

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ОДЕСЬКА ПОЛІТЕХНІКА»  
МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ

*Кваліфікаційна наукова  
праця на правах рукопису*

**ВИЧУЖАНІН ОЛЕКСІЙ ВОЛОДИМИРОВИЧ**

УДК 004.71

**ДИСЕРТАЦІЯ**

**СТОХАСТИЧНІ МОДЕЛІ ТА МЕТОДИ  
ДІАГНОСТИКИ, ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО  
СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ**

Спеціальність: 122 – Комп'ютерні науки

Галузь знань: 12 – Інформаційні технології

Подається на здобуття наукового ступеня доктора філософії

Дисертація містить результати власних досліджень. Використання ідей, результатів і текстів інших авторів мають посилання на відповідне джерело.

\_\_\_\_\_ О. В. Вичужанін

Науковий керівник: Рудніченко Микола Дмитрович, к.т.н., доцент

Одеса – 2024

## АНОТАЦІЯ

*Вичужанін О.В.* Стохастичні моделі та методи діагностики, оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора філософії за спеціальністю 122 – Комп'ютерні науки. – Національний університет «Одеська політехніка», МОН України, Одеса, 2024.

**У вступі** обґрунтовано актуальність розробки стохастичних моделей, методів діагностики, оцінки та прогнозування технічного стану (ТС) складних систем критичного застосування (КЗ).

Показано, що зростання складності технічних систем транспорту, авіації, енергетики супроводжується зростанням вимог до їх ефективної експлуатації за умов невизначеності при дії непередбачуваних, несприятливих вражаючих факторів на обладнання та їх взаємні зв'язки. Ефективна експлуатація складних технічних систем (СТС) КЗ залежить від своєчасного виявлення та усунення відмов обладнання. Підвищення ефективності експлуатації СТС можливо шляхом використання інформаційних інтелектуальних систем (ІС), які дозволяють оцінювати, прогнозувати ТС за результатами діагностики з урахуванням повних та часткових відмов обладнання СТС.

Визначено: об'єкт, предмет, задачі та методи дослідження; наведено наукову новизну та практичне значення отриманих результатів; висвітлено особистий внесок здобувача. Наведено інформацію про структуру та апробацію роботи, а також про публікації автора за темою дисертації.

**У першому розділі** дисертаційної роботи виконано аналіз моделей, методів діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ та особливостей їх застосування при невизначеності в умовах експлуатації. СТС КЗ, з погляду інформаційних технологій, є ієрархічними структурами, та

містять численні функціональні підсистеми, компоненти, елементи та зв'язки між ними.

З результатів аналізу літературних джерел випливає, що відомі структурні моделі діагностики ТС складних систем враховують лише повні відмови працездатності, але не враховують часткові. Відомі методи оцінки та прогнозування ТС складних систем мають обмеження: зростання алгоритмічної та обчислювальної складності, необхідність складної попередньої обробки різноманітних даних. Перспективними методами моделювання для діагностування ТС є байєсовські мережі довіри (БМД), що використовуються з урахуванням невизначеностей, стохастичності характеру робочих процесів та неповних даних СТС, а також методи когнітивного імітаційного моделювання, що дозволяють оцінювати структурні та функціональні вразливості обладнання систем. В ПС перспективними методами оцінки та прогнозування ТС складних систем є методи міркування на основі прецедентів.

За результатами проведеного аналізу визначено мету та сформульовано задачі дослідження.

У **другому та третьому розділах** розроблено та досліджено стохастичні моделі і метод діагностики ТС обладнання складних систем КЗ для виявлення та візуалізації структурних, функціональних вразливостей підсистем, компонентів, елементів їх взаємних зв'язків для подальшої оцінки та прогнозування ризику їх відмов. Розробка концептуальної стохастичної моделі діагностики для її реалізації дозволила запропонувати метод діагностики ТС обладнання СТС на основі БМД.

Концептуальна стохастична модель діагностики ТС відображає новий підхід з урахуванням структури СТС з частковими чи повними відмовами обладнання, з урахуванням невизначеності та неповноти даних. Модель містить опис СТС у вигляді циклічного спрямованого графу, множину ризиків відмов (часткових або повних) підсистем, компонентів, елементів та зв'язків, що входять до структури СТС.

Сформульовано **перший пункт наукової новизни**: вперше запропоновано стохастичну модель діагностики ТС складних систем, яка одночасно враховує наявність підсистем, компонентів та елементів, їх взаємні зв'язки та ризик часткової або повної відмови працездатності, що дозволило запропонувати метод діагностики ТС на основі БМД для складних систем КЗ.

Для своєчасного виявлення та візуалізації структурних, функціональних вразливостей, спрямованих на підвищення ефективності експлуатації СТС КЗ, запропоновано метод діагностики ТС складної системи на основі БМД. Метод містить наступні етапи:

1. Побудова БМД на основі стохастичної моделі діагностики ТС складних систем.
2. Ініціалізація моделі - вилучення даних ризику відмов обладнання та їх взаємних зв'язків з бази OREDA.
3. Проведення дослідження моделюванням аварійних ситуацій. Головною метою є визначення причин відмов обладнання.
4. Виявлення та візуалізація структурних і функціональних вразливостей обладнання. Аналіз результатів моделювання.

Наведено результати досліджень визначення ймовірності (ризик) відмов обладнання СТС та їх взаємних зв'язків за 20000 годин експлуатації.

Сформульовано **другий пункт наукової новизни**: набув подальшого розвитку метод діагностики ТС складних систем на основі БМД, що дозволило своєчасно виявити та візуалізувати структурні, функціональні вразливості та підвищити ефективність експлуатації СТС КЗ.

Для діагностики ТС обладнання систем з урахуванням їх взаємного зв'язку та впливу, відстеження реакції систем на ризики відмов з неочевидними причинами розроблено когнітивну імітаційну модель (КІМ) діагностики ризиків відмов обладнання, використовуючи імітаційні вражаючі моделюючі імпульси. КІМ містить імпульсний вектор для дискретного часу, що задається співвідношенням зміни ваг вузлів та ребер орграфу, визначаючи

динаміку поширення вражаючих впливів по СТС. При моделюванні використовують вплив вражаючого моделюючого імпульсу на систему у варіантах, найбільш наближених до реальних умов експлуатації суднової СТС. Проведені дослідження показали, що розроблена КІМ відображає пряму залежність ТС обладнання СТС від її структури та дозволяє виявити найменш працездатне обладнання, функціонування якого суттєво впливає на працездатність, тобто на ефективність та надійність експлуатації системи.

Сформульовано **третій пункт наукової новизни**: удосконалена когнітивна імітаційна модель, яка застосовує імітаційні вражаючі імпульси, що дозволяє діагностувати ТС обладнання систем з урахуванням їх взаємного зв'язку та впливу.

У **четвертому розділі** розроблено метод оцінки та прогнозування ТС складної системи КЗ і модель прийому-передачі даних при діагностиці, оцінці та прогнозуванні ТС складних систем.

Вхідні дані методу міркувань на основі прецедентів для оцінки та прогнозування ТС складних систем: число та рівні відмов підсистем, компонентів, елементів та їх взаємних зв'язків; множина цілей та можливих альтернатив; сукупність характеристик, переваг, критеріїв забезпечення працездатності обладнання систем.

Етапи методу оцінки та прогнозування ТС складної системи КЗ такі:

1. Подання прецеденту у вигляді набору параметрів з конкретними значеннями та рішеннями.
2. Отримання даних оцінок та прогнозування ТС складної системи.
3. Формування рекомендацій для забезпечення ефективної експлуатації обладнання СТС.
4. Передача даних оцінок та прогнозування ТС складної системи особі, яка приймає рішення (ОПР).

При поданні прецеденту у вигляді набору параметрів з конкретними значеннями та рішеннями (оцінками, прогнозами ТС та рекомендаціями ОПР) враховано: параметри, що описують прецедент; оцінки ризику,

ймовірності відмов та оцінки збитків від відмов СТС; рекомендації ОПР; оцінки працездатності (часткової або повної); уточнені оцінки параметрів ТС СТС; уточнені прогнозовані значення параметрів ТС СТС; рішення, що прийняті ОПР та результати діагностики.

Сформульовано **четвертий пункт наукової новизни**: набув подальшого розвитку метод міркувань на основі прецедентів, що дозволило забезпечити оцінку та прогнозування ТС і підвищити працездатність складних систем КЗ.

Розроблена модель прийому-передачі даних діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ забезпечує ефективність прийому-передачі даних при зменшенні надмірності інформації на етапах її обробки, максимального її захисту, мінімізації похибки.

Запропонована модель містить множину вимог та критеріїв, які характеризують: топологію; швидкодію; пропускну здатність; допустиму величину похибки прийому-передачі даних; ризик відмов пристроїв системи прийому-передачі даних; ефективність захисту інформації у системі.

Отриманий результат дозволив сформулювати **п'ятий пункт наукової новизни**: вперше розроблено модель прийому-передачі даних при діагностиці, оцінці та прогнозуванні ТС складних систем КЗ, яка враховує наявність множини суперечливих вимог та конкуруючих критеріїв, що дозволило знайти Парето-оптимальні розв'язки для забезпечення ефективності прийому-передачі даних.

У **п'ятому розділі** розроблено ПС оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ з використанням методу міркувань на основі прецедентів (СВР) та розроблено стратегію прийняття рішень щодо пошуку пошуку відмов обладнання на основі встановлених оцінок їх ТС.

Для перевірки працездатності було здійснено моделювання повного циклу функціонування ПС оцінювання, прогнозування ймовірності (ризик) відмов СТС на прикладі суднових енергетичних установок. Отримані значення оцінок ймовірностей (ризиків) підсистем, компонентів, елементів та

їх взаємних зв'язків, що не суперечать експертним оцінкам, свідчать про ефективність діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем, враховуючи повні та часткові відмови працездатності.

Враховання часткових (повних) відмов обладнання СТС КЗ дозволить приймати рішення, спрямовані на передвідмовне обслуговування систем, забезпечити працездатність, а, значить, підвищувати ефективність їх експлуатації. Послідовність прийняття рішень з використанням запропонованої ІС з СВР циклом, що враховує операції обробки та структуризації даних за прецедентами, в рамках функціонування розробленого ПЗ, забезпечує роботу ІС з неповною інформацією. Результати обчислення ефективності експлуатації СТС КЗ з урахуванням часткових відмов обладнання та проведення передвідмовного обслуговування його враховували, що ефективність визначається ймовірністю збереження працездатності системи. Результат не перевищує порогового значення ймовірності, при якій настає повна відмова СТС, що визначається з узагальненої функції бажаності Харрінгтона. Імовірність збереження СТС у працездатному стані збільшується на 3%.

Розроблені в роботі моделі, методи та їх застосування в ІС отримали впровадження у діяльності: судноплавної компанії Maersk (Данія); науковій діяльності та навчальному процесі Національного університету «Одеська політехніка».

**У висновках** сформульовано отримані в ході роботи над дисертацією науково-практичні результати.

**Ключові слова:** інформаційні технології, модель, метод, моделювання, алгоритм, програмне забезпечення, граф, інтелектуальна, мережі, діагностика, прогнозування, особа, яка приймає рішення, складна технічна система, суднова енергетична установка.

## СПИСОК ПУБЛІКАЦІЙ ЗДОБУВАЧА

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Вичужанін В.В., Рудніченко Н.Д., Вичужанін О.В., Юрченко М.О. Програмний додаток для автоматизації побудови моделі оцінок ризику відмов складних технічних систем. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2018. Т.8. №3. С. 200-208. URL: [http://immm.op.edu.ua/files/archive/n3\\_v8\\_2018/2018\\_3\(2\).pdf](http://immm.op.edu.ua/files/archive/n3_v8_2018/2018_3(2).pdf) (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

2. Вичужанін В.В., Рудніченко Н.Д., Вичужанін О.В. Мобільний додаток для моніторингу, діагностики та прогнозування ризику відмов компонентів складної технічної системи. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2018. Т.8. №4. С. 334-344. URL: <http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/8835/1/9.pdf> (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

3. Вичужанін В.В., Рудніченко Н.Д., Вичужанін О.В. Інформаційне забезпечення системи виявлення ризику відмов автомобільного обладнання. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2019. Т.9. №3. С.168-177. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v9.no3.168>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

4. Вичужанін В.В., Рудніченко Н.Д., Вичужанін О.В., Козлов А.Ю. Програмне забезпечення автоматизації оцінки ризику відмов складних технічних систем. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2019. Т.9. №4. С. 315-323. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v9.no4.315>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

5. Вичужанін В.В., Рудніченко Н.Д., Вичужанін О.В. Інтелектуальна система діагностики і прогнозування ризику відмов складних технічних систем. *Інформаційні системи та технології. Стан та перспективи: монографія / Бармак О., Божаткін С. та ін; під нав. ред. проф. В.Вичужаніна.*

- Одеса: НУ «ОМА», 2021. С.108 - 133. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/bitstreams/ed5fcfb6-2e33-4d7b-8e65-ed14d8f8c258/download>.

6. Vychuzhanin Vladimir, Shibaeva Natalia, Rudnichenko Nickolay, Vychuzhanin Alexey. Optimization of data transmission system information parameters for complex technical system's state diagnosing. *Ceur-ws.org, CMIS-2021*. Vol. 2864, P. 445 – 454. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2864/paper39.pdf>. (Indexed in SCOPUS).

7. Vychuzhanin Alexey. Intelligent system for assessing and forecasting the risk of failure of components of a complex technical system. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2022. Vol. 12. No3. P. 154-161. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v12.no3.154>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

8. Vychuzhanin Alexey. Intelligent system for supporting decision making for assessing the technical condition of complex systems. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2023. Vol. 13. No3-4. P. 219-227. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v13.no3-4.219>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

9. Vychuzhanin Vladimir, Shibaeva Natalia, Vychuzhanin Alexey, Rudnichenko Nickolay. Intellectualization Method and Model of Complex Technical System's Failures Risk Estimation and Prediction. *Ceur-ws.org, CMIS-2023*. Vol. 3392. P. 130 – 140. DOI: <https://doi.org/10.32782/cm/3392-11>. <https://ceur-ws.org/Vol-3392/paper11.pdf>. (Indexed in SCOPUS).

10. Vychuzhanin Vladimir, Rudnichenko Nickolay, Vychuzhanin Alexey, Rychlik Andrzej. Diagnosis Intellectualization of Complex Technical Systems. *Ceur-ws.org, ICST - 2023*. Vol. 3513. P. 352 – 362. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper29.pdf>. (Indexed in SCOPUS).

11. Vychuzhanin Alexey. Information Processing in Control and Decision-Making Systems. Problems and solutions. Section 5. Intellectual models and knowledge engineering technologies. Intelligent monitoring of the technical condition of complex systems. Обробка інформації в системах управління та

прийняття рішень. Проблеми та рішення. Монографія/Аксак Н. и др.; під наук. ред. проф. В.Вичужаніна – Одеса: НУ «ОМА», 2023. С. 212-232. URL: [https://www.researchgate.net/publication/375665853\\_Information\\_processing\\_in\\_control\\_and\\_decision-making\\_systems\\_problems\\_and\\_solutions](https://www.researchgate.net/publication/375665853_Information_processing_in_control_and_decision-making_systems_problems_and_solutions).

12. Vychuzhanin Vladimir, Vychuzhanin Alexey. Information Processing in Control and Decision-Making Systems. Problems and solutions. Diagnosis Intellectualization of complex technical systems. Обробка інформації в системах управління та прийняття рішень. Проблеми та рішення. Монографія / Аксак Н., Бобок І. и др.; під наук. ред. проф. В.Вичужаніна – Одеса: НУ «ОМА», 2023. С. 260-276. URL: [https://www.researchgate.net/publication/375665853\\_Information\\_processing\\_in\\_control\\_and\\_decision-making\\_systems\\_problems\\_and\\_solutions](https://www.researchgate.net/publication/375665853_Information_processing_in_control_and_decision-making_systems_problems_and_solutions).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. Вычужанин В.В., Вычужанин А.В. Когнітивно-імпульсна модель оцінки живучості складних технічних систем. *«Інформаційні управляючі системи і технології» (ІУСТ ОДЕСА-2020)*. матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. 2020. Одеса: Екологія. С. 219 - 224. URL: <http://icst-conf.com/2020.pdf>.

14. Вычужанин В.В., Вычужанин А.В. Інтелектуальна система оцінок ризику відмов складних технічних систем. *«Інформаційні управляючі системи і технології» (ІУСТ-ОДЕСА-2021)*. Матеріали Х Міжнародної науково-практичної конференції. 2021. Одеса: Екологія. С. 87 - 91. URL: <http://icst-conf.com/2021.pdf>.

15. Vychuzhanin Vladimir, Vychuzhanin Alexey. Optimization of information parameters when diagnosing the state of a complex technical system. *VIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформатика. Культура. Технології» ІКТ2021*, С. 22-23. URL: <https://drive.google.com/file/d/1YjTsi3p2jsOoZYyawr1wGFFPrpTW8K0z/view>.

16. Vychuzhanin Alexey. Decision support system for assessment and prediction of the technical condition of complex systems. Збірник тез доповідей. *II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (ІПШРІТ-2023)*. 6 грудня 2023 р. м. Черкаси. С.204-205. URL: [https://drive.google.com/file/d/1f0cc\\_HaFDH4G3AI\\_NfwqfTjaMjyWBvkc/view](https://drive.google.com/file/d/1f0cc_HaFDH4G3AI_NfwqfTjaMjyWBvkc/view).

17. Vychuzhanin Alexey. Intellectualization model of complex technical system's failures risk estimation. Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні Збірник матеріалів *IV Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів (Інтернет-конференція)* Київ. 20–21 квітня 2023. С.135-137.

18. Vychuzhanin Alexey. Intelligent decision support system for assessing the risk of failures of complex technical systems. *VI International scientific and practical conference «Modeling, control and information technologies»*, Rivne, November 9-11. 2023. С.181 – 183. DOI:<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.055>

19. Vychuzhanin Alexey. Program evaluation and prediction of the risk of failure of the components of a complex technical system. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2023, IX міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів АКІТ – 2023*, Київ. 19 квітня 2023 р. С. 81-82. URL: <https://tpza.kpi.ua/conferences/proceedings/AKIT-2023.pdf>.

20. Vychuzhanin Alexey. Model for assessing the risk of failure of components of complex technical systems. *XXIII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій»*. Матеріали конференції. Одеса 20-21 квітня 2023 р. С. 43-45. URL: [https://ontu.edu.ua/download/konfi/2023/Conference\\_abstract-IT-21-22-04-23.pdf](https://ontu.edu.ua/download/konfi/2023/Conference_abstract-IT-21-22-04-23.pdf).

21. Vychuzhanin Alexey. Intellectualization of technical condition assessment of ship complex systems. *XI International Scientific and Practical*

*Conference "Information Control Systems & Technologies (ICST-2023). 2023. C.124-130. URL: <http://icst-conf.com/2023.pdf>.*

22. Vychuzhanin A. Application of precedent technology to support decision-making to ensure the efficiency of complex technical systems. *I (VII) міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інформаційні технології: теорія і практика»*. Тези доповідей. Дніпро 20 – 22 березня 2024 р. С. 165-167. URI: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/166565>.

**ABSTRACT**

*Vychuzhanin O.V.* Stochastic models and methods of diagnostics, assessment and forecasting of technical state of complex systems of critical application. - Qualification scientific work on the rights of manuscript.

Thesis for the Degree of Doctor of Philosophy in Computer Science, Specialization 122 – Computer Science. – Odessa Polytechnic National University, Ministry of Education and Science of Ukraine, Odesa, 2024.

**The introduction** substantiates the relevance of developing stochastic models, methods of diagnostics, assessment and forecasting of the technical condition (TC) of complex systems of critical application (CA).

It is shown that the growing complexity of technical systems of transport, aviation, and energy is accompanied by increasing requirements for their efficient operation under conditions of uncertainty when unpredictable, unfavourable impact factors affect the equipment and their interconnections. Efficient operation of complex technical systems (CTS) of CA depends on timely detection and elimination of equipment failures. Increasing the efficiency of CTS operation is possible by using information intelligent systems (IIS), which allow assessing and predicting the TC based on the results of diagnostics, taking into account complete and partial failures of CTS equipment.

The object, subject, objectives and methods of the study are defined; the scientific novelty and practical significance of the results are presented; the personal contribution of the applicant is highlighted. Information is provided on the structure and testing of the work, as well as on the author's publications on the topic of the dissertation.

**In the first section** of the dissertation, an analysis of models, methods for diagnosing, assessing and predicting the TC of complex short-circuit systems and the features of their application under uncertainty in operating conditions was carried out. CTS of CA from the point of view of information technology, are

hierarchical structures and contain numerous functional subsystems, components, elements and connections between them.

From the results of the analysis of literary sources it follows that the known structural models for diagnosing the TC of complex systems take into account only complete failures of performance, but do not take into account partial ones. Known methods for assessing and predicting the TC of complex systems are limited: the growth of algorithmic and computational complexity, the need for complex pre-processing of various data. Promising modeling methods for diagnosing vehicle systems are Bayesian Belief Network (BBN), used taking into account uncertainties, the stochastic nature of work processes and incomplete vehicle data systems, as well as cognitive simulation modeling methods that allow assessing the structural and functional vulnerabilities of system equipment. In IIS, promising methods for assessing and predicting the TC of complex systems are reasoning methods based on precedents.

Based on the results of the analysis, the goals and objectives of the study were determined.

**In the second and third sections,** stochastic models and a method of diagnostics of TC equipment of complex systems of CA were developed and studied to identify and visualize structural and functional vulnerabilities of subsystems, components, and elements of their mutual connections for further assessment and prediction of the risk of their failures. The development of a diagnostic model for its implementation made it possible to propose a method of diagnosis of the TC of CTS equipment based on BBN.

The conceptual stochastic model reflects a new approach taking into account the structure of CTS with partial or complete equipment failures, taking into account uncertainty and incompleteness of data. The model provides risk diagnostics for partial and complete failures of system equipment and contains a description of the CTS in the form of a cyclic directed graph, a set of risks of failures (partial or complete) of subsystems, components, elements and connections included in the structure of the CTS.

**The first point of scientific novelty** was formulated: for the first time, a stochastic model of vehicle diagnosis of complex systems was proposed, which simultaneously takes into account the presence of subsystems, components and elements, their mutual relationships and the risk of partial or complete failure, which made it possible to propose a vehicle diagnosis method based on BBN for complex critical application systems.

For the timely detection and visualization of structural and functional vulnerabilities, aimed at increasing the efficiency of operation CTS of CA, a method for diagnosing complex systems based on BBN is proposed. The method includes the following stages:

1. Construction of the BBN based on the stochastic model of complex system diagnostics.
2. Initialization of the model - extraction of equipment failure risk data and their mutual relationships from the OREDA database.
3. Conducting research by modeling emergency situations. The main goal is to determine the causes of equipment failures.
4. Identification and visualization of structural and functional vulnerabilities of the equipment. Analysis of simulation results.

The results of research on determining the probability (risk) of CTS equipment failures and their mutual connections for 20,000 hours of operation are given.

**The second point of scientific novelty** was formulated: the method of diagnosing complex systems based on BBN was further developed, which made it possible to timely identify and visualize structural and functional vulnerabilities and increase the efficiency of operation of critical application CTS.

A cognitive simulation model (CSM) for diagnosing the risks of equipment failures has been developed for the diagnosis of TC of system equipment, taking into account their mutual connection and influence, tracking the response of systems to the risks of failures with non-obvious reasons, using simulated striking modeling pulses. CSM contains an impulse vector for a discrete time, which is

given by the ratio of changes in the weights of nodes and edges of the digraph, determining the dynamics of the spread of impressive influences along the CTS.

In the simulation, the effect of a striking modeling pulse on the system is used in the variants closest to the real operating conditions of the CTS. The conducted studies showed that the developed CSM reflects the direct dependence of the TC equipment of the CTS on its structure and allows to identify the least efficient equipment, the functioning of which significantly affects the efficiency, that is, the efficiency and reliability of the system operation.

**The third point of scientific novelty** is formulated: an improved cognitive simulation model that uses simulated impressive impulses, which allows diagnosing the TC of system equipment taking into account their mutual connection and influence.

**In the fourth section**, a method of evaluating and forecasting TC of a complex system of critical application and a model of data reception and transmission during diagnosis, evaluation and forecasting of TC of complex systems were developed.

Output data of the method of reasoning based on precedents for evaluating and predicting TC of complex systems: the number and levels of failures of subsystems, components, elements and their mutual connections; set of goals and possible alternatives; a set of characteristics, advantages, criteria for ensuring the functionality of system equipment.

The stages of the method of evaluation and forecasting of TC of a complex critical application system are as follows:

1. Presentation of a precedent in the form of a set of parameters with specific values and solutions.
2. Obtaining assessment data and forecasting of complex system vehicles.
3. Formation of recommendations to ensure effective operation of CTS equipment.
4. Transfer of assessment data and TC forecasting of a complex system to a decision-maker (DM).

When presenting a precedent in the form of a set of parameters with specific values and solutions (estimates, TC forecasts and DM recommendations), the following parameters are taken into account: parameters describing precedent, risk assessments, probability of failures and estimates of losses from CTS failures, DM recommendations, performance assessments (partial or full), refined estimations of CTS vehicle parameters, specified predicted values of CTS vehicle parameters, decisions made by the DM and diagnostic results.

**The fourth item of scientific novelty** was formulated: the method of reasoning based on precedents was further developed, which made it possible to provide evaluation and forecasting of TC and increase the performance of complex short-circuit systems.

The developed model of data reception and transmission of diagnostics, assessment and forecasting of complex systems of critical applications ensures the efficiency of data reception and transmission while reducing the redundancy of information at the stages of its processing, maximizing its protection, and minimizing errors.

The proposed model contains a set of requirements and criteria that characterize: topology, speed, bandwidth, permissible error value of data reception and transmission, risk of device failures of the data reception-transmission system, effectiveness of information protection in the system.

The obtained result made it possible to formulate **the fifth point of scientific novelty**: for the first time, a data reception-transmission model was developed for the diagnosis, evaluation and forecasting of complex systems of critical applications, which takes into account the presence of a set of conflicting requirements and competing criteria, which made it possible to find Pareto-optimal solutions to ensure the efficiency of reception - data transmission.

**In the fifth section**, IIS is developed for evaluating and forecasting TCs of complex critical application systems using the method of case-based reasoning (CBR) and developing a decision-making strategy for finding equipment failures based on established evaluations of their TCs.

In order to check the performance, a simulation of the full cycle of the IIS evaluation, prediction of the probability (risk) of CTS failures was carried out using the example of ship power plants. The obtained values of probabilities (risks) of subsystems, components, elements and their mutual relations, which do not contradict expert assessments, testify to the effectiveness of diagnostics, evaluation and forecasting of complex systems, taking into account complete and partial failures.

Accounting for partial (full) failures of CTS equipment of critical use will allow making decisions aimed at pre-failure maintenance of systems, ensuring operability, which means increasing the efficiency of their operation. The decision-making sequence using the proposed IIS with a CBR cycle, which takes into account the operations of data processing and structuring according to precedents within the framework of the functioning of the developed software, ensures the operation of the IIS with incomplete information. The results of the calculation of the efficiency of the CTS short-circuit operation, taking into account the partial failures of the equipment and its pre-failure maintenance, took into account that the efficiency is determined by the probability of maintaining the system's operability. The result does not exceed the threshold value of the probability at which complete failure of the CTS occurs, which is determined from the generalized Harrington desirability function. The probability of keeping the CTS in working condition increases by 3%.

The models, methods and their application in IIS developed in the work were implemented in the activities of: shipping company Maersk (Denmark); scientific activity and educational process of the National University "Odesa Polytechnic".

The **scientific and practical results** obtained during the work on the dissertation are formulated in the conclusions.

**Keywords:** information technologies, model, method, modeling, algorithm, software, graph, intelligent, measurements, diagnostics, forecasting, decision maker, complex technical system, ship power plant.

## LIST OF PUBLISHED PAPERS ON THE TOPICS OF THE DISSERTATION

Papers in which the main scientific results of the dissertation are published:

1. Vychuzhanin V.V., Rudnichenko N.D., Vychuzhanin O.V., Yurchenko M.O. A software application for automating the construction of a model of failure risk assessments of complex technical systems. *Informatics and mathematical methods in modeling*. 2018. T.8. No. 3. P. 200-208. URL: [http://immm. Op. edu. u /files/archive/n3\\_ v 8\\_2018/2018\\_3\(2\). Pdf](http://immm. Op. edu. u /files/archive/n3_ v 8_2018/2018_3(2). Pdf). (Register of scientific and professional publications of Ukraine, category "B").
2. Vychuzhanin V.V., Rudnichenko N.D., Vychuzhanin O.V. A mobile application for monitoring, diagnosing and forecasting the risk of failure of components of a complex technical system. *Informatics and mathematical methods in modeling* . 2018. T.8. No. 4. P. 334-344. URL: <http://dspace.opu.ua/ jspui /bitstream /123456789/8835/1/9.pdf>. (Register of scientific and professional publications of Ukraine, category "B").
3. Vychuzhanin V.V., Rudnichenko N.D., Vychuzhanin O.V., Kozlov A.Yu. Information support of the system for identifying the risk of automotive equipment failures. *Informatics and mathematical methods in modeling*. 2019. T.9. No. 3. P.168-177. DOI: <https:// doi. org / 10.15276/ imms. v 9. no. 3.168>. (Register of scientific and professional publications of Ukraine, category "B").
4. Vychuzhanin V.V., Rudnichenko N.D., Vychuzhanin O.V., Kozlov A.Yu. Software for automating risk assessment of complex technical systems. *Informatics and mathematical methods in modeling*. 2019. T.9. No. 4. P. 315-323. DOI: <https://doi. org /10.15276/ imms. v 9. no. 4.315>. (Register of scientific and professional publications of Ukraine, category "B").
5. Vychuzhanin V.V., Rudnichenko N.D., Vychuzhanin O.V. An intelligent system for diagnosing and predicting the risk of failure of complex technical systems. *Informational systems and technologies. Status and prospects: a*

monograph/ O. Barmak, S. Bojatin, etc.; p id on ed. Prof. V. Vychuzhanin - Odesa: NU "OMA", 2021. P.108 - 133. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/bitstreams/ed5fcfb6-2e33-4d7b-8e65-ed14d8f8c258/download>.

6. Vychuzhanin Vladimir, Shibaeva Natalia, Rudnichenko Nickolay , Vychuzhanin Alexey. Optimization of data transmission system information parameters for complex technical system's state diagnosing. *From eur-ws.org, CMIS-2021*. Vol. 2864, P. 445 – 454. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2864/paper39.pdf>. (Indexed in SCOPUS).

7. Vychuzhanin Alexey. Intelligent system for assessing and forecasting the risk of failure of components of a complex technical system. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2022. Vol. 12. No. 3. P. 154-161. DOI:<https://doi.org/10.15276/imms.v12.no3.154>. (Register of scientific and professional publications of Ukraine, category "B").

8. Vychuzhanin Alexey. Intelligent system for supporting decision making for assessing the technical condition of complex systems. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2023. Vol. 13. No. 3-4. P. 219-227. (Register of scientific and professional publications of Ukraine, category "B").

9. Vychuzhanin Vladimir, Shibaeva Natalia, Vychuzhanin Alexey, Rudnichenko Nickolay. Intellectualization Method and Model of Complex Technical System's Failures Risk Estimation and Prediction. *With eur - ws. org, CMIS -2023*. Vol. 3392. P. 130 – 140. DOI: <https://doi.org/10.32782/cm/3392-11>. <https://ceur-ws.org/Vol-3392/paper11.pdf>. ( Indexed in SCOPUS).

10. Vychuzhanin Vladimir, Rudnichenko Nickolay, Vychuzhanin Alexey, Rychlik Andrzej Diagnosis Intellectualization of Complex Technical Systems. *With eur - ws. org, ICST-2023*. Vol. 3513. P. 352 – 362. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper29.pdf>. ( Indexed in SCOPUS).

11. Vychuzhanin Alexey. Information Processing in Control and Decision-Making Systems. Problems and solutions. Section 5. Intellectual models and knowledge engineering technologies. Intelligent monitoring of the technical condition of complex systems. Processing information in systems management and

adoption decisions. Problems and solutions. Monograph /Aksak N., and others; of science ed. Prof. In Vychuzhanina - Odesa: NU" OMA", 2023 - 358 p . P. 212-232. URL:[https://www.researchgate.net/publication/375665853\\_Information\\_processing\\_in\\_control\\_and\\_decision-making\\_systems\\_problems\\_and\\_solutions](https://www.researchgate.net/publication/375665853_Information_processing_in_control_and_decision-making_systems_problems_and_solutions).

12. Vychuzhanin Vladimir, Vychuzhanin Alexey. Information Processing in Control and Decision-Making Systems. Problems and solutions. Diagnosis Intellectualization of complex technical systems. Processing information in systems management and adoption decisions Problems and solutions. Monograph /Aksak N., Bobok I. and others; of science ed. Prof. In Vychuzhanina - Odesa: NU " OMA", 2023. P.260-276. URL: [https://www.researchgate.net/publication/375665853\\_Information\\_processing\\_in\\_control\\_and\\_decision-making\\_systems\\_problems\\_and\\_solutions](https://www.researchgate.net/publication/375665853_Information_processing_in_control_and_decision-making_systems_problems_and_solutions).

Papers certifying the approbation of the dissertation materials:

13. Vychuzhanyn V.V., Vychuzhanyn A.V. Cognitive impulse model of assessing the survivability of complex technical systems. *"Informative control systems and technologies" (ICST Odesa-2020)*. Materials of the IX st International Scientific and Practical Conference. 2020. Odesa: Ecology. P. 219 - 224. URL: <http://icst-conf.com/2020.pdf>.

14. Vychuzhanyn V.V., Vychuzhanyn A.V. An intelligent system of failure risk assessments of complex technical systems. *"Information management systems and technologies" (ICST-ODESA-2021)*. Materials of the 10th International Scientific and Practical Conference. 2021. Odesa: Ecology. P. 87 - 91. URL : <http://icst-conf.com/2021.pdf>.

15. Vychuzhanin Vladimir, Vychuzhanin Alexey. Optimization of information parameters when diagnosing the state of a complex technical system. *VIII International scientific and practical conference "Informatics. Culture. Technologies". ICT2021* , P. 22-23. URL: <https://drive.google.com/file/d/1YjTsi3p2jsOoZYyawr1wGFFPrpTW8K0z/view>.

16. Vychuzhanin Alexey. Decision support system for assessment and prediction of the technical condition of complex systems. Collection theses reports . *II International scientific and practical Internet conferences. "Innovations and promising ways development informative of technologies" (IPSHRIT -2023)*. December 6, 2023. m. Cherkasy. P.204-205. URL: [https://drive.google.com/file/d/1f0cc\\_HaFDH4G3AI\\_NfwqfTjaMjyWBvkc/view](https://drive.google.com/file/d/1f0cc_HaFDH4G3AI_NfwqfTjaMjyWBvkc/view).

17. Vychuzhanin Alexey. Intellectualization model of complex technical system 's failures risk estimation. Modern information technologies and systems in management. Collection of materials of *the 1st and 5th international scientific and practical conference of young scienticts, graduate students and students (Internet conference)*. Kyiv. April 20–21, 2023. P.135-137.

18. Vychuzhanin Alexey. Intelligent decision support system for assessing the risk of failures of complex technical systems. *VI International scientific and practical conference "Modelling, control and information technologies"*, Rivne, November 9-11. 2023. P.181–183. DOI: <https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.055>.

19. Vychuzhanin Alexey. Program evaluation and prediction of the risk of failure of the components of a complex technical system. *Automation and computer-integrated technologies - 2023, IX international scientific and practical conference of young scientiCTS, postgraduates and students of AKIT - 2023*, Kyiv. April 19, 2023, P. 81-82. URL: <https://tpza.kpi.ua/conferences/proceedings/AKIT-2023.pdf>.

20. Vychuzhanin Alexey. Model for assessing the risk of failure of components of complex technical systems. *XXIII All-Ukrainian scientific and technical conference of young scientiCTS, graduate students and students "State, achievements and prospects of information systems and technologies"*. Materials of the conference. Odesa, April 20-21, 2023, P. 43-45. URL: [https://ontu.edu.ua/download/konfi/2023/Conference\\_abstract-IT-21-22-04-23.pdf](https://ontu.edu.ua/download/konfi/2023/Conference_abstract-IT-21-22-04-23.pdf).

21. Vychuzhanin Alexey. Intellectualization of technical condition assessment of ship complex systems. *XI International Scientific and Practical*

*Conference "Information Control Systems & Technologies (ICST-2023)". 2023. P.124-130. URL: <http://icst-conf.com/2023.pdf>.*

22. Vychuzhanin A. Application of precedent technology to support decision-making to ensure the efficiency of complex technical systems. *I (VII) international scientific and practical conference of higher education graduates and young scientists "Information technologies: theory and practice". Abstracts of reports (Dnipro, March 20-22, 2024). P. 165-167. URI: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/166565>.*

## ЗМІСТ

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ .....	27
ВСТУП .....	28
РОЗДІЛ 1 АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ ДІАГНОСТИКИ, ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ .....	34
1.1 Аналіз проблем експлуатації складних технічних систем критичного застосування.....	34
1.1.1 Принципи побудови та характеристики складних технічних систем критичного застосування.....	34
1.1.2 Аналіз техногенних аварій від відмов складних технічних систем критичного застосування.....	36
1.2 Аналіз моделей та методів інтелектуалізації діагностики, оцінювання та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування.....	40
1.2.1 Порівняльний аналіз моделей та методів інтелектуалізації діагностики технічного стану складних систем критичного застосування .....	40
1.2.2 Порівняльний аналіз моделей та методів інтелектуалізації оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування.....	45
1.3 Порівняльний аналіз інформаційних інтелектуальних систем діагностики, оцінювання та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування.....	51
1.4 Висновки до першого розділу.....	62
РОЗДІЛ 2 РОЗРОБКА СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ.....	64
2.1 Розробка стохастичної структурної моделі та методу діагностики технічного стану складних систем критичного застосування .....	64

2.1.1 Постановка задачі розробки стохастичної структурної моделі та методу діагностики технічного стану складних систем критичного застосування.....	64
2.1.2 Розробка стохастичної структурної моделі та методу діагностики технічного стану складних систем критичного застосування .....	65
2.2 Розробка моделі когнітивного імітаційного моделювання діагностики технічного стану складних систем критичного застосування.....	76
2.3 Висновки до другого розділу.....	87
<b>РОЗДІЛ 3 ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ І МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ.....</b>	<b>88</b>
3.1 Дослідження та аналіз стохастичної структурної моделі і методу діагностики технічного стану складних систем критичного застосування методом динамічної байєсівської мережі довіри .....	88
3.2 Дослідження та аналіз моделі когнітивного імітаційного моделювання діагностики технічного стану складних систем критичного застосування...	104
3.3 Висновки до третього розділу.....	109
<b>РОЗДІЛ 4 РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ.....</b>	<b>110</b>
4.1 Розробка методу оцінки та прогнозування на основі методу міркувань прецедентів технічного стану складних систем критичного застосування.....	110
4.2 Розробка моделі прийому та передачі даних при діагностиці, оцінці та прогнозуванні технічного стану складних систем критичного застосування.....	118
4.3. Висновки до четвертого розділу.....	126
<b>РОЗДІЛ 5 РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ ДІАГНОСТИКИ, ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ.....</b>	<b>127</b>

5.1 Проектування інформаційної інтелектуальної системи діагностики, оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування.....	127
5.2 Реалізація інформаційної інтелектуальної системи діагностики, оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування.....	131
5.3 Ефективність експлуатації складної технічної системи за результатами діагностування, оцінки та прогнозування технічного стану обладнання....	141
5.4 Висновки до п'ятого розділу.....	144
ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ.....	146
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ.....	149
ДОДАТОК А Список опублікованих праць за темою дисертації.....	167
ДОДАТОК Б Методи та моделі діагностування ТС складних систем.....	172
ДОДАТОК В Оцінки ефективності ІС.....	177
ДОДАТОК Г Лістинг програмного коду КІМ.....	180
ДОДАТОК Д Мобільний додаток для діагностики ризику відмов підсистем, компонентів складної технічної системи.....	205
ДОДАТОК Е Документи про впровадження результатів дисертації.....	213

## ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ ТА СКОРОЧЕНЬ

БД - база даних

БЗ – база знань

БМД - байєсовські мережі довіри

ПС – інформаційна інтелектуальна система

КЗ - критичне застосування

КІМ - когнітивна імітаційна модель

ОПР – особа, яка приймає рішення

ПЗ - програмне забезпечення

СППД – система прийому та передачі даних

СТС – складна технічна система

ТС - технічний стан

ШІ - штучний інтелект

СВР - Case-based Reasoning

FE - сукупність підсистем, компонентів, елементів

FC – сукупність міжкомпонентних, міжелементних зв'язків

OLAP - online analytical processing

## ВСТУП

**Актуальність дослідження.**

Однією з головних причин техногенних аварій, пов'язаних зі складними технічними системами (СТС), що використовуються на транспорті, в авіації, енергетиці тощо, залишаються відмови при експлуатації обладнання систем. Так, з аналізу результатів експлуатації суден, випливає, що, незважаючи на заходи щодо забезпечення безпеки мореплавання, кількість аварій на морі залишається високою. Основною із численних причин аварій є відмови СТС. В зв'язку з цим подібні СТС належать до складних систем критичного застосування (КЗ).

Складні технічні системи КЗ - це ієрархічні структури з нетривіальною внутрішньою структурою, різнофункціональними численними підсистемами, компонентами, елементами та складними зв'язками між ними, знаходяться у різних станах відмов. Характерною особливістю експлуатації СТС КЗ є невизначеність при експлуатації, неповнота інформації у даних, що характеризують технічний стан (ТС) систем.

У зв'язку підвищенням вимог до безпеки та безвідмовності дорогих судових СТС КЗ їх ефективність суттєво залежить від необхідності збільшення часу та ресурсу експлуатації. Підвищення ефективної експлуатації СТС можна досягти шляхом застосування результатів розробок моделей та методів діагностики, оцінки і прогнозування ТС складних систем та їх використанням у інформаційних інтелектуальних системах (ІС), які дозволяють оцінювати, прогнозувати ТС за результатами діагностики. Існуючі моделі та методи діагностування ТС широко використовуються на практиці, але їх застосування не завжди гарантує комплексне забезпечення ефективності експлуатації СТС. Крім того, існуючі моделі діагностики ТС враховують відмови від працездатності тільки повні, але не часткові. Спектр можливих часткових відмов у СТС за видами та місцями прояву значно ширший, ніж у повних відмов. Складніші алгоритми діагностування ТС для

вимог ефективності прийняття рішень з урахуванням можливості продовження функціонування СТС.

Перспективними методами моделювання для діагностування ТС є байєсовські мережі довіри, що використовуються з урахуванням невизначеностей та неповних даних моделюваних СТС, а також методи когнітивного імітаційного моделювання, що дозволяють додатково оцінити структурні та функціональні вразливості обладнання систем. Проте когнітивному імітаційному моделюванню необхідно удосконалення через недоліки: не є універсальним щодо структурних загроз, вразливих місць у СТС; враховує взаємний вплив обладнання, але без урахування його значимості та критичності для функціонування всієї системи.

Відомі методи оцінки та прогнозування ТС складних систем, які реалізуються у ІС: міркування на основі прецедентів; аналогій; системні; евристичні для задач оптимізації (генетичний алгоритм, штучні імунні мережі, метод відпалу, методи роєвого інтелекту, у тому числі мурашині алгоритми); структурного відображення з урахуванням прецедентів по OWL онтологіям. Ряд перерахованих методів мають недоліки: високе зростання алгоритмічної та обчислювальної складності при застосуванні; необхідність реалізації не тривіальних етапів попередньої обробки різноманітних даних; відсутність ефективних можливостей наочної інтерпретації результатів. Загальним недоліком є велика розмірність кількості можливих задач для подальшого використання під час прийняття рішень.

Підвищення ефективності експлуатації СТС КЗ шляхом застосування результатів розробок моделей та методів діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем з урахуванням часткових та повних відмов їх обладнання є актуальною науковою задачею.

### **Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами.**

Дисертаційна робота виконувалась згідно з планами наукових досліджень Національного університету «Одеська політехніка», а саме: в межах держбюджетної науково-дослідницької роботи № 163-176

«Інформаційно-технологічне забезпечення управління функціонально-топологічними структурами розподілених систем» (2018 - 2023 р. р) № ДР 0119U000257, у якій автор брав участь як виконавець.

**Метою дослідження** є підвищення ефективності експлуатації СТС КЗ за рахунок моделей та методів діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ. Для досягнення поставленої мети поставлено та вирішено такі задачі:

1. Проаналізовано моделі, методи та інформаційні системи діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ.
2. Розроблено стохастичні моделі та метод діагностики ТС складних систем КЗ.
3. Проведено дослідження та аналіз стохастичних моделей та методу діагностики ТС складних систем КЗ.
4. Розроблено метод оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ;
5. Розроблено інформаційну інтелектуальну систему діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ.

**Об'єктом дослідження** є процеси діагностування, оцінки та прогнозування ТС складних систем критичного застосування.

**Предметом дослідження** є моделі та методи діагностування, оцінки, прогнозування ТС складних систем критичного застосування.

**Методи дослідження.** Для досягнення мети використано методи математичного, імітаційного та комп'ютерного моделювання, експертного оцінювання, теорій: інформації; управління; прийняття рішень; графів; штучного інтелекту; когнітивного аналізу; контент аналізу літератури, обробки даних; діагностики, прогнозування, а також теоретичного, прикладного та об'єктно-орієнтованого програмування (при розробці концептуальних стохастичних моделей діагностики ТС складних систем КЗ); методів теорії оптимізації (при розробці моделі прийому-передачі даних, а також діагностуванні, оцінці та прогнозуванні ТС складних систем).

**Наукова новизна** одержаних результатів полягає:

*Вперше:*

- запропоновано стохастичну модель діагностики ТС складних систем, яка одночасно враховує наявність підсистем, компонентів та елементів, їх взаємні зв'язки та ймовірність часткової або повної відмови працездатності, що дозволило запропонувати метод діагностики ТС на основі байєсівської мережі довіри для складних систем критичного застосування;

- розроблено модель прийому та передачі даних при діагностиці, оцінці та прогнозуванні ТС складних систем КЗ, яка враховує наявність множини суперечливих вимог та конкуруючих критеріїв, що дозволило знайти Парето-оптимальні розв'язки для забезпечення ефективності прийому та передачі даних.

*Набули подальшого розвитку:*

- метод діагностики ТС складних систем на основі байєсівської мережі довіри, що дозволило своєчасно виявити та візуалізувати структурні, функціональні вразливості та підвищити ефективність експлуатації складних систем критичного застосування;

- метод міркувань на основі прецедентів, що дозволило забезпечити оцінку та прогнозування технічного стану та підвищити працездатність складних систем критичного застосування;

*Удосконалено:*

- когнітивну імітаційну, в якій застосовуються імітаційні вражаючі імпульси, що дозволяє діагностувати ТС обладнання систем з урахуванням їх взаємного зв'язку та впливу.

**Практичне значення** одержаних результатів полягає у розробці інформаційної інтелектуальної системи, яка дозволяє автоматизувати процеси оцінювання та прогнозування ТС обладнання складних систем КЗ, що перебувають в різних станах працездатності, та у розробці алгоритму пошуку відмов підсистем, компонентів, елементів і їх взаємних зв'язків - на основі встановлених оцінок їх ризику відмов, що дозволяє реалізувати

стратегію цілеспрямованого функціонування інформаційної інтелектуальної системи. Розроблено користувальницький інтерфейс бази знань, що дозволяє експертам переглядати формалізовані дані та, на їх основі, здійснювати кінцеві оцінки ризику відмов обладнання СТС КЗ.

Одержані наукові результати досліджень у вигляді інформаційного та програмного забезпечення впроваджено у діяльності судноплавної компанії Maersk (Данія), знайшли відображення у науковій діяльності та навчальному процесі кафедри інформаційних технологій Національного університету «Одеська політехніка» (Додаток Е).

**Особистий внесок здобувача.** Всі наукові положення та висновки, які викладено в дисертації та винесено на захист, одержано здобувачем самостійно. У статті [1] розроблено алгоритм визначення ризику відмов, у статті [2] розроблено алгоритм мобільного додатку, у статті [3] розроблено когнітивну імітаційну модель для оцінки ризику відмов підсистем, компонентів, елементів СТС з урахуванням їх взаємопов'язаності та взаємодії, а також забезпечення виявлення структурних загроз уразливих місць у СТС, у статті [4] розроблено програмне забезпечення автоматизації оцінки та прогнозування ризику відмов СТС, збитків від втрати працездатності системи, проведено дослідження ІС у статті [5], цільові функції оптимізації параметрів при прийомі та передачі даних розроблені для [6], у статті [9] в розробці моделі оцінки ТС ризику відмови складних систем, у статті [10] внесок здобувача полягає в розробці моделі діагностики ТС складних систем, у статті [12] розроблена методика діагностики СТС. Статті [7], [8], [11] виконані самостійно.

**Апробація результатів дисертації.** Результати дисертаційного дослідження доповідалися, обговорювалися і отримали схвалення на: IX International Scientific and Practical Conference "Information Control Systems & Technologies (ICST-2020), Odesa, September 24 - 26, 2020 p.; Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2023, IX Міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів АКІТ – 2023,

Київ, 19 квітня 2023 р.; IV Міжнародна науково-практична конференція молодих вчених, аспірантів і студентів «Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні», Київ, 20–21 квітня 2023 р.; XXIII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій» Матеріали конференції Одеса 20-21 квітня 2023 р.; VIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформатика. Культура. Технології» ІКТ2021: XI International Scientific and Practical Conference "Information Control Systems & Technologies (ICST-2023), September 21 - 23, 2023; «Інформаційні управляючі системи і технології» (ІУСТ-ОДЕСА-2021). Матеріали X Міжнародної науково-практичної конференції, 23 - 25 вересень 2021 р Одеса, 2021 р.; VI International scientific and practical conference «Modeling, control and information technologies», Rivne, November 9-11, 2023; II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (ІПШРІТ-2023), 6 грудня 2023 р. Черкаси; VII міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інформаційні технології: теорія і практика». Тези доповідей. Дніпро 20 – 22 березня 2024 р.

**Публікації.** За матеріалами дисертаційної роботи опубліковано 22 наукові роботи, в тому числі: 6 статей опубліковано у виданнях, включених до Переліку фахових видань України (Категорія "Б"), 1 стаття - у самостійному розділі у монографії, 2 статті - у колективних монографіях, 3 і статті - у матеріалах міжнародних науково-практичних конференцій, включених до наукометричної бази Scopus.

### **Структура і обсяг роботи.**

Дисертація складається з вступу, п'яти розділів, висновків, списку використаних джерел і додатків. Повний обсяг дисертації складає 215 сторінок, в тому числі: 148 сторінок основного тексту, 84 рисунків і 6 таблиц, список використаних джерел з 184 найменувань і 6 додатків.

## РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ МОДЕЛЕЙ, МЕТОДІВ ТА ІНФОРМАЦІЙНИХ СИСТЕМ  
ДІАГНОСТИКИ, ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
СКЛАДНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

1.1 Аналіз проблем експлуатації складних технічних систем критичного застосування

1.1.1 Принципи побудови та характеристики складних технічних систем критичного застосування

Сучасні складні технічні системи, встановлені на транспорті, в авіації, енергетиці тощо - ієрархічні структури з різнофункціональними численними підсистемами, компонентами, елементами та нетривіальними зв'язками між ними, що перебувають у станах часткових або повних відмов працездатності. Структура СТС відображає загальну картину причинно-наслідкових взаємодій підсистем, компонентів, елементів систем [1, 2].

Експлуатація СТС пов'язана з невизначеностями, які проблемно повністю описати, зрозуміти чи передбачити. СТС мають властивості нелінійності, адаптивності, самоорганізації, цілісності [1, 2]. Властивість адаптивності полягає у можливості обладнання систем перебувати у безлічі станів. Інформаційні компоненти СТС [1, 3, 4] з елементами штучного інтелекту забезпечують адаптивність систем. Здатність змінювати свої властивості та повертатися до початкового стану при виході з нього відповідає властивості самоорганізації СТС. Цілісність систем проявляється у збереження своїх системних якостей.

СТС класифікують: імовірнісні та детерміновані (з урахуванням ступеня визначеності функціонування); добре чи погано організовані. За взаємодією з навколишнім середовищем розрізняють замкнуті та відкриті СТС [1, 2].

Кожне обладнання СТС описується набором характеристичних ознак, значення яких визначають його стан. Зміни властивостей окремих підсистем, компонентів, елементів та взаємозв'язків у системах спричиняє зміну властивостей багатьох інших підсистем, компонентів, елементів. В основу функціонування СТС покладено системні принципи [1, 2]: функціональної належності елемента до компонента, компонента до підсистеми, підсистеми до СТС; незведення властивостей системи до суми властивостей складових її підсистем, компонентів, елементів.

Типові СТС це суднові системи, тобто - комплекси з десятків різних взаємозалежних технічних систем (механізмів, агрегатів, пристроїв, трубопроводів тощо), призначених для забезпечення експлуатації суден [3, 5]. Прикладом СТС є суднова енергетична установка (СЕУ), що складається із взаємозалежних підсистем, компонентів, елементів різного призначення. На рис. 1.1 наведено граф, який відповідає структурі СЕУ.

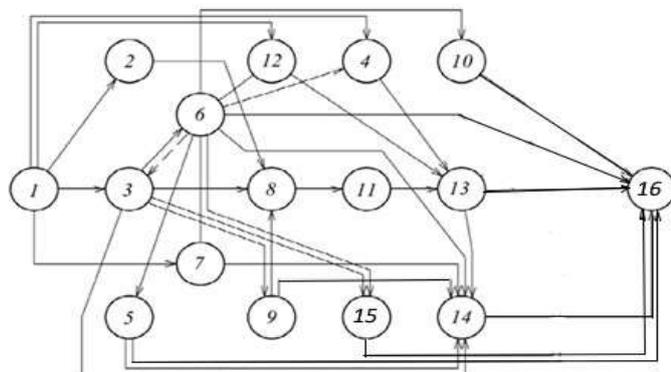


Рисунок 1.1 – Структура СЕУ

Вершинами графа є: вхідний компонент 1; ручне керування головним двигуном 2; підсистеми стисненого повітря 3 та управління рушійно-кермовим комплексом (ПУРК) 4; котельна установка 5; електростанція 6; протипожежна система 7; головний двигун 8; підсистеми дистанційно-автоматизованого керування 9 та баластно-осушувальна 10; передача потужності від головного двигуна до рушія 11; аварійний привід ПУРК 12; ПУРК 13; підсистеми вимірювальних приладів 14 та санітарної водопідготовки 15; вихідний компонент 16.

Таким чином, СТС є упорядкованою сукупністю численних функціонально взаємопов'язаних і взаємодіючих між собою підсистем, компонентів, елементів, з'єднаних нетривіальними зв'язками, які часто мають невизначеності у вихідних даних, що важко, або неможливо, передбачити і перебувають у різних станах відмов від працездатності.

### 1.1.2 Аналіз техногенних аварій від відмов складних технічних систем критичного застосування

Однією з головних причин техногенних аварій, пов'язаних з експлуатацією СТС, що використовуються на транспорті, в авіації, енергетиці тощо, залишаються відмови їх підсистем, компонентів, елементів [6]. У цьому подібні СТС відносяться до систем критичного застосування.

Теоретично надійність ТС складних систем є основним поняттям, пов'язаним із сукупністю властивостей систем, що фіксуються за певних умов зовнішнього середовища за конкретний момент часу. У зв'язку із змінами ТС при експлуатації СТС (рис.1.2) виникає необхідність оцінки ТС систем.



Рисунок 1.2 - Схема ТС та подій у процесі експлуатації СТС

Надійність [7, 8, 9] – властивість зберігати протягом певного проміжку часу значення параметрів, що характеризують функціонування СТС. Основні показники надійності: ймовірність (ризик) безвідмовної роботи; частота

розподілу та інтенсивність відмов; середнє напруцювання на відмову. Імовірність відмови та ступінь критичності СТС можна відобразити у вигляді матриці критичності (рис.1.3) [7].

		значущість наслідків			
		катастрофічні	великі	середні	незначні
Ймовірність	Висока	X	X	1	2
	Середня	X	X	1	2
	Низька	X	X	1	2
	Дуже низька	X	1	1	2
	Вкрай низька	1	2	2	3

Рисунок 1.3 - Якісна матриця критичності експлуатації СТС (категорії ризику відмови: X – неприпустимий; 1 – небажаний; 2 – прийнятний; – несуттєвий)

Відмова у теорії надійності - це випадкова подія, що полягає в частковій або повній втраті працездатності. Поняття часткова відмова використовується як перехідний стан між справністю та повною відмовою. Часткова відмова від працездатності СТС трактується як неможливість виконувати деякі функції, що виникає через часткову втрату ефективності функціонування системою. Такі СТС відносяться до систем з багатьма станами.

Зовнішні впливи викликають підвищення навантаження на окремо взяту підсистему, компонент, елемент СТС, що відображається з можливості ними виконувати свої функції, зменшення ефективності та надійності СТС, які призводять до техногенних аварій. До причин таких аварій також належать: відмови СТС через дефекти виготовлення та порушення режимів експлуатації; помилкові дії операторів

Серед галузей економіки, в яких висуваються підвищені вимоги до ефективності та надійності СТС КЗ, відноситься морський та річковий транспорт. Десятки СТС, встановлених на судах, впливають на їх живучість, яка не забезпечується при дотриманні нормативних вимог на стадії проектування та будівництва, а також при експлуатації суден [10, 11, 12]. У

базах даних [13] наведено інформацію щодо статистики морських аварій та інцидентів на морі. У Глобальній системі судноплавства GISIS, яка підтримується ІМО, міститься повна подібна інформація [14] (рис.1.4 - 1.7).

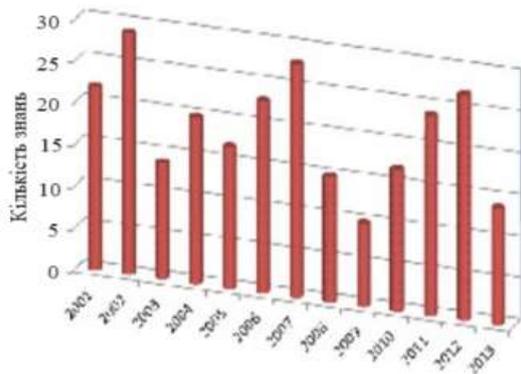


Рисунок 1.4 - Число аварій суден у морській зоні України

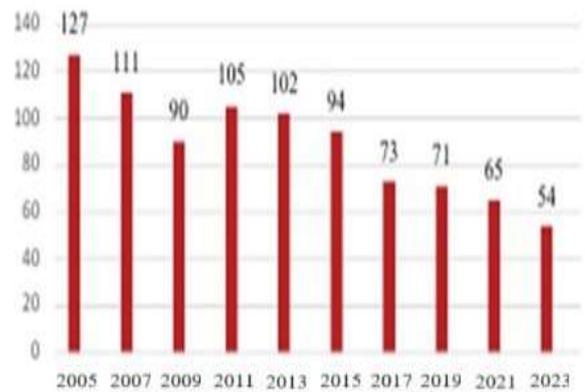


Рисунок 1.5 - Втрати суден

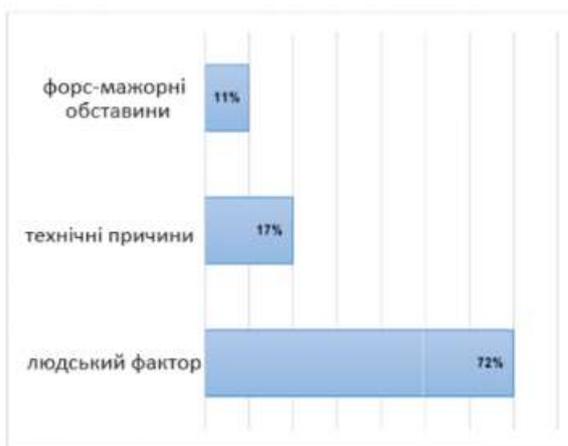


Рисунок 1.6 – Аналіз факторів аварійних подій

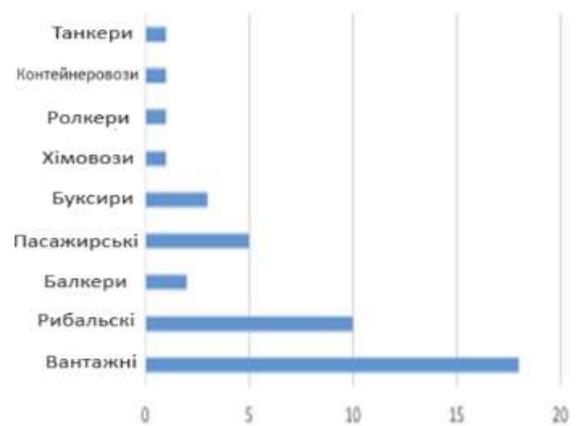


Рисунок 1.7 – Аварійність залежно від типу суден у 2023 р.

Систематизовані статистичні дані про морські події представлено також у Європейському агентстві безпеки на морі EMSA [15]. Статистика зареєстрованих, наприклад, в базі даних JTSC у зоні японського судноплавства аварій за період 2008–2023 р.р. показує [16], що їх кількість має слабку тенденцію до зниження (рис. 1.8 - 1.10). Зберігається актуальність проблеми забезпечення надійності для старих і нових суден та, особливо, для суден великої водотоннажності, з розвиненими системами управління та комунікаціями і як наслідок з більш вразливими підсистемами [17, 18, 19].

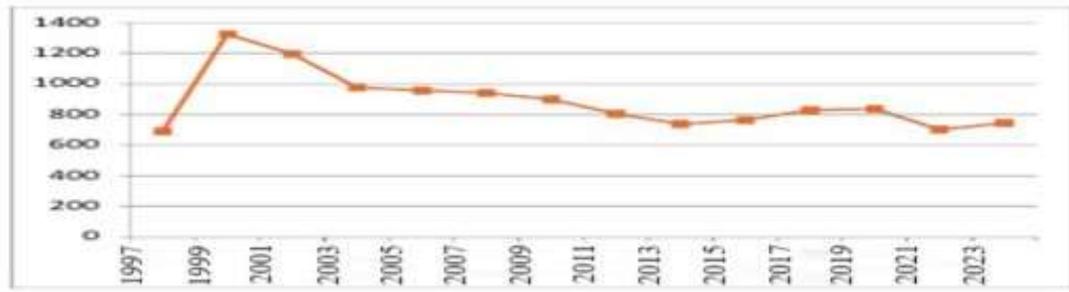


Рисунок 1.8 – Тенденція загальної аварійності морських суден

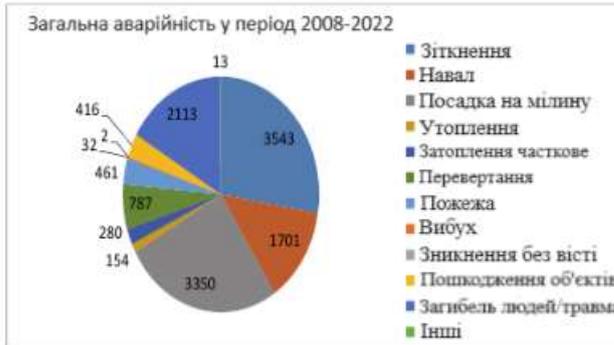


Рисунок 1.9 - Структура аварійності за видами аварій

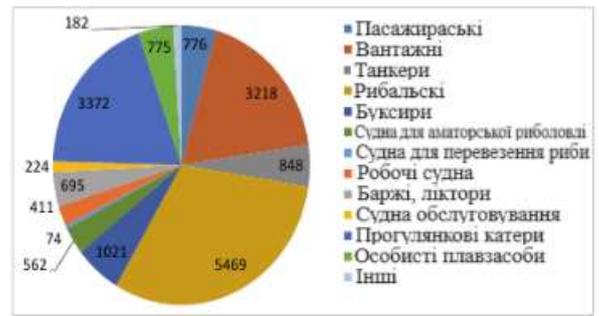


Рисунок 1.10 - Структура аварійності за типами суден

З проведеного аналізу результатів експлуатації суден випливає, що, незважаючи на заходи, що вживаються щодо забезпечення безпеки мореплавання, кількість аварійних випадків на морі залишається високою. Однією з найчисельніших причин аварій на судах є вихід із ладу СТС.

Морські аварії – це серйозна загроза життю людей, судну, навколишньому середовищу чи береговій інфраструктурі [20, 21, 22]. Так відмова СЭУ на контейнеровозі призвела до техногенної аварії в Балтиморі в березні 2024 р. (рис.1.11).



Рисунок 1.11 - Техногенна аварія в Балтиморі в березні 2024 р.

За даними ООН, за останні 30 років збитки, завдані техногенними катастрофами, досягають 200 млрд. \$ на рік. Тому морські організації, такі як держави прапора, органи управління портами та класифікаційні товариства, активізували свої спільні зусилля щодо забезпечення надійності та безпеки суден та їх систем. Нині посилюються міжнародні вимоги щодо безпеки морського судноплавства. Експлуатація СЕУ задачі про необхідність забезпечення безпечного функціонування подібних СТС до першочергових.

Таким чином, з аналізу результатів експлуатації суден випливає, що, незважаючи на заходи щодо забезпечення безпеки мореплавання, кількість аварійних випадків на морі залишається високою. Аналіз розподілу аварій з водотоннажністю та віку суден показує, що вихід з ладу СТС найчастіше є однією з найчисельніших причин аварій на судах. З підвищенням вимог до безпеки дорогих СТС одночасно зростають вимоги до їх ефективності, що залежить від часу та ресурсу при їх експлуатації. Тобто забезпечення безпечної та ефективної експлуатації судових СТС залишається актуальним науково-технічним завданням.

1.2 Аналіз моделей та методів інтелектуалізації діагностики, оцінювання та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування

1.2.1 Порівняльний аналіз моделей та методів інтелектуалізації діагностики технічного стану складних систем критичного застосування

Ефективна експлуатація СТС КЗ багато в чому залежить від працездатності їх підсистем, компонентів, елементів та їх взаємних зв'язків. Нормативними документами встановлено [23], що для забезпечення безаварійної роботи СТС потрібен контроль ТС систем, включаючи діагностику, оцінку та прогнозування працездатності їх обладнання.

Методи, засоби діагностики ТС, що реалізуються при проектуванні та експлуатації СТС, спрямовані на забезпечення ефективності, надійності систем [1, 23, 24, 25, 26]. Це дозволяє своєчасно виявляти наявність та місцезнаходження відмов обладнання та їх взаємних зв'язків у СТС, визначати за змін умов експлуатації ступінь працездатності, скоротити час простою, вартість ремонту та отримати необхідну інформацію для оцінки та прогнозування ТС систем. При цьому діагностика ТС повинна здійснюватися без виведення обладнання з роботи, уникаючи його демонтажу.

Діагностика ТС ґрунтується на теоріях розпізнавання образів та контрольності [6]. Перша пов'язана з побудовою алгоритмів розпізнавання ТС в умовах обмеженої інформації, правил прийняття рішень та діагностичними моделями систем. Друга включає розробку засобів та методів отримання діагностичної інформації та пошуку несправностей. У задачі розпізнавання ТС використовуються ймовірнісний та детерміністичний підходи. При ймовірнісному - розглядається система, яка перебуває у одному з випадкових станів. У детерміністичному - діагностування ТС системи відповідає певній галузі простору ознак. Найбільш застосовні ймовірнісні методи, але потребують великого обсягу апіорної інформації.

Актуальною задачею безаварійної експлуатації СТС є визначення їх ТС на основі безрозбірної діагностики та неруйнівного контролю. В основу теорії діагностування покладено залежність між ТС складної системи та її відображеннями у діагностичних параметрах. Через те, що при експлуатації об'єкта діагностування здійснюється за умов обмеженої інформації, значними чинниками у розпізнаванні несправностей є діагностичні моделі. Моделювання діагностування СТС КЗ важко через складні взаємозв'язки між її підсистемами, компонентами, елементами та взаємодії між системою та навколишнім середовищем. Через залежність числових значень параметрів компонентів діагностичних моделей від численних факторів, що важко враховуються при їх аналізі, а також з урахуванням того, що подібні моделі

описують випадкові процеси, дослідниками їх було віднесено до стохастичних моделей. При цьому вважається, що випадковість тих чи інших явищ виявляється у термінах ймовірності. Діагностичні моделі СТС є й концептуальними моделями, що визначають структуру та властивості моделюваної СТС в умовах невизначеності. У такому випадку математична модель СТС має вигляд [24, 25]:

$$Y(t) = F(X(t), U(t), V(t)), \quad (1.1)$$

де  $X$  – вектор поточного стану моделі системи;  $U$  – вектор управляючих впливів;  $V$  – вектор зовнішніх впливів;  $Y$  – вектор вихідних сигналів моделі

Відоме різноманіття моделей та методів діагностування ТС обумовлено залежністю їх від ступеня інформативності поведінки системи, її складності та різноманітності задач діагностики. Чим складніше система, тим складнішою є діагностика ТС, і тим більший ризик відмов, аварійні ситуації при експлуатації СТС [8, 28, 29, 30, 31].

Діагностика ТС включає: виявлення аномалій; локалізація; класифікація несправностей. Для цього застосовуються методи машинного навчання та штучного інтелекту: машини опорних векторів [32]; найближчі сусіди [33]; дерева рішень [34]. При проектуванні та експлуатації СТС для діагностики використовують також спеціальні методи та моделі діагностування ТС (Додаток Б) [35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45]. У стандартах [46, 47] для моделювання діагностики ТС рекомендуються дерева відмов, мережі Петрі. Проте дерева відмов не можуть врахувати загальні відмови устаткування СТС. Мережі Петрі використовуються, наприклад, при імітаційному моделюванні за методом Монте-Карло, але подібні моделі важко використовувати, особливо для великих систем.

З аналізу літературних джерел випливає, що моделювання діагностики ТС складних систем відомими методами не дозволяє отримати достовірні дані, які можна було б використовувати при оцінках та наслідках розвитку відмов у системах, прийнятті необхідних управлінських рішень. У цьому контексті байєсовські мережі довіри – моделі штучного інтелекту корисний

для діагностики ТС інструмент, що обумовлено наступними перевагами [27, 48, 49, 50, 51]: висока ефективність вирішення задач для СТС з великою кількістю підсистем, компонентів та елементів; простота інтерпретації та наочність; логічне пояснення розповсюдження відмов.

В основу теорії БМД покладено теорії ймовірностей та графів. Правила Байєса засновано на експертних оцінках фахівців, а також на апіорних та апостеріорних даних спостережень у вирішенні задач діагностики.

При діагностиці ТС складних систем КЗ для кожного моменту часу є неповнота даних щодо стану кожної підсистеми, компонента, елемента системи. Це свідчить про невизначеність, що враховується у методах подання знань з невизначеністю з ймовірнісними висновками в БМД, а також у когнітивних імітаційних моделях діагностики ТС складних систем [52].

БМД спираються на сучасні програмні технології (Microsoft Bayesian Network Editor, Bayes Net Toolbox для Matlab, GeNIe, Smile, AgenaRisk, Analytica, Bayes Server, Hugin Expert). Є готові бібліотеки та модулі для Python, C++, C#, MatLab, R, VB.NET та різних операційних систем (Windows, Linux, macOS) [53, 54, 55, 56, 57, 58, 59, 60]. Ключовим продуктом є GeNIe Modeler, що дозволяє створювати моделі будь-якого розміру та складності [28, 61, 62]. Відомі прикладні пакети для програмних середовищ Matlab (Package) - BNT (Bayes Net Toolbox) та BRML [63, 64], R - пакет gRain [65].

Зміст і методи імітаційного моделювання спрямовано на створення КІМ діагностування ТС з вивченням великої кількості можливих альтернатив. Імітаційну модель можна уявити як множину правил, сприятливих діагностиці ТС [66] з погляду їхньої значущості і критичності для функціонування всієї СТС. Перевагами КІМ перед аналітичними методами моделювання діагностування ТС є можливість побудови моделей складних систем, за винятком використання аналітичних методів, застосовуючи частково-достовірні та неповні дані про об'єкт моделювання. Розроблено теоретична база, великий спектр моделювання ПЗ у вигляді

продуктів КІМ, таких як Arena, AutoMod, AnyLogic, Extend, GPSS World та інших сприяє застосуванню КІМ.

Враховуючи об'єктивно існуючу невизначеність, неповноту та нечіткість інформації про СТС часто для діагностики ТС використовується апарат нечіткої логіки [45]. Це дозволяє діагностувати ТС складних систем в екстремальних сценаріях за мінімізації часу на розрахунок. При цьому враховується як функціональна взаємопов'язаність, так і взаємодія устаткування СТС. Ефективним для діагностування ТС складних систем є КІМ у поєднанні з нечітким моделюванням, що забезпечується алгоритмами та методами, які адекватно відображають особливості систем [40, 67]. Проте, на даний час, для діагностики ТС складних систем такий підхід потребує подальшого розвитку.

З проведеного аналізу типових моделей та методів впливає відсутність універсальної методики діагностування ТС СТС. Для відомих методів слід зазначити, що вони: застосовуються обмежено через «жорсткість» схем обробки інформації; не враховують передісторію ТС; потребують проведення суттєвих доробок при зміні складу та логіки функціонування СТС; не враховують часткові відмови від працездатності устаткування систем та їх взаємних зв'язків.

З аналізу літературних джерел, присвячених частковим відмовам працездатності, впливає [36, 37, 38]: спектр можливих часткових відмов практично в будь-якому технічному пристрої значно ширший, ніж у повних відмовах; виявлення та ідентифікація часткових відмов відрізняються більш складними алгоритмами розпізнавання.

На даний час відсутні інструменти для теоретичного підходу до розробки моделей діагностування ТС з урахуванням часткової відмови, що обумовлено тим, що статистика, яка стосується таких відмов, збирається рідко. Алгоритми ідентифікації, що використовуються, не передбачають поділ відмов за критерієм - частковий або повний.

З аналізу моделей та методів діагностування СТС КЗ випливає, що стратегія експлуатації СТС повинна мати превентивний характер. Поліпшення стратегії експлуатації та обслуговування СТС досягається при комплексному підході до розробки та впровадження відповідного діагностичного забезпечення. При вирішенні задач, пов'язаних з підвищенням ефективності експлуатації СТС, зростає роль методів, що базуються на сучасному для діагностиці ПЗ.

Таким чином, для ефективної експлуатації СТС КЗ актуальним є своєчасне діагностування часткових та повних відмов працездатності обладнання систем на основі застосування результатів розвитку та розробки концептуальних стохастичних моделей та методів діагностики ТС. Актуальним залишається діагностування ТС при відносній нечутливості до неповних даних обладнання СТС, з поданням знань з невизначеністю за максимально достовірних результатів.

### 1.2.2 Порівняльний аналіз моделей та методів інтелектуалізації оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування

Розробка концептуальних моделей та методів оцінки ТС складних систем КЗ потребує обліку можливості продовження експлуатації СТС в умовах часткових відмов від працездатності з множинністю сценаріїв їх розвитку [68, 69, 70, 71, 72, 73]. Такий підхід сприяє підвищенню ефективності експлуатації СТС через збільшення терміну продуктивної роботи до планового технічного обслуговування та відновлювальних заходів.

Мірою техногенних аварій є ризик відмов обладнання з наслідками, що визначаються рівнем та періодом експлуатації СТС [74, 75, 76]. З аналізом ризику пов'язано процес оцінок ризику відмов - це ідентифікація небезпек з оцінкою за критеріями допустимого ризику відмови з якісними та кількісними результатами та з переведенням небезпек до розряду вимірюваних категорій [77, 78, 79].

При оцінках ризику відмов СТС повинні враховуватися: ієрархія, топологія та різноманіття обладнання, що різняться за фізичними принципами, параметрами та режимами роботи; функціональний стан; умови експлуатації за невизначеностями; результати діагностування ТС; складності отримання статистичних та експертних даних щодо відмов [28, 29, 30, 78, 80, 81]. Доступними джерелами статистики оцінок ризику відмов, наприклад судових СТС є лише база даних OREDA [82] та метод обслуговування з оцінки безпеки СТС [83, 84].

Відомі методи оцінки ризику відмов СТС (рис.1.12) відрізняються способами отримання ймовірності та збитків від відмов [85, 86, 87, 88, 89].

Оцінки ризику відмов СТС у рамках технократичної концепції виконують за допомогою методів, що підрозділяються на детерміновані, імовірнісні, експертні оцінки в умовах невизначеності, комбіновані, виконуваних за результатами діагностування ТС складних систем.

Переваги імовірнісного методу: аналізуються аварійні сценарії та наслідки відмов; враховуються взаємозалежності між обладнанням СТС щодо відмов у явному вигляді; можливість кількісного визначення впливу невизначеності на оцінки ризику; ранжування недоліків та проблем безпеки. Однак з літературних джерел [90] випливає, що моделі, які базуються на ймовірнісних підходах до оцінок ризику відмов судових СТС, використовуються обмежено, дозволяючи отримати приблизні оцінки ризику відмов без достатнього обсягу об'єктивної інформації.

Найбільш поширеними методами оцінювання показників ризику відмов є експертні методи [91]. Однак недоліки таких методів пов'язано з високою складністю відбору експертів необхідної кваліфікації та суб'єктивізмом їх оцінок.

Істотні переваги методу БМД роблять перспективним застосування для оцінок ризику відмов у СТС. У моделях оцінки ризику відмов обладнання з погляду його значущості та критичності для функціонування СТС також

застосовується технологія когнітивного імітаційного моделювання [67, 92, 93, 94, 95, 96].

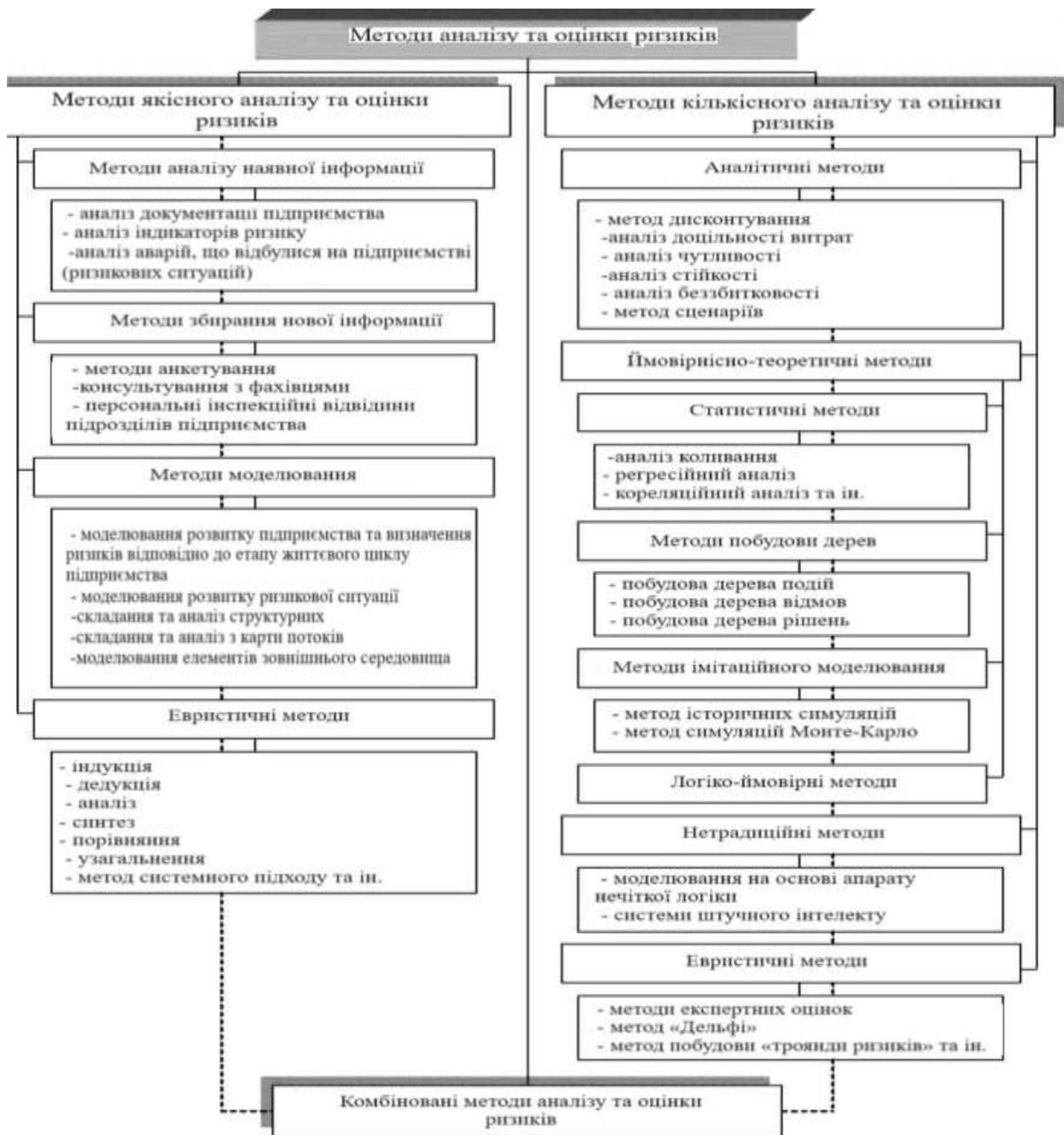


Рисунок 1.12 – Класифікація методів аналізу та оцінки ризику відмов СТС

Для побудови залежності між фактичним ресурсом та ймовірністю відмови СТС використовується метод нечітко-ймовірнісного моделювання [97, 98]. Проте наявність стандартів з апарату нечіткої логіки не вирішує проблеми числових оцінок ризику відмов СТС. Це пов'язано з тим, що у стандартах формулюються критерії без моделей, необхідних для порівняльного аналізу варіантів оцінок ризику відмов СТС.

Для ранжування оцінок ризику відмов застосовуються індекси ризику відмов, але без достовірності моделей та їх вихідних даних. Наприклад, використовується матриця оцінок наслідків та ймовірностей відмов, яка потребує експертних оцінок.

Для ранжування оцінок ризику відмов СТС рекомендується узагальнена функція бажаності Харрінгтона [99] з рівнями ризику та наслідками: 0 – 0,2 – мінімальний (мінімальні, що не впливають на експлуатацію СТС); 0,2 – 0,37 – допустимий (незначні, що дозволяють експлуатувати СТС без ремонту); 0,37 – 0,63 – максимальний (значні, експлуатація СТС можлива при виконанні ремонту); 0,63 – 1,0 – критичний (катастрофічні, експлуатувати СТС не можна).

З проведеного аналізу моделей, методів випливає, що, незважаючи на низку переваг, вони не можуть застосовуватися у вихідному вигляді як концептуальні моделі, методи для оцінок ризику відмов СТС через вузьку галузеву спрямованість.

Більшість моделей, методів ґрунтуються на припущенні роботи обладнання СТС у штатних режимах, без урахування їх часткових відмов працездатності. Однак застосуванням результатів розвитку інформаційних технологій можливе вирішення багатьох перерахованих проблем для оцінки ризику відмов СТС [1, 100, 101].

Рівень безпеки, наприклад судових СТС, багато в чому визначається якістю прогнозування ТС за результатами оцінок ризику відмов їх обладнання [102, 103, 104]. Прогнозування так само як і діагностування ТС повинно враховувати специфіку СТС, які експлуатуються при невизначених, екстремальних впливах, з нечутливістю до неповних даних про обладнання та їх взаємні зв'язки, часткові або повні відмови [25, 80, 97, 102, 105, 106].

Перелік методів прогнозування, придатних для використання залежно від рівня формалізації СТС, наведено на рис. 1.13 [107]. Прогнозування ТС може здійснюватися методами машинного навчання за заданими показниками функціонування СТС [108, 109, 110, 111, 112], але такий підхід

можна застосувати при врахуванні лише бінарного ТС. Для розрахунків залишкового терміну експлуатації СТС є перспективним метод прогнозування PHM (Prognostic Health Management) [113, 114].

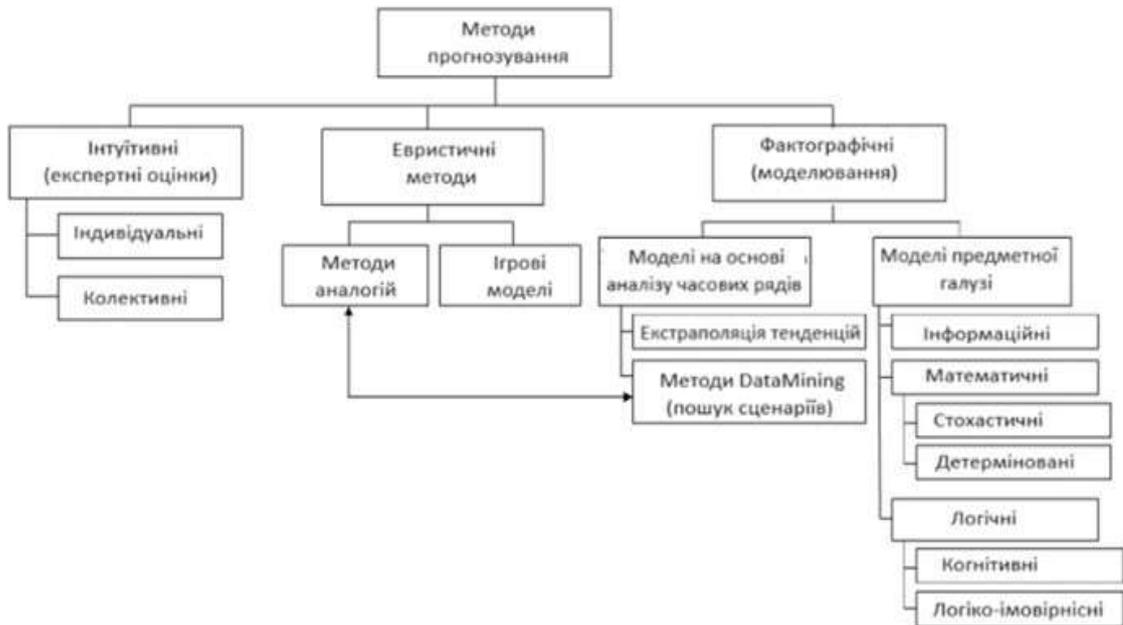


Рисунок 1.13 – Класифікація методів прогнозування

Проведений аналіз моделей та методів прогнозування показав, що зміни ТС суднових СТС є такими, що складно прогнозовані. Це обумовлено наступними причинами: недоліком якісних та кількісних експертних даних щодо надійності систем; динамічністю умов експлуатації; людським фактором [115].

Відомі моделі та методи прогнозування ТС, що спираються на детерміновані та формалізовані статистичні моделі не є універсальними. Відсутні можливості повноцінного обліку специфіки функціонування устаткування систем, особливо у умовах невизначеності впливів на СТС різних зовнішніх чи внутрішніх чинників.

Важливий недолік полягає в тому, що для суднових СТС подібні моделі та методи не рекомендовані через те, що вони не відповідають вимогам Міжнародної конвенції з охорони людського життя на морі СОЛАС-74, положенню Міжнародного кодексу з управління безпекою [116, 117].

Істотний недолік моделей та методів прогнозування ТС СТС полягає в тому, що вони не апробовані тривалим практичним використанням.

Значною перевагою для здійснення адекватного прогнозування оцінок ризику відмов СТС мають структурні моделі, що базуються на механізмах та методах штучного інтелекту [118, 119, 120]. Подібні моделі дозволяють забезпечити можливість прогнозування ризику відмов СТС з використанням механізмів ідентифікації неявних залежностей між вхідними та вихідними вибірками даних, підтримкою різних алгоритмів навчання. Це має суттєву перевагу для СТС при оцінках та прогнозуванні сценаріїв втрати працездатності, що містять сотні критеріїв та показників. Можливе вирішення проблем пов'язано також з розробкою також розробкою та розвитком комплексів проблемно-орієнтованих програм [100, 121, 122]. При цьому зростає роль методів, що базуються на сучасному ПЗ оцінки та прогнозування ТС складних систем.

Забезпечення гарантованої безпеки функціонування СТС за рахунок своєчасного та оперативного запобігання переходу штатних ситуацій у критичні, надзвичайні чи аварійні є основою стратегії управління ризиком відмов [23, 73, 123, 124]. Така стратегія ґрунтується на системному аналізі багатофакторного ризику відмов, достовірної його оцінки у різних режимах роботи СТС та прогнозуванні їх ТС протягом періоду експлуатації [28, 125].

Проведений аналіз публікацій, нормативних матеріалів за оцінками та прогнозуванням ризику відмов різних типів СТС показав, що існуюче різноманіття моделей та методів потребує зняття складних та значущих невизначеностей, підвищення точності оцінок та прогнозів. Багато моделей та методів враховують функціонування обладнання СТС у штатних режимах без урахування часткових відмов від працездатності та засновані на інженерних, експертних і інших підходах зі складними та дорогими розрахунками, що обмежує широке застосування та має вузьку спрямованість моделей, методів.

Таким чином, з метою забезпечення ефективності експлуатації СТС актуальними залишаються задачі розвитку та розробки нових моделей, методів та їх алгоритмів, реалізованих у вигляді комплексів проблемно-орієнтованих програм оцінок та прогнозування ТС систем.

1.3 Порівняльний аналіз інформаційних інтелектуальних систем для діагностики, оцінювання та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування

Традиційно під інформаційними інтелектуальними системами розуміють інтерактивні комп'ютерні системи, що допомагають особі, яка приймає рішення, використовувати інформацію, комплекс математичних та евристичних моделей та методів для розв'язку слабо структурованих або важко формалізованих задач [126, 127, 128, 129, 130, 131]. Ефективність функціонування ІС (Додаток В) впливає на ефективність експлуатації СТС за весь період їх життєвого циклу.

ІС об'єднано загальною методикою формування альтернатив управлінських рішень у СТС, визначення наслідків їх реалізації та обґрунтування вибору прийнятного управлінського рішення [132, 133]. До складу ІС входять: джерела та модель даних, база моделей та програмна підсистема, що складається з систем управління БД (СУБД), базою моделей (СУБМ) та інтерфейсом користувача (рис.1.14). Основні задачі, які вирішуються в ІС [128, 129] - введення, зберігання та аналіз даних.

Головний функціонал ІС:

- збирання необхідної інформації з різних джерел даних;
- перетворення інформації, що збирається, в єдиний формат даних;
- формування запитів до сховища даних, їх обробка, пошук інформації, формування та надання інформації у зручному для аналізу та прийняття рішень.



документами (Document-Driven DSS); знаннями (Knowledge-Driven DSS); моделями (Model-Driven DSS). Класифікація з архітектури може бути такою: функціональні; незалежні вітрини даних; дворівневі та тривірневі сховища даних. Залежно від виду даних, з якими ці системи працюють, ІС умовно можна поділити на оперативні та стратегічні. OLAP та Data Mining – дві складові частини процесу підтримки прийняття рішень. Виконання операцій над даними здійснюється OLAP - машиною, що реалізує концепцію оперативної аналітичної обробки. За способом зберігання даних розрізняють MOLAP, ROLAP та HOLAP. За місцем розміщення OLAP - машини розрізняються OLAP - клієнти та OLAP - сервери. OLAP - клієнт робить побудову багатовимірного куба за вихідними даними (для отримання потрібних розрізів – звітів) та обчислення на клієнтському ПК, а OLAP - сервер отримує запит, обчислює та зберігає агрегатні дані на сервері, видаючи результати. Куби та іншу аналітичну звітність необхідно налаштовувати [135]. Класифікація ІС також здійснюється за рівнями (початковий, середній, вищий) та за рівнем розподільності (зосереджені, розподілені) [136].

Для аналізу та вироблення пропозицій у ІС використовуються різні методи (табл. 1.1 [137]): інформаційний пошук; інтелектуальний аналіз даних; пошук знань у БД; міркування з урахуванням прецедентів; імітаційне моделювання; еволюційні обчислення та генетичні алгоритми; нейронні мережі; ситуаційний аналіз; когнітивне моделювання та ін. Застосування штучного інтелекту в ІС дозволить розширити функціональні можливості системи, підвищити ефективність експлуатації та надійність СТС.

Однією з найважливіших функцій програмного забезпечення ІС є оцінки можливих результатів прийнятих рішень та прогнозування ТС СТС [138, 139, 140]. Вибір застосовуваного конкретної ІС методу прогнозування залишається за розробником системи. Найчастіше у складі ПЗ використовуються фактографічні методи як найменш залежні від суб'єктивних факторів. В умовах слабкоформалізованих вихідних даних

використовуються експертні методи, але з обмеженнями, пов'язаними з наявністю достатньої кількості експертів.

Таблиця 1.1 - Методи та моделі ІС

Методи організації ІС	Модель представлення даних та знань	Розв'язувані завдання
Формування рішень з урахуванням сховищ даних.	Моделі оперативної аналітичної обробки даних (OLAP)	Організація середовища для нагромадження даних. Збір даних, їх об'єднання та перетворення. Інтелектуальний аналіз даних.
Формування рішень в експертній системі на основі правил.	Продукційні моделі Логічні моделі Семантичні мережі Фрейми	Пошук рішень на базі правил. Пояснення рішень. Навчання бази знань новим правилам.
Формування рішень з урахуванням прецедентів (CBR-системи)	Штучні нейронні мережі Прецеденти проблемних ситуацій	Накопичення прецедентів. Пошук рішень у базі прецедентів. Адаптація рішень до нової проблемної ситуації. Формування класів понять, що розглядається у предметній області.
Формування рішень на основі онтологій	Семантичні мережі, що описують поняття в предметній галузі, що розглядається, і відносини між поняттями	Формування відносин між поняттями. Розробка логічної моделі онтології.

Як впливає з [28, 80], при функціонуванні СТС несприятливі вражаючі впливи і фактори (НВ і НФ) можуть виводити з ладу окремі підсистеми, компоненти, а також впливати на працездатність систем. НВ і НФ, зазвичай, носять складнопрогнозований чи непрогнозований характер (наприклад, помилки персоналу, стихійні лиха тощо). Їх вплив може мати різні за рівнем тяжкості наслідки - до повного руйнації СТС [141].

Розробка ІС для управління ризиком відмов обладнання з метою забезпечення живучості суднових СТС при НВ та НФ є перспективним напрямом у забезпеченні безпеки СТС [124]. Такі ІС можуть бути реалізовані як у вигляді окремих stand-alone рішень, так і у вигляді модулів, що доповнюють необхідним функціоналом готові системи управління та прийняття рішень загального призначення. Вони дозволяють оперативно приймати рішення на етапі усунення наслідків НВ та НФ, забезпечувати

надійність СТС, завдяки можливості ідентифікації, аналізу та оцінювання існуючих ризиків відмов обладнання СТС [107, 124, 141].

Отже, більшість ІС розробляється на вирішення конкретної задачі чи загального класу задач, а також орієнтуючись на різні типи користувачів. Розробка ІС для управління ризиком відмов з метою забезпечення живучості СТС в умовах неповноти та невизначеності інформації, що надходить за наявності непередбачуваних НВ та НФ є одним з перспективних напрямків щодо ефективної та надійної експлуатації підсистем, компонентів, елементів та СТС в цілому.

Основною концепцією ІС є вирішення класичних проблем, що виникають у сфері неструктурованих та погано формалізованих СТС [142, 143]. Ці проблеми включають у себе неможливість здобуття повної та об'єктивної інформації для прийняття раціональних рішень, а також потребу у використанні суб'єктивної та евристичної інформації. Додатковими викликами є наявність невизначеностей у вихідних даних та навіть неоднозначність у процесі пошуку оптимального рішення. Крім того, рішення у таких випадках має взаємодіювати з користувачем у формі діалогу або інших форм комунікації між людиною та машинною системою.

З огляду на зазначені фактори, виникає необхідність відмовитися від традиційних алгоритмічних методів та моделей управління і прийняття рішень. Замість цього, необхідно переходити до використання технологій інтелектуальних систем [144].

Теоретичним обґрунтуванням та впровадженням інформаційних технологій на основі штучного інтелекту при проектуванні, моделюванні та вирішенні практичних задач в ІС займалися вчені: В.М. Глушков, О.М. Колмогоров, Н.Я. Вінер, У.Р. Ешбі, Ф. Уоссерманн, С. Хайкін, Ф. Розенблатт, Т. Кохонен, Г.С. Теслер, Н.Г., В.П. Беспалько, В.В. Давидов, М.М. Поташник, Г.В. Скок та ін [145, 146, 147, 148, 149, 150, 151, 152, 153].

ІС повинні реалізувати схему: оцінка – прогноз – рішення – дія. ІС забезпечує ОПР аналізом розв'язуваної проблеми. Основними функціями ІС

є оцінка, прогнозування подій, самонавчання та адаптація, робота з БЗ (включаючи формування, структурування, зберігання, а також зміст БД), формування рішень та їх виконання.

Відомі такі методи, що імплементуються в ПС [144, 154, 155, 156, 157, 158]:

- аналогій та системні;
- евристичні для задач оптимізації (генетичний алгоритм, штучні імунні мережі, метод відпалу, методи роєвого інтелекту, у тому числі мурашині алгоритми);
- міркування на основі прецедентів (найближчого сусіда, вилучення прецедентів на основі дерев рішень, прецедентів на основі знань, з урахуванням застосування прецеденту);
- структурного відображення на базі прецедентів за OWL онтологіями.

ПС часто створюються на основі поєднання систем штучного інтелекту з використанням знань та технологій експертних систем, машинного навчання, агентів [154, 159, 160]. Для автоматизації процесу оцінки ризику та передбачення можливих відмов широко використовується машинне навчання (аналіз великих обсягів даних, виявлення патернів та трендів, моделювання та симуляція систем). Однак, використання великого обсягу даних пов'язане з обмеженнями при оцінках ризику відмов, можливими помилками, що призводять до невірних прогнозів.

Відомий метод структурного відображення має переваги: можливість формалізації характеру багатозв'язних ієрархічних взаємодій між обладнанням СТС, що функціонує у стохастичних умовах; гнучкість імплементації продукційного підходу до формування БЗ у ПС; зручність програмної реалізації з урахуванням об'єктно-орієнтованого підходу. Більшість моделей, які дають змогу отримати нові знання на основі існуючих, можна звести до продукційних моделей. Недоліком таких моделей є неглибоке відображення проблемної області, що позначається на гнучкості формування запитів діалогу користувача з експертною системою [154].

Для моделювання взаємозв'язків між різними факторами та їх невизначеностями можна використовувати БМД для ІС у СТС з численним обладнанням, надаючи структуровану основу для оцінки ризику відмов при невизначеності та допомагати ОПР розставляти пріоритети у прийнятих рішеннях [48, 58].

У ІС для оцінки, прогнозування ТС СТС з метою узагальнення та застосування накопиченого досвіду можуть використовуватися методи міркування на основі прецедентів [161, 162, 163]. При експлуатації СТС, пов'язаних з невизначеністю, використання прецедентного підходу спрощує процес прийняття рішень. Переваги методу: здатність до навчання на основі досвіду; універсальність; вміння працювати з неповними чи неструктурованими даними; гнучкість у адаптації до нових ситуацій.

Етапи Case-based Reasoning (CBR) - циклу методу (рис.1.15):

1. Захоплення прецедентів із бібліотеки прецедентів (БП).
2. Індексція (для швидкого пошуку подібних випадків).
3. Пошук найбільш підходячих прецедентів для нової задачі.
4. Перегляд та адаптація (модифікація під поточну задачу).
5. Оцінка на придатність, збереження та впровадження.

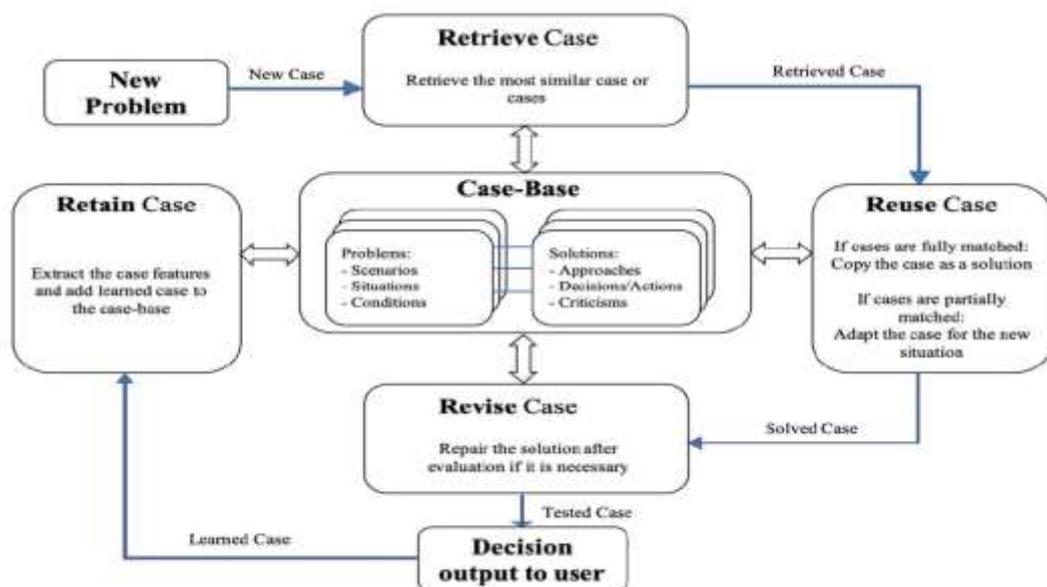


Рисунок 1.15 - Case-based Reasoning цикл [162]

Класична архітектура ІС (рис.1.16):

- забезпечує проведення обґрунтування альтернатив на основі моделей та методів з використанням експертних оцінок фахівців;
- включає методи прийняття рішень за умов невизначеності з моделюванням проблемних ситуацій прийняття рішень;
- містить БЗ – набір правил вибору відповідних моделей та методів прийняття рішень для обґрунтування альтернатив залежно від конкретної реалізації елементів поставленого завдання;
- містить БД для зберігання інформації;
- здійснює багатовимірний аналіз завдань і формування аналітичних звітів з використанням OLAP-сервера.

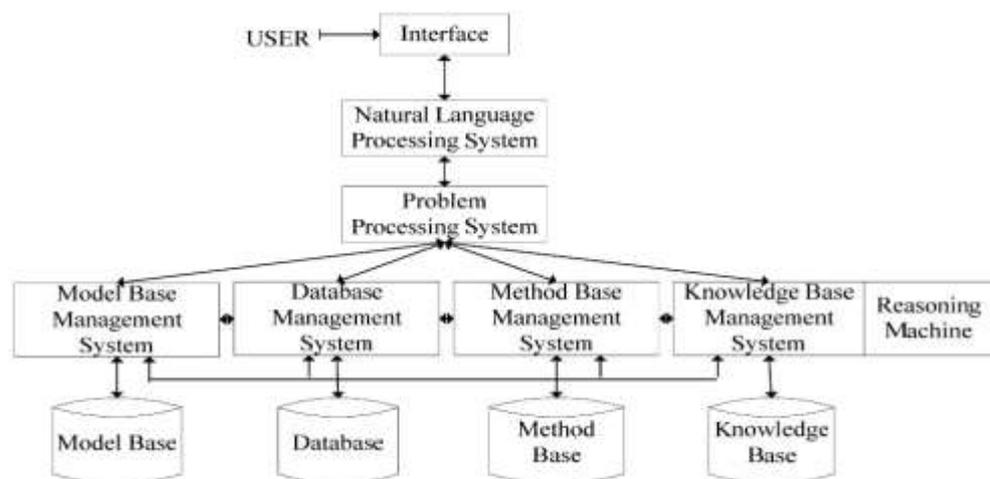


Рисунок 1.16 - Архітектура ІС

Використання при прийнятті рішень проблемно-орієнтованих БЗ у вигляді моделей знань забезпечує створення умов для виявлення нових евристичних знань при невизначеності [164, 165] (рис.1.17).

В даний час для підвищення ефективності експлуатації СТС продовжуються впровадження технологій ІІІ. Так, відповідно до вимог Регістру Морського судноплавства, всі судна повинні оснащуватися системами на основі технології ІІІ [25, 102]. Для цього необхідні

алгоритмічні та програмні засоби, що забезпечують оцінку та прогнозування ТС систем, адекватних поставленій меті [1, 166, 167].

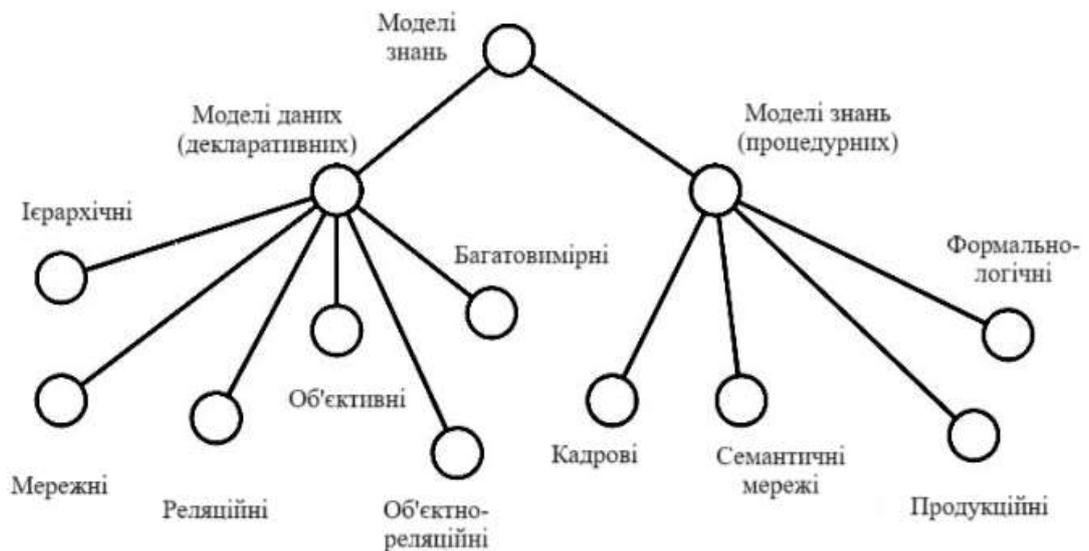


Рисунок 1.17 – Схема моделі представлення знань

Прикладом використання ІС є метод РНМ, що охоплює повний процес від збору даних до використання результатів прийняття рішень. Інформація про стан ТС, що одержується в реальному часі, використовується для оцінки ТС ІС. Для моделювання ТС можуть використовуватися: аналіз дерева несправностей; аналіз деревини подій; байєсовські мережі довіри. Як інструмент оцінок ризику відмов ТС перевагу віддано БМД.

Серед програмних комплексів, що вирішують завдання прийняття рішень, використовується Crystal Info (Seagate Info) – ІС, заснована на гнучкій технології доступу до даних та їх обробки. Технологія Open OLAP дозволяє інтегрувати багатовимірні OLAP - дані з різнорідних джерел ((Crystal Info, Crystal Holos, Hyperion Essbase, OLE DB for OLAP providers (Microsoft SQL Server OLAP Services and Applix TM 1, IBM DB 2 OLAP Services и Informix MetaCube). Всі OLAP-джерела можуть бути представлені в рамках єдиного інтерфейсу.

Протягом багатьох років дослідники ведуть роботи зі створення ІС різного призначення, проте існують проблеми, з погляду ефективності, формалізації знань у СТС, які потребують вирішення [168]:

- підвищення об'єктивності та достовірності прийнятих рішень за наявності невизначеностей у завданнях оцінок, прогнозування ризику відмов;
- облік факторів неповноти, неоднозначності та суперечливості вихідної інформації (даних та знань) та правил;
- забезпечення подання та обробки різнотипних знань, даних та моделей, розвиток відповідних БД, БЗ та моделей;
- збирання, зберігання та накопичення декларативної, експертної інформації про проблемну галузь у БД та БЗ, бібліотеки прецедентів;
- підвищення точності оцінок ТС СТС на основі нових моделей, методів, алгоритмів, ПЗ інваріантних до предметної галузі для оцінок, прогнозування ризику відмов з метою виявлення на ранній стадії розвитку ознак передвідмовного стану обладнання;
- застосування адекватних і технічно здійснених формальних моделей для вирішення поставлених задач з урахуванням структурних, функціональних, інформаційних та предметних особливостей СТС.

Для успішного вирішення проблеми ефективної, безаварійної експлуатації СТС у позаштатних режимах роботи необхідно використовувати інформаційні технології з програмними та апаратними модулями для прийому та передачі результатів діагностування, оцінки та прогнозування ТС складних систем [1, 169, 170]. Якість роботи системи прийому та передачі даних (СППД) визначається сукупністю множини характеристик, що впливають на ефективність її роботи: топологія; пропускна здатність; швидкодія; допустима величина похибки передачі-приймання даних; ефективність захисту інформації у системі, ризик відмов пристроїв СППД.

З проведеного аналізу літературних джерел випливає, що для забезпечення ефективної експлуатації СТС ІС має забезпечувати реалізацію наступної схеми: оцінка – прогноз – рішення – дія, на основі використання

результатів діагностики ТС підсистем, компонентів, елементів та їх взаємних зв'язків СТС. Необхідне використання результатів реалізації структурної схеми наведеної на рис. 1.18.



Рисунок 1.18 - Структурна схема діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ

Таким чином, вирішення задач ефективної та надійної експлуатації СТС критичного застосування потребує вдосконалення та розробки нових моделей, методів та алгоритмів, комплексів проблемно-орієнтованих програм. Вони мають бути спрямовані на виявлення передвідмовного та відмовного ТС обладнання систем, на вирішення задач оцінки, прогнозування ризику відмов систем за наявності невизначеностей, в умовах відносної нечутливості до неповних даних з обладнання з урахуванням їх часткових та повних відмов від працездатності. Інформатизація оцінки та прогнозування ТС має базуватися на методах штучного інтелекту. Інтелектуалізація оцінювання та прогнозування ТС систем із міркуваннями на основі прецедентів за діагностичними ознаками залишається необхідним напрямом розвитку сучасних технологій, що дозволяє забезпечити ефективність експлуатації СТС на різних етапах їх життєвого циклу та є актуальною задачею.

#### 1.4 Висновки до першого розділу

У першому розділі дисертаційної роботи проведено аналіз моделей, методів та інформаційних систем діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ.

Проведений аналіз існуючих моделей, методів та інформаційних систем діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ показав, що відомі структурні моделі та методи діагностики, оцінки і прогнозування ТС складних систем враховують лише повні відмови працездатності, але не враховують часткові, мають обмеження (зростання алгоритмічної та обчислювальної складності, необхідність складної попередньої обробки різноманітних даних), що знижує при їх застосуванні ефективність експлуатації СТС КЗ.

Перспективними методами моделювання при діагностуванні ТС є байєсовські мережі довіри (БМД), що використовуються з урахуванням невизначеностей, стохастичності характеру робочих процесів та неповних даних СТС, а також методи когнітивного імітаційного моделювання, що дозволяють оцінювати структурні та функціональні вразливості обладнання систем. В ПС перспективними методами оцінки та прогнозування ТС складних систем є методи міркування на основі прецедентів.

Тобто виникає актуальна науково-практична задача щодо підвищення ефективності експлуатації СТС застосуванням інтелектуалізації діагностування, оцінювання та прогнозування ТС складних систем за наявності невизначеностей, в умовах відносної нечутливості до неповних даних з обладнання з урахуванням повних та часткових відмов їх обладнання від працездатності.

Сформульовано мету та задачі дослідження:

Метою дослідження є підвищення ефективності експлуатації СТС критичного застосування за рахунок моделей та методів діагностики, оцінки

та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування.

Для досягнення поставленої мети необхідно вирішення наступних задач:

1. Проаналізувати моделі, методи та інформаційні системи діагностики, оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування.

2. Розробити стохастичні моделі та метод діагностики технічного стану складних систем критичного застосування.

3. Провести дослідження та аналіз стохастичних моделей та методу діагностики технічного стану складних систем критичного застосування.

4. Розробити метод оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування.

5. Розробити інформаційну інтелектуальну систему діагностики, оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування.

## РОЗДІЛ 2

### РОЗРОБКА СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДУ ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

2.1 Розробка стохастичної структурної моделі та методу діагностики технічного стану складних систем критичного застосування

2.1.1 Постановка задачі розробки стохастичної структурної моделі та методу діагностики технічного стану складних систем критичного застосування

Ефективність експлуатації суднових СТС КЗ може оцінюватися за надійністю у вигляді ризику відмов їх обладнання. При цьому оцінка ризику відмов обладнання має враховувати структуру СТС (ієрархію та топологію), функціональні стани (часткову або повну відмову від працездатності), а також неповноту даних систем. Експлуатація СТС пов'язана з невизначеностями (неповна інформація щодо зовнішніх і внутрішніх факторів, що впливають на системи та їх ТС; невизначеність у поведінці систем). Виходячи цього, і як було зазначено в п.1.2, моделі та методи діагностики ТС складних систем відносяться до стохастичних і мають концептуальний характер. Як випливає з проведеного аналізу у п.1.2.1 найбільш перспективним для діагностування ТС складних систем є інтелектуальний метод БМД, що спрощує та прискорює розробку відповідних моделей. Під час розробки моделі діагностики ТС суднових складних систем КЗ прийнято: ієрархічна її структура; взаємодія між обладнанням моделюється за допомогою GeNIeRate [61]. Це дозволяє на підставі агрегованої інформації про обладнання отримувати інформацію про систему в цілому. Для цього виділяються варіанти статусу об'єкта з погляду ризику відмов обладнання відповідно до узагальненої функції бажаності

Харрінгтона. Для опису категорій збитків від відмов може використовуватися вербальна форма, що дозволяє зіставляти числові оцінки різним класам збитків на основі шкали Харрінгтона, в якій критичний збиток позначений як  $D_{crit}$ :  $0,1 \cdot D_{crit}$  - шкода незначна;  $0,29 \cdot D_{crit}$  - шкода малозначна;  $0,51 \cdot D_{crit}$  - шкода середньозначна;  $0,72 \cdot D_{crit}$  - шкода значна;  $1,0 \cdot D_{crit}$  - збитки критичні.

Таким чином, з метою ефективної експлуатації обладнання СТС КЗ, що знаходиться в різних станах відмови працездатності, концептуальні стохастичні моделі діагностики ТС, що розробляються, повинні мати нечутливість до неповних даних, пов'язувати види ТС складних систем та їх діагностичні ознаки у вигляді ризику відмов. Результати, отримані за допомогою діагностичних моделей, мають забезпечити інтелектуалізацію оцінювання та прогнозування ТС складних систем.

### 2.1.2 Розробка стохастичної структурної моделі та методу діагностики технічного стану складних систем критичного застосування

В основу розробки концептуальної стохастичної моделі та методу інтелектуалізації діагностування ТС у вигляді динамічної БМД покладено використання діагностичних ознак СТС, а також модель опису інтелектуалізації діагностики ризику відмов: підсистем (S); компонентів (C); елементів (E); міжсистемних ( $I_S$ ), міжкомпонентних зв'язків ( $I_C$ ), міжелементних зв'язків ( $I_E$ ). Містить множини функціональних елементів і зв'язків складних систем за діагностичними ознаками.

Запропонована концептуальна стохастична модель діагностики ТС судових складних систем в графовому ймовірнісному поданні виглядає так:

$$CCM = \langle G, \{x_i\}, F, Q, \{FE\}, \{FC\}, \{R_{FE}\}, \{R_{FC}\}, L \rangle, \quad (2.1)$$

де  $G$  - циклічний спрямований граф ( $G = \langle V, T, E \rangle$ ),  $V = \{v_i\}$  - множини вершин орграфа;  $T$  - час;  $E = \{e_{ij}\}$  - множини ребер, що з'єднують вершини

орграфа,  $i$  - порядковий номер вершини графа,  $i=1,2,\dots,k$ ,  $ij$  - порядковий номер вхідної та вихідної функціонального зв'язку);

$X = \{x_i\}$  - множини параметрів вершин орграфа;

$F = f\{v_i, e_{ij}\}$  - функція зв'язку між вершинами орграфа;

$Q$  - область параметрів вершин орграфа;

$FE, FC$  - функціональне обладнання (підсистеми, компоненти, елементи) та зв'язки, що входять до структури СТС;

$\{R_{FE}\}, \{R_{FC}\}$  - множини діагностичних оцінок ризику відмов FE та FC;

$L$  - відображення зв'язків між множинами  $\{FE\}, \{FC\}, \{R_{FE}\}, \{R_{FC}\}$ , виходячи з дерева відмов діагностичної моделі СТС

Множини FE СТС з урахуванням ієрархічних рівнів визначається:

$$\{FE\} = \{v_{n_{fe}}^{<m_{fe}>} \mid i = \overline{1, I_{FE}}; m_{fe} = \overline{1, M_{FE}}\}, \quad (2.2)$$

де  $v_{n_{fe}}^{<m_{fe}>}$  - ТС кожного FE;

$i$  - номер FE;

$m_{fe}$  - номер ієрархічного рівня FE;

$I_{FE}$  - число FE;

$M_{FE}$  - кількість ієрархічних рівнів FE

Технічний стан кожного FE СТС визначається:

$$v_i^{<m_{fe}>} = \{W_{v_{FE}}^0, W_{v_{FE}}^f, a_{v_{in_{FE}i}}, a_{v_{on_{FE}j}}\}, \quad (2.3)$$

де  $W_{v_{FE}}^0, W_{v_{FE}}^f$  - повна та часткова працездатність FE;

$a_{v_{in_{FE}i}}, a_{v_{on_{FE}j}}$  - ТС вхідної та вихідної FC у FE;

$i$  - номер FE;

$m_{fe}$  - номер ієрархічного рівня FE;

$in, on$  - порядковий номер вхідної та вихідної FC у FE

Часткова працездатність FE при різних ступенях її втрати:

$$W_{v_{FE}}^f = \{W_f^{<i,m_{fe}>} \mid f = \overline{0,1}; i = \overline{1, I_{FE}}; m_{fe} = \overline{1, M_{FE}}\}, \quad (2.4)$$

У (2.4)  $f=0$  – справний стан СТС,  $f=1$  – повна відмова СТС.

Множини FC СТС визначається:

$$\{FC\} = \{\omega_{FC}^{<a,b,z,s>} \mid a = \overline{1, A}; b = \overline{1, B}; z = \overline{1, Z}; s = \overline{1, S}\}, \quad (2.5)$$

де  $\omega_{FC}^{<a,b,z,s>}$  - стан кожної FC;

$a$  – номер міжкомпонентного зв'язку;

$z$  – номер міжсистемного зв'язку;

$b$  – номер ієрархічного рівня міжкомпонентного зв'язку;

$s$  – номер ієрархічного рівня міжсистемного зв'язку;

$A$  - число міжкомпонентних зв'язків;

$Z$  – число міжсистемних зв'язків;

$B$  – кількість ієрархічних рівнів міжкомпонентних зв'язків;

$S$  – число ієрархічних рівнів міжсистемних зв'язків

Стан кожного міжкомпонентного та міжсистемного зв'язку:

$$\omega_{FC}^{<a,b,z,s>} = \{W_{\omega_{FC_{a(b),z(s)}}}^0; W_{\omega_{FC_{a(b),z(s)}}}^f; U_i^{<m_{fe}>}\}, \quad (2.6)$$

де  $W_{\omega_{FC_{a(b),z(s)}}}^0$ ,  $W_{\omega_{FC_{a(b),z(s)}}}^f$  - повна та часткова працездатність FC

Працездатність FC при різних ступенях її втрати:

$$W_{\omega_{FC_{a(b),z(s)}}}^f = \{W_f^{<a(b),z(s)>} \mid f = \overline{0,1}; a = \overline{1, A}; b = \overline{1, B}; z = \overline{1, Z}; s = \overline{1, S}\} \quad (2.7)$$

Множини діагностичних оцінок ризику відмов FE та FC СТС:

$$R\{R_{FE}, R_{FC}\}, \quad (2.8)$$

$$R_{FE} = \{r_{fe_{n(m)}} \mid fe = \overline{1, FE}, n_{fe} = \overline{1, N_{FE}}, m_{fe} = \overline{1, M_{FE}}\},$$

$$R_{FC} = \{r_{fc_{a(b),z(s)}} \mid i_{fc} = \overline{1, FC}, a = \overline{1, A}, b = \overline{1, B}, z = \overline{1, Z}, s = \overline{1, S}\},$$

де  $r_{fe_{n(m)}}$ ,  $r_{fc_{a(b),z(s)}}$  - ризик відмов кожного FE та FC СТС

Узагальнена модель визначення ризику відмов FE та FC:

$$KR = \langle P_{FE_{n(m)}}, P_{FC_{a(b),z(q)}}, D_{FE_{n(m)}}, D_{FC_{a(b),z(q)}}, e_{FE_{n(m)}}, e_{FC_{a(b),z(q)}} \rangle, \quad (2.9)$$

де  $P_{FE_{n(m)}}, P_{FC_{a(b),z(q)}}$  - відповідно умовні ймовірності відмов FE та FC;

$D_{FE_{n(m)}}, D_{FC_{a(b),z(q)}}$  - відповідно збитки від відмов FE і FC;

$e_{FE_{n(m)}}, e_{FC_{a(b),z(q)}}$  - відповідно вага FE та FC з урахуванням ієрархії в СТС

Ризик відмов  $n(m)$  - ої FE СТС:

$$R_{FE_{n(m)}} = D_{FE_{n(m)}} \cdot P_{FE_{n(m)}}(t) \quad (2.10)$$

Ризик відмов  $a(b), z(q)$  - ої FC СТС:

$$R_{FC_{a(b),z(q)}} = D_{FC_{a(b),z(q)}} \cdot P_{FC_{a(b),z(q)}}(t) \quad (2.11)$$

Сумарна оцінка ризику відмов СТС з урахуванням оцінки ризику відмов FE та FC визначається:

$$R = \sum_{k=1}^{FE} \sum_{n(m)=1}^{N(M)} (R_{fe_{n(m)}} \cdot e_{fe_{n(m)}}) + \sum_{fc=1}^{FC} \sum_{a(b),z(q)=1}^{A(B),Z(Q)} (R_{fc_{a(b),z(q)}} \cdot e_{fc_{a(b),z(q)}}) \quad (2.12)$$

Ймовірність відмови FE та FC визначається за формулами:

$$P_{FE_{n(m)}} \cdot \lambda(t)_{FE_{n(m)}} = \frac{\alpha_{FE_{n(m)}} \cdot \exp(-\alpha_{FE_{n(m)}} \cdot T_{FE_{n(m)}})}{\exp(-\alpha_{FE_{n(m)}} \cdot T_{FE_{n(m)}})} = \alpha_{FE_{n(m)}}, \quad (2.13)$$

$$P_{FC_{a(b),z(q)}} \cdot \lambda(t)_{FC_{a(b),z(q)}} = \frac{\alpha_{FC_{a(b),z(q)}} \cdot \exp(-\alpha_{FC_{a(b),z(q)}} \cdot T_{FC_{a(b),z(q)}})}{\exp(-\alpha_{FC_{a(b),z(q)}} \cdot T_{FC_{a(b),z(q)}})} = \alpha_{FC_{a(b),z(q)}} \quad (2.14)$$

де  $\lambda$  - інтенсивність відмов;

$\alpha$  – параметр розподілу, що приймається за результатами випробувань рівним  $\alpha \approx 1/\widehat{T}_o$ ,  $\widehat{T}_o$  – оцінка середнього напрацювання до відмови.

Кількісна оцінка збитків FE від відмови  $n(m)$  - ої підсистеми (компонента, елемента) для визначення ризику відмови:

$$D_{FE_{n(m)}} = \{d_{fe_{n(m)}} \mid fe = \overline{1, FE}, n = \overline{1, N}, m = \overline{1, M}\}, \quad (2.15)$$

де  $d_{FE_{n(m)}}$  - збитки від відмови підсистеми (компонента) СТС

Кількісна оцінка збитків FC від відмови  $a(b), z(q)$  - ої міжсистемного (міжкомпонентного) зв'язку:

$$D_{FC_{a(b),z(q)}} = \{d_{fc_{a(b),z(q)}} \mid fc = \overline{1, FC}, a = \overline{1, A}, b = \overline{1, B}, z = \overline{1, Z}, q = \overline{1, Q}\}, \quad (2.16)$$

де  $d_{fc_{a(b),z(q)}}$  - збитки від відмови міжсистемного (міжкомпонентного) зв'язку

Для опису категорії збитків від відмов міжсистемних (міжкомпонентних) зв'язків використовується вербальна форма.

За встановленими умовними ймовірностями відмов та збитків від відмов FE і FC (2.10), (2.11) визначається їх ризик відмов. Прийняті припущення та обмеження при моделюванні - FE та FC СТС мають рівень ризику відмови, що розподіляється за функцією бажаності Харрінгтона.

Модель інтелектуалізації оцінювання ТС складних систем за діагностичними ознаками за допомогою апарату БМД є результатом синтезу моделей надійності та діагностування. У моделі діагностики ТС БМД використовується для оцінки ризику відмови (ймовірності) виникнення відмови в системі. Для створення діагностичної моделі ТС необхідно визначити ризик відмови (умовну ймовірність) для кожного вузла в мережі. Ці дані отримані з експертних знань та аналізу історичних даних. Після визначення ризику відмови (умовних ймовірностей) модель може бути використана для оцінки та прогнозування ТС. Для цього в моделі визначається ризик відмови для кожного стану системи, використовуючи інформацію про ТС системи та ризик відмов для кожного вузла в мережі.

Розробка стохастичної моделі діагностики ТС складних систем, яка одночасно враховує наявність обладнання, їх взаємні зв'язки та ризик часткової або повної відмови працездатності дозволило запропонувати метод діагностики ТС на основі БМД для складних систем КЗ.

Розробка методу діагностики ТС складних систем КЗ на основі БМД містить етапи:

1. Побудова БМД на основі стохастичної моделі діагностики ТС складних систем.

2. Ініціалізація моделі - вилучення даних ризику відмов обладнання та їх взаємних зв'язків з бази OREDA.

3. Проведення дослідження моделюванням аварійних ситуацій.

4. Виявлення та візуалізація структурних, функціональних вразливостей обладнання. Аналіз результатів моделювання.

5. Передача даних діагностики технічного стану складної системи критичного застосування в інформаційну інтелектуальну систему оцінки та прогнозування ТС складної системи.

Побудова БМД на основі стохастичної моделі діагностики ТС складних систем містить наступні етапи.

1. Побудова БМД:

1.1. Створюються вершини та міжсистемні (міжкомпонентні) БМД, що позначають підсистеми (компоненти) СТС з урахуванням ТС:

1.1.1. Кожна підсистема (компонент, елемент) може знаходитись у наступному технічному стані:

$Work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>}$  - працездатний стан  $n_{fe}$ - ої підсистеми (компонента, елемента)  $m_{fe}$ - го рівня;

$Not\_work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>}$  - відмова часткова (повна)  $n_{fe}$  - ої підсистеми (компонента, елемента)  $m_{fe}$  - го рівня.

1.1.2. Кожен міжсистемний (міжкомпонентний) зв'язок перебуває у станах:

$Work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>}$  - працездатний стан  $a(z)_{fc}$  - го міжсистемного (міжкомпонентного) зв'язку  $b(q)$  рівня;

$Not\_work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>}$  - відмова часткова (повна)  $a(z)_{fc}$  - го міжсистемного (міжкомпонентного) зв'язку  $b(q)$  рівня

1.2. Вказуються зв'язки між вершинами БМД, що позначають підсистеми (компоненти, елементи), міжсистемні (міжкомпонентні) зв'язки СТС та діагностичні значення  $R$ .

2. Вказуються параметри БМД:

2.1. Ризик відмов у початковий момент часу для FE та FC СТС, вважаючи, що перед початком роботи СТС усі вони працездатні:

$$R(Work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>})_{t=0} = F(P(Work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>})_{t=0}) = 0; \quad (2.17)$$

$$R(Work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>})_{t=0} = F(P(Work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>})_{t=0}) = 0$$

2.2. Ризик відмов у початковий момент часу для FE та FC СТС, вважаючи, що перед початком роботи СТС всі вони непрацездатні:

$$R(Not\_work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>})_{t=0} = F(P(Not\_work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>})_{t=0}) = 1; \quad (2.18)$$

$$R(Not\_work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>})_{t=0} = F(P(Not\_work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>})_{t=0}) = 1$$

2.3. Ризик відмови FE та FC СТС у поточний момент часу за умови, що деякі FE та FC відмовили у попередній момент часу:

$$R((Not\_work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>})_t / (Not\_work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>})_{t-1}) = 1; \quad (2.19)$$

$$R((Not\_work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>})_t / (Not\_work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>})_{t-1}) = 1$$

2.4. Ризик відмови FE та FC СТС у поточний момент часу за умови їх знаходження у працездатному стані та у поточний момент часу за умови працездатності та у попередній момент часу:

$$R((Work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>})_t / (Work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>})_{t-1}) = \frac{e^{-\lambda_{n_{fe}}^{<m_{fe}>} t}}{e^{-\lambda_{n_{fe}}^{<m_{fe}>} (t-1)}} = e^{-\lambda_{n_{fe}}^{<m_{fe}>}} = 0; \quad (2.20)$$

$$R((Work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>})_t / (Work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>})_{t-1}) = \frac{e^{-\lambda_{a(z)_{fc}}^{<b,q>} t}}{e^{-\lambda_{a(z)_{fc}}^{<b,q>} (t-1)}} = e^{-\lambda_{a(z)_{fc}}^{<b,q>}} = 0$$

2.5. Ризик відмови FE та FC СТС у поточний момент часу за умови відмови FE та FC у поточний момент часу та за умови працездатності у попередній момент часу:

$$R((Not\_work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>})_t / (Work_{n_{fe}}^{<m_{fe}>})_{t-1}) = (1 - e^{-\lambda_{n_{fe}}^{<m_{fe}>}}) \cdot D_{FE}; \quad (2.21)$$

$$R((Not\_work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>})_t / (Work_{a(z)_{fc}}^{<b,q>})_{t-1}) = (1 - e^{-\lambda_{a(z)_{fc}}^{<b,q>}}) \cdot D_{FC_{a(z)}}$$

При побудові моделі та методу інтелектуалізації для діагностики ТС складних систем, таких як СЕУ, на основі БМД, вихідними даними є:

1. Схема та принцип роботи СЕУ, яка деталізує структуру системи та її функціональні можливості.

2. Імовірності відмов FE та FC, що дозволяють формалізувати варіації сценаріїв, у яких конкретний елемент або система не зможуть виконати свою цільову функцію.

3. Дерево відмов, яке представляє собою структурований набір можливих варіантів припинення функціонування ТС FE та FC, разом з відповідними рівнями їхнього ризику відмов.

Кількість ТС FE та FC СТС може бути встановлена на основі аналізу моделей дерев відмов та відповідних значень ризику відмов (рис.2.1).

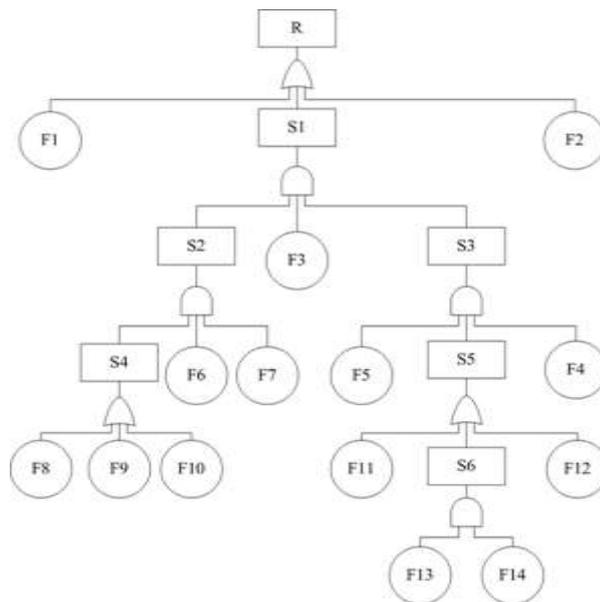


Рисунок 2.1 - Дерево відмов підсистем (компонентів, елементів), міжсистемних (міжкомпонентних) зв'язків СЕУ

Синтез та аналіз дерева відмов здійснено у структурному аспекті, заснованому на логічних схемах взаємодії обладнання СТС з точки зору збереження її працездатності. При структурному аналізі використовують статистичну інформацію про надійність обладнання СТС.

На рис. 2.1  $R$  представляє ризик відмови системи,  $S1-S6$  – різні комбінації послідовностей відмов, елементи системи  $F1-F14$  типи подій за її відмови. Табл. 2.1 відображає відповідність позначень на дереві відмов  $S$  і FE БМД.

Таблиця 2.1 - Відповідності  $S$  та підсистем (компонентів) БМД

Позначення	Характеристики події
S1	Відмова елемента ІЕ
S2	Відмова елементів FFS, CAS, MCME
S3	Відмова елементів RACSME, P1, SPP
S4	Відмова елементів CS, BDS, BP
S5	Відмова елементів ME, ED_PSC, CSPSC
S6	Відмова елементів TPMEP, P2, PSC

Розроблена структура БМД СЕУ (рис. 2.2) є багаторівневою системою і складається із тринадцяти підсистем, розташованих на семи рівнях. P1 та P2 – спеціалізовані проміжні вузли, призначені для реалізації багаторівневої структури БМД.

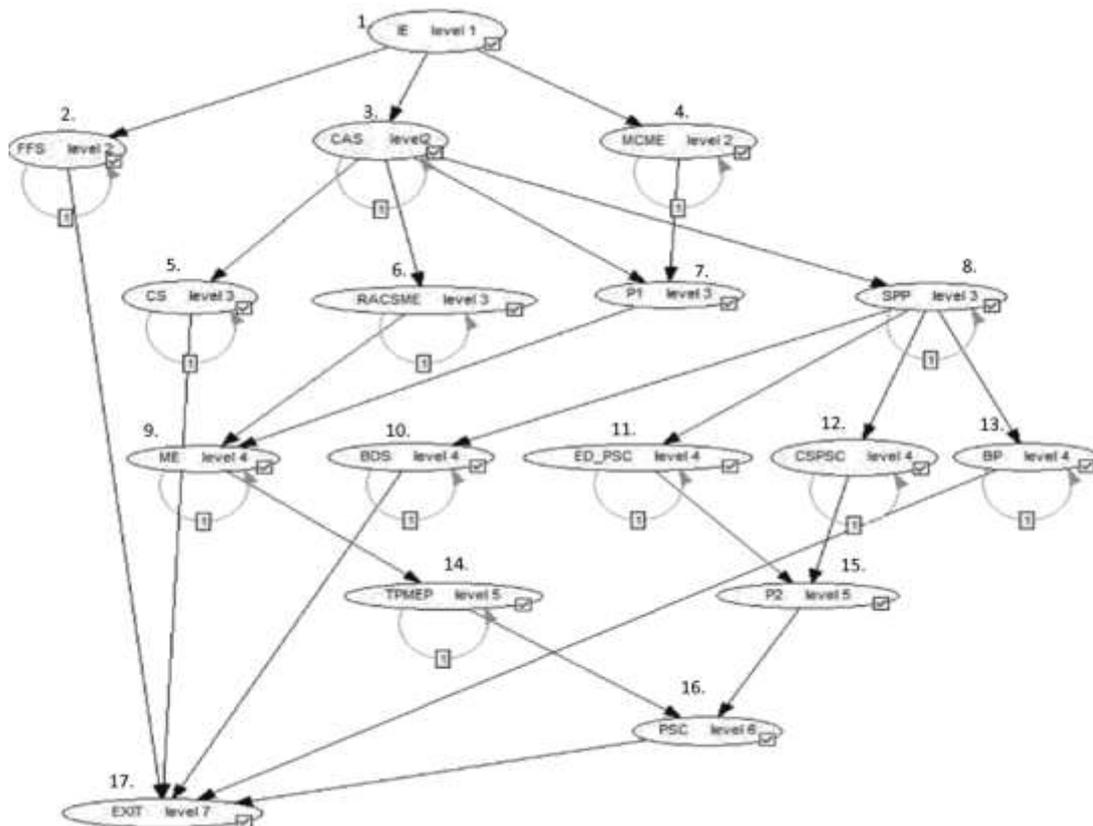


Рисунок 2.2 - Структура БМД СЕУ

Умовні позначення підсистем, компонентів СЕУ у БМД: вхідний елемент – ІЕ; системи пожежогасіння та стисненого повітря - FFS, CAS; ручне керування головним двигуном – МСМЕ; системи управління та дистанційного автоматизованого управління головним двигуном - CS, RACSME; проміжний компонент – P1; судова енергетична установка – SPP; головний двигун – ME; система дренажу баласту – BDS; аварійний привід рухово-кермового комплексу – ED PSC; система управління рухово-кермовим комплексом - CSPSC; котельня – ВР; передача потужності від головного двигуна до рушія – ТРМЕР; проміжний компонент – P2; рухово-кермовий комплекс – PSC; вихідний компонент - EXIT.

Для підсистем структури БМД СЕУ верхнього рівня задаються умовні відмови за результатами впливу на них підсистем нижчого ієрархічного рівня. Приклад застосування БМД для зв'язаних блоків СЕУ ІЕ, CAS, SPP та їх взаємних зв'язків ІЕ – CAS, CAS – SPP (рис.2.2), використовуючи дані про інтенсивність відмов можна подати таким чином:

$$\begin{aligned}
 R(Work_{1,3,8}^{1,2,3})_{t=0} &= 0 ; \\
 R(Not\_work_{1,3,8}^{1,2,3})_{t=0} &= 1 ; \\
 R(Work_{IE-CAS,CAS-SPP}^{2,3})_{t=0} &= 0 ; \\
 R(Not\_work_{IE-CAS,CAS-SPP}^{2,3})_{t=0} &= 1 ; \\
 R((Work_{1,3,8}^{1,2,3})_t / (Work_{1,3,8}^{1,2,3})_{t-1}) &= 0,1 ; \\
 R((Work_{IE\_CAS,CAS\_SPP}^{2,3})_t / (Work_{IE\_CAS,CAS-SPP}^{2,3})_{t-1}) &= 0,1
 \end{aligned}
 \tag{2.22}$$

Набори ризику відмов у поточний час з урахуванням попереднього стану підсистем (компонентів, елементів) і міжсистемних (міжкомпонентних) зв'язків можуть перебувати в межах:

- очікуваний рівень ризику відмов оцінюється як мінімальний, наслідки аварії мінімальні за таких оцінок:

$$R((Not\_work_{1,3,8}^{1,2,3})_t / (Work_{1,3,8}^{1,2,3})_{t-1}) = 0,1 - 0,2 ;
 \tag{2.23}$$

$$R((Not\_work_{IE\_CAS,CAS\_SPP}^{2,3})_t / (Work_{IE\_CAS,CAS\_SPP}^{1,3})_{t-1}) = 0,1 - 0,2$$

- очікуваний рівень ризику відмов оцінюється як допустимий, наслідки аварії незначні за таких оцінок:

$$R((Not\_work_{1,3,8}^{1,2,3})_t / (Work_{1,3,8}^{1,2,3})_{t-1}) = 0,2 - 0,37 ; \quad (2.24)$$

$$R((Not\_work_{IE\_CAS,CAS\_SPP}^{2,3})_t / (Work_{IE\_CAS,CAS\_SPP}^{1,3})_{t-1}) = 0,2 - 0,37$$

- очікуваний рівень ризику відмов оцінюється як максимальний, наслідки аварії значні за таких оцінок:

$$R((Not\_work_{1,3,8}^{1,2,3})_t / (Work_{1,3,8}^{1,2,3})_{t-1}) = 0,37 - 0,63 ; \quad (2.25)$$

$$R((Not\_work_{IE\_CAS,CAS\_SPP}^{2,3})_t / (Work_{IE\_CAS,CAS\_SPP}^{2,3})_{t-1}) = 0,37 - 0,63$$

- очікуваний рівень ризику відмов оцінюється як критичний за наступних оцінок:

$$R((Not\_work_{1,3,8}^{1,2,3})_t / (Work_{1,3,8}^{1,2,3})_{t-1}) = 0,63 - 1 ; \quad (2.26)$$

$$R((Not\_work_{IE\_CAS,CAS\_SPP}^{2,3})_t / (Work_{IE\_CAS,CAS\_SPP}^{2,3})_{t-1}) = 0,63 - 1$$

На основі проведеного ретроспективного аналізу можна здійснювати пошук найвірогідніших причин відмови, розслідувати причини відмов підсистем, компонентів, елементів СТС тощо. Застосування БМД для аналізу ризику відмов підсистем, компонентів СТС буде вважатися адекватним.

Врахування часткових відмов обладнання СТС, дає можливість встановити причини його відмов. Проведення передвідмовного обслуговування систем сприятиме підвищенню їх працездатності, а значить підвищенню ефективності експлуатації.

Сформульовано перший пункт наукової новизни: вперше запропоновано стохастичну модель діагностики ТС складних систем, яка одночасно враховує наявність підсистем, компонентів та елементів, їх взаємні зв'язки та ймовірність часткової або повної відмови працездатності, що дозволило запропонувати метод діагностики ТС на основі байєсівської мережі довіри для складних систем критичного застосування.

Представлена структура БМД, яка використовується для реалізації методу діагностики на основі графово-імовірнісної моделі відображає суть сформульованого другого пункту наукової новизни: набув подальшого розвитку метод діагностики ТС складних систем на основі байєсівської мережі довіри, що дозволило своєчасно виявити та візуалізувати структурні, функціональні вразливості та підвищити ефективність експлуатації складних систем критичного застосування.

## 2.2 Розробка моделі когнітивного імітаційного моделювання діагностики технічного стану складних систем критичного застосування

З точки зору технічної безпеки діагностика ризику відмов СТС є необхідним та складною задачею, що вимагає розробку та застосування спеціального математичного апарату. Розв'язок задач такого роду часто ґрунтується на аналізі «дерева відмов». Перспективним методом імітаційного моделювання для дослідження надійності СТС при переходах систем між різними ТС є КІМ, використовуючі моделі у вигляді орграфів, що відображають взаємодію ФЕ та ФС СТС. На підставі аналізу орграфів переходів для процесів визначення ТС ФЕ та ФС всіх рівнів ієрархії розроблено та реалізовано алгоритми прийняття рішення у відповідних функціях ПЗ. При моделюванні структурних та функціональних властивостей підсистем та їх зв'язків орграф є структурною моделлю ФЕ та ФС СТС.

Задачею розробки концептуального підходу до створення методу КІМ є створення методичних основ діагностики ризику відмов СТС за умов вражаючих малопередбачуваних зовнішніх і внутрішніх впливів. Концепція діагностики ризику відмов СТС в аварійних сценаріях ґрунтується на об'єднанні ФЕ та ФС СТС в єдину модель. Модель повинна забезпечити діагностику ризику відмов ФЕ та ФС СТС з урахуванням їх взаємного зв'язку, а також взаємного впливу, виходячи із значущості та критичності для

функціонування всієї системи та забезпечити визначення структурних загроз уразливих місць у СТС. Застосування КІМ здійснюється переходом від когнітивної карти до когнітивної моделі, в якій структурні вразливості обладнання СТС діагностуються шляхом імітаційного моделювання з використанням імітаційних (вражаючих, діагностичних) моделюючих імпульсів. При проведенні досліджень моделі генерується вражаючий моделюючий імпульс (ВМІ), що надходить в умовну вершину (ребро) КІМ і рухається до наступних вершин (ребер), вводячи в стан відмов взаємопов'язані ФЕ СТС.

Концептуальна стохастична КІМ діагностики ТС складних систем містить імпульсний вектор  $imp_k(t), k \in 1, 2, \dots, l$  для дискретного часу, задається співвідношенням зміни ваг вузлів та ребер орграфу, що визначає динаміку поширення вражаючих впливів по СТС. Для впливу  $imp = 0$  - елемент не уражається, а для впливу з силою  $imp = 1$  елемент виводиться з ладу зі 100% ймовірністю.

Запропонована концептуальна стохастична КІМ діагностики ТС судових складних систем КЗ виглядає так:

$$CCM = \langle G, \{x_i\}, F, Q, \{FE\}, \{FC\}, \{R_{FE}\}, \{R_{FC}\}, L, imp_k(t) \rangle \quad (2.27)$$

$$imp_k(T) = (x_1, x_2, \dots, x_{V(E)}), \quad (2.28)$$

де  $x_1, x_2, x_{V(E)}$  – стан ФЕ та FC СТС

Для апробації розробленого ПЗ (Додаток Г) у ньому створена КІМ СТС у вигляді орграфу з використанням у якості прикладу двигуна внутрішнього згоряння (ДВЗ) (рис. 2.3). Схему орграфу з прикладу ДВЗ з підсистемами наведено на рис. 2.4.

Як міру шкоди пропонується визначати структурні збитки відмов ФЕ і FC відповідно до методу діагностики структурного ризику відмов СТС. Для діагностики ризику відмов ФЕ та FC ДВЗ необхідно визначення ймовірностей відмов для кожного ФЕ та FC.

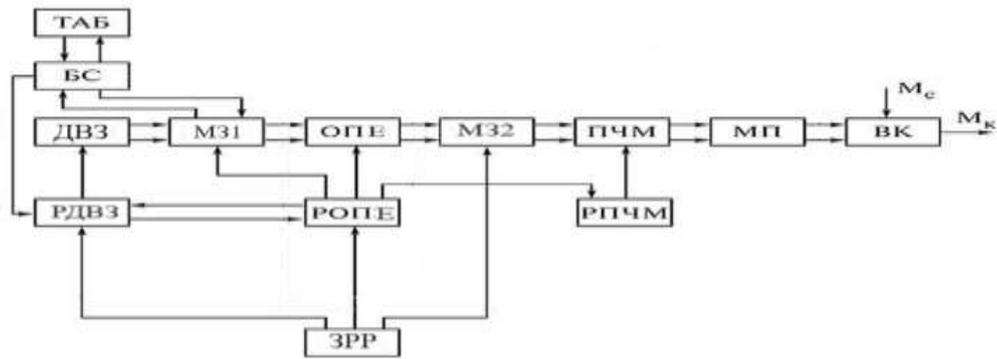


Рисунок 2.3 - Структурна схема ДВЗ із підсистемами (ТАБ – тягова акумуляторна батарея; ДВЗ – двигун внутрішнього згорання; ЗРР– задатчик режимів руху; БС– блок підсумовування напруг та потужностей; ОРЕ– перетворювач енергії; ПЧМ– перетворювач частоти обертання та моменту; МП– механічна передача; ВК– ведучі колеса; МЗ1 – муфта зчеплення між валами ДВЗ і ОРЕ; МЗ2– муфта зчеплення між валами ОРЕ і ПЧМ; РОРЕ– регулятор ОРЕ; РПЧМ– регулятор ПЧМ; РДВЗ – регулятор ДВЗ;  $M_c$  – момент опору на валу;  $M_k$  - крутний момент на валу)

Використовуються статистичні дані, прив'язані до певного часу  $\tau$ , що містять відомості про кількість відмов  $n_{FE}$  та  $n_{FC}$ .

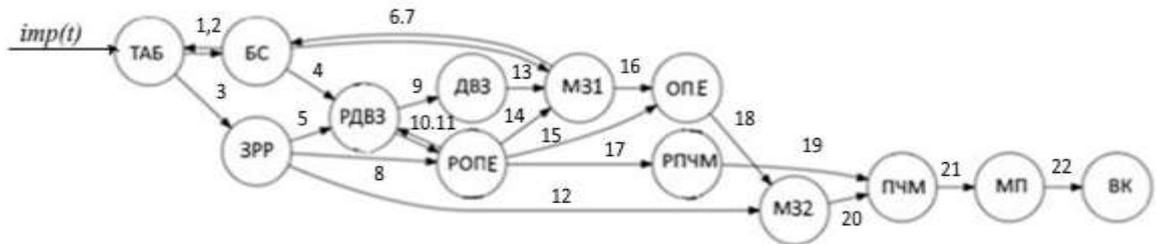


Рисунок 2.4 - Схема орієнтованого графа ДВЗ

Ймовірність відмов  $FE$  та  $FC$  ДВЗ визначається:

$$P_{v_i} = \frac{n_{v_i}}{\tau}, \quad P_{a_j} = \frac{n_{a_j}}{\tau}, \quad (2.29)$$

де  $P_{v_i}$  – ймовірність відмови  $i$ -го  $FE$ ;

$P_{a_j}$  – ймовірність відмови  $j$ -й  $FC$ ;

$n_{v_i}$  – кількість відмов  $i$ -го  $FE$ ;

$n_{aj}$  – кількість відмов  $j$ -ї FC;

$\tau = 10^6$  – період проведення статистичних випробувань

На підставі методу діагностики ризику відмов при експлуатації FE та FC СТС розроблено алгоритм діагностики ризику відмов FE та FC залежно від ступеня їх взаємного впливу (рис.2.5).

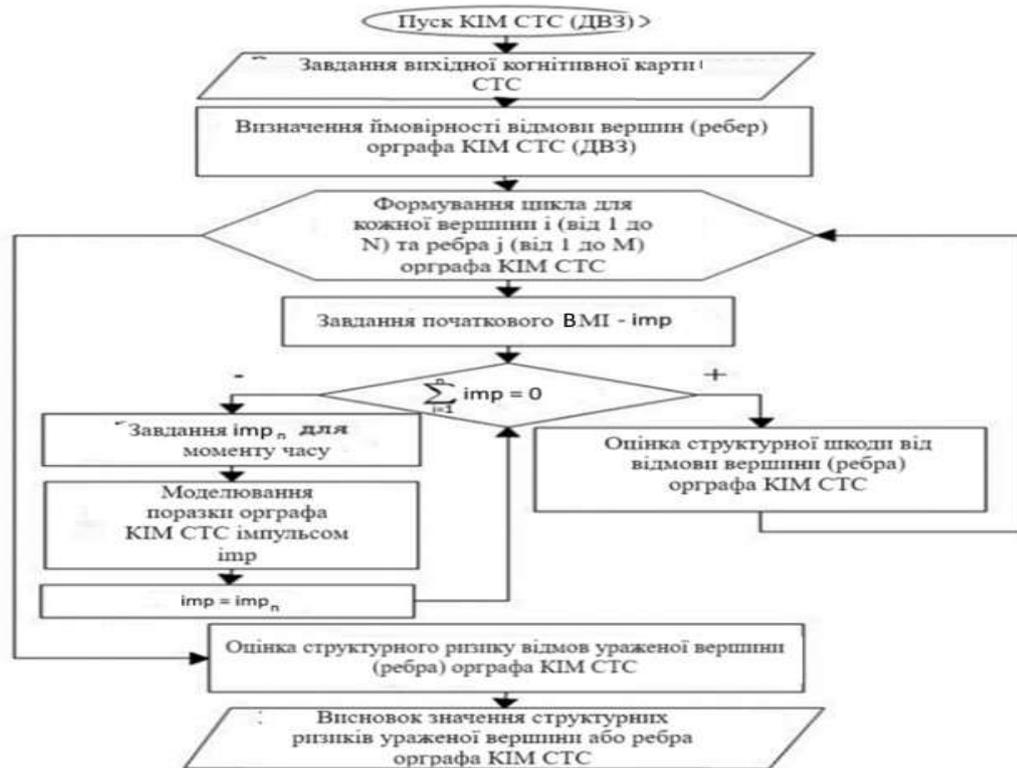


Рисунок 2.5 - Алгоритм діагностики ризику відмов від ступеня впливу компонентів КІМ СТС

Існуюча теоретична база та наявність широкого спектру імітаційного ПЗ моделювання такого як Arena, AutoMod, AnyLogic, Extend, GPSS World та інших сприяє активному застосуванню КІМ для діагностики ризику відмов СТС [171, 172]. Однак відомі програмні засоби полегшують лише сам процес випробувань і не стосуються найважчої задачі збору вихідної інформації, її інтерпретації, формалізації та адекватного співвідношення з конкретним об'єктом. Освоєння таких програмних середовищ потребує значних зусиль. На базі описаної в [93] концепції діагностики ризику відмов FE та FC СТС, стає можливою розробка ПЗ (Додаток Г), що дозволяє здійснювати

автоматизований процес діагностики ризику відмов FE та FC СТС з урахуванням їх ТС [8]. Для визначення загальних меж, контексту предметної області, що моделюється, на початкових етапах розробки ПЗ діагностики ризику відмов від втрати часткової та повної працездатності СТС та формулювання загальних вимог до її поведінки розроблена діаграма створюваного ПЗ (рис.2.6).

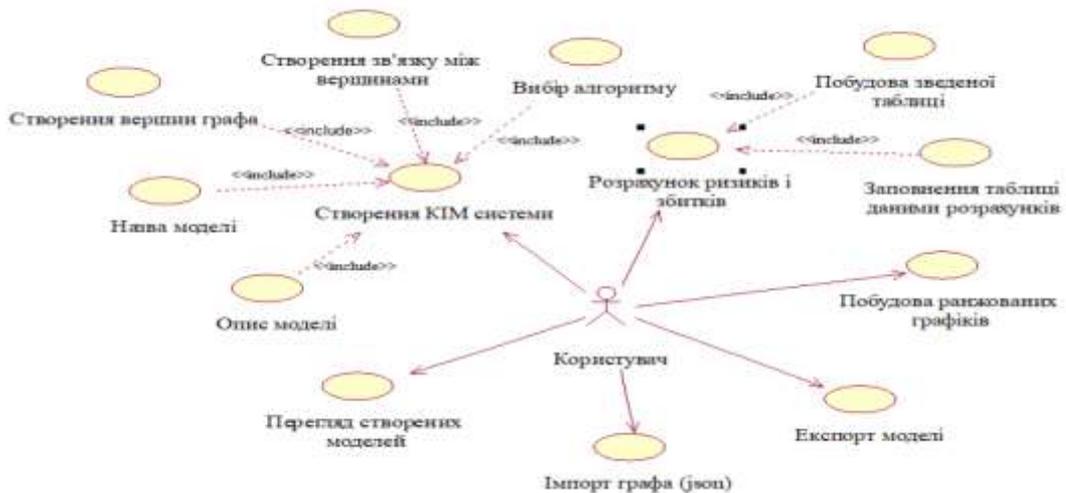


Рисунок 2.6 – Use case діаграма варіантів створюваного ПЗ

Розроблене ПЗ дозволяє користувачу:

- створювати модель СТС у формі орграфу, з підтримкою можливостей вказання ім'я моделі, введення текстового стислого опису, встановлення нової вершини орграфу та її візуалізації на панелі відображення моделі, побудови зв'язків між обраними вершинами моделі, активації поточного алгоритму розташування моделі на панелі та візуалізації отриманої структури у створеному графічному контейнері;
- відображати попередньо отриману структуру розробленої KIM у формі орграфу з візуалізації усіх ребер та вершин з наданням можливості її прямого імпорту до програми;
- додавати до системи модель, серіалізовану до json формату для її парсингу та відображення;
- здійснювати процедуру експорту KIM у формі створеного орграфу до файлу графічного формату с розширеннями png чи jpg;

- виконувати процедури розрахунку числових значень ризиків відмов FE та FC СТС та візуалізувати результати генерацією табличної форми;
- формувати відображення результатів у графічному вигляді з застосуванням ранжування значень за їх спаданням.

Побудована use case діаграма ПЗ дозволяє здійснити проектування логічних сутностей програмної імплементації ПЗ розробкою відповідних діаграм класів. Ключові розроблені класи ПЗ наведено на рис.2.7.

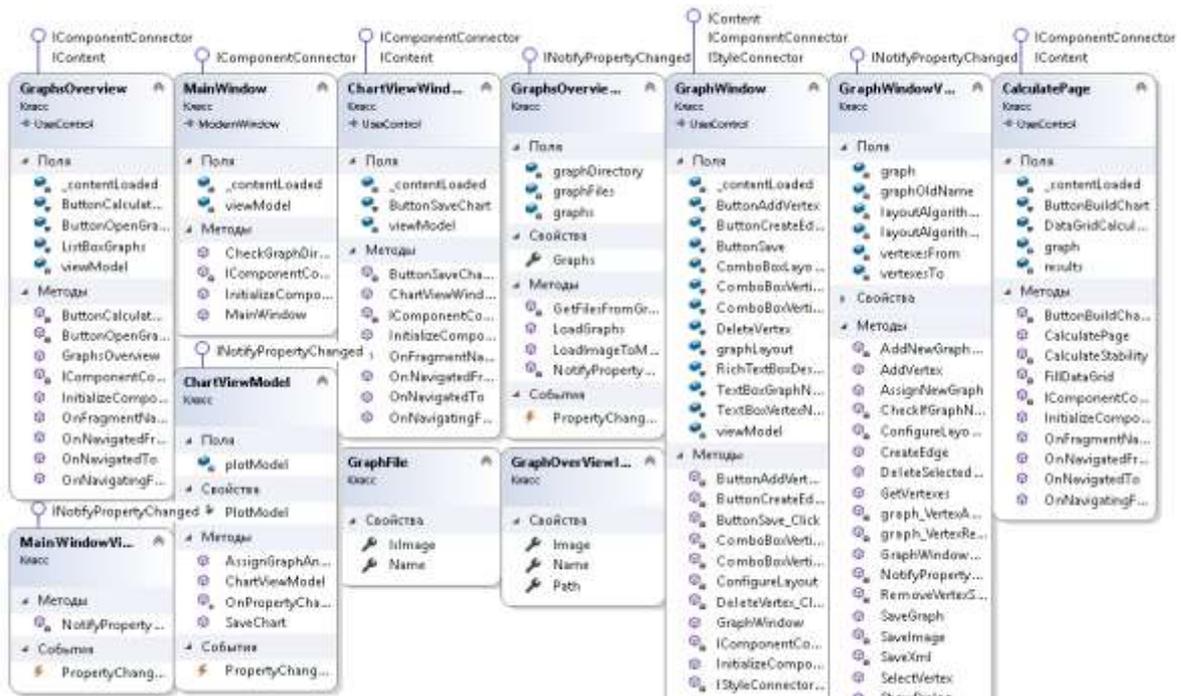


Рисунок 2.7 – Діаграма класів розробленого ПЗ

Класи GraphsOverview, MainWindow, ChartViewWindow, GraphsOverviewWindow, GraphWindow, GraphWindowView, CalculatePage, MainWindowView та ChartViewModel реалізують функціональні інтерфейси для гнучкої адаптації логіки з метою впровадження заданих функціональних можливостей з відображення результатів обробки даних та здійснення обчислювальних операцій. Для імплементації описаної програмної логіки застосовано інтерфейси для КІМ у вигляді оргграфа:

- IComponentConnector (для забезпечення зв'язку FE між собою);
- IContent (для відображення та реалізації можливостей динамічного поєднання та опису сутностей створеного графічного контейнера на кожній з форм інтерфейсу системи);

- INotifyPropertyChanged (для прив'язки подій щодо здійснення змін зазначених властивостей реалізованих об'єктів КІМ на панелі ПЗ);
- IStyleConnector (для модифікації та вибору зв'язку FE).

На основі створених діаграм описані особливості фізичного уявлення системи у вигляді формалізації порядку взаємозв'язку базових FE СТС. С цією метою слід застосувати діаграму компонентів (рис.2.8), що дозволяє визначати архітектуру ПЗ, формалізуючи усі зв'язки між створеними програмними компонентами.

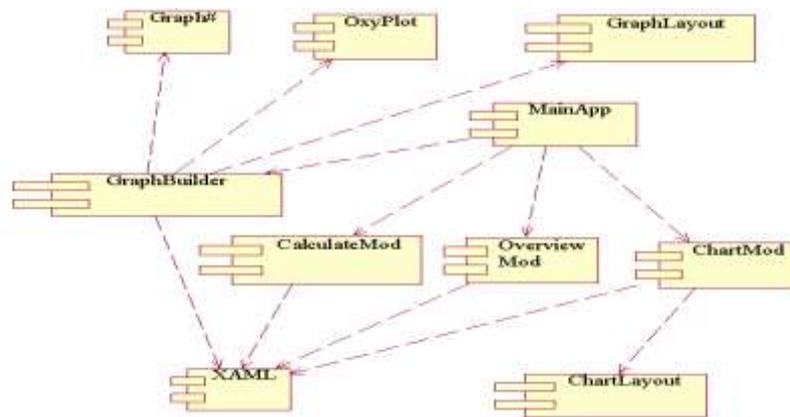


Рисунок 2.8 – Діаграма компонентів програмного забезпечення

MainApp є головним модулем та призначений для виконання виклику інших модулів для обробки запитів по таких процесах: побудова моделі орграфа КІМ засобами класу GraphBuilder шляхом застосування залежностей Graph# і OxyPlot, які є зовнішніми артефактами проекту, а також класу GraphLayout для здійснення побудви контейнера інтерактивної візуалізації створеної моделі; оцінки значень збитків та ризиків відмов; виведення результатів розрахунків у табличній формі для їх наочної оцінки; побудови та відображення графічного об'єкту для ранжування результатів.

У якості бібліотек обробки графічних примітивів використані артефакти Graph# і OxyPlot. Перша з цих залежностей містить ряд алгоритмів швидкого компонування моделей орграфів, зокрема присутня підтримка: Force-Scan; LinLog; Fruchterman – Reingold; ISOM; Sugiyama; Kamada – Kawai; простий макет дерева. Для виконання моделювання специфіки взаємодії об'єктів у часі в рамках розробленого ПЗ та з метою забезпечення

процесів обміну повідомленнями між ними сформовано діаграму послідовності дій ПЗ (рис. 2.9).

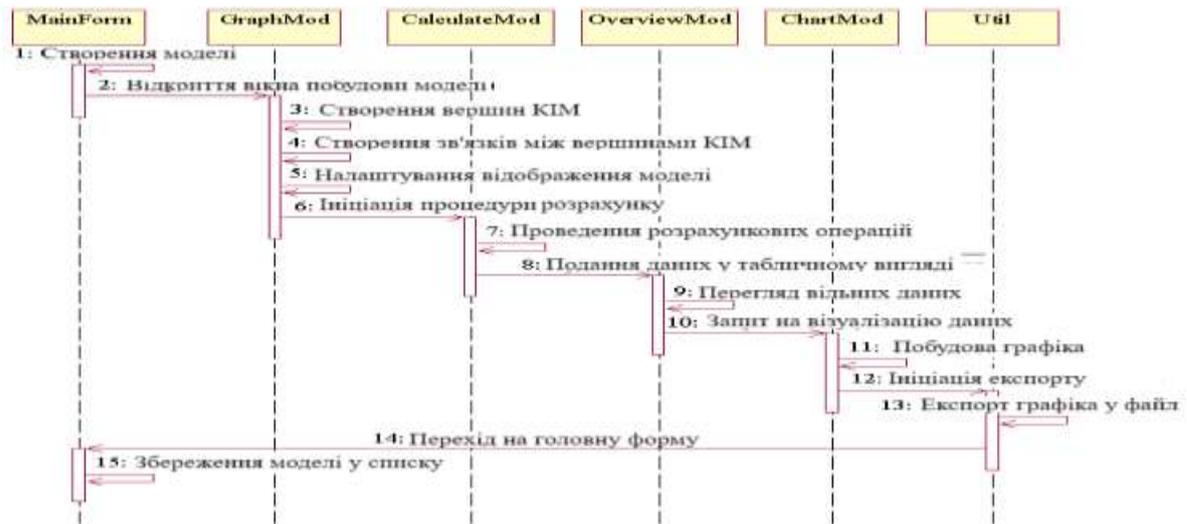


Рисунок 2.9 – Діаграма послідовності дій ПЗ

Усі форми, за винятком головної, які наведено на даній діаграмі є незв'язними між собою фрагментами, що динамічно інтегруються в єдину колекцію головної форми шляхом генерації нових вкладинок.

Основою методу побудови орграфової структури є алгоритм Сугіями, який базується на таких завданнях: розподіл сформованих вершин орграфу за рівнями для досягнення мінімальних значень їх довжини, при цьому їх напрямок є незмінним; мінімізація загального обсягу фіктивних вершин; мінімізація перетинів ребер орграфу за рахунок зміни порядку зназначених вершин моделі на відповідних їм рівнях; вибір значень для кожної координати вершини для зменшення кількості вигинів ребер.

Для формалізації програмного функціоналу розроблено наступні функціональні класи:

1. `Public partial class CalculatePage: UserControl, IContent, IComponentConnector` для інтерпретації даних та у використанні результатів розробленої моделі у вигляді орграфа для здійснення кількісної оцінки збитків FE СТС та їх ризиків відмов.

2. `Public class ChartViewModel: INotifyPropertyChanged` для побудови та візуалізації ранжованого графіка отриманих значень ризику відмов FE СТС.

3. Class `GraphWindowViewModel: INotifyPropertyChanged` для створення орграфа KIM.

4. Public class `GraphsOverview: UserControl, IContent, IComponentConnector` для виводу до інтерфейсу користувача моделі орграфа.

Інтерфейс форми створення орграфа KIM СТС розробленого ПЗ наведено на рис. 2.10. Така форма дозволяє вибрати один із підтримуваних алгоритмів побудови та відображення орграфа в рамках контейнера, задати йому ім'я у вигляді рядка, а також ввести його текстовий опис та зберегти створену модель у форматі \*.xml.

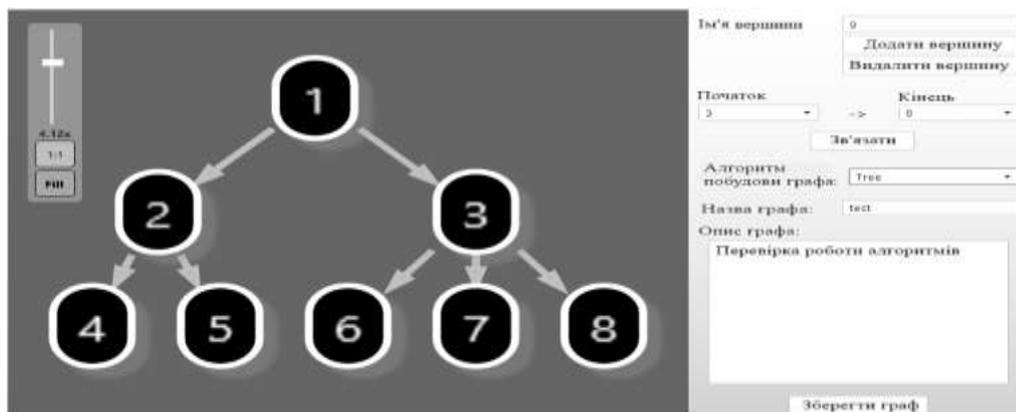


Рисунок 2.10 – Інтерфейс форми створення орграфа KIM СТС розробленого програмного забезпечення

Для апробації ПЗ у ньому створено KIM діагностики СТС як орграфа з прикладу векторного управління рульової передачею з електричним приводом судна (рис. 2.11) [124]. До неї входять: 1- рульова машина; 2 - сегмент черв'ячного колеса та гальма; 3 – черв'як; 4 – румпель; 5 – редуктор; 6 - кермовий штир; 7 - кермовий сектор; 8-напіввісь; 9-кранштейн піддону; 10 - болт; 11-болт із гайкою; 12 - шайба; 13-стопорна планка; 14, 15, 16, 24, 25 - шестірні; 17- водило; 18 – вільний епіцикл; 19-зубчасті колеса; 20-вільне водило; 21, 22-вали; 23-гальмівний епіцикл; 26-двигун; 27-пружина; 28-балер керма; 29-профільний кермо; 30-привідне колесо; 31-гребний вал; 32, 33-вали турбін низького та високого тиску; 34-наддувний агрегат; 35-привідне колесо; 36-проміжні шестірні; 37-привідне колесо колінчастого валу; 38-розподільний вал; 39-шатун; 40-поршень; 41-циліндрова гільза; 42-камера

охолоджувальної води; 43-колінчастий вал; 44-охолоджувач наддувного повітря; 45-трубопровід відпрацьованих газів; 46,47-трубопроводи наддувного повітря та охолоджувальної води; 48, 49 - масляний та паливний трубопроводи; 50-штанга; 51-паливний насос; 52-масляне кільце; 53-кришка циліндра; 54, 55, 56-випускний, впускний та паливний клапани; 58-масляна ванна картера; 59-блок циліндрів.

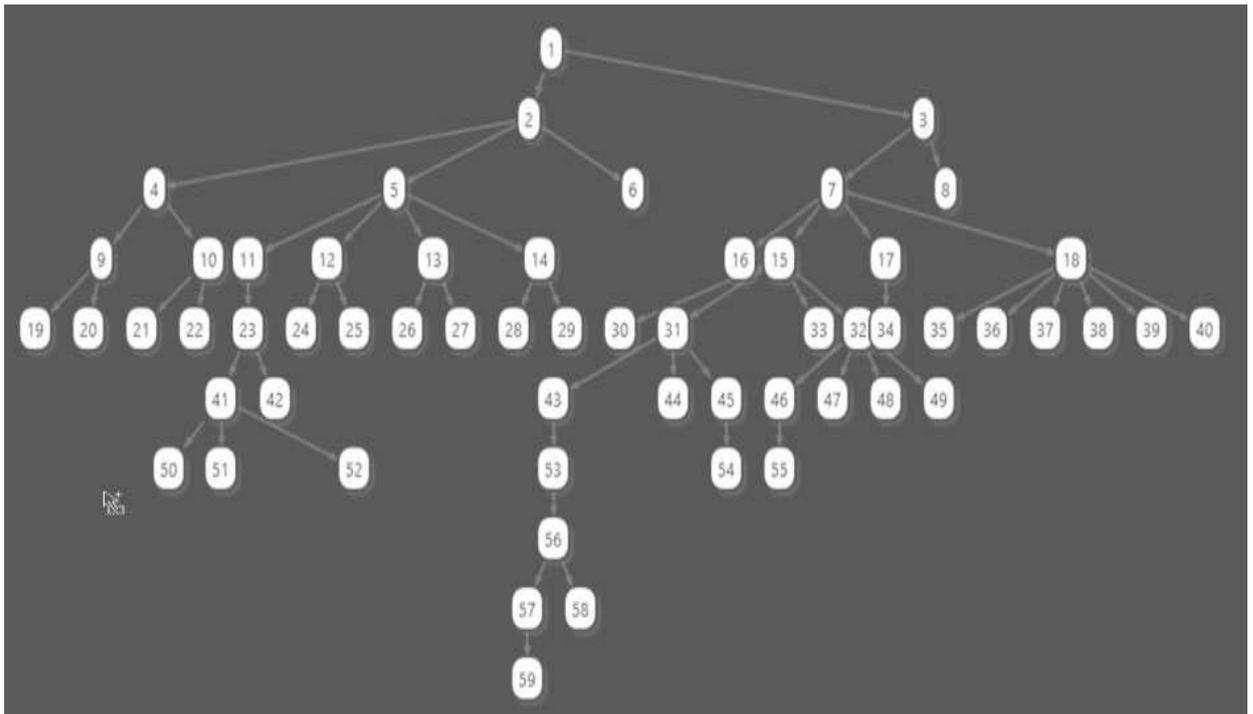


Рисунок 2.11 - КІМ діагностики СТС СТС

З проведеного моделювання впливає, що найбільш уразливими елементами системи є кермовий сектор, черв'як, сегмент черв'ячного колеса та гальма, редуктор. Їх відмова становить найбільшу загрозу для функціонування всієї системи векторного керування кермової передачі з електричним приводом. У цьому необхідно здійснювати постійну діагностику ТС, що дозволить уникнути втрати працездатності FE і FC СТС, знизити ризик відмов.

Для автоматизації процесу побудови КІМ діагностики ризику відмов обладнання суднової СТС розроблено кросплатформну програму на мові програмування Java, з використанням графічного фреймворку JavaFX та мові розмітки XML. Після запуску розробленого додатка користувач здійснює

вибір режиму роботи (ручний – дозволяє проводити оцінку параметрів покроковим чином, вводячи для вибраної системи необхідні дані (рис.2.12), автоматичний – активує автоматичну обробку даних).

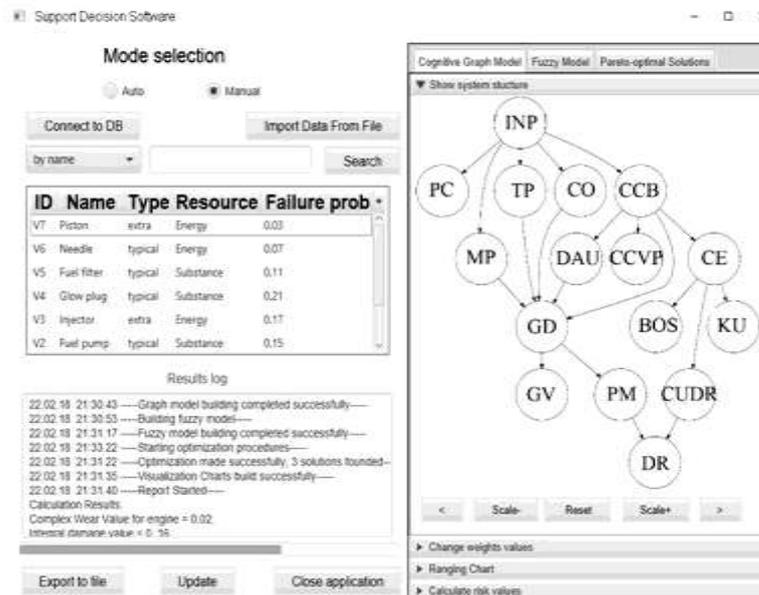


Рисунок 2.12 - Інтерфейс для перегляду КІМ діагностики ТС у ручному режимі

Умовні позначення ТС, що використовуються: вхідний елемент – INP; масляна підсистема - MP; паливна підсистема - TP; системи охолодження, стиснутого повітря, управління рушійно-кермовим комплексом – CO, CCC, CUDR; суднова електростанція - CE; протипожежна система - PC; головний двигун – GD; система дистанційного автоматизованого керування головного двигуна – DAU; баластно-осушувальна система – BOS; котельня – KU; передача потужності від головного двигуна до рушя – PM; рушійно-кермовий комплекс – DR; система санітарної водопідготовки – PCЗР; газовипускна система – GV.

Для забезпечення онлайн доступу до діагностичних ТС складних систем розроблено мобільне ПЗ (Додаток Д).

Сформульовано третій пункт наукової новизни: удосконалена когнітивна імітаційна модель, яка застосовує імітаційні вражаючі імпульси, що дозволяє діагностувати ТС обладнання систем з урахуванням їх взаємного зв'язку та впливу.

### 2.3 Висновки до другого розділу

У другому розділі дисертаційної роботи розроблені стохастичні моделі та метод діагностики ТС складних систем КЗ.

Моделі відображають новий підхід з урахуванням невизначеностей та неповних даних моделюваних систем, з урахуванням часткових та повних відмов від працездатності обладнання, виявлення та візуалізації структурних, функціональних вразливостей підсистем, компонентів, елементів їх взаємних зв'язків. Для моделювання використовувався метод динамічних БМД.

Сформульовано перший пункт наукової новизни: вперше запропоновано стохастичну модель діагностики ТС складних систем, яка одночасно враховує наявність підсистем, компонентів та елементів, їх взаємні зв'язки та ймовірність часткової або повної відмови працездатності, що дозволило запропонувати метод діагностики ТС на основі байєсівської мережі довіри для складних систем критичного застосування.

Сформульовано другий пункт наукової новизни: набув подальшого розвитку метод діагностики ТС складних систем на основі байєсівської мережі довіри, що дозволило своєчасно виявити та візуалізувати структурні, функціональні вразливості та підвищити ефективність експлуатації складних систем критичного застосування.

З метою виявлення, візуалізації вразливостей обладнання СТС КЗ з урахуванням його взаємного зв'язку та впливу, невизначеності та неповноти даних, часткових та повних відмов обладнання, а також для відстеження наслідків та реакції систем на ризик відмов з неочевидними джерелами використана когнітивна імітаційна модель діагностування ризику відмов обладнання, яка використовує імітаційні вражаючі імпульси.

Сформульовано третій пункт наукової новизни: удосконалена когнітивна імітаційна модель, яка застосовує імітаційні вражаючі імпульси, що дозволяє діагностувати ТС обладнання систем з урахуванням їх взаємного зв'язку та впливу.

## РОЗДІЛ 3

ДОСЛІДЖЕННЯ ТА АНАЛІЗ СТОХАСТИЧНИХ МОДЕЛЕЙ ТА МЕТОДУ  
ДІАГНОСТИКИ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ  
КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

3.1 Дослідження та аналіз стохастичної структурної моделі та методу діагностики технічного стану складних систем критичного застосування методом динамічної байєсівської мережі довіри

Мета дослідження розробленої концептуальної стохастичної моделі інтелектуалізації діагностики ризику відмов СТС (п. 2.1) полягає у діагностуванні вразливих FE та FC системи з урахуванням їх часткових та повних відмов від працездатності.

Зведення задачі діагностики ризику відмов FE і FC СТС до побудови БМД дозволить використовувати алгоритмічний апарат теорії БМД і програмний інструментарій GeNie. У цьому випадку численний контроль ризику (ймовірності) відмов FE і FC СТС, приховані змінні характеристики, необхідність їх відображення зводяться до використання розробленої моделі п.2.1. У моделі діагностики ТС БМД використовуються для оцінки ризику (ймовірності) відмови FE та FC системи принцип її роботи, експертні дані (отримані з бази OREDA). У моделі визначається ризик відмови для кожного ТС СТС з урахуванням поточних та попередніх ТС щодо ризику відмов, визначених для кожного взаємопов'язаного FE системи.

При проведенні досліджень як об'єкт обрано суднову СТС критичного застосування - СЭУ. Розроблена структура динамічної БМД з урахуванням схеми та принципу роботи СЭУ складається з семи рівнів та сімнадцяти вершин. Умовні позначення обладнання СЭУ, номери ієрархічного рівня та вага кожної підсистеми (компонента, елемента) у динамічної БМД СЭУ в середовищі GeNie наведені у табл.3.1.

Таблиця 3.1 - FE CEУ у динамічній БМД у середовищі GeNIe

Номер підсистеми (компонента)	Номер ієрархічного рівня підсистеми (компонента)	Найменування підсистеми (компонента)	Умовне позначення	Вага підсистеми (компонента)
1	1	Вхідний елемент	IE	0,26
2	2	Система пожежогасіння	FFS	0,01
3	2	Система стисненого повітря	CAS	0,047
4	2	Ручне керування основним двигуном	MCME	0,035
5	3	Система управління	CS	0,081
6	3	Дистанційна автоматизована система управління основним двигуном	RACSME	0,01
7	3	Проміжний компонент	P1	0,01
8	3	Корабельна електростанція	SPP	0,09
9	4	Головний двигун	ME	0,16
10	4	Баластна дренажна система	BDS	0,019
11	4	Комплекс рушійно-рульового управління з аварійним приводом	ED PSC	0,01
12	4	Система управління рушійно-рульовим комплексом	CSPSC	0,081
13	4	Котельня	BP	0,13
14	5	Передача потужності від головного двигуна до гвинта	TPMER	0,003
15	5	Проміжний компонент	P2	0,01
16	6	Рушійно-рульовий комплекс	PSC	0,01
17	7	Вихідний компонент	EXIT	0,26

Моделювання проведено традиційним способом «зверху-вниз» та «знизу-вгору», спираючись на апіорні характеристики моделі.

При моделюванні прийнято такі припущення та обмеження:

- FE та FC CTC знаходяться як у часткових, так і повних відмових від працездатності;
- у початковий момент часу FE та FC CTC перебувають у працездатному стані;
- поточне TC кожного FE та FC CTC залежить від поточного та попереднього TC;
- час дискретний з кроком дискретизації одну годину.

При моделюванні БМД СЕУ (рис. 3.1) для різних значень ймовірності (ризик) відмови вхідної підсистеми визначено значення ймовірності (ризик) відмов, працездатності FE та FC СЕУ за 20 000 годин її експлуатації.

На рис.3.1 наведено БМД СЕУ для моделювання та діагностування відмов FE та FC при ризику відмови вхідного елемента 0,26 з відображенням робочого стану та величини ризику відмови кожного FE та FC СЕУ. Фрагменти робочих станів та відмов, наприклад підсистем CS, SPP, що знаходяться на третьому рівні БМД та на виході моделі наведено на рис.3.1. Аналогічні дослідження проведені за ризику відмови вхідного елемента 0,49 з відображенням робочого стану та величини ризику відмови кожної FE та FC СЕУ (рис.3.2). На рис. 3.3, 3.4 наведено розрахункові значення умовної ймовірності та ризику відмов FE та FC, отримані за результатами моделювання для 2863, 8616, 13079, 16726, 19809 та 20000 годин експлуатації СЕУ відповідно. На рис. 3.5, 3.6 наведено розрахункові значення ймовірності та ризику відмов FE та FC, отримані за результатами моделювання функціонування СЕУ за 20000 годин у середовищі GeNe.

З ретроспективного аналізу результатів досліджень виявляються FE, що знаходяться в часткових або повних відмових працездатності. При дослідженні аварійних ситуацій, аналізі подій CTC головною метою є визначення причин відмов FE і FC.

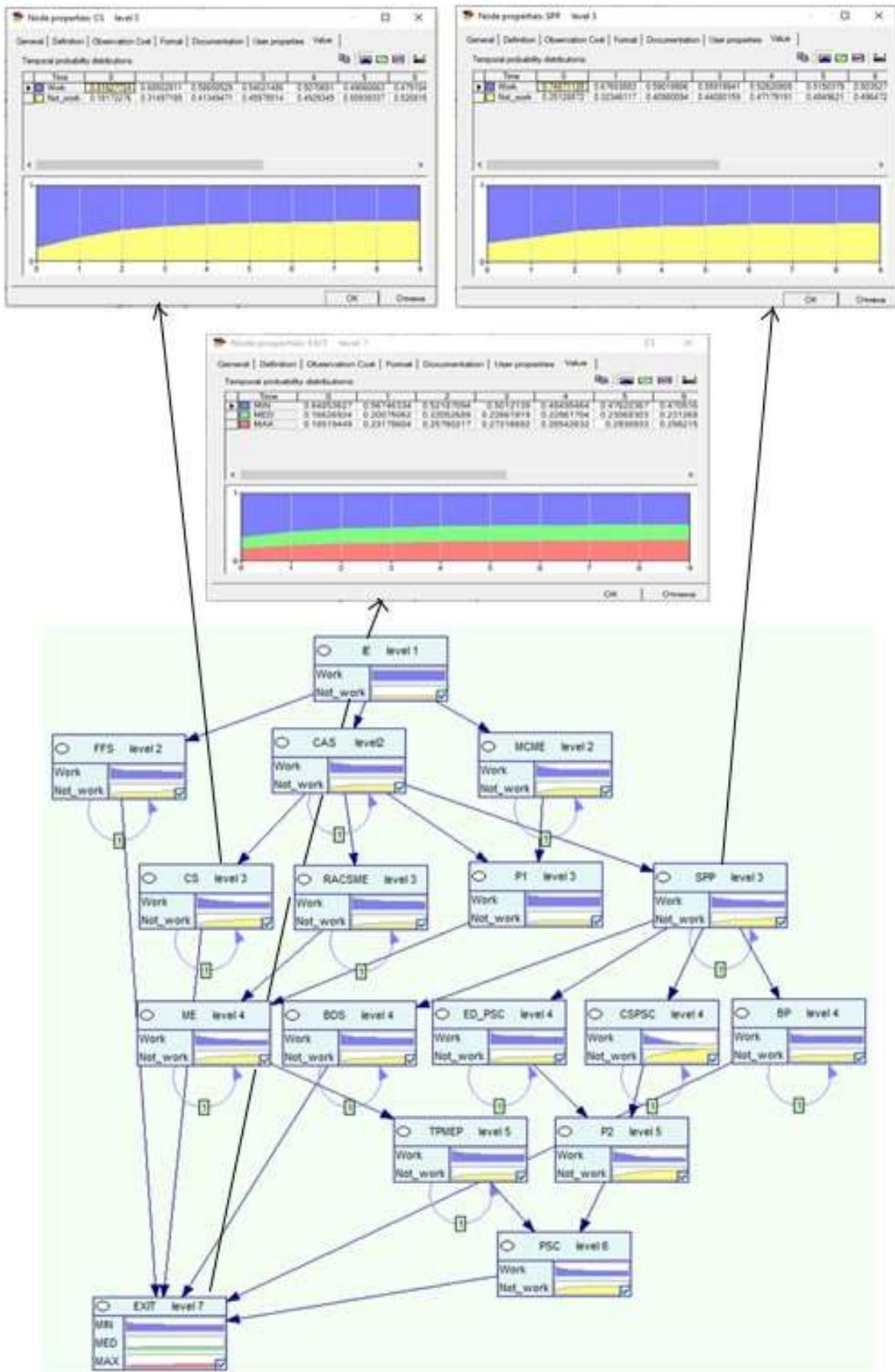


Рисунок 3.1 –БМД СЕУ в середовищі GeNIe для моделювання відмов FE та FC при ризику відмови вхідного елемента 0,26

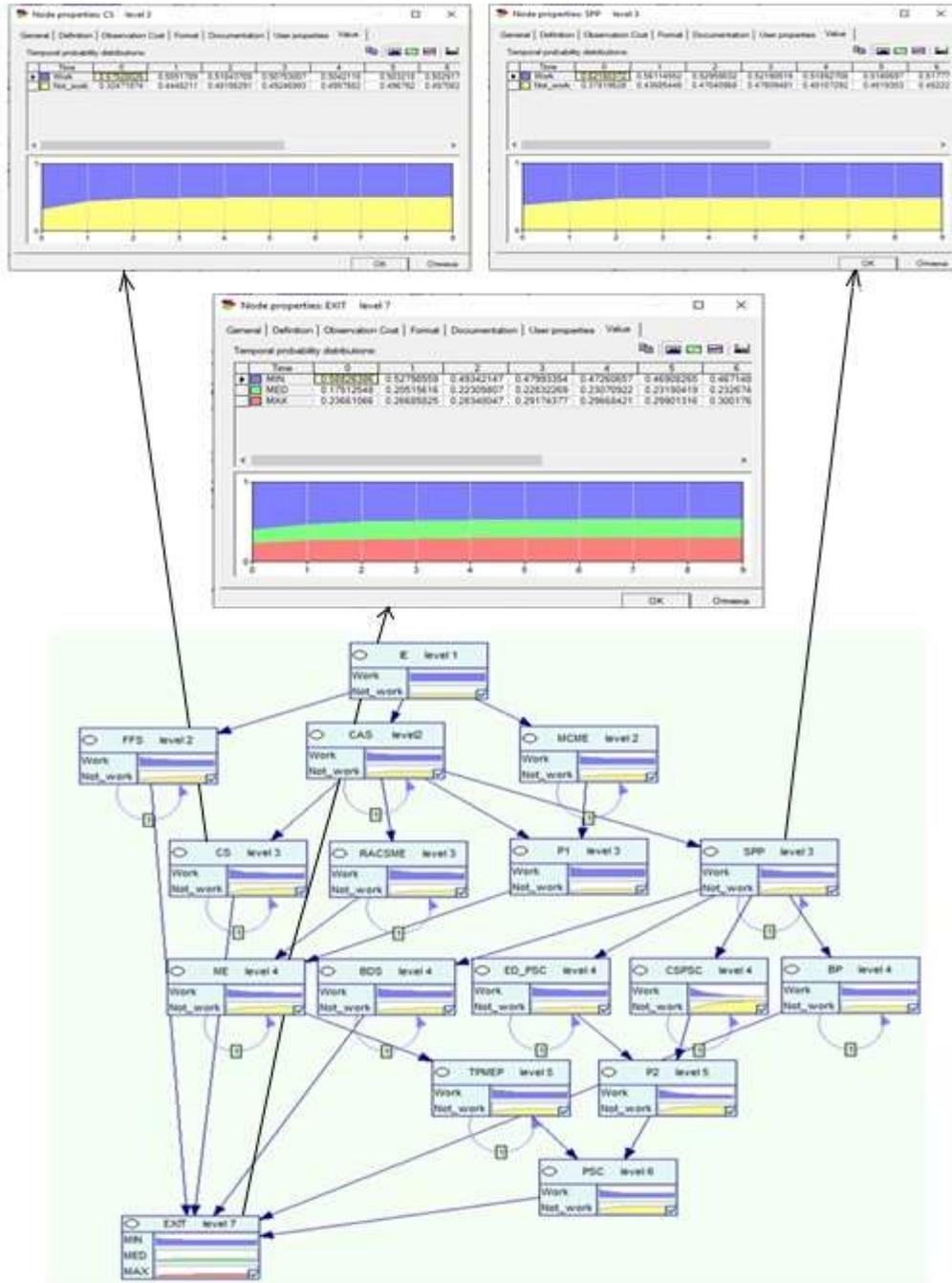


Рисунок 3.2 – БМД СЕУ в середовищі GeNIe для моделювання відмов FE та FC за ризику відмови вхідного елемента 0,49

t	IE	MCME	CS	CSPSC	BP	SPP	FFS	ME	RACSMЕ	BDS	TPMEP	ED PSC
	0,26	0,07	0,05	0,19	0,34	0,14	0,02	0,36	0,02	0,05	0,003	0,00
0	0,26	0,07	0,05	0,19	0,34	0,14	0,02	0,36	0,02	0,05	0,003	0,00
2863	0,300015	0,080773201	0,057695144	0,219242	0,392326977	0,161546	0,023078	0,415405	0,023078	0,057695	0,003462	0,023078057
8616	0,400007	0,107694148	0,076924391	0,292313	0,523085859	0,215388	0,03077	0,553856	0,03077	0,076924	0,004615	0,030769756
13079	0,500012	0,134618553	0,096156109	0,365393	0,653861541	0,269237	0,038462	0,692324	0,038462	0,096156	0,005769	0,038462444
16726	0,600031	0,161546858	0,115390613	0,438484	0,784656167	0,323094	0,046156	0,830812	0,046156	0,115391	0,006923	0,046156245
19809	0,700036	0,188471206	0,13462229	0,511565	0,915431572	0,376942	0,053849	0,96928	0,053849	0,134622	0,008077	0,053848916
20000	0,706753	0,190279728	0,135914091	0,516474	0,924215822	0,380559	0,054366	0,978581	0,054366	0,135914	0,008155	0,054365637

Рисунок 3.3 - Умовні ймовірності відмов FE та FC СЕУ

t	IE	MCME	CS	CSPSC	BP	SPP	FFS	ME	RACSME	BDS	TPMEP	ED PSC
	0,26	0,035	0,047	0,081	0,13	0,09	0,01	0,16	0,01	0,019	0,003	0,01
0	0,26	0,035	0,047	0,081	0,13	0,09	0,01	0,16	0,01	0,019	0,003	0,01
2863	0,300014747	0,040386601	0,054233435	0,093466133	0,150007	0,103851	0,011539	0,184624	0,011539	0,021924	0,003462	0,011539
8616	0,400006834	0,053847074	0,072308928	0,124617514	0,200003	0,138464	0,015385	0,246158	0,015385	0,029231	0,004615	0,015385
13079	0,500011766	0,067309276	0,090386742	0,155772896	0,250006	0,173081	0,019231	0,3077	0,019231	0,036539	0,005769	0,019231
16725	0,600001185	0,08076939	0,108461753	0,186923446	0,300001	0,207693	0,023077	0,369231	0,023077	0,043846	0,006923	0,023077
19808	0,700000907	0,094230891	0,126538626	0,218077206	0,35	0,242308	0,026923	0,43077	0,026923	0,051154	0,008077	0,026923
20000	0,706753275	0,095139864	0,127759246	0,220180828	0,353377	0,244645	0,027183	0,434925	0,027183	0,051647	0,008155	0,027183

Рисунок 3.4 - Ризик відмов FE та FC CEY

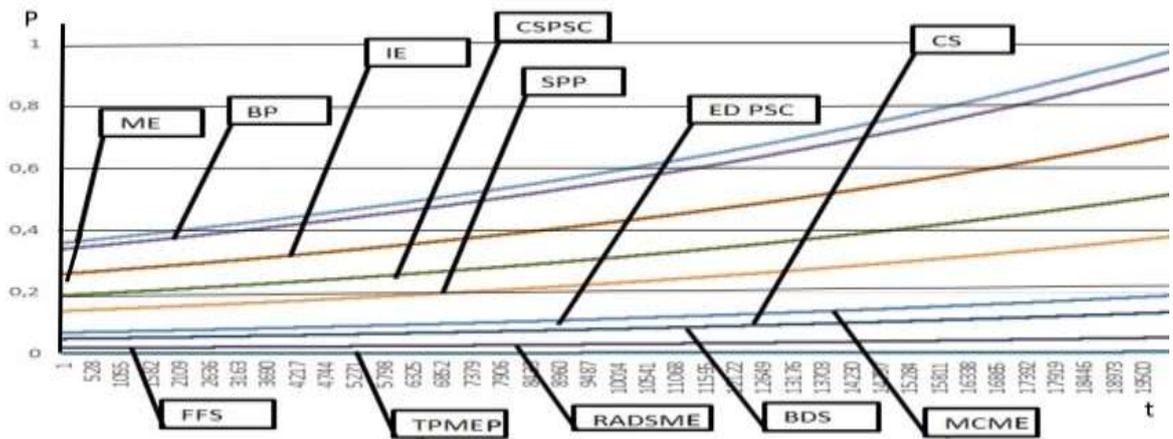


Рисунок 3.5. - Ймовірності відмов FE та FC за 20000 годин експлуатації CEY

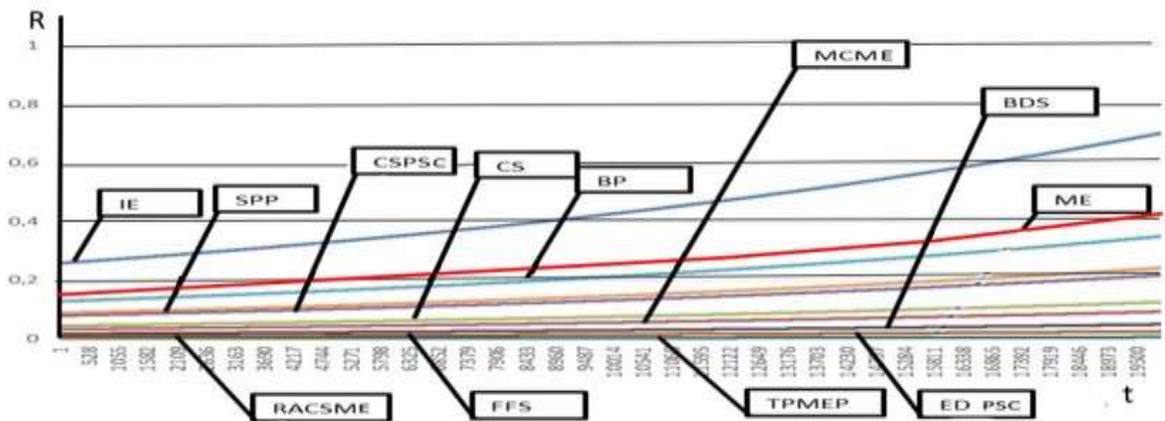


Рисунок 3.6 - Ризик відмов FE та FC за 20000 годин експлуатації CEY

З результатів досліджень слід, що одна з максимальних величин ризику відмови 0,35 за змін ризику відмови вхідного елемента складає від 0,26 до 0,70 за час експлуатації підсистем 20000 годин у підсистемі BP (рис. 3.6). Ця підсистема взаємозалежна при функціонуванні від інших підсистем CEY (IE, CAS, SPP). Максимальна величина ризику відмови склала 0,43 при змінах ризику відмови вхідного елемента від 0,26 до 0,70 за час експлуатації 20000 годин у підсистемі ME. Це пояснюється суттєвим впливом на ТС ME

пов'язаних з нею ІЕ – CAS – RACSME, ІЕ – МСМЕ – Р1, ІЕ – CAS – Р1. Для виявлення можливих причин відмови ВР проведено дослідження з використанням схеми пошуку причин відмови підсистеми ВР, наведеної на рис. 3.7. Чинники, що впливають на ТС ВР, позначені на рис.3.8.

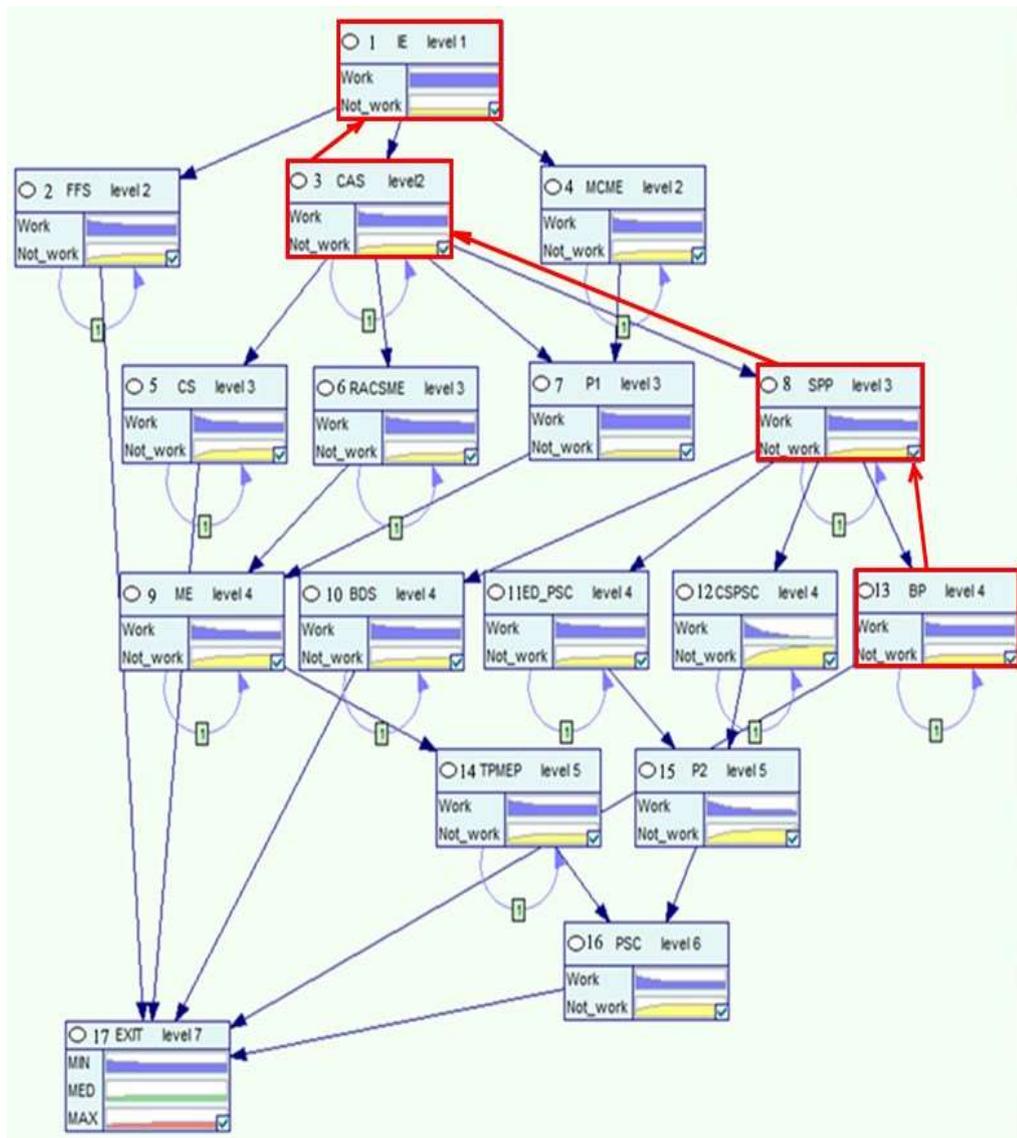


Рисунок 3.7 - Схема пошуку причин відмови підсистеми ВР



Рисунок 3.8 - Чинники, що впливають на ТС ВР

Пошук причин відмов підсистеми ВР динамічної БМД виконано відповідно до алгоритму, наведеного на рис.3.9.

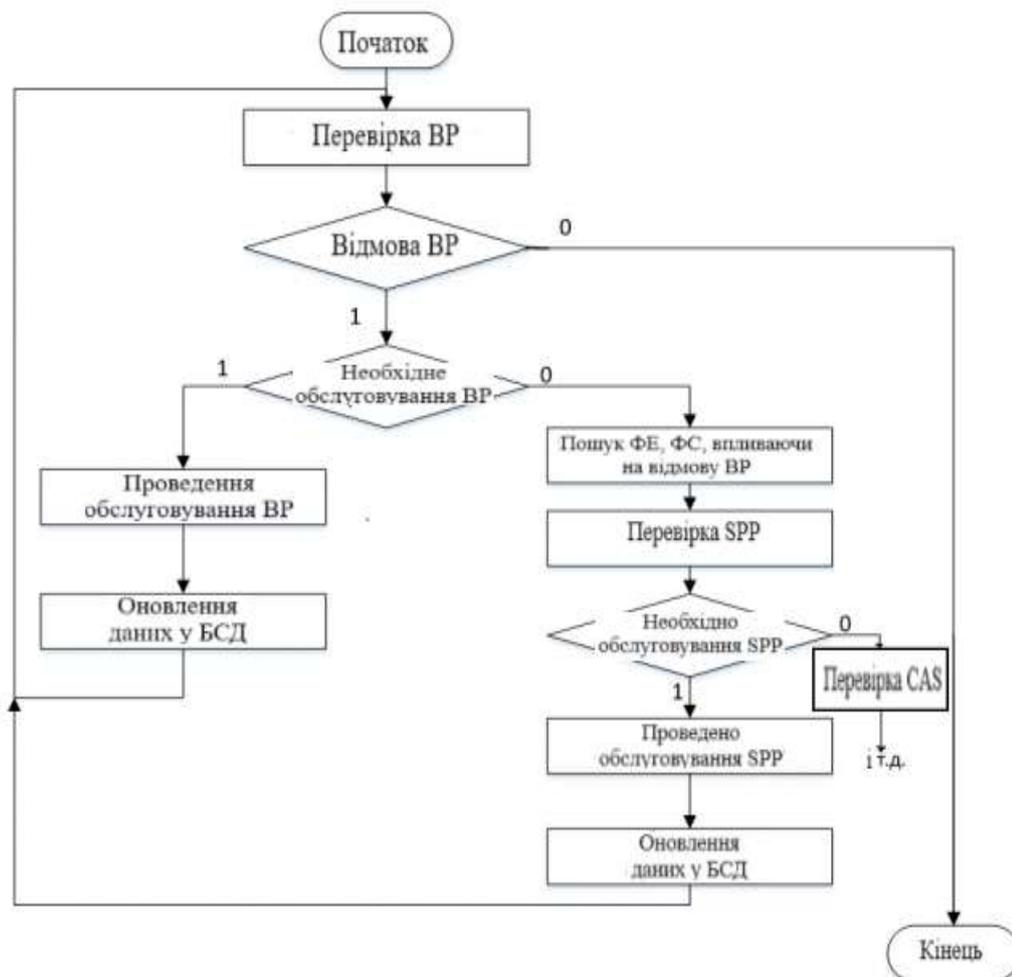


Рисунок 3.9 - Алгоритм пошуку несправності підсистеми ВР

При пошуку причин відмов підсистеми ВР для ФЕ БМД СЕУ (рис.3.9) ІЕ, CAS, SPP, ВР: ІЕ - CAS, CAS – SPP, SPP – ВР набори ризику відмов у початковий момент часу та з урахуванням динаміки ТС у часі на основі апріорних даних про інтенсивність відмов:

$$R(Work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_{t=0} = 0 ; R(Not\_work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_{t=0} = 1 ;$$

$$R(Work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{2,3,4})_{t=0} = 0 ;$$

$$R(Not\_work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{2,3,4})_{t=0} = 1 ; \quad (3.1)$$

$$R((Work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_t / (Work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_{t-1}) = 0,1 ;$$

$$R((Work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{2,3,4})_t / (Work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{2,3,4})_{t-1}) = 0,1$$

Набори ризику відмов у поточний момент часу з урахуванням попереднього ТС FE та FC можуть перебувати в межах:

- рівень ризику відмови оцінюється як мінімальний, наслідки аварії мінімальні за:

$$R((Not\_work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_t / (Work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_{t-1}) = 0,1 - 0,2; \quad (3.2)$$

$$R((Not\_work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{2,3,4})_t / (Work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{1,3,4})_{t-1}) = 0,1 - 0,2$$

- рівень ризику відмови оцінюється як допустимий, наслідки аварії незначні при:

$$R((Not\_work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_t / (Work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_{t-1}) = 0,2 - 0,37; \quad (3.3)$$

$$R((Not\_work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{2,3,4})_t / (Work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{1,3,4})_{t-1}) = 0,2 - 0,37$$

- рівень ризику відмови оцінюється як максимальний, наслідки аварії значні при:

$$R((Not\_work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_t / (Work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_{t-1}) = 0,37 - 0,63; \quad (3.4)$$

$$R((Not\_work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{2,3,4})_t / (Work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{1,3,4})_{t-1}) = 0,37 - 0,63$$

- рівень ризику відмови оцінюється як критичний при:

$$R((Not\_work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_t / (Work_{1,3,8,13}^{1,2,3,4})_{t-1}) = 0,63 - 1; \quad (3.5)$$

$$R((Not\_work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{2,3,4})_t / (Work_{IE-CAS,CAS-SPP,SPP-BP}^{1,3,4})_{t-1}) = 0,63 - 1$$

Розподіл ризику відмов FE і FC у динамічній БМД з урахуванням відмов та має вигляд:

- для розподілу ризику відмови ВР СЕУ:

$$\begin{aligned} R(Work_{13}^4)_t &= R((Work_{13}^4)_t / (Work_{13}^4)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \cdot R(Work_8^3)_{t-1} \times \\ &\times R(Work_{13}^4)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} \cdot R(Work_{SPP-BP}^4)_{t-1} + \\ + R(Work_{13}^4)_t &= R((Work_{13}^4)_t / (Not\_work_{13}^4)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \cdot R(Work_8^3)_{t-1} \times \\ &\times R(Not\_work_{13}^4)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} \cdot R(Work_{SPP-BP}^4)_{t-1} + \\ + R(Work_{13}^4)_t &= R((Work_{13}^4)_t / (Work_{13}^4)_{t-1}) \cdot R(Not\_work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \cdot R(Work_8^3)_{t-1} \times \\ &\times R(Work_{13}^4)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} \cdot R(Work_{SPP-BP}^4)_{t-1} + \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + R(Work_{13}^4)_t = R((Work_{13}^4)_t / (Work_{13}^4)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Not\_work_3^2)_{t-1} \cdot R(Work_8^3)_{t-1} \times \\
& \quad \times R(Work_{13}^4)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} \cdot R(Work_{SPP-BP}^4)_{t-1} + \\
& + R(Work_{13}^4)_t = R((Work_{13}^4)_t / (Work_{13}^4)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \cdot R(Not\_work_8^3)_{t-1} \times \\
& \quad \times R(Work_{13}^4)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} \cdot R(Work_{SPP-BP}^4)_{t-1} + \quad (3.6)
\end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
& + R(Work_{13}^4)_t = R((Work_{13}^4)_t / (Work_{13}^4)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \cdot R(Work_8^3)_{t-1} \times \\
& \quad \times R(Work_{13}^4)_{t-1} \cdot R(Not\_work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} \cdot R(Work_{SPP-BP}^4)_{t-1} + \\
& + R(Work_{13}^4)_t = R((Work_{13}^4)_t / (Work_{13}^4)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \cdot R(Work_8^3)_{t-1} \times \\
& \quad \times R(Work_{13}^4)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Not\_work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} \cdot R(Work_{SPP-BP}^4)_{t-1} + \\
& + R(Work_{13}^4)_t = R((Work_{13}^4)_t / (Work_{13}^4)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \cdot R(Work_8^3)_{t-1} \times \\
& \quad \times R(Work_{13}^4)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} \cdot R(Not\_work_{SPP-BP}^4)_{t-1}
\end{aligned}$$

- для розподілу ризику відмови SPP CEУ:

$$\begin{aligned}
& R(Work_8^3)_t = R((Work_8^3)_t / (Work_8^3)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \times \\
& \quad \times R(Work_8^3)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} + \\
& + R(Work_8^3)_t = R((Work_8^3)_t / (Not\_work_8^3)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \times \quad (3.7) \\
& \quad \times R(Not\_work_8^3)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} + \\
& + R(Work_8^3)_t = R((Work_8^3)_t / (Work_8^3)_{t-1}) \cdot R(Not\_work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \times \\
& \quad \times R(Work_8^3)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} + \\
& + R(Work_8^3)_t = R((Work_8^3)_t / (Work_8^3)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Not\_work_3^2)_{t-1} \times \\
& \quad \times R(Work_8^3)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} + \\
& + R(Work_8^3)_t = R((Work_8^3)_t / (Work_8^3)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \times \\
& \quad \times R(Work_8^3)_{t-1} \cdot R(Not\_work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Work_{CAS-SPP}^3)_{t-1} + \\
& + R(Work_8^3)_t = R((Work_8^3)_t / (Work_8^3)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \times \\
& \quad \times R(Work_8^3)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} \cdot R(Not\_work_{CAS-SPP}^3)_{t-1}
\end{aligned}$$

- для розподілу ризику відмови CAS CEУ:

$$R(Work_3^2)_t = R((Work_3^2)_t / (Work_3^2)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} + \quad (3.8)$$

$$\begin{aligned}
& + R((Work_3^2)_t / (Not\_work_3^2)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Not\_work_3^2)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} + \\
& + R((Work_3^2)_t / (Work_3^2)_{t-1}) \cdot R(Not\_work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \cdot R(Work_{IE-CAS}^2)_{t-1} + \\
& + R((Work_3^2)_t / (Work_3^2)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} \cdot R(Work_3^2)_{t-1} \cdot R(Not\_work_{IE-CAS}^2)_{t-1}
\end{aligned}$$

- для розподілу ризику відмови вхідного компонента СЕУ:

$$\begin{aligned}
R(Work_1^1)_t &= R((Work_1^1)_t / (Work_1^1)_{t-1}) \cdot R(Work_1^1)_{t-1} + \\
& + R((Work_1^1)_t / (Not\_work_1^1)_{t-1}) \cdot R(Not\_work_1^1)_{t-1}
\end{aligned} \quad (3.9)$$

Використання БМД в процесі діагностики ризику (ймовірності) втрати працездатності FE та FC має на меті отримання апостеріорних висновків. Для цього здійснюється перерахунок апріорних даних для оцінки значень ризиків чи ймовірності технічних відмов, які є початковою інформацією для аналізу нових даних. Апостеріорні висновки базуються на результатах проведення процесів аналізу даних, що отримані в результаті застосування БМД. Після моделювання з використанням апріорних та апостеріорних даних визначаються ймовірності (ризик) відмови FE і FC СЕУ, що впливають на працездатність головного двигуна системи, а також на роботу всієї системи за різні проміжки часу протягом 20000 годин (рис.3.10-3.32). Підтверджено, що найбільш критичні FE та FC, які мають найбільші прогнозовані ймовірності та ризик відмов є ВР, МЕ. Через те, що підсистеми ВР, МЕ є залежними у рівні ієрархічної структури СЕУ, тому було виконано перевірку СТС з метою пошуку причини значних величин значень ризиків (ймовірностей) їх відмов. Використання динамічної БМД забезпечило діагностування ймовірності (ризик) відмов СТС в ході моделювання взаємозв'язків між різними значеннями ймовірностей (ризиків) відмов. Результати розробки моделі діагностики СТС з неповними технологічними даними та її реалізація в інтелектуальній системі діагностування ризику відмов FE та FC суднової СТС критичного застосування дозволили отримати апріорну інформацію про ТС кожної підсистеми (компонента) складної системи.

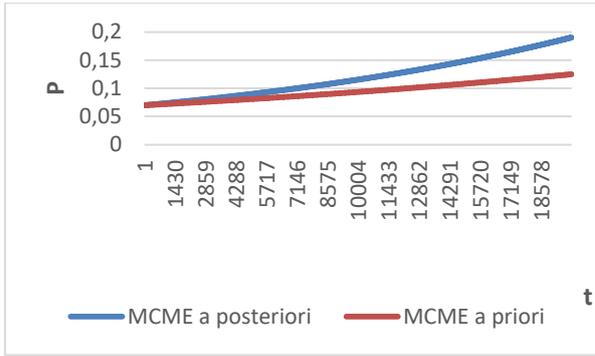


Рисунок 3.10 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми MCME

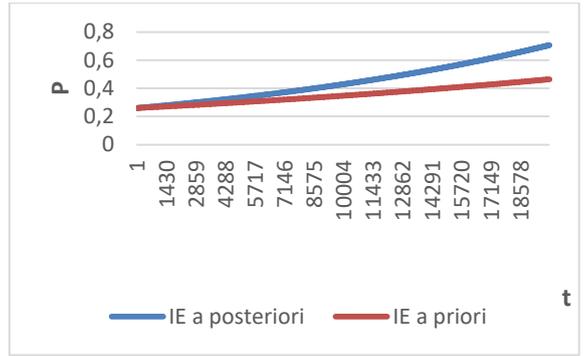


Рисунок 3.11 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми IE

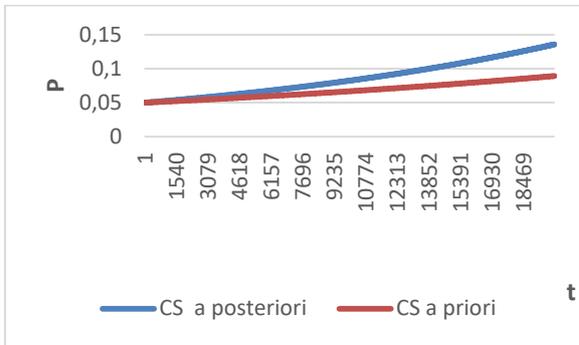


Рисунок 3.12 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми CS

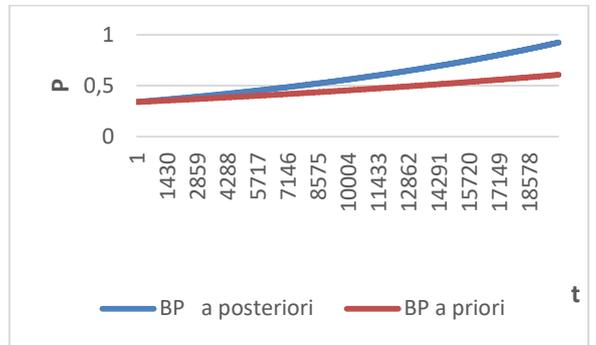


Рисунок 3.13 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми BP

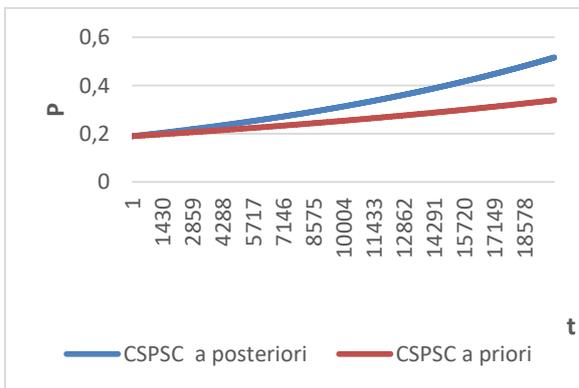


Рисунок 3.14 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми CSPSC

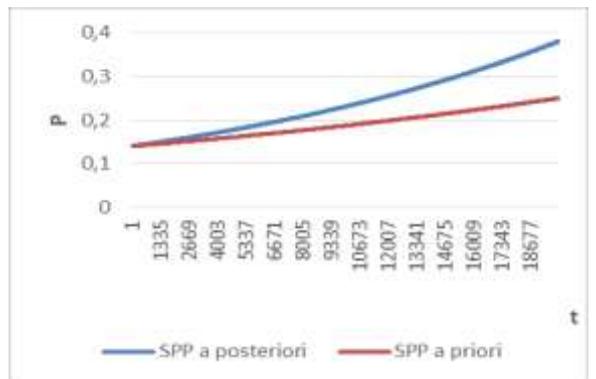


Рисунок 3.15 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми SPP

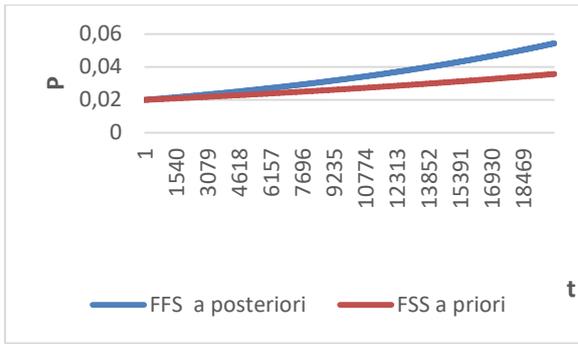


Рисунок 3.16 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми FFS

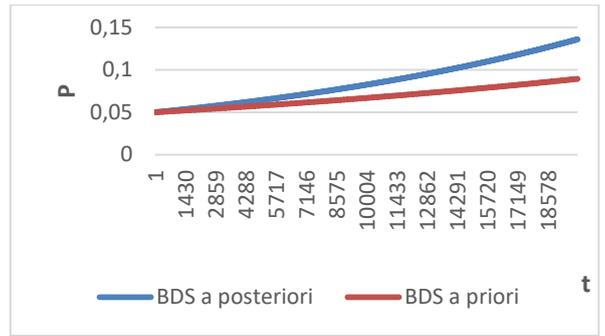


Рисунок 3.17 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми BDS

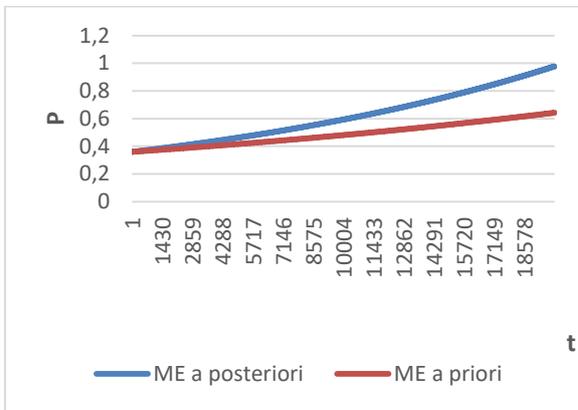


Рисунок 3.18 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми ME

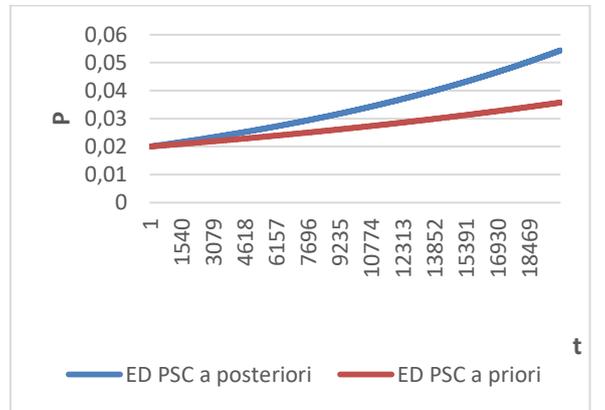


Рисунок 3.19 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми ED PSC

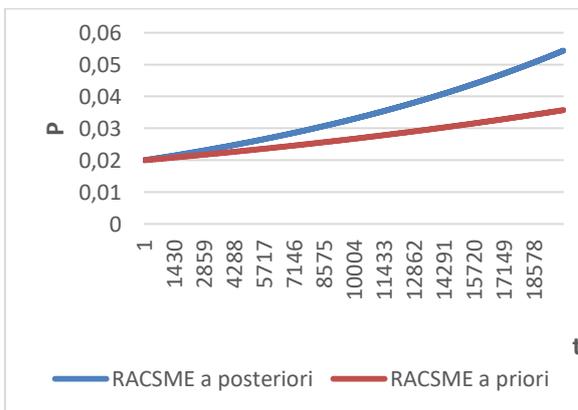


Рисунок 3.20 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми RACSME

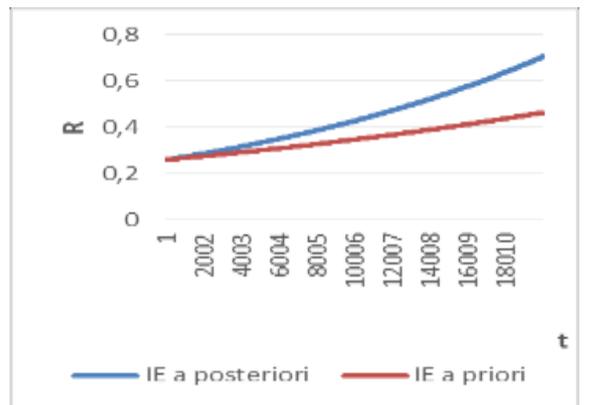


Рисунок 3.21 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови вхідного компонента CEU

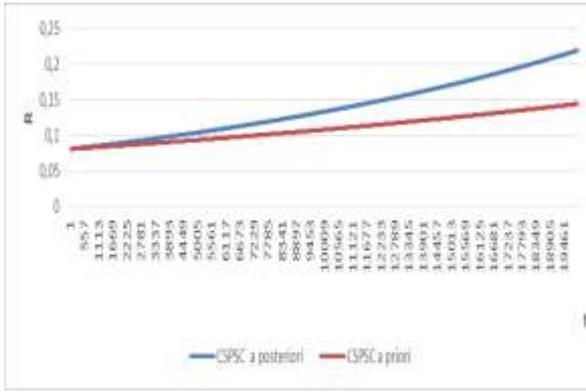


Рисунок 3.22 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови підсистеми CSPSC

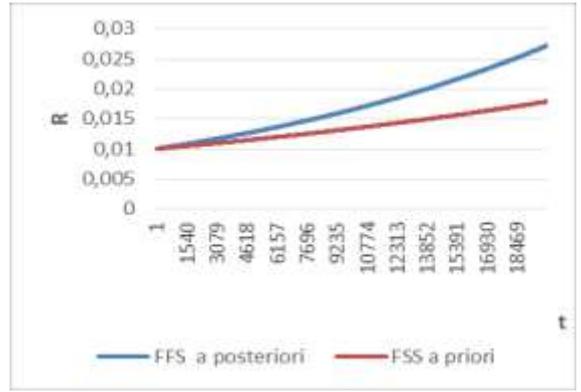


Рисунок 3.23 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови підсистеми FFS

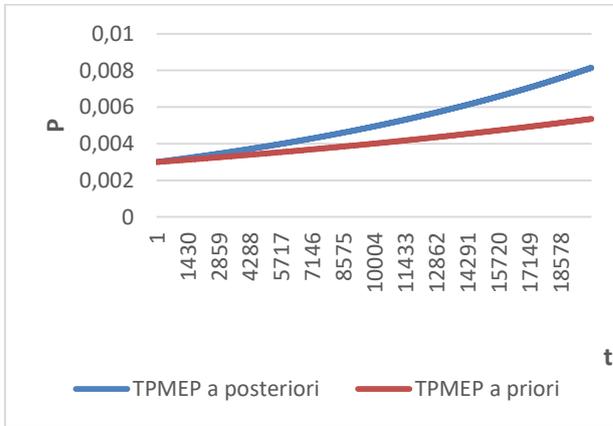


Рисунок 3.24 - Апостеріорні та апріорні оцінки ймовірності відмови підсистеми TPMEP

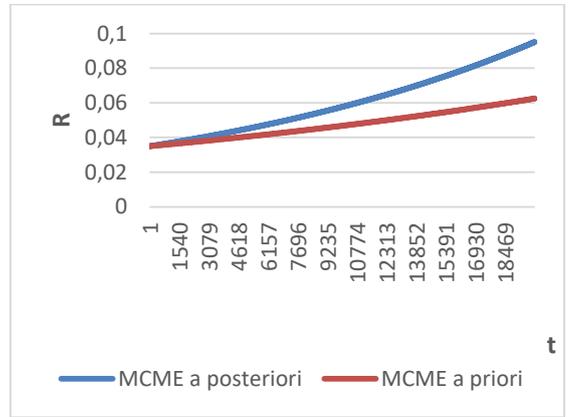


Рисунок 3.25 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови підсистеми MCME

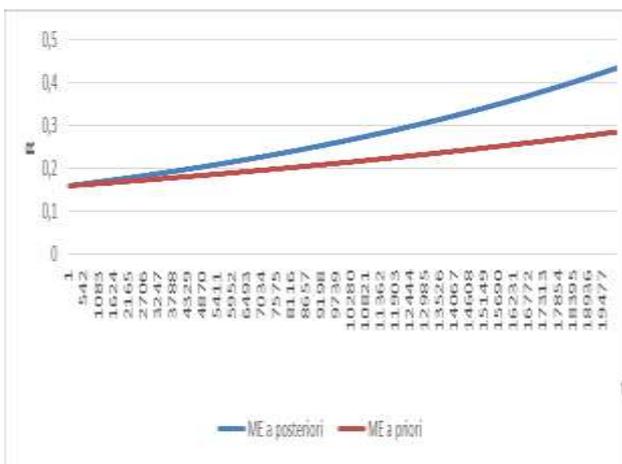


Рисунок 3.26 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови підсистеми ME

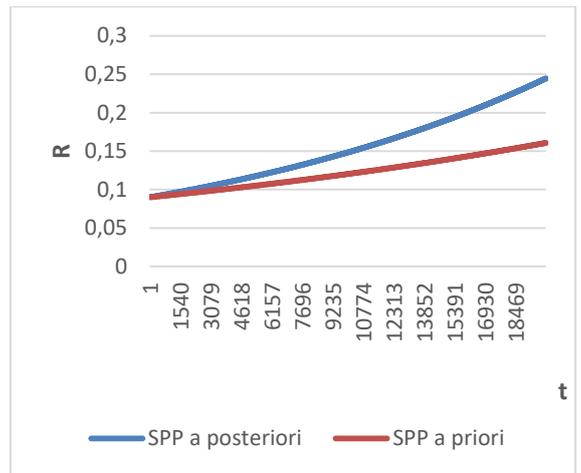


Рисунок 3.27 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови підсистеми SPP

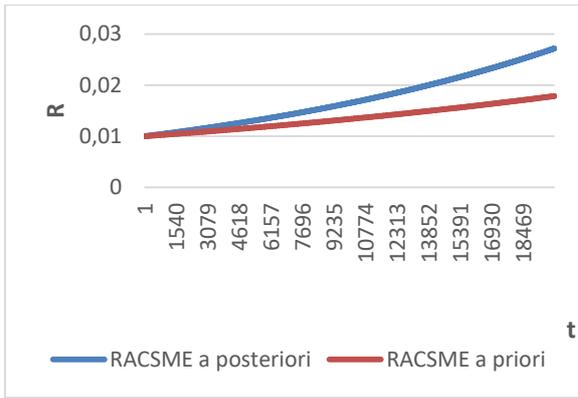


Рисунок 3.28 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови підсистеми RACSME

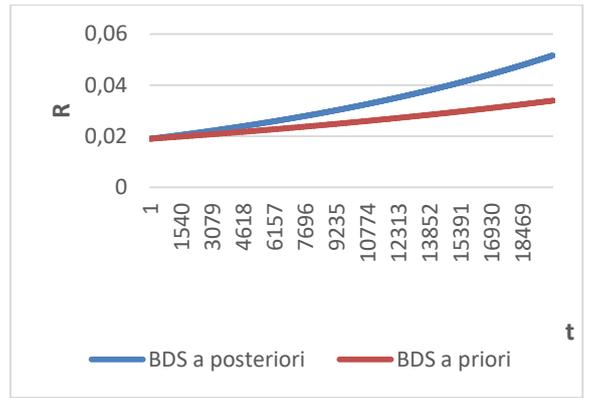


Рисунок 3.29 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови підсистеми BDS

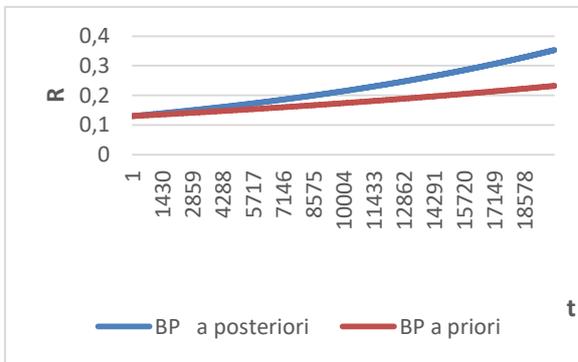


Рисунок 3.30 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови підсистеми BP

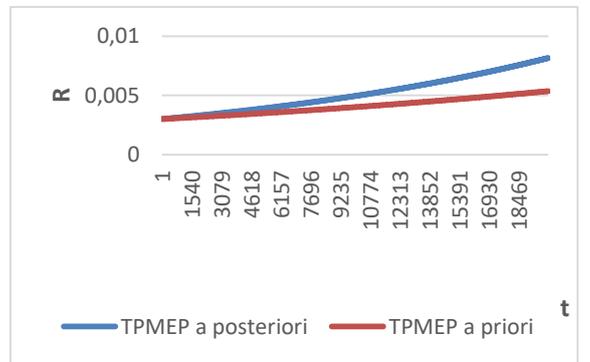


Рисунок 3.31 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови підсистеми TPMEP

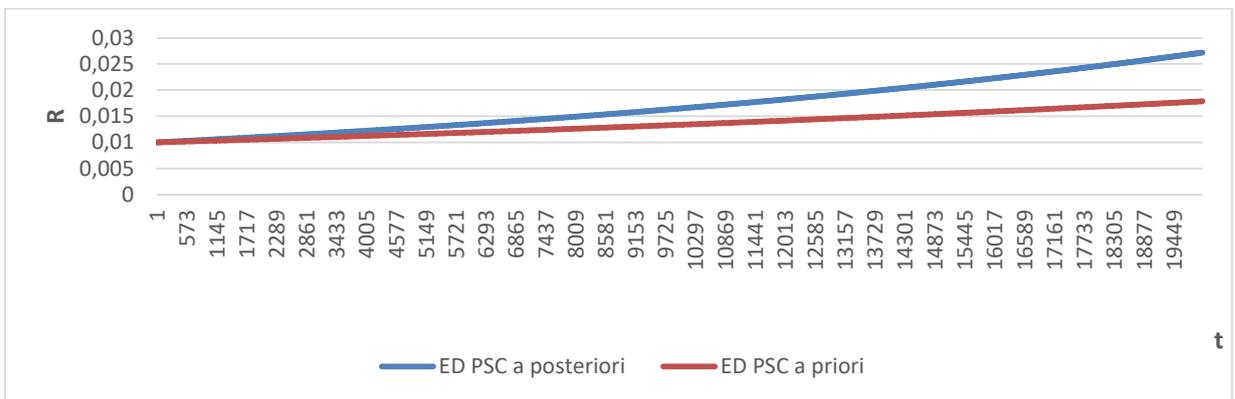


Рисунок 3.32 - Апостеріорні та апріорні оцінки ризику відмови підсистеми ED PSC

Апостеріорні характеристики, отримані за результатами досліджень при діагностуванні ТС СЕУ за 20 000 годин роботи, відповідають тому, що

FE і FC системи мають значення ризику відмов, що змінюються, дещо відрізняються від апріорних характеристик. Це не суперечить експертним значенням ризику відмов FE та FC суднової СТС у базі даних OREDA. Показник ТС СТС та її FE, FC - апостеріорний ризик відмови - орієнтований на достовірний висновок про відмови системи та її FE, FC. Обчислення апостеріорного розподілу змінних забезпечило отримання оцінок надійності СТС для мінімізації збитків від відмов підсистем (компонентів), а також дозволить зменшити ймовірність прийняття помилкового рішення. Проведені дослідження показали, що розроблена модель та метод з урахуванням ієрархічних рівнів FE та FC для інтелектуалізації діагностики ризику відмов СТС, а також при пошуку причин їх відмов дозволяє контролювати значення ризику (ймовірності) відмов при надходженні нової інформації про ризик (ймовірність) відмов FE та FC СТС у поточний та майбутній моменти часу протягом 20000 годин. Розглянуто метод інтелектуальної діагностики ризику відмов FE та FC СТС з різними ступенями відмов від працездатності та неповними даними про системи на прикладі СЕУ, заснованих на використанні апріорної інформації про відмови, що пов'язують види ТС FE та FC.

Діагностичні результати, що відображають ризик відмов FE та FC, підтвердили, що модель може розглядатися як концептуальна. Таким чином, проведені дослідження показали, що розроблена стохастична модель та метод діагностики ТС, що враховують часткові та повні відмови від працездатності з ретроспективним аналізом їх причин, виявленням найбільш уразливих FE та FC та впровадженням відповідних заходів, дозволяє виключити або зменшити ймовірність повторення відмов, виконати поставлене завдання для підвищення ефективності та надійності експлуатації FE та FC СТС.

Практична реалізація запропонованого методу за оцінками ризику відмов FE та FC СЕУ може поширюватися на будь-яку структуру СТС, будь-якого ступеня складності, з різними взаємозв'язками FE та FC СТС.

### 3.2 Дослідження та аналіз моделі когнітивного імітаційного моделювання діагностики технічного стану складних систем критичного застосування

Проведені дослідження у п.3.1. дозволили діагностувати ризик відмов FE та FC СТС, але без досліджень функціонування систем в екстремальній аварійній ситуації. Для діагностики ТС обладнання систем з урахуванням їх взаємного зв'язку та впливу, відстеження реакції систем на ризики відмов з неочевидними причинами розроблено когнітивну імітаційну модель.

Когнітивне імітаційне моделювання дозволяє доповнити отримані результати у п.3.1, проведенням досліджень моделей та методу діагностики ризику відмов FE та FC при імітації впливів на них в умовах малопередбачуваних зовнішніх умов, внутрішніх вражаючих факторів в екстремальних аварійних ситуаціях.

Мета КІМ полягає в генерації та перевірці гіпотез про ризик відмов СТС та отриманні ризики відмов FE та FC, що пояснюють причини виникнення відмов СТС. Однією з переваг інформаційної системи на основі КІМ СТС є можливість опрацювання сценаріїв різної ймовірності відмов, що відповідають на запитання «Що буде, якщо...?».

При проведенні досліджень враховується як положення і роль FE та FC у СТС, так і ризик (ймовірність) їх відмов при впливах ВМІ. Моделюється вплив ВМІ на систему у варіанті, найбільш наближеному до реальності. Це дозволяє оцінити можливі сценарії розвитку та наслідки враження FE та FC СТС. ВМІ поширюється від ураженого FE (вузла орграфа) до суміжних з ним FE (вузлів) переводячи їх у стан відмови. Для кожного з вузлів та для кожної дуги орграфа КІМ СТС вводиться показник відмови, що змінюється в діапазоні від 0 (вузол або дуга – відмова) до 1 (вузол чи дуга працездатні). ВМІ моделюється у вигляді імпульсного вектора, що містить значення ВМІ і вказують на ступінь ураження відповідного вузла орграфа в діапазоні від 0 до 1 (0 - вузол залишається неушкодженим, 1 - вузол повністю виводиться з

ладу). Прийнято, що ВМІ проходить дугою між двома вузлами орграфа за період дискретного часу.

Для реалізації поставленої задачі дослідження СТС на основі методу, реалізованого в КІМ діагностики ризику відмов СТС при пошуку причин відмов FE та FC було розроблено ПЗ, лістинг якого наведено в Додатку Г. При проведенні досліджень використовувався орграф на прикладі ДВЗ наведений у п. 2.2 (рис. 2.4). Активізація роботи моделі здійснювалася з урахуванням інструментів GNU make, візуалізація - за допомоги graphviz. Процес моделювання має структуру (рис.3.33): вихідна модель задається як файл у форматі JSON; програма Python обробляє модель, генеруючи масив таблиць у форматі CSV та діаграм у форматі DOT. Утиліта make обробляє DOT-файли за допомогою програми graphviz. В результаті формується масив діаграм ТЗ складної системи у форматі png.

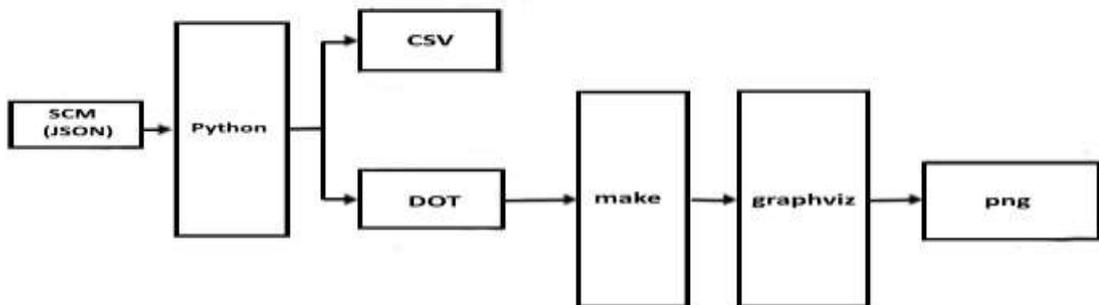


Рисунок 3.33 - Процес моделювання у середовищі Debian GNU /Linux

Для аналізу отриманих результатів використовується Calc Libre Office. Використання JSON формату надає можливість зручним та сбалансованим чином задавати структуру та конфігурацію наявного обладнання. Однією з переваг роботи з JSON-форматом є можливість формалізації повної специфікації системи (з числовими характеристиками вузлів, конфігурацією та орграфом міжвузлових зв'язків) у єдиному файлі. JSON-файл може редагуватися вручну засобами текстових редакторів чи за допомогою автоматизованих засобів збору та обробки інформації.

Проходження діагностичних імпульсів системою може бути уявлене у графічному вигляді чи у формі CSV-сценаріїв. З цього процесу генерується

окремий проміжний файл протоколу крокового проходження ВМІ, а також підсумковий CSV-файл із спільним узагальненням протоколів та розрахунком чисельних показників ризику відмов для різноманітних змін у системі. Отримані файли CSV, що генеруються окремо, містять розраховані характеристики для будь-якого з FE СТС відповідно до вказаної топології. Ці CSV-файли можуть бути використані в різноманітних аналітичних програмних засобах, таких як табличні редактори, зокрема Microsoft Excel чи Libre Office, або в більш складних системах візуалізації, наприклад gnuplot, R, Statistica, Seaborn. Шляхом поєднання форматів JSON, CSV та DOT система працює з конфігурацією та аналізує СТС з урахуванням різних аспектів, як візуального, так і автоматичного, а також у їх комбінації.

Попередній аналіз отриманих характеристик може бути проведений візуально, користуючись діаграмами проходження ВМІ. Методи, які використовують автоматичну поведінку, застосовують CSV-файли для аналізу характеристик системи в чисельному вигляді, а також для генерації та аналізу рішень.

Таким чином, метод діагностики ризику відмов FE у різних умовах їх експлуатації в рамках СТС базується на виконанні опису функціоналів станів та КІМ структурних FE систем. Це забезпечує оцінку рівня працездатності FE СТС за результатами впливів ВМІ на КІМ, а також значення впливу відповідних FE на загальну структуру системи у різних аварійних сценаріях.

Визначення значень вектора ВМІ виконується послідовним чином перед кожною з виконуваних ітерацій його проходження по усіх вершинах та ребрах орграфа КІМ СТС. У разі, якщо ВМІ не було досягнуто кінцевих вершин орграфа виконується наступна обчислювальна ітерація, отримані значення вектора ВМІ у такому разі записуються до текстового файлу та можуть бути використані у подальшому для проведення оцінки структурної відмови КІМ ТС по ребрах або вершинах побудованого орграфа. Після остаточного припинення циклу оцінки структурного ризику відмов по КІМ СТС здійснюється процедура аналізу текстового файлу. На основі отриманих

значень вектора ВМІ виконується етап розрахунків значень коефіцієнтів структурної загрози та ризику відмов, які виводяться у вікні програми та також додаються до текстового файлу. На базі отриманих результатів моделювання в КІМ сформовано значення оцінок структурних збитків та ризику відмов від ймовірностей виходу з ладу для FE та FC ДВЗ та виконано ранжування результатів розрахунків (рис. 3.34 - 3.37).

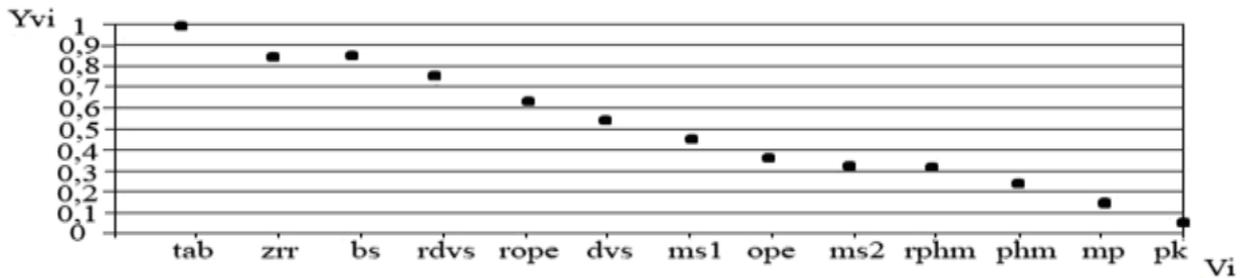


Рисунок 3.34 - Ранжування результатів оцінок структурних збитків FE

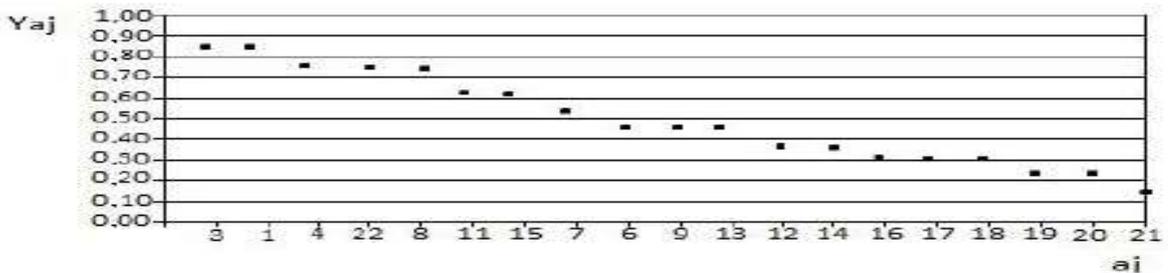


Рисунок 3.35 – Ранжування результатів оцінок структурних збитків FC

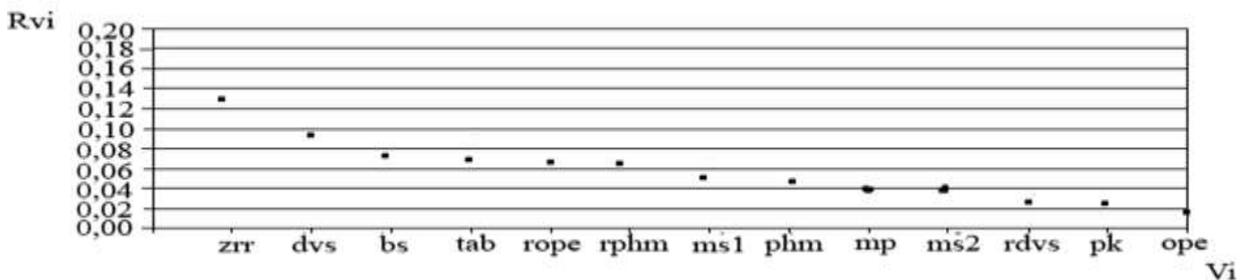


Рисунок 3.36 – Ранжування результатів оцінок структурного ризику відмов FE

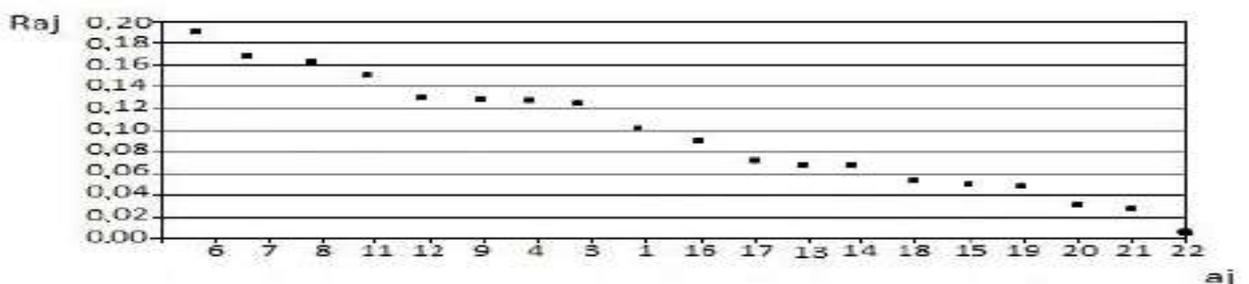


Рисунок 3.37–Ранжування результатів оцінок структурного ризику відмов FC

З результатів досліджень випливає, що істотний вплив на процес поширення ВМІ за оргграфом КІМ СТС здійснює застосування ВМІ.

Враховуючи такі структурні особливості оргграфа, як зв'язність, наявність контурів, вразливість його вершин і тип ресурсу FC були встановлені найбільш зв'язні FE оргграфа, на які впливають FC.

Результати досліджень структурних збитків FE ДВЗ показали, що найбільш критичними FE є ТАБ, БС та РДВС, що обумовлено високими значеннями їх структурної шкоди від відмов (1,0, 0,85 та 0,75). Менш критичними елементами є МП, ВК ДВЗ, саме механічна передача, провідні колеса мають дещо менші значення структурних збитків від відмов (0,15 і 0,05). До менш уразливих FE ДВЗ з підсистемами відноситься регулятор ОПЕ (0,02). Порівняно невисокі значення структурного ризику відмов FE СТС зумовлені малою структурною шкодою від відмов обладнання. Це підтверджує правильну задану при проектуванні топологію компонування FE та FC ДВЗ.

Розроблена КІМ СТС дозволила обґрунтувати можливість використання ВМІ для діагностики ризику відмов FE та FC СТС.

Перевагами розробленої КІМ, що використовується, є простота, наочність і можливість застосування для діагностики ризику відмов широкого класу СТС. Процедури КІМ легко формалізуються та трансформуються у обчислювальний алгоритм та модель для діагностики ризику відмов, що важливо для СТС з великою кількістю FE та FC.

Таким чином, проведені дослідження показали, що розроблена КІМ відображає пряму залежність ризику відмов FE та FC СТС від її топології та дозволяє виявити найменш працездатні FE та FC СТС, функціонування яких суттєво відбивається на працездатності, ефективності та надійності експлуатації системи.

### 3.3 Висновки до третього розділу

У третьому розділі наведено результати дослідження та аналізу стохастичних моделей та методу діагностики ТС складних систем КЗ.

Мета дослідження розроблених моделей полягає у діагностуванні ТС вразливих підсистем, компонентів, елементів та їх взаємних зв'язків СТС у часі з урахуванням часткових та повних відмов від працездатності. Під час проведення досліджень як об'єкт обрано СЕУ. Вхідними даними для моделювання діагностування ризику (ймовірності) відмов системи на основі БМД є: схема та принцип роботи об'єкта; експертні оцінки.

Для імітації впливів на обладнання СТС в умовах малопередбачуваних зовнішніх впливів внутрішніх вражаючих факторів та в екстремальних аварійних ситуаціях здійснено когнітивне імітаційне моделювання. При моделюванні використовують вплив вражаючого моделюючого імпульсу на систему у варіантах, найбільш наближених до реальних умов експлуатації СТС. Реалізація когнітивного імітаційного моделювання забезпечено розробкою програмного забезпечення. Процедури методу легко трансформуються в модель для діагностики ризику (ймовірності) відмов, що важливо для СТС з великою кількістю обладнання. Це дозволило відстежити наслідки та реакції СТС на ризик (ймовірність) відмов обладнання з неочевидними джерелами та причинами. Використання методу для діагностування ризику (ймовірності) відмов обладнання у СТС дозволяє виявляти, візуалізувати структурні та функціональні вразливості.

Методи інтелектуальної діагностики ризику відмов підсистем, компонентів, елементів з різним ТС та неповними даними у термінах технічних та технологічних основ побудови на прикладі СЕУ підтвердили, що створені моделі можуть розглядатися як концептуальні. Застосування результатів досліджень розроблених моделей з ретроспективним аналізом аварійних ситуацій дозволяє підвищити ефективність діагностики ТС, а, значить, ефективність експлуатації СТС.

## РОЗДІЛ 4

РОЗРОБКА МЕТОДУ ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО  
СТАНУ СКЛАДНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

4.1 Розробка методу оцінки та прогнозування на основі методу міркувань прецедентів технічного стану складних систем критичного застосування

Зростання складності технічних систем, різноманітність їх параметрів і недостатність опису ТС вимагають удосконалення управлінських рішень в умовах невизначеності щодо забезпечення ефективності та надійності FE та FC систем, що ґрунтуються на результатах оцінки, прогнозування їх ТС. З метою підвищення ефективності експлуатації суднових СТС КЗ прийняття рішень ускладнюється у зв'язку з необхідністю врахування значної кількості різноманітних факторів. Насамперед це: необхідний великий обсяг інформації про ТС; врахування взаємного впливу FE та його параметрів один на одного; часткові та повні відмови. При експлуатації СТС актуальною задачею залишається розробка та вдосконалення методів, спрямованих як на діагностику ТС систем, так на оцінку і прогнозування ТС. Тобто, розробка ІС для оцінок та прогнозування ТС FE та FC суднових СТС при несприятливих впливах та вражаючих факторах є один із перспективних напрямів у забезпеченні ефективності та безпеки функціонування таких технічних систем.

В результаті проведеного аналізу методів для оцінок та прогнозування ТС FE та FC СТС обрано метод структурного відображення в силу його переваг, що полягають у: можливості формалізації характеру багатозв'язних ієрархічних взаємодій між FE систем; ефективному застосуванні для СТС, що функціонують у стохастичних умовах; гнучкості імплементації продукційного підходу до формування БЗ у ІС; зручності програмної реалізації на базі об'єктно-орієнтованого підходу; підтримці можливостей

інтеграції засобів автоматизації для забезпечення інтерактивної інтерпретації результатів. Для практичної реалізації та експлуатації системи ІС необхідно пов'язати запропоновані моделі та методи (розділи 2 та 3) з різномірною апріорною інформацією, що включає показники діагностування ТС складних систем з експертною системою, що містить розрахункові, експериментальні, а також дані, отримані експертами під час роботи СТС.

Розробка методу міркувань на основі прецедентів технічного стану складних систем критичного застосування містить етапи:

1. Подання прецеденту набору параметрів з конкретними значеннями та рішеннями.
2. Введення даних діагностики ТС складної системи КЗ в ІС оцінки та прогнозування ТС складної системи.
3. Отримання даних оцінок та прогнозування ТС складної системи КЗ.
4. Передача даних оцінок та прогнозування ТС складної системи ОПР.

ІС можуть бути реалізовані як у вигляді окремих stand-alone рішень, так і у вигляді модулів, що доповнюють необхідним функціоналом готові системи управління та прийняття рішень загального призначення. Вони дозволять оперативно приймати рішення на етапі усунення наслідків несприятливих впливів та вражаючих факторів, забезпечити ефективність експлуатації суднових СТС завдяки можливості оцінювання та прогнозування їх ТС [155, 157].

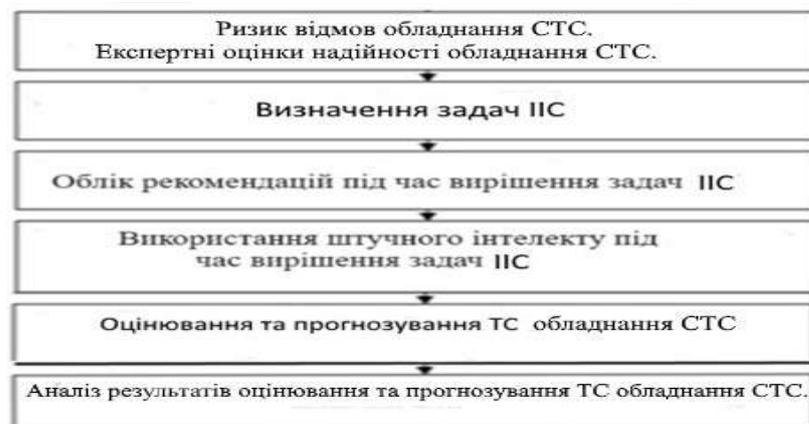


Рисунок 4.1 - Стратегія ІС під час оцінки та прогнозування ТС складних систем

Реалізація стратегії в ПС оцінки та прогнозування ТС складних систем (рис. 4.1) забезпечується цілеспрямованими діями відповідно до алгоритму ПС (рис. 4.2) для пошуку відмов у FE та FC на основі оцінок ризику відмов.

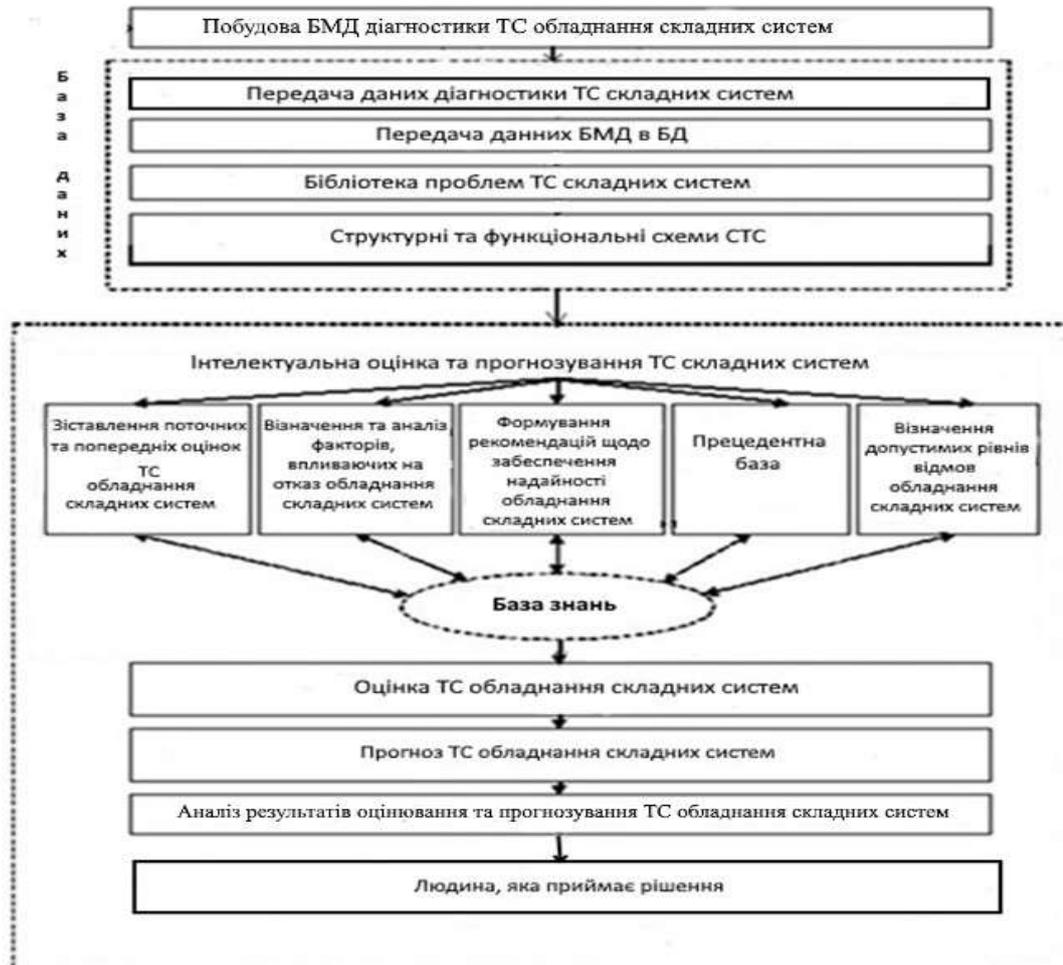


Рисунок 4.2 - Алгоритм ПС під час пошуку відмов СТС

В основі побудови ПС лежить постановка завдання ухвалення рішення у загальному вигляді:

$$N = f(F, G, A, FR, SG, P, C, PC, NS), \quad (4.1)$$

де  $F$  – кількість відмов FE та FC СТС;

$G$  – множини поставлених цілей;

$A$  – множини можливих альтернатив;

$FR$  - множини рівні відмов FE та FC СТС;

$SG, P, C$  – сукупність характеристик, переваг, критеріїв забезпечення надійності FE та FC СТС;

*PC* – множини принципів координації оцінки альтернатив з урахуванням індивідуальних критеріїв;

*NS* – необхідне вирішення проблеми

Перевага *F* – оцінка корисності методу досягнення мети. Вона уточнюється без виділення ознак, за якими зроблена або без характеристик *SG*. До характеристик належить ступінь досягнення мети. Щоб зробити остаточний вибір способу досягнення мети, необхідно сформулювати критерії, кількість яких визначається кількістю ознак. Якщо в *ПС* використовується кілька критеріїв, необхідно застосувати принципи координації *PC* для узгодження оцінки альтернатив по кожному критерію.

Проблемно-орієнтована модель *БЗ* у *ПС* заснована на наступних списках:

- *FE* та *FC*, що впливають на безаварійну роботу *СТС*;
- стану знаходження *СТС* при безвідмовній роботі *FE* та *FC* системи;
- фактори, під впливом яких може змінитись поточна надійність *СТС*;
- проблемні стани, які можуть перейти *СТС* під впливом відмов обладнання.

База знань представлена у вигляді п'ятирівневого ієрархічного дерева (рис. 4.3). Врахування ієрархічної структури *БЗ* дозволяє швидко локалізувати причину дефекту або відмови і скоротити час оцінки *ТС* складної системи. Набуття та додавання знань здійснюється автоматично в процесі навчання та впровадження експертної системи. Наповнення знаннями забезпечується експертом, а також за допомогою адаптації *БЗ* до змін предметної галузі та умов її функціонування. Це реалізується шляхом заміни правил або інформації *БЗ* у *ПС*. Основні обмеження методів і технологій, що використовуються в даний час *ПС*, полягають у розв'язанні складних формалізованих проблем, що виникають через недостатню ефективність: розв'язування задач навчання, налаштування та адаптації до проблемної галузі; обробки неповної та неточної вихідної інформації; інтерпретації даних та накопичення експертних знань. Ці обмеження в *ПС*

усуваються використанням методу міркувань на основі прецедентів (CBR) [162].

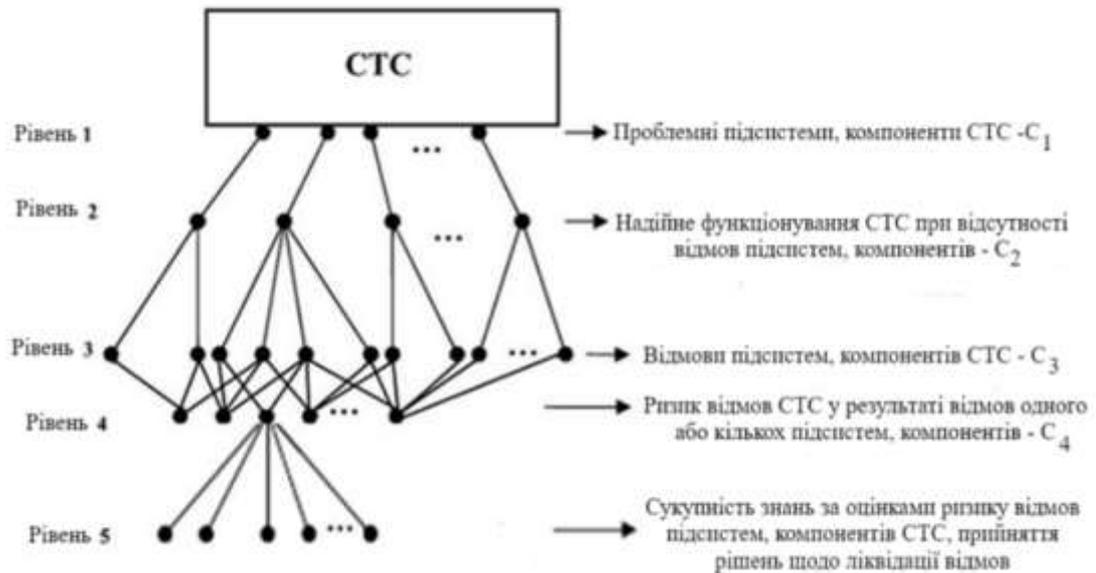


Рисунок 4.3 - Багаторівнева ієрархічна структура дерева бази знань

Розробка та дослідження ІС, що використовує CBR, з метою збільшення ефективності реалізації механізмів навчання та адаптації до специфіки проблемного середовища для відповідних конкретних додатків, а також підвищення ефективності прийняття рішень ОПР за результатами оцінки, прогнозування ТС складних систем є актуальним.

Така розробка та дослідження здійснено з урахуванням: часткових та повних відмов від працездатності FE та FC; прецедентної моделі знань на основі моделі динаміки ТС від справного стану до повної відмови. Модель динаміки ТС враховує причинно-наслідкові зв'язки та ієрархічну структуру СТС, що складається з: елементів (E); компонентів (C); підсистем (S); СТС (CTS).

Опис проблемної ситуації при експлуатації СТС полягає у наслідках від часткової або повної втрати працездатності FE та FC складної системи.

При використанні методу міркувань на основі прецедентів для уявлення прецедентів досить простого параметричного уявлення, тобто. подання прецеденту у вигляді набору параметрів з конкретними значеннями

та рішеннями (оцінками, прогнозами ТС та рекомендаціями ОПР):

$$CASE = \left( R, P, D, W_{\vartheta_{S(C,E)n(m)}}^f, W_{\omega_{I_{S(C)a(z)}}}^f, RE, FS, RF, FF, DR \right), \quad (4.2)$$

де  $R, P, D$ , - параметри (ризик, ймовірність, збиток), що описують прецедент;

$R \{ R_{S(C,E)n(m)}, R_{I_{S(C)a(z)}} \}$  - множини оцінок ризику відмов FE та FC СТС та рекомендації ОПР;

$P \{ P_{S(C,E)n(m)}, P_{I_{S(C)a(z)}} \}$  - множини оцінок ймовірностей відмов FE та FC СТС та рекомендації ОПР;

$D \{ D_{S(C,E)n(m)}, D_{I_{S(C)a(z)}} \}$  - множини оцінок збитків від відмов FE та FC СТС та рекомендації ОПР;

$W_{\vartheta_{S(C,E)n(m)}}^f$  - оцінки працездатності (часткової або повної) FE та рекомендації ОПР;

$W_{\omega_{I_{S(C)a(z)}}}^f$  - оцінки працездатності (часткової або повної) FC та рекомендації ОПР:

$RE$  – множини уточнених певних оцінок параметрів ТС FE та FC СТС, прийняття рішень ( $re_1, \dots, re_N \in RE$ );

$FS$  - збереження множини уточнених оцінок параметрів ТС FE та FC СТС, прийнятих рішень;

$RF$  - множини уточнених певних прогнозованих значень параметрів ТС FE та FC СТС, прийняття рішень ( $rf_1, \dots, rf_N \in RF$ );

$FF$  - збереження множини уточнених прогнозованих значень параметрів ТС FE та FC СТС, прийнятих рішень;

$DR$  - діагноз та рекомендації ОПР [99];

$$R_{s(c,e)n(m)} = \{ r_{s(c,e)n(m)} \mid \overline{s(c,e) = 1, S(C,E)}, \overline{n_{s(c,e)} = 1, N_{S(C,E)}}, \overline{m_{s(c)} = 1, M_{S(C)}} \}, \quad (4.3)$$

$$R_{I_{s(c)a(z)}} = \{ r_{I_{s(c)a(z)}} \mid \overline{i_{s(c)} = 1, I_{S(C)}}, \overline{a = 1, A}, \overline{z = 1, Z} \},$$

де  $r_{s(c,e)n(m)}$  - ризик відмов FE СТС;

$r_{i_{s(c) a(z)}}$  - ризик відмов FC СТС;

$n_{s(c,e)}$  - номер FE в СТС;

$m_{s(c)}$  - номер ієрархічного рівня FC СТС;

$N_{S(C,E)}$  - число FE СТС;

$M_{S(C)}$  - кількість ієрархічних рівнів FC СТС;

$S, C, E$  – FE СТС;

$I_S, I_C$  – FC СТС;

$n, m$  – номер, ієрархічний рівень у СТС;

$a$  – номер міжкомпонентного зв'язку;

$z$  – номер міжсистемного зв'язку.

$A$  - кількість міжкомпонентних зв'язків;

$Z$  - число міжсистемних зв'язків

$$P_{S(C,E)n(m)} \cdot \lambda(t)_{S(C,E)n(m)} = \frac{\alpha_{S(C,E)n(m)} \cdot \exp(-\alpha_{S(C,E)n(m)} \cdot T_{S(C,E)n(m)})}{\exp(-\alpha_{S(C,E)n(m)} \cdot T_{S(C,E)n(m)})} = \alpha_{S(C,E)n(m)}, \quad (4.4)$$

$$P_{I_{S(C)a(z)}} \cdot \lambda_{I_{S(C)a(z)}}(t) = \frac{\alpha_{I_{S(C)a(z)}} \cdot \exp(-\alpha_{I_{S(C)a(z)}} \cdot T_{I_{S(C)a(z)}})}{\exp(-\alpha_{I_{S(C)a(z)}} \cdot T_{I_{S(C)a(z)}})} = \alpha_{I_{S(C)a(z)}}$$

де  $\lambda$  - інтенсивність відмов;

$\alpha$  – параметр розподілу,  $\alpha \approx 1/\widehat{T}_0$ ,  $\widehat{T}_0$  – оцінка середнього напрацювання до відмови

Кількісна оцінка збитків від відмови  $n(m,e)$  - підсистеми, компонента, елемента для визначення ризику відмови:

$$D_{S(C,E)n(m)} = \{d_{s(c,e)n(m)} \mid s(c,e) = \overline{1}, S(C,E), n = \overline{1}, N, m = \overline{1}, M\}, \quad (4.5)$$

де  $d_{s(c) n(m)}$  - збитки від відмови FE СТС

Кількісна оцінка збитків від відмови  $a(z)$  - ої FC визначення ризику відмови:

$$D_{I_{S(C)a(z)}} = \{d_{I_{S(C)a(z)}} \mid i_{s(c)} = \overline{1}, I_{S(C)}, a = \overline{1}, A, z = \overline{1}, Z\}, \quad (4.6)$$

де  $d_{i_{s(c)a(z)}}$  - збитки від відмови FC

Працездатність FE при різних ступенях її втрати:

$$W_{v_{S(C,E)n(m)}}^f = \{W_f^{<n_{s(c)}, m_{s(c)}>} \mid f = \overline{0,1}; n_{s(c,e)} = \overline{1}, N_{S(C,E)}; m_{s(c)} = \overline{1}, M_{S(C)}\} \quad (4.7)$$

Працездатність FC при різних ступенях її втрати:

$$W_{\omega_{I_{S(C)a(z)}}}^f = \{W_f^{<a,z>} \mid f = \overline{0,1}; a = \overline{1}, A; z = \overline{1}, Z\} \quad (4.8)$$

У процесі функціонування FE СТС в аварійних сценаріях з урахуванням узагальненої функції бажаності Харрінгтона можуть перебувати в одному з наступних ТС [99]: 0 - 0,2 - рівень ризику та наслідки мінімальні, що не впливають на експлуатацію СТС (RMi); 0,2 - 0,37 - рівень ризику допустимий та наслідки незначні, що дозволяють експлуатувати СТС без ремонту (RA); 0,37 – 0,63 – рівень ризику максимальний, наслідки значні, але що дозволяють експлуатувати СТС при виконанні ремонтних робіт (RMa); 0,63 – 1,0 – рівень ризику критичний, наслідки катастрофічні, що не дозволяють експлуатувати СТС (RC). З урахуванням [173] для ієрархічної структури СТС переходи ТС можна у вигляді матриці ТС (рис.4.4). На рис.4.4  $k_e$ ,  $k_c$ ,  $k_s$  – коефіцієнти ваги (значущості) елемента, компонента, підсистеми у структурах СТС.

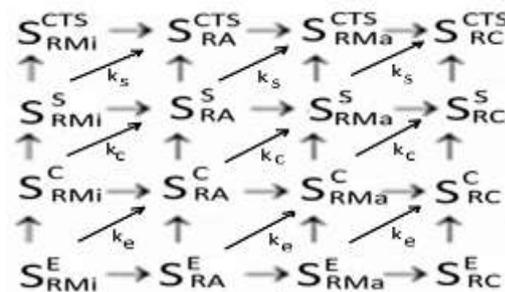


Рисунок 4.4 - Матриця ТС СТС

Сформульовано **четвертий пункт наукової новизни:** набув подальшого розвитку метод міркувань на основі прецедентів, що дозволило забезпечити оцінку та прогнозування технічного стану та підвищити працездатність складних систем критичного застосування.

#### 4.2 Розробка моделі прийому та передачі даних при діагностиці, оцінці та прогнозуванні технічного стану складних систем критичного застосування

Для успішного вирішення проблеми ефективної, безаварійної експлуатації СТС у позаштатних режимах роботи необхідно використовувати інформаційні технології з програмними та апаратними модулями для прийому та передачі результатів діагностування, оцінки та прогнозування ТС складних систем [1, 174, 175]. Якість роботи системи прийому та передачі даних визначається (СППД) сукупністю множини характеристик, що впливають на ефективність її роботи: топологія; пропускна здатність; швидкодія; допустима величина похибки прийому та передачі даних; ефективність захисту інформації у системі, ризик відмов пристроїв СППД.

При розробці моделі прийому та передачі даних при діагностиці, оцінці та прогнозуванні ТС складних систем КЗ необхідно враховувати наявність множини суперечливих вимог та конкуруючих критеріїв. З метою обґрунтованого вибору топології СППД необхідно розв'язувати задачу багатопараметричної, багатокритеріальної оптимізації інформаційних параметрів, спрямовані на підвищення швидкодії, мінімізації похибки та ризику відмов підсистем, компонентів, елементів СТС, максимального захисту інформації, що приймається та передається.

Застосування методів оптимізації для розв'язування практичних задач багатокритеріальної, багатопараметричної оптимізації [176, 177] має враховувати: велику розмірність задач (десятки та сотні змінних і обмежень); топологічну складність оптимізованої функції; значні обчислювальні витрати; необхідність розв'язування задачі у багатокритеріальній постановці, використання не пов'язаних між собою моделей.

Експлуатація відкритої платформи для СППД може спиратися на стандарти ISO в області Condition monitoring and diagnostics of machines [178]. Використання стандартної бази дозволяє забезпечити уніфікацію підходів

щодо прийому та передачі інформації. Прийом та передача інформації здійснюється на основі використання одного із стандартів для цифрових СППД інформації IEEE 802.15, WiMax, IEEE 802.22, UMTS, LTE.

Якість роботи моделі СППД визначається сукупністю множини характеристик, що впливають на ефективність її роботи: топологія  $\{F_o\}$ ; пропускна здатність  $\{B\}$ ; швидкодія  $\{T_\Sigma\}$ ; допустима величина похибки прийому та передачі даних  $\{\sigma\}$ ; ефективність захисту інформації у системі  $\{Z_\Sigma\}$ , ризик відмов пристроїв СППД  $\{R_\Sigma\}$ .

Приймаємо, що модель, яка описує СППД лінійна як з детермінованими, так і зосередженими стохастичними параметрами. Сукупність показників якості моделі можна записати у вигляді вектора, координати якого є приватними показниками, та їх задані значення потрібно покращити, підвищити до потрібного рівня.

Запропоновано модель прийому та передачі даних при діагностиці, оцінці та прогнозуванні ТС складних систем критичного застосування у функції від функціоналу:

$$\langle MPP \rangle = f(H), \quad (4.9)$$

$$H = \{\{F_o\}, \{T_\Sigma\}, \{B\}, \{\sigma\}, \{R_\Sigma\}, \{Z_\Sigma\}\},$$

Узагальнений показник якості функціонування СППД визначається за результатами оптимізації інформаційних параметрів та її характеристик надійності. Цільова функція оптимізації інформаційних параметрів моделі є багатопараметричною оптимізацією змінних, що впливають на ефективність роботи СППД:

$$\varphi(F) = \max \varphi(F_o) = \max \varphi(D, B, C), \quad (4.10)$$

$$D = \{D_o \in D | D_{\min} < D < D_{\max}\}, K = \{K_o \in K | K_{\min} < K < K_{\max}\}, C = \{C_o \in C | 0 < C < C_o\},$$

де  $D$  - довжина трактів передачі та прийому даних;

$K$  - компактність структури системи;

$C$  - ступінь централізації структури системи;

$D_0, K_0, C_0$  - нормовані приватні критерії показники ефективності топології системи, отримані приведенням показників  $D, B, C$  до безрозмірної форми.

Цільова функція оптимізації часу роботи СППД:

$$\varphi(T) = \max \varphi(T_\Sigma) = \max \varphi\left(\sum_{l=1}^p T_{S_{noi}}, T_{KO_l}, T_{C1}, T_K, T_{ПД}, T_{KC}, T_{ПК}, T_{ДК}, T_{Ш}, T_{ЛС}, T_{C2}\right), \quad (4.11)$$

$$T = \left\{ T_{S_{noi}} \in T \mid T_{S_{oi\min}} \angle T_{S_{oi}} \angle T_{S_{oi\max}} \right\}, T = \left\{ T_{KO} \in T \mid T_{KO\min} \angle T_{KO} \angle T_{KO\max} \right\}, T = \left\{ T_{C1} \in T \mid T_{C1\min} \angle T_{C1} \angle T_{C1\max} \right\},$$

$$T = \left\{ T_{ПК} \in T \mid T_{ПК\min} \angle T_{ПК} \angle T_{ПК\max} \right\}, T = \left\{ T_{ДК} \in T \mid T_{ДК\min} \angle T_{ДК} \angle T_{ДК\max} \right\}, T = \left\{ T_{C2} \in T \mid T_{C2\min} \angle T_{C2} \angle T_{C2\max} \right\},$$

$$T = \left\{ T_K \in T \mid T_{K\min} \angle T_K \angle T_{K\max} \right\}, T = \left\{ T_{ЛС} \in T \mid T_{ЛС\min} \angle T_{ЛС} \angle T_{ЛС\max} \right\}, T = \left\{ T_{Ш} \in T \mid T_{Ш\min} \angle T_{Ш} \angle T_{Ш\max} \right\},$$

$$T = \left\{ T_{KC} \in T \mid T_{KC\min} \angle T_{KC} \angle T_{KC\max} \right\}, T = \left\{ T_3 \in T \mid T_{3\min} \angle T_3 \angle T_{3\max} \right\}, T = \left\{ T_L \in T \mid T_{L\min} \angle T_L \angle T_{L\max} \right\}$$

$$\varphi(T) = \min \varphi(T_3), \quad \varphi(T_K) = \max \varphi(n, T_L), \quad \varphi(T_{ЛС}) = \max \varphi(B_{ЛС}, f),$$

$$\varphi(T_{Ш}) = \max \varphi(B_{Ш}, f), \quad \varphi(T_{KC}) = \max \varphi(B_{KC}, f), \quad \varphi(B) = \max \varphi(B_{ЛС}, B_{Ш}, B_{KC}),$$

$$B = \left\{ B_{ЛС} \in B \mid B_{ЛС\min} \angle B_{ЛС} \angle B_{ЛС\max} \right\}, B = \left\{ B_{Ш} \in B \mid B_{Ш\min} \angle B_{Ш} \angle B_{Ш\max} \right\}, B = \left\{ B_{KC} \in B \mid B_{KC\min} \angle B_{KC} \angle B_{KC\max} \right\},$$

де  $T_{S_{oi}}$  – швидкодія обладнання СТС;

$T_{KO}$  – швидкодія роботи комутаційного пристрою;

$T_{C1}, T_{C2}$  – швидкодія роботи серверів на передавальній та приймальній

сторонах СППД;

$T_K, T_{ДК}$  – швидкодія роботи кодера, декодера;

$T_{ПД}$  – швидкодія роботи передавального тракту;

$T_{ПК}$  – швидкодія роботи приймаючого тракту;

$T_{ЛС}$  – швидкодія обробки мережевих потоків у локальній мережі;

$T_{Ш}$  – швидкодія обробки мережних пакетів у транзитному шлюзі;

$T_3$  - затримка сигналів у надлишкових вузлах;

$f$  – розмір мережевих пакетів;

$B_{ЛС}$  – пропускна спроможність локальної мережі;

$B_{Ш}$  – пропускна спроможність транзитного шлюзу;

$B_{KC}$  - пропускна спроможність каналу зв'язку;

$n$  – довжина кодової комбінації;

$T_L$  – час, необхідний для прийому та передачі кодової комбінації.

Цільова функція похибки прийому та передачі даних:

$$\varphi(\delta) = \min \varphi(\delta_{S_{n0}}, \delta_{СПД}), \quad (4.12)$$

де  $\delta_{S_{n0}}$  - похибки даних;

$\delta_{СПД}$  - похибки даних при їх прийомі та передачі;

Завдання оптимізації захисту полягає у забезпеченні максимального рівня захищеності при мінімальному ризику від ймовірності злому СППД, тобто.

$$\varphi(Z_\Sigma) = \min \varphi(R_{B3Л}, T_a), \quad \varphi(Z_\Sigma) = \max \varphi(N_f) \quad (4.13)$$

при  $N_f \geq N_{f0}$ ,  $T_a \leq T_{a0}$ ,  $R_{B3Л} = p_{B3Л} \cdot H$ ,  $p_{B3Л} = p_i \cdot p_a \cdot p_b \cdot p_c \cdot p_d$ ,

де  $R_{B3Л}$  – мультиплікативний критерій ризику від ймовірності злому СППД;

$p_{B3Л}$  – ймовірність злому інформаційної системи, що визначається на основі експертних даних;

$p_i$  – ймовірність того, що дана інформаційна система потрапляє до списку можливих цілей;

$p_a$  - ймовірність того, що система буде обрана зі списку та атакована;

$p_b$  – ймовірність того, що будуть зламані технології, які межують;

$p_c$  – ймовірність того, що атаки посилюватимуться;

$p_d$  – ймовірність того, що СППД буде завдано шкоди;

$H$  – потенційні збитки від порушень інформаційної безпеки;

$N_f$  – кількість функцій, що характеризують функціональність СППД;

$T_a$  - середній час доступу до об'єктів захисту СППД;

$N_{f0}$ ,  $T_{a0}$  - обмеження на функціональність та продуктивність

Цільова функція ризику відмов пристроїв системи СППД:

$$\varphi(R) = \min \varphi(R_{S_{n0}}, R_{СПД}, P_{S_{n0}}, H_{S_{n0}}, R_i, P(S_i)), \quad (4.14)$$

де  $R_{S_{n0}}$  - ризик відмови пристроїв СППД;

$R_{СППД}$  - середній ризик відмови від СППД;

$p_{S_{n0}}$  – можливість відмови пристроїв СППД;

$H_{S_{n0}}$  – збитки від відмови пристроїв СППД;

$R_i$  – умовний ризик при прийомі та передачі даних ТС;

$P(S_i)$  – умовна ймовірність помилки при прийомі та передачі даних

Розроблена модель покликана забезпечити оптимізацію інформаційних параметрів СППД з метою забезпечення її ефективності. В основу використовуюваного методу, що дозволяє досліджувати розроблену модель та здійснити оптимізацію інформаційних параметрів СППД стану ТС, покладено врахування наявності множини суперечливих вимог до такої системи. Складність розв'язання багатокритеріальних задач оптимізації у тому, що критерії конкурують один з одним. Вирішення проблеми може бути здійснено застосуванням принципу оптимальності Парето [179, 180]. Властивістю оптимальної множини Парето є можливість «вибракувати» з безлічі альтернатив свідомо невдалі, які поступаються іншим за всіма критеріями. В результаті розв'язання задачі оптимізації інформаційних параметрів визначається множина альтернативних розв'язків, що відповідають принципу оптимальності Парето та задовільняють поставленим обмеженням. Дана стратегія розв'язування задач оптимізації істотно відрізняється від відомих підходів нелінійного програмування, має більш високу ефективність і забезпечує суттєво ширші можливості.

Послідовність оптимізації інформаційних параметрів СППД містить такі етапи:

- визначення набору незалежних параметрів, а також умов, що визначають допустимі значення, які приймаються змінними;
- отримання цільової функції як заходу забезпечення якості об'єкта оптимізації із заданими змінними;
- вибір методу та розв'язку оптимізаційної задачі.

Для дослідження моделі багатокритеріальної та багатопараметричної оптимізації інформаційних параметрів СППД використовувалися алгоритми, що реалізуються у вільно вільно розповсюджену ПЗ [181], яка базується на технології побудови поверхні відгуку. Відмінною особливістю даної технології є ефективність пошуку оптимального розв'язку при дослідженні СППД, що моделюються на високих рівнях складності та ієрархічності, включаючи досягнення математичного моделювання (2-х та 3-х мірні задачі) та можливість швидкої інтеграції. Програма призначена для числового розв'язування задач багатокритеріальної параметричної оптимізації складних функціональних залежностей за наявності функціональних обмежень та працює з урахуванням цільових функцій (4.10) – (4.14). Діапазони чисельних значень показників якості СППД наведено у табл.4.1.

Таблиця 4.1 - Діапазони чисельних значень показників якості СППД

Показник якості	Обмеження	
	Мін	Мах
Пропускна здатність (B)	10 МБ/с	100 МБ/с
Ефективність захисту інформації ( $Z$ ) <sub>Σ</sub>	0.95	1.0
Ризики структури ( $R$ ) <sub>Σ</sub>	0.2	0.37
Допустима величина похибки передавання даних ( $\sigma$ )	0.5 байт	1.0 байт

Розв'язання задачі оптимізації інформаційних параметрів СППД полягає у знаходженні максимальної ефективності такої системи за певних станів її показників. З метою оптимізації інформаційних параметрів СППД ТС судновий СТС розроблено структуру ПЗ її функціонування (рис. 4.5). Як приклад наведено результати розв'язання задачі оптимізації пропускної спроможності СППД. Пропускна спроможність СППД визначається максимальними пропускними здібностями каналів зв'язку системи, що приймає та передають локальні мережі та ітранспортний шлюз СППД.

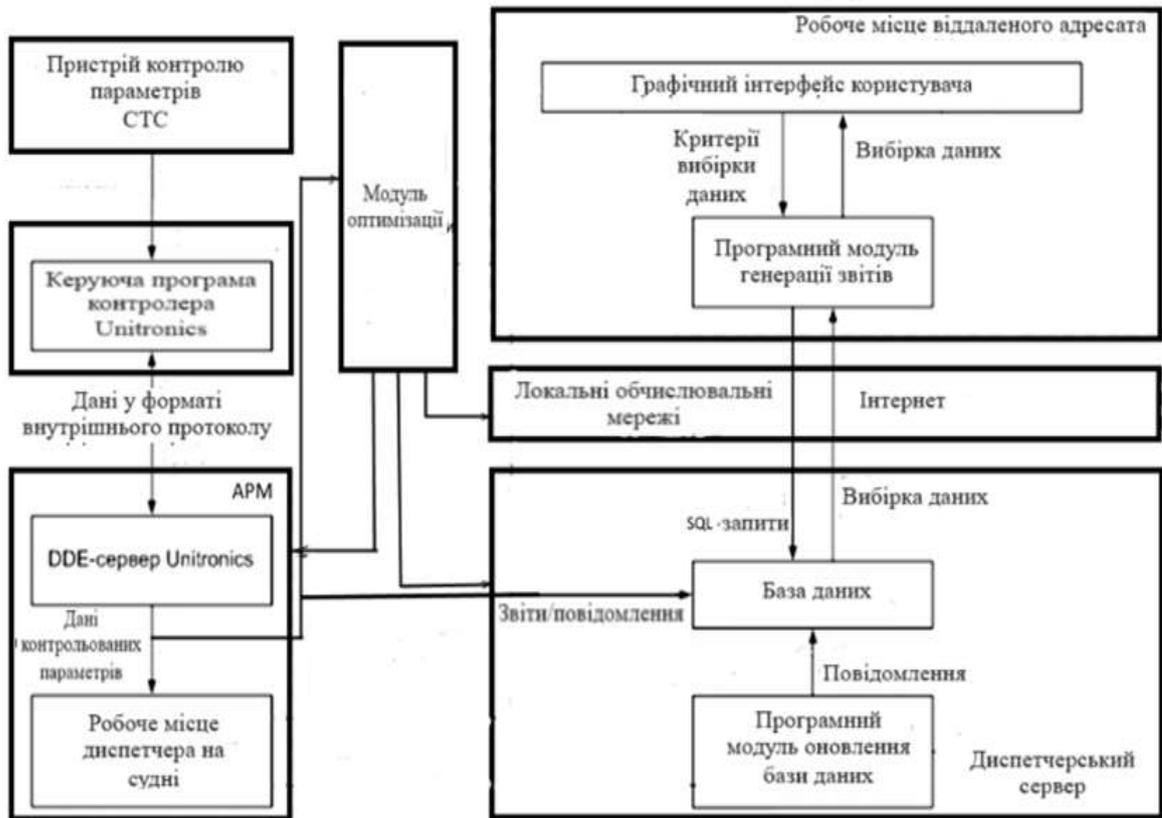


Рисунок 4.5 - Структура ПЗ функціонування СППД

Максимальну пропускну здатність каналу зв'язку з адитивним шумом визначено за Шенноном:

$$B = W \cdot \log_2 \left( 1 + \frac{S}{W \cdot N} \right), \quad (4.15)$$

де  $W$  – ширина смуги пропускання каналу зв'язку, кГц;

$S/N$  – співвідношення сигнал/шум у приймачі адресата, дБ

Цільова функція пропускну здатності СППД:

$$\varphi(B) = \max \varphi(W, S/N) \quad (4.16)$$

Як видно на рис. 4.6 розв'язання задачі оптимізації інформаційних параметрів системи СППД на основі розробленої моделі дозволяє віднайти кілька Парето-оптимальних розв'язків для показника (критерію) якості – пропускну здатність.

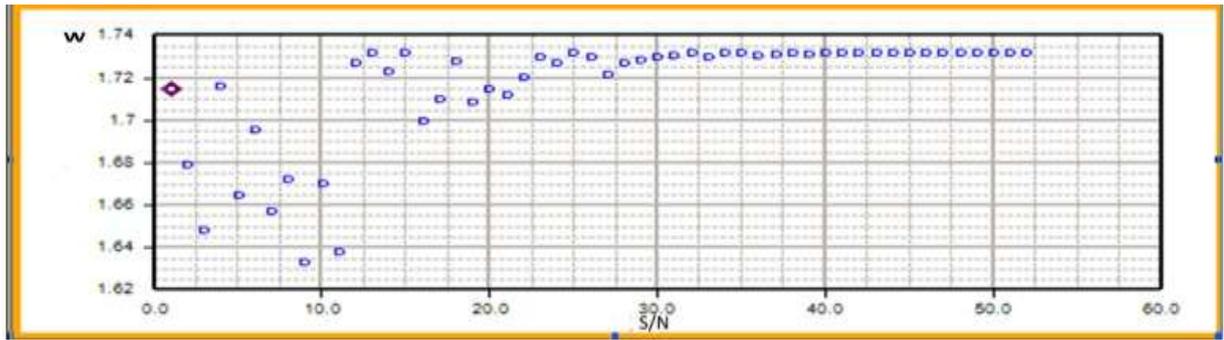


Рисунок 4.6 - Точкова діаграма безліч Парето-оптимальних рішень для пропускної здатності щодо сукупності  $W$  і  $S/N$

Через те, що всі точки невідомої множини у просторі критеріїв рівноцінні по Парето множині простору розв'язків, основну роль у підтримці прийняття рішень за результатами багатокритеріальної оптимізації грає ОПР.

На основі врахування переваг ОПР визначається єдине ефективне за Парето рішення, яке вважається остаточним результатом процедури його вибору. Провівши лінійну згортку за двома критеріями  $W$  і  $S/N$  з урахуванням 4.16, визначається найкращий оптимальний розв'язок – ширина смуги пропускання - 1,735 кГц співвідношення сигнал/шум 42,5 – 52,5 дБ.

При постановці та розв'язанні задачі оптимізації інформаційних параметрів СППД ТС визначено набір незалежних параметрів, умов, що визначають їх допустимі значення, отримані цільові функції та обрано метод розв'язування оптимізаційних задач. Розроблена модель оптимізації інформаційних характеристик СППД ТС дозволяє:

- відстежувати ОПР стан СТС у реальному часі, що дозволить уникнути аварій за її експлуатації;
- зменшити ризик відмов обладнання СППД.

Сформульовано **п'ятий пункт наукової новизни**: вперше розроблено модель прийому та передачі даних при діагностиці, оцінці та прогнозуванні ТС складних систем критичного застосування, яка враховує наявність

множини суперечливих вимог та конкуруючих критеріїв, що дозволило знайти Парето-оптимальні розв'язки для забезпечення ефективності прийому та передачі даних.

#### 4.3. Висновки до четвертого розділу

У четвертому розділі виконано розробку методу оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ.

В основу побудови методу покладено: подання прецеденту набору параметрів з конкретними значеннями та рішеннями; отримання даних оцінок та прогнозування ТС складної системи; формування рекомендацій для забезпечення ефективності експлуатації обладнання СТС.

Сформульовано четвертий пункт наукової новизни: набув подальшого розвитку метод міркувань на основі прецедентів, що дозволило забезпечити оцінку та прогнозування технічного стану та підвищити працездатність складних систем критичного застосування.

При прийомі та передачі різноманітних даних діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ повинна забезпечуватися їх ефективні прийом та передача при зменшенні надмірності інформації на етапах її обробки, максимального її захисту, мінімізації похибки. Для вирішення цієї проблеми розроблено модель прийому та передачі даних діагностування, оцінки та прогнозування, розв'язування задачі багатопараметричної, багатокритеріальної оптимізації інформаційних параметрів, що впливають на ефективність її роботи із застосуванням принципу оптимальності Парето.

Сформульовано п'ятий пункт наукової новизни: вперше розроблено модель прийому та передачі даних при діагностиці, оцінці та прогнозуванні ТС складних систем критичного застосування, яка враховує наявність множини суперечливих вимог та конкуруючих критеріїв, що дозволило знайти Парето-оптимальні розв'язки щодо забезпечення ефективності прийому та передачі даних.

## РОЗДІЛ 5

РОЗРОБКА ІНФОРМАЦІЙНОЇ ІНТЕЛЕКТУАЛЬНОЇ СИСТЕМИ  
ДІАГНОСТИКИ, ОЦІНКИ ТА ПРОГНОЗУВАННЯ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ  
СКЛАДНИХ СИСТЕМ КРИТИЧНОГО ЗАСТОСУВАННЯ

5.1 Проектування інформаційної інтелектуальної системи діагностики, оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування

Методи пошуку рішень у ІС на основі прецедентів - це підхід, заснований на використанні аналогій з раніше вирішеними проблемами для пошуку та адаптації рішень до нових ситуацій. Подібні методи включають етапи, що утворюють СВР-цикл:

1. Захоплення прецедентів із бібліотеки прецедентів (БП).
2. Індксація (організація прецедентів для пошуку аналогічних випадків).
3. Пошук найбільш підходящих прецедентів для нової задачі.
4. Адаптація (модифікація знайденого прецеденту для відповідності поточному завданню).
5. Оцінка та впровадження (перевірка адаптованого розв'язку на його придатність та, за необхідності, впровадження).

Переваги методу міркувань з урахуванням прецедентів: адаптивність; робота з неповною інформацією; універсальність; навченість. Прецеденти можуть бути представлені способами, включаючи текстовий опис, діаграми, таблиці, прототипи та сценарії використання, моделювання через UML. Кожен із цих способів може бути ефективним залежно від контексту та цілей проекту.

Спосіб подання прецедентів реалізовано наступним чином. У пропонованому СВР циклі (рис.5.1) для підтримки обміну знаннями на початковий блок формування завдання надходить набір вхідних параметрів

ТС, що діагностуються та масив онтологій, які представляють структурований опис доменної області суднової СТС. В результаті цього здійснюється генерація структури об'єкта нового прецеденту та вилучення вмісту, що виконується із застосуванням методу найближчого сусіда за результатами оцінки ступеня схожості (близькості) аналізованого сценарію з ТС та з урахуванням даних у БЗ. На основі виконання даної процедури формується об'єкт рішення, яке може бути змінено для його цільової адаптації з урахуванням усіх аспектів сценаріїв часткових і повних відмов FE і FC СТС застосуванням трансформаційного методу [181].

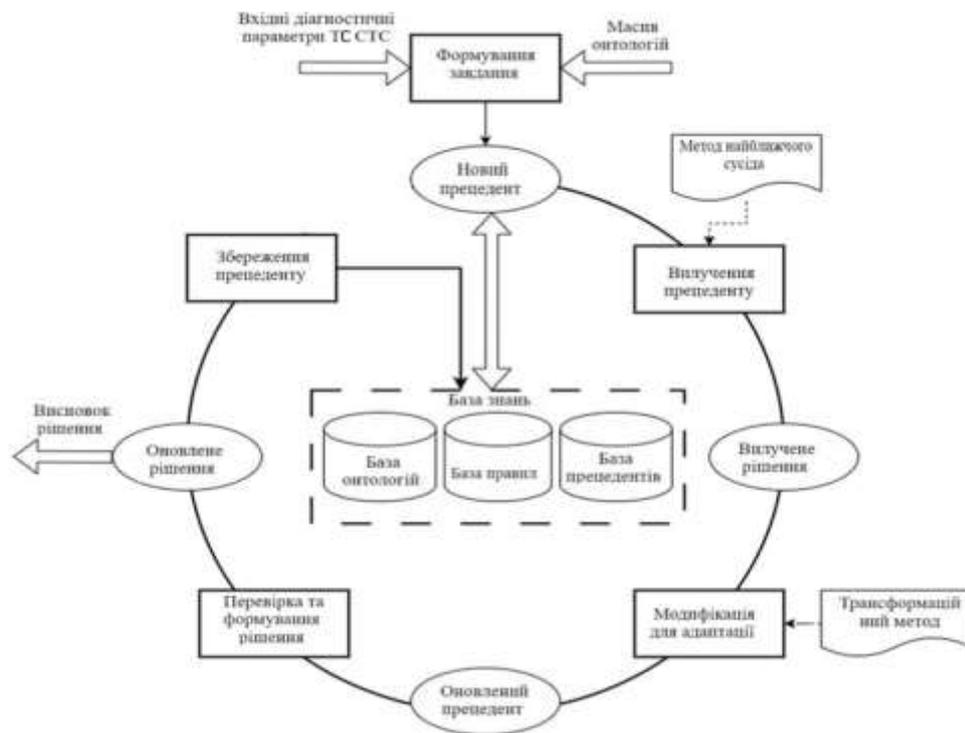


Рисунок 5.1 - Структура CBR циклу

Оновлений прецедент перевіряється на логічну несуперечність з урахуванням використання предикативних продукцій із застосуванням онтологічного способу побудови логічного висновку Hermit [181]. Отримане в результаті виконаних дій рішення експортується у вигляді окремого об'єкта, що містить рекомендації для ОПР та метадані. Після цього прецедент зберігається в основі прецедентів, що є складовою БЗ (рис.5.1). Послідовність прийняття рішень (рис.5.2) з використанням запропонованого CBR циклу з

урахуванням операцій обробки та структуризації даних щодо прецедентів у рамках роботи прикладної програмної системи здійснюється наступним чином.



Рисунок 5.2 - Діаграма послідовності прийняття рішень

При запуску програмної системи здійснюється ініціалізація головної форми інтерфейсу користувача, у якому передбачено можливість імпорту вхідних даних на формування завдання. Потім задаються керуючі параметри та опції конфігурації роботи всіх модулів, задіяних у циклі обробки інформації, зокрема модулів обробки даних (DPMod), вилучення прецедентів (PEMod) та адаптації (AMod). Далі виконується запит на передачу сформованих масивів даних в DPMod, в якому поетапно проводяться процедури обробки даних (у тому числі їх перевірки на несуперечність і розбиття на фрагменти), формування колекції для зберігання прецедентів з урахуванням метаданих (таких як короткий текстовий опис цільового призначення, його ідентифікатора, дати формування та деяких статистичних показників). Після цього здійснюється запит на отримання конкретного прецеденту PEMod, в якому виконуються дії з метричної оцінки за базою

методу найближчих сусідів. Отриманий результат відправляється до DPMoD у вигляді колекції на основі асоціативного масиву. DPMoD після перевірки та верифікації результатів виконує відправлення сформованої колекції до AMod з метою проведення процедури адаптації. Для цього використовується метод трансформації з урахуванням зіставлення прецеденту з набором правил, враховуються логічні продукції відповідності. В результаті оновлена колекція прецедентів надходить до DPMoD для формування переліку підсумкових рішень та їх валідації. Для виведення результатів у вигляді текстових записів та графічного подання результуючий розв'язок у серіалізованому вигляді (у форматі json) надходить до головної форми інтерфейсу. Це необхідно для подальшої ініціалізації процесу відправлення даних прецеденту, їх збереження в БЗ та видачі інформаційного повідомлення користувачеві про результати транзакції. Для формування прецедентів досить простого параметричного уявлення, тобто. подання прецеденту у вигляді набору параметрів з конкретними значеннями та рішенням (діагнозом та рекомендаціями ОПР).

Відомі різні методи вилучення прецедентів та їх модифікацій. Найбільш поширеними є методи: визначення найближчого сусіда (NN - Nearest Neighbor) [182]; вилучення прецедентів на основі дерев рішень; отримання прецедентів на основі знань [157, 183]; вилучення прецедентів з урахуванням їх застосування. Перелічені методи використовують різноманітні метрики.

З основних метрик використано метод визначення найближчого сусіда, що дозволяє легко розрахувати ступінь схожості поточної проблемної ситуації та прецедентів з БП. У методі визначення найближчого сусіда використовується просте покоординатне зіставлення поточної ситуації з прецедентом, де кожен параметр опису прецедентів сприймається як одна з координат. Визначається відстань  $D_{CT}$  між точкою, що відповідає поточній ситуації, та точкою, що відповідає прецеденту. Ефективність методу найближчого сусіда залежить від вибору метрики. Якщо прецедент  $C$  та

поточна проблемна ситуація  $T$  задані в  $n$ -мірному просторі властивостей, тоді ступінь подібності або близькості  $S(C, T)$  прецеденту  $C$  та поточної ситуації  $T$  можна визначити за допомогою однієї з метрик, що визначають відстань між двома точками  $x_i^C$  і  $x_i^T$ , зокрема, евклідова відстань:

$$D_{CT} = \sqrt{\sum_{i=1}^n (x_i^C - x_i^T)^2} \quad (5.1)$$

Для визначення значення ступеня подібності (SIM) обчислюється максимальна відстань  $D_{max}$  у вибраній метриці з використанням меж діапазонів параметрів для опису прецедентів. Після цього визначається значення ступеня подібності, використанням межі діапазонів параметрів для опису початкового та кінцевого прецедентів,  $i = 1, \dots, n$ . Значення ступеня подібності можна обчислити так:

$$SIM = 1 - D_{CT} / D_{max} \quad (5.2)$$

5.2 Реалізація інформаційної інтелектуальної системи діагностики, оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування

Реалізація ІС з CBR (рис.5.3) пов'язує розроблені моделі та метод діагностування ТС з БД, БЗ, експертною системою, що містить розрахункові, експериментальні, а також дані, отримані експертами під час роботи СТС. Розробку структури ПЗ розпочато зі схематичного представлення основних взаємодіючих модулів ІС. Структурна схема модулів та взаємозв'язків (рис.5.3) відображає візуальне уявлення про взаємодію FE та FC у ІС.

При розробці ІС у якості об'єкта оцінки та прогнозування ТС було обрано СЕУ. При оцінці надійності СЕУ враховувалося те, що СТС характеризується великою кількістю параметрів, що діагностуються, які відрізняються інформативністю і ступенем доступності при недостатній інформації для оцінок ТС, а також специфічними та різноманітними умовами експлуатації при невизначеності.



Рисунок 5.3 - Структурна схема реалізації методу міркувань на основі прецедентів для оцінки та прогнозування ТС складної системи КЗ

Ядрами ПС є: БД; БЗ з методами розрахунку показників надійності (ризиків та ймовірностей відмов) та набором вирішальних правил для вибору відповідних методів прийняття рішень; модель інтелектуалізації оцінки ТС FE та FC СТС.

ПС містить: модуль інтерфейсу; БЗ з бібліотекою прецедентів та БД; модуль формалізації запиту; модуль рекомендацій щодо забезпечення ефективності СТС; бібліотеки структурних схем судових СТС; модуль формалізації експертних оцінок; модуль формалізації знань. Реалізація розробленої стратегії в ПС забезпечується цілеспрямованими діями відповідно до підтримки прийняття рішень для пошуку відмов FE та FC на основі встановлених оцінок їх ТС.

Модель БЗ продукційна, щодо реалізації її програмного функціоналу - об'єктно-орієнтована. Розроблена БЗ представлена правилами, отриманими на основі інтелектуального аналізу даних (багаторівневої ієрархічної структури дерева бази знань), експертних оцінок, результатів застосування моделей діагностування ТС складних систем, що функціонує відповідно до

розробленої послідовності прийняття рішень (рис.5.2) та з урахуванням матриці ТС СТС (рис.4.4). У БЗ із БД за запитами надходить весь перелік даних та експертні оцінки. В результаті на виході БЗ формуються оцінки ТС підсистем, компонентів, елементів та їх взаємних зв'язків. Оцінки ТС надходять у модуль рекомендацій щодо забезпечення ефективної експлуатації СТС і далі ОПР для управління ТС складної системи. База даних містить: БД структур СТС; БД критеріїв ризику відмов; БД ТС складних систем; БД деградаційних процесів; БД заходів щодо зниження ризику відмов СТС. Бібліотека прецедентів складається із БП інцидентів та БП аварійних ситуацій. Діагностування проблемної ситуації - повної або часткової відмови обладнання та їх взаємних зв'язків СТС здійснюється при моделюванні їх діагностики за даними ризику (ймовірності) відмов, а також за збитками від відмов. З урахуванням даних діагностування в БЗ з БП надходить встановлена оцінка ТС складної системи, і формуються рекомендації до прийняття рішень ОПР. За результатами оцінок здійснюється прогнозування ТС складної системи. Результат може включати список виконаних дій, додаткові коментарі та посилання на інші прецеденти.

Ієрархічна структура ключової програмної логіки фрагментів модулів обробки даних за прецедентами та міркуваннями наведена на рис. 5.4. Для формування рівня абстракцій та забезпечення поліморфізму при реалізації поведінки об'єктів, що реалізують різні етапи обробки даних, реалізовано три інтерфейси.

**IData** – формування шляху до місцезнаходження набору вхідних даних, ініціалізації структур даних та колекцій, перетворення даних до єдиного нормалізованого виду з перевіркою пропущених рядків, встановлення структури. **IOntology** - зберігання структур атрибутів, класів та відносин, формування складання структури онтології з її перевіркою та валідацією. **IPrecedent** - оперування властивостями сценаріїв ситуацій, проблем і рішень, а також формування процесу складання прецеденту, його збереження та серіалізації, перевірки на логічну несуперечність.

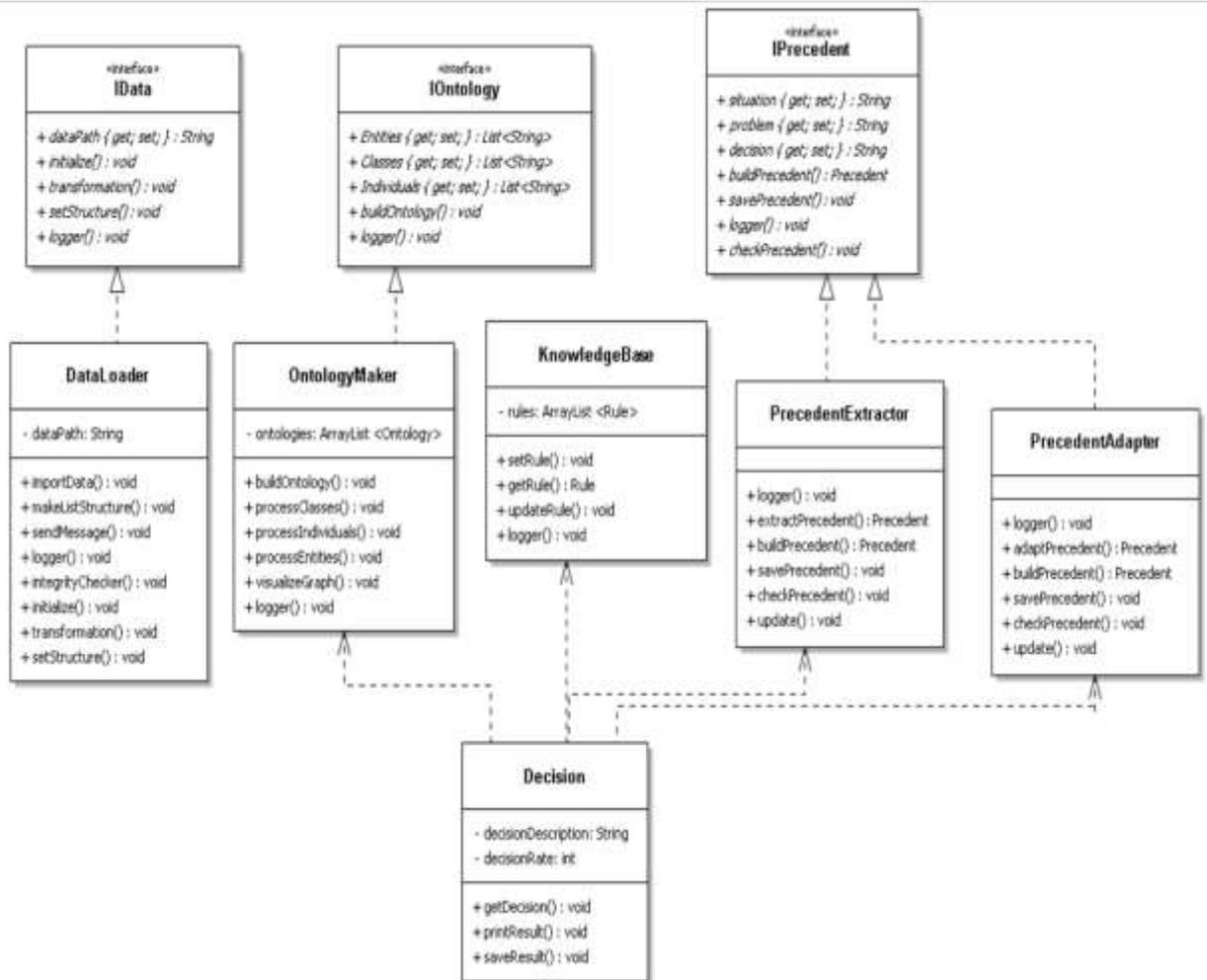


Рисунок 5.4 - Ієрархічна структура ключової програмної логіки фрагментів модулів обробки даних щодо прецедентів та міркувань

Кожен має різну реалізацію методу `logger()` забезпечення процесів журналізації проміжних результатів виконання обчислювальних операцій у часі. Клас `DataLoader` реалізує інтерфейс `IData`, виконуючи контакт із завантаження даних у систему та операції формування колекцій прецедентів, перевірки цілісності даних, виконання необхідних перетворень, фільтрації та агрегації, а також встановлення структури та видачі повідомлень за результатами виконаних дій у рядок стану. Клас `OntologyMaker` імплементує інтерфейс `IOntology`, оперуючи частинною колекцією `ontologies` динамічного масиву для агрегації окремих елементів онтології та призначений для формування логічної бази структури системи при побудові кожного окремого прецеденту, забезпечуючи візуалізацію онтології у граф-орієнтованому вигляді.

Класи `PrecedentExtractor` і `PrecedentAdapter` реалізують інтерфейс `IPrecedent`, перевизначаючи методи управління даними прецедентів для їх використання в процедурах вилучення та адаптації, що виконуються в методах `extractPrecedent()` і `adaptPrecedent()` відповідно, результатом є об'єкт `Precedent`. Окремо реалізовано клас `KnowledgeBase` для реалізації CRUD операцій з управління правилами. На основі використання екземплярів даних класів формується об'єкт `Decision`, стан якого описується за допомогою приватних властивостей `decisionDescription` та `decisionRate`, а поведінка виражена за допомогою публічних методів формування об'єкта рішення, його виведення та збереження результатів. Для програмної реалізації ІС з циклом CBR використано середовище розробки Visual Studio, фреймворк .NET 4.7, технологію створення графічних інтерфейсів WinForms, а також функціональні бібліотеки підтримки онтологій Hermit та роботи з JSON [170]. Інтерфейс головної форми програмної системи з вкладкою управління процесом створення прецедентів у рамках пропонованого CBR циклу для оцінки та прогнозування ТС, на прикладі суднової ТС наведено на рис.5.5.

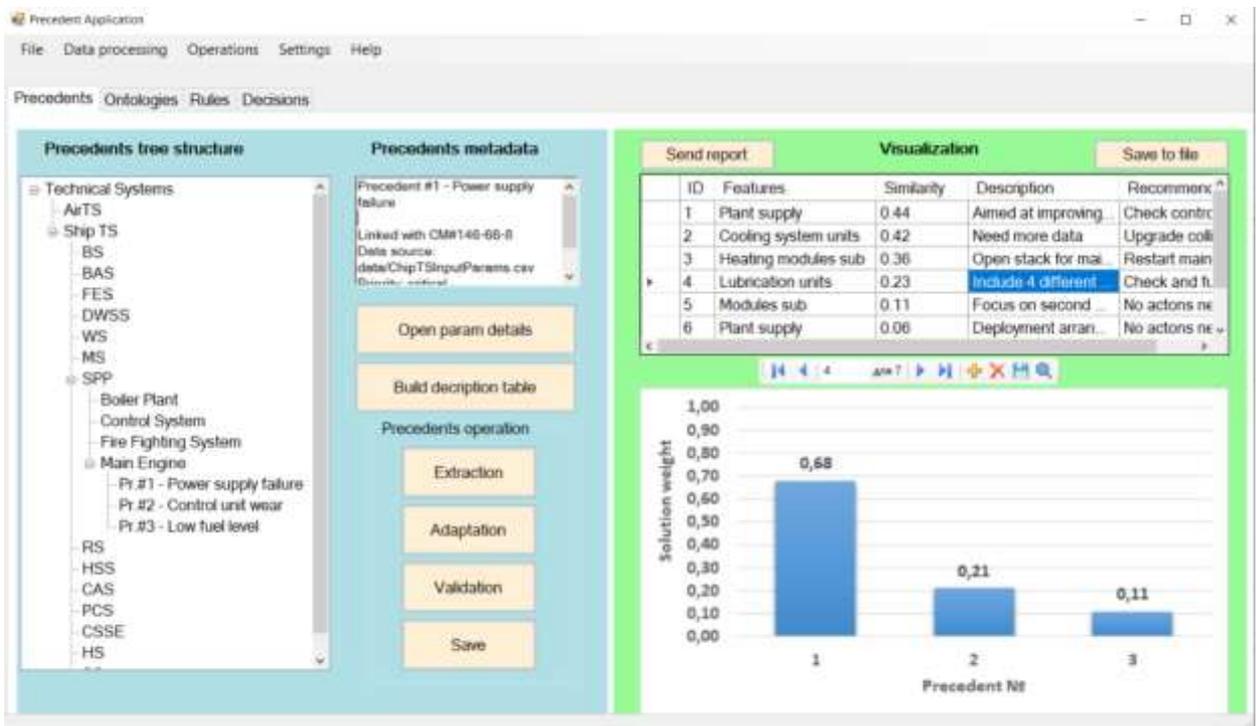


Рисунок 5.5 - Інтерфейс головної форми програмної системи із вкладкою управління процесом створення прецедентів

Передбачено головне меню для навігації між процесами під'єднання джерел даних та БЗ (пункт File) управління та обробки даними (пункт Data processing), вибором обчислювальних операцій та їх проведенням (пункт Operations), конфігурацією модулів систем та налаштувань її роботи (пункт Settings), видачі довідкової інформації щодо роботи системи (пункт Help).

Функціонал підтримує оперування даними з прецедентів, онтологій, правил та рішень. Для ієрархічного уявлення структури суднових СТС та їх FE і FC у вигляді дерева вузлів передбачено окремий графічний віджет. Введення даних за прецедентами здійснюється через відповідне текстове поле, передбачені опції з надання детального опису параметрів, побудови зведеної кростаблиці за всіма значеннями суднових СТС та їх обладнання, а також форми вилучення, адаптації та валідації (перевірки) складених прецедентів.

Реалізовано формування таблиці відображення отриманих результатів за прецедентами з оцінкою їх ступеня схожості, описом та коротким набором типових рекомендацій. Для зручності керування передбачено окремий компонент швидкої навігації по таблиці за допомогою CRUD операцій та пошуку.

Впроваджено засоби візуалізації найбільш пріоритетних варіантів адаптації прецедентів під конкретний сценарій експлуатації СТС, що розглядається після виконання всіх аналітичних процедур. Реалізовано можливість локального збереження результатів візуалізації у pdf та csv форматах відповідно.

Результати оцінок ризику відмов підсистем досліджуваної СЕУ, сформовані з урахуванням складених прецедентів наведено на рис. 5.6.

Результати прогнозування ризику відмов FE та FC СЕУ, наприклад, для підсистеми Main Engine можна бачити в блоці інтерфейсу перегляду прогнозування ризику відмов при навігації на веб-сторінку Predictions (рис. 5.7).

System name	Risk assessment value	Details
BS	77	
BAS	65	
FES	14	
DWSS	21	
WS	54	
MS	12	
<b>SPP</b>	<b>67</b>	→ Boiler Plant - 16% Control System - 22% Fire Fighting System - 11% Main Engine - 51%
RS	33	
HSS	21	
CAS	26	
PCS	40	
CSSE	29	
HS	11	
SS	5	

Рисунок 5.6 - Інтерфейс форми оцінки ризиків за аналізованими підсистемами СЗУ

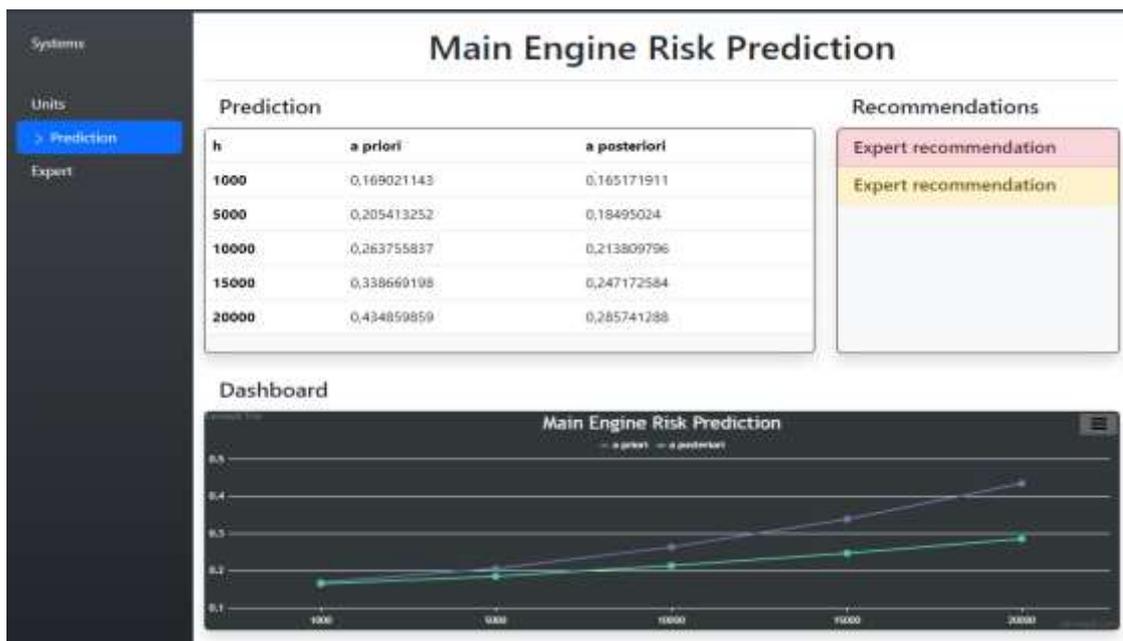


Рисунок 5.7 - Блок прогнозування ризику відмови підсистеми Main Engine

Передбачено блок відображення апріорних та апостеріорних значень ризику відмов Main Engine та віджет відображення залежності значень прогнозованих апріорного та апостеріорного ризику відмов Main Engine. Інтерфейс користувача форми перегляду модуля виведення отриманих результатів по сформованим рішенням системи наведено на рис. 5.8.

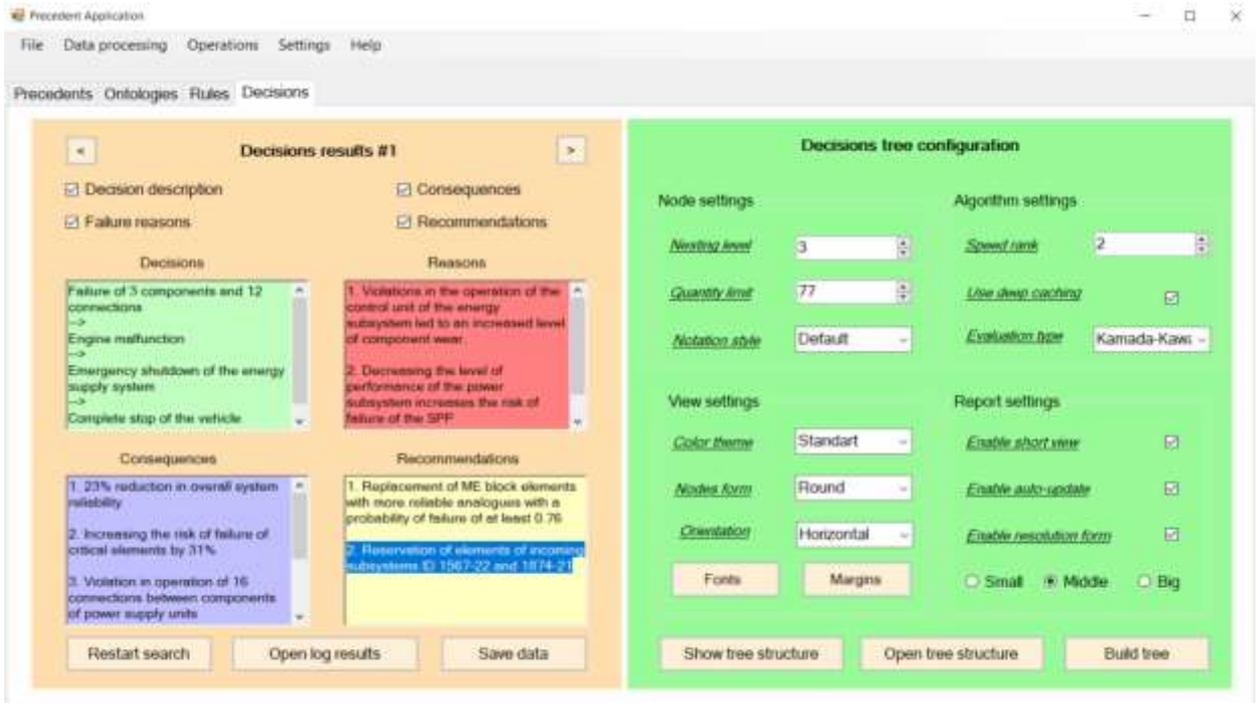


Рисунок 5.8 - Інтерфейс користувача

Реалізовано підтримку навігації сценаріями рішень, а також компоненти представлення даних щодо рішень, причин порушень, наслідків сценаріїв для подальшої роботи системи та переліку рекомендованих дій щодо підвищення працездатності СТС. Передбачено опції з відкриття файлу логів для перегляду проміжних етапів виконання обчислювальних операцій та розрахунків, а також збереження результатів БД.

Для керування процесом побудови моделі дерева відмов розроблено компоненти налаштування параметрів методів побудови вузлів, алгоритмів візуалізації графа дерева, графічних представлень та генерації звітів. Передбачені функціонал побудови дерева рішень, перегляду його структури, а також доповнення моделі в режимі редактора.

Недоліком методу прецедентів з циклом CBR є збільшення часу пошуку найближчих прецедентів. Тому було проведено порівняльний аналіз часу пошуку найближчого прецеденту залежно від розміру бази прецедентів з урахуванням кешування даних при ініціалізації структури даних як колекції асоціативного масиву. Графік відображає час визначення ТС складної

системи від числа прецедентів наведено на рис.5.9. Часові витрати на перебування найближчого прецеденту за 10000 прецедентів у БЗ склали близько 370 мс. Перший найближчий прецедент із 5000 прецедентів був отриманий за час близько 50 мс.

Зі збільшенням кількості прецедентів у бібліотеці прецедентів час визначення ТС складної системи збільшується, але він суттєво не впливає на загальний час, витрачений на оцінку ТС підсистем досліджуваної суднової енергетичної установки. Незважаючи на такий недолік, дослідження показали можливість застосування методу міркування на основі прецедентів СВР та його доцільне використання для ухвалення рішень у реальних експлуатаційних умовах. Розроблена ПС має високу швидкість.

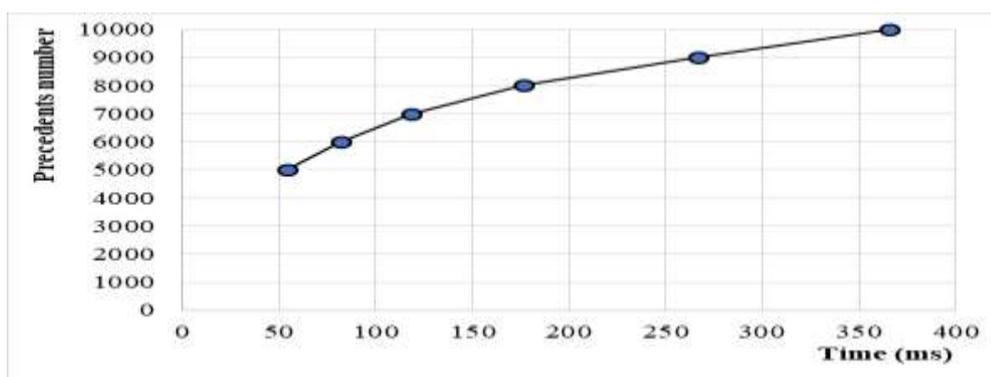


Рисунок 5.9 - Час визначення ТС складної системи залежно від розміру бази прецедентів

З метою оцінки часових витрат на формування БЗ у рамках імплементації запропонованого методу за допомогою розробленої ПС проведено порівняння часу виконання обчислювальних процесів при запуску системи в режимах: однопоточному; двопоточному; чотиріпоточному (рис.5.10). Слід зазначити загальний експоненційний характер залежності часу виконання обчислювальних процесів оцінок та прогнозування ТС СЕУ від числа прецедентів у БЗ. Завдяки розподіленому режиму обчислень стає можливим при використанні двох ізольованих між собою потоків даних

зниження часових витрат до 28%, і до 42% у разі поділу обчислювального навантаження на чотири окремі потоки даних.

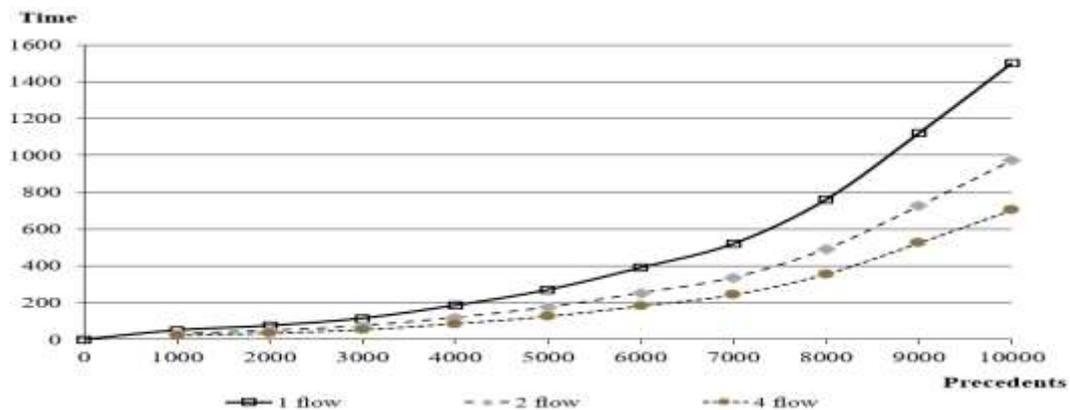


Рисунок 5.10 - Час виконання обчислювальних процесів від кількості сформованих прецедентів

Наведений інтерфейс головної форми програмної системи з вкладкою управління процесом створення прецедентів імплементує функціонал визначення працездатності ІС з циклом СВР та реалізацію функцій, закладених у ній.

Врахування часткових та повних відмов обладнання суднової СТС КЗ в ІС дозволить ОПР приймати рішення, спрямовані на передвідмовне обслуговування складних систем, і тим самим продовжувати термін експлуатації систем, а значить підвищувати ефективність їх експлуатації.

Таким чином, проведено розробку та дослідження ІС з СВР, призначену для ефективно оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ шляхом забезпечення швидкодії ІС.

Ефективне функціонування ІС з СВР ґрунтується на використанні методу міркувань на основі прецедентів. ІС з СВР складається з: модуля інтерфейсу; БЗ з бібліотекою прецедентів та БД; модуля формалізації запиту; модуля рекомендацій щодо забезпечення ефективності СТС; бібліотеки структурних схем СТС; модулів формалізації експертних оцінок та формалізації знань. Експериментальні дослідження ІС для оцінок та

прогнозування ТС складних систем показали, що часові витрати на перебування найближчого прецеденту при 10000 прецедентів у БЗ становили близько 370 мс.

Послідовність прийняття рішень, з використанням запропонованої системи ІС з СВР циклом, що враховує операції обробки та структуризації даних за прецедентами в рамках функціонування розробленої прикладної програмної системи, має високу швидкодію, забезпечує роботу з неповною інформацією, універсальність та навчання за підтримки прийняття рішень. Завдяки розподіленому режиму обчислень стає можливим при використанні двох ізольованих між собою потоків даних зниження часових витрат до 28%, і до 42% у разі поділу обчислювального навантаження на чотири окремі потоки даних.

При функціонуванні запропонованої ІС враховуються часткові та повні відмови від працездатності підсистем, компонентів, елементів та їх взаємних зв'язків у СТС КЗ.

Підвищення ефективності експлуатації СТС забезпечується швидкістю оцінювання та прогнозування ТС, а також діями ОПР, спрямованими на прийняття рішень щодо передвідмовного обслуговування обладнання складних систем на ранніх стадіях розвитку відмов.

### 5.3 Ефективність експлуатації складної технічної системи за результатами діагностування, оцінки та прогнозування технічного стану обладнання

В результаті проведених досліджень на основі діагностичних даних ТС обладнання складної системи в ІС здійснено оцінку, визначено прогнозовані значення ризику (ймовірностей) відмов FE, FC. У табл. 5.1 наведено отримані ймовірності відмови та ймовірності збереження працездатності СТС при виявленні часткових відмов обладнання за 20000 годин експлуатації системи.

Таблиця 5.1 - Ймовірнісні характеристики при часткових відмовах обладнання СТС

Час, година	1000	2500	5000	7500	10000	12500	15000	20000
Ймовірність відмови	0,133	0,144	0,163	0,185	0,209	0,237	0,269	0,304
Ймовірність збереження працездатності	0,867	0,856	0,837	0,815	0,791	0,763	0,731	0,696

Ефективність експлуатації СТС визначається скалярною величиною ( $E$ ), яка залежить від ефективності їх функціональних підсистем, компонентів, елементів та їх взаємних зв'язків:

$$E = E[FE, FC] \quad (5.3)$$

Ефективність експлуатації СТС визначається ймовірністю збереження працездатності системи, що не перевищує граничне значення ймовірності  $P_0$ , при якій настає повна відмова СТС:

$$P\{E > E_0\} < P_0 \quad (5.4)$$

Граничне значення ймовірності відмови  $P_0$  визначається з узагальненої функції бажаності Харрінгтона [99] і 0,63 - 1,0 - критична ймовірність (експлуатація СТС неможлива).

Ймовірність відмови знаходиться за відомою формулою теорії надійності:

$$P(t) = 1 - \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right], \quad (5.5)$$

де -  $\lambda$  інтенсивність відмов, що залежить від часу експлуатації СТС

При  $n$  часткових відмовах ймовірність збереження працездатності СТС, що визначає ефективність експлуатації системи:

$$P(t) = (P(t)_1 + P(t)_2 + \dots + P(t)_{n-1} + P(t)_n) / n < P_0 \quad (5.6)$$

При виявленні обладнання з частковою відмовою від працездатності та проведенні передвідмовного обслуговування інтенсивність його відмови зменшується ( $\lambda(t) - \Delta\lambda(t)$ ). Ймовірність збереження СТС у працездатному стані збільшується (табл.5.2).

Таблиця 5.2 - Ймовірнісні характеристики при часткових відмовах під час проведення передвідмовного обслуговування обладнання СТС

Час, година	1000	2500	5000	7500	10000	12500	15000	20000
Ймовірність відмови	0,110	0,121	0,140	0,162	0,186	0,214	0,246	0,289
Ймовірність збереження працездатності	0,890	0,879	0,860	0,838	0,814	0,786	0,754	0,711

На рис. 5.11 наведено результати отриманих ймовірностей працездатності СТС при виявлених часткових відмовах та виявлених часткових відмовах з проведенням запобіжних заходів.

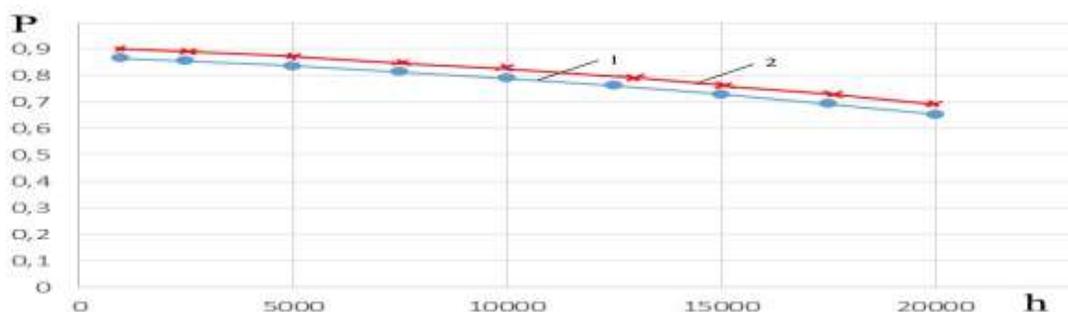


Рисунок 5.11 - Ймовірності працездатності СТС при: виявлених часткових відмовах – 1; при виявлених часткових відмовах та проведенні запобіжних заходів - 2

Ефективність експлуатації обладнання СТС за наявності часткових відмов та проведення передвідмовного обслуговування визначається:

$$P_E = P(t)P_{cf}(t)P_{ei}(t)P_{dm}(t)P_{er}(t), \quad (5.7)$$

де  $P_{cf}(t)$  – ймовірність відсутності повної відмови;

$P_{ei}(t)$  – ймовірність відсутності зовнішніх впливів, що призводять до повної відмови обладнання СТС;

$P_{dm}(t)$ - ймовірність помилкових дій ОПР;

$P_{er}(t)$ - ймовірність безпомилкових експертних оцінок

Результати розрахунку ефективності експлуатації СТС КЗ, яка визначається ймовірністю збереження працездатності, з урахуванням часткових відмов обладнання та проведення передвідмовного обслуговування не перевищують порогового значення ймовірності, при якій настає повна відмова СТС, що визначається з узагальненої функції бажаності Харрінгтона. Ймовірність збереження СТС у працездатному стані збільшується на 3%.

Таким чином, при виявленні часткових відмов та проведенні запобіжних заходів зі СТС ймовірність збереження працездатності збільшується, а значить, тривалість експлуатації обладнання системи зростає, зростає ефективність експлуатації FE, FC.

#### 5.4 Висновки до п'ятого розділу

У п'ятому розділі виконано розробку інформаційної інтелектуальної системи діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ.

Здійснено проектування ІС щодо забезпечення ефективності експлуатації СТС з використанням методу міркувань на основі прецедентів.

Проектування ІС з СВР пов'язує розроблені моделі та методи діагностування оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ з експертною системою, що містить розрахункові, експериментальні, а також

дані, отримані експертами під час роботи СТС. Ядрами ІС є: база даних; база знань з бібліотекою прецедентів, з методами розрахунку показників ймовірностей, ризиків відмов та набором вирішальних правил для прийняття рішень; модуль формалізації запиту; модуль рекомендацій щодо забезпечення ефективності СТС; бібліотеки структурних схем СТС; модуль формалізації експертних оцінок; модуль формалізації знань. Реалізація розробленої стратегії в ІС забезпечується цілеспрямованими діями відповідно до прийняття рішень для пошуку відмов обладнання на основі встановлених оцінок їх ТС.

Для перевірки працездатності було здійснено моделювання повного циклу функціонування ІС оцінювання, прогнозування ризику (ймовірності) відмов СТС на прикладі суднової енергетичної установки з використанням розробленої бази знань. Отримані оцінки ризиків (ймовірностей) відмов підсистем, компонентів, елементів їх взаємних зв'язків, що не суперечать експертним оцінкам, свідчать про ефективність діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем, враховуючи їх часткові та повні відмови від працездатності.

Результати розрахунку ефективності експлуатації СТС КЗ, яка визначається ймовірністю збереження працездатності, з урахуванням часткових відмов обладнання та проведення передвідмовного обслуговування не перевищують порогового значення ймовірності, при якій настає повна відмова СТС, що визначається з узагальненої функції бажаності Харрінгтона. Ймовірність збереження СТС у працездатному стані збільшується на 3%.

## ЗАГАЛЬНІ ВИСНОВКИ

Дисертаційне дослідження присвячено розв'язуванню актуальної науково-технічної задачі – підвищенню ефективності експлуатації СТС КЗ за рахунок використання результатів розробок стохастичних моделей та методів діагностики, оцінки та прогнозування ТС обладнання складних систем КЗ з урахуванням їх часткових та повних відмов.

1. Проведений аналіз існуючих моделей, методів та інформаційних систем діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ показав, що відомі структурні моделі та методи діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем враховують лише повні відмови від працездатності, але не враховують часткові, мають обмеження (зростання алгоритмічної та обчислювальної складності, необхідність складної попередньої обробки різноманітних даних), що знижує при їх застосуванні ефективність експлуатації СТС КЗ.

2. Розроблено стохастичні моделі та метод діагностики ТС складних систем КЗ, що одночасно враховують наявність підсистем, компонентів та елементів, їх взаємні зв'язки та ризик (ймовірність) часткової або повної відмови працездатності, враховують невизначеності та неповні дані моделюваних систем, що дозволило запропонувати метод діагностики ТС на основі БМД для складних систем КЗ. Удосконалення когнітивної імітаційної моделі, яка застосовує імітаційні вражаючі імпульси дозволяє діагностувати ТС обладнання систем з урахуванням їх взаємного зв'язку та впливу. Подальший розвиток методу діагностики ТС складних систем на основі БМД дозволяє своєчасно виявити та візуалізувати структурні, функціональні вразливості та підвищити ефективність експлуатації складних систем КЗ.

3. Проведено дослідження та аналіз стохастичних моделей та методу діагностики ТС вразливих підсистем, компонентів, елементів та їх взаємних зв'язків СТС КЗ у часі з урахуванням часткових та повних відмов від працездатності. Під час проведення досліджень як об'єкт обрано СЕУ.

Вихідними даними для моделювання діагностування ризику (ймовірності) відмов системи на основі БМД є: схема та принцип роботи об'єкта; експертні оцінки. Для імітації впливів на обладнання СТС в умовах малопередбачуваних зовнішніх впливів внутрішніх вражаючих факторів та в екстремальних аварійних ситуаціях здійснено когнітивне імітаційне моделювання, що дозволило відстежити наслідки та реакції СТС на ризик (ймовірність) відмов обладнання з неочевидними джерелами та причинами. Використання методу діагностування ризику (ймовірності) відмов обладнання у СТС на прикладі СЕУ з різним ТС та неповними даними дозволяє виявляти, візуалізувати структурні та функціональні вразливості, підтвердили, що створені стохастичні моделі можуть розглядатися як концептуальні. Застосування результатів досліджень розроблених моделей з ретроспективним аналізом аварійних ситуацій дозволяє підвищити ефективність діагностики ТС, а значить ефективність експлуатації СТС.

4. Розроблено метод оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ, в основу якого покладено подальший розвиток методу міркувань на основі прецедентів, що дозволило забезпечити оцінку та прогнозування ТС та підвищити працездатність складних систем КЗ.

Розроблено модель прийому та передачі даних при діагностиці, оцінки та прогнозуванні ТС складних систем КЗ, яка враховує наявність множини суперечливих вимог та конкуруючих критеріїв, що дозволило віднайти Парето-оптимальні розв'язки, що забезпечують ефективність прийому та передачі даних.

5. Розроблено інформаційна інтелектуальна система діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ. Проектування ІС з СВР пов'язує розроблені моделі та методи діагностування, оцінки та прогнозування ТС складних систем КЗ з експертною системою, що містить розрахункові, експериментальні, а також дані, отримані експертами під час роботи СТС. Реалізація ІС забезпечується цілеспрямованими діями відповідно до прийняття рішень для пошуку відмов обладнання на основі

встановлених оцінок їх ТС. Отримані оцінки ризиків (ймовірностей) відмов підсистем, компонентів, елементів їх взаємних зв'язків, що не суперечать експертним оцінкам, свідчать про ефективність діагностики, оцінки та прогнозування ТС складних систем, враховуючи їх часткові та повні відмови від працездатності. Результати розрахунку ефективності експлуатації ІС з використанням методу міркувань на основі прецедентів, яка визначається ймовірністю збереження працездатності з урахуванням часткових відмов обладнання та проведення передвідмовного обслуговування не перевищують порогові значення ймовірності, при якій настає повна відмова СТС, що визначається з узагальненої функції бажаності Харрінгтона. Ймовірність збереження СТС у працездатному стані збільшується на 3%.

6. Одержані наукові результати досліджень у вигляді інформаційного та програмного забезпечення впроваджено у діяльності судноплавної компанії Maersk (Данія), знайшли відображення у науковій діяльності та навчальному процесі кафедри інформаційних технологій Національного університету «Одеська політехніка» (Додаток Е).

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Vychuzhanin V.V., Rudnichenko N.D. *Metody informatsionnykh tekhnologiy v diagnostike sostoyaniya slozhnykh tekhnicheskikh sistem: monografiya*. Odessa: Ekologiya, 2019. 178 p.
2. Bar-Yam, Yaneer. *General Features of Complex Systems*». Encyclopedia of Life Support Systems. Oxford, UK: EOLSS UNESCO Publishers, 2017. 58 p.
3. Vychuzhanin V.V. *Informatsionnoye obespecheniye monitoringa i diagnostirovaniya tekhnicheskogo sostoyaniya sudovykh energoustanovok*. *Vísnik Odes'kogo natsional'nogo mors'kogo uníversitetu, zбірnik naukovikh prats*. 2012. 35. P. 111-124,
4. Langer Arthur M. *Analysis and Design of Information Systems*. New York: Springer-Verlag London Limited, 2008. 437 p.
5. Krarowski R. *Diagnosis modern systems of marine diesel engine*. *Journal of KONES Powertrain and Transport*. 2014. P. 191-198. DOI: <https://doi.org/10.5604/12314005.1133203>.
6. Національна транспортна стратегія України на період до 2030 року, схваленої розпорядженням КМУ №430-р. від 30.05.2018 р. URL: <http://zakon.rada.gov.ua/laws/show/430-2018-p>.
7. Birolini Alessandro. *Quality and Reliability of Technical Systems: Theory - Practice – Management*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin: Heidelberg, 1994, 515 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-662-02970-1>.
8. O'Neill J. *Technical Risk Assessment: a Practitioner's Guide*. Australia, 2007. – 29 p.
9. ISO 8402-2019. *Quality Management and Quality Assurance – Vocabulary*, 56p.
10. Banks J., Hambric S. *Structural Surface Intensity as a Diagnostic Indicator of machinery*. *Condition Proceedings of the 54th Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology*. Virginia Beach, VA. 2001. P. 551-558.

11. McClintic K. Residual and Difference Feature Analysis with Transitional Gearbox. Data Proceedings of the 54h Meeting of the Society for Machinery Failure Prevention Technology. Virginia Beach, VA. 2000. P. 635 - 645.
12. Cooke R.M. The design of reliability databases, part I: review of standard design concepts. Reliability Engineering and System Safety. 1996. 51. P. 137-146.
13. Safety and Shipping Review: Report & Insights. URL:<https://www.agcs.allianz.com/news-and-insights/reports/shipping-safety.html> (дата звернення: 15.10.2023).
14. Information about accidents with ships at sea and GDP. URL: <https://sea.rostransnadzor.gov.ru/funktsii/rassledovanie-transportny-h-proisshes/analiz-i-sostoyanieavarijnost>. (дата звернення: 15.10.2023).
15. Copernicus Maritime Surveillance. URL: <https://www.emsa.europa.eu/publications/reports.html>. (дата звернення: 15.10.2023).
16. Code of The International Standards and Recommended Practices for a Safety Investigation into a Marine Casualty or Marine Incident (Casualty Investigation Code): Resolution MSC.255(84)). IMO Publishing, 2008. 24 p.
17. Global Integrated Shipping Information System. URL: <https://gis.imo.org/Public/Default.aspx>. (дата звернення: 15.10.2023).
18. Copernicus Maritime Surveillance. URL: <http://emsa.europa.eu/implementation-tasks/accident-investigation.html>. (дата звернення: 15.10.2023).
19. Statistics of Marine Accident. Japan Transport Safety Board. URL: [https://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics\\_mar.html](https://www.mlit.go.jp/jtsb/statistics_mar.html). (дата звернення: 15.10.2023).
20. ISO 9001:2015. Quality management systems—Requirements, 2015. 40 p.
21. ISO 31000:2018(E). Risk management, Geneva: International Organization for Standardization. 2018. 19 p.
22. MAIB. Marine Accident Investigation Branch Annual Report 2011. Southampton, United Kingdom: Crown. 2011, 81 p.

23. ISO 13379-1:2015(E). Condition monitoring and diagnostics of machines - Data interpretation and diagnostics techniques, 2015. 33 p.
24. Law M.A., Kelton W.D. Simulation modeling and analysis. – 4th ed. Boston: McGrawHill, 2007. 768 p.
25. Byoung Kyu Choi, Dong Hun Kang. Modeling and simulation of discrete event systems. Hoboken (New Jersey): Wiley, 2013. 432 p.
26. Vychuzhanin V., Rudnichenko N. Complex Technical System Condition Diagnostics and Prediction Computerization. CMIS-2020 Computer Modeling and Intelligent Systems/ Ceur-ws.org. 2608.2020. P.1-15. DOI: <https://doi.org/10.32782/cmim/2608-4>.
27. Кононюк О.Є. Загальна теорія розпізнавання. Математичні засоби опису об'єктів, що розпізнаються, і розпізнаючих процесів. Книга 2. К.:Освіта України, 2012. 588 с.
28. Vychuzhanin V., Rudnichenko N. Assessment of risks structurally and functionally complex technical systems. Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. 2014. 1. 2. P.18-22. DOI: <https://doi.org/10.15587/1729-4061.2014.19846>.
29. Asuquo M., Wang J., Zhang L, Phylip-Jones, G. An integrated risk assessment for maintenance prediction of oil wetted gearbox and bearing in marine and offshore industries using a fuzzy rule base method. Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ, 2020. 234 p. DOI: <https://doi.org/147509021989952>.
30. Zhang M., Montewka J., Manderbacka T., Kujala P., Hirdaris S. A Big Data Analytics Method for the Evaluation of Ship. Ship Collision Risk reflecting Hydrometeorological Conditions. Reliability Engineering & System Safety. 2021. 213. 21 p. Doi: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107674>.
31. Compare M, Baraldi P, Zio E. Challenges to IoT-Enabled Predictive Maintenance for Industry 4.0. IEEE Internet Things. 2020. P .4585 – 4597, DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2019.2957029>.

32. Xu Z, Saleh JH. Machine learning for reliability engineering and safety applications: Review of current status and future opportunities. *Reliab Eng Syst Saf*, 2021. 51 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.107530>.

33. Casimir E., Boutleux G., Yahoui A. Ze use of features selection and nearest neighbors rule for faults diagnostic in induction motors. *Engineering Applications of Artificial Intelligence*. 2006. 19. 2. P.169–177.

34. Tran V. T., Yang B., Oh M. Fault diagnosis of induction motor based on decision trees and adaptive neuro-fuzzy inference. *Expert Systems with Applications*. 2009. 36. 2. P.1840–1849.

35. Liu J., Djurdjanovic D., Marko K. A. A divide and conquer approach to anomaly detection, localization and diagnosis,. *Mechanical Systems and Signal Processing*. 2009. 23. 8. P. 2488–2499. 36. ISO 13379 - 2:2015-04. Condition monitoring and diagnostics of machines – General guidelines on data interpretation and diagnostics techniques. Enter. 2015-03-01, 2015. 21 p.

37. Khomfoi S., Tolbert L. M. Fault diagnostic system for a multilevel inverter using a neural network. *IEEE Transactions on Power Electronics*. 2007. 22. .3. P.1062–1069.

38. Li X., Zhao J., Peng Z. Fault detection and diagnosis of a gearbox in marine propulsion systems using bispectrum analysis and artiěcial neural networks. *Journal of Marine Science and Application*. 2011. 10. 1. P.17–24.

39. Wang D., Miao Q., Kang R. Robust health evaluation of gearbox subject to tooth failure with wavelet decomposition. *Journal of Sound and Vibration*, 2009. 324. 3. 5. P.1141–1157.

40. Malinowski J. A Monte Carlo method for estimating reliability parameters of a complex repairable technical system with intercomponent dependencies. *IEEE Transactions on Reliability*. 2013. 62. 1. P. 256–266.

41. Lisnianski A., Elmakias D., Laredo D., BennHaim H. A multistate Markov model for a short-term reliability analysis of a power generating unit. *Reliability Engineering & System Safety*. 2012. 98. P. 1– 6.

42. Marcot B.G., Penman T.D. Advances in Bayesian network modelling: Integration of modelling technologies. *Environmental Modelling and Software*. 2019. 111. P. 386 – 393. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2018.09.016>.
43. Jensen F.V. *Bayesian Networks and Decision Graphs*. Berlin: Springer, 2007. 457 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-0-387-68282-2>.
44. Fam M.L., He X., Konovessis D. Dynamic Bayesian Belief Network for long-term monitoring and system barrier failure analysis: Decommissioned wells. 2022. 9. P.1-10. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.mex.2021.101600>.
45. Wulan, M., Petrovic D. A fuzzy logic based system for risk analysis and evaluation within enterprise collaborations. *Computers in Industry*. 2012. 63. 8. P. 739–748. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compind.2012.08.012>.
46. IEC61508 (7 parts). Functional safety of electrical/electronic/programmable electronic safety-related systems. IEC, 1998-2000.
47. IEC61511. Functional safety - Safety instrumented systems for the process industry sector. IEC, 2004.
48. Jensen F. V. *Bayesian networks basics*. - Tech. Rep. Denmark:, Aalborg Univ,1996.12 p.
49. Li Mingyang, Liu Jian, Li Jing, Kim Byoung Uk. Bayesian modeling of multi-state hierarchical systems with multi-level information aggregation. *Reliability Engineering & System Safety*. 2014. 124. P. 158–164.
50. Wang Chen R., Guan C. A Bayesian inference-based approach for performance prognostics towards uncertainty quantification and its applications on the marine diesel engine. *ISA Trans*. 2021. P.118, 159–173.
51. Handayani, D., Sediono W. Anomaly Detection in Vessel Tracking: A Bayesian Networks (Bns) Approach. *International Journal of Maritime Engineering (RINA Transactions Part A)*. 2015.157 (A3). P. 145–152.
52. Vychuzhanin V., Rudnichenko N. Cognitive Model of the Internal Combustion Engine. *SAE Technical Paper 2018-01-1738*, 2018. 10 p. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1738>.

53. Conrady S., Jouffe L. Modeling Vehicle Choice and Simulating Market Share with Bayesian Networks. 2010. 29 p. URL: [https://library.bayesia.com/download/attachments/4882677/choice\\_modeling\\_v32.pdf?api=v2](https://library.bayesia.com/download/attachments/4882677/choice_modeling_v32.pdf?api=v2).

(дата звернення: 15.10.2023).

54. Conrady S., Jouffe L. Probabilistic Latent Factor Induction with BayesiaLab. 2011. 45 p. URL: <https://www.bayesia.com/bayesia/bayesialab/bayesialab>. (дата звернення: 15.10.2023).

55. Conrady S., Jouffe L. Vehicle Size, Weight, and Injury Risk. 2013. 84 p. URL: [https://www.researchgate.net/publication/268804510\\_Vehicle\\_Size\\_Weight\\_and\\_Injury\\_Risk\\_-\\_High-Dimensional\\_Modeling\\_and\\_Causal\\_Inference\\_with\\_Bayesian\\_Networks](https://www.researchgate.net/publication/268804510_Vehicle_Size_Weight_and_Injury_Risk_-_High-Dimensional_Modeling_and_Causal_Inference_with_Bayesian_Networks). (дата звернення: 15.10.2023).

56. Agena's Bayesian Network Technology. URL: <https://www.agenarisk.com>. (дата звернення: 15.10.2023).

57. Woodberry O., Mascaro S. Programming Bayesian Network Solutions with Netica. Bayesian Intelligence, 2014. 206 p.

58. Norsys Software Corp., Netica API Programmer's Library, Reference Manual, C Language Version, Version 4.18 October 18, 2010. URL: [http://www.norsys.com/downloads/NeticaAPIMan\\_C.pdf](http://www.norsys.com/downloads/NeticaAPIMan_C.pdf). (дата звернення: 15.10.2023).

59. Norsys Software Corp., Netica-J, Reference Manual, Java Version of Netica API, Version 4.18 October 21, 2010. URL: [http://www.norsys.com/downloads/NeticaJ\\_Man\\_418.pdf](http://www.norsys.com/downloads/NeticaJ_Man_418.pdf). (дата звернення: 15.10.2023).

60. Hugin Expert, Building a Bayesian Network. URL: <https://www.hugin.com/wp-content/uploads/2016/05/Building-a-BN-Tutorial.pdf>. (дата звернення: 15.10.2023).

61. Bayes Fusion, LLC. GeNIe Modeler, User Manual, Version 2.2.4, Built on 4/3.2018. URL: <https://support.bayesfusion.com/docs/GeNIe.pdf>. (дата звернення: 15.10.2023).

62. Bayes Fusion, LLC. SMILE: Structural Modeling, Inference, and Learning Engine: Programmer's Manual, Version 2.2.2. 2018. URL: <https://support.bayesfusion.com/docs/SMILE.pdf>. (дата звернення: 15.10.2023).
63. Murphy K. The Bayes Net Toolbox for Matlab, 2001. 20 p. URL: <https://www.cs.ubc.ca/~murphyk/Papers/bnt.pdf>. (дата звернення: 15.10.2023).
64. David Barber, The BRML Matlab Package , 2012. 9 p.
65. Hojsgaard S. Bayesian networks in R with the gRain package. Denmark: Aalborg University, 2023, 19 p. URL: <https://cran.r-project.org/web/packages/gRain/vignettes/gRain-intro.pdf>. (дата звернення: 15.10.2023).
66. Axelrod R. The Structure of Decision: Cognitive Maps of Political Elites. Princeton: University Press, 1976, 422 p.
67. Beetz M., Buss M., Wollherr. D. Cognitive technical systems—what is the role of artificial intelligence? Lecture Notes in Computer Science. 2007. P. 19–42. DOI: [https://doi.org/10.1007/978-3-540-74565-5\\_3](https://doi.org/10.1007/978-3-540-74565-5_3).
68. Kolowrocki K., Soszy SskaBudny J. Reliability and safety of complex technical systems and processes. Modeling – Identification – Prediction – Optimization. – London: Springer Series in Reliability Engineering, 2011. 405 p.
69. Yu H., Yang J., Mo H. Reliability analysis of repairable multistate system with common bus performance sharing. Reliability Engineering & System Safety. 2015. 132. P. 90–96.
70. Yong L., Anxin L., Xiaonan Z. Complex multiistate system reliability modeling and assessment. International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST). 2012. 4. 9. P. 4260–4267.
71. Аронов І.З. Сучасні проблеми безпеки технічних систем і аналізу ризику. Х.: Інтуит, 2021. 451 с.
72. Kirwan B., Ainsworth L.K. A Guide to Task Analysis. Taylor Francis Ltd, Taylor Francis Ltd., 4 John Street, London WCIN 2ET, UK, 1992. 417 p.
73. ISO/IEC/IEEE 15288:2015 "Systems and software engineering - System life cycle processes".
74. ISO 31000:2009 "Risk management - Principles and guidelines".

75. Aven, T. Foundations of Risk Analysis. England: John Wiley & Sons Ltd, The Atrium, Southern Gate, Chichester, West Sussex PO19 8SQ, 2003. 205 p. DOI: <https://doi.org/10.1002/0470871245>.
76. Fragola J.R. Reliability and Risk Analysis Database Development: a Historical Perspective. Reliability Engineering and System Safety. 1996. 51. P. 125-136.
77. ISO 31000:2018(E). Risk management, Geneva: International Organization for Standardization, 2018. 19 p.
78. 81.ISO/IEC 31010:2019. Risk management - Risk assessment techniques, 2019. 127 p.
79. IEC TR 63039:2016. Probabilistic risk analysis of technological systems - Estimation of final event rate at a given initial state", 2016. 79 p.
80. Vychuzhanin V.V., Rudnichenko N.D. Tekhnicheskiye riski slozhnykh kompleksov funktsional'no vzaimosvyazannykh strukturnykh komponentov sudovykh energeticheskikh ustanovok. Vísnik Odes'kogo natsional'nogo mors'kogo uníversitetu, zбірnik naukovikh prats. 2014. 2(40). P. 68-77.
81. Boullosa-Falces D., Barrena J.L.L. Monitoring of fuel oil process of marine diesel engine. Appl. Therm. Eng. 2017. P. 127. 517–526. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.036>.
82. OREDA-Offshore Reliability Data Handbook. – 6th Edition / OREDA 2015 6TH EDITION, 2015. 831 p.
83. Guidelines for formal safety assessment (FSA) for use in the IMO rule-making process international maritime organization , 2002, 54 p.
84. SAE JA1012. A Guide to the Reliability-Centered Maintenance (RCM) Standard, Society of Automotive Engineers, 2002, 57 p.
85. IEC 61882. Hazard and operability studies (HAZOP studies) — Application guide, 2016. 195 p.
86. IEC 60812. Analysis techniques for system reliability - Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA), 2018. 93 p.
87. IEC 61025. Fault tree analysis (FTA), 2006. 8 p.

88. IEC 62502. Analysis techniques for dependability - Event tree analysis (ETA), 2010. 87 p.
89. IEC 60812. Failure modes and effects analysis (FMEA and FMECA), 2018. 165 p.
90. Kawasaki Y. The Marine Diesel Engine and its Reliability Problems. Bulletin of the Marine Engineers Society of Japan. 1998. 8.1. P. 3-13.
91. NASA/SP-2011-3421 Probabilistic Risk Assessment Procedures Guide for NASA Managers and Practitioners NASA Headquarters Washington, D.C. 20546, December 2011. 431 p.
92. George-Williams H., Santhosh T. V., Patelli E. Simulation Methods for the Analysis of Complex Systems. Oxford, United Kingdom. 2022. 19 p.
93. Shannon, R. E. Systems simulation: the art and science. Englewood Cliffs, N.J: Prentice-Hall. 1975. 375 p.
94. Rudnychenko N.D., Vychuzhanyn V.V. Vzaymodeystvye tekhnicheskikh sredstv SÉU na osnove kohnytyvnoho modelyrovanyya. Materialy VI Mizhnarodnoyi naukovo–tekhnichnoyi konferentsiyi Sudnova enerhetyka: stan ta problemy, 2013. P. 58–60.
95. Schwenk C.R. The cognitive perspective on strategic decision making. Journal of Management Studies. 2007. 25. 1. P. 41–55.
96. Vychuzhanin V.V. Informatsionnaya kognitivnaya model' tekhnologicheskoy vzaimozavisimosti slozhnykh tekhnicheskikh system. Ínformatika ta matematichní metodi v modelyuvanní. 2013. 3.3. P. 240-247.
97. Raptodimos Y., Lazakis I. Using artificial neural network-self-organising map for data clustering of marine engine condition monitoring applications. Ships Offshore Struc. 2018. 13. P. 649–656. DOI:<https://doi.org/10.1080/17445302.2018.1443694>.
98. Phylip-Jones G. An integrated risk assessment for maintenance prediction of oil wetted gearbox and bearing in marine and offshore industries using a fuzzy rule base method. Proc. Inst. Mech. Eng. Part M J. Eng. Marit. Environ. 2020, 234 p.

99. Harrington E.C. The desirability Function. *Industrial Quality Control*, 21(10), 1965 P. 494–498.
100. Rudnichenko N., Vychuzhanin V., Polyvianchuk A., Mateichyk V. Complex Technical System Condition Diagnostics and Prediction Computerization. *CMIS-2020 Computer Modeling and Intelligent Systems / CEUR Workshop Proceedings*, 2608. 2020. P. 42–56.
101. Vychuzhanin V.V., Rudnichenko N.D., Vychuzhanin A.V., Kozlov A.Ye. Programnoye obespecheniye avtomatizatsii otsenki riska otkazov slozhnykh tekhnicheskikh system. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2019. 9. 4. P. 315-323. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v9.no4>.
102. Zhang P., Gao Z., Cao L., Dong F., Zou Y. Marine Systems and Equipment Prognostics and Health Management: A Systematic Review from Health Condition Monitoring to Maintenance Strategy. *Machines*, 2022. 53 p. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines10020072>,
103. Lan F., Jiang Y., Wang H.Y. Performance Prediction Method of Prognostics and Health Management of Marine Diesel Engine. *3rd International Conference on Applied Mathematics, Modeling and Simulation*, Shanghai, China, 20–21 September 2020; IOP Publishing: Bristol, UK, 2020. 1670. P.1-8. DOI: <https://doi.org/10.1088/1742-6596/1670/1/012014>.
104. Vychuzhanin V. V. Information support remote risk assessment of complex technological systems. *Computer science is the method in matematichni modelyuvanni*. 2016. 2. P. 133–141.
105. Pohorletskyi D., Gritsuk I., Zenkin E., Bulgakov N., Golovan A., Kuric I., Mateichyk V. The Complex Application of Monitoring and Express Diagnosing for Searching Failures on Common Rail System Units. *SAE International*. 9.10. 2018-01-1773. 2018. DOI: <https://doi.org/10.4271/2018-01-1773>.
106. Yong L., Anxin L., Xiaonan Z. Complex multiistate system reliability modeling and assessment. *International Journal of Engineering Science and Technology (IJEST)*. 2012. 4. 9. P. 4260–4267.

107. Majid R. *Advances in Statistical Forecasting Methods: An Overview*. Economic Affairs. 2018. 63(4). P. 815-831.
108. Yang Hu<sup>1</sup>, Xuewen Miao, Yong Si, Ershun Pan, Enrico Zio. *Prognostics and Health Management: A Review from the Perspectives of Design, Development and Decision*. Reliability Engineering & System Safety. September 2021. 30 p. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.ress.2021.108063>.
109. Cordeiro-Costas M., Villanueva D., Егуна-Oller P., Martнnez-Comesaca M., Ramos S. *Load Forecasting with Machine Learning and Deep Learning Methods*. Basel, Switzerland. 2023. 25 p.  
DOI: <https://doi.org/10.3390/app13137933>
110. Witten I.H., Frank E. *Data mining: practical machine learning tools and techniques*. SF: Morgan Kaufmann Publ., 2005, 525 p.
111. Huang H. Z. Support vector machine based estimation of remaining useful life: current research status and future trends. *Journal of Mechanical Science and Technology*. 2015. 29 (1). P. 151-163.
112. Susto G. A., Schirru A., Pampuri S., McLoone S. Machine learning for predictive maintenance: A multiple classifier approach. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*. 2014. 11(3). P. 812- 820.
113. Dumargue T., Pougeon J., Masse J. *An Approach to Designing PHM Systems with Systems Engineering*. Eur Conf PHM Soc, 2016. 12 p.
114. Calabrese Francesca, Regattiera Alberto, Bottib Lucia, Galizia Francesco Gabriele. *Prognostic Health Management of Production Systems. New Proposed Approach and Experimental Evidences* | *Procedia Manufacturing*, 2019. P. 260–269. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.promfg.2020.01.333>.
115. ISO 13381-1:2015 *Condition monitoring and diagnostics of machines – Prognostics – Part 1: General guidelines*. Enter. 2015-03-01, 2015. 21 p.
116. IEC 60812. *Analysis techniques for system reliability – Procedure for failure mode and effects analysis (FMEA)*, 2006. 11 p.
117. International maritime organization. *guidelines for formal safety assessment (fsa) for use in the imo rule-making process*, London, 2002. 54 p.

118. Vychuzhanin V.V., Rudnichenko N.D. Development of the neural network model for prediction failure risk's of the complex technical systems components. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2016. 6. 4. P. 333-338.
119. Gupta M. M., Sinka N. K. *Intelligent Control Systems: Theory and Applications*. Eds: IEEE Press, 1996. 820 p.
120. Vasil'ev S. N. From Classical Control Problems to Intelligent Control. *Control theory and process*. 2001. № 1. P. 5–22.
121. Vychuzhanin V.V., Shibaeva N.O. Information support remote risk assessment of complex technological systems. *Computer science is the method in matematichni modelyuvanni*. 2016. 2. P. 133–141.
122. Rudnichenko N.D., Vychuzhanin V.V. Metod upravleniya riskami sudovykh slozhnykh tekhnicheskikh system. *Problemi tekhniki*, 2014. 2. P.138-142.
123. Владимиров В.А. Управління ризиком. К.: ЮНІТІ, 2020. – 352 с.
124. Vychuzhanin V., Rudnichenko N., Boyko V. et al. Devising a method for the estimation and prediction of technical condition of ship complex systems. *Eastern-European Journal of Enterprise Technologies*. 2016. 84. 6/9. P. 4-11.
125. Вичужанин В.В. Технічні ризики складних комплексів функціонально взаємопов'язаних структурних компонентів суднових енергетичних установок. *Вісник Одеського національного морського університету, збірник наукових праць*, 2014. 41. 2. С. 68-77.
126. Turban E., Aronson J. *Decision Support Systems and Intelligent Systems*. New Delhi, India: Prentice Hall, 2001. 47 p.
127. Burstein F., Holsapple C. *Handbook on Decision Support Systems*. New York: Springer-Verlag, 2008. 854 p. DOI: <https://doi.org/10.1007/978-3-540-48713-5>.
128. Power D. *Decision Support Systems Concepts and Resources for Managers*. London:Greenwood Publishing Group, 2002. 272 p.

129. Сніжко В.Л., Бенін Д.М. Системи підтримки прийняття рішень. В.: Тріада, 2022. 165 с.
130. Бідюк П.І., Тимошук О.Л., Коваленко А.Є., Коршевніук Л.О. Системи і методи підтримки прийняття рішень. Підручник. Київ: КПІ ім. Ігоря Сікорського, 2022. 610 с.
131. Морозов О.О., Баран Л.Б., Копейчиков В.В. та ін. Рада-3" – система підтримки прийняття рішень для законодавчого процесу Верховної Ради України та рад інших рівнів. Математичні машини і системи. 2008. 1. С. 3 – 22.
132. Gavrilyuk, E. A. Information Decision-Support System on the Basis of the Method of Diagnostics and Control of the Technical State of Industrial Equipment [Electronic resource], 2018, DOI: <https://doi.org/10.1109/Dynamics.2018.8601472>.
133. Turikov M.I. Dynamics of Systems, Mechanisms and Machines (Dinamics). IEEE Xplore Digital Library. - Electronic text data, 2018. P. 1-7. URL:<https://ieeexplore.ieee.org/document/8601472>.(дата звернення: 15.10.2023).
134. Сай Ван Квонг. A predictive maintenance modeling tool implemented as R-package and web-application. SoICT 2019: Proceedings of the Tenth International Symposium on Information and Communication Technology (Hanoi, Ha Long Bay, Viet Nam, December 4-6, 2019). New York (NY, USA): ACM, 2019. P. 433-440. DOI: <https://doi.org/10.1145/3368926.3369693>.
135. Pinter G. Integration of OLAP and data mining for analysis of results from dependability evaluation experiments. Int.J.Knowledge Management Studies. 2008. 2. 4. P. 479 – 498. DOI: <https://doi.org/10.1504/IJKMS.2008.019753>.
136. Aqel Musbah J., Nakshabandi Omar A., Adeniyi Ayodeji. Decision Support Systems Classification in Industry. Periodicals of Engineering and Natural Sciences. 2019. 7.2. P.774-785.
137. Soman S., Zasuwa G., Yee J. Automation, Decision Support, and Expert Systems in Nephrology. Information technology. 2008. 15. P. 42-55. DOI:<https://doi.org/10.1053/j.ackd.2007.10.005>

138. Ran, Y. A Survey of Predictive Maintenance: Systems, Purposes and Approaches. IEEE communications surveys & tutorials. 2019. P.1-36.
139. Zemouri R. Gouriveau R. Towards accurate and reproducible predictions for prognostic: an approach combining a RRBF network and an autoregressive model. IFAC Proceedings. 2010. 43. 3. P. 140–145. DOI:<https://doi.org/10.3182/20100701-2-pt-4012.00025>
140. Zhang L. Li X., Yu J. A review of fault prognostics in condition based maintenance. 2006. P. 635-752.
141. Siepermann M. Risk Cost Accounting and Bottom Price Calculation—A Risk Management Information System. International Conference on the Economics of Grids, Clouds, Systems, and Services. – Springer, Cham. 2017. P. 43-55.
142. Garcia R.V., Parades-Valverde M.A., Satas-Zarate M.P. Exploring Intelligent Decision Support Systems, Current State and New Trends. Springer International Publishing AG, 2018. 764 p.
143. Borra N., Dey S., Bhattacharyya M.S. Bouhleb, Intelligent Decision Support Systems: Applications in Signal Processing, De Gruyter Frontiers. Computational Intelligence. 2019. 4. 195 p. DOI: <https://doi.org/10.1515/9783110621105>.
144. Minglun R., Shanlin Y., Weidong Z. Intelligent Decision Support System State of Art and Challenges. Journal of System Engineering. 2002. 17(5). P.430 – 439.
145. Снітюк В.Є. Еволюційно-параметрична оптимізація RBF-мережі. Штучний інтелект. 2003. 4. С. 493 - 501.
146. Divyarajsinh N. P., Brijesh B. M. Face Recognition Methods & Applications International Journal of Computer Technology & Applications. 2013. 4 (1). P. 84-86.
147. Hartley, R.V.L. Information Theory of The Fourier Analysis and Wave Mechanics. 1955. P. 535-563.

148. Hornick K. Multilayer Feedforward Networks are Universal Approximators. *Neural Networks*. 1989. 2. P. 359 – 366.

149. Морозов А.А. Ситуаційне управління та системи підтримки прийняття рішень. Збірник доповідей науково-практичної конференції з міжнародною участю. «Системи підтримки прийняття рішень. Теорія і практика». 2005. С. 5 – 9.

150. Глушков В.М. Кібернетика, обчислювальна техніка, інформатика: 3 т. – Т. 2: ЕОМ – технічна база кібернетики. Київ: Наукова думка, 1990. С. 140 - 177.

151. Wiener N. *Cybernetics or Control and Communication in the Animal and the Machine*, the Technology Press and John Wiley & Sons, Inc., New York, 1948. 288 p.

152. Сергієнко І. Інформатика та комп'ютерні технології. К.: Наукова думка, 2004. 430 с.

153. Li Z., Wang Y., Wang K. S. Intelligent predictive maintenance for fault diagnosis and prognosis in machine centers: Industry 4.0 scenario. *Advances in Manufacturing*. 2017. 5(4). P. 377-387.

154. Lopez C., Ishizaka A. A scenario-based modeling method for controlling ECM performance. *Expert systems with applications*. 2018. 97. P. 253-265. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.eswa.2017.12.024>.

155. Снитюк В.Е. Еволюційні технології прийняття рішень в умовах невизначеності: автореф. дис. на здобуття наук. ступеня д-ра техн. наук: 05.13.06. Київ, 2009. – 36 с.

156. Minglun Ren, Shanlin Yang, Weidong Zhu. Intelligent Decision Support System State of Art and Challenges. *Journal of System Engineering*. 2002, 17(5). P. 430 – 439.

157. Luger D. *Artificial intelligence: strategies and methods for solving complex problems* . Williams, 2003, 779 p.

158. Chuang C. L. Case-based reasoning support for liver disease diagnosis. 2011. *Artif. Intell. Med.* 53(1). P. 15-23. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.artmed.2011.06.002>.
159. Ocampo E, MacEiras M, Herrera S, Maurente C, Rodriguez D. *Expert Systems with Applications*, 2011. 38 p.
160. Cowell R.G., Dawid A.P., Lauritzen S.L., Spiegelhalter D.J. *Probabilistic Networks and Expert Systems*, New York: Springer-Verlag, 1999. 313 p. DOI: <https://doi.org/10.1198/JASA.2001.S424>.
161. James V. Hansen, Rayman D. Meservy and Larry E. Wood. *Case-Based Reasoning: Application Techniques for Decision Support. Intelligent systems in accounting, finance and management.* 1995. 4. P.137-146. DOI: <https://doi.org/10.1002/j.1099-1174.1995.tb00086.x>.
162. Shaoli C, Jianjun Yi, Hui J, Xiaomin Z. Ontology and CBR based automated decision-making method for the disassembly of mechanical products. *Advanced Engineering Informatics*, 2016. 30. 3. P. 564-584.
163. Aamodt A., Plaza E. *Case-Based Reasoning: Foundational Issues, Methodological Variations, and System Approaches.* Artificial Intelligence Communications. IOS Press. 1994. 7. 1. Pp. 39–59.
164. В'юн В.І., Кузьменко Г.Є., Міхненко Ю.А. Проблемно-орієнтовані бази знань – платформа саморозвитку СППР. *Математичні машини і системи.* 2009. 4. С.52-57.
165. Кузьменко Г.Є., Литвинов В.А., Ходак В.І. Створення баз знань в системах колективного прийняття рішень типу Ситуаційних центрів. *Математичні машини і системи.* 2000. 1. С. 71– 80.
166. Boullosa-Falces D., Barrena J.L.L., Lopez-Arraiza A., Menendez J. Monitoring of fuel oil process of marine diesel engine. *Appl. Therm. Eng.* 2017. 127. P. 517–526. DOI:<https://doi.org/10.1016/j.applthermaleng.2017.08.036>.
167. Krarowski R. Diagnosis modern systems of marine diesel engine. *Journal of KONES Powertrain and Transport.* 2014. 21(3). P. 191-198. DOI:<https://doi.org/10.5604/12314005.1133203>.

168. Казимир В.В. Модельно-орієнтоване управління інтелектуальними виробничими системами: дис. доктора техн. наук: 05.13.06. Київ, 2005. – 358 с.
169. Smyth Barry, Keane Mark T. Retrieving adaptable cases. The role of adaptation knowledge in case retrieval. Berlin / Heidelberg: Springer. 1994. 837. P. 209-220.
170. Shunkun Yang, Chong Bian, Xing Li, Lin Tan.. Optimized fault diagnosis based on FMEA-style CBR and BN for embedded software system. The International Journal of Advanced Manufacturing Technology. 2018. 94. P. 3441 – 3453. DOI:<https://doi.org/10.1007/s00170-017-0110-y>.
171. Klein, J.H., Cork R.B. An approach to technical risk assessment. International Journal of Project Management. 1998. 16(6). P. 345-351.
172. Kertzner P., Watters J. Process Control System Security Technical Risk Assessment Methodology & Technical Implementation. Research Report. 2008. 13. 47 p.
173. Berman A. F. Method of synthesis and analysis of fault trees based on the concepts of mechanism and kinetics of events. Problems of risk analysis. 2018. 15. 3. P. 62 - 77.
174. Vychuzhanin V.V. Rudnichenko N.D., Vychuzhanin A.V., Kozlov A.Ye. Informatsionnoye obespecheniye sistemy vyyavleniya riska otkazov avtomobil'nogo oborudovaniya. Informatika i matematicheskiye metody v modelirovanii. 2019. 9. 3. P. 121-133.
175. Fuks V.A. Universal system for remote vehicle diagnostics. Young scientist. 2019. 12. P. 40-44.
176. Vakhania Nodari, Werner Frank. A brief look at multi-criteria problems - multi-threshold optimization versus Pareto-Optimization. Multicriteria Optimization - Pareto-optimal and Related Principles: Pareto-optimal and Related Principles. Zagreb: Intechopen, 2020. 11 p.

177. Steuer R. Multiple Criteria Optimization: Theory, Computation, and Application. N.Y.-Chichester-Brisbane-Toronto-Singapore: J.Wiley&Sons Inc., 1986. 546 p. DOI:<https://doi.org/10.1002/oca.4660100109>.
178. ISO 14830-1:2019(E) Condition monitoring and diagnostics of machine systems - Tribology-based monitoring and diagnostics. 2019. 15 p.
179. Horn J. Nafpliotis N., Goldberg D. A niched pareto genetic algorithm for multiobjective optimization. Proceedings of the 1st IEEE Congress of Evolutionary Computation. 1994. P. 82-87.
180. Rosenman M.A., Gero J.S. Reducing the pareto optimal set in multicriteria optimization. Engineering Optimization. 1985. 8. P. 189-206.
181. Mosavi A. The Multiobjective Optimization Package of IOSO; Applications and Future Trends. Conference: Conference of PhD Students in Computer Science, Szeged, Hungary. 2010. P. 55-56. DOI: <https://doi.org/10.13140/RG.2.1.3788.5286>.
182. Sumana De, Baisakhi Chakraborty. A Novel CBR-Decision Tree Based Intelligent Car Fault Diagnosis System (CFDS). International Journal of Recent Technology and Engineering. 2019. 8. P. 2180-2193. DOI: <https://doi.org/10.35940/ijrte.B2390.078219>.
183. Fdez-Riverola F., Corchado, J.M. CBR based System for Forecasting Red Tides. International Journal of Knowledge-Based Systems. 2003. 16. 5-. P. 321-328.
184. Watson I.D., Marir F. Case-based reasoning: A review. The Knowledge Engineering Review. 1994. 9. 4. P. 355-381.

## Список опублікованих праць за темою дисертації

Наукові праці, в яких опубліковані основні наукові результати дисертації:

1. Вичужанін В.В., Рудніченко Н.Д., Вичужанін О.В., Юрченко М.О. Програмний додаток для автоматизації побудови моделі оцінок ризику відмов складних технічних систем. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2018. Т.8. №3. С. 200-208. URL: [http://immm.op.edu.ua/files/archive/n3\\_v8\\_2018/2018\\_3\(2\).pdf](http://immm.op.edu.ua/files/archive/n3_v8_2018/2018_3(2).pdf) (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

2. Вичужанін В.В., Рудніченко Н.Д., Вичужанін О.В. Мобільний додаток для моніторингу, діагностики та прогнозування ризику відмов компонентів складної технічної системи. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2018. Т.8. №4. С. 334-344. URL: <http://dspace.opu.ua/jspui/bitstream/123456789/8835/1/9.pdf> (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

3. Вичужанін В.В., Рудніченко Н.Д., Вичужанін О.В. Інформаційне забезпечення системи виявлення ризику відмов автомобільного обладнання. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2019. Т.9. №3. С.168-177. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v9.no3.168>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

4. Вичужанін В.В., Рудніченко Н.Д., Вичужанін О.В., Козлов А.Ю. Програмне забезпечення автоматизації оцінки ризику відмов складних технічних систем. *Інформатика та математичні методи в моделюванні*. 2019. Т.9. №4. С. 315-323. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v9.no4.315>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

5. Вичужанін В.В., Рудніченко Н.Д., Вичужанін О.В. Інтелектуальна система діагностики і прогнозування ризику відмов складних технічних систем. *Інформаційні системи та технології. Стан та перспективи:*

монографія / Бармак О., Божаткін С.. та ін; під нав. ред. проф. В.Вичужаніна. - Одеса: НУ «ОМА», 2021. С.108 - 133. URL: <https://eir.nuos.edu.ua/bitstreams/ed5fcfb6-2e33-4d7b-8e65-ed14d8f8c258/download>.

6. Vychuzhanin Vladimir, Shibaeva Natalia, Rudnichenko Nickolay, Vychuzhanin Alexey. Optimization of data transmission system information parameters for complex technical system's state diagnosing. *Ceur-ws.org, CMIS-2021*. Vol. 2864, P. 445 – 454. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-2864/paper39.pdf>. (Indexed in SCOPUS).

7. Vychuzhanin Alexey. Intelligent system for assessing and forecasting the risk of failure of components of a complex technical system. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2022. Vol. 12. No3. P. 154-161. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v12.no3.154>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

8. Vychuzhanin Alexey. Intelligent system for supporting decision making for assessing the technical condition of complex systems. *Informatics and Mathematical Methods in Simulation*. 2023. Vol. 13. No3-4. P. 219-227. DOI: <https://doi.org/10.15276/imms.v13.no3-4.219>. (Реєстр наукових фахових видань України, категорія «Б»).

9. Vychuzhanin Vladimir, Shibaeva Natalia, Vychuzhanin Alexey, Rudnichenko Nickolay. Intellectualization Method and Model of Complex Technical System's Failures Risk Estimation and Prediction. *Ceur-ws.org, CMIS-2023*. Vol. 3392. P. 130 – 140. DOI: <https://doi.org/10.32782/cm/3392-11>. <https://ceur-ws.org/Vol-3392/paper11.pdf>. (Indexed in SCOPUS).

10. Vychuzhanin Vladimir, Rudnichenko Nickolay, Vychuzhanin Alexey, Rychlik Andrzej. Diagnosis Intellectualization of Complex Technical Systems. *Ceur-ws.org, ICST - 2023*. Vol. 3513. P. 352 – 362. URL: <https://ceur-ws.org/Vol-3513/paper29.pdf>. (Indexed in SCOPUS).

11. Vychuzhanin Alexey. Information Processing in Control and Decision-Making Systems. Problems and solutions. Section 5. Intellectual models and knowledge engineering technologies. Intelligent monitoring of the technical

condition of complex systems. Обробка інформації в системах управління та прийняття рішень. Проблеми та рішення. Монографія/Аксак Н. и др.; під наук. ред. проф. В.Вичужаніна – Одеса: НУ «ОМА», 2023. С. 212-232. URL: [https://www.researchgate.net/publication/375665853\\_Information\\_processing\\_in\\_control\\_and\\_decision-making\\_systems\\_problems\\_and\\_solutions](https://www.researchgate.net/publication/375665853_Information_processing_in_control_and_decision-making_systems_problems_and_solutions).

12. Vychuzhanin Vladimir, Vychuzhanin Alexey. Information Processing in Control and Decision-Making Systems. Problems and solutions. Diagnosis Intellectualization of complex technical systems. Обробка інформації в системах управління та прийняття рішень. Проблеми та рішення. Монографія / Аксак Н., Бобок І. и др.; під наук. ред. проф. В.Вичужаніна – Одеса: НУ «ОМА», 2023. С. 260-276. URL:[https://www.researchgate.net/publication/375665853\\_Information\\_processing\\_in\\_control\\_and\\_decision-making\\_systems\\_problems\\_and\\_solutions](https://www.researchgate.net/publication/375665853_Information_processing_in_control_and_decision-making_systems_problems_and_solutions).

Наукові праці, які засвідчують апробацію матеріалів дисертації:

13. Вычужанин В.В., Вычужанин А.В. Когнітивно-імпульсна модель оцінки живучості складних технічних систем. *«Інформаційні управляючі системи і технології» (ІУСТ ОДЕСА-2020)*. матеріали ІХ Міжнародної науково-практичної конференції. 2020. Одеса: Екологія. С. 219 - 224. URL: <http://icst-conf.com/2020.pdf>.

14. Вычужанин В.В., Вычужанин А.В. Інтелектуальна система оцінок ризику відмов складних технічних систем. *«Інформаційні управляючі системи і технології» (ІУСТ-ОДЕСА-2021)*. Матеріали Х Міжнародної науково-практичної конференції. 2021. Одеса: Екологія. С. 87 - 91. URL: <http://icst-conf.com/2021.pdf>.

15. Vychuzhanin Vladimir, Vychuzhanin Alexey. Optimization of information parameters when diagnosing the state of a complex technical system. *VIII Міжнародна науково-практична конференція «Інформатика. Культура.*

*Технології»* *ІКТ2021*, С. 22-23. URL: <https://drive.google.com/file/d/1YjTsi3p2jsOoZYyawr1wGFFPrpTW8K0z/view>.

16. Vychuzhanin Alexey. Decision support system for assessment and prediction of the technical condition of complex systems. Збірник тез доповідей. *II Міжнародної науково-практичної інтернет-конференції. «Інновації та перспективні шляхи розвитку інформаційних технологій» (ІПШПІТ-2023)*. 6 грудня 2023 р. м. Черкаси. С.204-205. URL: [https://drive.google.com/file/d/1f0cc\\_HaFDH4G3AI\\_NfwqfTjaMjyWBvkc/view](https://drive.google.com/file/d/1f0cc_HaFDH4G3AI_NfwqfTjaMjyWBvkc/view).

17. Vychuzhanin Alexey. Intellectualization model of complex technical system's failures risk estimation. Сучасні інформаційні технології та системи в управлінні Збірник матеріалів *IV Міжнародної науково-практичної конференції молодих вчених, аспірантів і студентів (Інтернет-конференція)* Київ. 20–21 квітня 2023. С.135-137.

18. Vychuzhanin Alexey. Intelligent decision support system for assessing the risk of failures of complex technical systems. *VI International scientific and practical conference «Modeling, control and information technologies»*, Rivne, November 9-11. 2023. С.181 – 183. DOI:<https://doi.org/10.31713/MCIT.2023.055>

19. Vychuzhanin Alexey. Program evaluation and prediction of the risk of failure of the components of a complex technical system. *Автоматизація та комп'ютерно-інтегровані технології – 2023, IX міжнародна науково-практична конференція молодих учених, аспірантів і студентів АКІТ – 2023*, Київ. 19 квітня 2023 р. С. 81-82. URL: <https://tpza.kpi.ua/conferences/proceedings/AKIT-2023.pdf>.

20. Vychuzhanin Alexey. Model for assessing the risk of failure of components of complex technical systems. *XXIII Всеукраїнська науково-технічна конференція молодих вчених, аспірантів та студентів «Стан, досягнення та перспективи інформаційних систем і технологій»*. Матеріали конференції. Одеса 20-21 квітня 2023 р. С. 43-45. URL: [https://ontu.edu.ua/download/konfi/2023/Conference\\_abstract-IT-21-22-04-23.pdf](https://ontu.edu.ua/download/konfi/2023/Conference_abstract-IT-21-22-04-23.pdf).

21. Vychuzhanin Alexey. Intellectualization of technical condition assessment of ship complex systems. *XI International Scientific and Practical Conference "Information Control Systems & Technologies (ICST-2023)*. 2023. С.124-130. URL: <http://icst-conf.com/2023.pdf>.

22. Vychuzhanin A. Application of precedent technology to support decision-making to ensure the efficiency of complex technical systems. *I (VII) міжнародна науково-практична конференція здобувачів вищої освіти і молодих учених «Інформаційні технології: теорія і практика»*. Тези доповідей. Дніпро 20 – 22 березня 2024 р. С. 165-167. URI: <http://ir.nmu.org.ua/handle/123456789/166565>.

Таблиця Б.1 Методи та моделі діагностування ТС складних систем

Метод	Назва	Опис і застосування	Переваги	Недоліки
1	2	3	4	5
Детермінований	Аналіз видів і наслідків в відмов -FMEA/FMECA [5].	Для ідентифікації способів відмови компонентів, систем, що призводять до невиконання їхніх функцій.	Застосуємо до видів відмов, пов'язаних із помилками персоналу, порушенням працездатності обладнання та роботи систем програмного забезпечення. Дозволяє ідентифікувати види відмов компонентів. Причини відмов та їх наслідки для системи. Дозволяє отримати вхідні дані для розроблення програм моніторингу, надаючи інформацію про необхідні об'єкти моніторингу та їхні особливості.	Використовується тільки для ідентифікації окремих відмов, а не їх поєднання. Трудомісткий і тривалий метод для складних багаторівневих систем. Застосовується тільки до бінарних станам (працездатному/непрацездатному) системи.
	Монте-Карло [23]	Використовується для оцінки діапазону зміни результатів і відносної частоти значень у цьому діапазоні.	Адаптація до будь-якого розподілу вхідних даних. Відносна простота моделей.	Неможливо адекватно моделювати події з дуже високою або дуже низькою ймовірністю появи

1	2	3	4	5
	Марковського аналізу [24].	<p>Застосуємо для аналізу ремонтно-придатних систем у ситуації, коли майбутній стан системи залежить тільки від її поточного стану.</p> <p>Трансформування невизначеності для звичайних аналітичних моделей.</p> <p>Розрахунок імовірностей, якщо аналітичні методи не можуть бути використані.</p>	Можливість обчислення ймовірностей станів систем із відновленням і множинними станами деградації	<p>Ґрунтується на припущенні про сталість імовірностей переходу і наявність тільки двох можливих станів елементів системи (відмови і відновлення).</p> <p>Використовується припущення, що всі розглянуті події статистично незалежні. Великі системи важко моделювати через комбінаторний вибух станів через комбінаторний вибух</p>
Вірогідній	Аналіз дерева подій - ЕТА [5].	Для моделювання, обчислення та ранжування різних сценаріїв інциденту.	Легко схематично зобразити сценарії розвитку подій після виникнення початкової події, провести аналіз працездатного стану або відмови допоміжних систем чи функцій, призначених для зниження наслідків відмови, та оцінити їхній вплив.	Застосуємо тільки для двох станів системи (працездатного стану і відмови)

1	2	3	4	5
	Аналіз дерева несправностей - FTA [5].	<p>Використовується для визначення якісної оцінки під час ідентифікації причин відмови та шляхів, що призводять до кінцевої події.</p> <p>Використовується для кількісної оцінки під час обчислення ймовірності.</p>	<p>Дає змогу здійснити аналіз різноманітних чинників, врахувати вплив відмов, безпосередньо пов'язаних із кінцевою подією.</p>	<p>Невизначеність оцінок імовірностей базисних подій впливає на оцінку ймовірності та вірогідність виникнення кінцевого співбуття. Є статичною моделлю, без урахування фактора часо-вої залежності.</p> <p>Може бути застосований тільки до бінарних СТС.</p>
	Аналіз причин і наслідків в [5].	<p>Поєднує метод дерева несправностей і дерева подій.</p> <p>Використовується для аналізу різних варіантів роботи системи після виникнення критичної події залежно від поведінки її підсистем (наприклад, аварійних).</p>	<p>Переваги методу аналізу причин і наслідків аналогічні загальним перевагам методів дерева подій і дерева несправностей.</p>	<p>Складність порівняно з методами дерева несправностей і дерева подій, як під час побудови схеми, так і під час врахування залежностей у разі кількісного аналізу.</p>

1	2	3	4	5
	<p>Байєсівських мереж [25,26,27]</p>	<p>Відображає отримання інформації про недоступні для спостереження змінні за допомогою інформації, що приходить у спостережувані змінні та зв'язки між ними. Доцільно застосовувати для вирішення задач ймовірнісного прогнозування та оцінки ризику відмов.</p>	<p>Для використання методу достатньо знання апіорної інформації. Здатність одночасно виконувати як передбачувальні, так і класифікуючі функції.</p>	<p>Визначення всіх взаємодій для складних систем не завжди здійсненне. Потребує знання безлічі умовних імовірностей, одержуваних експертними методами.</p>
	<p>Логіко-вірогідний [5].</p>	<p>Застосовується для розв'язання задач із великою кількістю елементів, що мають у своїй основі відображення систем у вигляді орієнтованих графів кінцевої події, якщо відомі значення ймовірностей початкових подій.</p>	<p>Результати застосування методу містять значення вагових значень елементів, що дає змогу оцінити їхню значущість для системи</p>	<p>Складність у визначенні точних значень імовірностей через статичний характер розглянутих подій, станів, що розглядаються, працездатний/непрацездатний/непрацездатний.</p>

1	2	3	4	5
Експертних оцінок	Нечітких множин [28]	Застосовують у разі невизначеності в кількісному описі сценаріїв і під час оцінки взаємовпливу факторів ризику.	Можливість спрощення розрахункових математичних моделей	Брак відомостей щодо функцій розподілу параметрів. Спрошеність розрахункових моделей знижує достовірність оцінок ризику.
Оцінки в умовах невизначеності нестационарної природи	Дослідження небезпеки та працездатності [5].	Структурований і систематизований аналіз процесу або системи.	Застосовність до широкого класу систем, процесів.	Тривалий аналіз у часі. Обмеженість завданнями проекту, областю та цілями дослідження
	Аналізу дерева рішень [5].	Дозволяє послідовно зіставити альтернативні варіанти рішень з їхніми вихідними даними і відповідною невизначеністю.	Точне графічне представлення всіх деталей вирішення проблеми. Можливість розрахунку оптимального шляху вирішення проблеми.	Може призвести до зайвого спрощення ситуації.
	Нейромережів і технології [5].	Дає можливість системі фіксувати показання датчиків і порівнювати їх з еталонними значеннями	Дає змогу проводити аналіз одержуваних параметрів системи в комплексі для прогнозування можливих збоїв у системі.	Використання методу потребує значних витрат часу. Надмірно висока точність при навчальній вибірці може спричинити нестійкість результатів.

Таблиця В.1 Оцінки ефективності ІС

Найменування та суть підходів до оцінки ефективності ІС	Переваги	Нестачі
1	2	3
Оцінка економічної ефективності ІС шляхом зіставлення економічного ефекту від розробки (використання) з витратами на його створення (придбання)	Враховується, наскільки впровадження ІС дозволило зменшити кількість робочих місць аналітиків та отримати економію на їхній заробітній платі.	Складно відокремити ефект, отриманий в результаті використання від ефекту, викликаного іншими видами діяльності та зовнішнім середовищем
Оцінка тимчасової ефективності ІС (наскільки ІС дозволяє скоротити час на обробку вихідних даних для прийняття рішення та обґрунтування оптимального рішення)	Даний підхід простий в застосуванні, для отримання результату можна використовувати тестові завдання до введення системи в експлуатацію	Не враховує вартісні показники

1	2	3
<p>Оцінка якості ІС, при якій визначається, якою мірою задоволені вимоги користувачів ІС. У відносно з можливостями виробників та завданнями, поставленими проєктувальниками ІС.</p> <p>Для розрахунку показника якості ІС використовується теоретико-множинний підхід</p>	<p>Дозволяє визначити шляхи доопрацювання, адаптації або розвитку системи, а в деяких випадках - способи зниження її собівартості та підвищення економічної ефективності</p>	<p>Присутня деяка суб'єктивізія оцінки, - задоволеність вимог може виявитися - різною для різних людей однієї і тієї ж професії</p> <p>Не враховує вартісні показники</p>
<p>Оцінка економічної ефективності ІС шляхом зіставлення фінансових результатів, отриманих безпосередньо від прийнятих рішень, з витратами на створення (при здобуття) ІС</p>	<p>Спосіб застосовується, якщо система призначена для підтримки прийняття рішень, результат реалізації яких дозволяє отримати прибуток у грошовому вираженні в короткостроковій перспективі (наприклад, системи підтримки прийняття біржових рішень)</p>	<p>Ефективність, розрахована таким способом, буде змінюватися динамічно в залежності від числа успішних або неуспішних рішень, що принесли відповідно прибуток чи збиток</p>

1	2	3
<p>Оцінка ефективності інтелектуальної частини ПС, що включає бази правил, знань, моделей, прецедентів. Цей напрямок є новим, математичну основу його становить теорія наближених множин, що дозволяє оцінювати ефективність правил та алгоритмів рішень</p>	<p>Новизна підходу полягає в тому, що він застосовний до ПС будь-якої спеціалізації, незалежно від того, чи є економічний ефект від рішення відразу ж (як при торгівлі на біржі), або його складно виділити із загальної сукупності фактора ефективності. (як у разі рішень щодо управління підприємством)</p>	<p>При оцінці бази правил, знань, моделей, прецедентів великий розмірності потрібен напис додаткового модуль ПС, що здійснює моніторинг ефективності</p>

## Лістинг програмного коду KIM

```
{
"rej": "sv_",
"row_razd" : ";",
"decimal_razd" : ",",
"v":
{
"tab":{"zrr":1, "bs":1},
"zrr":{"rdvs":1, "rope":1, "ms2":1},
"bs":{"ms1":1, "rdvs":1},
"rdvs":{"rope":1,"dvs":1},
"rope":{"ms1":1, "ope":1, "rphm":1},
"dvs":{"ms1":1},
"ms1":{"ope":1},
"rphm":{"phm":1},
"ms2":{"phm":1},
"ope":{"ms2":1},
"phm":{"mp":1},
"mp":{"pk":1},
"pk":{}
},
"w":
{
"tab":1.0,
"zrr":1.0,
"bs":1.0,
"rdvs":1.0,
"rope":1.0,
"dvs":1.0,
```

```
"ms1":1.0,  
"rphm":1.0,  
"ms2":1.0,  
"ope":1.0,  
"phm":1.0,  
    "mp":1.0,  
    "pk":1.0  
    },  
"ntau":  
    {  
    "tab":1.0,  
    "zrr":1.0,  
    "bs":1.0,  
    "rdvs":1.0,  
    "rope":1.0,  
    "dvs":1.0,  
    "ms1":1.0,  
    "rphm":1.0,  
    "ms2":1.0,  
    "ope":1.0,  
    "phm":1.0,  
        "mp":1.0,  
        "pk":1.0  
    },  
"names":  
    {  
    "tab":"беЕ імені",  
    "zrr":"беЕ імені",  
    "bs":"беЕ імені",  
    "rdvs":"беЕ імені",
```

```

"rope":"беЕ імені",
"dvs":"беЕ імені",
"ms1":"беЕ імені",
"rphm":"беЕ імені",
"ms2":"беЕ імені",
"ope":"беЕ імені",
"phm":"беЕ імені",
    "mp":"беЕ імені",
    "pk":"беЕ імені"
}
}
{
"rej": "sv_",
"row_razd" : ";",
"decimal_razd" : ",",
"v":
{
"tab":{"zrr":1, "bs":1},
    "zrr":{"rdvs":1, "rope":1, "ms2":1},
    "bs":{"ms1":1, "rdvs":1},
    "rdvs":{"rope":1,"dvs":1},
    "rope":{"ms1":1, "ope":1, "rphm":1},
    "dvs":{"ms1":1},
    "ms1":{"ope":1},
    "rphm":{"phm":1},
    "ms2":{"phm":1},
    "ope":{"ms2":1},
    "phm":{"mp":1},
    "mp":{"pk":1},
    "pk":{}
}
}

```

```
    },  
  "w":  
  {  
    "tab":1.0,  
    "zrr":1.0,  
    "bs":1.0,  
    "rdvs":1.0,  
    "rope":1.0,  
    "dvs":1.0,  
    "ms1":1.0,  
    "rphm":1.0,  
    "ms2":1.0,  
    "ope":1.0,  
    "phm":1.0,  
    "mp":1.0,  
    "pk":1.0  
  },  
  "ntau":  
  {  
    "tab":1.0,  
    "zrr":1.0,  
    "bs":1.0,  
    "rdvs":1.0,  
    "rope":1.0,  
    "dvs":1.0,  
    "ms1":1.0,  
    "rphm":1.0,  
    "ms2":1.0,  
    "ope":1.0,  
    "phm":1.0,
```

```

    "mp":1.0,
    "pk":1.0
  },
  "names":
  {
    "tab":"беЕ імені",
    "zrr":"беЕ імені",
    "bs":"беЕ імені",
    "rdvs":"беЕ імені",
    "rope":"беЕ імені",
    "dvs":"беЕ імені",
    "ms1":"беЕ імені",
    "rphm":"беЕ імені",
    "ms2":"беЕ імені",
    "ope":"беЕ імені",
    "phm":"беЕ імені",
    "mp":"беЕ імені",
    "pk":"беЕ імені"
  }
}
#!/usr/bin/python
# -*- coding: utf8 -*-
import json
import os
w = {}
v = {}
ntau={}
names={}
rej = "big_el_1"
row_razd = ""

```

```

decimal_razd = ""
json_name = "matrix_st.json"
"""
    "Оцінка ризику відмов ДВЗ "
"""
kU = {} # коефіцієнт структурної загрози
"""
    Формат вхідного файлу:
    {
        "name": "ДВЗ",
        "Code": "e1",
        "in": [],
        "out": {"e2", "e3"}
    }
    {
    "v":
        {
            "V01":{"V06":1},
            "V02":{"V06":1},
            "V03":{"V06":1},
            "V04":{"V07":1},
            "V05":{"V07":1},
            "V06":{"V08":1},
            "V07":{"V09":1},
            "V08":{"V09":1,"V10":1},
            "V09":{"V10":1,"V11":1, "V12":1},
            "V10":{"V13":1,"V14":1,"V15":1},
            "V11":{},
            "V12":{"V16":1,"V17":1},
            "V13":{}

```

```
"V14": {},
"V15": {},
"V16": {},
"V17": {}
},
"w":
{
"V01": 1.0,
"V02": 1.0,
"V03": 1.0,
"V04": 1.0,
"V05": 1.0,
"V06": 1.0,
"V07": 1.0,
"V08": 1.0,
"V09": 1.0,
"V10": 1.0,
"V11": 1.0,
"V12": 1.0,
"V13": 1.0,
"V14": 1.0,
"V15": 1.0,
"V16": 1.0,
"V17": 1.0
}
}
# формат вихідного файлу
{
'V01': {'V06': 1},
'V02': {'V06': 1},
```

```

'V03':{'V06':1},
'V04':{'V07':1},
'V05':{'V07':1},
'V06':{'V08':1},
'V07':{'V09':1},
'V08':{'V09':1,'V10':1},
'V09':{'V10':1,'V11':1, 'V12':1},
'V10':{'V13':1,'V14':1,'V15':1},
'V11':{},
'V12':{'V16':1,'V17':1},
'V13':{},
'V14':{},
'V15':{},
'V16':{},
'V17':{}
}

```

```

"""

```

```

def GetJson(w,v,ntau,names,rej, row_razd, decimal_razd, json_name):

```

```

    f_json = open(json_name,'rb')

```

```

    s = f_json.read()

```

```

    f_json.close()

```

```

    z = json.loads(s)

```

```

    # w

```

```

    w = {}

```

```

    keyzz = z["w"].keys()

```

```

    keyzz.sort()

```

```

        for i in keyzz:

```

```

            w[i] = z["w"][i]

```

```

    v = {}

```

```

    keyzz = z["v"].keys()

```

```

keyzz.sort()
    for i in keyzz:
        v[i] = z["v"][i]
ntau = {}
keyzz = z["ntau"].keys()
keyzz.sort()
    for i in keyzz:
        ntau[i] = z["ntau"][i]
names = {}
keyzz = z["names"].keys()
keyzz.sort()
    for i in keyzz:
        names[i] = z["names"][i]
rej = z["rej"]
row_razd = z["row_razd"] # константа роздільника рядів для csv
decimal_razd = z["decimal_razd"] # константа поділу цифр для csv
return (w,v,ntau,names,rej, row_razd, decimal_razd, json_name )

# допоміжні функції
# чорно-білий dot
def DotFile(t,Vs,w,v,rej):
    time_step = '%02i' % (t+1)
    name_f = rej+'_'+time_step+'.dot'
    preconfig = ""
    node [shape=circle,fontsize=14,fixedsized=true,width=.9];
    ranksep = 0.5;
    nodesep = 0.1;
    rankdir = TB;
    ratio = auto;
    center = true;
    mincross = 2.0 ;\n

```

```

'''
# preconfig = ""
# node [shape=circle,fontsize=12,fixedsized=true,width=0.7];
# size = "8,4";
# rankdir = LR;
# mincross = 2.0 ;\n
# '''
f = open(name_f,'wb')
f.write('digraph t{\n')
f.write(preconfig)
for i in Vs:
    s_w = '%.1f' % w[i]
    #label = i+'[label="'+i+'('+s_w+')"]\n'
    label = i+'[label="'+i+'"]\n'
    f.write(label)
for i in Vs:
    if w[i]<0.33:
        style = 'dotted'
    elif w[i]<0.66:
        style = 'dashed'
    else:
        style = 'solid'
    label_color = i+'[shape=circle,style='+style+']\n'
    f.write(label_color)
for i in Vs:
    for j in v[i].keys():
        arr = i+' -> '+j+';\n'
        f.write(arr)
f.write('}\n')
f.close()

```

```

w,v,ntau,names,rej,      row_razd,      decimal_razd,      json_name      =
GetJson(w,v,ntau,names,rej, row_razd, decimal_razd, json_name)
print '*****'
print ' w '
print '*****'
for i in w.keys():
    print i,w[i]
print '*****'
print ' v '
print '*****'
for i in v.keys():
    print i,v[i]
print '*****'
print ' ntau '
print '*****'
for i in ntau.keys():
    print i,ntau[i]
print rej
print row_razd
print decimal_razd
print json_name
row_razd = str(row_razd)
# сортуємо список вершин для зручності читання
Vs = w.keys()
Vs.sort()
# проходимо циклом по вершинах
imp = {}
imp2 = {}
# малюємо вихідний стан графа
DotFile(0,Vs,w,v,'fund')

```

for ver in Vs:

```

    rej = 'struct_kond_'+ver # дескриптор режиму роботи
    # задаємо імпульси
    for im_ver in Vs:
        imp[im_ver] = 0.0
        imp2[im_ver] = 0.0
    imp[ver] = 1.0
    # відкриваємо для запису csv-файл
    f_csv = open(rej+'.csv','wb')
    f_csv.write("""T""+row_razd)
    """
    # друкуємо заголовки
    razd = '+-----+'+'-----+'*len(Vs)
    print
    print razd
    print '|    |',
    for i in Vs:
        print i,'|',
    print
    print razd
    print '|    |',
    """
    # скидаємо інформацію у файл
    for i in Vs:
        f_csv.write("""+i+"""+row_razd)
    f_csv.write('\n')
    f_csv.write(' 0 '+row_razd)
    for i in Vs:
        s_w = '%.2f' % w[i]
        d = str(s_w).replace('.',decimal_razd)+row_razd

```

```

"""
print s_w, '|',
"""

f_csv.write(d)
"""

print
"""

f_csv.write('\n')
# малюємо вихідний стан орграфа
DotFile(0,Vs,w,v,rej)
# піддаємо вершини дії імпульсу
sum_imp = 0
for i in imp.keys():
    sum_imp += imp[i]
t = 0
while sum_imp > 0:
    time_step = '%2i' % t
    """
    print '|imp ',time_step, '|',
    for i in Vs:
        s_i = '%.2f' % imp[i]
        print s_i, '|',
    print
    print razd
    print '|шаг ',time_step, '|',
    """
    f_csv.write(time_step+row_razd)
    # піддаємо вершини дії імпульсу
    for i in Vs:
        w[i] = w[i] * (1 - imp[i])

```

```

s_w = '%.2f % w[i]
d = str(s_w).replace('.',decimal_razd)+row_razd
"""

print s_w, '|',
"""

f_csv.write(d)
"""

print
"""

f_csv.write('\n')
# зберігаємо все у файл
        namerej = rej + str(time_step)
DotFile(t,Vs,w,v,rej)
print t,rej
# відстежуємо поширення імпульсу на t+1
for i in imp.keys():
    # вбудовуємо захист - якщо вузол вже
    # вийшов з ладу - імпульс по ньому не
    # піде
    if imp[i] != 0:
        imp2[i] = 0
        for j in v[i].keys():
            if w[j] > 0:
                imp2[j] = imp[i]*v[i][j]
for i in imp.keys():
    imp[i] = imp2[i]
# підраховуємо нову суму імпульсу
# якщо вона дорівнює нулю – все закінчилося
sum_imp = 0
for i in imp.keys():

```

```

        sum_imp += imp[i]
    t+=1
"""
print razd
"""
f_csv.close()
# рахуємо коефіцієнт

N = float(len(Vs))
N0 = 0.0
for vv in Vs:
    if w[vv] == 0:
        N0 += 1
kU[ver] = N0/N
# скидаємо всі вершини на вихідні
for vv in Vs:
    w[vv] = 1.0
# друкуємо kU
print
print
print ' Структурні погрози'
print '          '
print '-----+-----'
print ' ЕЛЕМЕНТ | kU'
print '-----+-----'
for i in Vs:
    kU_w = '%.3f' % kU[i]
    probels = '*'*(2 - len(i))
    print ' '+str(i)+probels+' |'+ kU_w

```

```

# скидаємо kU у файл
f_csv = open('kU.csv','wb')
f_csv.write('Елемент , k_s\n')
for i in Vs:
    kU_w = '%.3f % kU[i]
    f_csv.write(str(i)+' '+str(kU_w)+'\n')
f_csv.close()
# розраховуємо та друкуємо ризики
r_s_z = {}
f_csv = open('ntau.csv','wb')
f_csv.write('Елемент '+row_razd+' n over %tau\n')
for i in Vs:
    f_csv.write(str(i)+row_razd+str(ntau[i])+'\n')
f_csv.close()
f_csv = open('rs.csv','wb')
f_csv.write('Елемент, r_s\n')
print
print
print ' Структурні ризики'
print '          '
print '-----+-----'
print ' Елемент | r_s'
print '-----+-----'
for i in Vs:
    r_s = ntau[i] * kU[i]
    r_s_z[i] = r_s
    kU_w = '%.3f % r_s
    probels = ' *(2 - len(i))
    print ' '+str(i)+probels+' |'+ kU_w
    f_csv.write(str(i)+' '+str(kU_w)+'\n')

```

```

f_csv.close()
# зберігаємо ризики у файл із десятковими комами
f_csv = open('rs_sorted.csv','wb')
f_csv.write('Елемент '+row_razd+' r_s\n')
for i in Vs:
    r_s = ntau[i] * kU[i]
    kU_w = '%.3f' % r_s
    kU_w2 = str(kU_w).replace('.',decimal_razd)
    f_csv.write(str(i)+row_razd+' '+kU_w2+'\n')
f_csv.close()
# розраховуємо сумарний ризик
r_summ = 0
for i in Vs:
    r_summ += ntau[i] * r_s_z[i] * (10**-6)
print
print
print 'Загальний ризик системи:', r_summ
print
print
# друкуємо умовні позначення
print
print
print 'Умовні позначення:'
print
nammm = names.keys()
nammm.sort()
for i in nammm:
    print i, names[i]
# vim:ft=python fdm=indent go-=m go-=T go-=r go-=L go-=e ar acd
#!/usr/bin/python

```

```

# -*- coding: utf8 -*-
"""
"Оцінка ризику відмов"
"""
import json
import os
def MakeEdge(v,Vs,e):
    """ Робимо масив вершин
    # приймаємо на вхід список вершин
    # повертаємо масив із ребер
    # v - список вершин та їх зв'язків
    # будуємо список "від вузлів"
    # Перебираємо вузли - щойно трапляється
    # вузол з ребром - вписуємо його в e {}
    """
    for i in Vs:
        if len(v[i]) > 0:
            # якщо щось із вузла виходить - додаємо ці ребра ve
            ishod = v[i].keys()
            ishod.sort()
            for j in ishod:
                e[(i,j)] = v[i][j]
def GetJson(w,v,ntau,names,rej, row_razd, decimal_razd, json_name):
    """ Підпрограма, що розпаковує Json """
    f_json = open(json_name,'rb')
    s = f_json.read()
    f_json.close()
    z = json.loads(s)
    w = {}
    keyzz = z["w"].keys()

```

```

keyzz.sort()
    for i in keyzz:
        w[i] = z["w"][i]
v = {}
keyzz = z["v"].keys()
keyzz.sort()
    for i in keyzz:
        v[i] = z["v"][i]
ntau = {}
keyzz = z["ntau"].keys()
keyzz.sort()
    for i in keyzz:
        ntau[i] = z["ntau"][i]
names = {}
keyzz = z["names"].keys()
keyzz.sort()
    for i in keyzz:
        names[i] = z["names"][i]
rej = z["rej"]
row_razd = z["row_razd"]
decimal_razd = z["decimal_razd"]
return (w,v,ntau,names,rej, row_razd, decimal_razd, json_name )
def PutCsv(name,for_csv):
    """ Підпрограма скидає дані у csv-файл
        f - дескриптор файлу
        for_csv - перелік
    """
    f = open(name+'.csv','wb')
    for i in for_csv:
        f.write(i+'\n')

```

```

f.close()
def DotFile(t,Vs,w,v,rej):
    """ Підпрограма малююча dot модифікована для малювання зв'язків"""
    time_step = '%02i' % (t+1)
    name_f = rej+'_'+time_step+'.dot'
    preconfig = """
node [shape=circle,fontsize=14,fixesize=true,width=.9];
ranksep = 0.5;
nodesep = 0.1;
rankdir = TB;
ratio = auto;
center = true;
mincross = 2.0 ;\n
"""
    f = open(name_f,'wb')
    f.write('digraph t{\n')
    f.write(preconfig)
    for i in Vs:
        s_w = '%.1f' % w[i]
        label = i+'[label="'+i+'"]\n'
        f.write(label)
    for i in Vs:
        if w[i]<0.33:
            style = 'dotted'
        elif w[i]<0.66:
            style = 'dashed'
        else:
            style = 'solid'
        label_color = i+'[shape=circle,style='+style+']\n'
        f.write(label_color)

```

```

for i in Vs:
    for j in v[i].keys():
        # перевіряємо зв'язки
        if v[i][j]<0.33:
            style_sv = 'dotted'
        elif v[i][j]<0.66:
            style_sv = 'dashed'
        else:
            style_sv = 'solid'
        arr = i+' --> '+j+'[style='+style_sv+'];\n'
        f.write(arr)
f.write('}\n')
f.close()
def ImpulsEd(Vs, v, w, edge, imp, imp2, kU, for_csv, decimal_razd,
row_razd):
    """ розрахунок імпульсу по вихідній вершині ver - з ушкодженням
ребер"""
    # Vs - список вершин
    # v -
        ver = edge[1]
    for_csv.append(edge[0]+' --> '+edge[1])
    rej = 'sv_'+ver
    for im_ver in Vs:
        imp[im_ver] = 0.0
        imp2[im_ver] = 0.0
    imp[ver] = 1.0 # задаємо початковий імпульс
    beg = edge[0]
    end = edge[1]
    v[beg][end] = 0.0 # виводимо з ладу вихідне ребро
    sum_imp = 0

```

```

for i in imp.keys():
    sum_imp += imp[i]
t = 0
ff = ""
ver_spis = list(Vs)
ver_spis.sort()
for i in ver_spis:
    ff += ""+i+""+row_razd
for_csv.append(ff)
while sum_imp > 0:
    time_step = '%2i' % t
    for i in Vs:
        # ушкоджуємо вузли
        w[i] = w[i] * (1 - imp[i])
    namerej = rej + str(time_step)
    DotFile(t,Vs,w,v,rej)
    for i in imp.keys():
        if imp[i] != 0:
            imp2[i] = 0
            for j in v[i].keys():
                if w[j] > 0:
                    imp2[j] = imp[i]*v[i][j]
    # тут потрібно і можна пошкоджувати зв'язки – перша вершина
    # imp, друга imp2
    for i in imp.keys():
        # якщо імпульс є
        if imp[i] != 0:
            for j in v[i].keys():
                if v[i][j] > 0:
                    v[i][j] = v[i][j] * (1 - imp[i])

```

```

# збираємо інфу для друку
ver_spis = list(Vs)
ver_spis.sort()
ff = time_step + row_razd
for i in ver_spis:
    s_w = '%.2f' % w[i]
    d = str(s_w).replace('.',decimal_razd)+row_razd
    ff += d

for_csv.append(ff)
# рокирування imp2 -> imp
for i in imp.keys():
    imp[i] = imp2[i]
sum_imp = 0
for i in imp.keys():
    sum_imp += imp[i]
t+=1

N = float(len(Vs))
N0 = 0.0
for vv in Vs:
    if w[vv] == 0:
        N0 += 1

kU = N0/N
print "|" + str(edge) + " | " + str(kU) + "|"
for vv in Vs:
    w[vv] = 1.0
v[beg][end] = 1.0 # відновлюємо ребро
return kU

def main():
    """
    Початок основного розділу.

```

```

'''
json_name = "matrix_sv.json" # ім'я файлу з яким проводиться робота
v = {} # Список вершин та їх зв'язків
w = {} # Список вершин та їх ваг
e = {} # Список ребер - у форматі e = {(початок, кінець):зв'язок}
ntau = {}
names = {} # імена вузлів
rej = "" # режим роботи
row_razd = ""
decimal_razd = ""
kU = {} # коефіцієнти загроз
w,v,ntau,names,rej, row_razd, decimal_razd, json_name =
GetJson(w,v,ntau,names,rej, row_razd, decimal_razd, json_name)
row_razd = str(row_razd)
Vs = w.keys() # список вершин
Vs.sort() # -сортований список вершин
MakeEdge(v,Vs,e) # отримуємо масив ребер
# навіщо? а! e - з нього отримуємо e_ver - більше ні для чого він не потрібен
imp = {}
imp2 = {}
DotFile(0,Vs,w,v,rej) # заочуємо вихідну dot-діаграму
# замість вершини - підемо після закінчення гілок
# for ver in Vs:
e_ver = e.keys()
e_ver.sort()
w2 = w.copy()
v2 = v.copy()
N = len(w)
print "|edge | KSA |"
f = open('ksa.csv','wb')

```

```

stroka = "Ver A " + row_razd + "Ver B " + row_razd + ' KSA \n'
f.write(stroka)
f.close()
for i in e_ver:
    edge = i # e_ver - повне ім'я ребра ("вузолпочатку","вузолкінця")
    ver = i[1] # кінцева гілка ребра
    w,v,ntau,names,rej, row_razd, decimal_razd, json_name =
    GetJson(w,v,ntau,names,rej, row_razd, decimal_razd, json_name) # сброс на
    НОЛЬ # цього не повинно бути, але...
    for_csv = []
    ksa = ImpulsEd(Vs, v, w, edge, imp, imp2, kU, for_csv, decimal_razd,
    row_razd)
    stroka = str(edge[0]) + row_razd + " " + str(edge[1]) + " " + row_razd
    + " " + str(ksa).replace('.',decimal_razd) + '\n'
    print stroka
    f = open('ksa.csv','ab')
    f.write(stroka)
    f.close()
    PutCsv('sv_'+str(i[0]),for_csv)
keyz = e.keys()
keyz.sort()
print '{',
for z in keyz:
    s = str(z).replace('u',"")+':'+str(e[z])+','
    #print s,
print '}'
if __name__ == "__main__":
    main()
# vim:ft=python fdm=indent go-=m go-=T go-=r go-=L go-=e

```

**Додаток Д**

Мобільний додаток для діагностики ризику відмов підсистем, компонентів складної технічної системи.

Проведений аналіз технічних рішень, що дозволяють підвищити надійність функціонування СТС показали, що з вчасною і якісною діагностикою, в тому числі дистанційною складовою складних технічних систем при їх експлуатації дозволяє підвищити надійність систем і ефективність їх експлуатації. Програмна та апаратна бездротова передача даних в інформаційних системах зі смартфонами додатково з виходом до обладнання СППД даних, встановленого на березі, дозволяє здійснювати дистанційне керування та контроль витрат ресурсів, синхронізацію роботи обладнання СТС, координацію розподілених обчислювальних процесів. Слід також наголосити на актуальності використання відкритої операційної системи Android як платформи для розробки мобільних додатків (МД). Система має переваги: підтримка інтеграції сторонніх сервісів та компонентів; наявність механізмів реалізації для віртуалізації; гнучкість реалізації додатків у Java -шаблонах MVC та шаблонах проектування; підтримка захисту протоколу SSL-протоколу від інформації, що передається; можливість оптимізації передачі мобільного трафіку даних Функціональність платформи Android, що підтримується, дозволяє розробляти МД для віддаленого моніторингу та прогнозування ризику відмов технічних компонентів системи.

Розроблений мобільний додаток призначений для використання на мобільних пристроях з версією операційної системи Android, розмір екрану 4,5 дюйми та роздільна здатність 800 \* 600 пікселів і більше. Гнучкість інтерфейсу користувача досягається за рахунок: елементів кольороподілу взаємодії та візуалізації дії динаміки при їх активації; можливості зміни розміру та шрифту текстових блоків та типів написів за допомогою Turekit; підтримки перемикання між вкладками екрана за допомогою методу вибору

типу обробки подій; переважання плоских елементів дизайну над skeuomorph; ясності та динамічної анімації при рендерингу статистики у графічній формі; часткового розмиття фонові активності з появою діалогових вікон чи інформаційних повідомлень; розміщення всіх функціональних елементів в одному екрані, виключаючи необхідність прокручування вгору/вниз; Інтегрована інтелектуальна клавіатура для введення текстових даних.

Вибір системи управління базами даних (СУБД) для розробки та впровадження МД ефективно взаємодіє з мобільним клієнтським додатком ускладнюється через велику кількість на ринку доступних рішень. СУБД SQLite – вбудована підтримка файлового сервера ОС Android є перевагою у разі повністю автономного режиму. Операції МД пов'язані з необхідністю постійного підключення до віддаленого зовнішнього сервера. Використання СУБД прийнятне через інтеграцію стандартних інструментів та підтримку її бібліотеки, що дозволяє збільшити швидкість та ефективність роботи МД. У довгостроковій перспективі при розробці проекту на основі нових списків вимог для відповідної масштабованості може бути обрана СУБД NoSQL .

Для вирішення поставленої задачі розроблено таблиці МД: обладнання, датчики, параметри, ймовірність відмов обладнання СТС, збитки від відмов, параметри прогнозу, список журналів. Типи даних, які у МД - переважно цілі дійсні числа, великі і реєстраційні дані у таблиці. На основі розробленої ER-моделі реалізована конкретна фізична модель БД MySQL Workbench або SQL Navigator. Проектування сценаріїв використання програми може бути забезпечене діаграмою варіантів використання МД (рис. Д.1). Використовуються функції програм: перегляд інформації про пошкодження обладнання СТС; оцінка ймовірності відмови, структурних та функціональних ризиків відмов; пошук інформації в МД на ім'я або унікальний номер об'єкта; локальне сховище та відправлення згенерованого звіту у форматі pdf; побудова КІМ; зміна налаштувань інтерфейсу користувача; перегляд результатів прогнозу стану обладнання СТС;

включення та відключення модулів моніторингу, діагностики та прогнозування ТС обладнання СТС; ведення журналу, а також забезпечує додатковий стиск даних, надісланих на сервер.

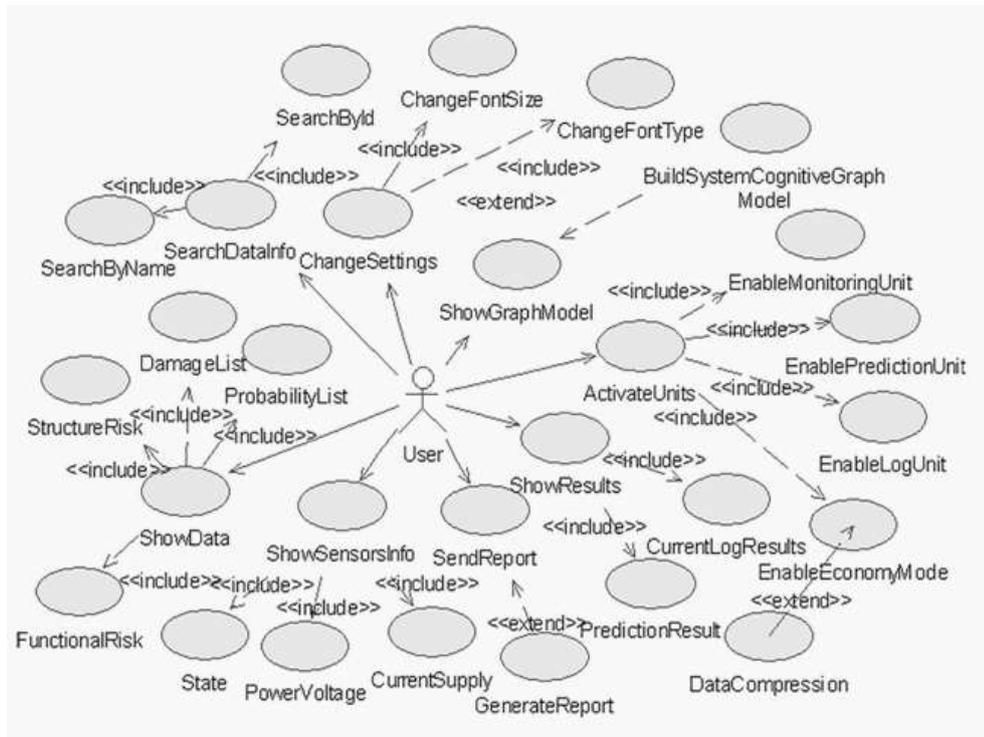


Рисунок Д.1 - Діаграма варіантів використання МД

Для формалізації класу та об'єктних моделей МД розроблено діаграму класів проекту, а також зазначено відносини між класами та їх екземплярами (рис. Д.2).

Запуск МД виконується в окремому потоці за допомогою `initApp Main class`. Процедура авторизації виконується в класі програм `Autoriz` та створює графічну активність користувача з полями входу та пароля. Кожен клас реалізує: моніторинг, діагностику, прогнозування; побудова графіка КІМ; пошук та перегляд інформації з датчиків контрольованих параметрів ТС СТС; визначення ймовірності відмов обладнання СТС, ризику відмов та збитків від відмов. Для більш докладного опису МД розробили діаграма його діяльності (рис. Д.3). Об'єкти на діаграмі: клієнт-мобільний додаток; зовнішній сервер, що синхронізує, обробляє та перевіряє статистичні дані про роботу компонентів СТС; сервер управління (виконує завдання зберігання, обробки, резервування та обміну даними із зовнішнім сервером

та системою збору даних); система збору даних (виконує функції збору даних безпосередньо з датчиків, розташованих на окремих компонентах СТС, та передає інформацію на сервер управління СТС).

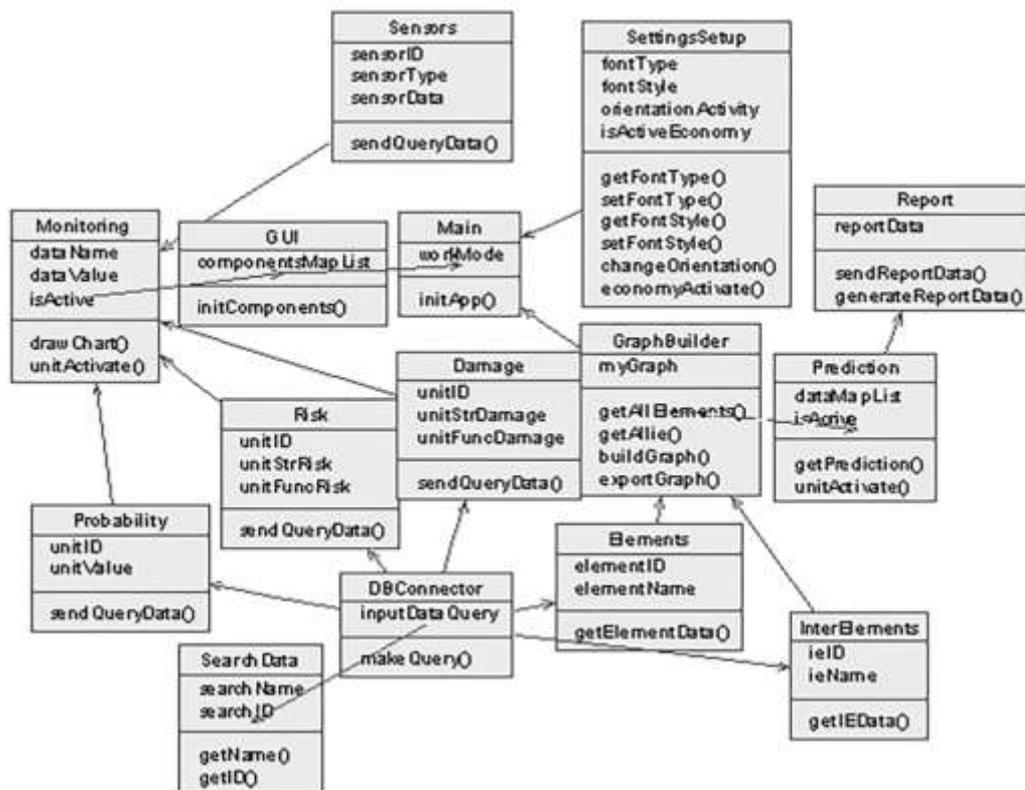


Рисунок Д.2 – Фрагмент діаграми класу МД

Для перевірки активності сервера та можливості встановлення з'єднання між сервером та клієнтом використовується МД. Воно надсилає пакет запитів для перевірки основних активних оновлень у репозиторіях, результатів перевірки даних авторизації, а також отримує технічну та статистичну інформацію про роботу СТС.

Для реалізації інтерфейсу прототипу та написання програмної кодової реалізації, формалізованої через UML-функціональність розроблено алгоритм роботи МД (рис. Д.4). Пакет інсталяції програми завантажується на мобільний пристрій у форматі \*.apk. В результаті виконується ініціалізація всіх компонентів та залежностей програмних додатків, включаючи перевірки підключення до точок бездротового доступу до Інтернету за допомогою підтримуваних технологій (з використанням пакету android.net) та дії

віддаленого сервера. Потім здійснюється процес візуалізації компонента відображення оновлення даних на сервер.

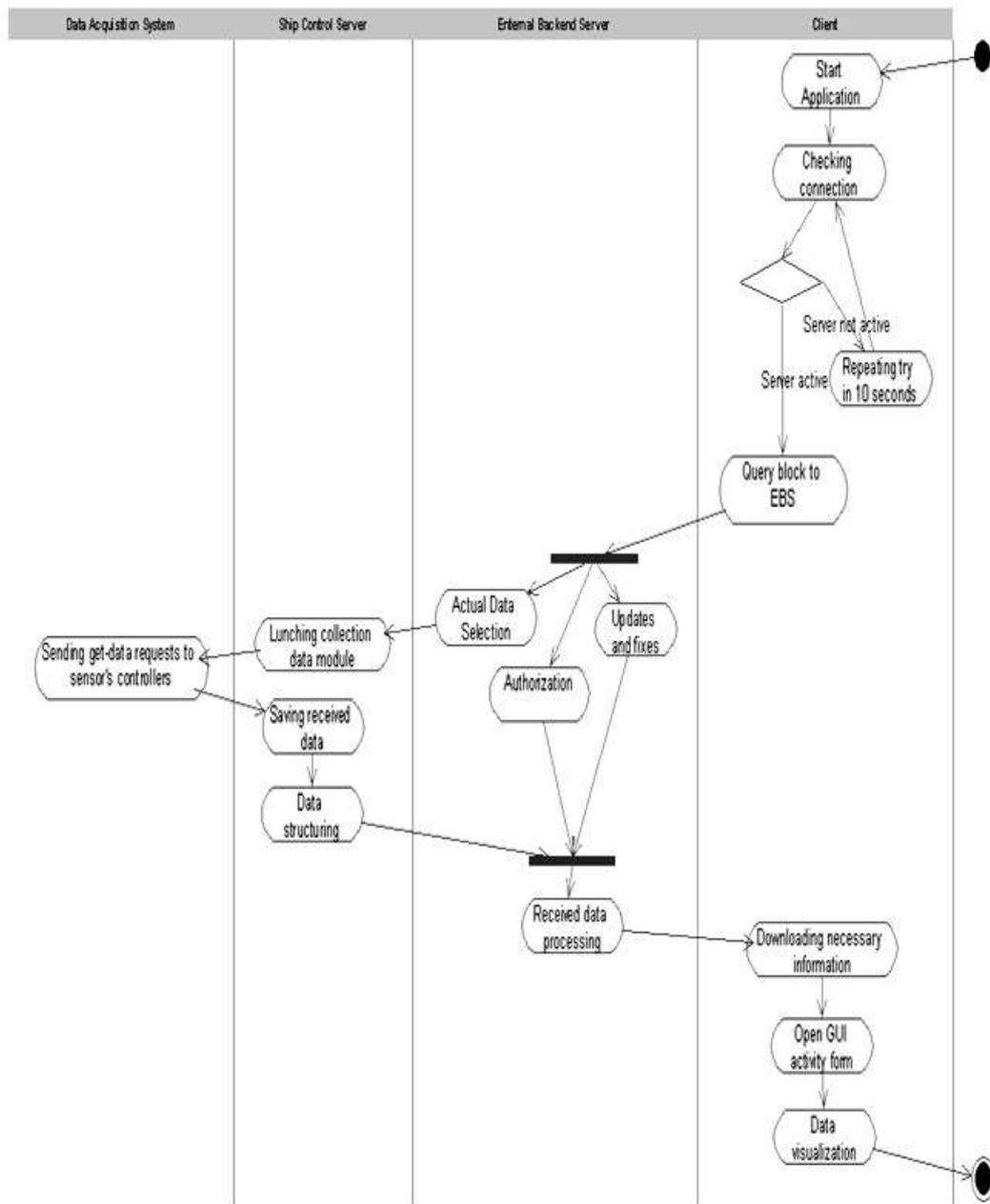


Рисунок Д.3 – Діаграма активності МД

У разі реалізації такої процедури новий процес починає встановлення необхідних пакетів та оновлення програм у фоновому режимі. Користувач застосовує інтерфейс входу до системи, ввівши ім'я користувача та пароль. Здійснюється отримання технічної та статистичної інформації про компоненти системи.

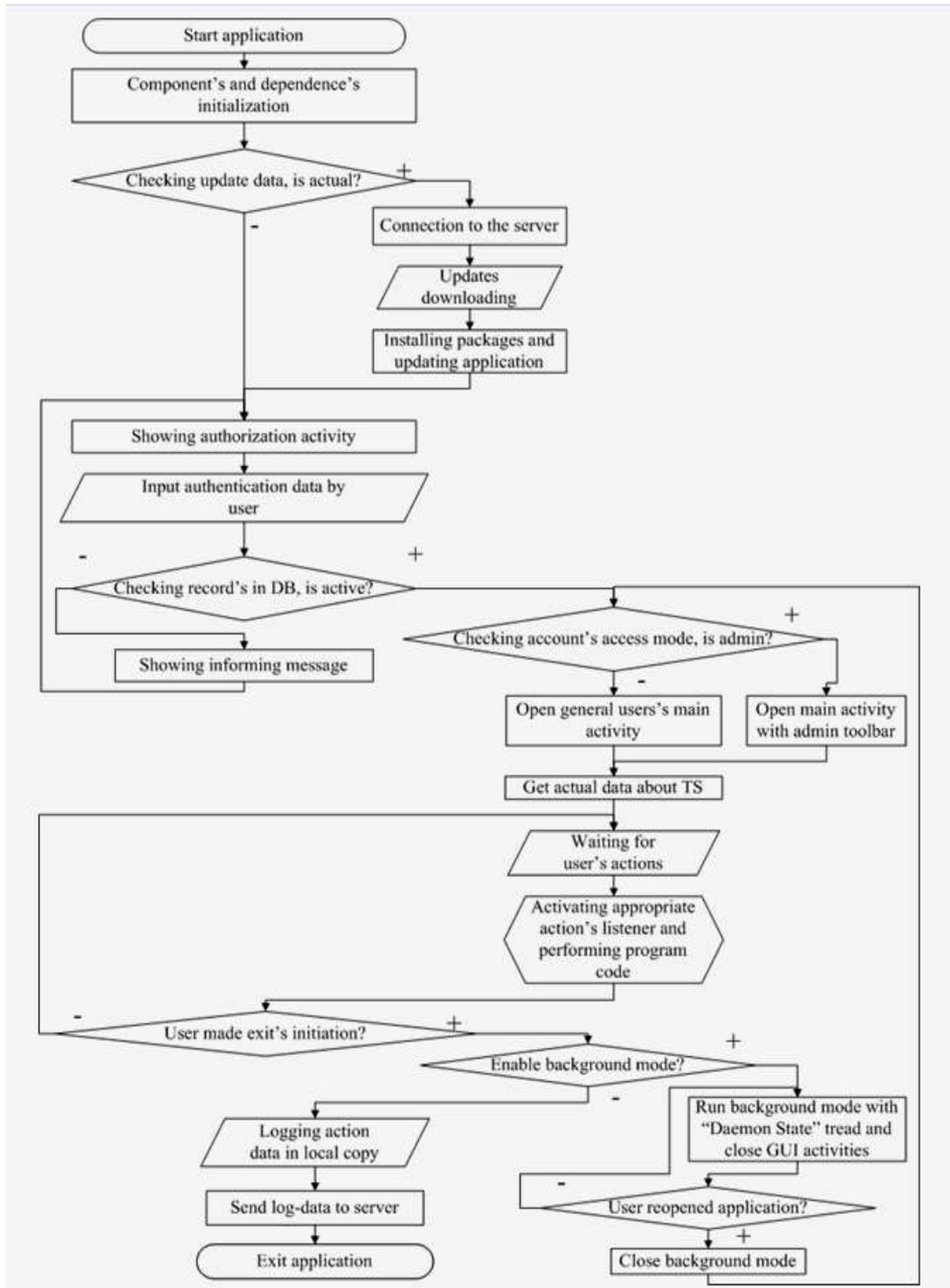


Рисунок Д.4 - Алгоритм МД

Після цього додаток переходить в основну форму, в режим очікування та режим запитів користувача, відповідно до якого здійснюється виконання програмного коду, що міститься у відповідному обробнику подій. При закритті програми з'являється візуалізація додаткового діалогового вікна, де пропонується переносити роботу МД у фоновому режимі. Якщо користувач

вибирає запуск програми у фоновому режимі в окремому процесі та потоці, тоді дія GUI вивантажується з оперативної пам'яті мобільного пристрою. Якщо програма, яка в цій точці вже знаходиться у фоновому режимі, знову запускається, режим закривається, і керування передається для перевірки доступу до режиму програми.

Коли користувач ініціює остаточне закриття програми у фоновому режимі, відбувається ведення журналу всіх дій, що виконуються у локальній копії робочого каталогу мобільного додатка. Якщо з'єднання з сервером встановлено, то надсилається дані на сервер. Після цього відбувається повна розрядка програми з основної пам'яті мобільного пристрою, що використовується.

Обсяг даних МД, що зберігаються у відповідному каталозі Cache , не повинен перевищувати 2,5 мегабайта. В іншому випадку відбудеться процедура кешування.

Розроблене МД складається з модулів:

- ініціалізації компонентів інтерфейсу користувача;
- Перевірки поточного модуля даних програми для версії програми;
- Підключення до віддаленого серверного модуля;
- побудови та візуалізації системного модуля КІМ;
- звітності, для перетворення, експорту статистики та графічних даних із додатків;
- прогноз для створення та навчання штучної нейронної мережі на основі методу зворотного поширення, лінійної функції нормалізації за допомогою дотичної функції активації. Створюється нейронна мережа, що навчається з оцінкою результатів, як значень помилок;
- візуалізації статистичних даних;
- отримання даних реалізації запитів вибірки даних, які у БД сервера.

Модулі є базовою структурою проекту розробки МД. Вони зберігаються в окремих пакетах, які можуть бути доповнені. Прототипна реалізація ПЗ Інтерфейс клієнта має форму, показану на рис. Д.5.

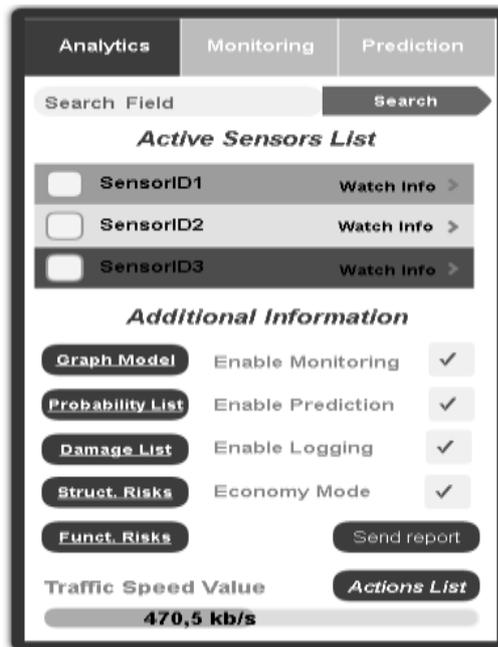


Рисунок Д.5 - Прототип інтерфейсу мобільного клієнта

Прототип розроблений з використанням хмарної служби SaaS fluidui.com, що складається з 3 вкладок: Analytics (містить компоненти, що переглядають список активних датчиків, отримання інформації та управління ними модулями моніторингу, діагностики та прогнозування ТС обладнання СТС, ведення журналів), моніторинг (включає графічні компоненти динамічної візуалізації параметрів та системи характеристик), Prediction (містить таблицю прогнозованих значень ризику в залежності від вибраного періоду часу).

Розроблений проект МД для моніторингу, діагностики та прогнозування ризику відмов обладнання СТС є повним та логічним завершенням. У процесі написання коду доцільно використання налаштування Gradle , що дозволить прискорити процес рефакторингу , профілювання та інтеграції із системою контролю версій GIT. Розроблене МД дозволяє спростити процес оцінки ризику відмов обладнання СТС. Додатковий контент та функціональні доповнення проекту можуть бути можливими завдяки інтерфейсам Android-Core. В якості альтернативи серверній стороні рекомендується використовувати сучасні хмарні сервіси та технології, засновані на моделях IaaS та PaaS .

## Документи про впровадження результатів дисертації

ACT OF IMPLEMENTATION

We, the undersigned, confirm the implementation of the dissertation Vychuzhanin Oleksii Volodymyrovych "Stochastic models and methods of diagnostics, evaluation and forecasting of the technical condition of complex systems of critical application" results, performed for the degree of Doctor of Philosophy in the speciality 122 "Computer Science" in the field of knowledge 12 "Information technology".

The main provisions of the scientific research of O. V. Vychuzhanin were used in the modernisation of ship's power plant control system, MAN B&W 10S90MC, m/v Louis Maersk, namely:

- a method for diagnosing the technical condition of a complex system for a ship's power plant, taking into account the structural and functional specifics, as well as partial failures of the system equipment;
- a method for assessing and predicting the technical condition of a complex system, taking into account the probability of equipment failures of a ship's power plant.

Implementation of the results of the dissertation research allowed to ensure timely pre-failure maintenance of ship systems equipment and, according to preliminary data, to increase their efficiency by 3,2%. This indicates an increase in the efficiency of operation of complex shipboard technical systems.

Senior Superintendent  
Maersk AS renovation department  
Pratish Kar



Ch.Eng. Louise Maersk  
Sagit Kumar





## ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційного дослідження  
 Вичужаніна Олексія Володимировича,  
 представленого на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю  
 122 – Комп'ютерні науки

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Вичужаніна Олексія Володимировича на тему «Стохастичні моделі та методи діагностики, оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування» є складовою частиною держбюджетною науково-дослідницької роботі № 163-176 «Інформаційно-технологічне забезпечення управління функціонально-топологічними структурами розподілених систем» (№ ДР 0119U000257).

Довідка надана у зв'язку захистом дисертації.

Проректор з наукової та науково-педагогічної роботи  
 д. т. н., професор



Дмитро ДМИТРИШИН



### ДОВІДКА

про використання результатів дисертаційної роботи

Вичужаніна Олексія Володимировича,

представленої на здобуття ступеня доктора філософії за спеціальністю

122 – Комп'ютерні науки

Надана довідка затверджує, що матеріали дисертаційного дослідження Вичужаніна Олексія Володимировича «Стохастичні моделі та методи діагностики, оцінки та прогнозування технічного стану складних систем критичного застосування» використовується Національним університетом «Одеська політехніка» при викладанні наступних дисциплін кафедрою інформаційних технологій:

- Системи та технології штучного інтелекту;
- Проектування інформаційних систем;
- Методи моделювання і реалізації моделей інформаційних процесів, систем

Довідка дана у зв'язку із захистом дисертації.

Перший проректор, проректор  
з науково-педагогічної та  
виховної роботи



Сергій НЕСТЕРЕНКО