора при цьому концентрується на виконанні певної технологічної функції. При цьому забезпечується максимальна повнота інформації про окремий технологічний процес.

Приклад відеокадру, орієнтованого на функцію — підсистеми охолодження активної зони, приведений на рис. 3.

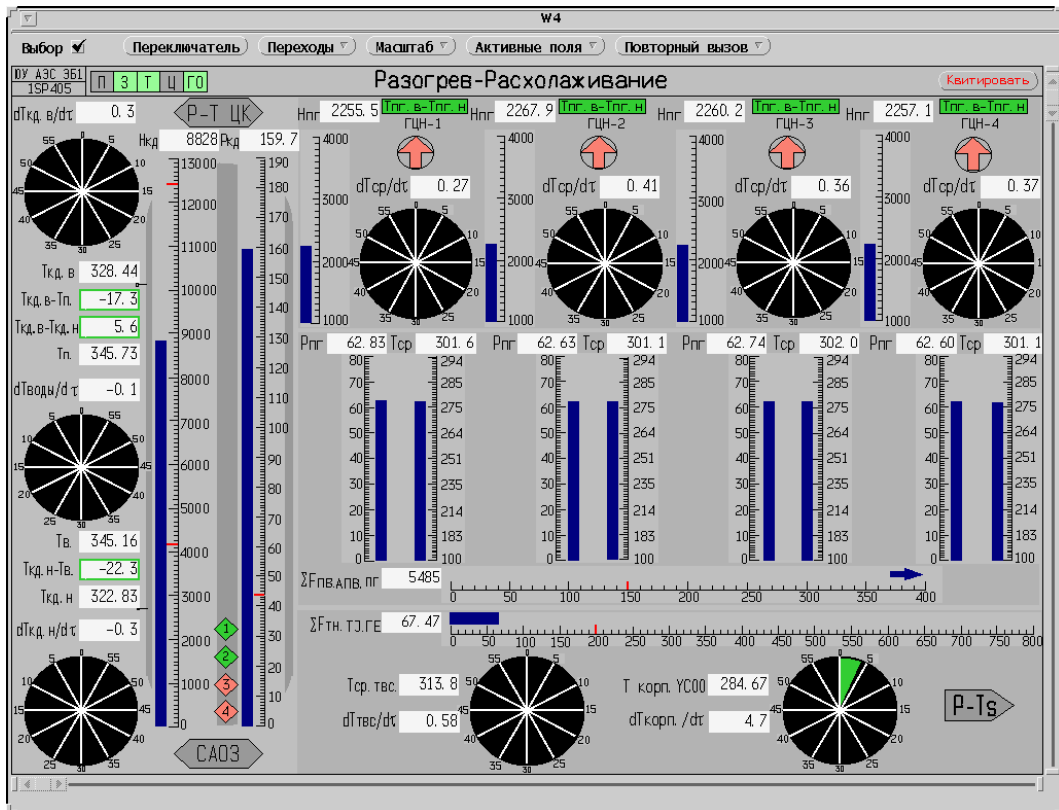


Рис. 2. Відеокадр, орієнтований на задачу

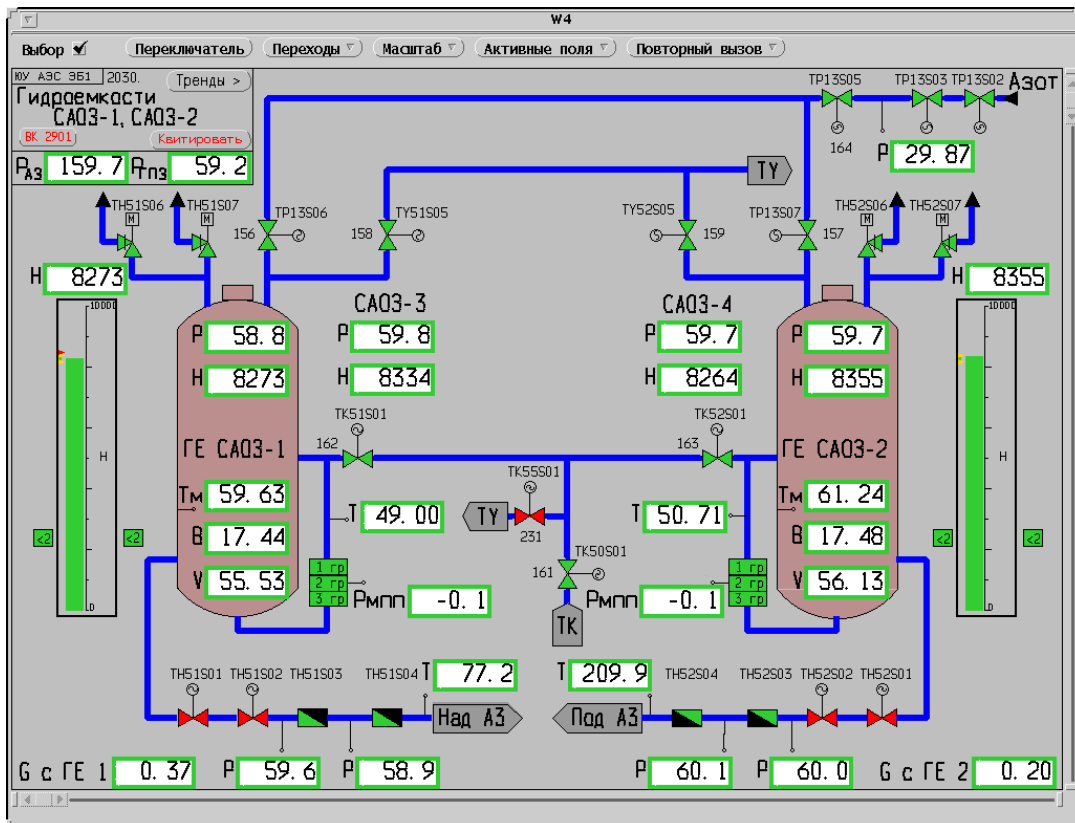


Рис. 3. Відеокадр, орієнтований на функцію

Екологічний інтерфейс екрану колективного користування надає інформацію для оперативної оцінки енергоблока в цілому та відображає узагальнений стан багатьох систем [5]. Його задача — підтримка оператора під час ідентифікації режиму роботи системи, виявлення локальних та глобальних тенденцій, виявлення наближення до експлуатаційних меж, оцінки ступеню виконання технологічних функцій.

Приклад відеокадру екологічного інтерфейсу приведений на рис. 4.

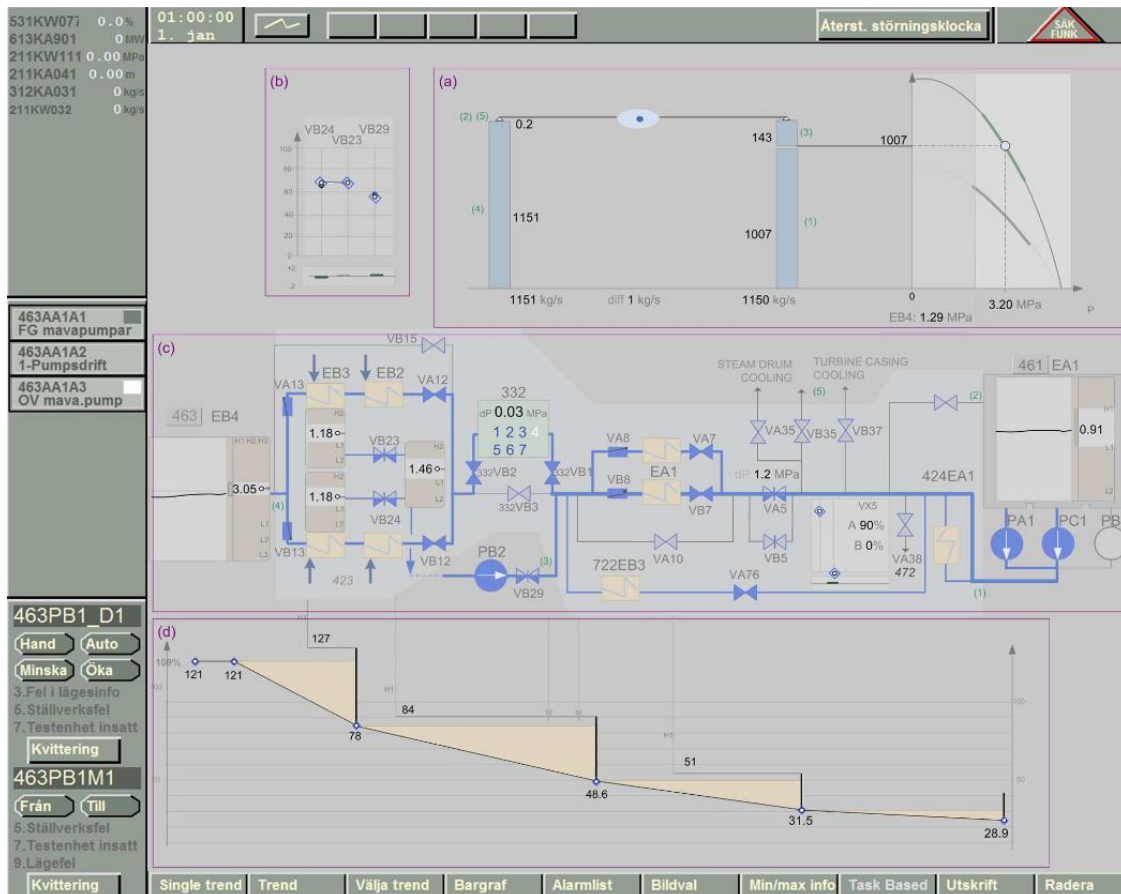


Рис. 4. Відеокадр екологічного інтерфейсу

Системи інтелектуальної підтримки

Інтелектуальна підтримка спрямована на підсилення здібностей людини приймати рішення в різноманітних ситуаціях та супроводження її дій. На відміну від СПО інформаційної підтримки, які відображають інформацію, СПО інтелектуальної підтримки виконують функції автоматизованого аналізу інформації та надають рекомендації на основі даних, баз знань та алгоритмів їх обробки.

Розвиток інтелектуальних систем для АЕС значно прискорюється протягом останніх двох десятиліть, що підтверджується кількістю присвячених їм наукових публікацій. У дослідженні [6] автори аналізують кількість та тематику публікацій щодо використання штучного інтелекту та інтелектуальних систем на АЕС. У В результаті аналізу авторами виділяються дві категорії застосування інтелектуальних систем на АЕС.

Перша категорія орієнтована на підтримку технологічних процесів та технічних засобів і спрямована на підтримку виконання наступних задач:

- оптимальне використання ядерного палива;
- обробка великого об'єму даних та його аналіз;



- автоматизоване керування технологічними процесами;
- раннє виявлення та діагностика відхилень.

Друга категорія орієнтована на підтримку ОП, тобто відноситься до категорії СПО. Зокрема, визначаються наступні напрямки інтелектуальної підтримки:

- удосконалення інформаційної підтримки в системі «людина-машина»;
- фільтрація сигналізації з метою зменшення навантаження на ОП;
- підтримка комп'ютеризованих процедур.

Сучасний стан СПО в на АЕС України

Для визначення стану використання СПО та потенційних напрямків їх розвитку було виконано дослідження на діючих енергоблоках Рівненської та Південноукраїнської АЕС, а також в навчально-тренувальному центрі Рівненської АЕС.

Коротко охарактеризуємо СПО, що використовуються в Україні на даний час.

Основна система, з якою взаємодіє ОП АЕС — це **інформаційно-обчислювальна система енергоблоку (ІОС)**. ІОС є розподіленою системою, що приймає стан параметрів енергоблоку від власних датчиків та цифрових ПТК, обчислює значення розрахункових параметрів за запрограмованими алгоритмами. Має розвинуту систему відображення параметрів у вигляді значень, графіків та мнемосхем, що може бути адаптована персоналом відділу супроводу ПТК на АЕС. Приклад відображення параметрів ІОС приведений на рис. 5.

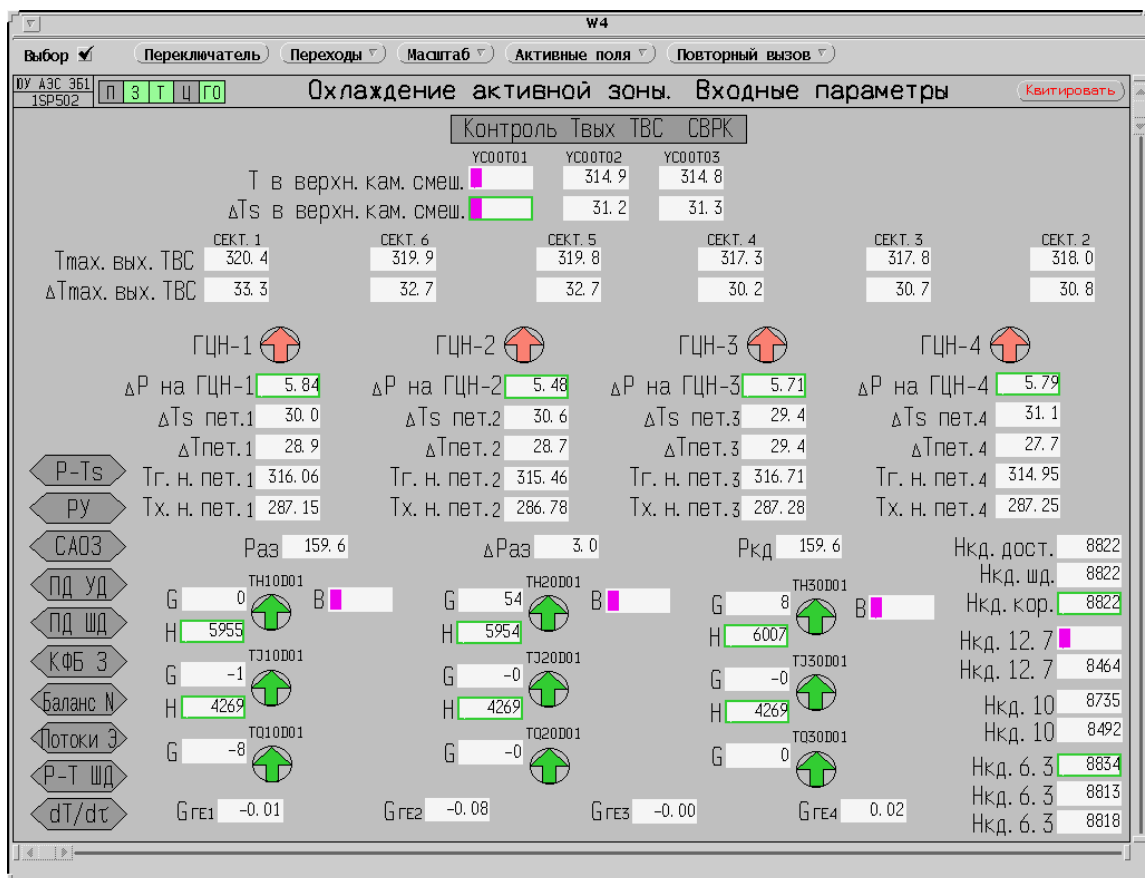


Рис. 5. Відображення інформаційних параметрів ІОС



ІОС також має розвинуті засоби пошуку інформації, архівування та створення звітів. Таким чином, дана система відноситься до класу інформаційних СПО.

Іншою СПО, яка використовується, є **система представлення параметрів безпеки (СППБ)**. Раніше дана система була автономною, в теперішній час вона є складовою частиною ІОС. Ця система отримує, розраховує та відображає стан критичних функцій безпеки (КФБ) енергоблоку. Результати відображаються у наступні способи:

- полярні діаграми нормального стану параметрів (так звані «шайби»), приведені на рис. 6;
- дерева КФБ, які представляють параметри безпеки у вигляді дерев рішень з підсвіткою визначених гілок та необхідних дій ОП (рис. 7);
- гістограми та схеми, що відображають допустимі межі значень параметрів згідно ТРБЕ та видають попередження у випадках порушення даних меж (рис. 8).

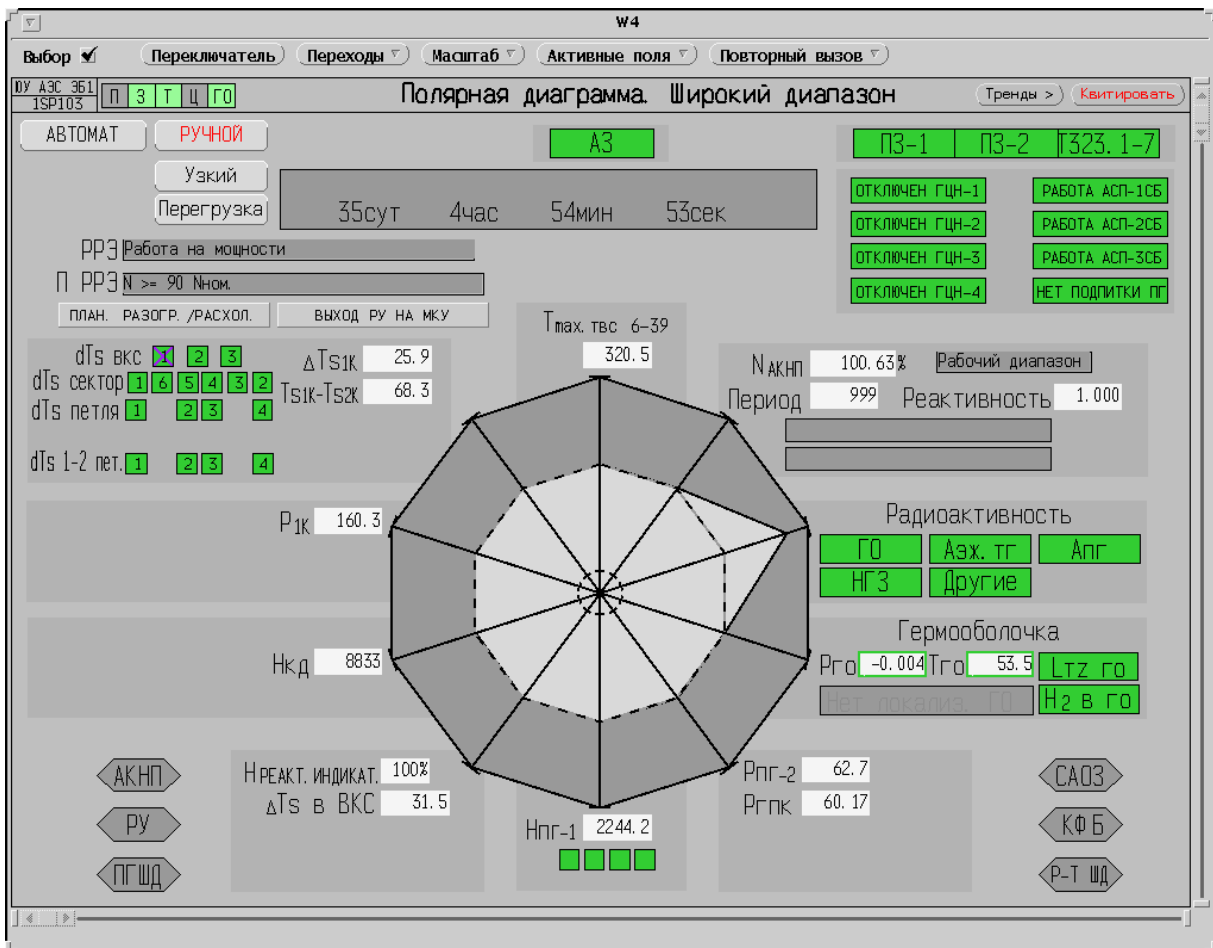


Рис. 6. Полярна діаграма параметрів безпеки

Слід зазначити, що СППБ також є інформаційною, тобто вона не містить інформації про процедури керування, а лише призначена для полегшення для ОП процесу контролю допустимих меж параметрів та аналізу стану функцій безпеки.

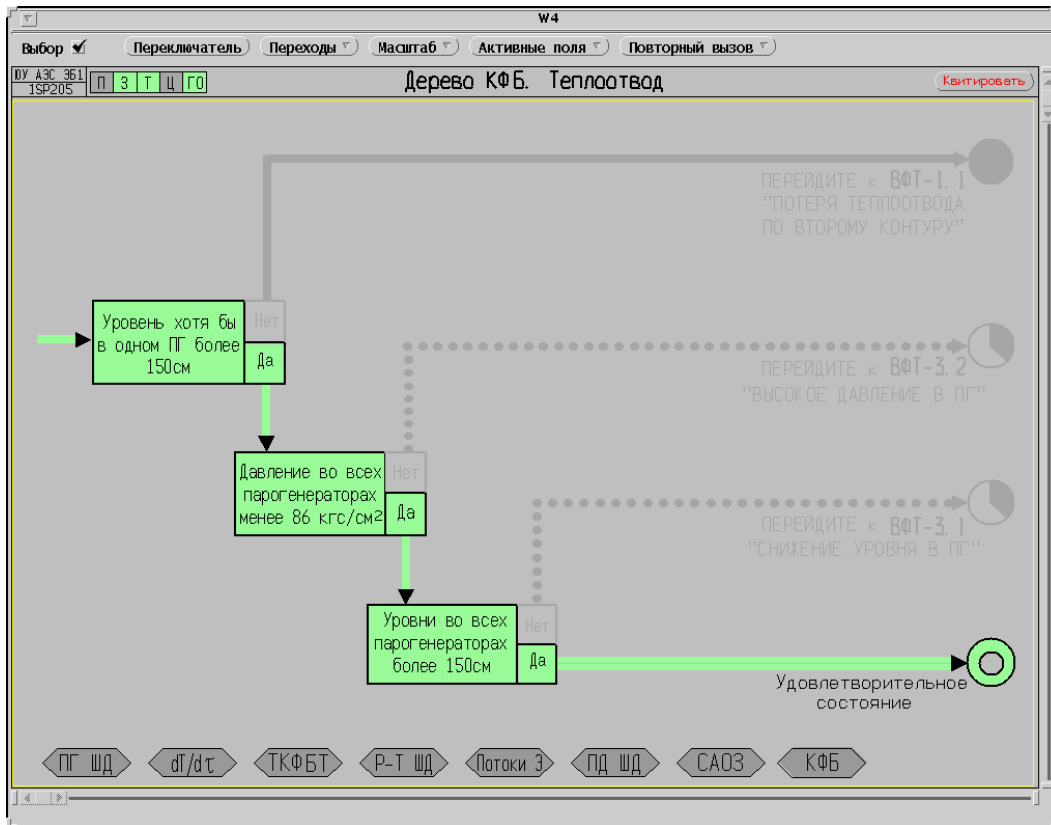


Рис. 7. Дерево рішень критичних функцій безпеки

Параметр	Значение	Уставки
Нейтронная мощность реактора, % Нном.	100.7	70.90
Тепловая мощность реактора, МВт	3014	2126
Ср. подогрев теплоносит. по петлям 1 к, град. С	28.7	30.5
Макс. подогрев теплоносит. на петле 3, град. С	29.5	30.7
Макс. подогрев теплоносит. на ТВС без СВП, град. С	33	36
Макс. подогрев теплоносителя на ТВС с СВП, град. С	32	39
Уставка сраб. АЗ по нейтронной мощности в зависимости от кол-ва ГЦН, %		
Уставка сраб. РОМ в завис. от кол-ва ГЦН, %	105.0	
Давление в первом контуре, кгс/см ²	160.2	175.0 153
Ср. темп. теплоносит. на входе в реактор, град. С	287.2	288.0
Макс. расход питательной воды по петле 1, т/час	1446	1530
Коэффициент неравномерности энерговыделения в активной зоне К _д	1.51	1.66
Положение регулирующей группы ОР СУЗ от низа активной зоны при Nнейтр. 100.7 N ном %	86.4	90 70

Рис. 8. Відображення допустимих меж експлуатації РУ

Ще однією інформаційною системою, яка використовується на РАЕС, є система «СПРУТ» [Error! Reference source not found.]. Вона забезпечує відображення параметрів роботи енергоблоку авторизованим користувачам в межах АЕС, а також надає інформацію для зовнішніх користувачів — диспетчерів енергосистем та експлуатуючої організації. ОП дана система не використовується. Функцій інтелектуальної підтримки система не має. Приклад інформації, що відображається системою «СПРУТ», приведений на рис. 9.

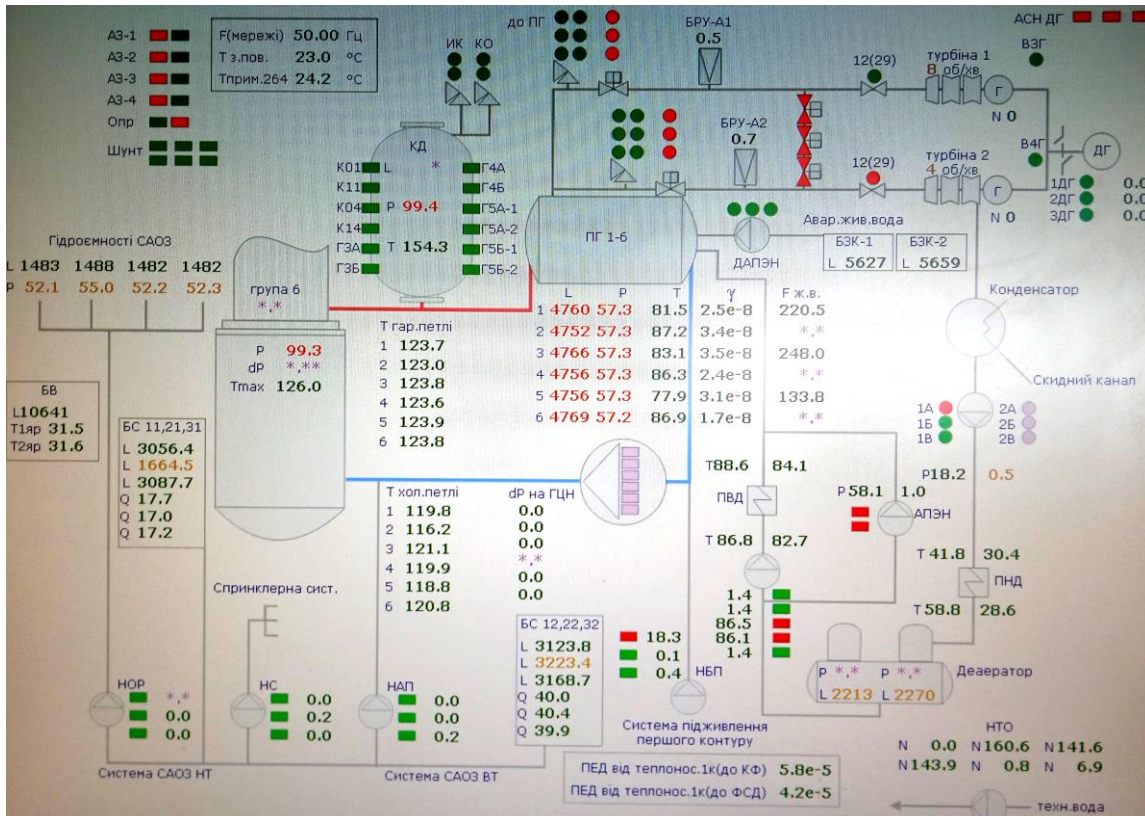


Рис. 9. Інформаційний відеокادر системи «СПРУТ»

СПО, що має властивості інтелектуальної підтримки, можна назвати системою внутрішньореакторного контролю (СВРК) [Error! Reference source not found.]. Вона отримує інформацію про стан реакторної установки, та на основі математичних моделей прогнозує стан реактора на декілька діб вперед. Приклад відображення параметрів на основі даних про стан реактора приведено на рис. 10.

В результаті огляду існуючих систем, що експлуатуються, слід зазначити, що на даний час основна частина СПО спрямована на аналіз та відображення найважливіших для безпеки параметрів роботи РУ, але не охоплює переважну більшість ситуацій та процедур, що виникають під час порушень умов нормальної експлуатації (ІЛП) та виникненні аварійних станів (ІА). При виникненні порушень умов нормальної експлуатації або виникненні аварійної ситуації ОП аналізує дані за допомогою інформаційної моделі та приймає рішення на основі інструкцій та власного досвіду і знань, тобто інтелекту. Для покращення ситуації з інтелектуальною підтримкою в Україні були спроби розробки інтелектуальних СПО.

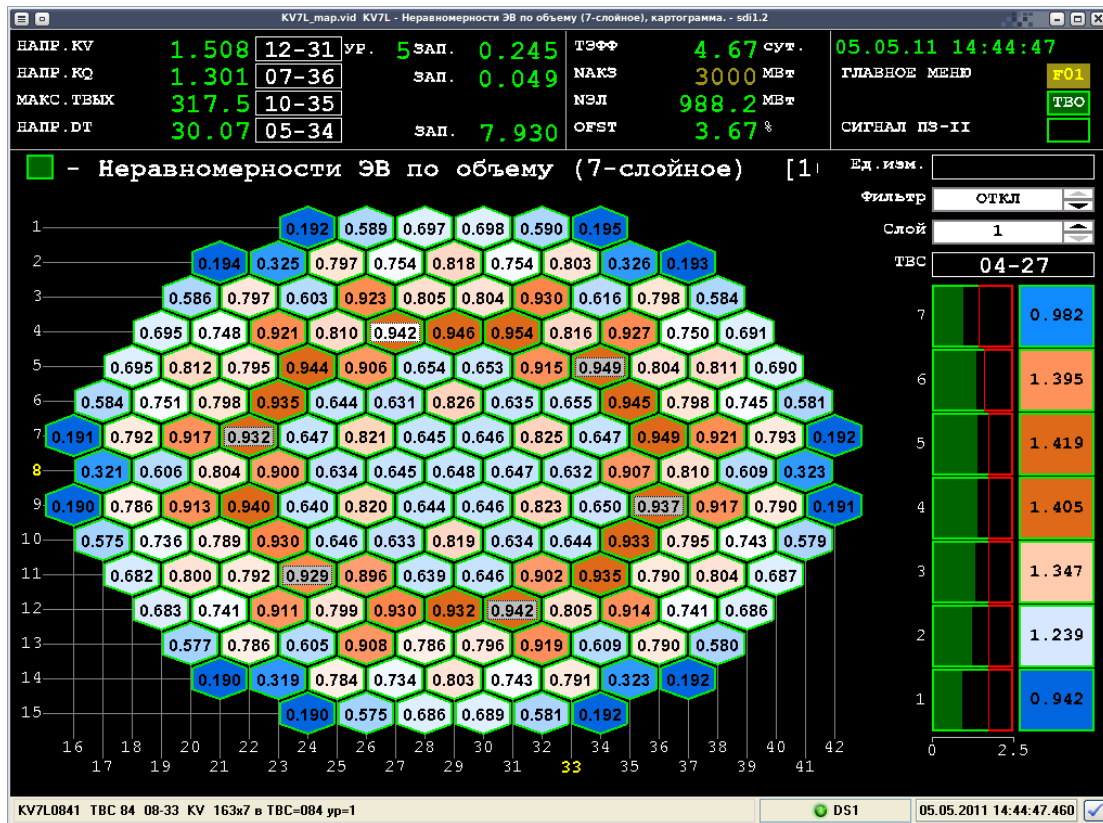


Рис. 10. Інформаційний відеокادر системи «СВРК»

Одним з проєктів, що пропонувався, була система раннього попередження порушень (СРПП). Ця система здібна виконати раннє визначення відхилення від умов нормальної експлуатації до спрацювання аварійної сигналізації, спрогнозувати подальшу поведінку параметрів і видати ОП рекомендації по ліквідації порушення.

Першою функцією даної системи передбачалося проведення ранньої діагностики початку перехідного процесу, тобто «наближення» значення параметру до умов його формування (рис. 11). Другою функцією було відображення можливих причин та рекомендованих дій ОП на основі завчасно підготовлених переліків (рис. 12).

Згідно досліджених протоколів нарад фахівців АЕС, було визнано ряд потенційних напрямків розвитку прототипу даної системи. Наприклад, пропонувалося виключити виведення списку причин, що за значеннями інших параметрів не можуть являтися істинними причинами події; додати динамічний аналіз даних під час перехідного процесу; додати підтримку всіх основних станів РУ; додати пріоритетність при одночасному виявленні декількох порушень. Демонстрація та обговорення функцій системи велися у 2013–2014 роках. Проте розробки та впровадження за різних причин не відбулося. В той же час було створено прототип іншої інтелектуальної системи — АІС СОАІ (автоматична інформаційна система симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій). Ця система була призначена для забезпечення покрокового супроводу ОП при виникненні симптомів аварійної ситуації, виконуючи контроль і формування сигналізації по умовах входу, діям постійного контролю, стану КФБ. АІС СОАІ виконувало розрахунок умов та відображення рекомендацій оператору при проходженні кроків СОАІ та допоміжної інформації. Метою впровадження АІС СОАІ було виключення помилкових дій оператора при аварійних ситуаціях та аваріях.

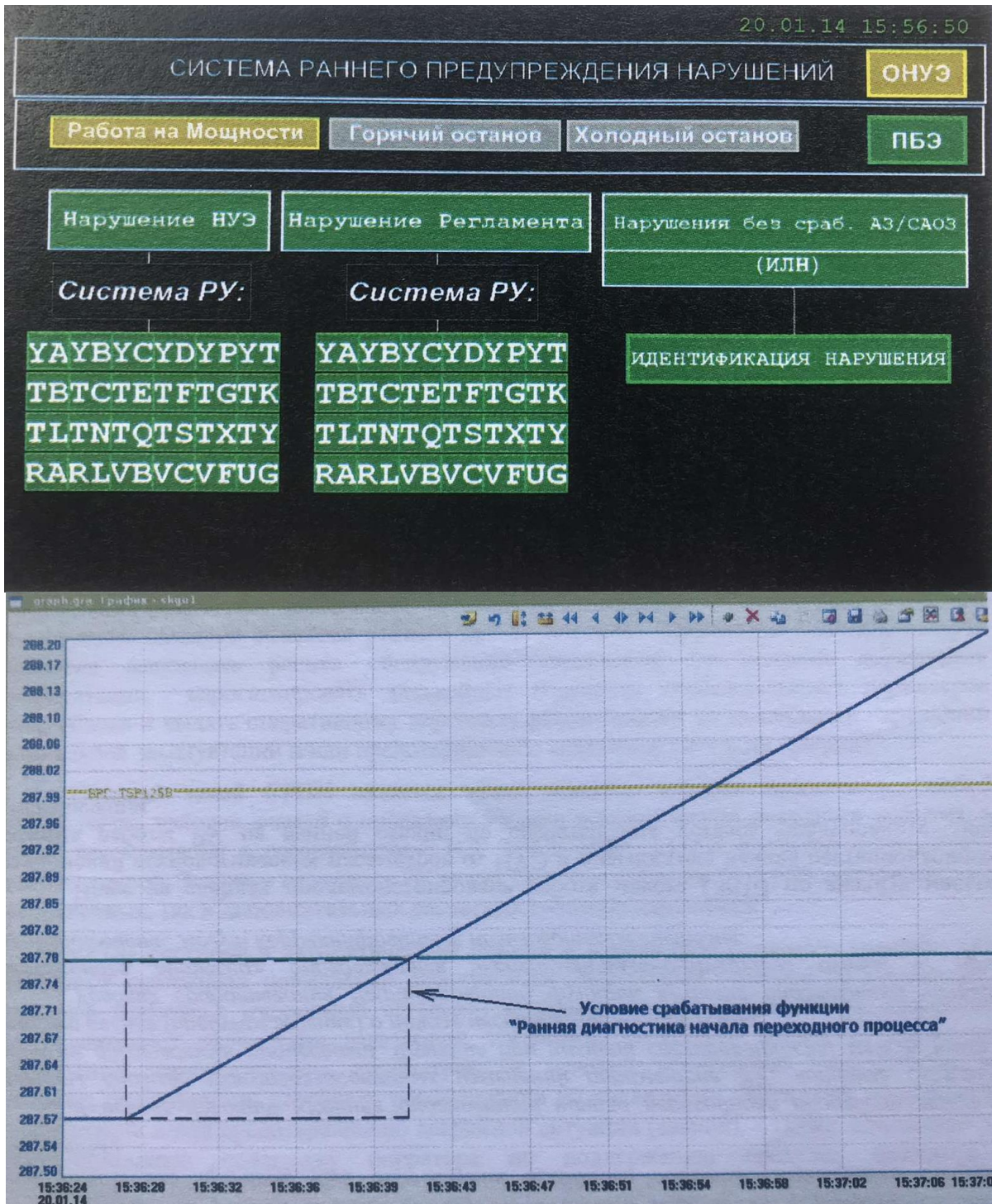


Рис. 11. Ранняя диагностика початку переходного процесу

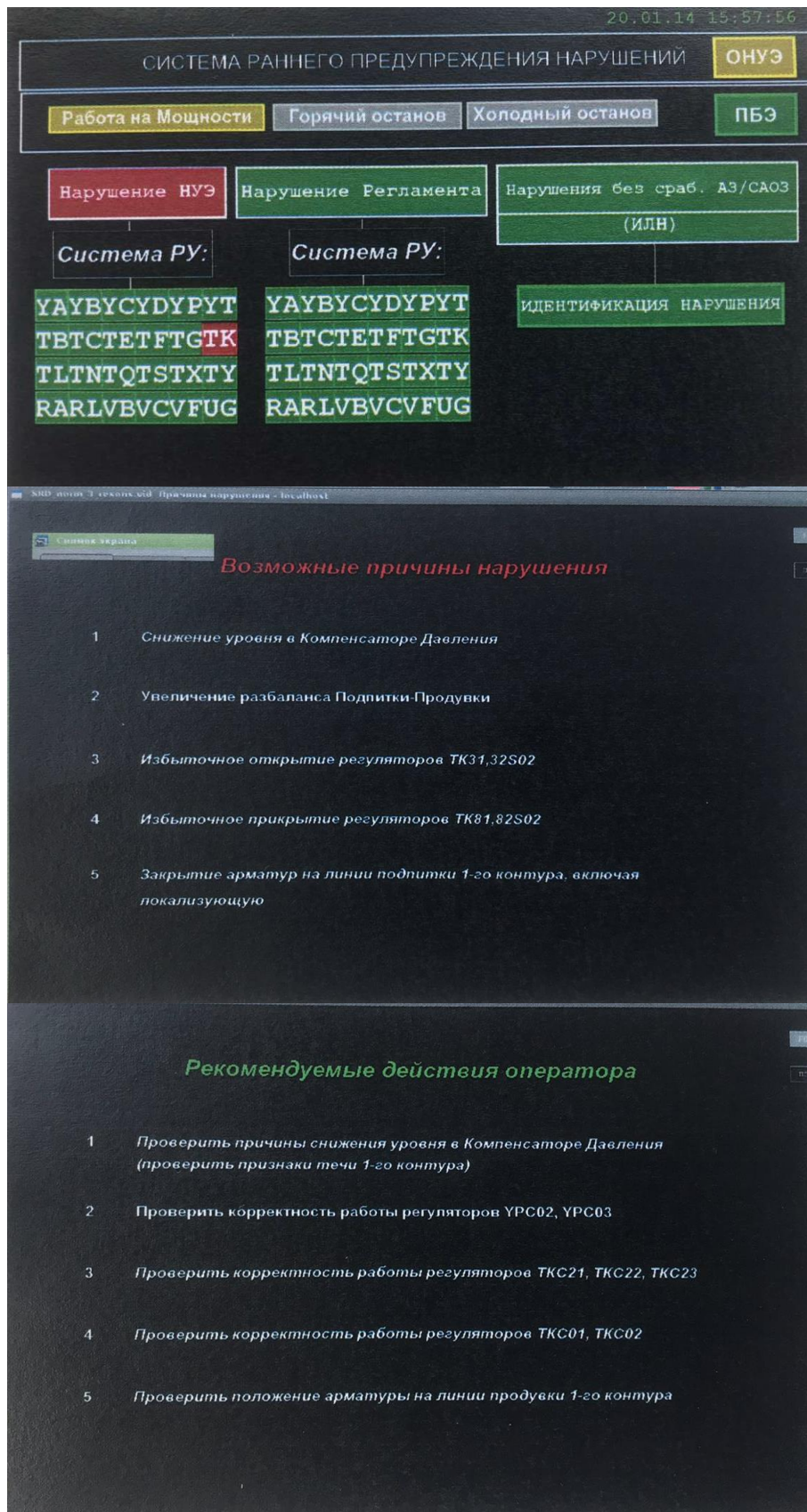


Рис. 12. Відображення можливих причин та дій

Впровадження системи було заплановано на повномасштабних тренажерах та на енергоблоках АЕС. В якості пілотного проекту було обрано ХАЕС, оскільки на цій станції вперше було впроваджені власне СОАІ (загальний алгоритм приведений на рис. 13) та СПО СОАІ у вигляді карток реакції на аварійний сигнал (детальний опис аварії та можливі причини). Проте прототип системи був встановлений на тренажері ХАЕС; на енергоблоках АЕС на даний момент дана система не використовується.

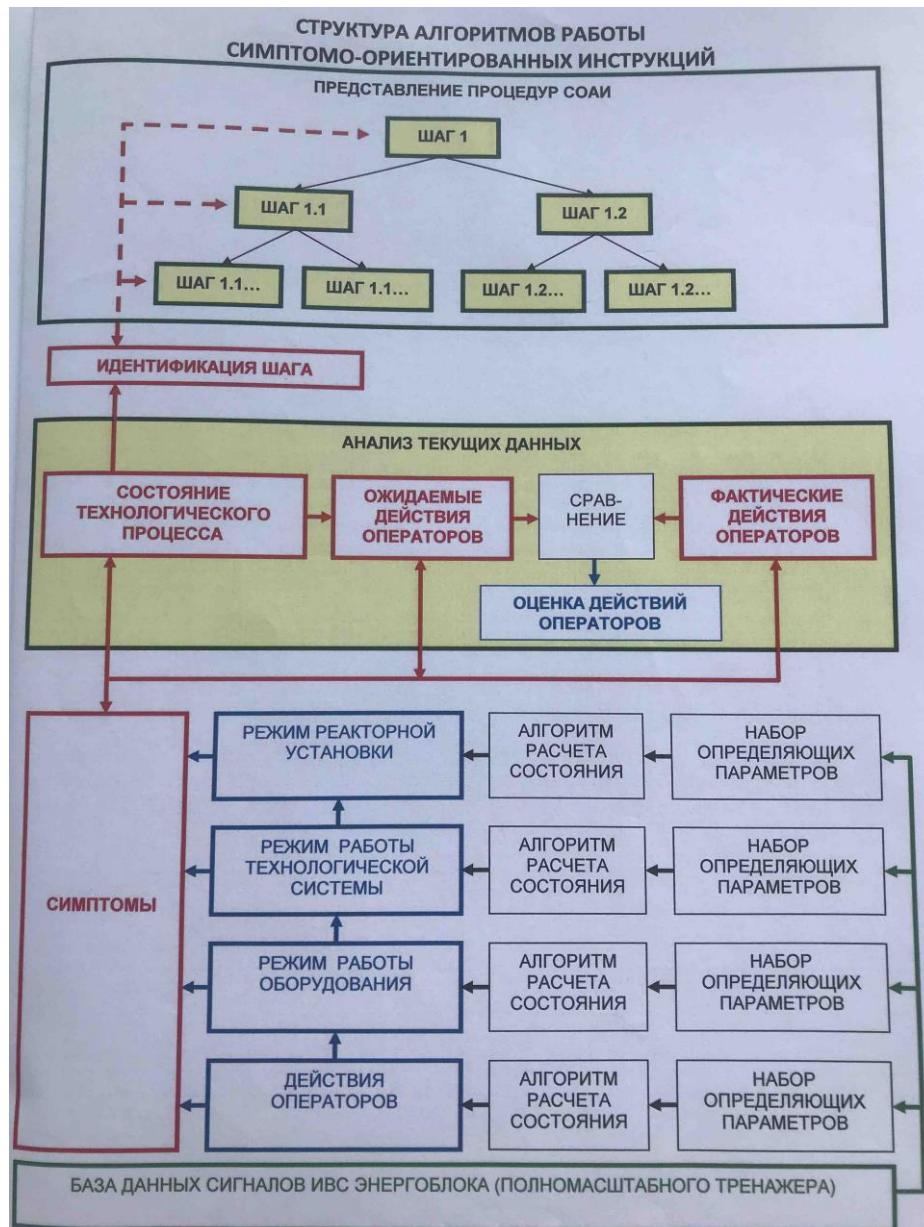


Рис. 13. Загальний алгоритм СОАІ

Підсумовуючи даний огляд, можна зробити висновок, що на діючих енергоблоках на даний час використовуються переважно інформаційні системи. Сфера використання СПО на АЕС України має великий потенціал для розвитку, розробка інформаційних технологій та розвиток інтелектуальних СПО на АЕС України є актуальною науково-практичною задачею.



Напрямки проєктування інтелектуальних СПО на АЕС України

Як зазначалося вище, при керуванні енергоблоком інтенсивність задач ОП залежить від режиму роботи. Якщо під час роботи на потужності або зупинці на ремонт основною задачею ОП є спостереження за протіканням технологічних процесів та періодична корекція режимів роботи автоматичних систем, то під час перехідних процесів, а тим більш виникненні відхилень та аварійних ситуацій кількість задач збільшується, а кількість часу на їх виконання зменшується. При інтенсивному режимі роботи ППУР та ППУТ мають знаходитися біля пультів керування, спостерігати за показами приладів та швидко оперувати ключами, тобто працювати «у полі», «очима» та «руками». При цьому у людини виникає дефіцит часу на аналіз обстановки та планування дій з врахуванням вимог процедур. В таких ситуаціях на допомогу приходять НЗБ, НСРЦ, НСТЦ, що присутні на БЩУ. Вони аналізують інформацію від операторів, надають голосову підтримку згідно необхідних процедур та контролюють виконання дій операторами, попереджуючи їх про виникнення додаткових умов. Слід зазначити, що пошук інформації в об'ємних регламентах не завжди може здійснюватися швидко, а тренованість та міцна пам'ять операторів може зазнати впливу людського фактору. Крім того, при модернізації обладнання енергоблоку в інформаційну модель та регламенти вносяться зміни, при цьому швидка адаптація оператора може ускладнитися. В результаті, як показують проведені дослідження існуючих СПО, оператори переважно використовують інформаційні системи підтримки та власні знання в межах технологічного регламенту безпечної експлуатації (ТРБЕ), інструкцій з ліквідації порушень та аварійних ситуацій (ІЛП та ІЛА).

На основі аналізу викликів, з якими стикається ОП при керуванні енергоблоком, можуть бути виділені **наступні напрямки використання систем підтримки**.

Ідентифікація відхилень. СПО може забезпечувати ідентифікацію станів енергоблоку, описану в регламенті. Інтелектуальною складовою в даному випадку може бути аналіз дотичних ознак, які прямо не вказані в інструкціях, але допомагають ідентифікувати ситуацію і вимагають досвіду операторів. За умови аналізу додаткових дотичних ознак СПО може точніше ідентифікувати ситуацію на надати ОП більш конкретні рекомендації.

Наприклад, причинами інформування про несанкціоноване зниження тиску пари в турбіні (величини «W») може бути або відмова датчиків систем керування (при цьому реального відхилення немає), або неявні додаткові умови (зменшення електричної потужності генератора «Nel», ріст температури відпрацьованої пари «t», ріст тиску в головному паровому колекторі «Ргпк»), що додатково підтверджують наявність відхилення.

Надання рекомендацій дій ОП та аналіз їх виконання. На основі бази знань та ідентифікації ситуації СПО може надавати ОП рекомендації щодо необхідних кроків. При цьому має бути знайдений оптимальний шлях виконання задачі з відкиданням непотрібної інформації та кроків, які не є необхідними в конкретній ситуації з урахуванням поточних показників параметрів.

Спостереження за протіканням ситуації та коректування дій. Після надання оператору рекомендацій щодо необхідних кроків СПО може продовжувати відслідковувати та аналізувати параметри, оскільки під час виконання процедури параметри можуть змінитися та може виникнути необхідність в корекції поточної процедури або переході на іншу процедуру. Крім того, у випадку внесення додаткових умов оператором (невиконання кроку або виконання іншої дії) СПО може запропонувати альтернативний шлях виконання задачі, не заходячи до «тупикової» ситуації.



Прогнозування. В процесі виконання дій в різноманітних ситуаціях СПО може визначати стани та ситуації, які є суміжними з поточним, та прогнозувати подальші режими або відхилення в залежності від змін параметрів та дій ОП.

Підтримка в основних режимах. СПО може виконувати підтримку ОП в областях ТРБЕ, ІЛП та ІЛА, які діють при всіх режимах роботи енергоблоку.

Інтелектуальна діагностика. Як визначається в ТРБЕ, виведення систем керування в обслуговування, ремонт або виникнення їх несправностей під час роботи енергоблоку збільшує імовірність аварійної ситуації, тому допустима робота енергоблоку з системами в стані ремонту або несправності має обмеження. СПО може ідентифікувати стан роботи реакторної установки та стан виведення систем, важливих для безпеки, в ремонт або виникнення в них несправностей, та вказувати ОП на допустимий час та режим експлуатації в даних умовах та необхідні дії для відновлення нормального стану.

Діалог СПО з ОП. Незважаючи на інтелектуальні можливості СПО, існують рішення, які може приймати виключно людина. В даній ситуації СПО може взаємодіяти з ОП шляхом діалогу через певний інтерфейс. Дані, які отримані в даному випадку, можуть бути використані для поповнення знань СПО, наприклад для бази «дотичних» ознак станів та порушень.

Збір статистики, аналіз та формування звітів. Після ліквідації порушень та аварійних ситуацій, зазвичай проводиться аналіз причин їх виникнення, а також роботи автоматики та дій персоналу («розбір польотів»). Для даного процесу може стати також корисною інформація від СПО. Аналіз такої інформації може навіть дати основу для корекції та покращення інструкцій з керування.

Загалом, розробка СПО може покращити наступні показники керування:

- зменшити кількість параметрів, що аналізуються ОП;
- збільшити правильність ідентифікації станів та ситуацій;
- зменшити час ідентифікації станів та ситуацій;
- зменшити час пошуку необхідних процедур;
- забезпечити коректний режим виконання процедур при виникненні додаткових умов;
- забезпечити вірну пріоритетність при одночасному виникненні декількох задач.

Для реалізації СПО в даних напрямках, необхідне **розв'язання ряду науково-практичних задач**, а саме:

- розробка методу оцифровки та актуалізації регламентів;
- ідентифікація станів та ситуацій, в тому числі по непрямих ознаках;
- пошук кроків розв'язання задач;
- пошук альтернативних шляхів;
- моделювання і оцінка діяльності ОП.

СПО, що використовується для підвищення ефективності ОП під час керування енергоблоком на основі інформаційної моделі, технологічних параметрів та інструкцій, може бути реалізована як система, що діє на основі комп'ютеризованих процедур. Загальні вимоги до даних систем приводяться в міжнародному стандарті ІЕС62646 [9].

В даному стандарті комп'ютеризована процедура визначається як інтерактивне програмне забезпечення, що використовується для надання рекомендацій операторам АЕС по процедурам керування, яке може, на відміну від паперово-орієнтованих процедур, містити динамічні характеристики процесу та доступ до органів керування.

Дослідження СПО на основі підтримки комп'ютеризованих процедур проведені, наприклад, в [10] та [11].



Для побудови інтелектуальних систем підтримки комп'ютеризованих процедур можуть бути застосовані різноманітні методи. Це статистичні методи, Байєсові мережі, продукційні правила, мережі Петрі, дерева рішень, машинне навчання, нечітка логіка, нейронні мережі, генетичні алгоритми, семантичні мережі тощо.

ВИСНОВКИ ТА ПЕРСПЕКТИВИ ПОДАЛЬШИХ ДОСЛІДЖЕНЬ

1. Системи підтримки оператора (СПО) використовуються для підвищення ефективності керування енергоблоком АЕС. Дослідження видів та функцій систем підтримки дозволило отримати наступні результати. СПО можуть бути впроваджені на різному технологічному рівні (класифікуються за рівнем — станція, енергоблок, відділення, окрема підсистема), для різних типів задач ОП (регулювання, перехідні процеси, усунення порушень, випробовування обладнання), для різних етапів діяльності ОП (виявлення задач, аналіз ситуації, планування дій, виконання дій). Також СПО можуть надавати інформаційну або інтелектуальну підтримку. Інформаційна підтримка спрямована на підвищення інформованості ОП про стан технологічних процесів та полегшення її аналізу. Інтелектуальні СПО виконують аналіз інформації та на основі бази знань надають рекомендації ОП та контролюють виконання з дій керування.

2. Аналіз існуючих СПО на АЕС України дозволив зробити наступні висновки. На теперішній час ефективно використовуються системи інформаційної підтримки ОП: інформаційно-обчислювальна система (ІОС), система представлення параметрів безпеки (СППБ), інформаційна система СПРУТ. Розробка інтелектуальних систем підтримки ОП проводилася, зокрема система раннього попередження порушень (СРПП) та система автоматизована інформаційна система симптомно-орієнтованих аварійних інструкцій (АІС СОАІ). Проте на діючих енергоблоках на даний час такі системи не використовуються.

3. На основі проведених досліджень існуючих СПО, задач ОП та документації на АЕС було визначено актуальні напрямки проєктування СПО. Серед них:

- інтелектуальна ідентифікація безпечних станів обладнання, відхилень нормальної експлуатації та аварійних ситуацій;
- надання рекомендацій ОП з кроків керування, передбаченими регламентом, в поточній ситуації;
- спостереження за діями ОП та контроль їх правильності;
- прогнозування подальшого стану обладнання;
- підтримка ОП в режимах нормальної експлуатації, ліквідації порушень та ліквідації аварійних ситуацій;
- підтримка ОП в режимах випробовування та ремонту обладнання.

У напрямку подальших досліджень буде виконано розробку інформаційної технології, що дозволить створити СПО для підтримки ОП в режимах нормальної експлуатації, ліквідації порушень та ліквідації аварійних ситуацій.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Вінтенко, Б. Ю., Миронець, І. В., & Смірнов О. А. (2024). Дослідження інформаційного забезпечення та технологічних регламентів процесів керування енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000. *Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка», 1(25), 253–278.* <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.253278>



2. Liu, P., & Li, Z. (2016). Comparison Between Conventional and Digital Nuclear Power Plant Main Control Rooms: A Task Complexity Perspective, Part I: Overall Results and Analysis. *Int. J. Ind. Ergonom.*, 51, 2–9.
3. Silva, L. C., Borges, M. R. D. S., & Carvalho, P. V. R. (2012). Human Factors Evaluation in Nuclear Power Plant Control Rooms Using a Mobile System to Support Collaborative Observation. *Prog. Nucl. Energy*, 55, 93–101.
4. Oliveira¹, M. V. D., Santos¹, I. J. A. L., Carvalho, P. V. R. D., Mol, A. C. A., Grecco, C. H. S., & Moreira D. M. (2007). Design and Evaluation of Human-System Interfaces for Industrial Plants. *2007 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007*.
5. Lau, N., et al. (2008). Ecological Interface Design in the Nuclear Domain: An Application to the Secondary Subsystems of a Boiling Water Reactor Plant Simulator. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55(6), 3579–3596. <https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2005979>
6. Lu, C., et al. (2020). Nuclear Power Plants with Artificial Intelligence in Industry 4.0 Era: Top-Level Design and Current Applications – a Systemic Review. In: *IEEE Access*, 8, 194315–194332. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032529>
7. Унікальний в Україні програмно-апаратний комплекс «Спрут» застосовують на Рівненській АЕС • Новини компанії • Інформаційна служба маркетплейсу Ub.ua. (б. д.). ub.ua. <https://ukrbiznes.ub.ua/news/33545-unikalniy-v-ukrayini-programno-aparatniy-kompleks-sprut-zastosovuyut-na-rivnenskiy-aes.html>
8. Система внутрішньореакторного контролю СВРК-М. (б. д.). ПрАТ «СНВО «Імпульс». <https://impulse.ua/index.php/ua/svrk-3>
9. *Nuclear power plants – Control rooms – Computer based procedures* (IEC62646-2019). (n. d.).
10. Boring, R. L., Thomas, K. D., Ulrich, T. A., & Lew, R. T. (2015). Computerized operator support systems to aid decision making in nuclear power plants. *Procedia Manuf.*, 3, 5261–5268.
11. Cetiner, S. M., Muhlheim, M. D., Flanagan, G. F., Fugate, D. L., & Kisner, R. A. (2014). *Development of an automated decision-making tool for supervisory control systems*. <https://doi.org/10.2172/1252136>
12. Вінтенко, Б. Ю., Смірнов, О. А., Коваленко, О. В., Смірнов, С. А., & Коваленко, А. С. (2023). Дослідження нормативних документів та галузевих стандартів розробки програмного забезпечення комп'ютерних систем управління АЕС, важливих для безпеки. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 2(72), 170–178. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.170>
13. Вінтенко, Б. Ю., Смірнов, О. А., Коваленко, А. С., Смірнов, С. А., & Буравченко, К. О. (2023). Дослідження вимог міжнародних стандартів IEC60880 та IEC62138 з розробки програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем АЕС, важливих для безпеки. *Системи управління, навігації та зв'язку*, 3(73), 155–166. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.155>
14. Вінтенко, Б., Миронець, І., Смірнов, О., Кравчук, О., Козірова, Н., Савеленко, Г., & Коваленко, А. (2024). Дослідження вимог та аналіз кібербезпеки програмного забезпечення інформаційно-керуючих систем АЕС, важливих для безпеки. *Кібербезпека: освіта, наука, техніка*, 3(23), 111–131. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.23.111131>
15. Гулак, Г. М., Жильцов, О. Б., Киричок, Р. В., Коршун, Н. В., & Складанний, П. М. (2024). *Інформаційна та кібернетична безпека підприємства*. Підручник. Львів : Видавець Марченко Т. В.

**Borys Vintenko**

PhD graduate student of the Department of Information Security and Computer Engineering
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
Leading engineer-programmer of KB ACS TP PJSC “Radio Scientific and
Production Enterprise”, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0009-0008-3748-0374
boris.vintenko@gmail.com

Iryna Myronets

PhD of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the
Department of Information Security and Computer Engineering
Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-2007-9943
i.myronets@chdtu.edu.ua

Oleksii Smirnov

Doctor of Technical Sciences, Professor,
Head of Cybersecurity & Software Academic Department
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-9543-874X
dr.smirnova@gmail.com

Anna Kovalenko

PhD of Technical Sciences, Associate Professor,
Associate Professor of Cybersecurity & Software Academic Department
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0003-3610-9465
annasun911@gmail.com

Oksana Konoplitska-Slobodeniuk

Lecturer
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-9981-5194
ksuha80@gmail.com

Tetiana Smirnova

PhD of Science (Engineering),
Associate Professor of Cybersecurity & Software Academic Department
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0001-6896-0612
sm.tetyana@gmail.com

Liliia Konstantynova

Lecturer of Cybersecurity & Software Academic Department
Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine
ORCID ID: 0000-0002-3305-2427
liliyashel1976@gmail.com

RESEARCH OF THE APPLICATION OF SUPPORT SYSTEMS FOR THE OPERATING STAFF OF A CRITICAL INFRASTRUCTURE FACILITY WHEN CONTROLLING A NPP POWER UNIT WITH A VVER-1000 REACTOR

Abstract. In this work, a study of the application of support systems for operational personnel of a critical infrastructure facility during the control of a power unit of a nuclear power plant with a VVER-1000 type reactor was carried out. The purpose of this article is to study the current directions for the application of SPO at NPPs, to analyze the experience of using operator support systems at NPPs of Ukraine, and to determine the current directions for the design of operator support systems based on the analysis. The object of the study is the process of using the operator support system in the management of the NPP power unit. The subject of the study is the classification of support systems



according to various characteristics, the experience of using SPO at Ukrainian NPPs, current tasks in the design of SPO at NPPs of Ukraine. The following tasks were solved in this study: The typical types of operator support systems were determined and classified by the type of support, volume and performed functions; Existing operator support systems used at Ukrainian NPPs were analyzed; Current directions for designing operator support systems are defined. It is also determined that in the direction of further research, the development of information technology will be carried out, which will allow the creation of SPO to support the OP in the modes of normal operation, elimination of violations and elimination of emergency situations.

Keywords: safety of critical infrastructure; nuclear power plants; information management systems; software and technical complexes; information model; technological regulation; energy.

REFERENCES (TRANSLATED AND TRANSLITERATED)

1. Vintenko, B., Myronets, I., Smirnov, O., Kovalenko, O., Smirnov, S., Buravchenko, K., & Yakymenko, N. (2024). Research of information security and technological regulations of the management processes of the critical infrastructure of a npp power unit with a vver-1000 reactor. *Electronic Professional Scientific Journal "Cybersecurity: Education, Science, Technique"*, 1(25), 253–278. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.253278>
2. Liu, P., & Li, Z. (2016). Comparison Between Conventional and Digital Nuclear Power Plant Main Control Rooms: A Task Complexity Perspective, Part I: Overall Results and Analysis. *Int. J. Ind. Ergonom.*, 51, 2–9.
3. Silva, L. C., Borges, M. R. D. S., & Carvalho, P. V. R. (2012). Human Factors Evaluation in Nuclear Power Plant Control Rooms Using a Mobile System to Support Collaborative Observation. *Prog. Nucl. Energy*, 55, 93–101.
4. Oliveira¹, M. V. D., Santos¹, I. J. A. L., Carvalho, P. V. R. D., Mol, A. C. A., Grecco, C. H. S., & Moreira D. M. (2007). Design and Evaluation of Human-System Interfaces for Industrial Plants. *2007 International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007*.
5. Lau, N., et al. (2008). Ecological Interface Design in the Nuclear Domain: An Application to the Secondary Subsystems of a Boiling Water Reactor Plant Simulator. In: *IEEE Transactions on Nuclear Science*, 55(6), 3579–3596. <https://doi.org/10.1109/TNS.2008.2005979>
6. Lu, C., et al. (2020). Nuclear Power Plants with Artificial Intelligence in Industry 4.0 Era: Top-Level Design and Current Applications – a Systemic Review. In: *IEEE Access*, 8, 194315–194332. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3032529>
7. *Unique in Ukraine hardware and software complex "Sprut" is used at Rivne NPP - Company news - Information service of the marketplace Ub.ua.* (n. d.). ub.ua. <https://ukrbiznes.ub.ua/news/33545-unikalniy-v-ukrayini-programno-aparatniy-kompleks-sprut-zastosovuyut-na-rivnenskiy-aes.html>
8. *SVRK-M in-reactor monitoring system.* (n. d.). PJSC SNPO Impulse. <https://impulse.ua/index.php/ua/svrk-3>
9. *Nuclear power plants – Control rooms – Computer based procedures (IEC62646-2019).* (n. d.).
10. Boring, R. L., Thomas, K. D., Ulrich, T. A., & Lew, R. T. (2015). Computerized operator support systems to aid decision making in nuclear power plants. *Procedia Manuf.*, 3, 5261–5268.
11. Cetiner, S. M., Muhlheim, M. D., Flanagan, G. F., Fugate, D. L., & Kisner, R. A. (2014). *Development of an automated decision-making tool for supervisory control systems.* <https://doi.org/10.2172/1252136>
12. Vintenko, B., Smirnov, O., Kovalenko, O., Smirnov, S., & Kovalenko, A. (2023). Study of regulatory documents and industry standards for the development of software for NPP computer control systems important for safety. *Control, Navig. Commun. Syst.*, 2(72), 170–178. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.2.170>
13. Vintenko, B. Yu., Smirnov, O. A., Kovalenko, A. S., Smirnov, S. A., & Buravchenko, K. O. (2023). Study of the requirements of international standards IEC60880 and IEC62138 for the development of software for information and control systems of nuclear power plants important for safety. *Control, navigation and communication systems*, 3(73), 155–166. <https://doi.org/10.26906/SUNZ.2023.3.155>
14. Vintenko, B., Myronets, I., Smirnov, O., Kravchuk, O., Kozirova, N., Savelenko, G., & Kovalenko, A. (2024). Study of requirements and analysis of cyber security of the software of information and control systems of NPPs important for security. *Cybersecurity: education, science, technology*, 3(23), 111–131. <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.23.111131>
15. Hulak, H. M., Zhiltsov, O. B., Kyrychok, R. V., Korshun, N. V., & Skladannyi, P. M. (2024). *Information and cyber security of the enterprise.* Textbook. Lviv: Publisher Marchenko T. V.

