

Б. Ю. Вінтенко^{1,2}, Т. В. Смірнова³, І. В. Миронець², О. А. Смірнов³, К. О. Буравченко³

¹ ПАТ “Науково-виробниче підприємство “Радій”, Кропивницький, Україна

² Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна

³ Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна

МЕТОД ОЦІНКИ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ СТІЙКОСТІ КОМП'ЮТЕРНО-ОРІЄНТОВАНИХ ПРОЦЕДУР СИСТЕМИ ПІДТРИМКИ ОПЕРАТИВНОГО ПЕРСОНАЛУ АЕС

Анотація. Актуальність. Атомні електростанції є великими високотехнологічними підприємствами, що містять велику кількість обладнання, складних процесів перетворення енергії та інформаційно-керуючих систем. Послідовності дій керування, що описані в регламентах, на АЕС мають вигляд паперово-орієнтованих або комп'ютерно-орієнтованих процедур. Використання комп'ютерно-орієнтованих процедур надає можливість створення систем підтримки оперативного персоналу, які підвищують надійність та зменшують навантаження на оперативний персонал при виконанні складних операцій. Важливою вимогою до систем підтримки оперативного персоналу, що використовуються на АЕС, є забезпечення відмовостійкості. При виникненні відмови у системі критичного застосування оператору необхідно мати достовірну інформацію, як сильно відмова впливає на працездатність системи та чи здатна система виконувати свої функції, тобто оцінити її функціональну стійкість. Для цього необхідно констатувати не тільки факт відмови, а і сформулювати чисельну оцінку рівня функціональної стійкості за відповідною шкалою. **Об'єкт дослідження:** процес функціональної стійкості елементів комп'ютерно-орієнтованої процедури у складі інформаційної системи підтримки оперативного персоналу АЕС. **Мета статті:** розробка методу чисельної оцінки функціональної стійкості елементів інформаційної системи підтримки оперативного персоналу АЕС. **Результати дослідження.** Розглянута оцінка працездатності компонентів комп'ютерно-орієнтованої процедури у складі системи підтримки оперативного персоналу АЕС. Запропоноване використання показників функціональної стійкості в якості числових критеріїв оцінювання. Запропоновано метод обчислення максимального, поточного та критичного рівня функціональної стійкості. **Висновки.** Даний метод відрізняється від відомих методів діагностики не тільки оцінкою факту наявності відмови, а і визначенням кількісної оцінки здатності системи виконувати свої функції. Запропонований метод може бути застосований для діагностування компонентів інформаційних систем критичного застосування, що отримують інформацію від резервованих та диверсифікованих джерел даних.

Ключові слова: чисельна оцінка, функціональна стійкість, інформаційна система, система підтримки прийняття рішень, підтримка оперативного персоналу, АЕС.

Вступ

Постановка проблеми. Атомні електростанції є великими високотехнологічними підприємствами, що містять велику кількість обладнання, складних процесів перетворення енергії та інформаційно-керуючих систем (ІКС). Основний оперативний персонал (ОП), що керує енергоблоком АЕС, знаходиться на блочному щиті керування (БЩУ). Для керування енергоблоком ОП використовує прилади, індикатори, табло, монітори та ключі керування, які знаходяться на БЩУ. Керування здійснюється згідно з технологічними регламентами та інструкціями, виконання вимог яких є обов'язковим для ОП [1].

Послідовності дій керування, що описані в регламентах, на АЕС мають вигляд паперово-орієнтованих або комп'ютерно-орієнтованих процедур (КОП). Використання КОП надає можливість створення систем підтримки оперативного персоналу (СПО), які підвищують надійність та зменшують навантаження на ОП при виконанні складних операцій [2].

СПО, які містять інформацію про різноманітні КОП, можуть працювати в реальному часі. При цьому вони безперервно отримують інформацію від суміжних систем енергоблоку цифровими каналами у вигляді сигналів та формують значення технологічних параметрів. Після цього значення параметрів використовуються для ідентифікації настання умов, при яких ОП має виконати керуючі дії згідно процедур.

Важливою вимогою до СПО, що використовуються на АЕС, є забезпечення відмовостійкості. Для цього застосовується велика кількість методів: самоконтроль, самодіагностика, резервування джерел даних та використання багатоверсійних технологій [3, 4]. Ці методи зменшують імовірність відмови системи та своєчасно інформують оператора про настання такої відмови. Водночас, при виникненні відмови у системі критичного застосування оператору необхідно мати достовірну інформацію, як сильно відмова впливає на працездатність системи та чи здатна система виконувати свої функції, тобто оцінити її функціональну стійкість [5]. Для цього необхідно констатувати не тільки факт відмови, а і сформулювати чисельну оцінку рівня функціональної стійкості за відповідною шкалою.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. У роботі [1] досліджено організацію процесу керування енергоблоком; розглянуті основні інформаційно-керуючі системи та програмно-технічні комплекси енергоблоку, а також засоби їх взаємодії з оперативним персоналом; розглянута інформаційна модель, яка використовується оперативним персоналом при керуванні енергоблоком; проаналізовано структуру технологічних регламентів та інструкцій з керування енергоблоком і визначити об'єм та складність цих документів; визначено доцільність досліджень щодо покращення процесів керування енергоблоком АЕС. Робота [2] присвячена переходу від використання паперових процедур до комп'ютерних процедур у видах діяльності,

що передбачають взаємодію людини з системами на атомній електростанції, що створює потребу в комп'ютерній системі процедур. Визначено що, щоб надати комп'ютерній системі процедур необхідну інформацію для відображення кроків процедури користувачеві, потрібна особлива увага до формату, який використовується для передачі всіх даних та інструкцій для створення кроків. Процедура повинна бути розбита на основні елементи та відформатована стандартним методом для комп'ютерної системи процедур. Комп'ютерна система процедур забезпечить контекст для кроку для передачі довідкової інформації, запиту рішення або прийняття вхідних даних від користувача. У роботі [3] наведено довідник з критично важливих систем безпеки: простий посібник з функціональної безпеки: IEC 61508 та IEC 61511, й відповідні вказівки, де представлено найновіші відомості про електричні, електронні та програмовані електронні системи, що забезпечують функції безпеки, які захищають працівників та населення від травм або смерті, а також навколишнє середовище від забруднення. У статті [4] запропонована платформа для оцінки ризиків системи цифрового контролю та управління (PRADIC), розроблена Національною лабораторією Айдахо (INL). Як частина цієї структури, було розроблено методологію оцінки програмних систем цифрового контролю та управління у високо значущих для безпеки систем цифрового контролю та управління АЕС. Структура об'єднує три етапи типової оцінки ризиків: якісний аналіз небезпек та кількісний аналіз надійності та наслідків. Кількісно визначені ризики порівняно з відповідними критеріями прийнятності надають цінну інформацію для альтернатив архітектури системи, що дозволяє оптимізувати проектування з точки зору зниження ризиків та економії коштів. Результати показують, що PRADIC є потужним інструментом, здатним виявляти потенційні цифрові можливості виникнення відмов за спільною причиною, оцінювати їх ймовірність та оцінювати їхній вплив на безпеку системи та електростанції. У статті [5] визначено функціональну стійкість, як властивість складних технічних систем. Стаття [6] присвячена розв'язанню наступних завдань: розробці структури даних моделі комп'ютерно-орієнтованої процедури, що відповідає актуальним регламентам та інструкціям; створенню логіко-структурної моделі комп'ютерно-орієнтованої процедури, що буде використовуватися для створення систем підтримки оперативного персоналу АЕС; розробці методу ідентифікації умов входу в процедуру та виконання її кроків. Дана модель, розроблена для вирішення задачі підтримки актуальності, ранньої ідентифікації станів енергоблоку та його обладнання, забезпечення можливості отримання інформації про стан технологічних параметрів з необхідним рівнем надійності та достовірності. Визначено, що запропонована у роботі модель може бути використана для створення систем підтримки оперативного персоналу, що керує складними технологічними об'єктами з використанням визначених процедур та інструкцій. Робота [7] присвячена побудові функціонально стійких розподілених інформаційних систем. У роботі [8] розглянутий досвід належного консерватизму у справах безпеки ядерної про-

мисловості Великої Британії. У роботі [9] визначено у рамках дій з ліквідації порушень нормальної експлуатації (ЛП) енергоблоку №4 РАЕС наступне: 50 процедур, до 10 правил активації процедури, до 3-х правил завершення процедури, до 10 кроків на процедуру, до 10 підкроків на кожний крок процедури, до 3 умов активації та завершення кроку. У роботах [10, 11] проведено дослідження застосування систем підтримки оперативного персоналу об'єкту критичної інфраструктури при керуванні енергоблоком АЕС з реактором типу ВВЕР-1000 та розроблена модель шляхів отримання вхідних даних комп'ютерної інтелектуальної системи підтримки оперативного персоналу АЕС.

Метою роботи є розробка методу чисельної оцінки функціональної стійкості елементів інформаційної системи підтримки оперативного персоналу АЕС.

Для досягнення поставленої мети, у даному дослідженні необхідно розв'язати наступні завдання:

1. Проаналізувати, які елементи КОП у складі СПО найбільше впливають на функціональну стійкість системи.

2. Розробити метод чисельної оцінки функціональної стійкості елементів СПО.

3. Реалізувати засіб моделювання відмов елементів СПО в об'ємі технологічних регламентів керування АЕС та оцінити вплив цих відмов на показники функціональної стійкості.

1. Модель КОП СПО на основі продукційних правил

У технологічних регламентах, які є основою для створення СПО у даному дослідженні, вказані дії оператора, які мають бути виконані в залежності від вихідних умов та результатів попередніх дій. Елементи даних регламентів розділяються на два основні типи: правила (Rules) та дії (Actions). В термінології інтелектуальних систем дані елементи утворюють систему продукційних правил на основі дерев рішень.

У рамках дослідження [6] було розроблено модель комп'ютерно-орієнтованої процедури СПО на основі графу. Вершинами графа є правила та дії, ребрами – переходи між діями згідно правил. Модель такої процедури формальна описана функцією:

$$P = f(\{R\}, \{A\}, \{L\}), \quad (1.1)$$

де $\{R\}$ – множина всіх правил, $\{A\}$ – множина всіх дій, $\{L\}$ – сукупність всіх переходів.

На рис. 1.1 приведена структурна схема моделі КОП згідно наведених складових.

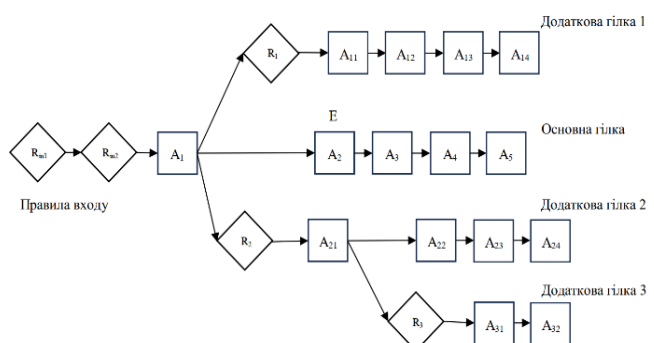


Рис. 1.1. Хід виконання процедури

Спрацювання правил активує гілки дій, які має виконати оператор. Також правилами визначається факт виконання дії оператором. Для визначення факту спрацювання правила використовуються значення технологічних параметрів, визначені в реальному часі, та вагові коефіцієнти. В свою чергу, значення кожного технологічного параметру P визначається на основі набору сигналів, отриманих від суміжних систем, логікою та власними ваговими коефіцієнтами:

$$P = f(\{s\}, l, \{\omega\}), \quad (1.2)$$

де $\{s\}$ – сигнали, l – логіка (алгоритм) обробки, ω – вагові інформаційні внески.

Наприклад, при відключенні головного циркуляційного насоса (ГЦН), системою нормальної експлуатації формується дискретний сигнал #GCN01_OFF, що спричиняє відображення інформації про дану подію на табло БЩУ. Для КОП відключення насоса є **параметром**, а дискретний сигнал є таким, що **формує даний параметр**.

Саме сигнали, отримані від суміжних систем, є визначальними даними для фіксації поточного стану правил процедури керування.

2. Метод визначення ФС КОП

Система підтримки оператора може функціонувати в умовах відсутності певної частини вхідних даних. Для забезпечення даної здатності в даному дослідженні пропонується використовувати резервовані вхідні дані різної природи, а також розробити алгоритм заміщення відсутніх даних іншими. Для роботи такого алгоритму необхідний критерій, при досягненні якого буде відбуватися заміщення. В якості такого критерію пропонується використовувати показник функціональної стійкості розподілених інформаційних систем [7].

Під функціональною стійкістю СПО будемо розуміти здатність даної системи надати оператору інформацію про стан та актуальні кроки керуючих процедур у будь-який момент часу в автоматичному режимі за відсутності або неактуальності частини даних через відмову або виведення обладнання в ремонт.

Стан КОП в системі визначається спрацюванням правил. В свою чергу, визначення факту спрацювання відбувається на основі значень технологічних параметрів, даними для яких є вхідні сигнали.

Розглянемо процес розрахунку функціональної стійкості для різних компонентів даної системи.

КОП можна вважати фрагментом розподіленої інформаційної системи на основі наявності ієрархії окремих компонентів: вхідні сигнали отримуються з різноманітних інформаційних систем; стани параметрів обчислюються на основі значення сигналів, правила спрацюють на основі станів параметрів і формують інформацію для людини-оператора. Дану ієрархію зобразимо у вигляді графу на рис. 2.1.

Вершини $\{s\}$ даного графу є мажоритованими резервованими наборами сигналів, $\{P\}$ – параметрами, $\{R\}$ – правилами. Кожне ребро означає напрям передачі даних між елементами та має ваговий коефіцієнт ω .

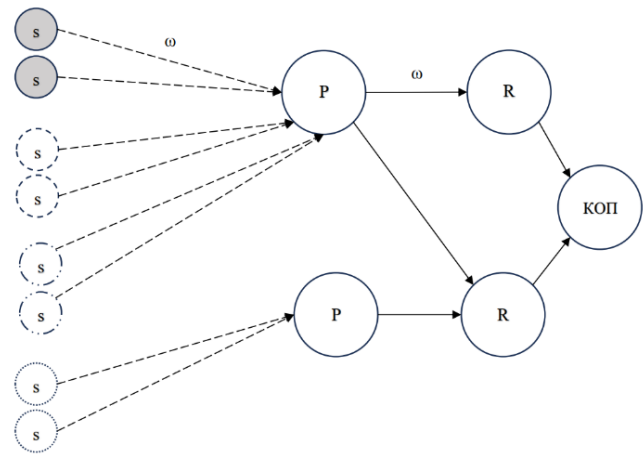


Рис. 2.1. КОП як розподілена інформаційна система

Джерелом негативних впливів на дану систему є можливі недостовірні або відсутні значення сигналів $\{s\}$, що з точки зору функціональної стійкості спричиняє розрив окремих ребр графу, тобто знижує вершинну зв'язність. Проте, вершинна зв'язність не є зручною в якості показника функціональної стійкості, оскільки кожний зв'язок між елементами має свою вагу (ω). Більш зручним є використання критерію імовірнісної зв'язності розподіленої системи, що у теорії ФС характеризує імовірність встановлення зв'язку між парами вузлів. У контексті КОП даний критерій використовуємо в якості показника імовірності достовірного визначення стану її елементів.

ФС наборів сигналів. Сигнали, які є вхідною інформацією для КОП, об'єднані в набори з метою резервування. Кожний набір сигналів $\{s\}$ містить інформацію від обраних з загальної множини сигналів, отриманих від зовнішніх джерел – інших ПТК енергоблоку. Після прийому значення сигналів піддаються логічній обробці алгоритмом отримання значення технологічного параметру шляхом голосування або обчислення (усереднення, медіана). У даному дослідженні прийняте використання схеми «M/N», при якому кожний набір містить N сигналів, і для достовірного визначення значення набору необхідні наявність та узгодження M сигналів (рис. 2.2).

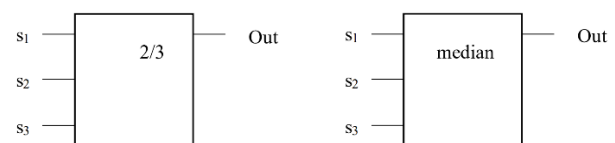


Рис. 2.2. Варіанти обчислення значення набору сигналів

Прийmemo, що кожний вхідний сигнал s_i має імовірність наявності значення (безвідмовної роботи) $Rel(s_i)$. Під **максимальним показником** ФС набору сигналів будемо вважати суму імовірностей безвідмовного стану всіх N сигналів:

$$FS_{\max} = \sum_{i=1}^N Rel(s_i), \quad (2.1)$$

Це значення буде порівняне до **100% функціональної стійкості** набору сигналів, яка враховуватиме максимальну надмірність при наявності всіх N

сигналів. Для прирівнювання ФС до відсотків обчислюємо коефіцієнт пропорційності

$$k_{fs} = \frac{100}{FS_{max}}. \quad (2.2)$$

Достовірне визначення значення з набору сигналів можливе, коли присутні значення M сигналів і можливі M визначень значень. Якщо у роботі залишається менше ніж N сигналів, то функціональна стійкість набору знизиться. Проте, якщо у роботі залишається M сигналів з мінімальним значенням імовірності безвідмовної роботи - це буде досягнення критичного показника ФС, тобто при подальшій відмові будь-якого елемента отримується гарантована відмова при визначенні значення набору сигналів. Даний рівень визначимо як **критичне значення** функціональної стійкості набору сигналів. Він виражається як сума мінімальних значень імовірностей безвідмовної роботи M сигналів:

$$FS_{critical} = \sum_{i=1}^M Rel(s_i), \quad (2.3)$$

де $Rel(s_i)$ -імовірності безвідмовної роботи сигналів, відсортовані за зростанням, $M \leq N$.

Поточний рівень ФС визначається як значення імовірності суми подій (визначень стану) з фактично достовірних (наявних) N сигналів. Достовірність сигналу s_i визначається функцією $V(i) \in \{0, 1\}$ (0 – недостовірність, 1 – достовірність):

$$FS_{current} = \frac{s \subseteq \{i | V(i) = 1\}}{|S| = N} \left(\sum_{i \in S} Rel(s_i) \right). \quad (2.4)$$

Запас функціональної стійкості визначається з різниці між поточною та критичною функціональною стійкістю:

$$FS_{reserve} = FS_{current} - FS_{critical}. \quad (2.5)$$

Усі визначені абсолютні значення ФС можуть бути виражені у відсотках з використанням коефіцієнту, визначеного у 2.2.

За наведеними формулами в один етап визначається функціональна стійкість технологічних параметрів КОП, що формуються зі значень наборів сигналів.

ФС правил КОП. Технологічні параметри використовуються для фіксації стану правил КОП $\{R\}$ з використанням інформаційних вагових внесків $\{\omega\}$. Таким чином, умовою можливості визначення стану параметрів та правил є не тільки наявність та узгодженість, а і достатня «вага» наборів даних (рис. 2.3).

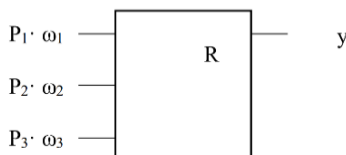


Рис. 2.3. Визначення стану параметрів та правил

Для розрахунку ФС правила кожний технологічний параметр P_i має мати попередньо розраховані показники ФС. Під **максимальним показником** ФС правила за середньою оцінкою будемо вважати **середнє** значення ФС всіх технологічних параметрів,

помножених на вагові коефіцієнти:

$$FS(Rule)_{max}^{mean} = \overline{FS(P_i)_{max}} \cdot \omega_i. \quad (2.6)$$

За консервативною оцінкою [8] за **максимальний показник** ФС будемо вважати **максимальне** значення серед ФС технологічних параметрів, помножених на вагові коефіцієнти:

$$FS(Rule)_{max}^{conservative} = \max(FS(P_i)_{max} \cdot \omega_i). \quad (2.7)$$

Це значення становить **100%** функціональної **стійкості** правила. Для прирівнювання ФС до відсотків використовується (2.2).

Під **критичним та поточним показниками** ФС правила будемо вважати **середні** (для середньої оцінки) або **мінімальні** (для консервативної оцінки) значення серед відповідних рівнів ФС всіх технологічних параметрів, помножених на вагові коефіцієнти:

– критичний середній:

$$FS(Rule)_{critical}^{mean} = \overline{FS(P_{critical})} \cdot \omega_i; \quad (2.8)$$

– поточний середній:

$$FS(Rule)_{current}^{mean} = \overline{FS(P_{current})} \cdot \omega_i; \quad (2.9)$$

– критичний консервативний:

$$FS(Rule)_{critical}^{conservative} = \min(P_{critical} \cdot \omega_i); \quad (2.10)$$

– поточний консервативний:

$$FS(Rule)_{current}^{conservative} = \min(P_{current} \cdot \omega_i). \quad (2.11)$$

Запас функціональної стійкості визначається з різниці між поточною та критичною функціональною стійкістю згідно (2.5). Усі визначені абсолютні значення ФС можуть бути виражені у відсотках з використанням коефіцієнту, визначеного у (2.2).

ФС КОП та СПО. На основі обчислених показників ФС кожного правила може бути обчислена ФС всієї КОП. В свою чергу, обчислення ФС всіх КОП надає можливість оцінити ФС всієї СПО. Виходячи з того, що у даному дослідженні розглядається створення СПО для АЕС як системи критичного застосування, для визначення ФС КОП та СПО пропонується використовувати консервативну оцінку, яка являє собою найнижче поточне значення ФС серед усіх правил:

$$FS_{proc} = \min(\{FS_R\}); FS_{system} = \min(\{FS_{proc}\}).$$

3. Реалізація оцінки ФС КОП та моделювання відмов

До складу розроблюваного прототипу СПО входить програма OpSupport, що виконує функції власне інформаційної підтримки оператора. Вона оперує наступними даними:

– значення вхідних сигналів, що отримуються мережевим протоколом від серверів ПТК енергоблоку;

– базу даних технологічних параметрів, для кожного з яких визначені кластеризовані сигнали та скрипти розрахунку;

– базу даних правил та дій.

Під час функціонування програми проводиться безперервний розрахунок показників функціональної стійкості для технологічних параметрів (рис. 3.1), правил та дій (рис. 3.2).

Type	ID	Caption	State	FS, %
TechParam	PARAM_1	Tech Param #1	0	100 (66.2436, 100)
TechParam	PARAM_2	Tech Param #2	0	100 (66.2572, 100)
TechParam	PARAM_3	Tech Param #3	0	66.1477 (66.1477, 100)
TechParam	PARAM_4	Tech Param #4	0	67.3614 (66.2599, 100)
TechParam	PARAM_5	Tech Param #5	0	100 (66.1862, 100)
TechParam	PARAM_6	Tech Param #6	0	100 (66.8132, 100)
TechParam	PARAM_7	Tech Param #7	0	100 (66.9965, 100)
TechParam	PARAM_8	Tech Param #8	0	100 (66.4836, 100)
TechParam	PARAM_9	Tech Param #9	0	100 (66.0927, 100)
TechParam	PARAM_10	Tech Param #10	0	100 (65.8992, 100)
TechParam	PARAM_11	Tech Param #11	0	100 (66.3854, 100)
TechParam	PARAM_12	Tech Param #12	0	100 (66.6397, 100)
TechParam	PARAM_13	Tech Param #13	0	100 (66.2776, 100)
TechParam	PARAM_14	Tech Param #14	0	100 (65.9016, 100)
TechParam	PARAM_15	Tech Param #15	0	100 (66.5546, 100)
TechParam	PARAM_16	Tech Param #16	0	100 (66.3206, 100)
TechParam	PARAM_17	Tech Param #17	0	100 (66.2091, 100)
TechParam	PARAM_18	Tech Param #18	0	100 (65.8216, 100)
TechParam	PARAM_19	Tech Param #19	0	66.7184 (66.5139, 100)
TechParam	PARAM_20	Tech Param #20	0	100 (66.3062, 100)
TechParam	PARAM_21	Tech Param #21	0	100 (65.7031, 100)
TechParam	PARAM_22	Tech Param #22	0	100 (66.3575, 100)
TechParam	PARAM_23	Tech Param #23	0	100 (66.5223, 100)
TechParam	PARAM_24	Tech Param #24	0	100 (66.4338, 100)
TechParam	PARAM_25	Tech Param #25	0	100 (66.299, 100)
TechParam	PARAM_26	Tech Param #26	0	100 (65.5782, 100)
TechParam	PARAM_27	Tech Param #27	0	100 (66.4814, 100)
TechParam	PARAM_28	Tech Param #28	0	100 (65.9213, 100)
TechParam	PARAM_29	Tech Param #29	0	100 (66.4631, 100)
TechParam	PARAM_30	Tech Param #30	0	65.9636 (65.9636, 100)
TechParam	PARAM_31	Tech Param #31	0	100 (66.5256, 100)

Рис. 3.1. Розрахунок ФС параметрів

Type	ID	Caption	State	FS, %
Procedure	RP.0.0	RP.0.0 Caption	0	97.9561 (83.6664, 100)
Rule	RP.0.1	RP.0.1 Caption	0	100 (65.8905, 100)
Rule	RP.0.2	RP.0.2 Caption	0	66.3039 (66.3039, 100)
Action	AP.0.0	AP.0.0 Caption	Inactive	100 (66.4081, 100)
Rule	RAP.0.0.0	RAP.0.0.0 Caption	?	100 (66.3519, 100)
Rule	RRAP.0.0.1	RRAP.0.0.1 Caption	0	100 (66.2572, 100)
Rule	RAP.0.0.0	RAP.0.0.0 Caption	?	100 (66.5876, 100)
Action	AAP.0.0.0	AAP.0.0.0 Caption	Inactive	100 (66.4358, 100)
Action	AAP.0.0.1	AAP.0.0.1 Caption	Inactive	100 (66.6397, 100)
Action	AAP.0.0.2	AAP.0.0.2 Caption	Inactive	100 (66.3854, 100)
Action	AAP.0.0.3	AAP.0.0.3 Caption	Inactive	100 (65.8997, 100)
Action	AAP.0.0.4	AAP.0.0.4 Caption	Inactive	67.3614 (66.2599, 100)
Action	AAP.0.0.5	AAP.0.0.5 Caption	Active	100 (100, 100)
Action	AP.0.1	AP.0.1 Caption	Active	100 (66.2107, 100)
Rule	RAP.0.1.0	RAP.0.1.0 Caption	?	100 (66.5489, 100)
Rule	RAP.0.1.1	RAP.0.1.1 Caption	0	100 (66.1904, 100)
Action	AAP.0.1.0	AAP.0.1.0 Caption	Active	100 (66.0927, 100)
Action	AAP.0.1.1	AAP.0.1.1 Caption	Active	100 (66.5876, 100)
Action	AAP.0.1.2	AAP.0.1.2 Caption	Active	100 (66.3663, 100)
Action	AAP.0.1.3	AAP.0.1.3 Caption	Active	100 (100, 100)
Action	AAP.0.1.4	AAP.0.1.4 Caption	Active	100 (66.5876, 100)
Action	AP.0.2	AP.0.2 Caption	Inactive	66.5051 (77.4951, 100)
Action	AAP.0.2.1	AAP.0.2.1 Caption	Active	100 (100, 100)
Action	AAP.0.2.2	AAP.0.2.2 Caption	Active	100 (100, 100)
Action	AAP.0.2.3	AAP.0.2.3 Caption	Active	100 (100, 100)
Action	AAP.0.2.4	AAP.0.2.4 Caption	Active	100 (100, 100)
Action	AAP.0.2.5	AAP.0.2.5 Caption	Active	100 (100, 100)
Action	AAP.0.2.6	AAP.0.2.6 Caption	Active	100 (100, 100)
Action	AP.0.3	AP.0.3 Caption	Inactive	100 (66.3414, 100)
Action	AAP.0.3.1	AAP.0.3.1 Caption	Active	100 (100, 100)

Рис. 3.2. Розрахунок ФС правил та дій

Програма виконує розрахунок ФС на основі показників прогнозованої імовірності надійної роботи сигналів та визначеної логіки мажоритирування М/Н. Розрахунок, описаний у розділі 2, обчислює максимальний, поточний та критичний рівні ФС у відсотках. Критичний рівень розраховується як сума імовірностей роботи М сигналів, відсортованих за зростанням (тобто мінімальним показником імовірності визначення, при якому можлива робота). Поточний визначається як сума імовірностей визначення значення N сигналів, що знаходяться в роботі в даний момент.

Для дослідження ефективності даних алгоритмів була змодельована база знань СПО з об'ємом, що відповідає документу ІЛП [9]: 50 процедур, до 10 правил активації процедури, до 3-х правил завершення процедури, до 10 кроків на процедуру, до 10 підкроків на кожний крок процедури, до 3 умов активації та завершення кроку. В якості вхідних даних було змодельовано 1000 сигналів, імовірність безвідмовної роботи кожного з яких випадковим чином становить від 0.95 до 1 (рис. 3.3). Для проведення експериментів було реалізовано можливість імітування відмов заданої кількості сигналів. В кожному експерименті була імітована відмова 20 випадкових сигналів та збережено результати зниження ФС. Кожний експеримент проводився 10 разів за однакових умов.

Середнє значення критичного рівня ФС технологічних параметрів, що відмовили, становило 66.23%. Середнє значення поточного рівня ФС становило 97.96%. Відповідно, запас ФС у середньому становив 31.03% (рис. 3.4).

AppSignalId	CustomAppSignal	Caption	Value	Tags
#SIGNAL_0	SIGNAL_0	Signal 0	0	rel=0.9271
#SIGNAL_1	SIGNAL_1	Signal 1	0	rel=0.9349
#SIGNAL_2	SIGNAL_2	Signal 2	0	rel=0.9134
#SIGNAL_3	SIGNAL_3	Signal 3	0	rel=0.9174
#SIGNAL_4	SIGNAL_4	Signal 4	0	rel=0.9361
#SIGNAL_5	SIGNAL_5	Signal 5	0	rel=0.9196
#SIGNAL_6	SIGNAL_6	Signal 6	0	rel=0.9139
#SIGNAL_7	SIGNAL_7	Signal 7	0	rel=0.9362
#SIGNAL_8	SIGNAL_8	Signal 8	0	rel=0.9422
#SIGNAL_9	SIGNAL_9	Signal 9	0	rel=0.9265
#SIGNAL_10	SIGNAL_10	Signal 10	0	rel=0.9216
#SIGNAL_11	SIGNAL_11	Signal 11	?	rel=0.9458
#SIGNAL_12	SIGNAL_12	Signal 12	0	rel=0.934
#SIGNAL_13	SIGNAL_13	Signal 13	0	rel=0.9373
#SIGNAL_14	SIGNAL_14	Signal 14	?	rel=0.9067
#SIGNAL_15	SIGNAL_15	Signal 15	0	rel=0.9383
#SIGNAL_16	SIGNAL_16	Signal 16	0	rel=0.9179

Рис. 3.3. Імітація відмов сигналів

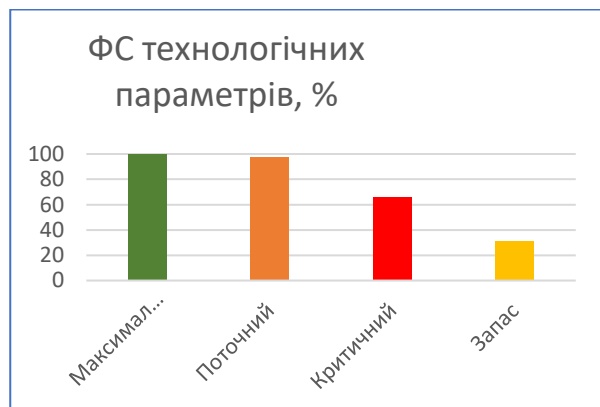


Рис. 3.4. Імітація відмов сигналів

При розрахунку ФС правил, дій та процедур реалізована можливість використання двох оцінок: середньої та консервативної.

Середня оцінка ФС обчислюється як середнє арифметичне відповідного показника ФС дочірніх елементів моделі КОП, тобто дочірніх правил та дій. Консервативна оцінка обирається за принципом мінімальної («найгіршої») оцінки серед усіх наявних. Середня оцінка є більш «чутливою» і надає можливість точніше оцінювати вплив відмов сигналів на працездатність елементів КОП.

Проте у системі критичного застосування, коли система або її частина вважається повністю непрацездатною при повній відмові хоча б одного елемента, більш вірним є використання консервативної оцінки для фіксації відмов.

Під час кожного експерименту також було зафіксовано зниження поточного ФС СПО за середньою та консервативною оцінкою. При консервативній оцінці критичний рівень ФС системи становив 65.78%, поточний у середньому 74.35%. При цьому середній запас ФС становив 8.57% (рис. 3.5).

При середній оцінці критичний рівень ФС становив **75.6%**, поточний – **98.8%**. При цьому середній запас ФС становив у середньому **23.2%** (рис. 3.6).

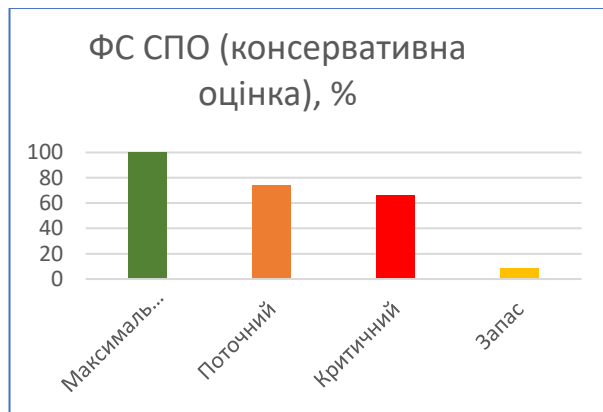


Рис. 3.5. Імітація відмов сигналів (консервативна оцінка)

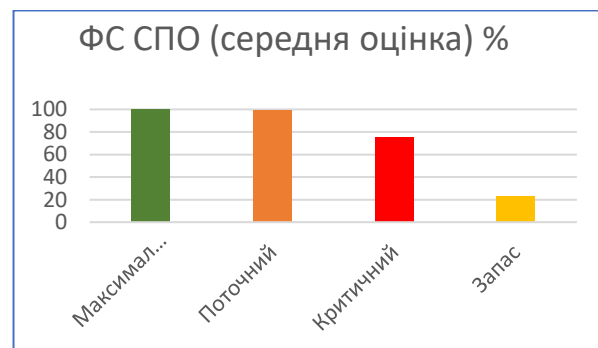


Рис. 3.6. Імітація відмов сигналів (середня оцінка)

Висновки

У дослідженні було запропоновано використання поняття функціональної стійкості для оцінки відмовостійкості елементів комп'ютерно-орієнтованої процедури у реальному часі.

Наведено метод розрахунку максимального, поточного та критичного рівнів функціональної стійкості.

Також було наведено приклад реалізації розрахунку рівнів функціональної стійкості для систем підтримки оперативного персоналу в об'ємі інструкції з ліквідації порушень (ЛІП) АЕС.

При проведенні моделювання відмов вхідних сигналів було показано значне зниження запасу функціональної стійкості за консервативною оцінкою.

Напрямок подальших досліджень є методи підвищення відмовостійкості компонентів систем підтримки оперативного персоналу, ефективність яких буде оцінена підвищенням показника запасу функціональної стійкості.

Конфлікт інтересів

Автори декларують, що не мають конфлікту інтересів стосовно даного дослідження, в тому числі фінансового, особистісного характеру, авторства чи іншого характеру, що міг би вплинути на дослідження та його результати, представлені в даній статті.

Використання засобів штучного інтелекту

Автори підтверджують, що не використовували технології штучного інтелекту при створенні представленої роботи.

СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- Вінтенко Б.Ю., Миронець І.В., Смірнов О.А., Коваленко О.В., Смірнов С.А., Буравченко К.О., Якименко Н.М. «Дослідження інформаційного забезпечення та технологічних регламентів процесів керування критичною інфраструктурою енергоблоку АЕС з реактором типу ВВЕР-1000». Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка». 2024. № 1(25), С. 253–278. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.25.253278>
- Bly A., Oxstrand J., Blanc K. Standardized Procedure Content and Data Structure Based on Human Factors Requirements for Computer-Based Procedures. 2015. Conf.: the 9th Nuclear Plant Instrumentation, Control & Human-Machine Interface Technologies topical meeting of the American Nuclear Society. <https://www.researchgate.net/publication/287216133>
- Daivd J. Smith, Kenneth G. L. Simpson. The Safety Critical Systems Handbook. A Straightforward Guide to Functional Safety IEC 61508 (2010 Edition), IEC 61511 (2015 Edition) and Related Guidance: Forth Edition. Elsevier Ltd, 2016. <https://shop.elsevier.com/books/the-safety-critical-systems-handbook/smith/978-0-12-805121-4#full-description>
- Bao, H., Zhang, H., Shorthill, T., Chen, E., Lawrence, S.: Quantitative evaluation of common cause failures in high safety-significant safety-related digital instrumentation and control systems in nuclear power plants. Reliability Engineering & System Safety 230, 108973 (2023). DOI: <https://doi.org/10.1016/j.res.2022.108973>
- Барабаш О.В., Кравченко Ю. В. Функціональна стійкість – властивість складних технічних систем. Збірник наукових праць Національної академії оборони України. Бюл. № 40. – К.: НАОУ, 2002. – С. 225-229. URL: <https://nuou.org.ua/nauka/npub/trudi-unversitetu/>
- Вінтенко, Б.Ю., Миронець, І.В., Смірнов, О.А., Коваленко, О.В., Усік, П.С., Буравченко, К.О., Лисенко, І.А. «Логіко-структурна модель комп'ютерно-орієнтованої процедури системи підтримки оперативного персоналу АЕС». Кібербезпека: освіта, наука, техніка. 2025. Том 2 № 30. С. 413-427, 2025. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2025.30.984>
- Барабаш О.В. Побудова функціонально стійких розподілених інформаційних систем / О.В. Барабаш. – К.: НАОУ, 2004. – 226 с. https://scholar.google.com/scholar?hl=uk&as_sdt=0.5&cluster=14371859060207516977
- Appropriate conservatism in safety cases: A nuclear industry guide. 2015/ Safety Case Forum. Режим доступу: <https://www.nuclearinst.com/media/brheshlg/appropriate-conservatism-in-safety-cases.pdf>
- Інструкція з ліквідації порушень нормальної експлуатації (ЛІП) енергоблоку №4 РАЕС. ВП «Рівненська АЕС», 2024. 286 с. URL: <https://energoatom.com.ua/branch/filii-vp-raes>
- Вінтенко, Б., Миронець, І., Смірнов, О., Коваленко, А., Коноплицька-Слободенюк, О., Смірнова, Т., Константинова, Л. «Дослідження застосування систем підтримки оперативного персоналу об'єкту критичної інфраструктури при керуванні енергоблоком АЕС з реактором типу ВВЕР-1000». Електронне фахове наукове видання «Кібербезпека: освіта, наука, техніка», 2024. № 2(26), С. 6-26. DOI: <https://doi.org/10.28925/2663-4023.2024.26.673>

11. Вінтенко Б.Ю., Смірнов О.А., Миронець І.В., Смірнова Т.В., Коваленко О.В., Мацуй А.М. «Модель шляхів отримання вхідних даних комп'ютерної інтелектуальної системи підтримки оперативного персоналу АЕС». *Центральноукраїнський науковий вісник. Технічні науки*. 2025. Вип. 11(42), ч. II. С.52-62. DOI: [https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11\(42\).2.63-69](https://doi.org/10.32515/2664-262X.2025.11(42).2.63-69)

Received (Надійшла) 28.01.2026

Accepted for publication (Прийнята до друку) 22.04.2026

Publication date (Дата публікації) 22.05.2026

ВІДОМОСТІ ПРО АВТОРІВ / ABOUT THE AUTHORS

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;

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;

e-mail: borys.vintenko@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0009-0008-3748-0374>;

Смірнова Тетяна Віталіївна – кандидат технічних наук, доцент, старший викладач кафедри автоматизації виробничих процесів, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Tetiana Smirnova Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Senior Lecturer, Department of Automation of Production Processes, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;

e-mail: sm.tetyana@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-6896-0612>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57219108044>.

Миронець Ірина Валеріївна – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри інформаційної безпеки та комп'ютерної інженерії, Черкаський державний технологічний університет, Черкаси, Україна;

Iryna Myronets – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of the Department of Information Security and Computer Engineering, Cherkasy State Technological University, Cherkasy, Ukraine;

e-mail: i.myronets@chdtu.edu.ua; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0003-2007-9943>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57208663236>.

Смірнов Олексій Анатолійович – доктор технічних наук, професор, завідувач кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Oleksii Smirnov – Doctor of Technical Sciences, Professor, Head of Cybersecurity & Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;

e-mail: dr.smirnova@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-9543-874X>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=57208667815>.

Буравченко Костянтин Олегович – кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри кібербезпеки та програмного забезпечення, Центральноукраїнський національний технічний університет, Кропивницький, Україна;

Kostiantyn Buravchenko – Candidate of Technical Sciences, Associate Professor, Associate Professor of Cybersecurity & Software Academic Department, Central Ukrainian National Technical University, Kropyvnytskyi, Ukraine;

e-mail: buravchenkok@gmail.com; ORCID Author ID: <https://orcid.org/0000-0001-6195-7533>;

Scopus Author ID: <https://www.scopus.com/authid/detail.uri?authorId=58698282700>.

Method for assessing the functional stability of computer-oriented procedures of the NPP operational personnel support system

Borys Vintenko, Tetiana Smirnova, Iryna Myronets, Oleksii Smirnov, Kostiantyn Buravchenko

Abstract. Relevance. Nuclear power plants are large high-tech enterprises containing a large amount of equipment, complex energy conversion processes and information and control systems. The control sequences described in the regulations at nuclear power plants take the form of paper-oriented or computer-oriented procedures. The use of computer-oriented procedures makes it possible to create operational personnel support systems that increase reliability and reduce the burden on operational personnel when performing complex operations. An important requirement for operational personnel support systems used at nuclear power plants is to ensure fault tolerance. In the event of a failure in a critical application system, the operator must have reliable information on how much the failure affects the system's performance and whether the system is able to perform its functions, that is, to assess its functional stability. To do this, it is necessary not only to state the fact of failure, but also to form a numerical assessment of the level of functional stability on the appropriate scale. **Object of research:** the process of functional stability of elements of a computer-oriented procedure as part of the information system for supporting operational personnel of a nuclear power plant. **Purpose of the article:** development of a method for numerical assessment of the functional stability of elements of an information system for supporting operational personnel of a nuclear power plant. **Results of the study.** The assessment of the operability of components of a computer-oriented procedure as part of the system for supporting operational personnel of a nuclear power plant is considered. The use of functional stability indicators as numerical evaluation criteria is proposed. A method for calculating the maximum, current and critical levels of functional stability is proposed. **Conclusions.** This method differs from known diagnostic methods not only by assessing the fact of the presence of a failure, but also by determining a quantitative assessment of the system's ability to perform its functions. The proposed method can be used to diagnose components of critical information systems that receive information from redundant and diversified data sources.

Keywords: numerical assessment, functional stability, information system, decision support system, support for operational personnel, nuclear power plant.