

Міністерство освіти і науки України
Національна металургійна академія України

СИРОТКІНА ОЛЕНА ІГОРІВНА

УДК 004.94:004.04:681.518.5

**МЕТОДИ ДІАГНОСТИКИ SCADA СИСТЕМ НА ОСНОВІ
М-АРНИХ КОРТЕЖІВ ТА К-ЗНАЧНОЇ ЛОГІКИ**

01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи

АВТОРЕФЕРАТ

дисертації на здобуття наукового ступеня
кандидата технічних наук

Дніпро – 2018

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі програмного забезпечення комп'ютерних систем Державного вищого навчального закладу «Національний гірничий університет» (м. Дніпро) Міністерства освіти і науки України.

Науковий керівник: доктор технічних наук, професор
Алексєєв Михайло Олександрович,
декан факультету інформаційних технологій,
професор кафедри програмного забезпечення
комп'ютерних систем ДВНЗ «Національний
гірничий університет» (м. Дніпро) Міністерства
освіти і науки України.

Офіційні опоненти: доктор технічних наук, доцент
Гнатушенко Вікторія Володимирівна,
професор кафедри інформаційних технологій і
систем Національної металургійної академії
України Міністерства освіти і науки України.

доктор технічних наук, професор
Положаєнко Сергій Анатолійович,
завідувач кафедри комп'ютеризованих систем
управління Одеського національного
політехнічного університету Міністерства
освіти і науки України.

Захист відбудеться «___»_____ 2018 р. о ___ годині на засіданні спеціалізованої вченої ради Д 08.084.01 у Національній металургійній академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна 4, НМетАУ, конференц-зал засідань.

З дисертацією можна ознайомитись у бібліотеці Національної металургійної академії України за адресою: 49600, м. Дніпро, пр. Гагаріна, 4, НМетАУ.

Автореферат розіслано « ___ » _____ 2018 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради Д 08.084.01
к.т.н., доцент

Т.В. Селівьорстова

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Останнім часом, з розвитком і впровадженням нових технологій у різні галузі промислового виробництва та енергетики, все більш широке розповсюдження набувають сучасні SCADA системи відповідального призначення, що забезпечують контроль та оперативне диспетчерське керування промисловими об'єктами. На сьогодні існує гостра необхідність впровадження високонадійних відмовостійких SCADA систем, особливо для об'єктів з потенційною техногенною небезпекою. Крім того, до таких систем ставляться підвищені вимоги щодо безпеки їх використання в процесі експлуатації. Дана задача стає особливо актуальною в процесі вдосконалення та значного ускладнення самих SCADA систем – розподілених багаторівневих і багатозадачних апаратно-програмних комплексів, які працюють в режимі реального часу. На сьогодні відомі SCADA системи потребують для своєї експлуатації та обслуговування постійної цілодобової присутності висококваліфікованого персоналу на об'єктах експлуатації, проте живучість та відмовостійкість систем не гарантується. За останні роки з'явилися нові міжнародні та загальнодержавні стандарти, в яких наголошується на необхідності використання онлайн методик, спрямованих на автоматичну самодіагностику та самовідновлення SCADA систем, що застосовуються на об'єктах відповідального призначення та/або підвищеної безпеки.

Теоретичні та методологічні аспекти автоматичної самодіагностики SCADA систем відображені в роботах вітчизняних і зарубіжних вчених, таких як Беляков В.В., Бушуєва М.Є., Горяїнов О.М., Димитриєв Ю.К., Липаєв В.В., Пархоменко П.П., Петрова Є.А., Попов Є.В., Репін А.І., Соловйов С.Ю., Тоценко В.Г., Чернявська А.А., Нох J.J., Huang Kaiyuan, Somanı Agun K. Моделі та методи діагностики розглянуті в роботах таких авторів, як Варламов О.О., Воробйов А.О., Воронін В.В., Калядін А.Ю., Комолов Д.В., Лобанов А.В., Матюхін М.Б., Котельников Б.В., Кузоваткін А.М., Димитриєв Ю.К., Пархоменко П.П., Янковська А.Є., Філіппов М.М., Погомій О.В., Bernard J.P., Charbonnier S., Durocher D., Ligeza A., MacGregor J., Muñoz M., Pencole Y., Wang X., Windmann S.

Таким чином, проведений аналіз наявної у відкритому доступі нормативної та науково-технічної документації дозволяє зробити висновок про те, що на сьогоднішній день задача вдосконалення методології автоматичної діагностики SCADA систем у режимі реального часу є досить актуальною.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Робота виконана відповідно до Закону України № 2623-14 від 11.07.2001 «Про пріоритетні напрями розвитку науки і техніки». Автор дисертації у якості виконавця брала участь у держбюджетній науково-дослідній роботі (НДР) ГП-458 «Інтелектуальні технології управління процесами гірського виробництва в задачах енергозбереження та енергоефективності» (№ держреєстрації 0113U000402), яка виконувалася в ДВНЗ «Національний

гірничий університет» у 2013 – 2015 роках. Результати досліджень по цій темі, отримані автором особисто, представлені в даній роботі.

Мета і задачі дослідження. Метою роботи є підвищення якості функціонування апаратно-програмного комплексу розподіленої SCADA системи за рахунок розробки моделей та методів забезпечення її автоматичної діагностики в режимі реального часу.

Для досягнення зазначеної мети в рамках дисертаційної роботи поставлені та вирішені наступні **основні задачі**:

1. Огляд і аналіз відомих підходів та методів автоматичної діагностики роботи SCADA системи в режимі реального часу.
2. Розробка математичної моделі діагностики SCADA системи із застосуванням методології експертних систем для визначення закономірностей групування вхідних даних при формуванні простору пошуку діагнозу.
3. Розробка математичної моделі та методу діагностики відмов у процесі проходження потоків даних за структурними елементами та рівнями ієрархії системи для теоретичного обґрунтування принципів виявлення та локалізації незалежних і вторинних відмов у SCADA системі.
4. Створення програмного засобу для проведення експериментальних досліджень отриманих методичних і математичних результатів, що дозволяє контролювати працездатність структурних одиниць SCADA системи в режимі реального часу.

Об'єкт дослідження – процеси функціональної діагностики, характеристики елементів з розподілу діагностичних ознак в інфраструктурі апаратно-програмного комплексу SCADA системи.

Предмет дослідження – математичні моделі виявлення, локалізації та ідентифікації відмов у SCADA системі, методи аналізу інформаційних потоків, дослідження яких дозволяє розробити інструмент оперативного контролю та моніторингу працездатності SCADA з діагностикою стану структурних елементів в режимі реального часу.

Методи дослідження. Теоретичні дослідження виконувалися з використанням методів теорії множин, класичної, багатозначної та модальної логік, теорії формальних дедуктивних систем, теорії алгоритмів, обчислення предикатів першого порядку, методів логічного автоматичного висновку, методів комбінаторного та системного аналізу. При розробці програмного забезпечення була застосована технологія об'єктно-орієнтованого проектування та програмування з використанням методів ефективно організації, пошуку та сортування інформації для складних структур організації даних, сформованих на основі стандартних бібліотек шаблонів класів-контейнерів STL.

Наукова новизна одержаних результатів:

1. Вперше розроблено математичні методи роботи зі спеціалізованою структурою організації даних типу *m*-арні кортежі на основі впорядкованих

множин довільної потужності, які дозволяють мінімізувати простір пошуку діагнозу стосовно до бази знань експертної системи.

2. Вперше отримано на основі k -значної логіки аналітичні залежності допустимої зміни стану контрольованого параметра при проходженні інформаційного потоку за рівнями ієрархії SCADA, виявлення та локалізації незалежних і вторинних відмов у SCADA системі, що дозволяє автоматично контролювати та прогнозувати працездатність структурних елементів системи.
3. Вперше розроблено метод діагностики працездатності АПК SCADA системи з використанням аналітичних залежностей виявлення, локалізації та розмежування відмов, який дозволяє визначати коефіцієнти нестабільності роботи структурних модулів, що забезпечує можливість оперативного контролю стану системи в умовах неповної інформації в режимі реального часу.
4. Удосконалено структурно-логічну модель діагностики працездатності АПК SCADA системи, що дозволяє контролювати працездатність системи в режимі реального часу на основі аналізу зміни стану потоку інформації у процесі його проходження за структурними елементами та рівнями ієрархії SCADA при неповних даних / недостовірних даних / відсутності даних у структурних елементах системи.
5. Отримала подальший розвиток об'єктно-класифікаційна модель діагностики працездатності АПК SCADA з використанням методології експертних систем, що дозволяє локалізувати та ідентифікувати відмови в системі на основі обробки та аналізу повного потоку низькорівневої діагностичної інформації, що генерується SCADA системою.

Практичне значення одержаних в роботі результатів визначається суттєвим підвищенням якості діагностування апаратно-програмного комплексу розподіленої SCADA системи за рахунок розроблених математичних моделей та методів.

Розроблений метод та програмний засіб автоматичної діагностики відмов SCADA системи:

- є універсальними для SCADA систем будь-якої топології;
- дозволяють виконувати автоматичне виявлення, локалізацію та розмежування незалежних і вторинних відмов SCADA системи з використанням критеріїв, визначених з урахуванням характерних особливостей для кожного рівня ієрархії системи;
- реалізують самодіагностику працездатності SCADA системи в режимі реального часу, що дозволяє використовувати механізм автоматичного самовідновлення системи і, відповідно, дає можливість багаторазово скоротити час відновлення працездатності SCADA після оборотних відмов;
- дозволяють експлуатаційним службам підприємства здійснювати своєчасну діагностику позаштатних ситуацій і причин відмов, оперативно приймати

рішення щодо організації ремонтно-відновлювальних робіт SCADA системи.

Практичне значення результатів підтверджується:

1. впровадженням результатів роботи в ДП «УкрдіпроМез» при виконанні проекту № Д256726-АТХ «Аглоцех ВАТ «Запоріжсталь». Автоматизована система контролю та диспетчеризації «Аглофабрика»;
2. впровадженням результатів роботи в ІТМ НАН України і ДКА України при виконанні держбюджетної науково-дослідної теми Ш-90-16 «Дослідження проблеми управління газовими потоками в задачах розширення функціональних можливостей і поліпшення характеристик ракетних двигунів та струминного технологічного обладнання»;
3. впровадженням результатів роботи в навчальний процес ДВНЗ «Національний гірничий університет» при викладанні дисципліни «Алгоритми та структури даних» бакалаврам спеціальностей 121 «Інженерія програмного забезпечення» та 122 «Комп'ютерні науки та інформаційні технології»;
4. патентом на корисну модель UA 73812 «Промисловий сервер SCADA системи» від 10.10.2012;
5. патентом на корисну модель UA 92363 «Спосіб автоматичної самодіагностики автоматизованої системи керування технологічним об'єктом» від 11.08.2014.

Достовірність та обґрунтованість результатів та рекомендацій підтверджується аналізом сучасних наукових і технічних досягнень в області діагностики працездатності SCADA систем; коректністю постановки та рішення задач з використанням фундаментальних положень теорії класичної, багатозначної, реляційної та модальної логік, теорії формальних дедуктивних систем, теорії обчислення предикатів, теорії алгоритмів; узгодженістю результатів, отриманих у процесі теоретичних і експериментальних досліджень; апробацією основних теоретичних і експериментальних результатів роботи в друкованих працях та доповідях на конференціях.

Особистий внесок здобувача. Усі основні наукові результати дисертаційної роботи отримані автором самостійно. У роботах, що виконані в співавторстві, авторові належать наступні результати. У [16, 17] проведено аналіз задачі підвищення відмовостійкості та надійності розподілених SCADA систем відповідального призначення. У [5] запропоновано метод автовідновлення сервера реляційної бази даних після оборотних відмов. У [6] створено математичну модель процесу прийому-передачі даних і методику діагностики сеансів зв'язку в SCADA системах. У [21] розроблено модель зовнішньої підсистеми діагностики для SCADA систем. В [12–15] запропоновано об'єктно-класифікаційну модель діагностики відмов SCADA на основі методології експертних систем. У [20] розроблено спосіб автоматичної самодіагностики автоматизованої системи. У [1] розроблено метод формування простору пошуку діагнозу на конфліктній множині вхідних даних –

діагностичних кодах, що генеруються SCADA системою, із застосуванням розробленого математичного методу роботи зі структурою типу m -арні кортежі на основі впорядкованих множин. Наведено порівняльний аналіз оцінок часу виконання алгоритмів формування простору пошуку діагнозу при послідовному доступі до булеану вхідних даних та із застосуванням розробленого методу. У [7, 10] розроблено програмний засіб (ПЗ), що дозволяє: конфігурувати структуру SCADA системи; аналізувати діагностичну матрицю, яка є дампом потоку діагностичних ознак (ДО) контрольованих параметрів системи; виявляти та локалізувати відмови у системі; вести оперативний моніторинг з визначенням коефіцієнтів нестабільності роботи структурних модулів системи.

Апробація результатів дисертації. Основні результати наукових досліджень доповідалися, обговорювалися та були схвалені на наступних науково-технічних конференціях: «Сучасні напрямки теоретичних і прикладних досліджень 2010» (м. Одеса, 2010), «Розширюючи обрії» (м. Дніпро, 2011), «Наукова весна» (м. Дніпро, 2012, 2013), «Новітні технології – для захисту повітряного простору» (м. Харків, 2012), «Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту» (м. Херсон, 2013), «Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості» (м. Дніпро, 2013, 2016), «Проблеми надрокористування» (м. Санкт-Петербург, 2013, 2014), «Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості» (м. Івано-Франківськ, 2015).

Публікації. За результатами виконаних досліджень опубліковано 21 наукова робота (в тому числі 8 – одноосібних), з них 6 – у наукових фахових виданнях, які рекомендовано Міністерством освіти і науки України (в тому числі 2 статті – в журналах, що входять до наукометричної бази SCOPUS), 2 – у виданнях іноземних держав і 11 – у збірниках матеріалів міжнародних науково-технічних конференцій, 2 патенти України на корисну модель.

Структура та обсяг дисертаційної роботи. Дисертаційна робота складається зі вступу, чотирьох розділів, висновків, додатків та списку використаних джерел. Загальний обсяг роботи – 330 сторінок, із них 168 сторінок – основний текст. Дисертація містить 23 таблиці, 33 рисунки, 14 додатків на 114 сторінках та список використаних джерел із 220 найменувань на 24 сторінках.

ОСНОВНИЙ ЗМІСТ РОБОТИ

У **вступі** на основі аналізу сучасного стану діагностування SCADA систем відповідального призначення обґрунтовано актуальність теми дисертаційної роботи, сформульовано мета та задачі, визначено об'єкт і предмет досліджень, наукова новизна й практична цінність отриманих результатів, позначені методи досліджень.

У першому розділі виконано огляд і аналіз існуючих методів автоматичної діагностики сучасних SCADA систем.

Серед сучасних методів автоматичної діагностики АПК SCADA широкого поширення набули такі основні методології, як математична, логіко-лінгвістична, графо-аналітична та евристична. Перевага у використанні певних методів або їх комплексне використання залежить від типу розв'язуваної задачі.

Однак на сьогоднішній день при вирішенні задач діагностики SCADA систем слабо опрацьовані наступні питання:

- інтенсивний потік діагностичної інформації викликає значні труднощі при необхідності її оперативного опрацювання відповідними експлуатаційними службами підприємства;
- великий обсяг діагностичної інформації являє собою низькорівневу діагностичну інформацію, для обробки якої необхідні високопрофесійні знання технологів, IT-фахівців, системних інтеграторів;
- для більшості автоматизованих систем керування (АСК) методологія експертних систем (ЕС) застосовується тільки для діагностування стану технологічного об'єкта керування (ТОК), а не стану рівнів системної ієрархії від ТОК до SCADA.

Таким чином, актуальною задачею є розробка методів комплексної автоматичної високорівневої діагностики працездатності всіх рівнів системної ієрархії автоматизованої системи від ТОК до SCADA з мінімізацією часу постановки діагнозу до масштабів реального часу.

Другий розділ присвячено розробці об'єктно-класифікаційної моделі (ОКМ) діагностики працездатності SCADA на основі методології експертних систем (рис. 1).

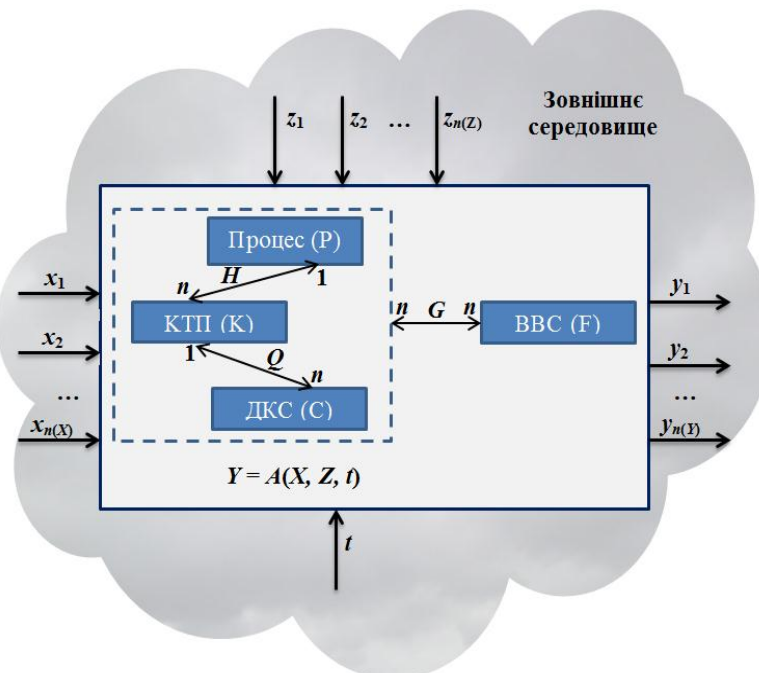


Рис. 1. Об'єктно-класифікаційна модель діагностики працездатності SCADA системи

де: КТП – контрольна точка процесу; ДКС – діагностичні коди системи; ВВС – види відмов системи; G – відношення відповідності деякого набору ДКС, визначених у КТП, до розглянутих ВВС.

На основі даної моделі було запропоновано метод формування простору пошуку діагнозу стосовно до бази знань експертної системи.

Маємо: X – множина ДКС, що визначені у КТП, у складі бази даних (БД) експертної системи (ЕС); G_1 – система правил бази знань (БЗ) ЕС для визначення ВВС; F – множина видів відмов системи;

$X(\Delta t)$ – множина вхідних даних експертної діагностичної системи (ЕДС) на інтервал часу (Δt); $y_{m,j}^n$ – m -арний кортеж, що формується на базовій множині $X(\Delta t)$.

Дано: $X = \{x_1, x_2, x_3, x_4, x_5, x_6, x_7, x_8, x_9, x_{10}, x_{11}, x_{12}, x_{13}, x_{14}, x_{15}\}$;

$G_1 = \{g_1, g_2, g_3, g_4, g_5, g_6, g_7, g_8, g_9, g_{10}\}$;

$f_1 = g_1(x_1, x_4, x_6, x_{11}) = G_{f_1}(X_{f_1})$;

$f_2 = g_2(x_2, x_5, x_9, x_{11}, x_{15}) = G_{f_2}(X_{f_2})$;

$f_3 = g_3(x_2, x_3, x_7, x_{10}) = G_{f_3}(X_{f_3})$;

$f_4 = g_4(x_1, x_3, x_7) = G_{f_4}(X_{f_4})$;

$f_5 = g_5(x_7, x_{13}, x_{14}, x_{15}) = G_{f_5}(X_{f_5})$;

$f_6 = g_6(x_4, x_8, x_{12}, x_{13}) = G_{f_6}(X_{f_6})$;

$f_7 = g_7(x_5, x_8, x_{15}) = G_{f_7}(X_{f_7})$;

$f_8 = g_8(x_2, x_3, x_8, x_{14}) = G_{f_8}(X_{f_8})$;

$f_9 = g_9(x_6, x_{11}, x_{12}, x_{15}) = G_{f_9}(X_{f_9})$;

$f_{10} = g_{10}(x_9, x_{10}, x_{13}) = G_{f_{10}}(X_{f_{10}})$;

$X(\Delta t) = \{x_1, x_3, x_7, x_{12}\}$.

Знайти: простір пошуку діагнозу F_u для набору вхідних даних $X(\Delta t)$.

Результати формування простору пошуку діагнозу наведені в табл. 1.

Таблиця 1 – Альтернативні простори пошуку діагнозу

№	$y_{m,j}^n$	F_u	$X_{f_i}^-$
1	2	3	4
1	$y_{4,1}^4 = (x_1, x_3, x_7, x_{12})$	\emptyset	\emptyset
2	$y_{3,1}^4 = (X_{f_4} \cap 2^{X(\Delta t)}) = (x_1, x_3, x_7)$	f_4	\emptyset
3	$y_{3,2}^4 = (x_1, x_3, x_{12})$	\emptyset	\emptyset
4	$y_{3,3}^4 = (x_1, x_7, x_{12})$		
5	$y_{3,4}^4 = (x_3, x_7, x_{12})$		
6	$y_{1,1}^4 = x_1$	Ці елементи булеану $2^{X(\Delta t)}$	

Продовження таблиці 1

1	2	3	4
	$y_{1,2}^4 = x_3$		необхідно виключити з аналізу груп вхідних параметрів, так як простір пошуку діагнозу повністю визначено на елементі $y_{3,1}^4$
	$y_{1,3}^4 = x_7$		
	$y_{2,1}^4 = (x_1, x_3)$		
	$y_{2,2}^4 = (x_1, x_7)$		
	$y_{2,4}^4 = (x_3, x_7)$		
7	$y_{2,3}^4 = (x_1, x_{12})$	\emptyset	\emptyset
	$y_{2,5}^4 = (x_3, x_{12})$		
	$y_{2,6}^4 = (x_7, x_{12})$		
8	$y_{1,4}^4 = (X_{f_6} \cap 2^{X(\Delta t)}) \vee (X_{f_9} \cap 2^{X(\Delta t)}) = x_{12}$	f_6	$X_{f_6}^- = \{x_4, x_8, x_{13}\}$
		f_9	$X_{f_9}^- = \{x_6, x_{11}, x_{15}\}$

Кожному елементу $y_{m,j}^n \in Y_m^n \subset 2^{X(\Delta t)}$, сформованому на наборі вхідних даних $X(\Delta t)$, відповідає набір правил бази знань експертної системи $G_{m,j}(y_{m,j}^n)$, що формує простір пошуку діагнозу $F_{m,j}$:

$$X_{f_i} \cap 2^{X(\Delta t)} = y_{m,j}^n, \quad (1)$$

$$X_{f_i}^- = X_{f_i} \setminus y_{m,j}^n, \quad (2)$$

$$G_{m,j} : y_{m,j}^n \rightarrow F_{m,j}, \quad (3)$$

$$F_{m,j} = \{f_1, \dots, f_N\}_{m,j} = \{G_{f_1}(X_{f_1}), \dots, G_{f_N}(X_{f_N})\}_{m,j}, \quad (4)$$

де $X_{f_i}^-$ – необхідний для виведення діагнозу f_i набір ДКС, значення елементів якого не визначені на наборі вхідних даних $X(\Delta t)$.

Якщо $X_{f_i}^- = \emptyset$, то набір правил G_{f_i} повністю визначений на наборі вхідних параметрів $X(\Delta t)$, інакше – частково визначений.

Згідно з табл. 1, для нашого прикладу простір пошуку діагнозу:

$$F_u = \{f_4, f_6, f_9\} \quad (5)$$

У методі формування простору пошуку діагнозу для виконання функцій пошуку та проєкції елементів були застосовані наступні розроблені математичні методи роботи зі структурою організації даних (СОД) типу m -арні кортежі на основі впорядкованих множин довільної потужності:

– визначення значень кортежу індексів $i_{m,j}^n$ за порядковим номером j елемента впорядкованої множини Y_m^n – метод $A_1 : j \rightarrow i_{m,j}^n$;

– визначення порядкового номера j елемента впорядкованої множини Y_m^n за кортежем індексів $i_{m,j}^n$ – метод $A_2 : j \leftarrow i_{m,j}^n$;

– визначення доповнення до кортежу індексів $i_{m,j}^n$ до базової множини I –

метод $A_3 : \overline{i_{m,j}^n} \leftarrow i_{m,j}^n$;

– визначення доповнення елемента $y_{m,j}^n$ до базової множини X – метод

$A_4 : \overline{y_{m,j}^n} \leftarrow y_{m,j}^n$.

Методом математичної індукції була доведена теорема: доповненням до елемента $y_{m,j}^n$, що належить до множини Y_m^n , яка впорядкована за правобічним перебором у порядку зростання індексів I базової множини X потужності n , є елемент множини, що визначається за формулами:

$$y_{m,j}^n = y_{n-m, k_m^n - (j-1)}^n, \quad y_{n-m, k_m^n - (j-1)}^n = y_{m,j}^n \quad (6)$$

Методи A_1 , A_2 , A_3 та A_4 при роботі з СОД типу m -арні кортежі на основі впорядкованих множин довільної потужності n дозволяють перетворити роботу зі списком з послідовним доступом у роботу зі списком з прямим доступом. Отримані наступні результати розрахунку оцінки часу виконання методу, як функціональної залежності від кількості даних $O(f(n))$:

– A_1 і A_2 є алгоритмами кубічного часу виконання:

$$O_1(f_1(n)) = O_1(n^3), \quad O_2(f_1(n)) = O_2(n^3);$$

– A_3 є алгоритмом лінійного часу виконання: $O_3(f_3(n)) = O_3(n)$;

– A_4 є алгоритмом постійного часу виконання: $O_4(f_4(n)) = O_4(1)$;

– послідовний доступ до булеану вхідних даних є алгоритмом експоненціального часу виконання: $O(f(n)) = O(2^n)$

Графіки функцій зростання кількості операцій $f(n)$, $f_1(n)$, $f_2(n)$, $f_3(n)$, $f_4(n)$ для вищезазначених методів роботи з СОД наведені на рис. 2, 3.



Рис. 2. Графіки швидкості зростання кількості операцій для A_1 , A_2 , A_3 , A_4

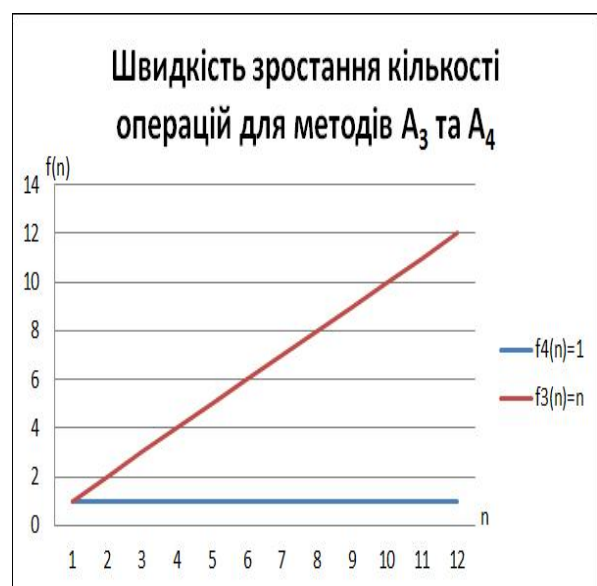


Рис. 3. Графіки швидкості зростання кількості операцій для A_3 та A_4

Оцінки часу виконання методів зведено до табл. 2.

Таблиця 2 – Оцінки часу виконання методів роботи з СОД

n	$O_3(n), c$	$O_1(n^3) = O_2(n^3), c$	$O(2^n), c$
1	$1,33 \cdot 10^{-9}$	$1,33 \cdot 10^{-9}$	$1,33 \cdot 10^{-9}$
5	$6,65 \cdot 10^{-9}$	$1,663 \cdot 10^{-7}$	$4,256 \cdot 10^{-8}$
25	$3,325 \cdot 10^{-8}$	$2,078 \cdot 10^{-5}$	$4,463 \cdot 10^{-2}$
30	$3,99 \cdot 10^{-8}$	$3,591 \cdot 10^{-5}$	1,428
40	$5,32 \cdot 10^{-8}$	$8,512 \cdot 10^{-5}$	$1,462 \cdot 10^3 \approx 25 \text{ хв}$
45	$5,985 \cdot 10^{-8}$	$1,212 \cdot 10^{-4}$	$4,680 \cdot 10^4 \approx 13 \text{ год}$
50	$6,65 \cdot 10^{-8}$	$1,663 \cdot 10^{-4}$	$1,498 \cdot 10^6 \approx 17 \text{ днів}$

З табл. 2 та рис. 2 видно, що зі збільшенням n методи A_1 і A_2 прямого доступу до елементів СОД **на кілька порядків** швидші, ніж методи послідовного доступу. Різниця в оцінці часу виконання методів особливо помітна при $n \geq 40$.

Третій розділ присвячено розробці структурно-логічної моделі (СЛМ) та методу автоматичної діагностики відмов SCADA на основі аналізу закономірностей зміни стану інформаційних потоків у процесі їх проходження за рівнями ієрархії (PI) SCADA при неповних даних / недостовірних даних / відсутності даних у структурних елементах системи.

На рис. 4 наведено приклад конфігурації структурної схеми SCADA системи.

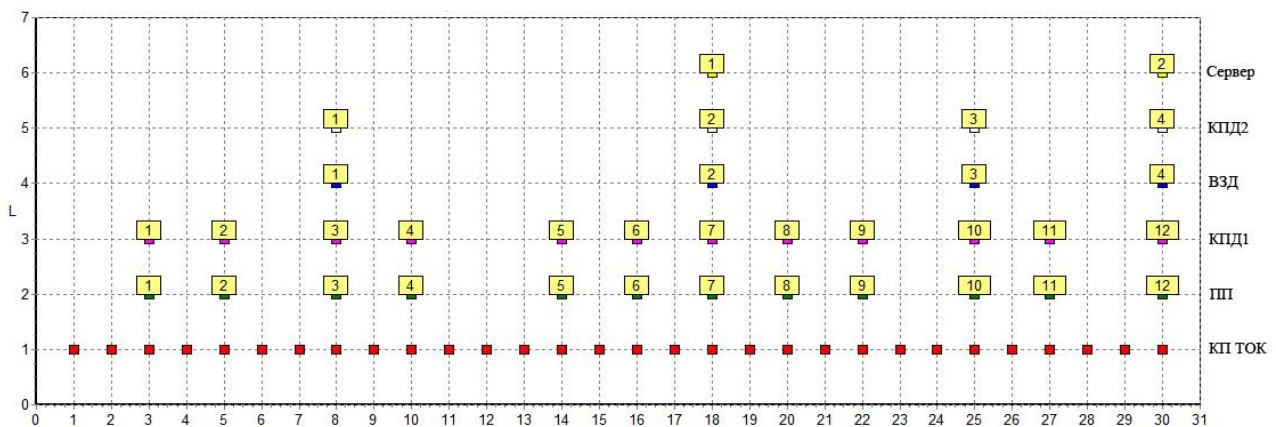


Рис. 4. Конфігурація структурної схеми SCADA системи

де: вісь абсцис – порядковий номер контрольованого параметра (КП) ТОК, вісь ординат – PI SCADA, ПП – первинні перетворювачі, ВЗД – вузли збору даних, КПД1 – канали передачі даних від ПП до ВЗД, КПД2 – канали передачі даних від ВЗД до сервера.

Розподіл КП за ПП і КПД1 визначається на неспадній послідовності позитивних цілих чисел K_x :

$$K_x = k_1, k_2, \dots, k_\mu, \dots, k_{m_N}. \quad (7)$$

Розподіл КП за ВЗД і КПД2 визначається на неспадній послідовності позитивних цілих чисел I_x :

$$I_x = i_1, i_2, \dots, i_j, \dots, i_N. \quad (8)$$

Розподіл ПП і КПД1 за ВЗД і КПД2 визначається на неспадній послідовності позитивних цілих чисел M_k :

$$M_k = m_1, m_2, \dots, m_j, \dots, m_N. \quad (9)$$

Наявність зв'язку між елементами СЛМ визначається за допомогою наступних предикатів:

– предикат наявності зв'язку між КП ТОК x_i і ПП $_{\mu}$ / КПД1 $_{\mu}$

$$H_1(i, \mu) := ((i \leq k_{m_N}) \& (\mu \leq m_N)) ? ((\mu > 1) ? ((i > k_{\mu-1}) \& (i \leq k_{\mu})) : (i \leq k_{\mu})) : 0. \quad (10)$$

– предикат наявності зв'язку між КП ТОК x_i і ВЗД $_j$ / КПД2 $_j$

$$H_2(i, j) := ((i \leq i_N) \& (j \leq N)) ? ((j > 1) ? ((i > i_{j-1}) \& (i \leq i_j)) : (i \leq i_j)) : 0. \quad (11)$$

– предикат наявності зв'язку між ПП $_i$ / КПД1 $_i$ і ВЗД $_j$ / КПД2 $_j$

$$H_3(i, j) := ((i \leq m_N) \& (j \leq N)) ? ((j > 1) ? ((i > m_{j-1}) \& (i \leq m_j)) : (i \leq m_j)) : 0. \quad (12)$$

На рис. 5 представлено діаграму конфігурації КП за структурними елементами SCADA.

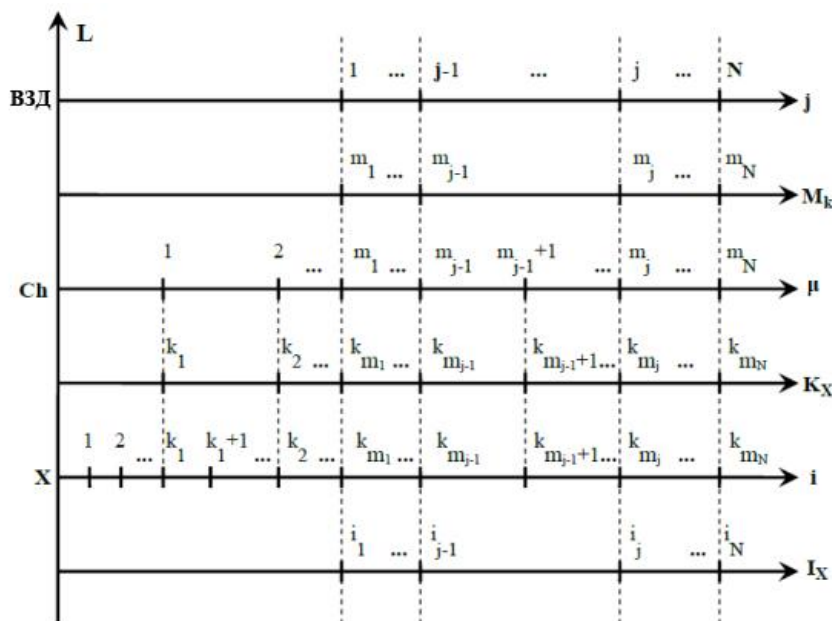


Рис. 5. Діаграма конфігурації КП за структурними елементами

На основі аналізу закономірностей зміни стану контролюваного параметра у процесі його проходження за рівнями ієрархії SCADA була отримана аналітична залежність його допустимої зміни.

$$f_1(x, y, z) = (2 - 2z^2 - xyz^2 + 2x^2y^2 + x^2y^2z + x^2yz^2 + xy^2z^2 - 2x^2y^2z^2) \pmod{3}. \quad (13)$$

На рис. 6 представлено графік функції $f_1(x, y, z)$.

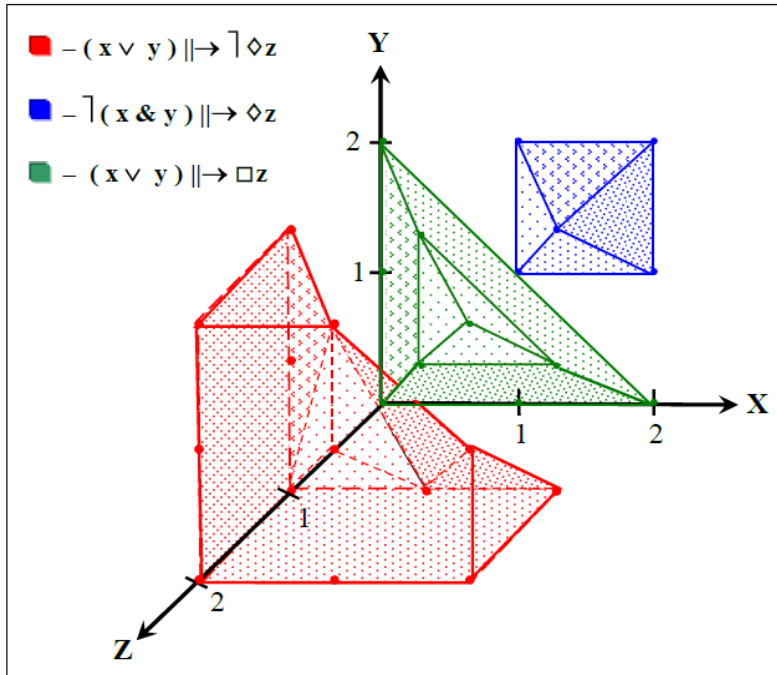


Рис. 6. Графік функції допустимої зміни стану КП

де: x – стан контрольованого параметра на передаючому PI SCADA; y – вид завершення процесу прийому-передачі параметра; z – стан контрольованого параметра на приймаючому PI SCADA; $f_1(x, y, z) = 2$ – необхідна зміна стану параметра на приймаючому PI, тобто $(x \vee y) \|\rightarrow \square z$ (події x або y є причиною необхідності події z); $f_1(x, y, z) = 1$ – допустима (можлива) зміна стану параметра на приймаючому PI, тобто $\neg(x \& y) \|\rightarrow \diamond z$ (події x або y не є причиною події z , але подія z у системі можлива); $f_1(x, y, z) = 0$ – недопустима (неможлива) зміна стану параметра на приймаючому PI, тобто $(x \vee y) \|\rightarrow \neg \diamond z$ (події x або y є причиною неможливості події z).

У загальному вигляді функція виявлення відмови у системі на основі аналізу діагностичної матриці, що представляє собою дамп стану інформаційного потоку, записується таким чином:

$$g_2(iL, \alpha, \beta, t) = \neg \left(\bigwedge_{iC=\alpha}^{\beta} \varphi_2(d_{iL, iC}(t)) \right) \quad (14)$$

де iL – рівень ієрархії SCADA; α, β – відповідно до діаграми конфігурації є початковий та кінцевий порядковий номер контрольованих параметрів, що проходять через структурні елементи системи заданого PI, для підмножини структурних елементів, які входять у зону локалізації відмови.

Для виведення функції виявлення відмови застосуємо елементарну функцію k -значної логіки φ_e – характеристичну функцію першого роду значення e , що визначається наступним чином:

$$\varphi_e(x) = \begin{cases} 1, & x = e, \quad e \in E_3, E_3 = \{0, 1, 2\} \\ 0, & x \neq e, \quad e \in E_3, E_3 = \{0, 1, 2\} \end{cases} \quad (15)$$

Отримано аналітичну залежність розмежування незалежних і вторинних відмов:

$$f_2(x, y, z) = (2xyz - 2x^2yz - 2xy^2z - xyz^2 + x^2y^2 + 2x^2y^2z + x^2yz^2 + xy^2z^2 - 2x^2y^2z^2) \pmod{3}. \quad (16)$$

де x – стан параметра на передаючому ПІ; y – вид завершення процесу прийому-передачі параметра; z – стан контрольованого параметра на приймаючому ПІ; $f_2(x, y, z) = 1$ – необхідна, але недостатня умова наявності ДО виявлення незалежної відмови; $f_2(x, y, z) = 0$ – достатня умова відсутності ДО виявлення незалежної відмови.

Розроблено систему предикатів для бази знань експертної системи, що дозволяє реалізувати алгоритм виявлення, локалізації та розмежування первинних і вторинних відмов у SCADA на основі аналізу розподілу діагностичних ознак за структурними елементами та ПІ системи. Запропоновано формулу розрахунку коефіцієнта нестабільності роботи структурного елемента системи з урахуванням ПІ SCADA.

Четвертий розділ присвячено створенню програмного засобу (ПЗ) «DgnMethod», що реалізує описаний вище метод автоматичної діагностики відмов у SCADA.

ПЗ «DgnMethod» дозволяє реалізувати СЛМ діагностики працездатності SCADA системи будь-якої топології (рис. 7).

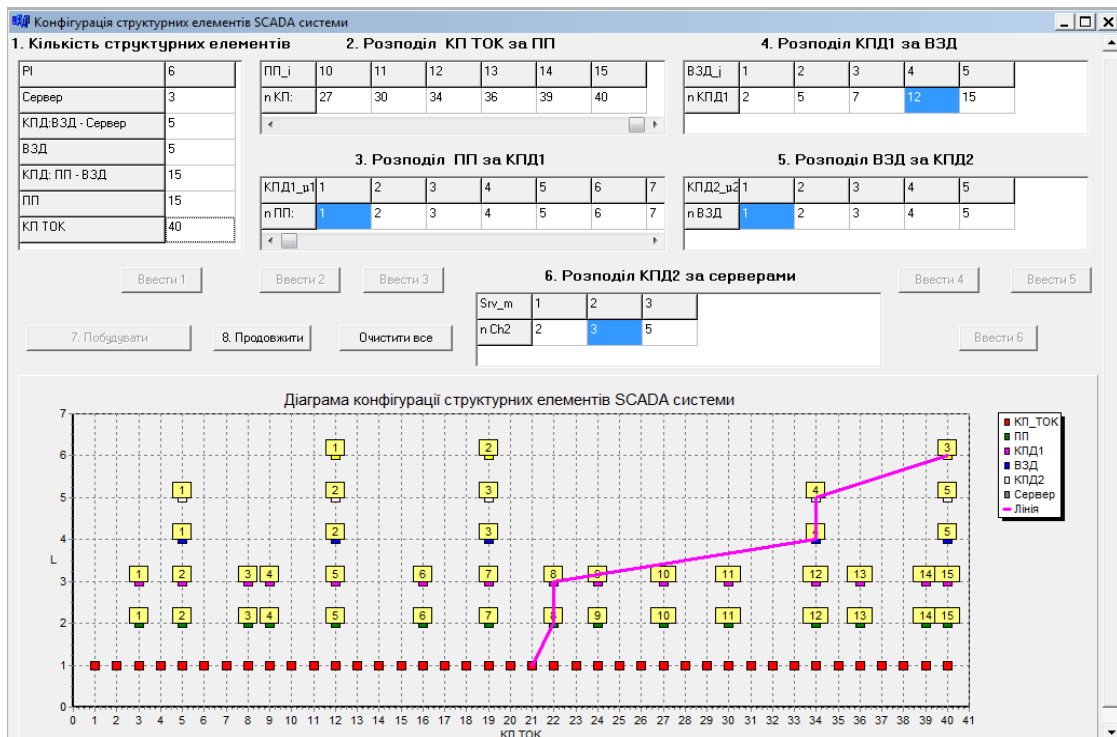


Рис. 7. Вікно для формування конфігурації структурної схеми SCADA

На рис. 8 представлено діаграми коефіцієнтів нестабільності роботи структурних модулів (КНРСМ) SCADA системи з можливістю аналізу їх

взаємозв'язку з відповідними структурними модулями нижнього рівня ієрархії системи, які є джерелами даних для аналізованого структурного модуля. ПЗ «DgnMethod» призначено для оперативного контролю та моніторингу працездатності всієї системи, наочно ілюструючи найбільш вразливі структурні елементи SCADA. Крім того, ПЗ «DgnMethod» дозволяє аналізувати ретроспективу зміни значень КНРСМ за часом (рис. 9).

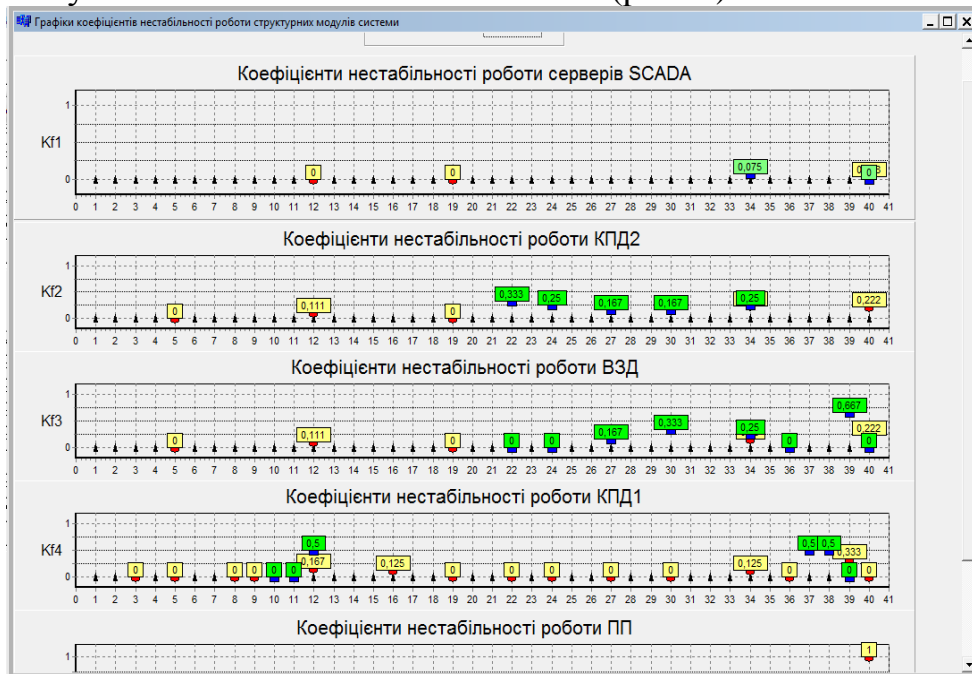


Рис. 8. Діаграма КНРСМ з урахуванням КНРСМ попереднього РІ

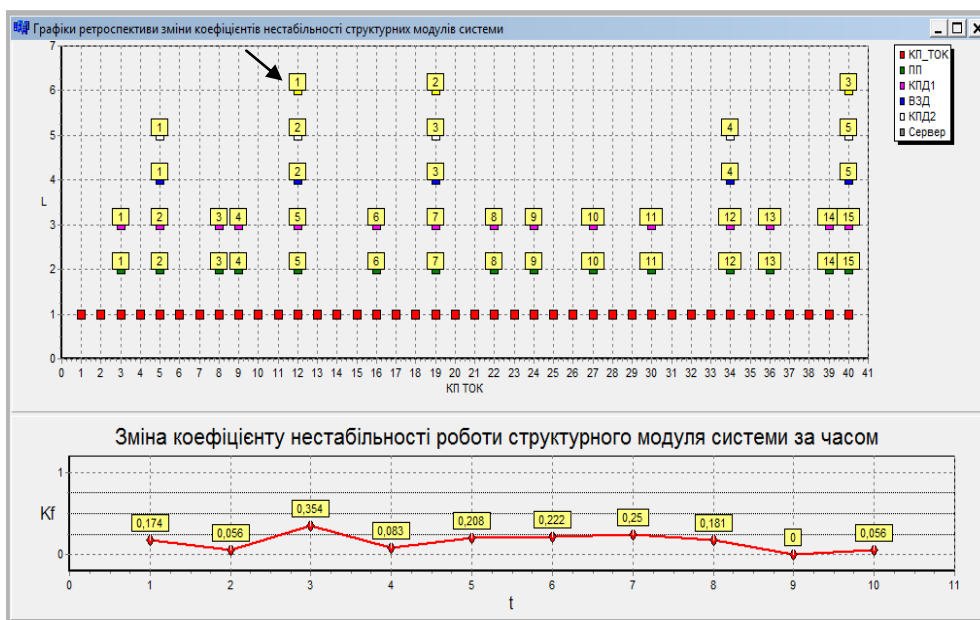


Рис. 9. Графік зміни КНРСМ за часом для S_1

Для перевірки достовірності застосовуваних моделей діагностики працездатності SCADA було розроблено план проведення експериментальних досліджень з використанням методу зменшення простору станів, що аналізуються на основі застосування залежностей, отриманих у розділі 3.

Застосування отриманої аналітичної залежності допустимої зміни стану КП у процесі його проходження за PI SCADA (див. формулу 13) дозволяє простежити динаміку зменшення складової частини допустимих станів контрольованого параметра відносно до повного набору комбінацій у залежності від числа PI моделі SCADA системи (див. табл. 3, рис. 10, 11).

$$\Delta = A_{f_2} / \bar{A}_k^l \cdot 100\%$$

де: l – кількість PI моделі SCADA системи; \bar{A}_k^l – кількість станів контрольованого параметра для повного набору комбінацій; A_{f_2} – кількість станів контрольованого параметра для допустимого набору комбінацій; Δ – відношення допустимого числа комбінацій стану контрольованого параметра до повного числа комбінацій у відсотках.

Таблиця 3 – Повний і допустимий набір комбінацій КП

l	\bar{A}_k^l	A_{f_2}	$\Delta, \%$
1	2	3	$4 = 3/2 \cdot 100\%$
1	3	3	100%
2	9	6	67%
3	27	14	51,9%
4	81	25	31%
5	243	53	22%
6	729	90	12%
7	2187	182	8,3%
8	6561	301	4,6%
9	19683	593	3%
10	59 049	966	1,6%
11	177147	1874	1%



Рис. 10. Графіки динаміки зміни кількості станів КП



Рис. 11. Графік зміни складової допустимого числа станів КП

Застосування функціональних залежностей виявлення, локалізації та розмежування незалежних і вторинних відмов, отриманих на основі

встановлених закономірностей зміни інформаційних потоків в структурних елементах рівнів ієрархії SCADA скорочує простір допустимих станів математичної моделі діагностики роботи SCADA в залежності від кількості рівнів ієрархії в діапазоні від 8% до 1% відносно до повного набору станів, що аналізуються. Це дозволяє підвищити достовірність автоматичної діагностики за рахунок забезпечення повноти та достовірності оперативної інформації.

Надійність керування будь-яким об'єктом, крім надійності керуючих алгоритмів та технічних засобів їх реалізації, багато в чому залежить від здатності служби експлуатації підприємства оперативно відновити працездатність відповідної АСК. Відомо, що найбільш часто виникають відмови периферійного обладнання RTU (Remote Terminal Unit). Ці структурні елементи SCADA системи не є критично важливими та їх відмови оперативно-диспетчерська служба керування об'єктом, як правило, не фіксує в режимі реального часу. Особливо це стосується великих та складних багаторівневих, багатокористувальницьких та багатозадачних АПК розподілених SCADA систем.

У той же час сховані відмови будь-яких периферійних вузлів SCADA систем призводять до часткової втрати керованості об'єктом, що неприпустимо для об'єктів критично важливої інфраструктури.

У свою чергу, процес відновлення працездатності автоматизованих систем можна умовно розділити на два етапи. I етап - виявлення, локалізація та ідентифікація відмови, II етап - безпосереднє усунення виниклої несправності того чи іншого вузла системи та відновлення працездатності всієї системи в цілому.

Для аналізу впливу часу виявлення схованої відмови на показники надійності роботи системи визначимо ймовірність безвідмовного застосування, як:

$$P_{б.з.}(t) = 1 / (1 + \beta \cdot \bar{T}_{виявл}) e^{-\lambda t},$$

де β – складова схованих відмов; $\bar{T}_{виявл}$ – середній час виявлення схованих відмов.

Динаміка зниження ймовірності безвідмовної роботи (ІБР) при схованих відмовах в залежності від параметрів β та $\bar{T}_{виявл}$ наведена на рис. 12. Динаміка збільшення різниці ймовірностей безвідмовної роботи без та при наявності схованих відмов у залежності від параметрів β та $\bar{T}_{виявл}$ показана на рис. 13.

На рис. 12 та 13 значення ІБР розраховувалися при середньогрупової інтенсивності відмов $\lambda = 0,2 \cdot 10^{-5}$, 1/год.

Результати аналізу впливу схованих відмов на ІБР подані у таблиці 4.

Підвищення якості функціонування АПК розподіленої SCADA системи завдяки застосуванню розробленого в рамках дисертаційної роботи методу автоматичного виявлення та локалізації відмов у SCADA системі в режимі реального часу, реалізованого за допомогою ПЗ «DgnMethod» дозволяє:

– мінімізувати час виявлення схованих відмов до масштабів реального часу;

– не допустити зменшення ІБР при наявності схованих відмов більш ніж на 1% (див. рис. 12,13, табл. 4) при мінімізації часу виявлення схованих відмов до 0,1 години.

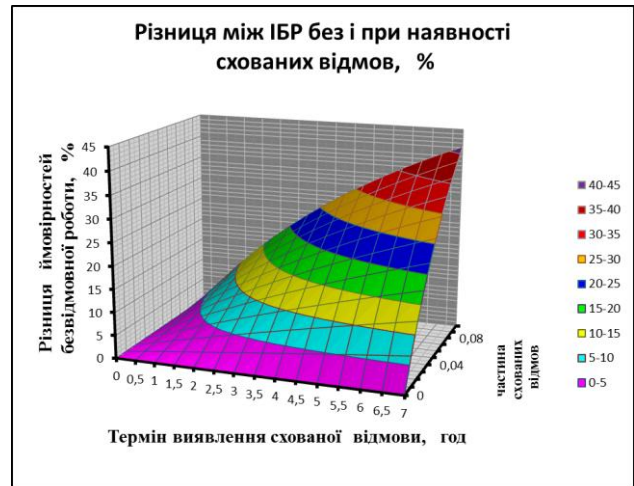
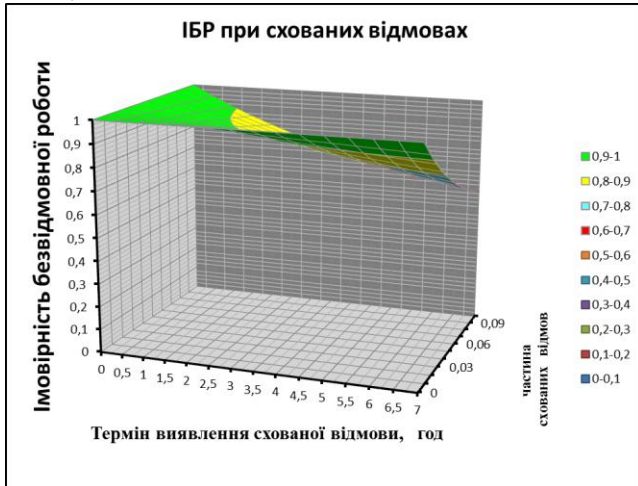


Рис. 12. Динаміка зниження ІБР при схованих відмовах

Рис. 13. Динаміка збільшення різниці між ІБР без і при схованих відмовах

Таблиця 4 – Залежність зниження ІБР при схованих відмовах від часу виявлення та складової схованих відмов.

№ п/п	β , %	$\bar{T}_{\text{виявл}}$, год	Різниця ІБР, % при	
			$\lambda=0,2 \cdot 10^{-5}$, 1/год	$\lambda=0,5 \cdot 10^{-5}$, 1/год
1	1	0,1	0,1	0,09
2	3	0,1	0,3	0,27
3	5	0,1	0,5	0,45
4	1	3	2,9	2,62
5	3	3	8,25	7,43
6	5	3	13,03	11,74
7	1	7	6,54	5,89
8	3	7	17,33	15,62
9	5	7	25,9	23,33

У додатках наведено типову архітектуру та структуру програмного забезпечення SCADA системи, діаграму сучасних методів функціональної діагностики SCADA, таблиці параметрів досліджуваних математичних моделей, приклади застосування математичних методів роботи з СОД типу m -арні кортежі на основі впорядкованих множин довільної потужності, виведення аналітичних залежностей (13), (14), (16) на основі тризначної логіки, таблицю з планом проведення експериментальних досліджень, а також акти впровадження результатів дисертаційної роботи.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі отримано нові науково обґрунтовані результати, які відповідно до поставленої мети дають вирішення актуальної науково-прикладної задачі забезпечення якості функціонування апаратно-програмного комплексу розподіленої SCADA системи за рахунок її автоматичної діагностики в режимі реального часу.

Основні наукові та практичні результати полягають у наступному:

1. Отримала подальший розвиток об'єктно-класифікаційна модель діагностики працездатності АПК SCADA з використанням методології експертних систем, що дозволяє локалізувати та ідентифікувати відмови в системі на основі обробки та аналізу повного потоку низькорівневої діагностичної інформації, що генерується SCADA системою.
2. Вперше розроблено математичні методи роботи зі структурою організації даних типу m -арні кортежі на основі впорядкованих множин довільної потужності. Встановлено, що функціональна залежність оцінки часу виконання методів від кількості вхідних даних n змінюється з експоненціальної $O(2^n)$ на кубічну $O(n^3)$, що дозволяє мінімізувати час формування простору пошуку діагнозу до масштабу реального часу. Різниця в оцінці часу виконання методів особливо помітна при $n \geq 40$.
3. Вперше отримано аналітичну залежність знаходження доповнення елемента булеану до деякої підмножини базової множини для СОД типу m -арні кортежі на основі впорядкованих множин довільної потужності, для якої оцінка часу її виконання не залежить від кількості вхідних даних n і є функцією постійного часу виконання $O(1)$, що дозволяє замість зберігання і обробки великих масивів даних генерувати будь-який m -арний кортеж за деякою послідовністю формальних правил.
4. Удосконалено структурно-логічну модель діагностики працездатності АПК SCADA системи, що дозволяє контролювати працездатність системи в режимі реального часу на основі аналізу зміни стану потоку інформації у процесі його проходження за структурними елементами та рівнями ієрархії SCADA при неповних даних / недостовірних даних / відсутності даних у структурних елементах системи.
5. Вперше отримано аналітичні залежності: допустимої зміни стану контрольованого параметра при проходженні інформаційного потоку за рівнями ієрархії SCADA; виявлення та локалізації незалежних і вторинних відмов у SCADA системі, що дозволяє зменшити простір допустимих станів математичної моделі діагностики роботи SCADA в залежності від кількості рівнів ієрархії в діапазоні від 8% до 1% відносно до повного набору станів, що аналізуються.
6. Вперше розроблено метод діагностики працездатності АПК SCADA системи з використанням аналітичних залежностей виявлення, локалізації та розмежування відмов, який дозволяє визначати коефіцієнти нестабільності роботи структурних модулів, що забезпечує можливість

оперативного контролю стану системи в умовах неповної інформації в режимі реального часу.

7. Для проведення експериментальних досліджень на основі СЛМ і методу діагностики працездатності SCADA був розроблений ПЗ «DgnMethod». Експериментальні дослідження показали, що дана модель та метод діагностики забезпечують повноту і коректність реалізації функцій, у тому числі коректно описують процеси: виявлення та локалізації відмов у системі; розмежування незалежних та вторинних відмов; визначення причинно-наслідкових зв'язків між первинними і вторинними відмовами.
8. ПЗ дозволяє працювати зі SCADA системами будь-якої топології; виконувати моніторинг і прогнозування надійності роботи структурних модулів SCADA системи в режимі реального часу; визначати найбільш уразливі з точки зору надійності роботи структурні модулі та причинно-наслідкові зв'язки між первинними і вторинними відмовами.
9. Підвищення якості функціонування АПК SCADA системи завдяки застосуванню методу автоматичної діагностики працездатності системи дозволяє мінімізувати час виявлення схованих відмов до масштабів реального часу. Мінімізація часу виявлення схованих відмов до 0,1 години дозволяє не допустити зменшення ІБР за наявності схованих відмов більш ніж на 1%, що в порівнянні з середніми даними розглянутих інтервалів зміни параметрів (час виявлення схованих відмов – 3 години, складова схованих відмов – 3%) збільшує ІБР на 7% – 8%.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

Статті у виданнях, що включені до міжнародних наукометричних баз:

1. Syrotkina O. Evaluation to Determine the Efficiency for the Diagnosis Search Formation Method of Failures in Automated Systems / O. Syrotkina, M. Alekseyev, O. Aleksieiev // Eastern-European Journal of Enterprise Technologies. – 2017. – Vol. 4, Issue 9 (88). – P. 59-68. Цитується у базах: Scopus, Index Copernicus, ResearchBib, CiteFactor, Google Scholar.
2. Сироткина Е.И. Структурно-логическая модель диагностики отказов SCADA системы / Е.И. Сироткина // Науковий вісник НГУ. – 2014. – № 4. – С. 52-57. Цитується у базах: Scopus, Ulrichsweb, Index Copernicus, ResearchBib, EBSCO, Engineering Village, ProQuest, Google Scholar.
3. Syrotkina O. The Application of Specialized Data Structures for SCADA Diagnostics / O. Syrotkina // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – Випуск 4, 2015. – Дніпропетровськ, 2015. – С. 72-81. Цитується у базі Index Copernicus.

Статті у наукових фахових виданнях:

4. Сироткина Е.И. Аналитическая модель обнаружения и локализации отказов SCADA / Е.И. Сироткина // Металлургическая и горнорудная промышленность. – Днепропетровск, 2014. – № 5. – С. 112-115.

5. Сироткина Е.И. Диагностика и отказоустойчивость программного обеспечения промышленных SCADA систем ответственного назначения / М.А. Алексеев, Е.И. Сироткина // Системні технології. Регіональний міжвузівський збірник наукових праць. – 2012. – № 4. – С. 56-63.
6. Сироткина Е.И. Методика диагностики приемо-передачи данных в SCADA системах на основе применения графа состояний сеансов связи в режиме реального времени / М.А. Алексеев, Е.И. Сироткина // Науковий вісник НГУ. – 2011. – № 1. – С. 89-94.

Статті в закордонних виданнях:

7. Syrotkina O. Software Diagnostics for Reliability of SCADA Structural Elements / O. Syrotkina, M. Alekseyev // Power Engineering and Information Technologies in Technical Objects Controls: Taylor & Francis Group, London. – 2016. – P. 259-265. Цитується у базі Google Scholar.
8. Syrotkina O. Formation of the Classification Space of the Expert System Knowledge Base for SCADA Failure Diagnostics / O. Syrotkina // Power Engineering, Control and Information Technologies in Geotechnical Systems: Taylor & Francis Group, London. – 2015. – P. 179-184. Цитується у базі Google Scholar.

Матеріали наукових конференцій:

9. Syrotkina O. The Model and Method of SCADA Diagnostics as an Object with Partially Defined Parameters / O. Syrotkina // Матеріали XII Міжнародної конференції з проблем використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості (23-24 листопада 2016, м. Дніпро): тези доповіді. – ДВНЗ «НГУ», 2017. – С. 18-20.
10. Сироткіна О.І. Методика автодіагностики SCADA системи / М.О. Алексеев, О.І. Сироткіна // Інформаційні технології в освіті, техніці та промисловості: матеріали II Всеукраїнської науково-практичної конференції молодих учених і студентів (6-9 жовтня 2015, м. Івано-Франківськ): тези доповіді. – ІФНТУНГ, 2015. – С. 54-56.
11. Сироткина Е.И. Логико-аналитическая модель диагностики работы SCADA / Е.И. Сироткина // Проблемы недропользования: материалы международного форума–конкурса молодых ученых, г. Санкт-Петербург, 23–25 апреля 2014г. – Ч 2. – С. 158-160.
12. Сироткина Е.И. Формирование объектно-классификационной модели диагностики работы SCADA системы / Е.И. Сироткина, М.А. Алексеев // Проблемы недропользования: материалы международного форума–конкурса молодых ученых, г. Санкт-Петербург, 24–26 апреля 2013г. – Ч 2. – С. 256-258.
13. Сироткина Е.И. Методика диагностики работы SCADA на основе применения экспертных систем / М.А. Алексеев, Е.И. Сироткина // Проблеми використання інформаційних технологій в освіті, науці та промисловості: матеріали X міжнародної конференції (30-31 січня 2013, м. Дніпропетровськ): тези доповіді. — ДВНЗ «НГУ», 2013. – С. 43-44.

14. Сироткина Е.И. Методика диагностики аппаратно-программного комплекса SCADA систем / М.А. Алексеев, Е.И. Сироткина // Наукова весна – 2013: Матеріали четвертої всеукр. наук.-практ. конф., 29 березня 2013 р.: тези доповіді. – Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ», 2013. – С. 417-418.
15. Сироткина Е.И. Экспертно-диагностическая система принятия решений для автовосстановления работоспособности аппаратно-программных комплексов SCADA / М.А. Алексеев, Е.И. Сироткина // Інтелектуальні системи прийняття рішень та проблеми обчислювального інтелекту: матеріали міжнародної наукової конференції. – Херсон: ХНТУ, 2013. – Т. 1. – С. 342-344.
16. Сироткина Е.И. Методы повышения надежности распределенных SCADA систем управления авиацией и ПВО ВС Украины / М.А. Алексеев, Е.И. Сироткина // Новітні технології – для захисту повітряного простору: Восьма наукова конференція Харківського університету Повітряних Сил імені Івана Кожедуба, 18-19 квітня 2012 р.: тези доповіді – Харків: ХУПС ім. І. Кожедуба, 2012. – С. 46-47.
17. Сироткина Е.И. Повышение надежности SCADA систем на основе совершенствования методов диагностики / М.А. Алексеев, Е.И. Сироткина // Наукова весна – 2012: Матеріали третьої всеукр. наук. – практ. конф., 29 березня 2012 р.: тези доповіді. – Дніпропетровськ: ДВНЗ «НГУ», 2012. – С. 378-379.
18. Syrotkina O. Automatic Subsystem of Data Transmission Diagnostics is the Base of Reliability and Stability of Modern SCADA Systems for Mission-critical Applications / O. Syrotkina // The 6th International Forum for Students and Young Researches, April 14-15, 2011: Abstracts. – Dnipropetrovsk: NMU, 2011. – Volume 2. – P. 85-86.
19. Сироткина Е.И. Концепция построения автоматических необслуживаемых SCADA систем ответственного назначения / Е.И. Сироткина // Сборник научных трудов по материалам международной научно-практической конференции «Современные направления теоретических и прикладных исследований 2010», (Одесса, 15-26 марта 2010 г.) / Том 2. Технические науки. – Одесса: Черноморье, 2010. – С. 67-72.

Патенти:

20. Пат. 92363 Україна, МПК G05B 13/02 (2006.01), G05B 17/00, G06F 11/07 (2006.01), G06F 11/25 (2006.01) Спосіб автоматичної самодіагностики автоматизованої системи керування технологічним об'єктом / Алексеев М.О., Сироткіна О.І.; заявник і власник патенту ДВНЗ «НГУ». – № 201402956; заявл. 24.03.2014; опубл. 11.08.2014, Бюл. № 15. – 6 с.: кресл.
21. Пат. 73812 Україна, МПК G06F 12/12 (2006.01), G06F 15/16 (2006.01) Промисловий сервер SCADA системи / Алексеев М. О., Сироткіна О.І.; заявник і власник патенту ДВНЗ «НГУ». – № 201203199; заявл. 19.03.2012; опубл. 10.10.2012, Бюл. № 19. – 5 с.: кресл.

АНОТАЦІЯ

Сироткіна О.І. Методи діагностики SCADA систем на основі m -арних кортежів та k -значної логіки. – На правах рукопису.

Дисертація на здобуття наукового ступеня кандидата технічних наук за спеціальністю 01.05.02 – математичне моделювання та обчислювальні методи. – Національна металургійна академія України, Дніпро, 2018.

Дисертаційну роботу присвячено вирішенню актуальної науково-прикладної задачі забезпечення якості функціонування SCADA системи за рахунок її самодіагностики.

На основі об'єктно-класифікаційної моделі запропоновано метод формування простору пошуку діагнозу з використанням математичних методів роботи зі структурою типу m -арні кортежі на основі впорядкованих множин, що мінімізує простір пошуку діагнозу.

На основі структурно-логічної моделі вперше отримано функції виявлення та локалізації відмови у системі, запропоновано метод аналізу зміни стану інформаційного потоку в SCADA.

Розроблено програмний засіб оперативного контролю працездатності SCADA з визначенням коефіцієнтів нестабільності роботи структурних модулів системи.

Комплексне використання отриманих у роботі результатів дозволяє мінімізувати час виявлення схованих відмов до масштабів реального часу; експлуатаційним службам підприємства здійснювати своєчасну діагностику позаштатних ситуацій і причин відмов SCADA системи.

Ключові слова: математичне моделювання, діагностика працездатності SCADA, виявлення та локалізація відмов, інформаційний потік, коефіцієнт нестабільності роботи.

АННОТАЦИЯ

Сироткина Е.И. Методы диагностики SCADA систем на основе m -арных кортежей и k -значной логики. – На правах рукописи.

Диссертация на соискание ученой степени кандидата технических наук по специальности 01.05.02 – математическое моделирование и вычислительные методы. – Национальная металлургическая академия Украины, Днепр, 2018.

Диссертационная работа посвящена решению актуальной научно-прикладной задачи обеспечения качества функционирования SCADA системы за счет ее самодиагностики.

На основе объектно-классификационной модели предложен метод формирования пространства поиска диагноза с использованием математических методов работы со структурой типа m -арные кортежи на основе упорядоченных множеств, что минимизирует пространство поиска диагноза.

На основе структурно-логической модели впервые получены функции обнаружения и локализации отказа в системе, предложен метод анализа

изменения состояния информационного потока в SCADA.

Разработано программное средство оперативного контроля работоспособности SCADA с определением коэффициентов нестабильности работы структурных модулей системы.

Комплексное использование полученных в работе результатов позволяет минимизировать время обнаружения скрытых отказов до масштабов реального времени; эксплуатационным службам предприятия осуществлять своевременную диагностику нештатных ситуаций и причин отказов SCADA системы.

Ключевые слова: математическое моделирование, диагностика работоспособности SCADA, обнаружение и локализация отказов, информационный поток, коэффициент нестабильности работы.

ABSTRACT

Syrotkina O. Methods of SCADA Diagnostics Based on M -tuples and K -valued logic. - Manuscript.

This thesis is submitted to obtain a Ph.D (Candidate of Technical Sciences) in specialty 01.05.02 – Mathematical Modelling and Computational Methods. – The National Metallurgical Academy of Ukraine, Dnipro, 2018.

This dissertation is devoted to solving a relevant scientific task of quality assurance for the distributed SCADA system while the system is in operation. This is achieved by performing self-diagnostics through detecting, localizing and identifying failures in real-time.

We further developed an object and classification model of SCADA self-diagnostics using the methodology of expert systems. We suggested a method of forming a search space to establish the diagnosis based on this methodology. The method processes and analyzes a full flow of low-level diagnostic information generated by SCADA. It uses mathematical methods to work with the data structure m -tuples based on ordered sets we developed for the first time.

We established that the application of the proposed mathematical models changes the functional dependency to estimate the time needed to form the diagnosis search space with the number of input data n from the exponential $O(2^n)$ to the cubic $O(n^3)$.

The author used the method of mathematical induction to prove theoretically the formula of finding the complement to the element of Boolean to a subset of the ordered basis set. This allows us to work with the data structure m -tuples based on ordered sets of arbitrary cardinality. The estimated time needed to perform this calculation does not depend on the number of input data n and is a function with the constant time execution $O(1)$.

We improved a structural and logical model to diagnose SCADA operability. For the first time the author obtained the following analytical dependencies: an admissible state change of the controlled parameter while it is passing through the SCADA hierarchy levels; detection and localization of a failure in the system;

separation between independent and dependent failures. The author proposed the method to analyze the change of the information flow state while it is passing through SCADA structural elements and hierarchy levels on the basis of analytical dependencies obtained. The method allows human operators to control the system operability in real-time in case of incomplete / unreliable / absent data in the system's structural elements. It has been established that the application of the proposed analytical dependencies reduces the space of permissible states for the mathematical model of SCADA diagnostics. The foregoing depends on the number of hierarchy levels in the range from 8% to 1% with respect to the complete set of analyzed states. This allows the increase of the reliability for automatic diagnostics by ensuring the completeness and reliability of operational information.

The author developed an algorithm and software application for the operational control and monitoring of SCADA operability. It was achieved by setting the coefficients of instability for the work of the system's structural elements.

The software application allows users to work with SCADA of any topology; perform monitoring and prediction of SCADA modules' reliability in real-time; determine the most vulnerable structural modules and the cause-effect relationships of their vulnerability.

Improving the functional quality for the distributed hardware-software SCADA complex is achieved by using the diagnostic method developed. This is the method of automatic diagnostics based on automatic failure detection and localization in the system in real-time. This method allows us to minimize the time needed to detect and localize hidden failures to real-time.

We established that minimizing the time of hidden failure detection up to 0.1 hour allows us to maintain a decrease in the probability of failure-free operation. It is achieved in the event of having hidden failures within the limits up to 1%. This increases the probability of failure-free operation by 7% – 8% compared to the average data of the parameter change intervals (hidden failure detection time is 3 hours; the percentage of hidden failures in the total number of failures is 3%).

The integrated use of models, methods and software application developed allows the maintenance personnel of any enterprise to carry out timely diagnostics of emergency situations and reasons for failures; make quick decisions for the organization of SCADA repair and recovery work; repeatedly reduce the recovery time of SCADA performance after reversible failures in the event the system has mechanisms to automatically self-recover. The results of the work were implemented into the Institute of Technical Mechanics (The National Academy of Sciences of Ukraine) and into the educational curriculum of The State Higher Educational Institution "National Mining University". The author received two patents issued by the Ukrainian government.

Keywords: mathematical modelling, diagnostics of SCADA operability, detection and localization of failures, information flow, coefficient of work instability.