

**МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ**

Нечипорук Олена Петрівна



УДК 004.891.3:681.518.5

**ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ
ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ**

05.13.06 – Інформаційні технології

Автореферат
дисертації на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

Київ – 2021

Дисертацією є рукопис.

Робота виконана на кафедрі комп'ютеризованих систем управління Національного авіаційного університету, м. Київ.

Науковий консультант: доктор технічних наук, професор
Литвиненко Олександр Євгенійович,
Національний авіаційний університет,
завідувач кафедри комп'ютеризованих
систем управління.

Офіційні опоненти: заслужений діяч науки і техніки України,
доктор технічних наук, професор
Додонов Олександр Георгійович,
Інститут проблем реєстрації інформації НАН
України, заступник директора з наукової
роботи;

доктор технічних наук, професор
Корнієнко Богдан Ярославович,
Національний технічний університет України
«Київський політехнічний інститут імені Ігоря
Сікорського», професор кафедри автоматики
та управління в технічних системах;

доктор технічних наук, доцент
Корж Роман Орестович,
Національний університет «Львівська
політехніка», проректор з науково-
педагогічної роботи.

Захист відбудеться “ 30 ” квітня 2021 р. о 13⁰⁰ годині на засіданні спеціалізованої
вченої ради Д 26.062.01 в Національному авіаційному університеті за адресою:
03058, Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

З дисертацією можна ознайомитися у бібліотеці Національного авіаційного
університету за адресою: 03058, Київ, проспект Любомира Гузара, 1.

Автореферат розісланий “ 30 ” березня 2021 р.

Вчений секретар
спеціалізованої вченої ради



Т. Охріменко

ЗАГАЛЬНА ХАРАКТЕРИСТИКА РОБОТИ

Актуальність теми. Експлуатація і обслуговування сучасних складних технічних об'єктів (СТО) у будь-яких умовах вимагає забезпечення їх високоякісним технічним діагностуванням. Діагностування є однією з найбільш інтелектуально ємних процедур. Від якості діагностування технічного стану системи залежить ефективність її технічного обслуговування та безпека експлуатації.

Сучасні СТО представляють собою складні технічні системи, що являються об'єднанням модулів різного фізичного виконання й призначення. Системи, які з'явилися спочатку в авіабудуванні й космонавтиці, поступово знаходять своє застосування практично у всіх сферах життєдіяльності людини. Проведення діагностичної процедури та обробка її результатів має велику працездатність, чи, більш того, вона є нереалізованою з причин обмеження на обчислювальні ресурси. Тому постає необхідність створення принципово нових моделей подання даних про об'єкт з метою діагностування, на основі яких можливо організувати ефективну комбінаційну процедуру пошуку несправностей для складних систем з великою кількістю станів.

Підвищення складності технічних систем, обумовлене об'єктивними тенденціями розвитку науки, техніки і технологій, призводить до зростання частки комбінацій несправностей на загальному фоні факторів непрацездатності реальних об'єктів. Такі несправності можуть відбуватися одночасно в різних місцях (підсистемах) об'єкта контролю і мати неоднорідний характер. Кожна окрема несправність призводить до відомих змін певного набору контрольованих параметрів. Методи локалізації подібних одиночних несправностей в технічних системах описані в роботах вітчизняних і зарубіжних вчених П.Л. Пархоменко, Є.С. Согомоян, В.В. Карібський, А.В. Мозгалевський, Я.Я. Осіс, В.А. Гуляєв, Д. Маєда, С. Рамомурті.

Та особливої гостроти набуває проблема ідентифікації саме комбінацій несправностей, що притаманні об'єктам діагностування (ОД) з багаторівневою структурою, в яких несправності в підсистемі того чи іншого рівня можуть викликати віялоподібний потік несправностей в інших підсистемах даного рівня і підсистемах інших рівнів, що взаємодіють з даним. Прикладом може служити газотранспортна система, що складається з декількох рівнів, кожен з яких в свою чергу складається зі складних підсистем. Так, несправності в системі мастила газоперекачувального агрегату можуть спричинити за собою потік несправностей в підсистемах верхніх рівнів, таких як компресорна станція та ін.

На додаток до сказаного необхідно зазначити, що негативні впливи, що призводять до несправностей технічної системи, носять прихований характер, при цьому в системі виникають комбінації несправностей на різних її рівнях, кожна з яких викликає відповідні зміни значень того чи іншого набору параметрів, що контролюються. Виходячи з цього, на момент діагностування в таких системах маємо накладання наслідків кожної окремої несправності з множини несправностей, яка обумовлена додаванням змін контрольованих параметрів об'єкта діагностування.

Тому традиційні методи діагностування в подібних ситуаціях є неприйнятними, такі комбінації несправностей можуть бути виявлені завчасно тільки при використанні методів діагностування, подібних до тих, які використовуються в експертних системах, що володіють елементами штучного інтелекту.

Задача ідентифікації комбінацій несправностей в багаторівневому об'єкті діагностування носить комбінаторний характер. Це дає підставу вважати, що для її розв'язання можуть бути застосовані методи комбінаторного аналізу, вільні від недоліків евристичних алгоритмів.

Основною причиною, що стримує розвиток систем діагностування багаторівневих об'єктів на основі інформаційних технологій є відсутність теорії, яка здатна автоматизувати процес створення діагностичних моделей, що описують нелінійні функціональні залежності між системними об'єктами. Дані моделі необхідні для побудови алгоритмів діагностування, що здатні визначати технічний стан багаторівневих об'єктів в умовах накладання наслідків впливу кожної з несправностей на значення контрольованих параметрів. Такі алгоритми повинні мати властивості збіжності та повноти.

Для побудови такої теорії необхідно розв'язати декілька істотних проблем в розумінні процесів діагностування багаторівневих систем, пов'язаних, насамперед, з ефективним і своєчасним виявленням аномалій у поведінці складної технічної системи, пошуком та ідентифікацією місця розташування і характеру комбінацій несправностей системи за умови виникнення діагностичної ситуації, коли накладання наслідків різних несправностей компенсують значення відхилень контрольованих параметрів системи, що несе невизначеності різного ступеня та характеру. Дана проблема зумовлена великою розмірністю завдання та необхідністю врахування різноманітних факторів, властивих системі, які впливають на якість вирішення завдання.

Отже, створення наукових основ побудови моделей, методів та інформаційної технології діагностування складних технічних систем з багаторівневою структурою, які дозволитимуть визначати комбінації прихованих несправностей, що призводять до накладання їх наслідків на різних рівнях, є актуальною науково-прикладною проблемою.

Зв'язок роботи з науковими програмами, планами, темами. Основні дослідження за темою дисертації проводилися у Національному авіаційному університеті в рамках виконання держбюджетної науково-дослідної роботи №782-ДБ12 «Розробка моделюючої системи польоту БПЛА у комбінованому режимі» (номер держреєстрації 0112U002051); науково-дослідницької роботи №901-X13 «Розробка програмного забезпечення «Програмне забезпечення комплексу завдань «Параметрична діагностика» (контракт №804/07546819/00413 між НАУ та ОАО «Авиадвигатель»); держбюджетні кафедральні науково-дослідні роботи №93/09.01.05 «Моделі та методи визначення показників функціонування телекомунікаційних систем»; №62/09.02.02 «Дослідження засобів аналізу та оптимізації роботи комп'ютерних мереж вузівського масштабу»; №71/09.02.02 «Теоретичні та практичні аспекти впровадження мережевих 3D-технологій у навчальному процесі».

Мета і завдання дослідження. Метою даного дослідження є створення інформаційної технології діагностування багаторівневих технічних систем для підвищення достовірності результатів ідентифікації комбінацій прихованих несправностей в умовах накладання їх наслідків на контрольовані параметри.

Виникнення комбінацій окремих несправностей при накладанні їх наслідків унеможливує розв'язання задачі діагностування багаторівневої технічної системи традиційними методами та надає їй комбінаторний характер.

Досягнення вказаної мети вимагає подальшого розвитку теорії і практики побудови інформаційних технологій діагностування складних технічних об'єктів з багаторівневою структурою, а також розробки методів розв'язання основних функціональних задач, що виникають у подібних випадках.

У результаті проведених досліджень у галузі контролю технічного стану і пошуку несправностей, які виникли, у роботі, сформульовано наступні завдання:

1. Провести аналіз проблем діагностування складних технічних систем з багаторівневою структурою і, зокрема, процесу ідентифікації комбінацій несправностей на всіх рівнях складної системи.

2. Розробити узагальнену логічну діагностичну модель, яка відобразатиме причинно-наслідкові залежності між типовими комбінаціями несправностей та відповідними їм змінами значень контрольованих параметрів багаторівневого технічного об'єкту.

3. Розробити окремі форми логічної діагностичної моделі, що відповідають найбільш розповсюдженим реальним об'єктам діагностування, в залежності від можливості апріорного встановлення сукупності типових комбінацій несправностей.

4. Розробити метод перетворення логічних діагностичних моделей до комбінаторних форм, які зводяться до канонічного виду систем нерівностей лінійної та нелінійної структури з булевими змінними.

5. Розробити метод розв'язання систем комбінаторних нерівностей з лінійною та нелінійною структурою, адаптованих до логічних моделей задач діагностування багаторівневих технічних об'єктів.

6. Розробити інформаційну технологію діагностування багаторівневих технічних систем, яка дозволяє ідентифікувати комбінації несправностей з урахуванням наслідків впливу кожної з них на значення контрольованих параметрів системи.

7. Розробити експертну систему діагностування технічних об'єктів з багаторівневою структурою, здатну ідентифікувати комбінації несправностей, які виникають на момент діагностування, враховуючи накладання наслідків впливу кожної з них на значення контрольованих параметрів об'єкту.

8. Реалізувати інформаційну технологію діагностування складних технічних систем з багаторівневою структурою у вигляді програмного забезпечення та впровадити її у виробництво з метою підвищення достовірності результатів ідентифікації комбінацій несправностей в умовах накладання їх наслідків.

Об'єктом дослідження є процес ідентифікації прихованих несправностей та їх комбінацій в складних технічних системах з багаторівневою структурою.

Предметом дослідження є моделі, методи та інформаційна технологія діагностування багаторівневих технічних систем з комбінаціями несправностей з урахуванням наслідків їх впливу на значення контрольованих параметрів об'єкта.

Методи дослідження: математична логіка, на основі якої здійснено формалізацію завдання діагностики, сформовано логічні моделі; системний аналіз, який застосовано при дослідженні роботи складних систем в умовах масових відхилень значень характеристик від еталонних значень; теорія штучного інтелекту, використана при розробці моделей діагностування складної технічної системи; методи оптимізації, застосовані при розробці і модифікації алгоритму розв'язання завдання діагностики; теорія програмування, використана при побудові архітектури і механізмів програмних систем діагностики складних технічних об'єктів.

Наукова новизна одержаних результатів. Основний науковий результат дисертації полягає у створенні моделей, методів та інформаційної технології діагностування складних технічних систем з багаторівневою структурою з метою визначення комбінацій прихованих несправностей, враховуючи наслідки впливу кожної з них на значення контрольованих параметрів об'єкту.

У рамках виконаних досліджень отримано такі наукові результати:

1. *Вперше* розроблено метод діагностування багаторівневих технічних об'єктів, який дозволяє ідентифікувати комбінації прихованих несправностей в умовах накладання наслідків кожної з них на значення контрольованих параметрів, що дозволяє скоротити час приведення об'єкта до робочого стану.

2. *Вперше* розроблено узагальнену та окремі логічні моделі діагностування технічних об'єктів з багаторівневою структурою, які відображають причинно-наслідкові залежності між типовими комбінаціями несправностей та змінами значень контрольованих параметрів, що дозволяє скоротити час діагностування в окремих практичних випадках.

3. *Вперше* розроблено метод перетворення логічних діагностичних моделей до комбінаторних форм, які зводяться до канонічного виду систем нерівностей лінійної та нелінійної структури з булевими змінними, що дозволяє використовувати для розв'язання задач діагностування складних технічних об'єктів з комбінаціями прихованих несправностей ефективні алгоритми послідовного аналізу і відсіювання варіантів.

4. *Отримав подальший розвиток* метод послідовного аналізу і відсіювання варіантів, який адаптований до структури моделей реальних задач діагностування, що дозволяє скоротити час отримання шуканого рішення.

5. *Вперше* розроблено інформаційну технологію діагностування багаторівневих технічних об'єктів, інваріантну щодо їх фізичної природи, структури та технічних параметрів, яка здатна ідентифікувати комбінації прихованих несправностей в умовах накладання наслідків впливу кожної з них на значення характеристик стану об'єкту. Розроблена інформаційна технологія містить комплекс методів, алгоритмів і програм, які надають можливість розв'язувати задачі діагностування багаторівневих технічних систем на новому якісному рівні, що дозволяє підвищити достовірність прийняття рішень в умовах накладання наслідків кожної окремої несправності.

Практичне значення одержаних результатів.

1. В результаті виконаного дисертаційного дослідження розроблено експертну систему діагностування багаторівневих технічних об'єктів, здатну ідентифікувати комбінації прихованих несправностей з урахуванням накладання їх наслідків.

2. Розроблено логічну модель діагностування газотранспортної системи України як багаторівневого технічного об'єкта з урахуванням всіх її складових частин, яка дозволяє виявляти комбінації прихованих несправностей, і, як наслідок, приводить до зменшення аварійних останов системи.

3. Удосконалено моделі діагностування турбореактивних двоконтурних двигунів як складової частини газотранспортної системи, що дозволило скоротити процес діагностування та термін ліквідації наслідків несправностей у системі.

4. Результати експериментальних досліджень в газотранспортній галузі з використанням розробленого програмного забезпечення підтверджують вірність наукових положень запропонованої інформаційної технології, оскільки їх впровадження надало можливість виявити несправності, які раніше неможливо було ідентифікувати через накладання їх наслідків, що на 9% підвищило достовірність процесу діагностування та на 12% підвищило термін міжаварійного ремонту об'єктів діагностики, а саме компонентів газотранспортної системи, знизило витрати на ліквідацію наслідків несправностей у складних технічних системах.

5. Результати наукових досліджень впроваджено у науково-дослідну роботу в Національному авіаційному університеті (акт впровадження вересень 2014 р.).

6. Результати наукових досліджень впроваджено у діяльність: ДП «Завод №410 ЦА» (акт впровадження грудень 2013 р.); УМГ «Черкаситрансгаз» (акт впровадження лютий 2014 р.); АТ «Укртрансгаз» (акт впровадження березень 2020 р.).

Отримані результати дослідження призначені для використання, в першу чергу, в газотранспортній галузі. Крім того, вони можуть знайти своє застосування в інших галузях, де виникає потреба діагностування багаторівневих технічних систем з комбінаціями прихованих несправностей при накладанні їх наслідків.

Особистий внесок здобувача. Основні положення і результати дисертаційної роботи, що виносяться до захисту, отримані автором самостійно. У роботі автору належать: логічні моделі діагностування складних технічних систем з багаторівневою структурою; логічні моделі адаптовані до завдань ідентифікації комбінацій несправностей у турбореактивних двигунах і газотранспортній системі; метод формування комбінаторних систем нерівностей з лінійною та нелінійною структурою на основі логічних моделей; модифіковані алгоритми визначення комбінацій несправностей в газотранспортній системі, що реалізують стратегію послідовного аналізу та відсіювання варіантів; програмна реалізація алгоритмів, адаптованих до завдань діагностування газотранспортної системи [15, 16, 25, 31, 32, 35, 50].

У роботах, написаних у співавторстві, автору належать: [1, 3-8] – постановки та теоретичні реалізації задач, що стосуються проблем діагностування технічних систем; [13, 27, 36, 43-44] – різні версії логічних моделей діагностування технічних систем, адаптованих до реальних багаторівневих об'єктів (турбореактивних

двоконтурних двигунів, електричних машин, газотранспортної системи); [9-11] – алгоритми визначення похибок вимірювання; [12, 14, 17, 18, 33] – методи та моделі аналізу функціонування складних об'єктів; [2, 19-22, 29, 30] – методи діагностування багаторівневих технічних систем; [23, 24, 26, 37] – метод обробки діагностичної інформації; [28, 29] – структура інформаційної технології діагностування технічних об'єктів з багаторівневою структурою; [39-41, 49-50] – програмна реалізація алгоритмів ідентифікації комбінацій несправностей в багаторівневих системах; [34, 38, 42] – методи моделювання складних систем; [45-48] – технологія проектування експертної системи діагностування багаторівневих технічних об'єктів.

Апробація результатів дисертації. Основні положення дисертаційної роботи доповідались і обговорювались на наукових конференціях, серед яких: VII Международная научно-практическая конференция «Ключевые вопросы в современной науке» (София, Болгария, 2011); Международная научно-практическая конференция «Новости научной мысли» (Прага, Чешская Республика, 2011, 2012); The fourth world congress «Aviation in the XXI-st century. Safety in Aviation and Space Technologies» (Kyiv, Ukraine, 2010); Всеукраїнська науково-практична конференція «Проблеми навігації і управління рухом» (Київ, 2010); Міжнародна конференція «Реформування та розвиток науки: сучасні виклики» (Київ, 2013); IV Міжнародна науково-практична конференція «ІРТК-2011» (Київ, 2011); IX Международная научно-практическая конференция «Научное пространство Европы» (Перемышль, Республика Польша, 2013); Международная научно-практическая конференция «Прикладные научные разработки» (Прага, Чешская Республика, 2014, 2015); Международная научно-практическая конференция «Динамика современной науки» (София, Болгария, 2014, 2015); International research and practice conference «Prospects of world science» (Sheffield, Great Britain, 2014, 2015); Міжнародна науково-практична конференція «Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу» (Київ, 2014, 2015, 2017); Международная научно-практическая конференция «Современная наука: проблемы, прогнозы и решения» (Тбилиси, Грузия, 2014); Международная научно-практическая конференция «Наука: теория и практика» (Перемышль, Республика Польша, 2015, 2016).

Публікації. Основні положення дисертаційного дослідження опубліковано у 50 наукових працях, у тому числі: 2 монографії [1-2], 28 наукових статей у наукових журналах та збірниках наукових праць [3-30], з яких 3 наукові статі у виданнях, що входять до міжнародної бази даних Scopus [23, 29-30], 11 наукових статей у наукових виданнях, що входять до інших міжнародних наукометричних баз даних [9-11, 13, 19-22, 24-26], 14 наукових статей у вітчизняних фахових наукових журналах та збірниках наукових праць [3-8, 14-18, 27-28], а також 20 матеріалів та тез доповідей конференцій [31-50].

Структура та обсяг дисертації. Дисертаційна робота складається з анотації, списку скорочень, вступу, змісту, п'яти розділів, висновків, додатків, списку використаних джерел, та містить 269 сторінок основного тексту, 31 рисунок, 9 таблиць, 9 сторінок додатків. Список використаних джерел налічує 254 найменування на 28 сторінках. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 306 сторінок.

ОСНОВНА ЧАСТИНА

У анотації та вступі обґрунтовано актуальність теми дисертації, відзначено зв'язок роботи з науковими темами, сформульовано мету і завдання дослідження, визначено об'єкт, предмет, методи дослідження, наукову новизну отриманих результатів та їх практичне значення, наведено інформацію про впровадження результатів, їх апробацію та публікації, структуру, об'єм та ключові слова.

У першому розділі наведено стислий огляд основних наукових праць, що стосуються тематики дисертаційної роботи, виконано аналіз сучасних технологій діагностування складних технічних систем. Визначено методи формалізації та описано проблеми дослідження складних систем. Наведено найбільш поширену класифікацію методів формалізованого представлення складних систем. Описано переваги систем експертної діагностики.

Показано, що при спробах подальшого вдосконалення систем діагностування доцільно застосовувати модифіковані під ситуацію алгоритми послідовного аналізу і відсіювання варіантів, що вимагає перетворення логічних моделей діагностування до комбінаторних форм.

Сформульовано завдання діагностики: виходячи з поточних значень характеристик стану об'єкта діагностики, однозначно визначити рівні, підсистеми та елементи підсистем, в яких виникли несправності, та види виявлених несправностей. Виходячи з поставленого завдання запропоновано розробити інформаційну технологію, що дозволяє ідентифікувати комбінації несправностей у багаторівневому технічному об'єкті діагностування, з урахуванням накладання їх наслідків на значення характеристик стану об'єкта.

Припустимо, об'єктом діагностування є структурно-складна технічна система S , яка складається з l ієрархічних рівнів, кожен з яких включає множину C_i взаємодіючих підсистем c_{ij} : $C_i = \{c_{ij}; j \in J_i\}$, де J_i – множина ідентифікаторів підсистем i -го рівня; $i = \overline{1, l}$.

Стан кожної підсистеми c_{ij} у довільний момент часу визначається вектором значень її контрольованих параметрів $z_{ij} = (z_p | p \in P_{ij})$, де P_{ij} – множина номерів таких параметрів; $i = \overline{1, m}$; $j \in J_i$.

Стан ОД у цілому визначається загальним вектором значень контрольованих параметрів $z = (z_p | p = \overline{1, u})$, який являє собою впорядковану сукупність елементів

векторів z_{ij} , $i = \overline{1, m}$; $j \in J_i$ та має розмірність $u = \sum_{i=1}^m \sum_{j \in J_i} |P_{ij}|$.

Для кожної підсистеми c_{ij} відома певна кількість видів ймовірних несправностей K_{ij} ; $i = \overline{1, m}$; $j \in J_i$.

Прийmemo e_p – еталонний рівень p -ї характеристики стану ОД; ε_p – допустиме відхилення, а δ_p – фактичне відхилення поточного значення цієї характеристики від еталонного: $\delta_p = |z_p - e_p|$, $p = \overline{1, u}$.

Якщо для усіх характеристик стану ОД фактичне відхилення поточного значення не перевищує допустимого, то, в такому випадку, виконується умова:

$$(\forall p: 1 \leq p \leq u)(\delta_p \leq \varepsilon_p),$$

отже, можна стверджувати, що об'єкт діагностування знаходиться у нормальному (справному, робочому) стані; у протилежному випадку – у аномальному (несправному, неробочому).

Перехід об'єкта діагностики у аномальний стан потребує розв'язання задачі діагностування.

У загальному випадку логічні моделі діагностування технічної системи з багаторівневою структурою, у якій існує можливість настання комбінацій прихованих несправностей, будують за наступною схемою: комбінація несправностей призводить до зміни значень підмножини характеристик стану системи.

При цьому зроблено припущення, що зміну значень кожної характеристики оцінено відносно відомого наперед еталонного рівня. У випадку неможливості кількісного вимірювання тієї чи іншої характеристики стану ОД її може бути задано на якісному рівні.

Логічна модель діагностування складного об'єкта з багаторівневою структурою налаштовується, виходячи з наступних припущень, які узагальнюють досвід дослідження реальних технічних систем різноманітного призначення.

1. Для кожної характеристики стану ОД можна вказати одну або декілька комбінацій несправностей, виникнення яких найбільш суттєво та безпосередньо змінюють значення даної характеристики, тоді як інші комбінації мають на неї менш значний (опосередкований) вплив. І навпаки, для кожної комбінації несправностей можна вказати «основну» характеристику стану ОД, яка піддається прямій та найбільш суттєвій зміні під впливом даної комбінації, тоді як інші характеристики стану ОД відчувають менш суттєві (опосередковані) зміни (прямий вплив).

2. Існують комбінації несправностей, які викликають зміну значень не лише «основної» (для даної комбінації) характеристики ОД, а й характеристик тієї підсистеми, до якої належить «основна» характеристика (побічний ефект першого роду).

3. Існують комбінації несправностей, які викликають, крім зміни значень «основної» характеристики стану тієї чи іншої підсистеми певного рівня ОД, зміну значень деяких характеристик стану інших підсистем даного рівня, які взаємодіють з системою, що розглядається (побічний ефект другого роду).

4. Існують комбінації несправностей, які викликають, крім зміни значень не лише «основної» характеристики стану тієї чи іншої підсистеми певного рівня ОД, а й деяких характеристик стану підсистем інших рівнів, які взаємодіють з системою, що розглядається (побічний ефект третього роду).

5. Існують різні комбінації несправностей, які викликають однакові наслідки (тобто, однакові зміни значень тих чи інших характеристик стану ОД).

6. Існують різні комбінації несправностей, що викликають протилежні за знаком зміни значень однакових характеристик стану ОД (ефект накладання наслідків).

Вплив комбінацій несправностей на зміну значень характеристик стану технічного об'єкта з багаторівневою структурою (ТОБС) відображено на рисунку 1. На даному рисунку побічний ефект першого роду позначено червоним кольором; побічний ефект другого роду – зеленим; побічний ефект третього роду – синім; однакові зміни значень тих чи інших характеристик стану ОД позначено жовтим кольором; накладання наслідків позначено коричневим кольором.

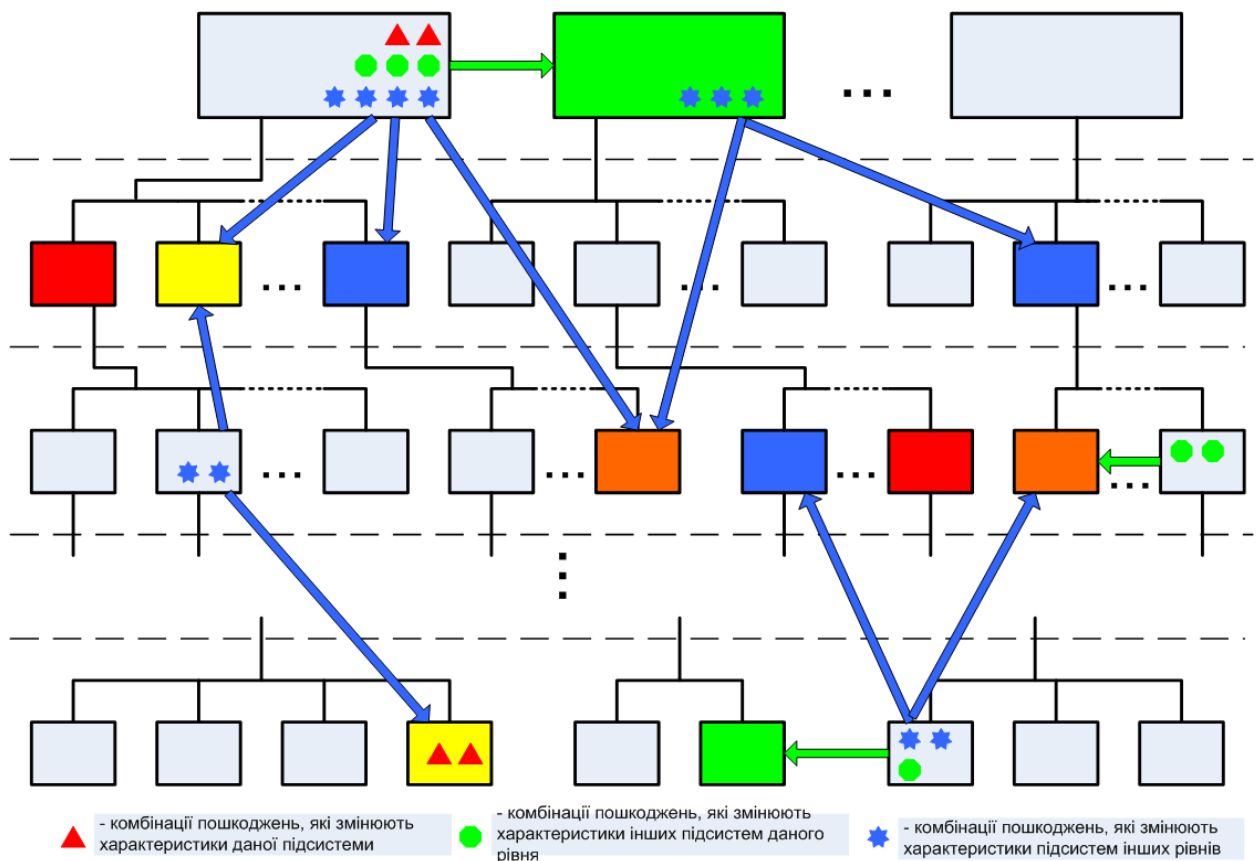


Рисунок 1 – Вплив комбінацій несправностей на зміну характеристик стану ТОБС

Позначимо R – множина ймовірних типових комбінацій несправностей, визначена експертним шляхом; $\rho = |R|$. У загальному випадку цю множину розбивають на w непересічних підмножин R_q , $q = \overline{1, w}$, кожна з яких поєднує комбінації несправностей, що приводять до однакових змін однакових характеристик стану ОД. При цьому $R = \prod_{q=1}^w R_q$.

Позначимо $I^{(r)}$ – множину номерів рівнів ОД, що вміщують підсистеми, характеристики стану яких підлягають змінам внаслідок виникнення r -ї комбінації

несправностей; $r = \overline{1, \rho}$; $J_i^{(r)}$ – множина ідентифікаторів підсистем i -го рівня ОД, характеристики стану яких змінюються під впливом r -ї комбінації несправностей; $r = \overline{1, \rho}$; $i \in I^{(r)}$; $K_{ij}^{(r)}$ – множина видів несправностей у j -й підсистемі i -го рівня ОД, що входять до складу r -ї типової комбінації; $r = \overline{1, \rho}$; $i \in I^{(r)}$; $j \in J_i^{(r)}$; $P_{ij}^{(r)}$ – множина номерів характеристик стану j -ї підсистеми i -го рівня ОД, які змінюють своє значення під впливом r -ї комбінації несправностей; $r = \overline{1, \rho}$; $i \in I^{(r)}$; $j \in J_i^{(r)}$; $P^{(r)}$ – повна множина номерів характеристик стану ОД, які змінюють свої значення у результаті виникнення r -ї комбінації несправностей:

$$P^{(r)} = \prod_{i \in I^{(r)}} \prod_{j \in J_i^{(r)}} P_{ij}^{(r)}; r = \overline{1, \rho},$$

$h_p^{(r)}$ – величина, яка характеризує зміну характеристики z_p стану ОД під впливом r -ї комбінації несправностей; $r = \overline{1, \rho}$; $p \in P^{(r)}$; $p_0(r)$ – номер характеристики стану ОД, яка піддається найбільш відносній зміні у результаті виникнення r -ї комбінації несправностей та визначається за ознакою:

$$\left| \frac{h_{p_0(r)}^{(r)}}{\mathcal{E}_{p_0(r)}} \right| = \max \left\{ \left| \frac{h_{p(r)}^{(r)}}{\mathcal{E}_{p(r)}} \right|; p \in P^{(r)} \right\}; r = \overline{1, \rho}, \quad (1)$$

де $i_0(r)$ – номер рівня ОД, який включає підсистему, до якої належить характеристика стану $p_0(r)$; $r = \overline{1, \rho}$; $j_0(r)$ – ідентифікатор підсистеми ОД, множина характеристик стану якої включає характеристику $p_0(r)$; $r = \overline{1, \rho}$.

Параметри $i_0(r)$ та $j_0(r)$ визначаються за ознакою:

$$p_0(r) \in P_{i_0(r), j_0(r)}; 1 \leq i_0(r) \leq m; j_0(r) \in J_{i_0(r)}.$$

У другому розділі запропоновано логічні моделі, які дозволяють визначати комбінації прихованих несправностей з урахуванням накладання їх наслідків у багаторівневих технічних об'єктах діагностики. Також запропоновано метод, що передбачає перетворення даних моделей до комбінаторних форм, які дозволяють використовувати для ідентифікації комбінацій несправностей алгоритми послідовного аналізу і відсіювання варіантів, що є альтернативою громіздким традиційним процедурам логічного виводу. Це, у свою чергу, дозволяє звести завдання визначення комбінацій несправностей у складному об'єкті діагностування до формування вектора значень змінних, що задовольняють даним системам нерівностей і умові бівалентності.

Логічна модель діагностування складного об'єкта з багаторівневою структурою формується з логічних виразів, кожен з яких співвідносять до одного з

класів типових комбінацій несправностей, які приводять до однакових змін однакових характеристик стану ОД:

$$Y_q \rightarrow \bigwedge_{\mu=0}^{\nu} F_{\mu}^{[r(q)]}; q = \overline{1, w}; \nu = 3, \quad (2)$$

де $r(q)$ – позначення однієї з типових комбінацій несправностей, які входять до складу підмножини R_q ;

Y_q – логічний вислів, який конкретизує сукупність типових комбінацій несправностей, які входять до складу підмножини R_q .

$F_0^{(r)}$ – логічний вислів, який відображає зміну характеристики $p_0(r)$ стану ОД під впливом r -ї типової комбінації несправностей;

$F_1^{(r)}$ – складний вислів, який описує зміну значень інших (за виключенням $p_0(r)$ -ї) характеристик стану $j_0(r)$ -ї підсистеми ОД в результаті виникнення r -ї комбінації несправностей;

$F_2^{(r)}$ – складний вислів, який відображає зміну значень характеристик стану інших підсистем $i_0(r)$ -го рівня ОД, які взаємодіють з $j_0(r)$ -ю підсистемою, під впливом r -ї комбінації несправностей;

$F_3^{(r)}$ – складний вислів, який описує зміну значень характеристик стану підсистем інших (за виключенням $i_0(r)$ -го) рівнів ОД внаслідок виникнення r -ї комбінації несправностей.

Вислови $F_1^{(r)}$, $F_2^{(r)}$ та $F_3^{(r)}$ відображають побічні ефекти першого, другого та третього роду.

Вислови, що входять до формули (2), мають наступну структуру:

$$Y_q = \bigvee_{r \in R_q} \bigwedge_{i \in \overline{1}^{(r)}} \bigwedge_{j \in \overline{J}_i^{(r)}} \bigwedge_{k \in \overline{K}_{ij}^{(r)}} X(i, c_{ij}, s_k),$$

$$F_0^{(r)} = D[z_{p_0(r)}, h_{p_0(r)}^{(r)}]; F_1^{(r)} = \bigwedge_{p \in \overline{P}_{i_0(r), j_0(r)}^{(r)}} D[z_p, h_p^{(r)}],$$

$$F_2^{(r)} = \bigwedge_{j \in \overline{J}_{i_0(r)}^{(r)}} \bigwedge_{p \in \overline{P}_{i_0(r), j}^{(r)}} D[z_p, h_p^{(r)}]; F_3^{(r)} = \bigwedge_{i \in \overline{I}^{(r)}} \bigwedge_{j \in \overline{J}_i^{(r)}} \bigwedge_{p \in \overline{P}_{ij}^{(r)}} D[z_p, h_p^{(r)}],$$

$$q = \overline{1, w}; r \in R_q.$$

У наведених формулах використано наступні умовні позначення:

s_k – предикатна константа, що позначає несправність k -го виду; $i = \overline{1, m}$;
 $j \in \overline{J}_i$; $k \in \overline{K}_{ij}$;

$X(i, c_{ij}, s_k)$ – простий предикат, що описує несправність k -го виду у j -й підсистемі i -го рівня ОД; $i = \overline{1, m}$; $j \in \overline{J}_i$; $k \in \overline{K}_{ij}$;

$D[z_p, h_p^{(r)}]$ – предикат, що відображає зміну значення характеристики z_p

стану ОД на величину $h_p^{(r)}$ по відношенню до еталонного рівня в результаті виникнення несправностей, які утворюють r -у типову комбінацію; $r = \overline{1, \rho}$; $p \in P^{(r)}$;

$\overline{P}_{i_0(r), j_0(r)}^{(r)}$ – множина номерів характеристик стану $j_0(r)$ -ї підсистеми $i_0(r)$ -го рівня ОД, що змінюють свої значення під впливом r -ї комбінації несправностей, за виключенням $p_0(r)$ -ї:

$$\overline{P}_{i_0(r), j_0(r)}^{(r)} = P_{i_0(r), j_0(r)}^{(r)} \setminus \{p_0(r)\}; r = \overline{1, \rho}; i_0(r) \in I^{(r)}; j_0(r) \in J_{i_0(r)}^{(r)},$$

$\overline{J}_{i_0(r)}^{(r)}$ – множина ідентифікаторів підсистем $i_0(r)$ -го рівня ОД, характеристики стану яких змінюються під впливом r -ї комбінації несправностей, за виключенням $j_0(r)$ -ї:

$$\overline{J}_{i_0(r)}^{(r)} = J_{i_0(r)}^{(r)} \setminus \{j_0(r)\}; r = \overline{1, \rho}; i_0(r) \in I^{(r)},$$

$\overline{I}^{(r)}$ – множина номерів рівнів ОД, що вміщують підсистеми, характеристики стану яких підлягають змінам внаслідок виникнення r -ї комбінації несправностей, за виключенням $i_0(r)$ -го:

$$\overline{I}^{(r)} = I^{(r)} \setminus \{i_0(r)\}; r = \overline{1, \rho}.$$

Сукупність виразів (2) утворює базу знань експертної системи діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою.

Відомі логічні еквівалентності дозволяють перетворити систему (2) до більш компактної форми, яку можна вважати канонічним видом логічних моделей задач діагностування комбінацій несправностей у багаторівневих ОД:

$$\bigwedge_{i \in \overline{I}^{(r)}} \bigwedge_{j \in J_i^{(r)}} \bigwedge_{k \in K_{ij}^{(r)}} X(i, c_{ij}, s_k) \rightarrow D[z_p, h_p^{(r)}], \quad (3)$$

$$r = \overline{1, \rho}; p \in P^{(r)}.$$

У формальній постановці дана задача полягає в наступному: на основі спостережуваних значень характеристик стану ОД $z = (z_p | p = \overline{1, u})$ визначити значення предикатів $X(i, c_{ij}, s_k)$; $i = \overline{1, m}$; $j \in J_i$; $k \in K_{ij}$, які задовольняють систему (3).

Для розв'язання задачі діагностування на основі логічної моделі (3) можна використати будь-який дедуктивний алгоритм логічного виводу. Найбільш ефективним вважають алгоритм, побудований за принципом резолюцій Дж. Робінсона. Проте, навіть він має недостатнє цілеспрямованість дії, що досить часто приводить до недопустимих затримок у визначенні несправностей ОД. Прагнення підвести процес локалізації комбінацій несправностей до строгої математичної основи зумовило розробку нового підходу до діагностування складних технічних систем з багаторівневою структурою. Цей підхід дозволяє трансформувати логічну модель (3) у системи комбінаторних нерівностей, для розв'язання яких створено досить ефективні алгоритми.

Метод перетворення моделі (3) до комбінаторної форми передбачає виконання наступних дій:

1) Кожному предикату $X(i, c_{ij}, s_k)$, який описує несправність k -го виду у j -й підсистемі i -го рівня ОД, виставляють у відповідність булеву змінну $x_{ijk} \in \{0, 1\}$, $i = \overline{1, m}$; $j \in J_i$; $k \in K_{ij}$.

2) Кожному виразу моделі (3) співставлено систему комбінаторних рівнянь:

$$\begin{aligned} \pi_{ijk}^{(r)}(\gamma) &= \delta_p^{(r)}, \\ \pi_{ijk}^{(r)}(\gamma) &= \prod_{i \in I^{(r)}} \prod_{j \in J_i^{(r)}} \prod_{k \in K_{ij}^{(r)}} h_p^{(r)} x_{ijk}, \\ \gamma &= h_p^{(r)}, r = \overline{1, \rho}; p \in P^{(r)}, \end{aligned} \quad (4)$$

де $\delta_p^{(r)}$ – фактичне відхилення поточного значення характеристики z_p від еталонного рівня, викликане виникненням r -ї типової комбінації несправностей.

Вектор значень незалежних булевих змінних $(x_{ijk} \mid i = \overline{1, m}; j \in J_i; k \in K_{ij})$, що задовольняє систему нелінійних комбінаторних рівнянь (4), визначає комбінацію несправностей в об'єкті діагностування, які привели його до аномального стану. Проте, в деяких випадках рішення даної системи може виявитися таким, що не відповідає дійсності, з причин, які сформульовані у вигляді наступних тверджень.

Твердження 1. Необхідно враховувати той факт, що зміна значення кожної характеристики стану ОД в загальному випадку може бути викликана різними факторами, що неминуче призводить до виникнення «накладання» наслідків можливих комбінацій одночасних несправностей:

$$\begin{aligned} D(z_p, h_p^{(r_1)}) \& D(z_p, h_p^{(r_2)}) \rightarrow D(z_p, h_p^{(r_1)} + h_p^{(r_2)}), \\ p &= \overline{1, u}; r_1, r_2 \in R(p); r_1 \neq r_2, \end{aligned}$$

де $R(p)$ – множина ймовірних комбінацій несправностей, що приводять до зміни значення характеристики z_p стану ОД:

$$R(p) = \{r : (1 \leq r \leq \rho) \& (p \in P^{(r)})\}; p = \overline{1, u}.$$

У технічних системах з багаторівневою структурою і численними функціональними залежностями буває важко (а іноді й неможливо) визначити експертним шляхом величину зміни значення тієї чи іншої характеристики стану ОД, викликаного окремою типовою комбінацією несправностей.

Твердження 2. Для врахування «накладання» наслідків множини факторів аномального стану ОД систему рівнянь (4) слід представити у інтегративній формі,

яка не вимагає співставлення величин зміни значень контрольованих параметрів до типових комбінацій несправностей:

$$\sum_{r \in R(p)} \pi_{ijk}^{(r)}(\gamma) = \delta_p \quad (5)$$

$$\gamma = h_p^{(r)}, \quad p = \overline{1, u}.$$

Твердження 3. Необхідність обліку похибок різного роду при оцінюванні значень характеристик стану ОД обумовлює зображення комбінаторної моделі (5), у вигляді системи нелінійних нерівностей:

$$\sum_{r \in R(p)} \pi_{ijk}^{(r)}(\gamma) \leq \delta_p^{(w)}, \quad (6)$$

$$\gamma = a_{rp}^{(\omega)} x_{ijk},$$

де $p = \overline{1, u}$; $\omega \in \{1, 2\}$, $a_{rp}^{(1)} = h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)}$; $a_{rp}^{(2)} = -h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)}$; $\delta_p^{(1)} = \delta_p$; $\delta_p^{(2)} = -\delta_p$; $\xi_p^{(r)}$ – допустиме розузгодження між фактичним та передбаченим логічною моделлю (2) відхиленням значення характеристики z_p , яке викликане виникненням r -ї комбінації несправностей.

Величини $\xi_p^{(r)}$, $p = \overline{1, u}$, $R(p)$ задаються експертами та відображають вимоги до ступеня адекватності моделі (2) функціональним залежностям у реальному об'єкті діагностування.

Зроблені перетворення дозволяють звести завдання визначення комбінацій несправностей у складному об'єкті діагностування на основі логічної моделі (2) до знаходження бівалентного вектора значень змінних $(x_{ijk} \mid i = \overline{1, m}; j \in J_i; k \in K_{ij})$, що задовольняє систему нерівностей (6).

Зміст шуканих змінних інтерпретують наступним чином: якщо в результаті розв'язання системи (6) деяка змінна $x_{i^* j^* k^*}$ ($1 \leq i^* \leq m$, $j^* \in J_{i^*}$, $k^* \in K_{i^* j^*}$) приймає значення 1, це означає, що в j^* -й підсистемі i^* -го рівня ОД відбулась несправність k^* -го виду; при $x_{i^* j^* k^*} = 0$ дане твердження є невірним. Сукупність змінних, які треба знайти, що прийняли значення 1, визначає місце виникнення (рівні ОД, підсистеми) та види великої кількості несправностей, що виникли (одночасно, послідовно чи послідовно-паралельно) у об'єкті, який досліджується, на момент його діагностування.

Метод трансформації моделі (3) до комбінаторної форми представлено на рисунку 2.

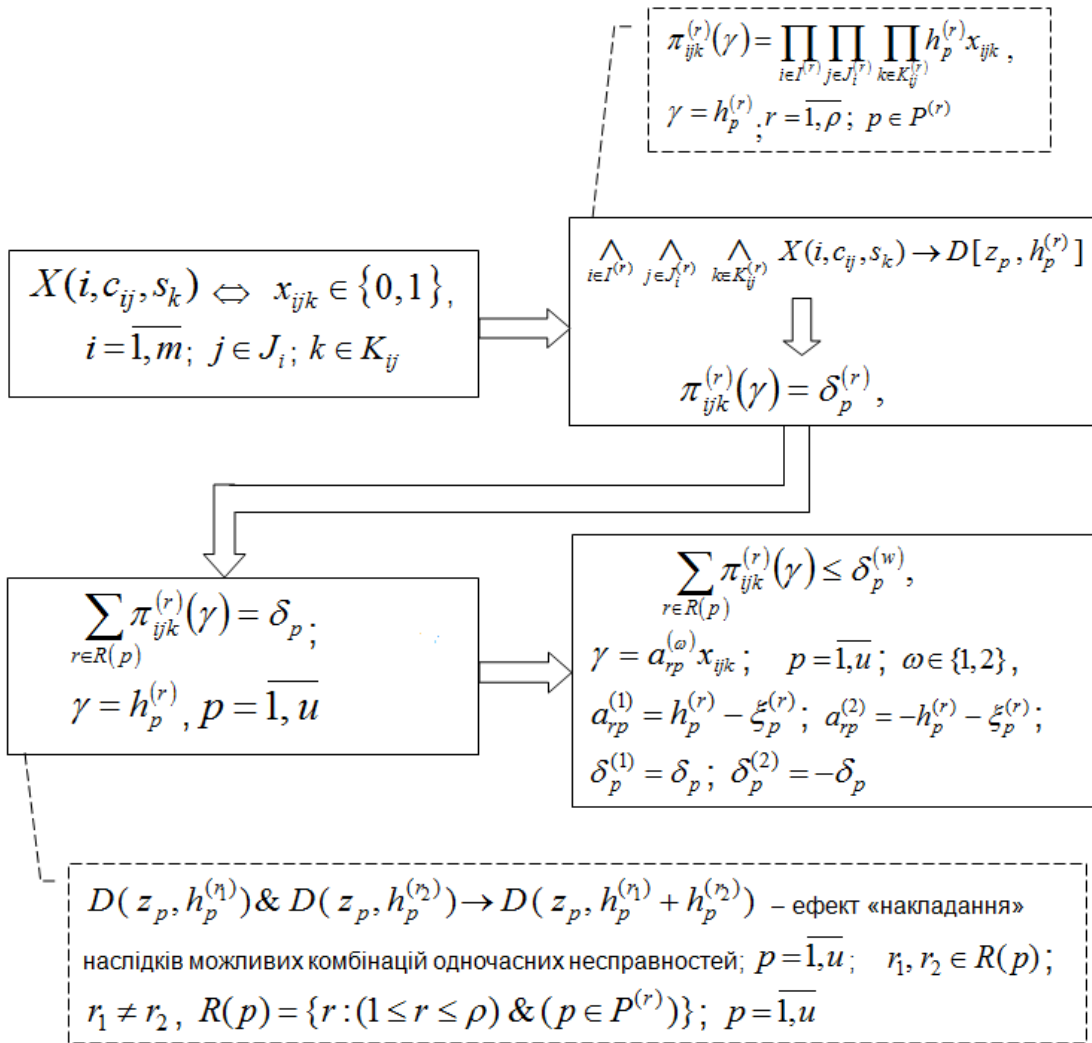


Рисунок 2 – Трансформація логічної моделі до комбінаторної форми

Система нерівностей (6) має нелінійну структуру та носить комбінаторний характер. Бівалентність шуканих змінних, що входять до цієї системи, надає можливості використовувати для її розв'язання модифіковані алгоритми послідовного аналізу і відсіювання варіантів, адаптовані під структуру вказаної комбінаторної моделі.

Запропонований метод дозволяє ідентифікувати комбінації прихованих несправностей, що виникають у багаторівневому об'єкті діагностування, з урахуванням ефекту накладання наслідків впливу кожної з них на значення характеристик стану об'єкта. У основу методу покладено логічну модель, яка відображає причинно-наслідкові залежності між типовими комбінаціями несправностей та змінами значень контрольованих параметрів досліджуваного об'єкта, які їм відповідають.

Сфера застосування методу, який розглядається, обмежена двома умовами: можливістю апріорного встановлення сукупності типових комбінацій несправностей, та можливістю визначення для кожної з них підмножини контрольованих параметрів, що змінюють свої значення під впливом тієї чи іншої комбінації, з зазначенням величини цих змін. У випадку невиконання однієї з

названих умов для розв'язання задачі діагностування складних об'єктів використовуються спрощені логічні моделі.

У третьому розділі описано метод перетворення комбінаторних моделей до канонічного виду, наведені алгоритми ідентифікації комбінацій несправностей у багаторівневих технічних об'єктах.

Система нелінійних нерівностей з булевими змінними представлена у наступному загальному вигляді, який можна вважати канонічним для подібних завдань:

$$g_j(x) \leq b_j; j = \overline{1, n}, \quad (7)$$

де x – m -вимірний вектор незалежних булевих змінних: $x = (x_i | i = \overline{1, m})$; $x_i \in \{0, 1\}$;
 $g_j(x)$ – функція незалежних змінних, яка має нелінійну структуру:

$$g_j(x) = \sum_{r \in R_j} a_{jr} \varphi_r(x); j = \overline{1, n},$$

$\varphi_r(x)$ – добуток незалежних змінних (x -добуток):

$$\varphi_r(x) = \prod_{i \in I_r} x_i; r = \overline{1, q},$$

R_j – множина номерів x -добутків, що входять до j -ї нерівності; $j = \overline{1, n}$;

I_r – множина номерів незалежних змінних, що утворюють r -й x -добуток; $r = \overline{1, q}$;

a_{jr}, b_j – дійсні числа; $j = \overline{1, n}$; $r \in R_j$.

Необхідно визначити вектор значень бівалентних змінних $x = (x_i | i = \overline{1, m})$, що задовольняє систему нерівностей (7).

Метод перетворення нелінійної комбінаторної моделі задачі діагностування (6) до канонічного виду (7) передбачає нумерацію шуканих змінних $x_{i'j'k}$, $i' = \overline{1, m'}$, $j' \in J_{i'}$, $k \in K_{i'j'}$ та всіх обмежень системи (6) числами натурального ряду; формування множин x -добутків, що входять до системи нерівностей (6); визначення сукупності підмножин номерів незалежних змінних, що утворюють x -добутки, та інше.

Отримані результати розв'язання системи (7) можуть бути інтерпретовані наступним чином. Якщо деяка змінна x_i ; $1 \leq i \leq m$ в результаті реалізації алгоритму послідовного аналізу і відсіювання варіантів приймає значення 1, тоді таке ж значення надається і змінній $x_{i'j'k}$, $1 \leq i' \leq m'$, $j' \in J_{i'}$, $k \in K_{i'j'}$, трійка індексів якої (i', j', k) відповідає номеру (i) змінної x_i ; $1 \leq i \leq m$: $[i \leftrightarrow (i', j', k)] \& (x_i = 1) \rightarrow (x_{i'j'k} = 1)$.

В протилежному випадку: $[i \leftrightarrow (i', j', k)] \& (x_i = 0) \rightarrow (x_{i'j'k} = 0)$.

Сформований таким чином вектор значень незалежних змінних $x = (x_{i'j'k} \mid i' = \overline{1, m'}; j' \in J_{i'}; k \in K_{i'j'})$ вказує рівні ОД, підсистеми та види множини несправностей, які виникли на момент розв'язання задачі діагностування.

Метод трансформації комбінаторної моделі до канонічного виду представлено на рисунку 3.

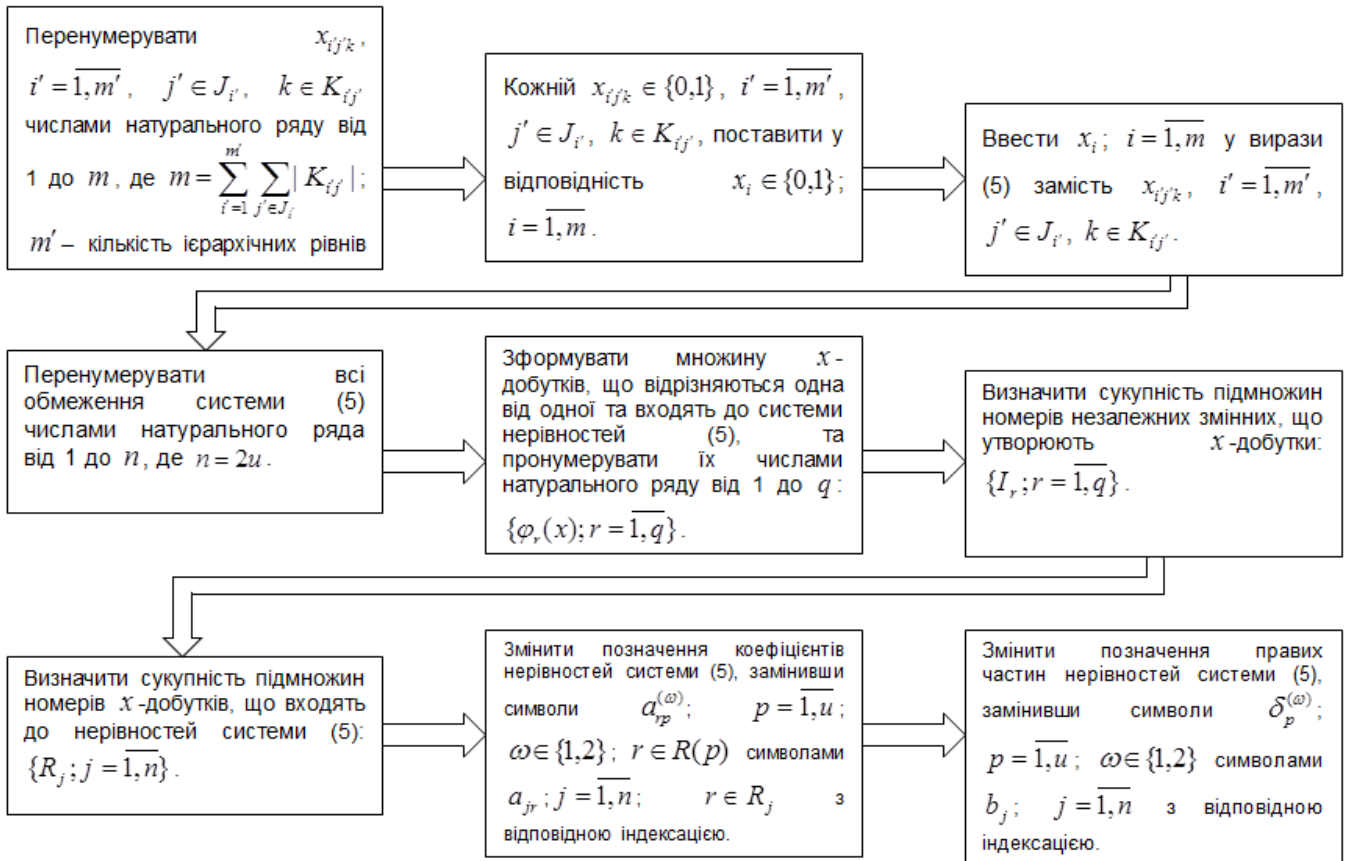


Рисунок 3 – Трансформація комбінаторної моделі до канонічного виду

З метою розв'язання подібних задач традиційно використовуються різні евристичні алгоритми. Відомо, що такі алгоритми мають ряд істотних недоліків, що обмежують їх практичне застосування. До них відносять, насамперед, слабку цілеспрямованість дії і відсутність властивості повноти. Результатом цього є не виправдано високі витрати машинного часу, а також виникнення ситуацій, коли розв'язок задачі не вдається знайти, хоча він об'єктивно існує.

Прагнення поставити процес розв'язання систем нелінійних нерівностей з булевими змінними на строгу математичну основу зумовило розробку нового методу, що реалізує стратегію послідовного аналізу і відсіювання варіантів.

Метод полягає у послідовному аналізі вихідної множини варіантів, що продукується до тих пір, поки не буде встановлено оптимального плану чи факту несумісності системи нерівностей. Підмножини варіантів, що виділяються, підлягають формальному аналізу, метою якого є скорочення кількості кроків алгоритму та тривалості процесу розв'язання задачі.

У четвертому розділі запропоновано інформаційну технологію діагностування багаторівневих технічних систем, інваріантну щодо їх фізичної природи, структури та технічних параметрів, яка здатна ідентифікувати комбінації несправностей в умовах накладання наслідків впливу кожної з них на значення характеристик стану (контрольованих параметрів) системи.

Компоненти інформаційної технології діагностування багаторівневих технічних систем (технічних об'єктів з багаторівневою структурою – ТОБС) показано на рисунку 4.

На основі запропонованих логічних моделей подання діагностичної інформації створено інформаційну технологію, що містить комплекс методів, алгоритмів і програм, які надають можливість розв'язувати задачі діагностування складних технічних систем на новому якісному рівні, що дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень в умовах накладання наслідків кожної окремої несправності, яка обумовлена додаванням змін контрольованих параметрів об'єкту діагностування від сукупності одночасних несправностей.



Рисунок 4 – Компоненти інформаційної технології діагностування ТОБС

Функціональні рівні інформаційної технології (ІТ) діагностування технічних об'єктів з багаторівневою структурою представлено на рисунку 5.

Логічний рівень ІТ включає процеси конкретизації мети діагностування; формування бази знань; формування інформаційного забезпечення.

Рівень прийняття рішень ІТ включає методи перетворення вхідної інформації та виведення рішень; аналіз результатів.

Інформаційну технологію діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою реалізовано у вигляді експертної системи (ЕСДТОБС).

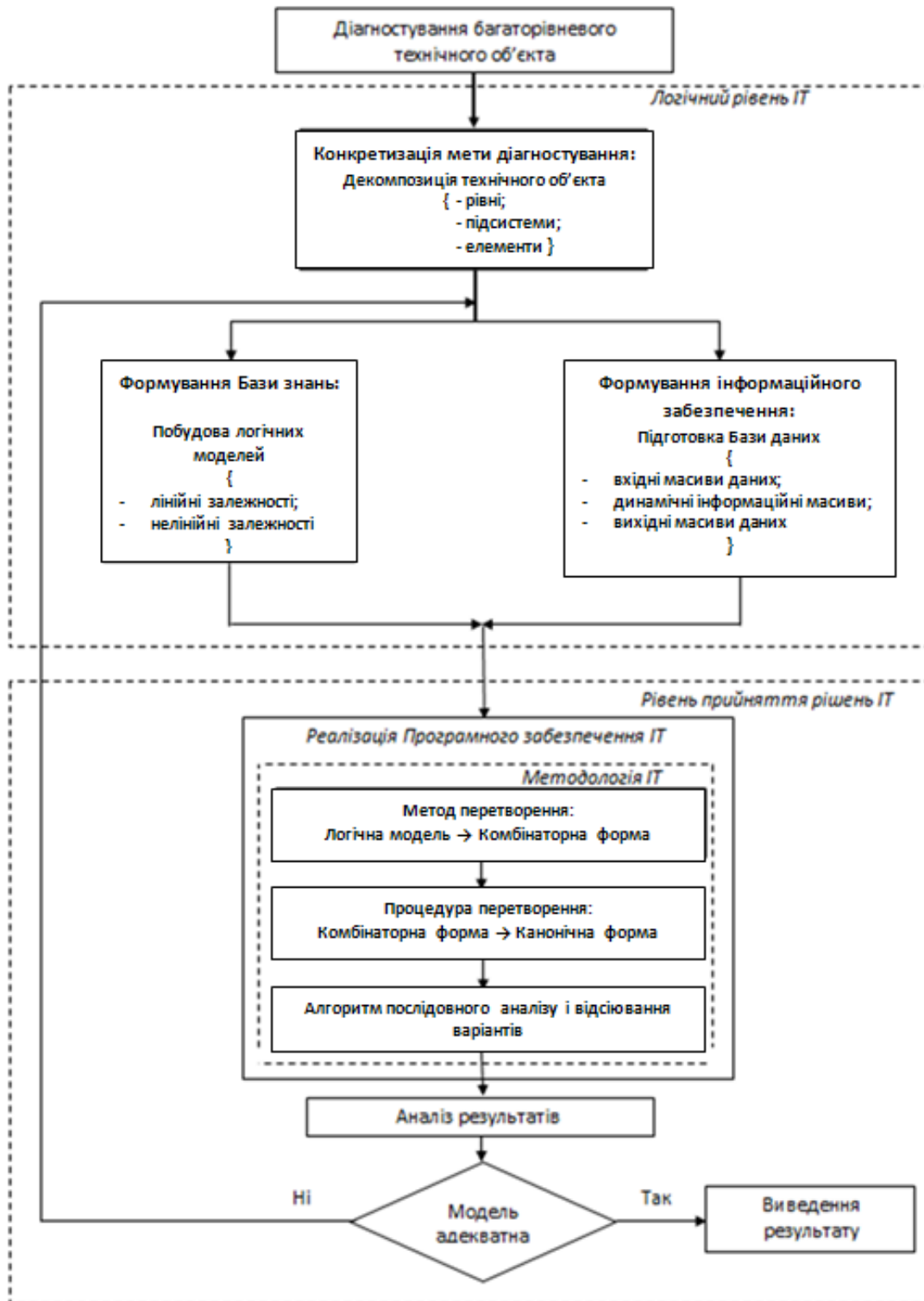


Рисунок 5 – Функціональні рівні інформаційної технології діагностування ТОБС

Експертна система реалізує інформаційну технологію подання та опрацювання діагностичних знань і даних на основі логічних моделей, що стали основою для програмного забезпечення ЕСДТОБС і забезпечили підвищення достовірності процесу діагностування. Розроблено структурну схему експертної системи діагностування ТОБС, побудованої на основі логічних моделей діагностування, яка відрізняється від відомих наявністю модулів аналізу та

організації інформації, що забезпечують реалізацію запропонованого подання діагностичної інформації та методу опрацювання діагностичної інформації.

Представлена експертна система дозволяє визначати місце виникнення і вид прихованих несправностей та їх комбінацій, що викликають зміну контрольованих параметрів системи. Програмне забезпечення, яке реалізує цю функцію, використовує логічні моделі та алгоритми інструментарію для створення експертної системи діагностування стану ТОВС.

Отримані попередні результати досліджень і розробок говорять про велику практичну значимість таких систем, що, без сумніву, є суттєвим стимулом для подальшого вдосконалення, розширення можливостей та підвищення зручності користування даним програмним продуктом. Розроблена експертна система під час тестових іспитів знаходила вірний розв'язок для всіх тестових завдань. Перевірялась також робота програмного забезпечення по корегуванню бази знань. Таким чином, на підставі результатів тестування можливо зробити висновок про ефективну роботу прикладної експертної системи.

П'ятий розділ містить результати експериментального дослідження запропонованого методу визначення комбінацій прихованих несправностей. Для впровадження результатів роботи обрано газотранспортну галузь. Відповідно побудовані експериментальні моделі діагностування газотранспортної системи (ГТС) України в цілому та її складових частин на всіх рівнях (на прикладі компресорної станції (КС), газоперекачувального апарату (ГПА), системи змащувального мастила).

Проведено натурний експеримент для побудови логічних моделей діагностування газотранспортної системи. При цьому виявлено залежність зміни значень характеристик стану елементів системи від комбінацій несправностей, що відбулись в системі на момент діагностування.

Проведено дослідження структури ГТС, визначено рівні цієї системи, визначено підсистеми на кожному з рівнів ГТС та їх елементи.

Важливою системою компресорної станції є газоперекачувальні агрегати, тому основний напрям в контролі і діагностиці на КС здійснюється по ГПА.

Визначені наступні підсистеми ГПА: двигун ($c_{3,1}$); система управління, сигналізації і захисту ($c_{3,2}$); система електропостачання агрегату ($c_{3,3}$); система пожежогасінні вуглекислим газом ($c_{3,4}$); система змащувального мастила ($c_{3,5}$); система гідравлічного масла ($c_{3,6}$); система ущільнювача мастила ($c_{3,7}$); система подачі рідини, що охолоджує ($c_{3,8}$); система повітря, що охолоджує і ущільнює ($c_{3,9}$); система пускового газу ($c_{3,10}$); система паливного газу ($c_{3,11}$); система антиобмороження ($c_{3,12}$); система очищення циклового повітря ГТУ ($c_{3,13}$); система технологічних кранів нагнітача ($c_{3,14}$); нагнітач ($c_{3,15}$); система пожежогасіння ГПА «Галон» ($c_{3,16}$).

Експертним шляхом визначені наступні контрольовані параметри (характеристики стану) ГПА: температура на виході ГПА $Z_{3,1}$; навантаження ГПА

$z_{3,2}$; температура змащувального мастила до підшипників $z_{3,3}$; температура змащувального мастила на сливі з підшипника $z_{3,4}$; вібрація нагнітача $z_{3,5}$; тиск газу на вході нагнітача $z_{3,6}$; тиск газу на виході нагнітача $z_{3,7}$; вібрація двигуна $z_{3,8}$; тиск змащувального мастила в колекторі $z_{3,9}$; тиск мастила ущільнювача $z_{3,10}$; перепад мастило/газ $z_{3,11}$; тиск паливного газу $z_{3,12}$; температура паливного газу $z_{3,13}$; тиск масла управління $z_{3,14}$; температура зовнішнього середовища $z_{3,15}$.

Для укрупнення схеми взаємозв'язків підсистем різних рівнів газотранспортної системи розглянемо відносно ГПА наступні види несправностей: механічне пошкодження $s_{3,1}$; негерметичність $s_{3,2}$; зміна атмосферних умов $s_{3,3}$; збій електропостачання $s_{3,4}$.

Нижче наведено фрагмент логічної моделі діагностування відносно ГПА за наслідками зміни характеристик стану з причини певної сукупності комбінацій несправностей (зміну значень характеристик стану позначено символами):

$$\begin{aligned} & X(3, c_{3,5}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,6}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,1}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,4}, s_{3,1}) \vee \\ & \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,11}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,13}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,15}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,16}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,14}, \downarrow), \\ & X(3, c_{3,1}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,15}, \uparrow), \\ & X(3, c_{3,5}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,14}, \downarrow) \wedge D(z_{3,4}, \uparrow) \wedge D(z_{3,9}, \downarrow) \wedge D(z_{3,10}, \downarrow) \wedge D(z_{3,11}, \downarrow \uparrow) \wedge D(z_{3,12}, \downarrow \uparrow). \end{aligned}$$

Останній вираз показує, що несправності системи змащувального масла ГПА веде до зміни значень відразу шести описаних характеристик стану ГПА. Розглянемо детальніше систему змащувального мастила. Це підсистема 3-го рівня ГТС, отже, її підсистеми є підсистемами 4-го рівня ГТС.

Система змащувального мастила (СЗМ) ($c_{3,5}$) складається з наступних підсистем: головний масляний насос ($c_{4,1}$); допоміжний масляний насос ($c_{4,2}$); аварійний мастильний насос ($c_{4,3}$); головні повнопотокові фільтри змащувального мастила ($c_{4,4}$)-($c_{4,5}$); перемикальний клапан між головними повнопотоковими фільтрами змащувального мастила ($c_{4,6}$); регулююча арматура ($c_{4,7}$); запобіжна арматура ($c_{4,8}$); замочна арматура ($c_{4,9}$); контрольно-вимірювальні прилади ($c_{4,10}$); мастилоохолоджувачі ($c_{4,11}$); система мастилопроводів ($c_{4,12}$); маслобак ($c_{4,13}$); електродвигуни насосів ($c_{4,14}$); підігрівач мастила ($c_{4,15}$); підшипники ($c_{4,16}$)-($c_{4,19}$).

До характеристик стану СЗМ експерти відносять: об'єм масла $z_{4,1}$; тиск на виході насосів $z_{4,2}$; перепад тиску на фільтрах $z_{4,3}$; тиск мастила в колекторі підшипника $z_{4,4}$; температура мастила на подачі в підшипнику $z_{4,5}$; температура

мастила на сливі з кожного підшипника $z_{4,6}$ - $z_{4,9}$; температура мастила в мастилобаку $z_{4,10}$.

В системі змащувального мастила експертами вказані наступні несправності: механічне пошкодження $s_{4,1}$; засмічення $s_{4,2}$; збій первинного перетворювача (несправність датчика) $s_{4,3}$; збій електропостачання $s_{4,4}$; витік $s_{4,5}$; зміна рівня $s_{4,6}$; зміна атмосферних умов $s_{4,7}$; негерметичність $s_{4,8}$.

Нижче наведено фрагмент експериментальної моделі діагностування системи змащувального мастила ГПА КС ГТС:

$$\begin{aligned}
 & X(4, c_{4,7}, s_{4,1}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \rightarrow D(z_{4,2}, \uparrow) \wedge D(z_{4,4}, \uparrow), \\
 & X(4, c_{4,19}, s_{4,1}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,4}) \rightarrow D(z_{4,6}, \uparrow), \\
 & X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,3}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \vee X(4, c_{4,16}, s_{4,1}) \vee \\
 & \vee X(4, c_{4,17}, s_{4,1}) \vee X(4, c_{4,18}, s_{4,1}) \vee X(4, c_{4,19}, s_{4,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,4}) \rightarrow D(z_{4,10}, \uparrow), \\
 & X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \rightarrow D(z_{4,10}, \downarrow).
 \end{aligned}$$

Отримана експериментальним шляхом логічна модель демонструє взаємозв'язок підсистем різних рівнів складної технічної системи, а також вплив комбінацій несправностей на зміни значень контрольованих характеристик системи.

Розроблене програмне забезпечення експертної системи діагностування ТОБС на основі побудови логічних моделей діагностування дало змогу апробувати результати досліджень та впровадити їх в підрозділах підприємств, що займаються експлуатацією та ремонтом ТОБС.

В даному дослідженні проведено ряд експериментів, в ході яких визначено причини вимушених остановів ГПА на компресорній станції. На рисунку 6 відображено зміну кількості несправностей впродовж звітного періоду.

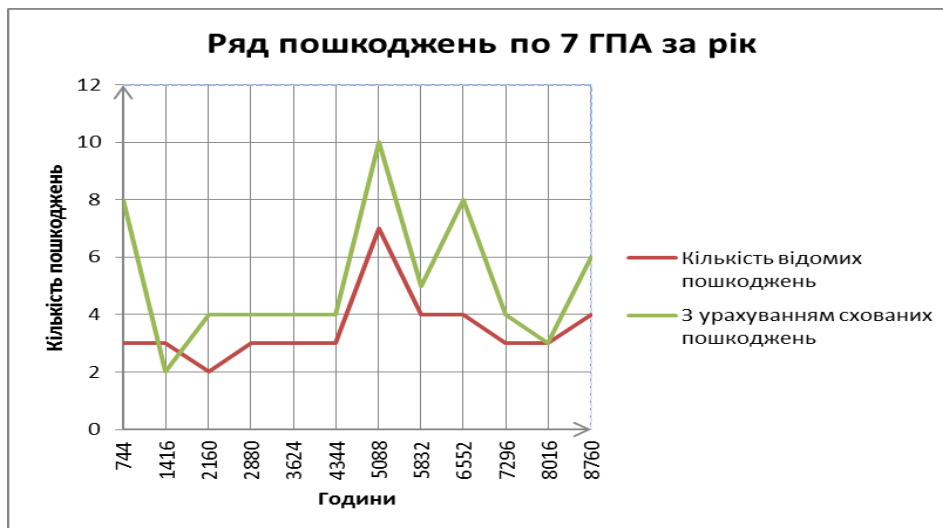


Рисунок 6 – Зміна кількості несправностей

Було опрацьовано статистику по 1 компресорній станції, що містить 7 ГПА: 5 – в роботі, 1 – в резерві, 1 – в ремонті. Відповідно до побудованої моделі в ході експерименту виявлено несправності, які зафіксовано у статистичних даних, а також деякі несправності, які були сховані через накладання їх наслідків.

На рисунку 7 показано виявлені несправності в розрізі планових ремонтів і вимушених остановів ГПА за звітний період.

Результати експерименту показано в розрізі по кожному з семи ГПА, звітний період – 1 рік.

Виявлені пошкодження: ■ відомі; ■ сховані; ■ сховані, які надалі відомі; ■ не критичне пошкодження.

Місяць		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
ГПА 1	Відомі												
	Сховані												
ГПА 2	Відомі												
	Сховані												
ГПА 3	Відомі												
	Сховані												
ГПА 4	Відомі												
	Сховані												
ГПА 5	Відомі												
	Сховані												
ГПА 6	Відомі												
	Сховані												
ГПА 7	Відомі												
	Сховані												

Рисунок 7– Виявлені несправності при планових ремонтах та вимушених остановах ГПА

Жовтим кольором виділено несправності, які відомі у статистичних даних.

Коричневим кольором виділено несправності, які визначені за допомогою побудованої технології ідентифікації комбінацій прихованих несправностей.

Фіолетовим кольором виділено несправності, які при попередньому діагностуванні виявлені за допомогою нової технології, а при розгляді статистичних даних виявлені тільки впродовж наступного ремонту.

Зеленим кольором виділено несправності, які не є критичними (не призвели для конкретного випадку вимушеного останова ГПА).

Червоним контуром виділено вимушений останов ГПА.

Аналіз отриманих практичних даних показав, що логічні моделі, які побудовані в даному дослідженні є адекватними, оскільки розгалуження при отриманні даних входить в область адекватності даних моделей, яка задана

експертами. В ході дослідження виявлено можливість зменшення вимушених простоїв технічних систем, завдяки виявленню несправностей, що викликають накладання їх наслідків на зміни контрольованих параметрів об'єкту діагностування.

Результати експериментальних досліджень в газотранспортній галузі з використанням розробленого програмного забезпечення підтверджують вірність наукових положень запропонованої інформаційної технології, оскільки її впровадження надало можливість виявити несправності, які раніше неможливо було ідентифікувати через накладання їх наслідків, що на 9% підвищило достовірність процесу діагностування та на 12% підвищило термін міжаварійного ремонту об'єктів діагностики, а саме компонентів газотранспортної системи, знизило витрати на ліквідацію наслідків несправностей у складних технічних системах.

ВИСНОВКИ

У дисертаційній роботі вирішено актуальну науково-прикладну проблему створення наукових основ побудови моделей, методів та інформаційної технології діагностування складних технічних систем з багаторівневою структурою, які дозволили визначати комбінації прихованих несправностей з урахуванням накладання їх наслідків на зміни контрольованих параметрів об'єкту діагностування.

Основні наукові та практичні результати роботи полягають у наступному:

1. Виконано аналіз проблем діагностування складних технічних систем з багаторівневою структурою і, зокрема, процесу ідентифікації комбінацій несправностей на всіх рівнях складної системи. Доведено, що при цих умовах виникає накладення наслідків окремих несправностей при виникненні їх комбінацій, що унеможливує розв'язання задачі діагностування складної системи традиційними методами.

Описано переваги систем експертної діагностики. Показано, що досягнутий рівень автоматизації не задовольняє вимогам, висунутим до такого роду систем. Основною причиною цього є орієнтування розробників на використання традиційних видів архітектури програмного забезпечення, зокрема – на системні засоби, що не містять елементів штучного інтелекту. Показано, що при спробах подальшого вдосконалення систем діагностування доцільно застосовувати модифікований під ситуацію метод послідовного аналізу і відсіювання варіантів, що, у свою чергу, вимагає перетворення логічних моделей діагностування до адекватних комбінаторних форм.

Сформульовано завдання діагностики: виходячи з поточних значень характеристик стану об'єкта діагностики, однозначно визначити рівні, підсистеми та елементи підсистем, в яких виникли несправності, та види виявлених несправностей. Виходячи з поставленого завдання запропоновано розробити інформаційну технологію, що дозволяє ідентифікувати комбінації несправностей у багаторівневому технічному об'єкті діагностування, з урахуванням накладання наслідків впливу кожної з них на значення контрольованих параметрів об'єкта.

2. Запропоновано узагальнену логічну модель діагностування багаторівневих технічних систем, яка на відміну від відомих дозволяє визначати комбінації прихованих несправностей з урахуванням накладання їх наслідків на значення характеристик стану контрольованого об'єкта. Дана модель відображає причинно-наслідкові залежності між типовими комбінаціями несправностей та змінами значень контрольованих параметрів досліджуваного об'єкта, які їм відповідають та покладена в основу запропонованого методу, який дозволяє ідентифікувати комбінації несправностей, що виникають у багаторівневому об'єкті діагностування, з урахуванням накладання наслідків впливу кожної з них на значення характеристик стану об'єкта.

Сфера застосування методу, який розглядається, обмежена двома умовами: можливістю апріорного встановлення сукупності типових комбінацій несправностей, та можливістю визначення для кожної з них підмножини контрольованих параметрів, що змінюють свої значення під впливом тієї чи іншої комбінації, з зазначенням величини цих змін. У випадку невиконання однієї з названих умов для розв'язання задачі діагностування складних об'єктів використовуються окремі форми логічної моделі.

3. Запропоновано метод, що передбачає перетворення логічної моделі до комбінаторних форм, які дозволяють використовувати для ідентифікації комбінацій несправностей ефективні алгоритми послідовного аналізу і відсіювання варіантів, що є альтернативою громіздким традиційним процедурам логічного виводу. Це, у свою чергу, дозволяє звести завдання визначення комбінацій несправностей у складному об'єкті діагностування до формування вектора значень змінних, що задовольняють даним системам нерівностей і умові бівалентності.

4. Доведено, що задача ідентифікації комбінацій несправностей носить комбінаторний характер. Для розв'язання таких задач традиційно використовують різні евристичні алгоритми, які не гарантують знаходження розв'язку задачі в усіх випадках, коли він існує, внаслідок чого мають обмежене практичне використання.

Запропоновано методи розв'язання систем комбінаторних нерівностей лінійної та нелінійної структури з булевими змінними, що реалізують стратегію послідовного аналізу і відсіювання варіантів. Дані системи комбінаторних нерівностей адаптовані до логічних моделей задач діагностування складних технічних об'єктів з багаторівневою структурою. Алгоритми в цих методах мають властивість повноти, обумовлену тим, що жодна з виділених підмножин варіантів не виключається з поля розгляду до моменту встановлення факту несумісності відповідної їй системи нерівностей. Запропоновані методи дозволяють скоротити тривалість розв'язання систем комбінаторних нерівностей за рахунок високого ступеню спрямованості та звуження області пошуку вектора значень булевих змінних, що задовольняє дані системи нерівностей, завдяки формальному аналізу підмножин варіантів.

5. Вперше розроблено інформаційну технологію діагностування багаторівневих технічних систем, інваріантну щодо їх фізичної природи, структури та технічних параметрів, яка здатна ідентифікувати комбінації несправностей в умовах накладання наслідків впливу кожної з них на значення контрольованих параметрів системи.

Інформаційну технологію створено на основі запропонованих логічних моделей подання діагностичної інформації. Технологія містить комплекс методів, алгоритмів і програм, які надають можливість розв'язувати задачі діагностування складних технічних систем на новому якісному рівні, що дозволяє підвищити ефективність прийняття рішень в умовах накладання наслідків кожної окремої несправності, яка обумовлена додаванням змін контрольованих параметрів об'єкту діагностування від сукупності одночасних несправностей.

6. Розроблено експертну систему, що реалізує інформаційну технологію подання та опрацювання діагностичних даних на основі логічних моделей, що стали основою для програмного забезпечення і забезпечили підвищення достовірності результатів процесу діагностування багаторівневого технічного об'єкта.

Розроблена експертна система під час проведення експериментів знаходила вірний розв'язок для всіх тестових завдань. Перевірялась також робота програмного забезпечення по корегуванню бази знань. Таким чином, на підставі результатів тестування можливо зробити висновок про ефективну роботу прикладної експертної системи.

7. Результати дисертаційної роботи впроваджено у газотранспортну галузь. Відповідно побудовані експериментальні моделі діагностування газотранспортної системи України в цілому та її складових частин на всіх рівнях (на прикладі компресорної станції, газоперекачувального апарату, системи змащувального мастила).

Проведено натурний експеримент для побудови логічних моделей діагностування газотранспортної системи. При цьому виявлено залежність зміни значень характеристик стану елементів системи від комбінацій несправностей, що відбулись в системі на момент діагностування.

Результати експериментальних досліджень в газотранспортній галузі з використанням розробленого програмного забезпечення підтверджують вірність наукових положень запропонованих інформаційних технологій, оскільки їх впровадження надало можливість виявити несправності, які раніше неможливо було ідентифікувати через накладання їх наслідків, що на 9% підвищило достовірність процесу діагностування та на 12% підвищило швидкість усунення несправностей об'єктів діагностики, а саме компонентів газотранспортної системи, знизило витрати на ліквідацію наслідків несправностей у складних технічних системах.

В ході дослідження побудовано експериментальну логічну модель двоконтурного турбореактивного двигуна, який є основним конструктивним вузлом ГПА газотранспортної системи. Подібні двоконтурні турбореактивні двигуни також є підсистемою інших складних систем.

Розроблене програмне забезпечення експертної системи діагностування ТОБС на основі побудови логічних моделей діагностування дало змогу апробувати результати досліджень та впровадити їх в підрозділах підприємств, що займаються експлуатацією та ремонтом ТОБС.

Результати наукових досліджень впроваджено у виробничий процес ДП «Завод №410 ЦА» (акт впровадження грудень 2013 р.); УМГ «Черкаситрансгаз»

(акт впровадження лютий 2014 р.); АТ «Укртрансгаз» (акт впровадження березень 2020 р.), а також у науково-дослідну роботу в Національному авіаційному університеті (акт впровадження вересень 2014 р.).

Отримані результати дослідження призначені для використання, в першу чергу, в газотранспортній галузі. Крім того, вони можуть знайти своє застосування в інших галузях, де виникає потреба діагностування багаторівневих технічних систем з комбінаціями прихованих несправностей при накладанні їх наслідків.

СПИСОК ОПУБЛІКОВАНИХ ПРАЦЬ ЗА ТЕМОЮ ДИСЕРТАЦІЇ

1. Н. Марченко, В. Нечипорук, О. Нечипорук, Ю. Пепа, *Методи оцінювання точності інформаційно-вимірвальних систем діагностики. Монографія. Київ: «За друга», 2014, 200 с.*
2. О. Литвиненко, О. Нечипорук, *Логіко-математичні методи діагностування складних систем. Монографія. Київ: «Артмедіа прінт», 2016, 166 с.*
3. О. Нечипорук, В. Антонов, Р. Одарченко та ін., «Багатокритеріальний підхід до визначення доцільності використання технології кабельних мереж», *Електроніка та системи управління*, №3(25), С.89-94, 2010.
4. О. Нечипорук, О. Ткаліч, П. Андрухович та ін., «Аналіз затримок в каналі зв'язку в залежності від його якості», *Проблеми інформатизації та управління*, №3(31), С.142-147, 2010.
5. Е. Нечипорук, В. Потапов, О. Ткаліч и др., «Кодирование речи с комбинированным предсказанием», *Захист інформації*, №4, С.11-16, 2010.
6. О. Нечипорук, Ю. Петрова, Р. Одарченко, «Вибір оптимальної кількості обладнання для побудови бездротових мереж передавання даних», *Вісник інженерної академії України*, №3-4, С.113-117, 2010.
7. О. Нечипорук, О. Ткаліч, О. Ткаліч, «Аналіз перспектив розвитку технології Gigabit Ethernet», *Вісник інженерної академії України*, №3-4, С.164-167, 2010.
8. О. Нечипорук, Р. Одарченко, С. Паук та ін., «Особливості обслуговування трафіка у мережах авіаційного електрозв'язку», *Вісник ДУІКТ*, Т.9, №1, С. 22-27, 2011.
9. N. Marchenko, O. Nechyporuk, «Spectral-time models to increase the accuracy evaluation of harmonic wave fetch amplitude and frequency with influencing interferences in electric and magnetic measuring tasks», *The Advanced Science Open Access Journal*, № 3, pp.70-74, 2012.
10. Marchenko, O. Nechyporuk, «Simulation of nonstationary energetic random processes with the use of stochastic linear processes», *The Advanced Science Open Access Journal*, № 6, pp.64-70, 2012.
11. Marchenko, O. Nechyporuk, «Digital orthogonal filtration of spatiotemporal signals in multichannel correlation systems», *The Advanced Science Open Access Journal*, № 5, pp.115-119, 2012.
12. Е. Нечипорук, Н. Марченко, «Причины возникновения и классификация отказов в технических системах», *Сучасний захист інформації*, №4, С.84-87, 2012.

13. Y. Tereschenko, I. Lastivka, O. Nechyporuk et al, «Gas-dynamic influence on aerodynamic trails behind the gas-turbine engine stator elements», *The Advanced Science Open Access Journal*, № 3, pp.71-77, 2013.

14. Н. Марченко, О. Нечипорук, «Особенности реализации швидких вікон і аналіз похибок, що виникають при їх застосуванні», *Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку*, №1(25), С.62-69, 2013.

15. О. Нечипорук, «Недоліки сучасних технологій діагностування складних систем і завдання їх усунення», *Математичне моделювання*, Вип. 1(28), С. 10-13, 2013.

16. Е. Нечипорук, «Особенности построения обобщенной логической модели диагностирования сложных систем», *Проблеми інформатизації і управління*, Вип. 1(41), С. 65-68, 2013.

17. Y. Tereschenko, I. Lastivka, O. Nechyporuk et al, «Effect of hysteresis on efficiency of compressor cascades during streamlining by unsteady flows», *Science-based technologies*, №2 (18), pp. 133-139, 2013.

18. Нечипорук О.П., Нечипорук В.В., Гончарук В.В. «Розробка математичних моделей характеристики технічного стану вузлів електроенергетичного обладнання», *Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку*, №3(27), С. 69-74, 2013.

19. А. Литвиненко, Е. Нечипорук, «Метод диагностирования сложных объектов с множественными отказами», *«Black sea» scientific journal of academic research*, Vol. 8, Iss. 1, pp. 58-62, 2014.

20. О. Нечипорук, Н. Марченко, «Діагностика віброакустичних сигналів електричних машин», *«Black sea» scientific journal of academic research*, Vol.11, Iss. 4, pp.72-77, 2014.

21. А. Литвиненко, Е. Нечипорук, «Метод диагностирования сложных объектов с многоуровневой структурой», *«Black sea» scientific journal of academic research*, Vol. 12, Iss. 5, pp. 36-43, 2014.

22. О. Нечипорук, Н. Марченко, «Дослідження, класифікація та діагностування станів об'єктів складних систем за віброакустичними сигналами», *«Black sea» scientific journal of academic research*, Vol. 13, Iss. 6, pp. 36-41, 2014.

23. Н. Марченко, О. Нечипорук, В. Нечипорук, «Алгоритм мінімізації методичної похибки оцінки частоти сигналу по максимуму спектра», *Восточно-европейский журнал передовых технологий*, №3/9(69), С. 57-60, 2014.

24. Н. Марченко, О. Нечипорук, А. Вахіль та ін., «Методи обробки вібродіагностичної інформації та побудова на їх основі систем оперативної діагностики електротехнічного обладнання», *«The Caucasus» integration journal*, №3, pp. 25-29, 2014.

25. О. Nechyporuk, «Adjustment of the generalized logical model of compound systems diagnosing according to the situation», *The Advanced Science Journal*, № 2, pp.20-23., 2014.

26. Н. Марченко, Е. Нечипорук, «Адаптивные весовые функции для спектрального анализа непрерывных сигналов и оптимизация параметров весовых функций», *Уральский научный вестник*. №42(121), С. 88-93, 2014.

27. Е. Нечипорук, А. Попов, «Экспериментальная логико-лингвистическая модель диагностирования сложных систем», *Авиационно-космическая техника и технология*, №10/117, С. 154-158, 2014.

28. О. Нечипорук, В. Нечипорук, Н. Голего, «Інформаційне забезпечення технологій діагностування технічних об'єктів з багаторівневою структурою», *Міжнародний науковий журнал «Інтернаука»*, №4(66), Том 1, С. 71-76, 2019.

29. О. Nechyporuk, V. Nechyporuk, I.-F. Kashkevich et al, «Identification of combinations of faults in multilevel information systems», *The perspective technologies and methods in MEMS Design (MEMSTECH): 2020 IEEE XVI International conference*, Lviv, 2020, С. 76-81.

30. О. Nechyporuk, S. Gnatyuk, V. Sydorenko et al, «Studies on the disasters criticality assessment in aviation information infrastructure», *The 1st International Workshop on Computational & Information Technologies for Risk-Informed Systems (CITRisk 2020) co-located with XX International scientific and technical conference on Information Technologies in Education and Management (ITEM 2020)*, Kherson, 2020, pp. 282-296.

31. Е. Нечипорук, «Методы формализации сложных технических систем диагностирования», *Ключевые вопросы в современной науке: VII Междунар. науч.-практ. конф.*, София, Болгария, 2011, Т. 37, С. 3-6.

32. Е. Нечипорук, «Проблемы диагностирования сложных технических систем», *Новости научной мысли: VII Междунар. науч.-практ. конф.*, Прага, Чешская Республика, 2011, Т. 21, С. 51-53.

33. О. Nechyporuk, О. Tkalich, О. Zharova et al, «Maintenance of quality of service in the communication network of the following generation», *Aviation in the XXI-st century. Safety in Aviation and Space Technologies: the fourth world congress*, Kyiv, Ukraine, 2010, Vol. 1, pp. 21.68-21.71.

34. О. Нечипорук, О. Ткаліч, «Передача конфіденційних даних через GSM або WI-FI мережі на основі смарт-карт», *Проблеми навігації і управління рухом: Всеук. наук.-практ. конф.*, Київ, 2010, С.117.

35. Е. Нечипорук, «Критерии отказов в сложных технических системах», *Реформування та розвиток науки: сучасні виклики: Міжнар. конф.*, Київ, 2013, Ч. IV, С.33-35.

36. О. Нечипорук, О. Потороча, О. Попов, «Аналіз ефективності використання в експлуатації діагностичних моделей ГТД за параметрами робочого процесу», *ІРТК-2011: IV Міжнар. наук.-практ. конф.*, Київ, 2011, С. 332-334.

37. N. Marchenko, О. Nechyporuk, «Spectral-time models of data signals under the action of interferences in the tasks related to electric and magnetic values measuring», *«Aviation in the XXI-st century» Safety in Aviation and Space Technologies: Proceeding the first world congress*, Kyiv, 2012, Vol.1, pp. 1.11.27-1.11.31.

38. О. Нечипорук, О. Семко, М. Наумець та ін., «Перспективи розвитку імітаційної моделі в моделюванні складних систем», *Научное пространство Европы: IX Междунар. науч.-практ. конф.*, Перемышль, Республика Польша, 2013, Т. 32, С. 55-58.

39. О. Нечипорук, А. Вахіль, В. Шукало, «Програмне забезпечення експертної системи діагностування складних об'єктів з багаторівневою структурою»,

Прикладные научные разработки: VII Междунар. науч.-практ. конф., Прага, Чешская Республика, 2014, Т. 17, С. 48-50.

40. О. Нечипорук, А. Вахіль, В. Шукало, «Функціональна структура експертної системи діагностування складних технічних об'єктів з багаторівневою структурою», *Динамика современной науки: Междунар. науч.-практ. конф.*, Софія, Болгария, 2014, Т. 12, С. 3-5.

41. О. Нечипорук, А. Вахіль, В. Шукало, «Інформаційний пристрій керування віддаленою складною системою», *Prospects of world science: X international research and practice conference*, Sheffield, Great Britain, 2014, Vol. 9, pp. 34-36.

42. О. Нечипорук, Б. Масловський, «Функціональні завдання при моделюванні складних систем», *Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу: Міжнар. наук.-техн. конф.*, Київ, 2014. – С. 35.

43. Н. Марченко, О. Нечипорук, «Діагностика віброакустических сигналов электрических машин», *Современная наука: проблемы, прогнозы и решения: междунар. науч.-практ. конф.*, Тбілісі, Грузія, 2014, С. 72-77.

44. О. Нечипорук, П. Смоляров, «Универсальный модуль голосового управления системами», *Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу: Міжнар. наук.-техн. конф.*, Київ, 2015, С.16.

45. О. Нечипорук, В. Лейких, В. Сігаєв, «Проектування експертних систем діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою», *Динамика современной науки: Междунар. науч.-практ. конф.*, Софія, Болгария, 2015, Т. 5, С. 34-35.

46. О. Нечипорук, В. Лейких, В. Сігаєв, «Методи прийняття рішень в експертних системах», *Прикладные научные разработки: Междунар. науч.-практ. конф.*, Прага, Чешская Республика, 2015, Т. 5, С. 49-51.

47. О. Нечипорук, Н. Тисько, В. Лейких, та ін., «Побудова бази знань експертних систем діагностування багаторівневих технічних об'єктів», *Prospects of world science: XI international research and practice conference*, Sheffield, Great Britain, 2015, Vol. 9, pp. 46-48.

48. О. Нечипорук, Н. Тисько, В. Лейких, та ін., «Розробка бази даних експертної системи діагностування багаторівневих технічних об'єктів», *Наука: теория и практика: XI Междунар. науч.-практ. конф.*, Перемишль, Республика Польша, 2015, Т. 7, С. 31-33.

49. О. Нечипорук, О. Поночовний, «Компоненти системи моніторингу статистичних даних веб-сторінок», *Наука: теория и практика: XII Междунар. науч.-практ. конф.*, Перемишль, Республика Польша, 2016, Т. 3, С. 82-84.

50. О. Нечипорук, «Налаштування експертної моделі діагностування багаторівневого технічного об'єкта», *Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу: Міжнар. наук.-техн. конф.*, Київ, 2017, С.6-8.

АНОТАЦІЯ

Нечипорук О.П. Інформаційна технологія діагностування багаторівневих технічних систем. – Рукопис.

Дисертація на здобуття наукового ступеня доктора технічних наук за спеціальністю 05.13.06 – Інформаційні технології. – Національний авіаційний університет, Київ, 2021.

Метою даного дослідження є розв'язання актуальної науково-прикладної проблеми створення наукових основ побудови моделей, методів та інформаційної технології діагностування складних технічних систем з багаторівневою структурою, які дозволятимуть визначати комбінації прихованих несправностей, що призводять до накладання їх наслідків на різних рівнях.

Виникнення комбінацій окремих несправностей при накладанні їх наслідків унеможливорює розв'язання задачі діагностування багаторівневої технічної системи традиційними методами та надає їй комбінаторний характер.

Створено інформаційну технологію діагностування багаторівневих технічних систем, інваріантну щодо їх фізичної природи, структури та технічних параметрів, яка здатна ідентифікувати комбінації несправностей в умовах накладання наслідків впливу кожної з них на значення характеристик стану об'єкту.

Розроблено узагальнену логічну модель діагностування та її окремі форми, які відображають причинно-наслідкові залежності між типовими комбінаціями несправностей та відповідними їм змінами значень контрольованих параметрів багаторівневого технічного об'єкту. Розроблено метод перетворення логічних моделей до комбінаторних форм, які зводяться до канонічного виду систем нерівностей лінійної та нелінійної структури. Розроблено метод розв'язання систем комбінаторних нерівностей з лінійною та нелінійною структурою, адаптованих до моделей задач діагностування багаторівневих технічних об'єктів. Розроблено інформаційну технологію діагностування багаторівневих технічних об'єктів, яка дозволяє ідентифікувати комбінації несправностей з урахуванням наслідків впливу кожної з них на значення контрольованих параметрів об'єкта.

Розроблено експертну систему діагностування технічних об'єктів з багаторівневою структурою, здатну ідентифікувати комбінації несправностей, які виникають на момент діагностування, враховуючи накладання наслідків впливу кожної з них на значення контрольованих параметрів об'єкта. Реалізовано інформаційну технологію діагностування складних технічних систем з багаторівневою структурою у вигляді програмного забезпечення та впроваджено її у виробництво. Інформаційна технологія, що містить комплекс методів, алгоритмів і програм, надає можливість розв'язувати задачі діагностування складних технічних систем на новому якісному рівні, що дозволяє підвищити достовірність прийняття рішень в умовах невизначеності наслідків кожної окремої несправності, яка обумовлена накладанням змін контрольованих параметрів об'єкту діагностування від сукупності одночасних несправностей.

Ключові слова: складні системи, багаторівневі технічні системи, діагностування, комбінації прихованих несправностей, логічні моделі, алгоритм послідовного аналізу і відсіювання варіантів, накладання наслідків несправностей.

АННОТАЦИЯ

Нечипорук Е.П. Информационные технологии диагностирования многоуровневых технических систем. – Рукопись.

Диссертация на соискание ученой степени доктора технических наук по специальности 05.13.06 – Информационные технологии. – Национальный авиационный университет, Киев, 2021.

Актуальность работы вызвана тем, что повышение сложности технических систем, обусловленное объективными тенденциями развития науки, техники и технологий, приводит к росту доли комбинаций скрытых неисправностей на общем фоне факторов неработоспособности реальных объектов.

Поэтому необходимо решить несколько существенных проблем в понимании процессов диагностирования сложных технических систем, связанных прежде всего с эффективным и своевременным выявлением аномалий в поведении сложной технической системы, поиском и идентификацией местоположения и характера комбинаций неисправностей системы при возникновении диагностической ситуации, когда наложения последствий различных неисправностей компенсируют значения отклонений контролируемых параметров системы, что несет неопределенности разной степени и характера. Данная проблема обусловлена большой размерностью задачи и необходимостью учета различных факторов, присущих системе, которые влияют на качество решения задачи.

Целью данного исследования является решение актуальной научно-прикладной проблемы создания научных основ построения моделей, методов и информационной технологии диагностирования сложных технических систем с многоуровневой структурой, которые позволяют определять комбинации скрытых неисправностей, приводящих к наложению их последствий на разных уровнях.

Возникновение комбинаций отдельных неисправностей при наложении их последствий исключает решение задачи диагностирования многоуровневой технической системы традиционными методами и придает ей комбинаторный характер.

В работе создана информационная технология диагностирования многоуровневых технических систем, инвариантная относительно их физической природы, структуры и технических параметров, которая способна идентифицировать комбинации неисправностей в условиях наложения последствий влияния каждой из них на значения характеристик состояния объекта.

Разработана обобщенная логическая модель диагностирования и ее отдельные формы, которые отражают причинно-следственные зависимости между типичными комбинациями неисправностей и соответствующими им изменениями значений контролируемых параметров многоуровневого технического объекта. Разработан метод преобразования логических моделей в комбинаторные формы, которые сводятся к каноническому виду систем неравенств линейной и нелинейной структуры. Разработан метод решения систем комбинаторных неравенств линейной и нелинейной структурой, адаптированных к логическим моделям задач диагностирования многоуровневых технических объектов. Разработана информационная технология диагностирования многоуровневых технических

объектов, которая позволяет идентифицировать комбинации неисправностей с учетом последствий влияния каждой из них на значения контролируемых параметров объекта.

Разработана экспертная система диагностирования технических объектов с многоуровневой структурой, способная идентифицировать комбинации неисправностей, которые возникают на момент диагностирования, учитывая наложения последствий влияния каждой из них на значения контролируемых параметров объекта. Реализована информационная технология диагностирования сложных технических систем с многоуровневой структурой в виде программного обеспечения и внедрена ее в производство. Информационная технология содержит комплекс методов, алгоритмов и программ, позволяет решать задачи диагностики сложных технических систем на новом качественном уровне, что позволяет повысить достоверность принятия решений в условиях неопределенности последствий каждой отдельной неисправности, которая обусловлена наложением изменений контролируемых параметров объекта диагностирования от совокупности одновременных неисправностей.

Разработанное программное обеспечение экспертной системы диагностирования технических объектов с многоуровневой структурой на основе построения логических моделей диагностики позволило апробировать результаты исследований и внедрить их в подразделениях предприятий, занимающихся эксплуатацией и ремонтом таких систем.

Результаты научных исследований внедрены в производственный процесс ГП «Завод №410 ГА», УМГ «Черкасытрансгаз», АО «Укртрансгаз», а также в научно-исследовательскую работу в Национальном авиационном университете.

Полученные результаты исследования предназначены для использования, в первую очередь, в газотранспортной отрасли. Кроме того, они могут найти свое применение в других отраслях, где возникает потребность диагностирования многоуровневых технических систем с комбинациями скрытых неисправностей при наложении их последствий.

Ключевые слова: сложные системы, многоуровневые технические системы, диагностика, комбинации скрытых неисправностей, логические модели, алгоритм последовательного анализа и отсеивания вариантов, наложение последствий неисправностей.

ABSTRACT

Nechporuk O.P. Information technology for diagnosing multilevel technical systems. – Manuscript.

Dissertation for the degree of Doctor of Technical Sciences in the specialty 05.13.06 – Information technologies. – National Aviation University, Kyiv, 2021.

The purpose of this research is solving of the actual scientific and applied problem of creating scientific bases for building models, methods and information technology for diagnosing complex technical systems with multilevel structure, which will identify combinations of hidden faults that lead to their consequences at different levels.

The occurrence of combinations of individual faults in the imposition of their consequences makes it impossible to solve the problem of diagnosing a multilevel technical system by traditional methods and gives it a combinatorial character.

An information technology for diagnosing multilevel technical systems, invariant in terms of their physical nature, structure and technical parameters, has been created, which is able to identify combinations of faults in the conditions of overlapping the impact of each of them on the value of object characteristics.

A generalized logical model of diagnosis and its separate forms have been developed, which reflect the causal relationships between typical combinations of faults and the corresponding changes in the values of the controlled parameters of a multilevel technical object. A method for transforming logical models into combinatorial forms, which are reduced to the canonical form of systems of inequalities of linear and nonlinear structure, has been developed. A method for solving systems of combinatorial inequalities with linear and nonlinear structure, adapted to models of problems of diagnosing multilevel technical objects, has been developed. Information technology for diagnosing multilevel technical objects has been developed, which allows to identify combinations of faults taking into account the consequences of the influence of each of them on the values of controlled parameters of the object.

An expert system for diagnosing technical objects with a multilevel structure has been developed, which is able to identify combinations of faults that occur at the time of diagnosis, taking into account the effects of each of them on the value of controlled parameters of the object. Implemented information technology for diagnosing complex technical systems with a multilevel structure in the form of software and introduced it into production. Information technology, containing a set of methods, algorithms and programs, provides an opportunity to solve problems of diagnosing complex technical systems at a new qualitative level, which increases the reliability of decision-making in conditions of uncertainty of the consequences of each failure, which is due to changes in controlled parameters diagnosing from a set of simultaneous faults.

Keywords: complex systems, multi-level technical systems, diagnostics, combinations of hidden faults, logical models, an algorithm for sequential analysis and filtering of options, superposition of the consequences of faults.