

МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ
НАЦІОНАЛЬНИЙ АВІАЦІЙНИЙ УНІВЕРСИТЕТ

Кваліфікаційна наукова
праця на правах рукопису

Нечипорук Олена Петрівна

УДК 004.891.3:681.518.5

ДИСЕРТАЦІЯ

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ
БАГАТОРІВНЕВИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

05.13.06 – «Інформаційні технології»

Подається на здобуття наукового ступеня
доктора технічних наук

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

Науковий консультант:
Литвиненко Олександр Євгенійович,
доктор технічних наук, професор,

Київ – 2021

АНОТАЦІЯ

Нечипорук О.П. Інформаційна технологія діагностування багаторівневих технічних систем. – Кваліфікаційна наукова праця на правах рукопису.

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, накладення наслідків несправностей.

ABSTRACT

Nechyporuk 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.

Список публікацій здобувача:

1. Н. Марченко, В. Нечипорук, О. Нечипорук, Ю. Пепа, Методи оцінювання точності інформаційно-вимірювальних систем діагностики. *Монографія. Київ: «Задруга», 2014, 200 с.*
2. О. Литвиненко, О. Нечипорук, Логіко-математичні методи діагностування складних систем. *Монографія. Київ: «Артмедіа принт», 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., «Особенности обслуживания трафика у сетях авиационного электросвязи», *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. O. 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. O. 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. O. Nechyporuk, O. Tkulich, O. 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, O. 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 Международ. 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 Международ. 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: Международ. науч.-практ. конф.*, София, 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 сигналів електрических машин», *Современная наука: проблемы, прогнозы и решения: междунар. науч.-практ. конф.*, Тбілісі, Грузія, 2014, С. 72-77.
44. О. Нечипорук, П. Смоляров, «Універсальний модуль голосового управління 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, Болгарія, 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, Чеська Республіка, 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, Республіка Польща, 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, Республіка Польща, 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.

ЗМІСТ

| | |
|---|-----|
| ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ..... | 14 |
| ВСТУП | 15 |
| Розділ 1 АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ | 25 |
| 1.1. Методи формалізації та проблеми дослідження складних технічних систем..... | 25 |
| 1.2. Методи діагностування складних технічних систем..... | 41 |
| 1.3. Аналіз наукових розробок в галузі діагностування багаторівневих технічних систем..... | 58 |
| 1.4. Постановка завдання дослідження | 80 |
| 1.5. Висновки до першого розділу | 84 |
| Список використаних джерел до першого розділу..... | 85 |
| Розділ 2 ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ ДІАГНОСТУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ СИСТЕМ..... | 99 |
| 2.1. Узагальнена логічна модель діагностування складного технічного об'єкту з багаторівневою структурою | 99 |
| 2.2. Метод трансформації узагальненої моделі діагностування до комбінаторної форми..... | 106 |
| 2.3. Виведення окремих форм узагальненої моделі діагностування | 110 |
| 2.4. Висновки до другого розділу | 142 |
| Список використаних джерел до другого розділу | 143 |
| Розділ 3 МЕТОДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ | 146 |
| 3.1. Метод трансформації комбінаторної моделі до канонічного виду систем нерівностей лінійної та нелінійної структури з булевими змінними | 146 |

| | |
|---|------------|
| 3.2. Метод розв'язання систем комбінаторних нерівностей з нелінійною структурою..... | 152 |
| 3.3. Метод розв'язання систем комбінаторних нерівностей з лінійною структурою..... | 173 |
| 3.4. Висновки до третього розділу..... | 183 |
| Список використаних джерел до третього розділу | 185 |
| Розділ 4 ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ | 188 |
| 4.1. Функціональна структура інформаційної технології діагностування технічних об'єктів з багаторівневою структурою | 188 |
| 4.2. Інформаційне забезпечення технології діагностування складних технічних об'єктів з багаторівневою структурою | 196 |
| 4.3. Програмне забезпечення інформаційної технології діагностування складних технічних об'єктів з багаторівневою структурою. | 235 |
| 4.4. Висновки до четвертого розділу..... | 239 |
| Список використаних джерел до четвертого розділу..... | 241 |
| Розділ 5 ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ..... | 248 |
| 5.1. Діагностування газотранспортної системи України..... | 248 |
| 5.2. Діагностування компресорної станції..... | 253 |
| 5.3. Діагностування газоперекачуючих агрегатів. | 258 |
| 5.4. Результати експериментів | 280 |
| 5.5. Висновки до п'ятого розділу..... | 288 |
| Список використаних джерел до п'ятого розділу..... | 289 |
| ВИСНОВКИ..... | 293 |
| ДОДАТОК..... | 298 |

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ СКОРОЧЕНЬ

| | |
|-------|---|
| ОД | – об'єкт діагностування |
| ЕС | – експертна система |
| ТОБС | – технічний об'єкт з багаторівневою структурою |
| БЗ | – база знань |
| БД | – база даних |
| СТО | – складний технічний об'єкт |
| РЗ | – редактор знань |
| МЗ | – математичне забезпечення |
| ПЗ | – програмне забезпечення |
| ІЗ | – інформаційне забезпечення |
| СДСТО | – система діагностування складного технічного об'єкта |
| ГТС | – газотранспортна система |
| ГРС | – газорозподільна станція |
| КС | – компресорна станція |
| ПСГ | – підземні сховища газу |
| ГВС | – газовимірювальна станція |
| ГПА | – газоперекачуючий агрегат |
| ДКС | – дотискні компресорні станції |
| ПЗК | – повітрязабірна станція |
| ОК | – осьовий компресор |
| ТВТ | – турбіна високого тиску |
| ТНТ | – турбіна низького тиску |
| ГТУ | – газотурбінні установки |
| ЕГПА | – електрогазопривідні агрегати |
| ГМКУ | – газомотокомпресорні установки |
| СЗМ | – система защувального масла |

ВСТУП

Актуальність. 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. Карибський, А.В. Мозгалецький, Я.Я. Осіс, В.А. Гуляев, 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 дозволятимуть 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-Х13 «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 унеможлиблює 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 останів 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 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.)

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 «ПРТК-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 рисунків, 9 таблиць, 9 сторінок додатків. Список використаних джерел налічує 254 найменування на 28 сторінках. Загальний обсяг дисертаційної роботи складає 306 сторінок.

РОЗДІЛ 1

АНАЛІЗ СТАНУ ПРОБЛЕМИ ТА ПОСТАНОВКА ЗАВДАННЯ ДОСЛІДЖЕННЯ

1.1. Методи формалізації та проблеми дослідження складних технічних систем

Проблема діагностування та ідентифікації стану складних процесів в багаторівневих системах, зокрема, настання та виявлення множинних несправностей в технічних об'єктах на момент їх діагностування, що призводять до катастрофічних наслідків, в останні роки набуває все більшої актуальності та досліджується багатьма науковцями, проте й досі є не вирішеною.

У даному дослідженні розглядається один з підходів до проектування інформаційних технологій діагностування складних систем. Тому спочатку розглянемо поняття складності систем. „Наші інтерпретації поняття складності настільки ж різноманітні, як і сама складність” (Р. Розен). За своєю природою системність є латентною, безпосередньо невимірною властивістю. У широкому розумінні під системністю слід розуміти: структурний взаємозв'язок і цілеспрямовану функціональну взаємодію повних елементів та частин, як матерії, так і матеріальних об'єктів.

Визначальною особливістю задачі системного аналізу структури складних технічних систем (системного об'єкта) є: неповнота, невизначеність, неточність, нечіткість і суперечливість вихідної інформації; невизначеність і неоднозначність або суперечливі та протилежні цілі розробки або дослідження об'єкта; латентність факторів: естетичних, ергономічних, етнічних, звички та навички користувача, конкурентність, динаміка запитів користувачів; складність реалізації протилежних критеріїв: максимізація якості розвитку і мінімізація складності процедури розв'язування; пошук раціонального компромісу (суб'єктивний фактор) [1].

Практичні системні задачі – є концептуально невизначені, адже їм властиві принципи: невизначеності, неоднозначності, ризику, суперечливості множинних цілей, наявність у досліджуваних системах елементів різної природи та інформації різного характеру (кількісного і якісного), що циркулює між цими елементами.

Формалізація – одна з найскладніших процедур під час постановки та розв’язання системних задач різного типу. Складна система – як об’єкт дослідження, є множина властивостей із кожною з яких пов’язана множина його проявів; множина базисів, із кожним з яких пов’язана множина її елементів.

Базис – це будь-яка суттєва властивість, яку можна застосувати на практиці для визначення відмінностей у разі спостереження однієї й тієї властивості. Існують базиси трьох основних типів: час, простір, група (соціальна група, набір товарів певного типу, множина слів у творі, сукупність країн тощо). Систему будемо розглядати як модель об’єкта системного дослідження, як реальний матеріальний об’єкт певного призначення. Використаємо декілька означень системи у формі моделі [26, 27].

Система – упорядкована множина структурно взаємопов’язаних і функціонально взаємозалежних елементів.

Складна система – упорядкована множина структурно взаємопов’язаних і функціонально взаємозалежних систем.

Означення системи як матеріального об’єкта певного призначення.

1) Технічна система – матеріальний цілісний об’єкт, призначений для виконання певної функції в заданих умовах, технічно реалізований на основі впорядкованої за номенклатурою, скінченої множини функціонально взаємозалежних, структурно взаємопов’язаних функціональних елементів, які технологічно взаємодіють [27].

2) Складна технічна система – матеріальний цілісний об’єкт, призначений для виконання скінченої множини функції в заданих умовах,

технічно реалізований на основі впорядкованої за номенклатурою, скінченої множини функціонально взаємозалежних, структурно взаємопов'язаних функціональних технічних систем, які технологічно взаємодіють.

Безмежна різноманітність складних багаторівневих ієрархічних технічних та організаційних систем і незліченна кількість виконуваних ними функцій зумовлюють складність формального подання задач системного аналізу. Тому основні поняття необхідно формалізувати, а припущення та обмеження описати в термінах задач системного аналізу. Введемо означення складної ієрархічної системи.

Складна ієрархічна система – це цілісний об'єкт, утворений із функціонально різнотипних систем, структурно взаємопов'язаних ієрархічною підпорядкованістю і функціонально об'єднаних для досягнення заданих цілей за певних умов [28]. Прикладами складних ієрархічних систем можуть служити сучасні виробничі об'єкти, космічні системи зв'язку, навігації, дистанційного зондування, сучасні системи управління регіонами, корпораціями, багато профільними фірмам тощо. Аналіз таких систем не зводиться лише до встановлення типів елементів чи типів відношень. Суттєве значення у даному випадку має ієрархічність структури не лише топології цих систем, а й систем управління. По-друге, для цих класів об'єктів багаторівнева ієрархічна структура складних і великих систем характеризується такими властивостями.

- Відмінність значимості й можливостей функціональних елементів (ФЕ) для різних ієрархічних рівнів.
- Вільна поведінка ФЕ кожного рівня ієрархії у певних межах, встановлених заздалегідь, або у процесі функціонування об'єкта.
- Пріоритет дій або право на втручання ФЕ верхнього рівня у «справи» нижнього рівня, залежно від функцій, які вони виконують.

Завдяки цим властивостям складна ієрархічна система має кілька принципових особливостей, які визначають як загальні проблеми дослідження, так і конкретні цілі проведення аналізу її структури та

функцій, або структурно-функціонального аналізу (СФА). Розглянемо ці особливості в обсязі, необхідному для розуміння основних цілей і задач СФА складних ієрархічних систем. Насамперед зазначимо, що можливе різне трактування поняття ієрархії, й тому можливі різні види ієрархій. Найсуттєвішу розбіжність ієрархій визначає розбіжність поняття рівня в ієрархії. Необхідність введення кількох понять рівня зумовлено складністю й різноманіттям цілей, задач, функцій, властивостей та можливостей реальних багаторівневих ієрархічних систем, а також різноманіттям властивостей, особливостей та наслідків штатних, позаштатних, критичних і надзвичайних ситуацій їхнього функціонування. Так у роботі використано три поняття рівня [28].

Ешелон – термін, що визначає рівень організаційної ієрархії. Ієрархічна структура об'єкта, який відповідає поняттю «ешелон», передбачає, що реальний об'єкт можна зобразити у вигляді багаторівневої організаційної ієрархічної системи, яка має такі властивості: складається із множини точно виділених за рівнями підсистем; має повноваження, чітко розподілені між рівнями і підсистемами одного рівня, виходячи з формулювання, вибору і прийняття рішень у визначеній сфері відповідальності; забезпечує прямий і зворотний зв'язок з управління між підсистемами різних рівнів, а між підсистемами одного рівня – прямий і зворотний зв'язок із взаємодії. Такі системи прийнято називати багаторівневими і багатоцільовими.

Страта – термін, який характеризує рівень опису або абстрагування. Ієрархічна структура об'єкта, що відповідає поняттю «страта», припускає, що властивості реального складного об'єкта описано у вигляді деякої сукупності, в якій окремі описи наведено з різних позицій та впорядковано з урахуванням рівня їхньої значимості. Такі ієрархічні системи прийнято називати стратифікованими. Шар – термін, що визначає рівень складності прийняття рішення. Ієрархічна структура об'єкта, що відповідає поняттю «шар» передбачає, що загальну процедуру ухвалення рішення реалізують у

вигляді певної послідовності часткових процедур, кожна з яких забезпечує можливість одержання розв'язку з певним ступенем обґрунтованості та вірогідності за різних рівнів неповноти, невизначеності, нечіткості й суперечливості вхідної інформації.

Таку ієрархічну структуру прийнято називати багат шаровою, багаторівневою або ієрархічною системою прийняття рішень. Системне мислення – вища форма людського пізнання, коли процеси відображення об'єктивної реальності базуються на цілісному відображенні досліджуваного об'єкта з позицій досягнення цілей, дослідження на підставі знань, досвіду, інтуїції, передбачення, здорового глузду.

Об'єктами моніторингу складних процесів є окремі їх прояви або групи проявів, що становлять базу для моделювання та прогнозування процесів, які розвиваються в умовах випадкових збурень різного характеру. Таким чином, проблема визначення моделей та методів аналізу, моделювання та прогнозування складних процесів, що призводять до катастрофічних наслідків, вимагає в певних випадках застосування нетрадиційних підходів [2].

Згідно з класифікацією, всі проблеми підрозділяються на три класи:

1) добре структуровані (well-structured) або кількісно сформульовані проблеми, в яких істотні залежності з'ясовано дуже добре;

2) неструктуровані (unstructured) або якісно виражені проблеми, що містять лише опис найважливіших ресурсів, ознак і характеристик, кількісні залежності між якими фактично невідомі;

3) слабо структуровані (ill-structured) або змішані проблеми, які містять як якісні елементи, так і маловідомі, невизначені аспекти, які мають тенденцію домінувати [26].

Проблема моніторингу, моделювання та прогнозування складних процесів належить до класу слабо структурованих проблем (визначено певний клас кількісно сформульованих задач і є проблеми з невизначеними аспектами або з невідомими залежностями). Для вирішення добре

структурованих проблем, які можна кількісно виразити, використовується відома методологія дослідження операцій, яка полягає в побудові адекватної математичної моделі (наприклад, моделі лінійного, нелінійного, динамічного програмування, моделі теорії масового обслуговування, теорії ігор тощо) і застосуванні методів для пошуку оптимальної стратегії управління цілеспрямованими діями. Класифікацію моделей наведено на рис. 1.1 [28].

Модель (від латинського *modulus* – міра) – це заміщувач об’єкта дослідження, що знаходиться з ним в такій відповідності, яка дозволяє отримати нове знання про цей об’єкт; є прагматичним засобом, засобом керування, засобом організації практичних дій, способом представлення зразково правильних дій та їх результату, тобто робочим представленням цілей [56]. Моделювання – метод опосередкованого пізнання за допомогою штучних або природних систем, які зберігають деякі особливості об’єкта дослідження, що дає можливість отримати нове знання про об’єкт-оригінал. Задачу побудови математичної моделі супроводжує ряд проблем, серед яких можна виділити такі [30]:

- вибір структури моделі;
- оцінювання вектора коефіцієнтів моделі a ;
- вибір критерію оцінки якості моделі D .

Всі ці задачі тісно пов’язані між собою: вибираючи структуру моделі, потрібно оцінювати її якість, а щоб оцінити якість моделі, необхідно знайти її коефіцієнти.

Виділяють такі методи побудови математичних моделей:

- аналітичний;
- статистичний (експериментальний);
- експериментально-аналітичний.



Рис. 1.1. Класифікація моделей складних технічних систем

Постановка будь-якої задачі полягає в тому, щоб перевести її словесний, вербальний опис у формальний. Існуючі методи формування дають різний ступінь формалізації. Якщо проранжувати їх за цією властивістю, можна побудувати умовну шкалу методів (рис. 1.2) [26].

Цей спектр методів розділяють на два класи:

- методи формалізованого представлення систем (для простоти називатимемо їх формальними методами);
- методи, направлені на активізацію використання інтуїції та досвіду фахівців (для простоти називатимемо їх евристичними методами).

Необхідно відзначити, що строгого розділення на формальні і неформальні методи не існує. Можна говорити тільки про більший або менший ступінь формалізованості. (Системний аналіз іноді визначають як «формалізований здоровий глузд»).

Формальні методи можна розбити відповідно до класифікації Ф.Е.Темника на такі групи [26]:

1. Аналітичні методи:

- методи класичної математики, включаючи інтегрально-диференціальне числення, методи пошуку екстремумів функцій, варіаційне числення тощо;
- методи математичного програмування;
- методи теорії ігор.

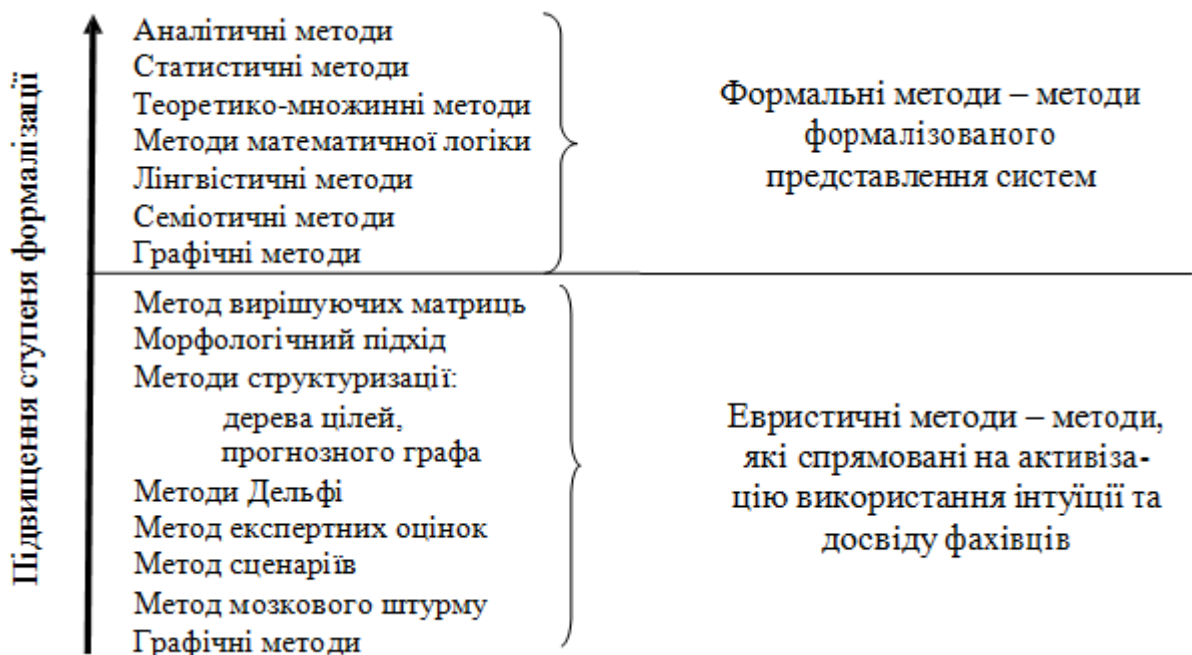


Рис. 1.2. Шкала методів

2. Статистичні методи:

- теоретичні розділи математики: теорія ймовірностей, математична статистика;

– напрями прикладної математики, що використовують стохастичні моделі: теорія масового обслуговування, методи статистичних випробувань, методи висунення і перевірки статистичних гіпотез А.Вальда та інші методи статистичного імітаційного моделювання.

3. Методи дискретної математики: теоретико-множинні, логічні, лінгвістичні, семіотичні методи;

4. Графічні методи, що включають теорію графів і різного роду графічні представлення інформації типу діаграм, гістограм тощо.

До графічних методів можна віднести методи структурного системного аналізу і об'єктного моделювання.

Методи, направлені на активізацію використання інтуїції та досвіду фахівців, активізують виявлення і узагальнення думок досвідчених фахівців-експертів, які здійснюють експертні оцінки. Експерт – це кваліфікований фахівець у досліджуваній області. Експертні оцінки – це кількісні та якісні оцінки процесів і явищ, що виконуються експертами на основі суб'єктивних висновків.

Класифікацію методів, направлених на активізацію інтуїції та досвіду фахівців, можна визначити таким чином:

- методи індивідуальної експертизи;
- методи групової експертизи (метод номінальних груп, методи типу «мозкової атаки» або колективної генерації ідей);
- методи вироблення колективних рішень (експертне фокусування, метод комісій, метод інтеграції рішень, «Консиліум», метод аналізу конкретних ситуацій, Балінтова сесія, метод «метаплан», метод «за – проти», метод ролей, блокові методи, дискусія з розділенням інтелектуальних функцій, методи типу «сценаріїв», методи типу Дельфі, метод синектики);
- методи структуризації;
- морфологічні методи (метод заперечення і конструювання, метод систематичного покриття поля, метод морфологічного ящика та ін.);

– методи організації складних експертиз (методика ПАТЕРН, метод вирішальних матриць).

На рис. 1.3 відображено чотири групи методів: якісні (що базуються на оцінках та судженнях експертів), кількісні (що базуються на оптимізації та математичному моделюванні), аналізу часових рядів (що використовують передісторію протікання певного процесу для його прогнозування) та прийняття рішень (що засновані на багатоцільовому аналізі, евристичних підходах, створенні баз даних, логічних методах моделювання, експертних системах). Кожна група методів використовує спеціальні методи, для яких розроблені певні моделі та алгоритми їх застосування.

На даний час відомі різні класифікації методів формалізованого подання складних систем [28, 29]. Як наслідок, методи, що інколи виникають незалежно, мають лише термінологічні розбіжності. У роботі наведено найбільш поширену класифікацію, у якій виділяють наступні групи методів формалізованого подання: аналітичні, статистичні, теоретико-множинні, логічні, лінгвістичні, семіотичні, графічні. Загальна направленість класифікації є такою: кожна наступна група методів дозволяє формалізувати завдання, що не може бути вирішене в рамках попередньої групи методів. В дисертаційній роботі серед методів розв'язання задач системного аналізу, які застосовуються при дослідженні роботи складних систем в умовах множинних відхилень значень характеристик від еталонних, використовуються методи прийняття рішень, а саме методи штучного інтелекту (рис.1.3.).

Аналітичними називають методи, у яких ряд властивостей багатомірної системи з багатьма зв'язками відображено у n -мірному просторі лише однією точкою, що виконує певний рух.

Аналітичні методи застосовують у тих випадках, коли властивості системи можна відобразити за допомогою детермінованих величин чи процесів, тобто, знання про процеси та події у деякому часовому інтервалі дозволяють повністю визначити їх поведінку за межами цього інтервалу. Ці

методи використовуються при вирішенні завдань руху та стійкості, оптимального розміщення, розподілу робіт та ресурсів, вибору найкращого шляху, оптимальної стратегії поведінки у конфліктних ситуаціях і т.і.

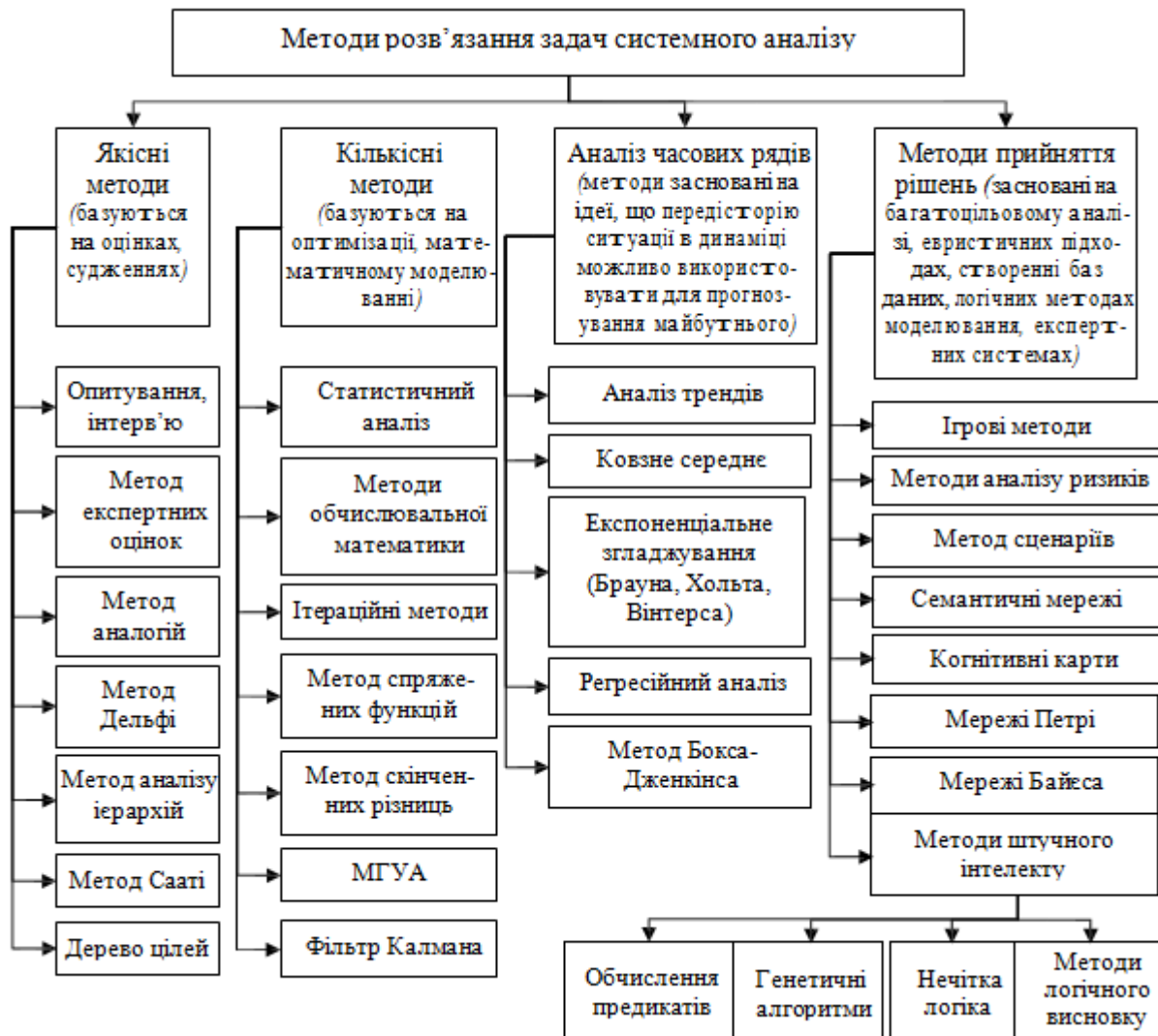


Рис. 1.3. Класифікація основних методів

У тих випадках, коли не вдається зобразити систему на основі детермінованих категорій, можна застосувати її відображення за допомогою випадкових (стохастичних) подій, процесів, які описані відповідними ймовірнісними характеристиками та *статистичними* закономірностями.

На статистичних відображеннях базуються математична статистика, теорія статистичних випробувань (чи статистичного імітаційного

модельовання) окремим випадком якої є метод Монте-Карло, теорія висування та перевірки статистичних гіпотез, окремим випадком якої є байєсівський підхід до дослідження процесів передачі інформації у процесах спілкування, навчання та інших ситуаціях, що є характерними для складних систем, які перебувають у розвитку.

Не всі процеси і явища можуть підлягати під статистичні закономірності, не завжди може бути вибрано представницьку вибірку, доведено правомірність застосування статистичних закономірностей, часто для отримання статистичних закономірностей потрібні недопустимо великі затрати часу, що також обмежує можливості їх застосування. У таких випадках слід розглядати можливість застосування інших методів подання систем.

Теоретико-множинне подання базується на поняттях множина, елементи множини, та відношення на множинах. Складну систему можна відобразити як сукупність різнорідних множин та відношень між ними. У основі більшості теоретико-множинних перетворень лежить перехід від одного способу завдання множини до іншого. У множині можна виділити підмножини. З двох і більше множин чи підмножин можна, встановивши відношення між їх елементами, сформулювати нову множину, що складатиметься з елементів, які якісно відрізняються від елементів вихідних множин.

При теоретико-множинному поданні можна вводити будь-які відношення. Конкретизуючи застосовані відношення та правила їх використання можна отримати одну з алгебр логіки, одну з мов математичної лінгвістики. Можна також створити мову модельовання складних систем, яка, в подальшому, може розвиватися як самостійний науковий напрямок.

Проте, у мовах модельовання, що створюються, важко ввести правила, закономірності, при використанні яких формально можна отримати нові результати, адекватні реальним об'єктам та процесам, що моделюються (як це дозволяють робити аналітичні та статистичні методи). Тому, спочатку при

застосуванні теоретико-множинного подання прагнули використовувати обмежений набір відношень.

Логічні відображення є окремим випадком теоретико-множинного подання. Вони переводять реальну систему та відношення в ній на мову однієї з алгебр логіки (двомовної, багатомовної), що засновані на використанні алгебраїчних методів для вираження законів формальної логіки.

Найпоширеніше застосування отримала бінарна алгебра логіки Буля (булева алгебра). Алгебра логіки оперує поняттями: висловлювання, предикат, логічні операції (логічні функції, квантори).

Логічні методи застосовуються при дослідженні нових структур систем різноманітної природи (технічних об'єктів, текстів і т.і.), у яких характер взаємодії між елементами ще не зрозумілий настільки, щоб було можливо представити їх аналітичними методами, а статистичні дослідження або ускладнені, або не привели до виявлення стійких закономірностей. В той же час, за допомогою логічних алгоритмів можна описувати не будь-які відношення, а лише ті, що передбачені законами алгебри логіки та підлягають вимогам логічного базису. Логічні подання знайшли широке практичне застосування при дослідженні та розробці різних видів автоматів, автоматичних систем контролю, а також при вирішенні завдань розпізнавання образів [3].

Лінгвістичні та семіотичні подання – наймолодші методи формалізованого відображення систем.

Лінгвістичні подання базуються на поняттях тезаурусу T (елементи мови, що виражають зміст за заданими змістовними відношеннями; тезаурус характеризує структуру мови), граматики G (правила утворення елементів, що виражають зміст різних рівнів тезаурусу), семіотики (сутнісний зміст фраз, що формуються, речень та інших елементів, що виражають цей зміст) та прагматики (зміст для даного завдання, мети).

Цей спосіб подання систем виник та розвивається у зв'язку з потребами аналізу тексту та мов. Однак, останнім часом, його починають широко застосовувати для відображення та аналізу процесів у складних системах у тих випадках, коли не вдається застосувати одночасно аналітичні, статистичні подання чи методи формальної логіки. А саме, лінгвістичні та семіотичні подання є зручним апаратом (особливо у поєднанні з графічним поданням) для першого етапу поступової формалізації завдань прийняття рішень у задачах, які погано формалізуються, що й викликало зацікавлення цими методами з боку розробників складних систем.

Стосовно недоліків методів, при ускладненні мови моделювання важко гарантувати правильність отриманих результатів, виникають проблеми алгоритмічного вирішення, можлива поява парадоксів, чого можна частково уникнути шляхом застосування змістовного контролю та коригування мови на кожному етапі її розширення у діалоговому режимі моделювання [2].

До *графічного* подання відносять будь-які графіки (графіки Ганта, діаграми, гістограми і т.і.) та теорії, що виникли на основі графічних відображень (теорія графів, теорія планування мереж чи керування ними і т.і.), тобто, все те, що дозволяє наочно представити процеси, що проходять у системах, і в такий спосіб полегшити їх аналіз людиною (особою, що приймає рішення).

Графічне подання є зручним засобом дослідження структур та процесів у складних системах та вирішення різного роду організаційних питань у інформаційно-керуючих комплексах, де необхідно мати взаємодію людини та технічних засобів.

Для опису систем діагностування на практиці використовують ряд вищезгаданих формалізованих методів, які різною мірою забезпечують вивчення функціонування систем у часі, вивчення схем управління, складу підрозділів, їх підлеглості і т.і. з метою створення нормальних умов роботи апарату діагностування та чіткого інформаційного забезпечення діагностики [6-10].

Інакше кажучи, дослідження системи діагностування у рамках вибраного методу формалізованого опису має виявити оптимальні варіанти побудови, організації та функціонування реального об'єкту діагностики.

Використовувані методи формалізованого опису систем діагностування у кінцевому результаті повинні сприяти створенню чітких організаційних механізмів діагностики складних об'єктів. Необхідність створення таких механізмів обумовлена впровадженням нових методів господарювання, які вимагають як чіткої регламентації діагностування, так і скорочення витрат на проведення діагностики.

Діагностування є однією з найбільш інтелектуально ємнісних процедур у процесі експлуатації складних технічних об'єктів (СТО). Однак, у процесі створення об'єктів діагностування (ОД) знання про них, які закладаються в алгоритми, програми та технічні засоби діагностування, часто виявляються недостатніми для забезпечення належного рівня готовності ОД у процесі його експлуатації.

Це стосується таких ОД, як, наприклад, авіаційні двигуни. Такого роду ОД являють собою складні технічні системи зі значною структурою, що складаються з великої кількості елементів з різними принципами дії, режимами роботи, процедурами обслуговування та умовами експлуатації. Процеси деградації в елементах таких систем мають різні закономірності та, часто, недостатньо вивчені. Доволі проблематичним є встановлення необхідних датчиків (навіть якщо вони існують) на певному ряді елементів та організація інтерфейсу для передачі діагностичної інформації. Все це зумовлює обмеженість вихідної бази знань (БЗ) системи діагностування та приводить до зниження рівня достовірності прийнятих рішень щодо актуальних та прогнозованих технічних станів ОД.

Стрімкі темпи розвитку та впровадження в усі сфери діяльності сучасних технічних систем, безперервне зростання їх структурної складності та розмірності, спеціалізовані умови застосування та вимоги до безвідмовності функцій, які виконуються апаратурою, визначають

актуальність проблеми надійності, якості та безпеки експлуатації технічних об'єктів [29-32]. Велике значення в успішному вирішенні цих завдань належить методам і засобам контролю та діагностики технічних систем та програмного забезпечення [32-34].

Проектуючи складні об'єкти варто враховувати вимоги технічного контролю – своєчасно визначати фактичний стан об'єкту (справний, допустимий, передаварійний, аварійний), та, у випадку несправності, ефективно виявляти та усувати дефекти, що виникли [35-43].

Засновниками теорії діагностування дискретних і неперервних технічних систем є вітчизняні і зарубіжні вчені П.Л. Пархоменко, Є.С. Согомоян, В.В. Карибський [44-48], А.В. Мозгалецький [49, 50], Я.Я. Осіс [51, 52], В.А. Гуляєв [53, 54], Д. Маєда, С. Раомурті.

Зростання розмірності та структурної складності технічних пристроїв випереджає можливості активно використовуваних методів підтримки їх у робочому стані шляхом своєчасного виявлення дефектів.

Необхідно розробити нові ефективні моделі для вирішення завдань діагностики технічних об'єктів, що складаються з кількох сотень, і, навіть, тисяч одиниць, автоматизувати процедури побудови оптимальних стратегій діагностування технічного стану та прогнозування поведінки складних сучасних технічних систем.

Підвищення конструктивної складності систем при інших рівних умовах неухильно веде до зниження їх надійності та ефективності виконання ними заданих функцій. Протириччя між зростанням складності технічних систем та зниженням їх надійності приводить до необхідності розробки ефективних методів контролю та діагностики їх стану. Реалізація заходів з підвищення надійності за рахунок забезпечення контролепридатності та діагностованості пов'язана з додатковими витратами, у цьому контексті актуальним є завдання одночасної локалізації різних характеристик стану елементів підсистем складного об'єкту діагностування, що приводить до оптимізації ресурсів у процесі діагностування. Аналіз причин та

характеристик дефектів дозволив виконати їх класифікацію за основними ознаками, так як успішність застосування методів діагностування визначається точністю побудови моделі причинно-наслідкових зв'язків дефектів, звідки формулюється завдання дослідження – розробка моделей та алгоритмів синтезу процедур діагностування структурно-складних об'єктів, які точно опрацьовують об'єм діагностичної інформації з метою прийняття рішень стосовно керування об'єктом [2, 53].

Проведення діагностичної процедури та обробка її результатів має велику працездатність, чи, більш того, вона є нереалізованою з причин обмеження на обчислювальні ресурси. Проведені дослідження виявили необхідність створення принципово нової моделі подання даних про об'єкт з метою діагностування, на основі якої можливо організувати ефективну комбінаційну процедуру пошуку несправностей для складних систем з великою кількістю станів.

Під час дослідження складних технічних систем з використанням методів математичного моделювання виникає ряд проблем, що зумовлені великою розмірністю завдання та необхідністю врахування великої кількості факторів, властивих системі, які впливають на якість вирішення завдання. Наявність великої кількості реальних завдань, що є комбінаторними за своїм характером, але включають нелінійні функціональні залежності, вимагала розробки ефективних алгоритмів їх вирішення, що мають властивості збіжності та повноти. Такі алгоритми були створені шляхом поширення стратегії послідовного аналізу варіантів на екстремальні комбінаторні моделі з лінійною та нелінійною структурою [5].

1.2. Методи діагностування складних технічних систем

Сучасні технічні об'єкти (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.

Під складною технічною системою розуміють систему, яка об'єднує модулі й механізми різного призначення й виконання (електронні схеми, двигуни, датчики, програмне забезпечення і т.д.).

Підвищення вимог до надійності СТО обумовлено цілим рядом причин, серед яких особливо необхідно відзначити:

- зростання складності об'єктів, що вже саме по собі приводить до зменшення їх надійності;
- зростанням вимог до безпеки їх використання;
- розширенням й ускладненням розв'язку поставлених перед об'єктом задач;
- зменшенням ролі обслуговуючого персоналу, що займається технічним обслуговуванням, визначенням технічного стану, локалізацією несправності та ремонтом. Це обумовлено як все більшою складністю об'єктів, так і швидкістю, з якою з'являються нові технічні рішення з їх різноманітністю.

Істотною причиною, що ускладнює задачі діагностики, є переважаючий підхід до побудови СТО як децентралізованої системи. Це, з одного боку, дозволяє підвищити надійність об'єктів діагностування за рахунок того, що вихід з ладу одного модуля, як правило, не приводить до виходу з ладу решти модулів, але, з другого боку, істотно ускладнює контроль технічного стану системи в цілому. І не дивлячись на те, що цей підхід в більшості випадків себе виправдовує, особливо з точки зору економіки, проте з точки зору розробки автоматизованих систем технічного діагностування він обумовлює цілий ряд труднощів [3].

У найближчому майбутньому не варто чекати, що такий підхід себе живе. Це пов'язано, в першу чергу, із зростаючою спеціалізацією не тільки фірм, але і цілих країн, що призводить до ситуації, коли СТО комплектується модулями, виробленими в різних частинах земної кулі й

конструктор об'єкта часто навіть не знайомий з внутрішньою структурою модулів, не кажучи вже про повну інформацію про конструкцію модуля.

Широке розповсюдження отримало використання в складі СТО вбудованих систем контролю й діагностики (ВСКД) [54-56]. Вбудовані системи контролю й діагностики використовуються не тільки в авіації і сучасних зразках техніки й озброєння, але і в сучасній побутовій та автомобільній техніці. Контроль технічного стану систем, які мають в своєму складі модулі зі ВСКД, є складною науково-технічною задачею, що обумовлено цілим рядом чинників. Особливо варто відзначити складність оцінки показників охопту ВСКД устаткування СТО. Це пов'язано не тільки з використанням різними розробниками різних методик для оцінки устаткування, але і різною природою модулів (електричної, механічної, електронної і т.д.). Окрім цього, часто відсутня інформація про складність модулів, а задача порівняльної оцінки модулів з різною природою або комбінованих являється слабо вивченою. Крім того, використання ВСКД приводить у цілому ряді випадків до неможливості обслуговуючого персоналу отримати доступ до ряду систем без наявності спеціального устаткування. Усунення вище визначених недоліків систем контролю і діагностики дає можливість застосування сучасних інформаційних технологій.

Таким чином використання спеціальних програмно-апаратних систем для виконання операцій діагностики без застосування спеціальних засобів та сучасних інформаційних технологій не тільки дуже складне, але в деяких випадках взагалі неможливе. Технічна діагностика має два підходи до вирішення цієї проблеми. До першої віднесено рішення, в рамках яких розробляються спеціальні, призначені тільки для однієї моделі зовнішні системи діагностики. До другої, віднесено рішення, які припускають використання комплексу систем, орієнтованих на роботу з окремими модулями або універсальні вимірювальні засоби для контролю тих або інших параметрів.

Рішення, що ґрунтуються на першому підході, як правило, розробляються разом із СТО. Такий підхід має цілий ряд переваг:

- простота використання системи, внаслідок того, що автоматизовано велике число операцій;
- однозначність одержуваних результатів;
- спрощена взаємодія з самою системою та її автоматизованою системою технічного діагностування.

До недоліків такої системи слід віднести: збільшення вартості самих об'єктів за рахунок необхідності розробки спеціальних засобів контролю технічного стану і діагностики. Така розробка вимагає цілого ряду операцій (наладка, підготовка виробництва, виробництво і т.д.), що, при невеликих об'ємах виробництва таких систем, приводить до істотного зростання їх питомої частки у вартості об'єктів. Прагнення ж до зменшення цієї питомої частини приводить до недосконалості цих систем. Тому ці системи значно дорожчі, не дуже надійні, але і не вимагають високої кваліфікації обслуговуючого персоналу.

Рішення, що ґрунтуються на другому підході, з використанням більш універсальних, а значить більш дешевих і надійних пристроїв, висувають підвищені вимоги до кваліфікації обслуговуючого персоналу. Оскільки, такі пристрої дозволяють тільки отримати інформацію про характеристики системи, але не мають напрацьованих алгоритмів їх обробки, надаючи цю можливість персоналу. Враховуючи велику різноманітність технічних рішень, які використовуються в СТО, підготовка технічного обслуговуючого персоналу є дуже дорогим і трудомістким процесом. Таким чином, зменшення вартості устаткування компенсується підвищенням витрат на підготовку персоналу, а також на компенсацію наслідків так званого «людського чинника», тобто помилок персоналу. Передбачається, що рішенням цієї проблеми могло б бути використання експертних систем.

Ускладнення технічних об'єктів вимагає підвищення уваги до систем технічного діагностування. Існуючі підходи до реалізації систем технічного

діагностування не відповідають сучасним вимогам до цього класу систем. Вимоги до персоналу, який зайнятий діагностикою об'єктів, досягли рівня, задовольняти який може дуже обмежена кількість спеціалістів.

Тому, актуальними являються дослідження перспективних напрямів розвитку автоматизованих систем технічного діагностування багаторівневих об'єктів на основі застосування сучасних інформаційних технологій для отримання та обробки діагностичної інформації.

Сформулюємо вимоги до ідеальних автоматизованих систем технічного діагностування багаторівневих об'єктів. Головна вимога полягає в тому, що система повинна забезпечувати повністю об'єктивний контроль технічного стану і локалізувати несправності до рівня нерозбірної конструкції (до елемента). Крім цього автоматизована система технічного діагностування СТО повинна:

- 1) бути універсальною, тобто мати можливості контролювати технічний стан і локалізувати несправність об'єктів різних моделей різних виробників;
- 2) мати інтуїтивний інтерфейс взаємодії з обслуговуючим персоналом;
- 3) мати можливість безпосередньо підключатися до об'єктів для подачі тестових впливів;
- 4) мати напрацьовані алгоритми обробки діагностичної інформації;
- 5) мати можливість обмінюватися інформацією з аналогічними системами;
- 6) мати можливість збирати, аналізувати і зберігати статичну інформацію про несправності об'єктів і їх складових частин;
- 7) використовувати умовні алгоритми діагностики, тобто діяти на основі припущень про технічний стан складових частин об'єктів;
- 8) мати можливість формулювати припущення про технічний стан об'єктів в цілому і їх складових частин, на основі статичних даних, інформації про внутрішній пристрій об'єктів і їх складових частин, а також

отриманих, в результаті взаємодії із об'єктами, даних;

9) бути здатною проводити прогноз технічного стану об'єктів і їх складових частин;

10) мати можливість доступу та взаємодії з існуючими пошуковими системами.

Існуючі інформаційні технології, технічна і теоретична база дозволяють реалізувати вказані вимоги. Розглянемо можливості реалізації даних вимог.

Універсальність системи забезпечується:

– можливістю підключення до модулів для вимірювання тих або інших характеристик систем, що забезпечується наявністю універсальних інтерфейсів;

– наявністю універсальних алгоритмів отримання, обробки і управління діагностичною інформацією;

– наявність інтуїтивного інтерфейсу людина-машина сьогодні не є скільки-небудь серйозною проблемою. Складність даного питання знаходиться в чисто технічному і нормативному руслі; використання стандартних блоків в різних об'єктах і розробка міжнародних рекомендаційних стандартів дозволяє говорити про можливість створення таких інтерфейсів;

– обмін інформацією між комп'ютерними системами в Інтернет є напрямом розвитку програмного забезпечення, що сьогодні динамічно розвивається і досяг достатнього рівня, щоб дозволити реалізувати будь-яку задачу такого плану (XML, EJB, Corba, Servlets, SOAP);

– зберігання великих обсягів діагностичної інформації вже давно не є проблемою, а її статистична обробка є суто програмною задачею, розв'язання якої не викликає сумнівів;

– наявність алгоритмів отримання, обробки і управління діагностичною інформацією є вимогою часу і викликане необхідністю скорочення часу діагностики; труднощі реалізації даного питання викликані

в першу чергу складністю формування самих алгоритмів; для отримання універсального і адаптивного розв'язку цієї задачі необхідно мати діагностичні моделі;

– складність побудови діагностичних моделей пов'язана, перш за все, з неможливістю існуючого теоретичного апарату розв'язати задачу автоматичного синтезу моделі; в усіх існуючих теоріях побудови діагностичних моделей основною проблемою також є проблема автоматизації процесу моделювання в тому або іншому вигляді залежно від того, як це подається в рамках цих теорій;

– вирішення питання автоматизації прогнозування технічного стану також неможливе без теорії автоматичної побудови діагностичних моделей.

Одним із перших методів для вирішення завдань технічної діагностики складних систем управління з великим числом елементів електроніки і автоматики стала теорія розпізнавання образів [84-86]. Велику кількість робіт в області технічної діагностики присвячено завданням класифікації та розробки алгоритмів розпізнавання стосовно області контролю і локалізації дефектів. Алгоритми розпізнавання в технічній діагностиці частково ґрунтуються на діагностичних моделях, що встановлюють зв'язок між станами технічної системи та їх відображеннями у просторі діагностичних сигналів. Важливою частиною проблеми розпізнавання є правила прийняття рішень (вирішальні правила) [57, 58].

Вирішуючи завдання технічної діагностики, необхідно брати до уваги специфіку функціонування технічних систем, розглядаючи їх як об'єкти моделювання. Всі множини моделей, згідно [59], можна розділити на такі групи: безперервні моделі, що представляють об'єкт або процеси, які протікають будучи мінливими в часі, що є аргументом певних функцій. Це алгебраїчні або диференціальні лінійні і нелінійні рівняння, функції передачі і т.п.

Дискретні моделі, що визначають стан об'єкта діагностування для послідовності дискретних значень часу, як правило, без урахування

характеру протікають в проміжках процесів. Дані моделі зазвичай представляються звичайно-різницеvими рівняннями або кінцевими автоматами і використовуються для опису цифрових та імпульсних пристроїв.

Гібридні моделі описують реальні об'єкти, що включають пристрої як безперервної, так і дискретної дії. Під технічним станом [26, 60] розуміють стан, який характеризується в певний момент часу, за певних умов зовнішнього середовища, значеннями параметрів, установлених технічною документацією на об'єкт.

Методи визначення станів, зумовлені виникненням дефектів, в технічній діагностиці поділяються на методи, що забезпечують розрізнення дефектів у технічних засобах безперервної дії та методи, що забезпечують розрізнення дефектів в об'єктах дискретної дії.

Методи обробки безперервних моделей, як відомо, базуються на допустимих способах контролю. Це означає, що технічними умовами обумовлені межі значень вимірюваного параметра, і вихід параметра за встановлені межі означає наявність дефекту. Відповідно до цього підходу будь-який пристрій безперервної дії незалежно від його специфіки функціонування можна представити математичною моделлю логічного типу, побудованою за відомими правилами [45].

При переході до логічної моделі кожному функціональному блоку у відповідність поставлено логічний блок, який повинен задовольняти умовам: мати тільки один вихід (число входів не обмежене); якщо функціональний блок об'єкта має декілька виходів, його розщеплюють на число блоків, що дорівнює кількості виходів (при цьому для кожного розщепленого логічного блоку залишаються тільки істотні входи, які впливають на даний вихід). Перший опис логічної моделі, її суворо формалізація і доказ однозначної відповідності між досліджуваним об'єктом і моделлю були приведені в роботах [44, 45, 63]. Логічні моделі будуються таким чином: кожному функціональному блоку поставлено у

відповідність сукупність логічних блоків. При цьому вихід кожного логічного блоку характеризується тільки одним параметром, і залишаються тільки входи, що формують даний вихід. З одного боку, моделі логічного типу прості, що, безсумнівно, є їх перевагою [45]. З іншого боку, застосовуючи логічні моделі при діагностуванні об'єктів, що містять контури зворотних зв'язків, можна визначити дефект тільки з точністю до групи компонентів, що входять до контуру зворотних зв'язків. Якщо об'єкт діагностування не можна представити блоковою структурою, то в якості моделі використовується граф причинно-наслідкових зв'язків, побудований в просторі властивостей об'єкта. Кожній вершині графа поставлено у відповідність той чи інший параметр системи, що діагностується. Дуги графа представляють собою функціональні залежності між параметрами.

Математична природа цих двох моделей однакова, тому що в обох випадках еквівалентом граф-моделі є матриця суміжності, що задає структуру причинно-наслідкового зв'язку дефектів. Завдання побудови процедур діагностування об'єктів безперервної дії вирішуються на базі логічних моделей і графів причинно-наслідкових зв'язків.

Зазначимо, що для обробки логічної моделі і графа причинно-наслідкових зв'язків можна використовувати одні й ті ж методи, оскільки очевидно, що логічна модель, яка не містить багатоканальних блоків, може бути сприйнята як граф причинно-наслідкових зв'язків між вхідними, внутрішніми і вихідними параметрами об'єкту. Справедливо також зворотне: якщо при побудові графа причинно-наслідкових зв'язків виконано вимоги, які висувають до побудови логічної моделі, то від графу причинно-наслідкових зв'язків можна однозначно перейти до логічної моделі.

Робота [44] присвячена розробці алгоритму, що забезпечує розрізнення дефектів, як стійких, так і нестійких, в блокових об'єктах. Об'єкт представлений логічною моделлю, яка відображає причинно-наслідкові зв'язки, що існують в об'єкті за наявності в ньому дефектів. Аналіз логічної моделі проводять на підставі використання методів,

розроблених в [46]. Для забезпечення повного розпізнавання в розглянутій роботі запропоновано алгоритм, що дозволяє шляхом видалення мінімальної множини дуг зворотних зв'язків отримати модель об'єкта діагностування у вигляді спрямованого графа без контурів і петель. Далі обирають мінімальне число точок контролю, що дозволяє однозначно визначити місце дефекту. Завдання отримання мінімального числа точок контролю виставляють як завдання пошуку мінімального покриття таблиці функцій несправностей. Алгоритми обробки результатів, що знімаються в контрольних точках в процесі діагностування, при цьому не розглядаються. Перші кроки в розробці процедур діагностики технічних систем було зроблено в роботах [44-46, 49, 50, 59-68], де було закладено основи прикладної теорії надійності, контролю та діагностування об'єктів різної фізичної природи (механічних, електричних, гідравлічних і т.п. систем). Велика кількість робіт, викликана актуальністю завдань технічної діагностики, присвячена проблемам пошуку дефектів, однак складність розглянутих об'єктів при цьому обмежується можливостями розроблених методів. Так у перших роботах з технічної діагностики [49, 50, 64] наведено алгоритми, що дозволяють формалізувати процедуру вибору ефективних з точки зору забезпечення розпізнавання дефектів діагностичних параметрів. Алгоритм призначення сукупності діагностичних параметрів на базі математичного опису об'єкта у вигляді граф-моделі описаний в роботі [64]. У даній роботі розглядаються формальні методи обробки вихідної моделі: визначення дальності поширення впливу параметрів по графу, побудова робочої граф-моделі з первинної. Кожна вершина графа оцінюється складовим показником, який враховує витрати при організації контролю. Знаходять підмножину вершин граф-моделі об'єкта діагностування, яка визначає сукупність діагностичних параметрів. Після цього знаходять відповідність симптомів дефектів. Обрані подібним чином діагностичні параметри є попередніми, а тому їх число можна скоротити. Остаточний перелік параметрів, які підлягають контролю, визначається застосуванням

того чи іншого методу розпізнавання образів. Алгоритм мінімізації числа точок знімання інформації, що забезпечує розпізнавання технічного стану об'єкта дослідження, описаний в роботі [52]. Він дозволяє знайти мінімальну підмножину, враховуючи структуру граф-моделі. Згідно з методом, спочатку будується матриця суміжності, потім таблиця для формування зовні стійкої підмножини вершин граф-моделі. У побудованій таблиці виділяються ключові вершини, тупикові вершини і вершини, які відображаються у вершинах, які вже входять до шуканої підмножини. Проводиться алгебраїчний аналіз інформативності окремих вершин. Найбільш інформативна вершина включається до підмножини. Проводиться заповнення таблиці, з якої в подальшому виділяється мінімальна зовні стійка підмножина вершин граф-моделі об'єкта діагностування. У роботі також проводиться огляд існуючих алгоритмів мінімізації і в порівнянні їх з запропонованим методом визначається його ефективність. Однак слід зазначити, що розглянутий алгоритм не гарантує однозначної ідентифікації дефекту конструкції.

Завдання технічної діагностики отримали подальший розвиток у роботах [65-67], які присвячені пошуку одиничних несправностей. Алгоритм, заснований на використанні матриці шляхів упорядкованого графа, що представляє собою логічну модель об'єкта діагностування для забезпечення розпізнавання одиничних дефектів запропоновано в роботі [71]. Застосування цього алгоритму дозволяє повністю формалізувати пошук дефекту в об'єктах невисокої складності. Але для забезпечення розпізнавання дефектів та аналізу технічного стану складного об'єкта діагностування використання матриці шляхів обмежує можливості даного алгоритму, оскільки розмірність матриці шляхів залежить від структури об'єкта і може значно перевищувати розмірність матриці суміжності, що представляє собою еквівалент логічної моделі об'єкта діагностування. Метод доповнення відомої множини точок контролю, необхідного для пошуку одиничної несправності, мінімальною множиною запропоновано в

роботі [66], причому отримана сумарна множина точок контролю дозволяє визначити дефекти будь якої кратності. Розглянутий алгоритм так само, як і алгоритм [65], будується на основі матриці шляхів, а тому успадковує всі його недоліки. У роботі [66] для об'єктів, заданих у всіх технічних станах за допомогою аналітичних виразів їх вихідних функцій, забезпечення ідентифікації несправних технічних станів запропоновано виконувати за допомогою функцій, які виконують розпізнавання. Набори, що розпізнають дві булеві функції, тобто набори значень вхідних параметрів, на яких значення аналізованих булевих функцій різні, збігаються з наборами так званої функції розпізнавання, що представляє собою суму за модулем двох булевих функцій, розпізнавання яких необхідно забезпечити. Для пристроїв великої розмірності обчислення робочих наборів розпізнавання функції часто виявляється тяжким, і, навіть, неможливим. Розглядають методи побудови діагностичних тестів для вирішення завдань пошуку дефектів у комбінаційних пристроях, засновані на використанні діагностичних словників. Повний діагностичний словник повинен містити значення виходів комбінаційного пристрою за всіх можливих дефектів на всій множині вхідних наборів пристроїв. За збігом фактичних вихідних значень випробуваного пристрою зі значеннями, записаними в діагностичному словнику, визначають технічний стан випробуваного об'єкта. Повний діагностичний словник по суті являє собою не що інше, як таблицю функцій несправностей. Таким чином, всі недоліки, властиві методам побудови діагностичних тестів для комбінаційних пристроїв на основі використання таблиці функцій несправностей, притаманні і методам, заснованим на використанні діагностичних словників.

У роботах [58, 67, 70, 72-74] представлено подальший розвиток методів вирішення завдань з побудови процедур локалізації місця дефекту в об'єкті діагностування. У роботі [70] наведено алгоритми для вирішення завдань побудови безумовних процедур діагностування. При цьому витрати на проведення перевірок передбачено рівними, а подача всіх вхідних

впливів – одночасною. На базі цієї роботи сформовано практичні методики вибору діагностичних параметрів [68, 69], які застосовують в інженерній практиці.

Вирішення завдань оптимізації послідовних процедур діагностування об'єктів наведено в роботах [58, 66, 70, 72-74]. При цьому діагностування пропонується здійснювати шляхом послідовної перевірки блоків до виявлення несправного. Для ефективного контролю технічного стану питання забезпечення контролепридатності об'єктів діагностування необхідно вирішувати якомога раніше – на стадіях розробки і проектування об'єктів. Ці питання успішно вирішено в роботах [53, 54, 74-86]. Запропоновано систему показників [75, 76], що дозволяють оцінити рівень контролепридатності об'єкта діагностування на стадії його проектування, що дозволяє цілеспрямовано змінювати структуру об'єкта діагностування з метою його пристосованості до робіт з контролю технічного стану в процесі експлуатації. При цьому запропоновано порівнювати показники контролепридатності об'єкта, що розробляють, з еквівалентними базовими показниками, обумовленими раніше створеними об'єктами-аналогами. При вирішенні завдань оптимізації контролепридатності в якості заходів забезпечення контролепридатності запропоновано використовувати коефіцієнт глибини пошуку дефекту [108, 79], який однозначно визначає частку дефектів однорозпізнання. З цією метою використовують матрицю перевірок, побудовану на множині контрольних точок, а коефіцієнт глибини пошуку визначають часткою її стовпців, які розрізняються. Даний показник використовують в роботах [76-82], де вирішуються завдання його максимізації на заданому числі додаткових точок контролю. У роботі [78] введено обмеження на ресурси і вирішено завдання визначення коефіцієнта глибини пошуку дефекту, при якому сумарні витрати на перевірку і ремонт об'єкта будуть мінімальними.

Однак, необхідно зауважити, що використання в якості оцінки контролепридатності коефіцієнта глибини пошуку кратного дефекту не

дозволяє встановити ступінь розрізнення дефектів на вихідній множині діагностичних параметрів і цілеспрямовано змінити структуру об'єкта для поліпшення його діагностування. Цей недолік усунуто в роботі [79]. Тут запропоновано визначати кількісно глибину діагностування як середнє число конструктивних блоків, з точністю до якого здійснюється пошук дефектів. Такий підхід до кількісної оцінки глибини діагностування істотно розширює практичні можливості синтезу контролепридатних об'єктів.

У роботах [84-88] вирішуються завдання призначення точок контролю і побудови процедур пошуку дефектів по матриці перевірок. Перевагами даних методів є їх вдала алгоритмізація, що дозволяє автоматизувати процес вирішення завдань діагностики. Методи базуються на аналізі матричних моделей графа, що представляє об'єкт дослідження – матриць суміжності і досяжності, і дозволяють визначити глобальний оптимум цільової функції. Істотний недолік даних точних методів отримання розв'язків – застосування їх до об'єктів з невеликим числом можливих станів. Крім того, для локалізації дефектів використовується повна сукупність перевірок на заданій множині контрольних точок, яка є надлишковою для багатовхідних об'єктів за можливості почергової подачі тестових впливів та збільшує витрати на діагностування.

Розвиток методів забезпечення контролепридатності шляхом призначення контрольних точок у складних об'єктах діагностування великої розмірності отримав розвиток в роботах [89-92], де запропоновано використовувати методи еволюційного моделювання та генетичні алгоритми. У роботі [91] розроблено символну модель кодування допустимих рішень і запропоновано ефективний метод призначення контрольних точок з використанням генетичного алгоритму. Проведено адаптацію генетичних алгоритмів до вирішення завдань забезпечення контролепридатності відновлюваних безперервних технічних систем за критеріями глибини пошуку, часу відновлення за наявності обмежень на зону допустимих рішень. Розроблений метод успішно вирішує завдання

призначення контрольних точок у завданнях високої складності. Однак, при цьому, не розглянуто питання обробки знятої діагностичної інформації в контрольних точках з метою локалізації місця дефекту.

Роботи [93-96] присвячені розробці методів організації відмовостійкості та аналізу надійності обчислювальних систем.

У роботі [93] проводиться порівняльний аналіз методів забезпечення відмовостійкості комп'ютерних систем на основі використання частково відмовлених обчислювальних модулів, що в початковому стані володіють багатофункціональністю. Підхід засновано на функціональній реконфігурації системи після виявлення відмов. Показано переваги забезпечення надійності та відмовостійкості систем з багатофункціональних обчислювальних модулів на основі динамічного розподілу запитів, що в порівнянні з функціональною реконфігурацією дозволяє підвищити як відмовостійкість, так і продуктивність системи.

Робота [95] розглядає організацію динамічного розподілу запитів в обчислювальних системах з модулів, що володіють багатофункціональністю і здатних до збереження частини початкових функцій після відмов. Запропоновано багаторівневу модель забезпечення відмовостійкості систем при динамічному розподілі запитів, на основі якої проведена систематизація. У роботі [96] оцінено ефективність підвищення відмовостійкості обчислювальних систем на основі динамічного розподілу запитів залежно від конфігурації обчислювальних вузлів і співвідношення складності процесорних модулів, мережевих адаптерів, функціональних модулів та обладнання розподілу запитів, а також затримок перерозподілу запитів через магістраль. Представлено залежності, що дозволяють оцінити ефективність і визначити зону доцільності підвищення відмовостійкості обчислювальних систем.

У роботі [97] запропоновано модифікацію функції перманенту матриці, що дозволяє проаналізувати надійність відмовостійкості систем з функціональною реконфігурацією, що передбачає перерозподіл функцій

багатофункціональних модулів, закріплюючи за кожним з них виконання заданого числа типів функцій, при виділенні на кожен тип функції одного модуля.

Роботи [98, 99] присвячено методам контролю та корекції помилок комп'ютерних обчислень. Можливість створення ефективної системи контролю помилок комп'ютерних обчислень на основі теорії кодування і модулярної алгебри оцінено в роботі [98]. Представлено методи та алгоритми, що дозволяють коригувати одиничні та виявляти багаторазові помилки. Розглянуті методи і алгоритми характеризуються слабкою обчислювальною складністю і здатністю виявлення не тільки помилок, але і адитивних переповнень.

У роботі [99] представлено методи корекції помилок комп'ютерних обчислень на основі відомої з теорії чисел системи відрахувань. Дані методи відрізняються тим, що вони не використовують досить трудомістку процедуру розширення вихідної системи обчислень, характеризуються слабкою обчислювальною складністю і, таким чином, можуть вважатися кращими для застосування у інформаційних і обчислювальних системах певних класів. Ряд робіт [100-102] присвячений діагностиці та власному діагностуванню різних технічних систем.

У статті [100] викладено принцип діагностики лінійних систем методом комплементарного сигналу, описано алгоритми розрахунку, досліджено діагностичні властивості методу на прикладі діагностування електричного кола. Запропоновано нову модифікацію процедури пошуку одноразових дефектів, засновану на аналітичному підході до побудови годографів несправностей, за якою у якості діагностичних ознак використовують коефіцієнти характеристичного рівняння перевірки системи. У роботі [102] описано деякі способи формування швидкодіючих моделей діагностики основних технологічних процесів на ядерних енергетичних реакторах. Це особливим чином виконана дискретизація неперервної моделі, це редукція складної моделі до спрощеної та подання

вихідної моделі в розрідженому форматі. Роботи [100, 101] містять описи методів системного діагностування відмов у цифрових системах.

У роботі [131] представлено організацію розподіленого власного діагностування технічного стану компонентів (модулів і ліній зв'язку) цифрових систем, що використовує діагностичну модель Барсі, Грандоні, Маєстріні. Складовими частинами організації власного діагностування є наступні процедури: виконання справним модулем функцій перевіряючого модуля; знаходження шляху від одного справного модуля до іншого справного модуля; обробка та дешифрування результатів виконаних перевірок. У роботі наведено приклади власного діагностування компонентів, які відмовили в 4-вимірному гіперкубі, які ілюструють особливості розроблених процедур.

Робота [132] присвячена розробці підходу до власного діагностування при виникненні відмови в цифрових системах, в основу якого покладено принцип розширення сфер. Допускаються стійкі кратні відмови обмеженого числа компонентів, причому за час діагностування може виникнути ще одна відмова. Для виявлення відмови та отримання достовірного діагнозу запропоновано використовувати дворазовий запуск процесу власного діагностування з порівнянням результатів обох запусків. У роботі розглянуто приклад реалізації процесу власного діагностування 9-модульною системою. У роботах [103, 104] запропоновано вирішення завдань виявлення і локалізації одиничних несправностей в off-line режимі для апаратно реалізованих схем шифрування заснованих на новому криптографічному примітиві блок-керованих перестановок. Отримані результати встановлюють верхні оцінки складності виявлення і локалізації несправностей в off-line режимі для апаратних реалізацій високошвидкісних блокових шифрів. Побудовано тести, які можна застосовувати також для виявлення і локалізації кратних несправностей.

Слід зазначити, що структура інформаційно-обчислювальних систем являє собою складну ієрархічну сукупність різних технічних і програмних

підсистем, блоків та елементів, взаємодія яких реалізується через множину зв'язків між ними і є технічною реалізацією множини функцій, виконуваних системою. Розглянуті вище методи забезпечення відмовостійкості обчислювальних систем вирішують, як правило, локальні завдання в даній складній ієрархії. Проте небезпека полягає не тільки в тому, що системи складного рівня не будуть функціонувати через відмови, збої, а й у тому, що недостовірною робота систем може призвести до катастрофічних наслідків.

Таким чином, проведений аналіз робіт у сфері діагностування технічних систем показав відсутність загального підходу до побудови ефективних моделей, методів і алгоритмів контролю поточного стану і діагностування причин непрацездатності або виникнення передаварійних ситуацій в складних системах з великим числом можливих станів. При цьому ступінь гостроти проблеми забезпечення необхідної надійності постійно збільшується у зв'язку із зростанням конструктивної складності і часто надзвичайної небезпеки унікальних систем для навколишнього середовища і людини. Тому, розробка нових методів контролю та діагностики складних об'єктів, що представлені логічними моделями стану системи, є важливим і актуальним завданням на даний час.

1.3. Аналіз наукових розробок в галузі діагностування багаторівневих технічних систем

При спробах подальшого вдосконалення систем діагностування доцільно застосовувати алгоритми послідовного аналізу та відсіювання варіантів, що, у свою чергу, вимагає перетворення логічних моделей діагностування до комбінаторних форм, що і запропоновано в роботі [24].

Складність побудови діагностичної моделі багаторівневого об'єкту на множині можливих дефектів, що враховує причини і наслідки їх прояву, вимагає ретельного аналізу умов їх експлуатації, виявлення всіх факторів, що впливають на якість виконання поставлених завдань. Сучасні технічні об'єкти, що включають в себе велику кількість різномірних елементів –

техніку, програмне забезпечення, інформаційні масиви, людський фактор, в значній мірі відрізняються як за характером відмов, так і за прийомами і методами їх виявлення та усунення. При цьому очевидно, чим ретельніше і ширше завдання діагностування вирішується на стадіях проектування, тим повніше питання діагностування будуть реалізовані при експлуатації.

У зв'язку з цим в роботі приділено увагу дослідженню причин і характеристик несправностей сучасних технічних систем, що дозволило скласти їх загальну класифікацію. З метою встановлення критеріїв несправностей складають перелік ознак або параметрів, за якими може бути виявлений факт виникнення кожної несправності. Даний етап аналізу та встановлення можливих несправностей, причин їх виникнення, а також викликаних ними наслідків передбачає побудову логічних моделей діагностування складної системи.

Результати технічного діагностування дозволяють прогнозувати надійність об'єкта на найближчий період. Рішення в цьому випадку приймають у відповідності з наявними моделями відмов і дефектів. За своїм типом несправності поділяються на несправності функціонування, коли виконання об'єктом основних функцій, що визначають його працездатність, припиняється, та параметричні несправності, при яких деякі параметри об'єкта змінюються в неприпустимих межах, що також переводить об'єкт у непрацездатний стан. Природа несправностей може бути випадковою, зумовленою непередбачуваними перевантаженнями, дефектами матеріалу, помилками персоналу або збоями системи керування, або систематичною, зумовленою закономірними і немінучими явищами, що викликають поступове накопичення ушкоджень (втома, зношення, старіння, корозія, тощо). Повнота обліку дефектів у моделі залежить від проведеного аналізу причин і характеру їх виникнення, дослідження наслідків несправностей і характеру їх усунення, прогнозування часу їх виникнення, можливості подальшого використання об'єкта за призначенням за наявності дефектів.

Стратегії контролю та діагностування повинні враховувати характер виникнення несправностей [11-13]. При раптових несправностях, що виявляються у різкій (миттєвій) зміні характеристик (параметрів) об'єкта, зазвичай не спостерігають попередньо видимих ознак їх наближення. Раптова відмова характеризується незалежністю моменту виникнення від часу попередньої роботи. Поступові відмови, наступають в результаті тривалого, поступового погіршення параметрів об'єкта, їх можна уникнути шляхом своєчасного застосування процедур діагностування технічного стану об'єкта.

На рисунку 1.4 представлено класифікацію несправностей за основними ознаками, яку було отримано в результаті проведеного аналізу джерел [16-17, 51, 65, 88], у яких ця проблема отримала належну увагу.

При розробці системи діагностування, як правило, орієнтуються, насамперед, на наявні моделі відмов, властиві проектуваному об'єкту. Наведена класифікація дефектів і відмов дозволяє проектувальникам і розробникам системи контролю та діагностування виявити різноманітність причин і множинний характер їх виникнення, не пропустивши при цьому досить важливих моментів. Ефективність вирішень залежить від ретельного аналізу та обліку дефектів, що виникають на всіх етапах життєвого циклу складного технічного об'єкта.

Ступінь повноти виявлення можливих несправностей у процесі життєвого циклу об'єкта, причин, що призводять до аварійних ситуацій, значною мірою впливає на ефективність діагностичної системи і, відповідно, на якість розв'язуваних об'єктом діагностування завдань.

Тільки після цього слід переходити до вирішення питань забезпечення контролепридатності проектуваної системи відповідно до проведеного аналізу. В даний час при проектуванні і створенні контролепридатних технічних об'єктів досить велику увагу приділяють призначенням мінімальних сукупностей діагностичних ознак в моделі об'єкта для визначення технічного стану системи. Причому такого роду діагностична

інформація часто визначає тільки працездатність системи, але не дозволяє ефективно визначати характер дефекту. Слід відзначити відсутність належної уваги до побудови ефективних процедур обробки великих масивів діагностичної інформації з метою локалізації і, можливо, вже в процесі роботи, без переходу в режим відновлення, усунення несправностей, що виникли, та які можуть призвести до відмови всієї системи.

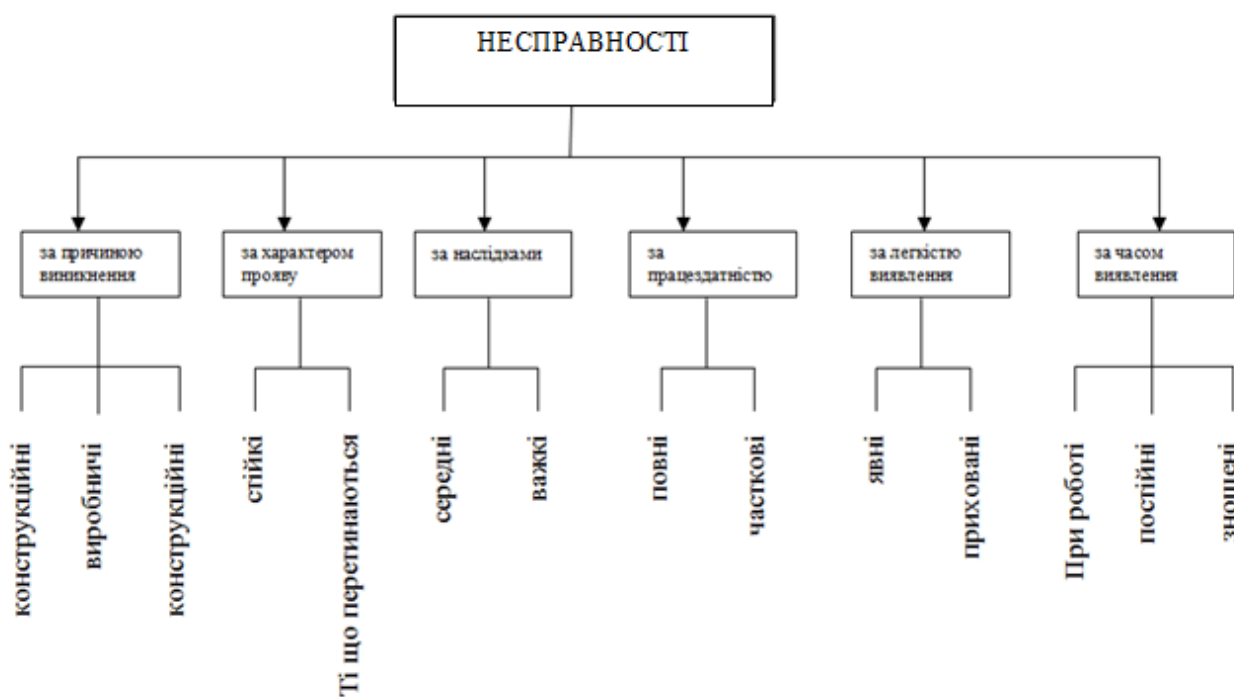


Рис. 1.4. Класифікація несправностей за ознаками

При виборі засобів діагностики виникає питання, пов'язане з параметрами об'єктів, що діагностуються. Якщо діагностується однотипне обладнання тривалого режиму роботи з невеликими відхиленнями по конструкції, частоті обертання, масі, габаритам і умовам експлуатації перевагу слід віддати системам поглибленої діагностики на основі багатоканальності і використання експертних систем.

Використання експертних систем напряму пов'язано з такою областю як штучний інтелект. Областю застосування методів і систем штучного

інтелекту у сфері діагностики є розв'язання задач, що не формалізуються або слабо формалізуються.

Причинами неформалізованості задач діагностики можуть бути такі чинники:

- складність і численність функціональної залежності в об'єкті діагностики;

- необхідність врахування при виробленні управлінських рішень випадкових чинників, зовнішніх і внутрішніх збуджуючих дій стохастичного характеру;

- неоднозначність причинно-наслідкових зв'язків між управлінськими рішеннями і результатами їх практичної реалізації;

- неможливість кількісного вимірювання контрольованих параметрів (в цьому випадку використовуються їх якісні оцінки, а математичний апарат ухвалення рішень базується на таких категоріях, як нечітка логіка, розмиті або розпливчаті множини);

- неповнота, суперечність інформації про ОД та ін.

В подібних випадках побудова строгих математичних моделей для задач діагностики або достатньо адекватних імітаційних моделей керованих процесів складно або взагалі неможливо. Замість них доцільно будувати логічні моделі об'єкта. Подібні моделі розробляються на основі узагальнення досвіду найдосвідченіших фахівців в даній проблемній області, що виступають в ролі експертів [20, 21].

Тому системи штучного інтелекту називаються також експертними системами, а моделі що використовуються в них – моделями представлення знань про проблемну область.

Важливість систем, що базуються на методах штучного інтелекту, полягає в тому, що програмні продукти, які поєднують в собі технологію традиційного програмування з елементами штучного інтелекту, суттєво розширюють коло практичних задач, які можна розв'язувати за допомогою ПК, і їх розв'язок дає значний економічний ефект [105-108].

Експертні системи розглядаються залежно від їх застосування в двох аспектах – для розв’язку яких задач вони можуть бути використані і в якій області діяльності. Ці два аспекти накладають свій відбиток на архітектуру експертної системи, що розробляється.

Експертні системи, що базуються на логіці. У експертних системах, що базуються на логіці, база знань складається з тверджень у вигляді пропозицій логіки предикатів.

Експертна система, що базується на логіці, має множину правил, які можуть викликатися за допомогою даних з вхідного потоку. Система має також інтерпретатор, який може вибирати і активізувати модулі, що включаються в роботу системи.

Інтерпретатор виконує різні функції всередині системи на основі такої схеми:

1. Система має пропозиції в базі знань, які керують пошуком і порівнянням. Інтерпретатор порівнює ці пропозиції з елементами даних в базі даних.

2. Система отримує результати процесу уніфікації автоматично, тому вони можуть прямувати на необхідній пристрій виведення інформації.

Найбільш важливим аспектом для бази знань в системі, заснованій на логіці, є проектування бази знань, її тверджень і їх структури. База знань повинна мати недвозначну логічну організацію, і вона повинна містити мінімум надмірної інформації. Так само як і в системі, що базується на правилах, мінімальна достатня кількість даних утворює найбільш ефективну систему [108].

Експертні системи застосовуються для вирішення тільки важких практичних задач. За якістю і ефективністю розв’язку експертні системи не поступаються рішенням експерта-людини. Рішення експертних систем володіють „прозорістю”, тобто можуть бути пояснені користувачу на якісному рівні. Ця якість експертних систем забезпечується їх здатністю

міркувати про свої знання і висновки. Експертні системи здатні поповнювати свої знання в ході взаємодії з експертом.

Методи розв'язку завдань, засновані на зведенні їх до пошуку, залежать від особливостей області, в якій розв'язується завдання, і від вимог, що висуваються користувачем до розв'язку [11-15]. Особливості області розв'язку:

- об'єм простору, в якому належить шукати розв'язок;
- ступінь змінності області в часі і просторі (статичні і динамічні області);
- повнота моделі, що описує область, якщо модель не повна, то для опису області використовують декілька моделей, доповнюючих одна одну;
- визначеність даних про завдання, що розв'язується, ступінь точності (помилковості) і повноти (неповноти) даних.

Вимоги користувача до результату завдання, що розв'язується за допомогою пошуку, можна характеризувати:

- 1) кількістю розв'язків: один розв'язок, декілька розв'язків, всі розв'язки;
- 2) властивостями результату: обмеження, яким повинен задовольняти отриманий результат;
- 3) і (або) способом його отримання.

Існуючі методи розв'язку завдань, що використовуються в експертних системах, можна класифікувати таким чином:

- методи пошуку в одному просторі – методи, призначені для використання в наступних умовах: області невеликої розмірності, повнота моделі, точні і повні дані;
- методи пошуку в ієрархічних просторах – методи, призначені для роботи в областях великої розмірності;
- методи пошуку при неточних і неповних даних;

– методи пошуку, що використовують декілька моделей, призначені для роботи з областями, для адекватного опису яких однієї моделі недостатньо.

Припускається, що перераховані методи при необхідності повинні об'єднуватися для того, щоб дозволити розв'язувати завдання, складність яких зростає одночасно по декількох параметрах.

Пошук рішень в одному просторі. Методи пошуку рішень в одному просторі зазвичай поділяють на:

- пошук у просторі станів;
- пошук методом редукції;
- евристичний пошук;
- пошук методом „генерація-перевірка”.

Пошук в просторі станів. Завдання пошуку в просторі станів зазвичай формулюється в теоретико-графовій інтерпретації.

Евристичний пошук. При збільшенні простору пошуку методи сліпого пошуку вимагають надмірних витрат часу і (або) пам'яті. Це привело до створення евристичних методів пошуку, тобто методів, що використовують деяку інформацію про наочну область для розгляду не всього простору пошуку, а таких шляхів в ньому, які з найбільшою вірогідністю приводять до мети.

Пошук методом „генерація-перевірка”. Процес пошуку може бути сформульований в термінах „генерація-перевірка”. Для здійснення процесу пошуку необхідно генерувати черговий можливий розв'язок (стан або підзадачу) і перевірити, чи не є він результуючим.

Пошук в ієрархії просторів. Методи пошуку в одному просторі не дозволяють розв'язувати складні завдання, оскільки із збільшенням розміру простору час пошуку експоненційно зростає. При великому розмірі простору пошуку можна спробувати розбити загальний простір на підпростори і здійснювати пошук спочатку в них. Простір пошуку

представлений ієрархією просторів. Методи пошуку розв'язку в ієрархічних просторах зазвичай поділяють на:

- 1) пошук у факторизованому просторі;
- 2) пошук у фіксованій множині просторів;
- 3) пошук у множині просторів, що змінюється.

Пошук у факторизованому просторі. Досить часто у прикладних задачах потрібно знайти всі розв'язки. Наприклад, встановлення діагнозу. Простір називається факторизованим, якщо він розбивається на підпростори (класи), що не пересікаються, частковими (неповними) розв'язками. При цьому по вигляду часткового розв'язку можна визначити, що він не приведе до успіху, тобто що всі повні розв'язки, утворені з нього, не приведуть до цільових рішень. Пошук у факторизованому просторі здійснюється на основі методу „ієрархічна генерація-перевірка”. Якщо простір пошуку вдається факторизувати, то пошук навіть в дуже великому просторі можна організувати ефективно.

Пошук у фіксованій множині просторів. Застосування методу факторизації простору обмежене тим, що для ряду областей не вдається по частковому розв'язку зробити висновок про його непридатність. Наприклад, завдання планування і конструювання. У цих випадках можуть бути застосовані методи пошуку, що використовують ідею абстрактного простору. Абстракція повинна підкреслити важливі особливості даного завдання, дозволити розбити завдання на простіші підзадачі і визначити послідовність підзадач (план розв'язку), що приводить до розв'язку основної задачі.

Пошук в множині ієрархічних просторів, що змінюється. У ряді випадків не вдається всі розв'язувані завдання звести до фіксованого набору підзадач. План розв'язку задачі в даному випадку повинен мати змінну структуру і не може бути зведений до фіксованого набору підзадач. Для розв'язку подібних завдань може бути використаний метод низхідного уточнення. Цей метод базується на таких припущеннях:

– можливо здійснити часткове впорядкування понять області, прийнятне для всіх завдань, які розв’язуються;

– рішення, що приймаються на верхніх рівнях, немає необхідності відмінити на більш нижчих.

Пошук в альтернативних просторах. Розглянуті вище методи пошуку виходять з умови, що знання про наочну область і дані про завдання є точними і повними і для них справедливо наступне:

– всі твердження, що описують стан, є істинними;

– застосування оператора до деякого стану формує деякий новий стан, опис якого складається тільки з дійсних фактів.

Проте при розв’язуванні будь-яких практичних завдань і особливо неформалізованих завдань поширена зворотна ситуація. Експертові доводиться працювати в умовах неповноти і неточності знань (даних) і, як правило, в умовах дефіциту часу. Коли експерт розв’язує задачу, він використовує методи, що відрізняються від формальних математичних міркувань. В цьому випадку експерт робить правдоподібні припущення, які він не може довести; тим самим питання про їх істинність залишається відкритим. Всі твердження, отримані на основі цих правдоподібних припущень, також не можуть бути доведені.

Отже, для того, щоб система могла робити висновки, засновані на здоровому глузді, при роботі з неповними (неточними) даними і знаннями, вона повинна бути здатна робити припущення, а при отриманні нової інформації, що показує помилковість припущень, відмовлятися як від зроблених припущень, так і від висновків, отриманих на основі цих припущень. Думка системи про те, які факти мають місце, змінюється в ході міркування, тобто можна говорити про ревізію думок. Таким чином, навіть якщо розглядати проблемну область як статичну, неповнота (і неточність) знань і даних спричиняє розгляд цієї області при різних (і навіть протилежних) припущеннях, що, у свою чергу, приводить до представлення

області у вигляді альтернативних просторів, відповідних різним, можливо, суперечливим і (або) взаємодоповнюючим припущенням і думкам.

Всі невдачі, що виникли при пошуку в одному напрямі, не запам'ятовуються при переході до пошуку в іншому напрямі. Та ж сама причина невдачі може знову виявитися і на новому напрямі. Здійснювати повернення доцільно не до попереднього стану, а до того, який є причиною виникнення невдачі. У використовуваних термінах причинами невдач є припущення, тобто недоказові твердження. Тому при виявленні невдачі необхідно повертатися в стан, де це припущення було зроблене, і випробовувати інше припущення.

Цей метод пошуку називають пошуком, що направляється залежністю.

Пошук з використанням декількох моделей. Всі методи пошуку, розглянуті вище, використовували при представленні проблемної області одну модель, тобто розглядали область з якоїсь однієї точки зору. При розв'язуванні складних завдань в умовах обмежених ресурсів використання декількох моделей може значно підвищити потужність системи [18, 19, 22]. Об'єднання в одній системі декількох моделей дає можливість подолати наступні труднощі:

- перехід з однієї моделі на іншу дозволяє обходити безвихідь, що виникає при пошуку в процесі розповсюдження обмежень;

- використання декількох моделей дозволяє у ряді випадків зменшити ймовірність втрати вірного розв'язку (наслідок неповного пошуку, викликаного обмеженістю ресурсів) за рахунок конструювання повного розв'язку з обмеженого числа часткових кандидатів шляхом їх розширення і комбінації;

- наявність декількох моделей дозволяє системі справлятися з неточністю (помилковістю) даних.

Слід зазначити, що використання декількох моделей вимагає додаткових знань про те, як створювати і об'єднувати різні точки зору.

Вибір методу розв'язування задачі залежить перш за все від складності завдання, яке визначається особливостями проблемної області і вимогами, що висувуються користувачем до розв'язку задачі. Для подолання труднощів, викликаних великим простором пошуку, використовуються методи, засновані на введенні ієрархії просторів (конкретних, абстрактних і метапросторів). Простий з цих методів ґрунтується на факторизуємості простору розв'язків, що дозволяє проводити раннє відсікання. Метод забезпечує отримання всіх рішень. Якщо простір пошуку не вдається факторизувати, але при цьому не потрібно отримувати всі розв'язки або вибирати кращий, то можуть бути застосовані методи, що використовують ієрархію однорідних абстрактних просторів, якщо простір пошуку такий, що будь-яке завдання може бути зведене до відомого заздалегідь.

Ефективність цього методу визначається можливістю використовувати безповоротну стратегію. У випадку, якщо підзадачі взаємозалежні, тобто для розв'язку деякої підзадачі може бути потрібна інформація, що отримується іншою підзадачею, і підзадачі не можуть бути впорядковані, доцільно застосовувати принцип найменших звершень. Цей підхід дозволяє припиняти розв'язок підзадачі, для якої бракує інформації, переходити до розв'язку іншої підзадачі і повертатися до початкового завдання, коли відсутня інформація стане доступною (пошук в ієрархії просторів).

Для подолання труднощів, викликаних неповнотою і (або) неточністю даних (знань), використовують імовірнісні, розмиті і точні методи. Всі ці методи ґрунтуються на ідеї збільшення надійності шляхом комбінування фактів і використання метазнань про можливість комбінування фактів.

Для подолання неадекватності моделі проблемної області використовуються методи, орієнтовані на використанні декількох моделей. Ці методи дозволяють об'єднати можливості різних моделей, що описують проблемну область з різних точок зору. Крім того, використання декількох

моделей дозволяє зменшити вірогідність втрати вірного розв'язку, не зважаючи на неповноту пошуку, викликану обмеженістю обчислювальних ресурсів.

Необхідно зазначити, що в даний час технологія експертних систем використовується для розв'язку різних типів задач (інтерпретація, прогноз, діагностика, планування, конструювання, контроль, інструктаж, управління) в найрізноманітніших проблемних областях таких, як фінанси, нафтова і газова промисловість, енергетика, транспорт, фармацевтичне виробництво, космос, металургія, гірська справа, хімія, освіта тощо [105-108].

За останні роки все виразніше виявляються основні відмінності між системами управління і контролю складного технічного об'єкту, з одного боку, і системами їх діагностики, з іншого. Системи контролю, що є прообразом і складовою частиною сучасних систем моніторингу, використовують, як правило, найпростіші способи вимірювання основних фізичних величин. Діагностичні системи будуються з урахуванням необхідності отримання найбільшого об'єму інформації про об'єкт, що діагностується [109]. Саме тому для систем діагностики широко використовуються нові інформаційні технології, часто засновані на складних методах вимірювання і аналізу відмов у системі.

Методи і засоби оцінки технічного стану об'єктів розвивалися поетапно. Спочатку використовувалися засоби контролю різних параметрів, потім моніторингу, і, на останньому етапі, системи діагностики і прогнозу технічного стану. Впровадження кожної наступної системи дає користувачу нові можливості для переходу на обслуговування складних технічних об'єктів по фактичному стану.

Так, контроль дає інформацію про величини параметрів і зони їх допустимого відхилення. При моніторингу з'являється додаткова інформація про тенденції зміни параметрів в часі, яка може використовуватися і для прогнозу. Ще більший об'єм інформації дає діагностика, а саме, ідентифікацію місця, вигляду і величини дефекту.

Найбільш складна задача прогнозу розвитку дефекту, а не змін контрольованих параметрів, розв'язок якої дозволяє визначити залишковий ресурс або прогнозований інтервал безаварійної роботи.

В даний час під терміном моніторинг часто розуміється рішення всього комплексу процедур оцінки стану, але існуючі системи, які називають системами моніторингу, далеко не завжди вирішують питання ідентифікації дефектів і прогнозу їх розвитку. Тому надалі під терміном моніторинг слід розуміти контроль основних параметрів, виявлення тенденцій їх змін і прогноз розвитку контрольованих параметрів, а під терміном діагностика – ідентифікацію дефектів і прогноз їх розвитку [110].

Проблеми користувача систем моніторингу пов'язані з необхідністю інтерпретувати зміни стану об'єкта, що знаходяться і прогнозуються. Природною межею, що розділяє системи моніторингу і діагностики, міг би бути етап розподілу знайдених змін на дві групи, а саме, оборотні (зміна умов роботи об'єкту) і необоротні (дефекти). На жаль, жодна з систем моніторингу не вирішує повністю задачу такого розподілу. Тому системи діагностики повинні вступати в дію до того, як знайдені системою моніторингу зміни будуть розділені на групи оборотних і необоротних. У зв'язку з цим, однією з основних характеристик систем діагностики слід вважати глибину її інтеграції в систему моніторингу.

Іншою найважливішою характеристикою систем діагностики є необхідний ступінь підготовки оператора. За об'ємом діагностичної підготовки, що вимагається від оператора, системи можуть бути розділені на три групи [110].

Перша група – професійні системи діагностики, в яких оператор самостійно вибирає інформаційну технологію і засоби вимірювання. Знання і досвід оператора-експерта при використанні подібної системи повністю визначають глибину і достовірність діагнозу і прогнозу.

Друга група – експертні системи діагностики, що включають експертні програми, які містять відповіді на типові запити оператора, тобто

допомагають оператору ухвалювати рішення в певних ситуаціях. Експертні системи можуть застосовуватися операторами, що мають спеціальну підготовку, але не володіють знаннями і досвідом експертів.

Третя група – системи автоматичної діагностики. Вони будуються на методах, що дозволяють автоматизувати постановку діагнозу, формуючи для оператора програму вимірювань, і не вимагають від користувача спеціальної підготовки.

Діагностика технічного стану в реальному часі дозволяє перевести більшість відмов з категорії раптових в категорію поступових за рахунок раннього їх виявлення і сповіщення персоналу про несправність, яка вже існує і розвивається, хоча, можливо, поки не є небезпечною і не порушує працездатності об'єкту діагностики.

Досягнення безаварійності і безпеки складного технічного об'єкта можливо за наявності систем діагностики, що володіють рядом відповідних характеристик, перш за все, функціонально-невизначеною структурою, незалежною від типу обладнання, що діагностується, інваріантною експертною системою, високою швидкістю і достовірністю діагностики – не гірше (95-98)% [110-113].

Експертна система діагностування призначена для визначення технічного стану об'єктів діагностики фахівцями за допомогою обладнання.

Структура системи діагностики в реальному часі на основі знань включає наступні підсистеми: базу знань, підсистему виводу, що працює в реальному часі, підсистему попередньої обробки інформації в реальному часі – препроцесор інформації, різні підсистеми діагностики. Відповідно до встановленого рівня інтелектуальності ці підсистеми найчастіше організовують у вигляді ієрархічної структури [114].

Вищий рівень в цій ієрархії утворюють база знань і підсистема виводу. На даному рівні виконуються всі міркування вищої складності і здійснюються процедури ухвалення рішень, такі як визначення збоїв в роботі системи і діагностика ситуації. Машина логічного виводу – механізм

міркувань, що оперує знаннями і даними з метою отримання нових даних із знань і інших даних, що є в робочій пам'яті. Машина логічного виведення може реалізувати міркування у вигляді:

- дедуктивного виведення (прямого, зворотного, змішаного);
- нечіткого виведення;
- імовірнісного виведення;
- уніфікації;
- пошуку розв'язку з розбиттям на послідовність підзадач;
- пошуку розв'язку з використанням стратегії розбиття простору пошуку з урахуванням рівнів абстрагування розв'язків або понять, з ними зв'язаних;
- монотонного або немонотонного міркування;
- міркувань з використанням механізму аргументування;
- асоціативного пошуку з використанням нейронних мереж;
- виведення з використанням механізму лінгвістичної змінної [115].

Для цього, як правило, використовується програмно реалізований механізм дедуктивного логічного виводу (будь-який його різновид) або механізм пошуку розв'язку в мережі фреймів або семантичній мережі. В підсистемі виводу ухвалюється рішення в реальному часі на основі знань, що зберігаються в базі знань, і виходячи з поточного стану складного технічного об'єкту, який визначається препроцесором інформації. Останній складає другий рівень ієрархії. Його основна задача полягає в перетворенні „сирих результатів” вимірювань на об'єктах діагностики в деяку сукупність показників, які характеризують експлуатаційні якості системи. Нижній рівень в даній ієрархії займають підсистеми діагностики, призначені для роботи як в умовах нормального функціонування системи, так і в умовах впливу різноманітних випадкових чинників.

Застосування експертної системи з базою знань, незмінною в процесі експлуатації, можливо при достатньо стабільній протягом довгого часу предметної області, в якій розв'язуються задачі. Прикладами таких

предметних областей є розділи математичного аналізу, опис правил діагностики різних об'єктів.

Прикладами областей застосування, що вимагають гнучкості з боку створення і поповнення бази знань, є: планування виробництва, проектування і діагностика в області електроніки, обчислювальної техніки і машинобудування.

Системи діагностики на основі знань і класичні експертні системи дуже схожі один з одним. Проте є ряд суттєвих відмінностей між цими двома класами систем. Робота майже всіх експертних систем подібна процесу консультації.

Експертній системі задаються питання так само, як проводилися б консультації з людиною-експертом. Такі системи звичайно функціонують зовні реального часу, а людина при цьому завжди включається в контур ухвалення рішення і одержує необхідну інформацію відповідно до запиту [116].

Разом з тим системи діагностики на основі знань призначені для контролю і виявлення відмов в об'єкті, а не для забезпечення консультації по тій або іншій проблемі, що виникає в процесі функціонування. Така система працює в безперервному неінтерактивному режимі в реальному часі. При цьому вона взаємодіє власне з об'єктом, який діагностує, а не з людиною-оператором. Для безперервного контролю характеристик об'єкту система діагностики на основі знань використовує схеми попередньої обробки інформації. При виявленні якої-небудь аномалії в роботі системи підсистема виведення повинна автоматично входити в режим діагностики, в якій будуть локалізовані можливі причини аномалій. При цьому оператор системи діагностики на основі знань не включається в контур ухвалення рішення, а всі рішення приймаються автономно самою системою.

Експертні системи, що призначені для вирішення задач діагностики в реальному часі, можна розглядати як розповсюдження методів традиційних експертних систем на розв'язок задач діагностики складних технічних

об'єктів в реальному часі. При цьому моделювання стратегії діагностики об'єкту, прийнятої оператором, здійснюється в рамках нечіткої, або заснованої на правилах, методології, тобто правила, що використовуються, замінюють традиційні алгоритми діагностики. Таке моделювання базується на застосуванні якісних, логічних правил по вибору розв'язку в різних ситуаціях. Областю застосування цього підходу є задачі діагностики складних процесів, для яких або не існує відповідних формальних моделей, або ці моделі не адекватні процесу, який вони описують. Розв'язок подібних задач орієнтовано на представлення емпіричних знань про те, як повинен діагностуватися який-небудь конкретний об'єкт.

Одна з головних рис таких систем – застосування в підсистемі виводу методології, яка називається прогресивним міркуванням. Підсистема виводу розбиває весь процес міркування на декілька рівнів відповідно до їх складності. Виходячи з реалізованих обчислювальних функцій системи діагностики, самий верхній рівень виходить найменше трудомістким, і чим нижче розташований рівень, тим більш потрібні обчислювальні витрати і досягаються більш точні результати. Таким чином, процес ухвалення рішення, що протікає в реальному часі, підсистема виведення починає з верхнього рівня. Якщо дозволяє час, послідовно досягаються більш глибокі рівні для отримання більш точного розв'язку.

Системи експертної діагностики вимагають застосування методів експертних систем для контролю традиційних і адаптивних регуляторів. Тут знання, необхідні для ефективної настройки параметрів регуляторів, отримуються як у фахівців по системах діагностики, так і у операторів і потім поміщаються в базу знань у вигляді правил налаштувань [116]. В процесі функціонування системи характер поведінки об'єкта фіксується класифікатором образів. Підсистема виведення використовує правила налаштування і класифіковані образи для налаштування параметрів регуляторів.

Підхід, названий експертною діагностикою, застосовує методи експертних систем для розширення класу традиційних алгоритмів діагностики завдяки введенню загальних знань по діагностиці, евристичних методів настройки і адаптації в контролюючу експертну систему. Отримані таким чином системи експертної діагностики складаються з інтелектуальної комбінації різних алгоритмів діагностики, ідентифікації і контролю.

Для забезпечення допустимої якості функціонування таких адаптивних схем в більшості випадків повинні виконуватися певні обмежуючі умови, що накладаються на об'єкт діагностики. За допомогою методів експертних систем можна контролювати виконання подібних умов і здійснювати необхідні дії тоді, коли ці умови змінюються.

Експертна діагностика ближче до адаптивної, ніж методи діагностики, що використовують описані вище експертні системи, призначені для вирішення задач в реальному часі, у тому числі до методів нечіткої діагностики. Розвиток даного підходу долає недоліки, властиві сучасним адаптивним регуляторам, де потрібні апіорні знання про об'єкт діагностики. Експертна діагностика включає дві великі проблемні області. Першу з них визначає об'єм знань про об'єкт, яким необхідно розташовувати для того, щоб автоматично налаштувати регулятор і здійснити спостереження за об'єктом, а також технологію отримання цих знань, тобто про навчальну процедуру. Друга область – це відображення і використання знань.

Метод досягнення ідеальної мети експертної діагностики можна виразити як спробу включити досвідченого фахівця по діагностиці в контур діагностики, надавши йому можливість використовувати будь-які алгоритми діагностики, ідентифікації, контролю і створення системи діагностики. Експертна діагностика здійснюється в двох різних режимах функціонування – навчання і адаптації. Перша фаза режиму навчання є постановкою питань, коли користувач може пропонувати свої апіорні

знання про об'єкт і про характеристики контуру діагностики. Якась частина первинних знань про об'єкт завжди доступна.

Після опитування система експертної діагностики проводить різні навчальні експерименти, які дають інформацію про динаміку об'єкту. Ця інформація використовується для побудови регулятора. В процесі адаптації система контролює і, якщо це необхідно, змінює регулятор. Такими змінами можуть бути як невеликі підгонки параметрів, так і побудова абсолютно нового регулятора [117].

Експертна діагностика базується на тому припущенні, що немає універсальних алгоритмів діагностики або, принаймні, вони не можуть бути застосовані на практиці.

В даному дослідженні в якості об'єкта діагностування пропонується газотранспортна система, однією з основних підсистем якої є турбореактивні двоконтурні двигуни, які застосовуються в авіаційній галузі і в свою чергу є основним елементом літака.

Одним з найскладніших завдань при технічній експлуатації (ТЕ) авіаційної техніки (АТ) є діагностування авіаційних газотурбінних двигунів (АГТД), на частку яких доводиться виникнення в середньому 28% інцидентів реєстрового парку повітряних суден (ПС) України [118].

Функціонування ГТД базується на складних фізико-хімічних процесах, які протікають в проточній частині (ПЧ) двигуна і викликають появу несправностей як окремих конструктивних вузлів, так сумісно несправних, у зв'язку з чим, діагностування конструктивних вузлів ПЧ авіаційного турбореактивного двоконтурного двигуна (ТРДД) проводиться на основі методів параметричної ідентифікації технічного стану (ТС) двигуна. Існуючі методи і засоби визначення ТС ГТД за функціональними параметрами з подальшою локалізацією несправності носять ймовірностно-статистичний характер технічного діагнозу [119, 120].

Задача підвищення вірогідності оцінки ТС ГТД залишається актуальною з причини стохастичності простору ознак і простору станів.

Підвищення вірогідності визначення ТС двигуна ускладнюється необхідністю включення в процес діагностування значного числа ознак, які відображають взаємодію різних конструктивних вузлів і елементів ПЧ. Отже, побудова ефективних алгоритмів діагностування стає можливою лише на основі використання статистичних моделей, які відображають поведінку об'єкту ідентифікації в різних, передвідмовних станах. Для вирішення задач, пов'язаних з аналізом даних за наявності стохастичності, необхідне використання методів математичної статистики і розпізнавання образів, нейронних мереж і теорії прийняття рішень. Ці методи дозволяють виявляти закономірності на фоні випадковості, робити обґрунтовані висновки і прогнози. Використання методів багатовимірної класифікації припускає звернення до системного аналізу простору ознак і простору станів, основних його складових і їх зв'язків, ухвалення рішення про характер встановлених закономірностей.

Ефективність реалізації процесу діагностування ГТД в експлуатації на основі методик ідентифікації їх ТС з використанням експертних логічних моделей діагностування і методів розпізнавання комбінацій несправностей вимагає розробки якісного програмно-алгоритмічного забезпечення, аналізу зміни параметрів робочого процесу в експлуатації з подальшим прогнозуванням ТС конструктивних вузлів двигуна.

З результату аналізу сучасних концепцій управління ТС ТРДД виходить, що найбільша ефективність забезпечується при поєднанні заходів щодо вдосконалення методів діагностування із конструктивно-технологічними заходами по усуненню причин відмов і несправностей двигунів. Як показує досвід експлуатації, близько 28-30% від загальної кількості авіаційних подій припадає на двигуні. Основною причиною дострокового знімання двигунів (ДЗД) в 80-90% випадках є виникнення несправностей і відмов конструктивних вузлів ПЧ двигуна [121]. Проведений аналіз статистичних даних про відмови і несправності вузлів і елементів сприяє встановленню чіткіших взаємозв'язків між

функціональними параметрами робочого тіла і характеристиками ГТД з урахуванням впливу експлуатаційних несправностей таких двигунів, як: АІ-25, Д-30КП/КП2, Д-36, Д-18Т. Дані взаємозв'язки дозволяють вести розробки, спрямовані на удосконалення існуючих і пошук нових методів оцінки ТС ПЧ двигуна.

Виконаний критичний огляд інструментальних і параметричних методів діагностування ГТД, які використовуються на даний період, вказує на перевагу одних і недоліки інших. Найбільш перспективними при цьому вважаються саме параметричні методи, в зв'язку з тим, що вони призводять до економії часового фонду експлуатанта на ТО ПС, дозволяють вести контроль і моніторинг ТС двигуна у польоті і при ТЕ на землі [122]. Доцільно реалізувати методики параметричного діагностування ТРДД в автоматизованій системі діагностування. Проте ефективність даного методу залежить від точності технічного діагнозу, обумовленого вибором математичної моделі робочого процесу (ММРП) об'єкту діагностування, вибором діагностичних ознак і режиму діагностування, діагностичної моделі, алгоритмічного і програмного забезпечення, рівня контролепридатності і модульності конструкції двигуна [123].

Діагностичні моделі (ДМ), що використовуються в існуючих методиках оцінки ТС двигуна базуються на гіпотезі про можливу появу несправності тільки в якому не будь одному конструктивному вузлі. При глибшому аналізі досвіду експлуатації двигунів був одержаний розподіл випадків виникнення несправностей і відмов двох і більш вузлів від загального числа, тобто спільно несправних (СП), для Д-30КП/КП2 воно складає 17,65%, при вибірці в 140 двигунів [120-123].

За результатами проведеного літературного огляду можна зробити висновок, що: основним методом визначення ТС АД за параметрами, що реєструються в експлуатації, є метод допускового контролю ("Контроль 8-2У", Контроль-Д-30КП, СДД-90, АСК-90), що ускладнює рішення задачі локалізації несправності [123].

Останнім часом при рішенні задач технічного діагностування все більш широкого поширення набувають самонавчальні структури на основі штучних нейромереж. Підвищений інтерес до нейротехнічних структур обумовлений можливостями нейромереж виконувати операції обробки, порівняння і класифікації образів, які недоступні для традиційної математики.

Використане в роботі моделювання для роз'язання завдань діагностування багаторівневих технічних систем є одним з інструментів дослідження надійності складних технічних систем на всіх етапах їх життєвого циклу. Дослідження спрямовані на створення ефективних методів обробки діагностичної інформації з метою прийняття рішення про технічний стан об'єкта та проведення відповідних заходів з його відновлення.

1.4. Постановка завдання дослідження

Підвищення конструктивної складності систем за інших рівних умов неминує веде до зниження їх надійності та ефективності виконання ними заданих функцій. Протиріччя між зростанням складності технічних систем і зниженням їх надійності призводить до необхідності розробки ефективних методів контролю і діагностики їх стану. Аналіз причин і характеристик несправностей дозволив виконати їх класифікацію за основними ознаками, тому що успішність застосування методів діагностування визначається точністю побудови моделей причинно-наслідкових зв'язків несправностей.

Огляд наукових робіт у галузі діагностування технічних систем (п.1.3) показав відсутність загального підходу до побудови ефективних моделей і алгоритмів діагностування причин виникнення прихованих несправностей підсистем і аналізу передаварійних ситуацій у об'єктах з багаторівневою структурою та множинами несправностей. Великий клас об'єктів різної технічної природи і призначення можна представити експертними моделями, що відображають всі множини подій і їх взаємозв'язки. При

цьому, проведений аналіз існуючих методів контролю технічного стану і пошуку несправностей у складних системах діагностування на базі їх логічних моделей виявив їх суттєві недоліки [2]:

1. Низьку ефективність за рахунок сильної залежності від складності досліджуваного об'єкта і, відповідно, розмірності його моделі. Такі методи, як випадковий пошук, повний перебір або модифікація методу відгалуджень і меж пошуку оптимальної стратегії обробки діагностичної інформації у контрольних точках незмінно призводять до локального екстремуму цільової функції.

2. Виникнення проблем, пов'язаних з обмеженням обчислювальних ресурсів для складних об'єктів дослідження, представлених логічними моделями з великою кількістю станів (сотні одиниць). Застосування точних традиційних методів обробки бази даних не працює у завданнях великої розмірності через нестачу обчислювальних ресурсів.

Значного ефекту можна досягти, адаптувавши методи послідовного аналізу і відсіювання варіантів до розроблених логічних моделей з метою діагностування систем з багаторівневою структурою.

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.

Досягнення цієї мети вимагає подальшого розвитку теорії і практики побудови інформаційних технологій діагностування складних технічних об'єктів з багаторівневою структурою, що матимуть наступні властивості:

- ефективність використання для діагностування багаторівневих технічних систем, що складаються з рівнів, підсистем та елементів;
- алгоритмічність, що дозволяє успішно проводити їх автоматизацію та впровадження в керування складними системами;
- повинні бути розраховані на широкий клас систем, представлених складною структурою або логічними моделями причинно-наслідкових

зв'язків.

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.

Припустимо, об'єктом діагностування є складна технічна система C , яка складається з m ієрархічних рівнів, кожен з яких включає множину C_i взаємодіючих підсистем c_{ij} [5]:

$$C_i = \{c_{ij}; j \in J_i\},$$

де J_i – множина ідентифікаторів підсистем i -го рівня; $i = \overline{1, m}$.

Структура технічного об'єкта з багаторівневою структурою (ТОБС) представлена на рисунку 1.5.

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

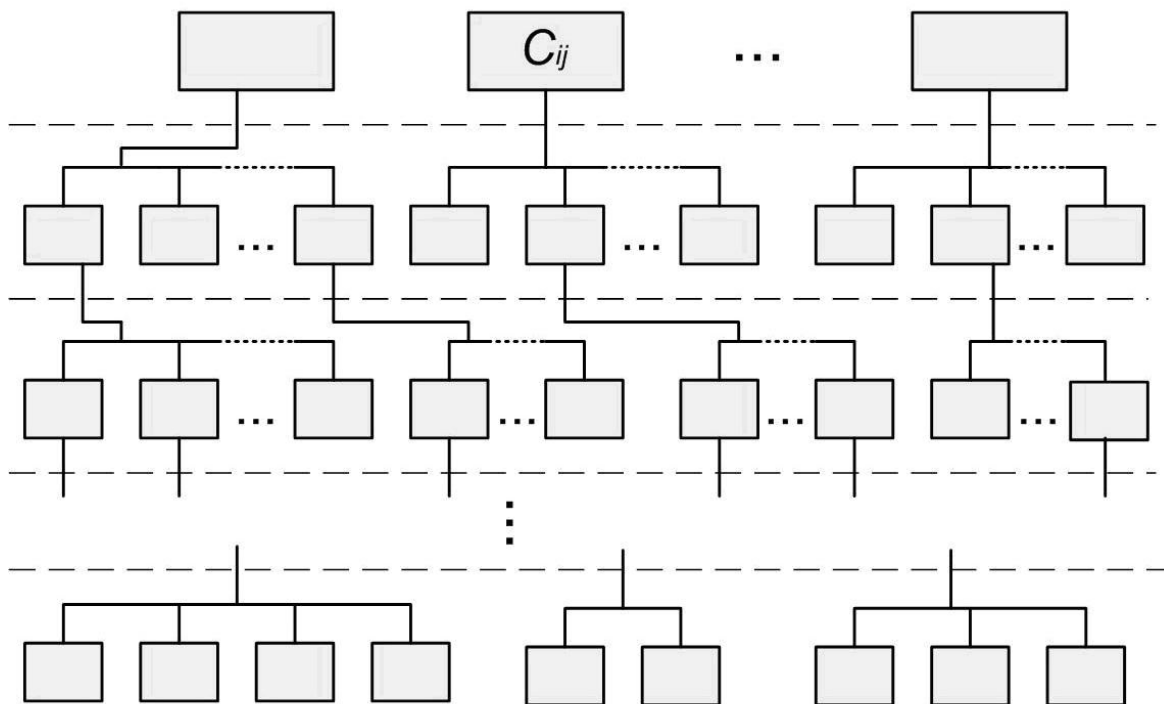


Рис.1.5. Структура ТОБС

Стан ОД у цілому визначається загальним вектором значень характеристик $z = (z_p | p = \overline{1, u})$, 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 $K_{ij}; i = \overline{1, m}; j \in J_i$.

Нехай 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 ОД у аномальний стан потребує вирішення завдання діагностування, сформульованого наступним чином: виходячи з поточних значень характеристик стану ОД, визначити рівні, підсистеми та елементи, у яких відбулись несправності, та види цих несправностей.

1.5. Висновки до першого розділу

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 унеможлиблює розв'язання задачі діагностування складної системи традиційними методами.

2. 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.

3. 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.

4. 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.

Основні результати дисертаційної роботи, представлені в розділі 1, опубліковані в працях автора [1-24].

Список використаних джерел до першого розділу

1. 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.

2. Е. Нечипорук, «Проблемы диагностирования сложных технических систем», *Новости научной мысли: VII Междунар. науч.-практ. конф.*, Прага, Чешская Республика, 2011, Т. 21, С. 51-53.
3. О. Нечипорук, «Недоліки сучасних технологій діагностування складних систем і завдання їх усунення», *Математичне моделювання*, Вип. 1(28), С. 10-13, 2013.
4. Е. Нечипорук, «Особенности построения обобщенной логической модели диагностирования сложных систем», *Проблеми інформатизації і управління*, Вип. 1(41), С. 65-68, 2013.
5. 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.
6. О. Нечипорук, О. Поночовний, «Компоненти системи моніторингу статистичних даних веб-сторінок», *Наука: теорія і практика: XII Междун. науч.-практ. конф.*, Перемышль, Республика Польша, 2016, Т. 3, С. 82-84.
7. 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.
8. 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.
9. О. Нечипорук, П. Смоляров, «Универсальный модуль голосового управления системами», *Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу: Міжнар. наук.-техн. конф.*, Київ, 2015, С.16.
10. 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.

11. 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.
12. Е. Нечипорук, В. Потапов, О. Ткаліч и др., «Кодирование речи с комбинированным предсказанием», *Захист інформації*, №4, С.11-16, 2010.
13. 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.
14. О. Нечипорук, О. Ткаліч, О. Ткаліч, «Аналіз перспектив розвитку технології Gigabit Ethernet», *Вісник інженерної академії України*, №3-4, С.164-167, 2010.
15. 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.
16. Е. Нечипорук, Н. Марченко, «Причины возникновения и классификация отказов в технических системах», *Сучасний захист інформації*, №4, С.84-87, 2012.
17. Н. Марченко, О. Нечипорук, «Особливості реалізації швидких вікон і аналіз похибок, що виникають при їх застосуванні», *Наукові записки українського науково-дослідного інституту зв'язку*, №1(25), С.62-69, 2013.
18. 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.
19. Н. Марченко, В. Нечипорук, О. Нечипорук, Ю. Пепа, *Методи оцінювання точності інформаційно-вимірjuвальних систем діагностики. Монографія. Київ: «Задруга», 2014, 200 с.*
20. О. Нечипорук, Б. Масловський, «Функціональні завдання при моделюванні складних систем», *Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу: Міжнар. наук.-техн. конф.*, Київ, 2014. – С. 35.

21. О. Нечипорук, В. Лейких, В. Сігаєв, «Проектування експертних систем діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою», *Динамика современной науки: Междун. науч.-практ. конф.*, Софія, Болгарія, 2015, Т. 5, С. 34-35.
22. О. Литвиненко, О. Нечипорук, Логіко-математичні методи діагностування складних систем. *Монографія. Київ: «Артмедіа принт»*, 2016, 166 с.
23. 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.
24. 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.
25. 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.
26. М. Згуровський, Н. Панкратова, Основи системного аналізу. *Київ: «Видавнича група BHV»*, 2007, 544 с.
27. Техническая диагностика. Термины и определения. *ГОСТ 20911-89*, 1989.
28. А. Катренко, Системний аналіз об'єктів та процесів комп'ютеризації. *Львів: «Новий світ – 2000»*, 2013, 424 с.
29. П. Павленко, П. Ратушний, «Технологія інформаційної підтримки процесу концептуального проектування складних технічних

систем», *Комплексне забезпечення якості технологічних процесів і систем: III Міжнар. наук.-практ. конф.*, Чернігів, 2013, С. 118-119.

30. П. Павленко, *Основи математичного моделювання систем і процесів*. Київ: «Книжкове вид-во НАУ», 2014, 276 с.

31. П. Павленко, С. Філоненко, О. Чередніков, В. Трейтяк, *Математичне моделювання систем і процесів*. Київ: «Книжкове вид-во НАУ», 2014, 425 с.

32. В. Бабак, В. Харченко, С. Філоненко та ін. *Безпека авіації*. Київ: «Техніка», 2004, 564 с.

33. S. Filonenko, I. Kornienko-Miftakhova, «Use of inductive transducers in the low-frequency oscillation section of bridge constructions», *Proceedings of the second world congress "Aviation in the XXI-st century"*, Kyiv, 2005, pp. 2.51-2.54.

34. С. Филоненко, И. Корниенко-Мифтахова, «Информационно-измерительная система для анализа характеристик динамического поведения конструкций», *Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы*, №1, С.75-83, 2006.

35. П. Павленко, В. Трейтяк, С. Толбатов, «Модель критерію ефективності сучасних методів аналізу робіт», *Вісник Чернігівського державного технологічного університету*, №3, С. 149-157, 2013.

36. С. Филоненко, «Математическая модель совместной обработки информации при регистрации акустической эмиссии», *Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы*, №.2, С.19-27, 2000.

37. V. Prokhorenko, S. Prokhorenko, S. Mudry et al, «Acoustic Emission Study of solidliquid transition in $GaxIn_{1-x}$ alloys», *Proceedings of the 10-th International Scientific Conference: Achievements in Mechanical and Material Engineering*, Gliwice, 2001, pp. 475- 478.

38. П. Павленко, А. Хлевний, «Метод відбору ключових показників ефективності технологічної підготовки виробництва», *Вісник Інженерної академії*, №3/4, С. 189-194, 2013.
39. Л. Девин, А. Найденко, С. Филоненко, «Применение широкополосных датчиков акустической эмиссии для изучения износа режущего инструмента», *Современные методы и средства неразрушающего контроля и технической диагностики: VIII-ой междунар. семинар*, Ялта, 2000, С. 26-28.
40. С. Филоненко, «Анализ достоверности критериальной оценки выделения сигналов акустической эмиссии от трещин на источнике Су Нильсона», *Автоматика, автоматизация, электротехнические комплексы и системы*, №2, С.33-39, 2001.
41. S. Prokhorenko, S. Filonenko, M. Buzansky, «Studying of thermal and mechanical stresses by AE method», *Scientific Bulletins of Rzesow University of Technology*, №179, Mechanics, 54, pp. 307-310, 2000.
42. И. Новиков, В. Рощупкин, М. Покрасин и др., «Метод акустической эмиссии для диагностики и прогнозирования», *Наука и технологии в промышленности*, №2(9), С. 56-57, 2002.
43. А. Корченко, С. Филоненко, Д. Пуха, «Методы защиты в социотехнических системах», *Материалы 2-ой междунар. науч.-практ. конф.*, Судак, Т2., 2007, С. 136-137.
44. П. Пархоменко, Е. Согомоян, Основы технической диагностики: Оптимизация алгоритмов диагностирования, аппаратурные средства. Москва: «Энергия», 1981, 320 с.
45. В. Карибский, П. Пархоменко, Е. Согомоян, Техническая диагностика объектов контроля. Москва: «Энергия», 1997, 78 с.
46. В. Карибский, П. Пархоменко, Е. Согомоян, В. Далчев, Основы технической диагностики. Москва: «Энергия», 1976, 464 с.
47. В. Согомоян, «О диагностике неисправностей в дискретных блочных объектах», *Автоматика и телемеханика*, С. 156-167, 1999.

48. В. Согомонян, «Контроль работоспособности и поиск неисправностей в функционально связанных системах», *Автоматика и телемеханика*, т.25, № 6, С. 980-990, 1994.
49. А. Мозгалеvский, Д. Гаскаров, *Техническая диагностика*. Москва: «Высшая школа», 1975, 206 с.
50. Д. Гаскаров, Т. Голинкевич, А. Мозгалеvский, *Прогнозирование технического состояния и надежности радиоэлектронной аппаратуры*. Москва: «Сов. Радио», 1974, 224 с.
51. Я. Осис, З. Маркович, «Алгоритм предварительного выбора эффективных диагностических параметров», *Кибернетика и диагностика*, вып. 4, С. 77-91, 2000.
52. П.К. Аузинь, Я.Я. Осис, «Минимизация числа точек съема диагностической информации, основанная на алгебраическом анализе структуры граф-модели сложного объекта», *Кибернетика и диагностика*, 1969, вып. 3, С. 33-42, 1969.
53. В. Гуляев, *Методические указания по проектированию контролепригодных устройств и систем*. Киев: «Наук. Думка», 1985, 32 с.
54. В. Гуляев, *Техническая диагностика управляющих систем*. Киев: «Наук. Думка», 1983, 208 с.
55. П. Павленко, С. Філоненко, К. Бабіч, *Методологічні основи інформаційних систем і технологій. Електрон. ресурс: навч. посіб. для студ. вищ. навч. закл*, 2013.
56. Г. Шибанов, Б. Городецкий, Л. Тотаев, «Техническая диагностика систем методом распознавания двумерных сигналов», *Вопросы технической диагностики*, вып. 1, ТРТИ, 1970.
57. А. Дмитриев, В. Александров, «Применение алгоритмов распознавания образов в задачах технической диагностики», *Техническая диагностика*, С. 127-130, 1992.

58. А. Литвин, О. Подгорный, А. Засядько, «Распознавание отказов в системах автоматики с помощью ортогональных дискретных функций», *Электронное моделирование*, №2, С. 67-69, 1995.
59. И. Биргер, *Техническая диагностика*. Москва: «Машиностроение», 1978, 240 с.
60. В. Dhyllon, С. Singh, *Engineering Reliability, «New Techniques and Applications»*, Willey&Sons, London, 1981.
61. П. Давыдов, *Техническая диагностика радиоэлектронных устройств и систем*. Москва: «Радио и связь», 1988, 256 с.
62. Технічне діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. *ДСТУ 2389-94*, 1994.
63. Е. Henley, Н. Kumamoto, «Reliability Engineering and Risk Assessment», *Prentice-Hall*, New York, 1982.
64. З. Маркович, «Предварительное определение диагностических параметров», *Кибернетика и диагностика*, вып. 3, С. 19-32, 1969.
65. С. Гаркавенко, В. Сагунов, «О диагностике неисправностей в непрерывных объектах», *Автоматика и телемеханика*, , №9. С. 177-187, 1996.
66. С. Гаркавенко, В. Сагунов, «О доопределении минимальной совокупности точек контроля с целью поиска неисправностей произвольной кратности в непрерывных объектах диагностирования», *Автоматика и телемеханика*, №7, С. 175-179, 1977.
67. А. Мозгалеvский, «Техническая диагностика (непрерывные объекты)», *Автоматика и телемеханика*, №1, С. 145-166, 1978.
68. Методика выбора диагностических параметров для непрерывных объектов, представленных логическими моделями. *Горький: Гос. Комитет стандартов СМ СССР, ВНИИНМАШ*, 1977, 67 с.
69. Методика выбора диагностических параметров для непрерывных объектов, представленных логическими моделями в форме

графа, с помощью ЭВМ. *Горький: Горьковский филиал ВНИИНМАШ*, 1978, 79 с.

70. Г. Пашковский, Задачи оптимального обнаружения и поиска отказов в РЭА. *Моква: «Радио и связь»*, 1981, 280 с.

71. Э. Соколова, «Об одном алгоритме диагностирования одиночных дефектов», *Стандарты и качество. Методы менеджмента качества*, №7, С.28-30, 2011.

72. А. Дмитриев, И. Кравченко, «Модель процесса диагностирования технических объектов при использовании непрерывных диагностических признаков», *Изв. Вузов. Приборостроение*, №11-12, С. 3-9, 1994.

73. А. Дмитриев, И. Кравченко, «Выбор диагностических признаков с максимальной разрешающей способностью», *Изв. Вузов. Приборостроение*, №4, С.3-7, 1996.

74. А. Дмитриев, И. Кравченко, «Методы и алгоритмы синтеза оптимальных систем диагностирования сложных технических объектов по критерию минимума затрат», *Надежность и контроль качества*, №7, С.43-50, 1996.

75. Рекомендации по оценке контролепригодности машин и приборов. *Горький: Горьковский филиал ВНИИНМАШ*, 1972, 26 с.

76. Методика выбора показателей и оценки уровня контролепригодности конструкций машин и приборов. *Горький: Горьковский филиал ВНИИНМАШ*, 1975, 42 с.

77. М.В. Жуков, В.В. Карибский, «Показатели системы диагностирования», *Автоматика и телемеханика*, №7, С. 137-145, 1999.

78. В. Сагунов, «Обеспечение максимальной глубины поиска дефекта при заданном числе дополнительных точек контроля», *Надежность и контроль качества*, № 10, С. 3-7, 1979.

79. В. Сагунов, «Обеспечение максимальной глубины поиска дефекта при назначении точек контроля ограниченной стоимости», *По*

испытанию, контролю и технической диагностике в процессе разработки и постановки изделий на производство: науч-техн. конф., Горький, 1981, С. 38-41.

80. Техническая диагностика. Контролепригодность объектов диагностирования. *ГОСТ 23563-79*, 1979.

81. Техническая диагностика. Категории контролепригодности объектов диагностирования. *ГОСТ 24029-80*, 1980.

82. А. Давыдьков, «Оптимизация глубины диагностирования технических объектов», *Техническая диагностика электронных систем*, С. 51-56, 1982.

83. В. Нечаев, «Минимизация эксплуатационных издержек на автомобильном транспорте», *Сб. трудов НИИУавтопром*, Горький, вып. 2, С. 84-85, 1982.

84. Ю. Беляев, Надежность технических систем. *Москва: «Радио и связь»*, 1985, 608 с.

85. Л. Птицына, Е. Трубицына, «Применение графовых моделей для определения показателей качества обнаружения появляющихся дефектов», *Сб. науч. трудов*, №452, С. 110-120, 1999.

86. Л. Птицына, «Оценка показателей качества обнаружения появляющихся дефектов при двухуровневой системе принятия решений», *Сб. науч. трудов*, №452, С.98-109, 1995.

87. Э. Соколова, Разработка и реализация моделей, методов и алгоритмов решения задач оптимального синтеза контролепригодных объектов: дис. д-ра техн. наук. *Нижний Новгород*, 2001, 351 с.

88. Л. Ломакина, В. Сагунов, Контролепригодность структурно связанных систем. *Москва: «Энергоатомиздат»*, 1990, 111 с.

89. В. Сагунов и др., «Влияние глубины диагностирования на структурную надежность систем «человек-машина», *«Эффективность, качество и надежность систем «человек-техника»: VII Всесоюзный симпозиум*, часть 2, 1984, С.71.

90. Э. Соколова, С. Капранов, «Обеспечение контролепригодности технических систем с помощью эволюционного моделирования», *Методы менеджмента качества*, №8, С. 42-46, 2004.

91. С. Капранов, Разработка моделей и методов синтеза контролепригодных объектов с помощью генетических алгоритмов: дис. канд. техн. наук. *Нижний Новгород*, 2004, 150 с.

92. Э. Соколова, С. Капранов, «Оптимизация коэффициента глубины поиска дефектов методом генетических алгоритмов», *Журн. Контроль. Диагностика*, №4, С. 32-40, 2004.

93. В. Воронин, «Множество возможных дефектов и виды технических состояний», *Приборы и системы. Управление, контроль, диагностика*, №6, С. 41-45, 2002.

94. В. Богатырев, «Отказоустойчивость компьютерных систем при многофункциональности модулей», *Информационные технологии*, №12, С. 2-7, 2002.

95. В. Богатырев, «Организация отказоустойчивых вычислительных систем на основе динамического распределения запросов с учетом частичной функциональной работоспособности вычислительных модулей», *Информационные технологии*, №6, С. 10-15, 2002.

96. В. Богатырев, «Эффективность обеспечения отказоустойчивости вычислительных систем на основе динамического распределения запросов», *Информационные технологии*, №4, С. 42-48, 2002.

97. В. Богатырев, «О модификации функции «перманент матрицы» и ее применении в комбинаторных методах анализа надежности вычислительных систем», *Информационные технологии*, №1, С. 5-11.2002.

98. О. Жуков, «Обнаружение и коррекция ошибок компьютерных вычислений на основе модулярной алгебры», *Информационные технологии*, №6, С. 15-24, 2002.

99. О. Жуков, «Методы контроля ошибок для компьютерных модулярных вычислений», *Информационные технологии*, №2, С. 33-39, 2003.

100. Л. Мироновский, «Диагностирование линейных систем методом комплементарного сигнала», *Информационные технологии*, №5, С. 52-57, 2002.
101. В. Ведешенков, «Организация самодиагностирования технического состояния цифровых систем», *Автоматика и телемеханика*, №11, С. 165-182, 2003.
102. В. Ведешенков, «Подход к самодиагностированию возникающего отказа в цифровых системах», *Автоматика и телемеханика*, №4, С. 127-140, 2005.
103. Е. Анисимова, В. Скобелев, «Сложность идентификации неисправностей блока управляемых перестановок», *Идентификация систем и задачи управления (SICPRO): Труды V Международ. конф.*, Москва, 2006. С. 1241-1258.
104. В. Ильюков, «Формирование дискретно-временных моделей диагностики», *Идентификация систем и задачи управления (SICPRO): Труды V Международ. конф.*, Москва, 2006, С. 1287-1293.
105. О. Литвиненко, «Математичний метод визначення множинних відмов в складних технічних системах», *Вісник НАУ*, №4, С. 143-150, 2002.
106. Э. Кьюсиак, Искусственный интеллект. Применение в интегрированных производственных системах. Москва: «Машиностроение», 1991, 136 с.
107. Р. Форсайт, Экспертные системы. Принципы работы и примеры. Москва: «Радио и связь», 1987, 124 с.
108. Ф. Хейес-Рот, Д. Уотермен, Д. Ленат, Построение экспертных систем. Москва: «Мир», 1987, 204 с.
109. В. Карибский, П. Пархоменко, Е. Согомонян и др., Основы технической диагностики. Москва: «Энергия», 1976, Кн. 1, 112 с.
110. В. Сидоров, А. Сотников, «Выбор средств технического диагностирования», *Мир техники и технологий*, №7, С. 36-44, 2004.

111. Н. Баркова, Современное состояние виброакустической диагностики машин. *Санкт Петербург: «Изд-во С.-Петербургского морского технического университета»*, 2002, 212 с.
112. В. Костюков, Мониторинг безопасности производства. *Москва: «Машиностроение»*, 2002, 224 с.
113. Г. Анцев, В. Сарычев, «Интеллектуальные технологии, сложные радиоэлектронные системы и подготовка специалистов по радиоэлектронике», *Труды СПбГТУ*, №472, С. 74-82, 1998.
114. Н. Малышев, Л. Берштейн, А. Боженюк, Нечеткие модели для экспертных систем в САПР. *Москва: «Энергоатомиздат»*, 1991, 124 с.
115. А. Ерофеев, А. Поляков, Интеллектуальные системы управления. *Санкт Петербург*, 1999, 136 с.
116. А. Наумов, Системы управления базами данных и знаний. *Москва: «Финансы и статистика»*, 1991, 92 с.
117. Дж. Элти, М. Кумбс, Экспертные системы. Концепции и примеры. *Москва: «Финансы и статистика»*, 1987, 132 с.
118. С. Дмитриев, А. Литвиненко, Е. Стёпушкина и др. «Экспертные модели определения множественных отказов в авиационных двигателях», *Вестник двигателестроения*, №1, С. 67-77, 2005.
119. Е. Стёпушкина, А. Попов, А. Вознюк, «Визначення множинних відмов проточної частини ТРДД за термогазодинамічними параметрами», *Проблеми інформатизації*, № 1(16), С. 142-145, 2006.
120. С. Дмитриев, О. Попов, О. Стёпушкина, «Экспертна модель локалізації несправностей проточної частини газогенератора», *Авиационно-космическая техника и технология*, №8/34, С. 168-171, 2006.
121. А. Попов, Е. Степушкина, «Влияние эксплуатационных повреждений на динамические свойства ТРДД», *АВИА-2006: Матеріали VII Міжнар. наук.-техн. конф.*, Київ, 2006, Т. 2, С. 3.96-3.99.
122. О. Попов, «Аналіз надійності двигуна Д-36№», *АВИА-2002: Матеріали IV Міжнар. наук. техн. конф.*, Київ, 2002, Т. 3, С. 34.39-34.41.

123. О. Попов, «Исследование динамических характеристик ТРДД с перемежающимися неисправностями проточной части на установившихся режимах его работы», *Авіаційно-космічна техніка і технологія*, №2/38, С. 63-67, 2007.

РОЗДІЛ 2

ТЕОРЕТИЧНІ ОСНОВИ ПОБУДОВИ УЗАГАЛЬНЕНОЇ МОДЕЛІ ДІАГНОСТУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ СИСТЕМ

2.1. Узагальнена логічна модель діагностування складного технічного об'єкту з багаторівневою структурою

У загальному випадку логічні моделі діагностування складної технічної системи, у якій існує можливість настання комбінацій несправностей, будують за наступною схемою [1]:

<комбінація несправностей> → <зміна значень підмножини характеристик стану системи>.

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

Логічна модель діагностування складного технічного об'єкта з багаторівневою структурою налаштовується виходячи з наступних припущень, які узагальнюють досвід дослідження реальних технічних систем різноманітного призначення [2, 4-8].

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 відчують 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 ТОБС відображено на рисунку 2.1. 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; ефект накладання наслідків позначено коричневим кольором [3, 9-10].

Нехай 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 $R = \bigcup_{q=1}^w R_q$.

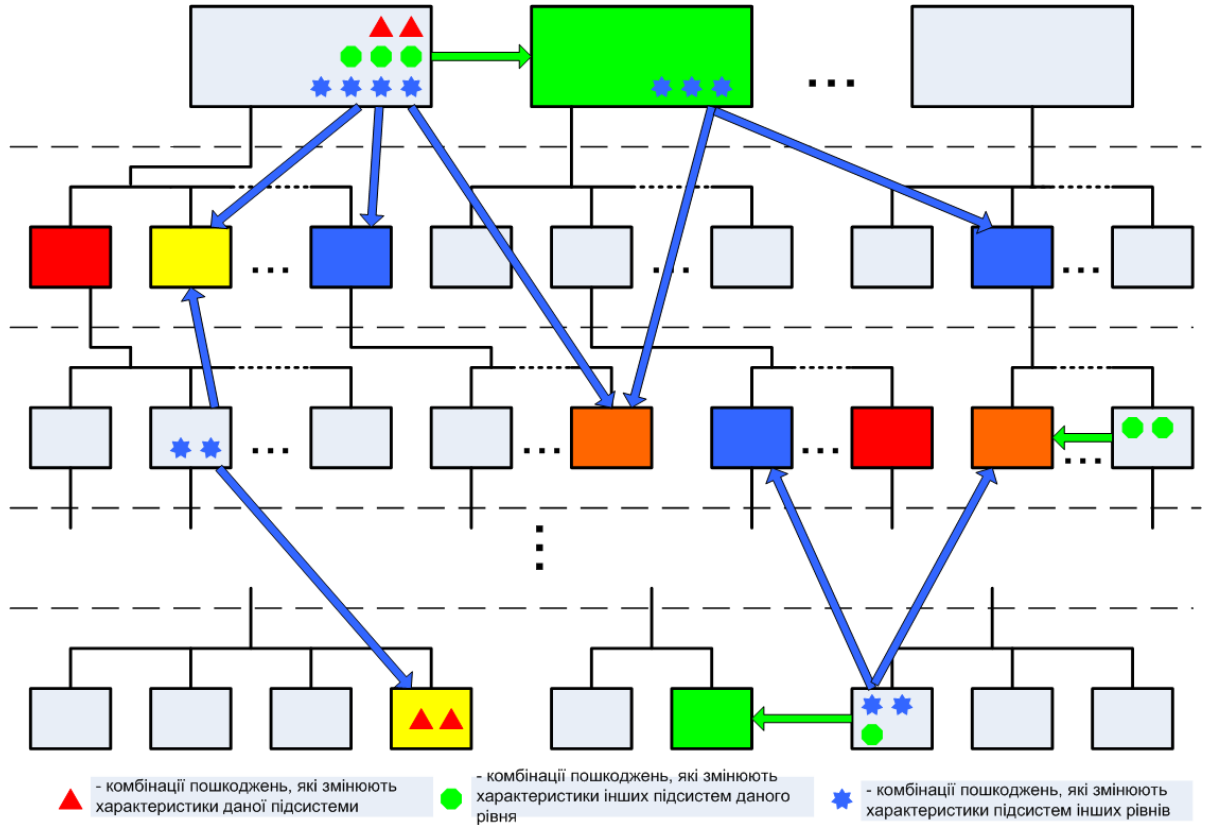


Рис.2.1. Вплив комбінацій несправностей на зміну характеристик стану ТОБС.

Нехай $I^{(r)}$ – множина номерів рівней 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:

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

$h_p^{(r)}$ – величина, яка характеризує зміну характеристики z_p стану ОД під впливом r -ї комбінації несправностей; $r = \overline{1, \rho}$; $p \in P^{(r)}$;

$p_o(r)$ – номер характеристики стану ОД, яка піддається найбільш відносній зміні у результаті виникнення r -ї комбінації несправностей та визначається за ознакою [11-12]:

$$\left| \frac{h_{p_o(r)}^{(r)}}{\mathcal{E}_{p_o(r)}} \right| = \max \left\{ \left| \frac{h_{p(r)}^{(r)}}{\mathcal{E}_{p(r)}} \right|; p \in P^{(r)} \right\}; \quad r = \overline{1, \rho}; \quad (2.1)$$

$i_0(r)$ – номер рівня ОД, який включає підсистему, до якої належить характеристика стану $p_o(r)$; $r = \overline{1, \rho}$;

$j_0(r)$ – ідентифікатор підсистеми ОД, множина характеристик стану якої включає характеристику $p_o(r)$; $r = \overline{1, \rho}$.

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

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

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:

$$Y_q \rightarrow \bigwedge_{\mu=0}^v F_{\mu}^{[r(q)]}; q = \overline{1, w}; v = 3, \quad (2.2)$$

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 зміни 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 зміни 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 зміни значень характеристик стану підсистем інших (за виключенням $i_0(r)$ -го) рівнів ОД внаслідок виникнення r -ї комбінації несправностей.

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

Вислови, що входять до формули (2.2), мають наступну структуру:

$$Y_q = \bigvee_{r \in R_q} \bigwedge_{i \in I^{(r)}} \bigwedge_{j \in J^{(r)}} \bigwedge_{k \in K_{ij}^{(r)}} X(i, c_{ij}, s_k);$$

$$F_0^{(r)} = D[z_{p_0(r)}, h_{p_0(r)}^{(r)}];$$

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

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

$$F_3^{(r)} = \bigwedge_{i \in \overline{I}^{(r)}} \bigwedge_{j \in \overline{J}_i^{(r)}} \bigwedge_{p \in \overline{P}_{ij}^{(r)}} D[z_p, h_p^{(r)}]; \quad q = \overline{1, w}; \quad r \in R_q.$$

У наведених формулах використано наступні умовні позначення:

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

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

$D[z_p, h_p^{(r)}]$ – 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:

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

$\overline{J}_{i_0(r)}^{(r)}$ – 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:

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

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

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

Сукупність виразів (2.2) утворює базу знань інформаційної технології діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою.

Перетворимо узагальнену логічну модель до канонічного виду. Дане перетворення базується на двох відомих еквівалентностях, що є справедливими для довільних логічних висловів A , B та C :

$$(A \vee B \rightarrow C) \leftrightarrow (A \rightarrow C) \& (B \rightarrow C); \quad (2.3)$$

$$(A \rightarrow B \& C) \leftrightarrow (A \rightarrow B) \& (A \rightarrow C). \quad (2.4)$$

Перша дозволяє уникнути диз'юнкції у лівій частині виразу (2.2) представити його у більш компактному вигляді:

$$Y^{(r)} \rightarrow \bigwedge_{\mu=0}^v F_{\mu}^{(r)}; r = \overline{1, \rho}; v = 3, \quad (2.5)$$

де

$$Y^{(r)} = \bigwedge_{i \in I^{(r)}} \bigwedge_{j \in J_i^{(r)}} \bigwedge_{k \in K_{ij}^{(r)}} X(i, c_{ij}, s_k).$$

Друга еквівалентність дає можливість без втрат спільності замінити вираз (2.5) системою простіших виразів, яку можна вважати канонічним видом логічних моделей завдань діагностування комбінацій прихованих несправностей у багаторівневих ОД:

$$\bigwedge_{i \in I^{(r)}} \bigwedge_{j \in J_i^{(r)}} \bigwedge_{k \in K_{ij}^{(r)}} X(i, c_{ij}, s_k) \rightarrow D[z_p, h_p^{(r)}]; \quad (2.6)$$

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

У формальній постановці дане завдання полягає в наступному: на основі спостережуваних значень характеристик стану ОД $z = (z_p | p = \overline{1, \rho})$ визначити значення предикатів $X(i, c_{ij}, s_k)$; $i = \overline{1, m}$; $j \in J_i$; $k \in K_{ij}$, які задовольняють систему (2.6).

Для вирішення завдання діагностування на основі логічної моделі (2.5) 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 (2.6) у систему комбінаторних нерівностей лінійної та нелінійної структури, для розв'язання яких створено досить ефективні алгоритми [18].

2.2. Метод трансформації узагальненої моделі діагностування до комбінаторної форми

Метод трансформації моделі (2.6) до комбінаторної форми передбачає виконання наступних дій [10, 12]:

1) Кожному предикату $X(i, c_{ij}, s_k)$, який описує несправності 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 (2.6) співставлено систему комбінаторних рівнянь:

$$\pi_{ijk}^{(r)}(\gamma) = \delta_p^{(r)}, \quad (2.7)$$

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

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 (2.7), може визначити 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 наступних причин.

По-перше, необхідно враховувати той факт, що зміна значення кожної характеристики стану ОД в загальному випадку може бути викликана різними факторами, що неминуче призводить до виникнення ефекту «накладання» наслідків можливих комбінацій одночасних несправностей:

$$D(z_p, h_p^{(r_1)}) \& D(z_p, h_p^{(r_2)}) \rightarrow D(z_p, h_p^{(r_1)} + h_p^{(r_2)});$$

$$p = \overline{1, u}; \quad r_1, r_2 \in R(p); \quad r_1 \neq r_2,$$

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

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

По-друге, 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. Тому, систему рівнянь (2.7) слід представити у інтегративній формі, що дозволяє враховувати ефект «накладання» наслідків множини факторів аномального стану ОД і не вимагає співставлення величин зміни значень контрольованих параметрів до типових комбінацій несправностей:

$$\sum_{r \in R(p)} \pi_{ijk}^{(r)}(\gamma) = \delta_p; \gamma = h_p^{(r)}; p = \overline{1, u}. \quad (2.8)$$

Необхідність обліку похибок різного роду при оцінюванні значень характеристик стану ОД обумовлює зображення комбінаторної моделі (2.8), у вигляді системи нелінійних нерівностей:

$$\sum_{r \in R(p)} \pi_{ijk}^{(r)}(\gamma) \leq \delta_p^{(\omega)}; \gamma = a_{rp}^{(\omega)} x_{ijk}, \quad (2.9)$$

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 експертною моделлю (2.2) відхиленням значення характеристики z_p , яке викликане виникненням r -ї комбінації несправностей. Величини $\xi_p^{(r)}$, $p = \overline{1, u}$, $R(p)$ задані експертами, відображають вимоги до ступеня адекватності моделі (2.2) реальному об'єкту діагностування.

Зроблені перетворення дозволяють звести завдання визначення комбінацій несправностей у складному об'єкті діагностування на основі логічної моделі (2.2) до знаходження бівалентного вектора значень змінних $(x_{ijk} | i = \overline{1, m}; j \in J_i; k \in K_{ij})$, що задовольняє ситему нерівностей (2.9).

Зміст шуканих змінних інтерпритують наступним чином: якщо в результаті розв'язання системи (2.9) 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 відбулася 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 (2.2) до комбінаторної форми представлено на рис. 2.2.

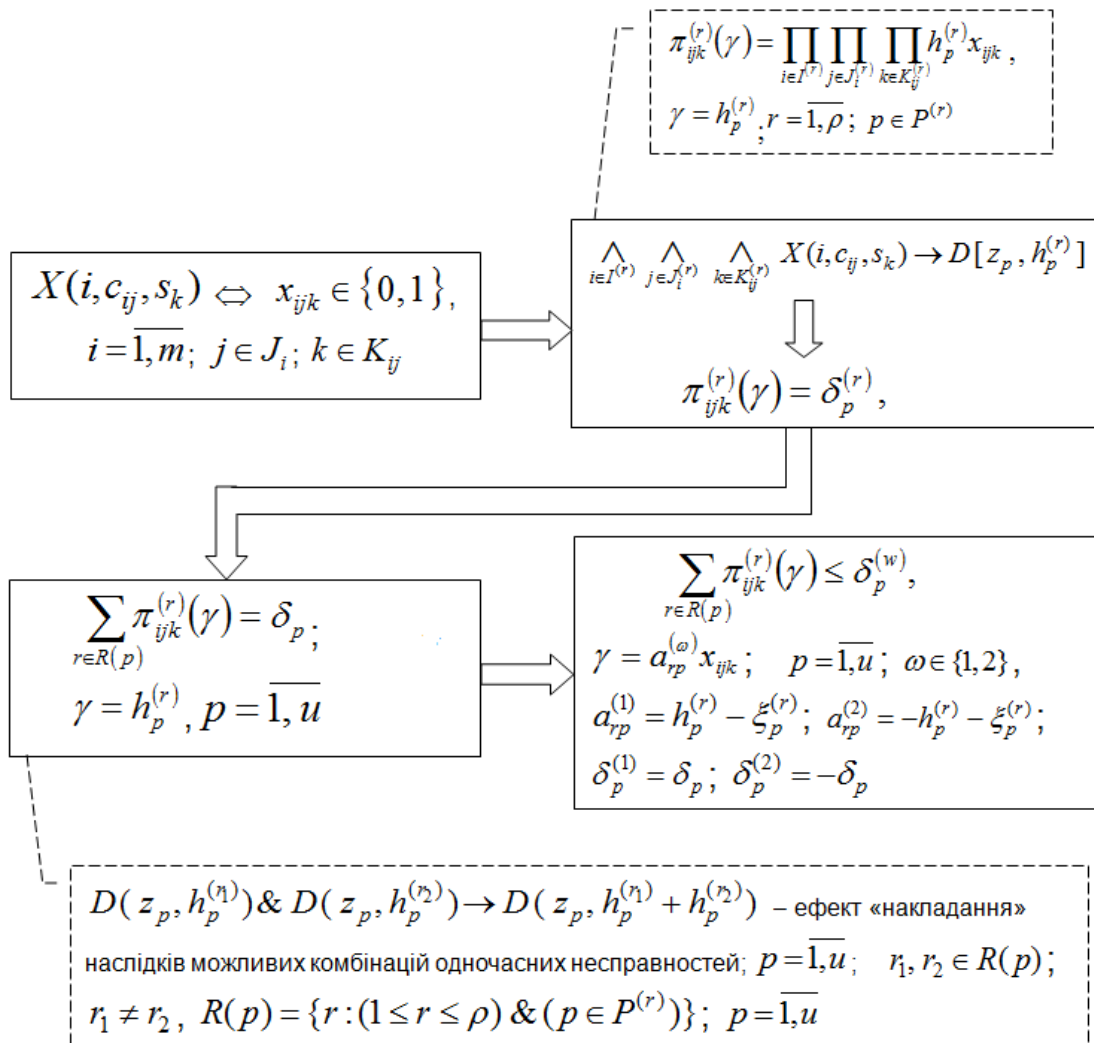


Рис. 2.2. Трансформація логічної моделі до комбінаторної форми

Як ми бачимо, система нерівностей (2.9) 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 та відсіювання варіантів, адаптовані під структуру вказаної комбінаторної моделі [170-172].

Відсутність допустимих рішень системи нерівностей (2.9) свідчить про те, що модель (2.2) є недостатньо адекватною ОД, який розглядають, або ж у об'єкті діагностування відбулись несправності, що не були враховані експертами на етапі формування даної моделі.

2.3. Виведення окремих форм узагальненої моделі діагностування

В останньому випадку вирішення завдання діагностування носить приблизний характер і вимагає уточнення із залученням експертів [16-23].

Проведені дослідження реальних технічних систем дають підставу для виведення наступних факторів, що вимагають використання окремих форм логічних моделей діагностування [11]:

- відсутність (або неможливість апріорного визначення) різних комбінацій несправностей, що викликають однакові зміни значень одних і тих самих характеристик стану ОД;

- неможливість апріорного визначення комбінацій несправностей, що призводять до змін контрольованих параметрів ОД (за можливості встановлення таких змін для одиничних несправностей);

- відсутність (або неможливість апріорного визначення) комбінацій несправностей, що викликають одночасну зміну значень характеристик стану підсистем декількох рівнів ОД;

- відсутність (або неможливість апріорного визначення) комбінацій несправностей, що викликають одночасну зміну значень характеристик стану декількох підсистем одного і того самого рівня ОД;

– відсутність (або неможливість апіорного визначення) комбінацій несправностей, що викликають одночасну зміну значень декількох характеристик стану однієї і тієї ж підсистеми ОД.

Відповідно до зазначених змін логічної моделі спрощують і комбінаторні моделі завдання діагностування досліджуваного об'єкта.

Подібні спрощення можна продовжити, комбінуючи перераховані вище чинники.

Нижче наведено окремі форми логічних та комбінаторних моделей діагностування, що відповідають найбільш поширеним реальним ситуаціям.

1. За відсутності різних комбінацій несправностей, що викликають однакові зміни значень однакових характеристик стану ОД, логічна модель спочатку може бути побудована за формулою (2.5). При цьому відповідна комбінаторна модель зберігає форму системи комбінаторних нерівностей (2.9).

2. При одночасному виконанні таких умов:

а) неможливість апіорного встановлення сукупності типових комбінацій несправностей;

б) відсутність різних несправностей, що викликають однакові зміни значень одних і тих самих характеристик стану ОД:

– ліва частина виразів логічної моделі (2.2) формується з окремих предикатів, що описують несправності кожного виду в кожній підсистемі ОД.

Нехай λ – кількість видів несправностей, які можуть виникати у ОД:

$$\lambda = |K|; \quad K = \bigcup_{i=1}^m \bigcup_{j \in J_i} K_{ij};$$

I_k – множина номерів рівнів ОД, що вміщують підсистеми, в яких можуть виникати несправності k -го виду; $k = \overline{1, \lambda}$;

J_{ik} – множина ідентифікаторів підсистем i -го рівня ОД, в яких можуть виникати несправності k -го виду; $k = \overline{1, \lambda}$; $i \in I_k$;

$I(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – множина номерів рівнів ОД, що вміщують підсистеми, характеристики стану яких змінюють своє значення під впливом несправності k -го виду, який виникає у j^* -й підсистемі i^* -го рівня; $k = \overline{1, \lambda}$; $i^* \in I_k$; $j^* \in J_{ik}$;

$J_i(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – множина підсистем i -го рівня ОД, характеристики стану яких змінюють своє значення під впливом несправності k -го виду, що виникає у j^* -й підсистемі i^* -го рівня; $k = \overline{1, \lambda}$; $i^* \in I_k$; $j^* \in J_{ik}$; $i \in I(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$;

$P_{ij}(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – множина характеристик стану j -ї підсистеми i -го рівня ОД, що змінюють свої значення під впливом несправностей k -го виду, що виникає у j^* -й підсистемі i^* -го рівня; $k = \overline{1, \lambda}$; $i^* \in I_k$; $j^* \in J_{ik}$; $i \in I(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$; $j \in J_i(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$;

$P(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – множина характеристик стану ОД, що змінюють свої значення під впливом несправностей k -го виду в j^* -й підсистемі i^* -го рівня:

$$P(i^*, c_{i^*j^*}, s_k) = \bigcup_{i \in I^*} \bigcup_{j \in J_i^*} P_{ij}(i^*, c_{i^*j^*}, s_k);$$

$$k = \overline{1, \lambda}; i^* \in I_k; j^* \in J_{ik}; I^* = I(i^*, c_{i^*j^*}, s_k); J_i^* = J_i(i^*, c_{i^*j^*}, s_k);$$

$h_p(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – величина, яка характеризує зміну характеристики z_p стану ОД під впливом несправностей k -го виду, що виникає у j^* -й підсистемі i^* -го рівня; $k = \overline{1, \lambda}$; $i^* \in I_k$; $j^* \in J_{ik}$; $p \in P(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$;

$p_0^{\max} = p_0(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – номер характеристики стану ОД, яка зазнає найбільш відносних змін у результаті виникнення несправності k -го виду, що виникає у j^* -й підсистемі i^* -го рівня та встановлена за ознакою:

$$\left| \frac{h_{p_0^{\max}}(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)}{\varepsilon_{p_0^{\max}}} \right| = \max \left\{ \left| \frac{h_p(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)}{\varepsilon_p} \right| ; p \in P(i^*, c_{i^*j^*}, s_k) \right\};$$

$$k = \overline{1, \lambda}; i^* \in I_k; j^* \in J_{ik};$$

$i_0^{\max} = i_0(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – номер рівня ОД, що включає підсистему, до якої належить характеристика стану $p_0^{\max} = p_0(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$; $k = \overline{1, \lambda}; i^* \in I_k; j^* \in J_{ik}$;

$j_0^{\max} = j_0(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – ідентифікатор підсистеми ОД, множина характеристик стану якої включає характеристику $p_0^{\max} = p_0(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$; $k = \overline{1, \lambda}; i^* \in I_k; j^* \in J_{ik}$.

Параметри i_0^{\max} та j_0^{\max} визначають за ознакою:

$$p_0^{\max} \in P_{i_0^{\max}, j_0^{\max}}; 1 \leq i_0^{\max} \leq m; j_0^{\max} \in J_{i_0^{\max}}.$$

Логічна модель діагностування складного об'єкта за неможливості апріорного встановлення сукупності типових комбінацій несправностей має наступний вигляд:

$$X(i^*, c_{i^*j^*}, s_k) \rightarrow \bigwedge_{\mu=0}^v F_{\mu}(i^*, c_{i^*j^*}, s_k); \quad (2.10)$$

$$k = \overline{1, \lambda}; i^* \in I_k; j^* \in J_{ik}; v = 3,$$

де $F_0(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – простий логічний вислів, що відображає зміну характеристики p_0^{\max} стану ОД під впливом несправностей k -го виду у j^* -й підсистемі i^* -го рівня;

$F_1(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – складний вислів, що описує зміни значень інших (за виключенням p_0^{\max} -ї) характеристик стану j_0^{\max} -ї підсистеми ОД в результаті виникнення несправності k -го виду у j^* -й підсистемі i^* -го рівня;

$F_2(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – складний вислів, що відображає зміни значень характеристик стану інших підсистем i_0^{\max} -го рівня ОД, які взаємодіють з j_0^{\max} -ю підсистемою, під впливом несправностей k -го виду у j^* -й підсистемі i^* -го рівня;

$F_3(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)$ – складний вислів, який описує зміни значень характеристик стану підсистем інших (за виключенням i_0^{\max} -го) рівнів ОД внаслідок виникнення несправностей k -го виду у j^* -й підсистемі i^* -го рівня.

Перераховані вислови визначають за наступними формулами:

$$F_0(i^*, c_{i^*j^*}, s_k) = D[z_{p_0^{\max}}, h_{p_0^{\max}}(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)];$$

$$F_1(i^*, c_{i^*j^*}, s_k) = \bigwedge_{p \in \bar{P}_{i^*, j^*, k}} D[z_p, h_p(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)];$$

$$F_2(i^*, c_{i^*j^*}, s_k) = \bigwedge_{j \in \bar{J}_{i^*, k}} \bigwedge_{p \in P_{i^*, j^*, k}} D[z_p, h_p(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)];$$

$$F_3(i^*, c_{i^*j^*}, s_k) = \bigwedge_{i \in \bar{I}_k} \bigwedge_{j \in J_{ik}} \bigwedge_{p \in P_{ijk}} D[z_p, h_p(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)];$$

$$k = \overline{1, \lambda}; i^* \in I_k; j^* \in J_{ik},$$

де

$$\bar{P}_{i^*, j^*, k} = P_{i^*, j^*}(i^*, c_{i^*j^*}, s_k) \setminus \{p_0(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)\};$$

$$\bar{J}_{i^*, k} = J_{i^*}(i^*, c_{i^*j^*}, s_k) \setminus \{j_0(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)\};$$

$$P_{i^*,j,k}^* = \bigcup_{j \in \bar{J}_{i^*,k}} P_{i^*,j}^*(i^*, c_{i^*j^*}, s_k);$$

$$\bar{I}_k = I(i^*, c_{i^*j^*}, s_k) \setminus \{i_0(i^*, c_{i^*j^*}, s_k)\};$$

$$J_{ik} = \bigcup_{i \in \bar{I}_k} J_i(i^*, c_{i^*j^*}, s_k).$$

Базуючись на тотожності (2.4) логічна модель (2.10) може бути замінена системою спрощених виразів:

$$X(i, c_{ij}, s_k) \rightarrow D[z_p, h_p(i, c_{ij}, s_k)]; \quad (2.11)$$

$$k = \overline{1, \lambda}; i \in I_k; j \in J_{ik}; p \in P_{ij}(i, c_{ij}, s_k).$$

У формальному вигляді дане завдання полягає в наступному: на основі спостереження за значеннями характеристик стану ОД $z = (z_p \mid p = \overline{1, u})$ визначити значення предикатів $X(i, c_{ij}, s_k); k = \overline{1, \lambda}; i \in I_k; j \in J_{ik}$, які задовольняють систему (2.11).

Процедура перетворення моделі (2.11) у комбінаторну форму передбачає виконання наступних дій:

1) Кожному предикату $X(i, c_{ij}, s_k)$, який описує несправності k -го виду у j -й підсистемі i -го рівня ОД, приводять у відповідність булеву змінну $x_{ijk} \in \{0, 1\}; k = \overline{1, \lambda}; i \in I_k; j \in J_{ik}$.

2) Кожному виразові моделі (2.11) співставляють систему комбінаторних рівнянь:

$$h_p(i, c_{ij}, s_k) x_{ijk} = \delta_p(i, c_{ij}, s_k); \quad (2.12)$$

$$k = \overline{1, \lambda}; i \in I_k; j \in J_{ik}; p \in P_{ij}(i, c_{ij}, s_k),$$

де $\delta_p(i, c_{ij}, s_k)$ – фактичне відхилення поточного значення характеристики стану z_p від еталонного рівня, що викликане виникненням несправності k -го виду у j -й підсистемі i -го рівня ОД.

Вектор значень незалежних булевих змінних $(x_{ijk} | k = \overline{1, \lambda}; i \in I_k; j \in J_{ik})$, що задовольняє систему лінійних комбінаторних рівнянь (2.12), визначає множину несправностей у об'єкті діагностування, що призвели до його аномального стану.

З метою врахування можливого ефекту «накладання» наслідків одночасних несправностей систему рівнянь (2.12) представлено в інтегративному вигляді:

$$\sum_{i \in I_p} \sum_{j \in J_{ip}} \sum_{k \in K_{ijp}} h_p(i, c_{ij}, s_k) x_{ijk} = \delta_p(i, c_{ij}, s_k), \quad p = \overline{1, u}, \quad (2.13)$$

де I_p – множина номерів рівнів ОД, що вміщують підсистеми, несправності в яких призводять до зміни значення характеристики стану z_p :

$$I_p = \{i : (1 \leq i \leq m) \& (\exists j \in J_i)(\exists k \in K_{ij})[p \in P(i, c_{ij}, s_k)]\};$$

J_{ip} – множина ідентифікаторів підсистем i -го рівня ОД, несправності в яких приводять до зміни значення характеристики стану z_p :

$$J_{ip} = \{j \in J_i : (\exists k \in K_{ij})[p \in P(i, c_{ij}, s_k)]\};$$

K_{ijp} – множина видів несправностей, що можуть виникати у j -й підсистемі i -го рівня ОД та призводити до зміни значення характеристики стану z_p :

$$K_{ijp} = \{k \in K_{ij} : p \in P(i, c_{ij}, s_k)\}.$$

Похибки в оцінюванні значень характеристик стану ОД обумовлюють необхідність зображення комбінаторної моделі (2.13), у вигляді системи лінійних нерівностей:

$$\begin{cases} \sum_{i \in I_p} \sum_{j \in J_{ip}} \sum_{k \in K_{ijp}} [h_p(i, c_{ij}, s_k) - \xi_p(i, c_{ij}, s_k)] x_{ijk} \leq \delta_p(i, c_{ij}, s_k) \\ \sum_{i \in I_p} \sum_{j \in J_{ip}} \sum_{k \in K_{ijp}} [h_p(i, c_{ij}, s_k) + \xi_p(i, c_{ij}, s_k)] x_{ijk} \geq \delta_p(i, c_{ij}, s_k) \end{cases}; p = \overline{1, u}, \quad (2.14)$$

де $\xi_p(i, c_{ij}, s_k)$ – допустиме розузгодження між фактичним та заданим експертами відхиленням значення характеристики z_p , викликане виникненням несправності k -го виду у j -й підсистемі i -го рівня ОД; $p = \overline{1, u}$; $i \in I_p$; $j \in J_{ip}$; $k \in K_{ijp}$.

Більш компактно систему нерівностей (2.14) можна зобразити у наступному вигляді:

$$\sum_{i \in I_p} \sum_{j \in J_{ip}} \sum_{k \in K_{ijp}} a_p^{(\omega)}(i, c_{ij}, s_k) x_{ijk} \leq \delta_p^{(\omega)}(i, c_{ij}, s_k); \quad (2.15)$$

$$p = \overline{1, u}; \omega \in \{1, 2\},$$

де

$$a_p^{(1)}(i, c_{ij}, s_k) = h_p(i, c_{ij}, s_k) - \xi_p(i, c_{ij}, s_k);$$

$$a_p^{(2)}(i, c_{ij}, s_k) = -h_p(i, c_{ij}, s_k) - \xi_p(i, c_{ij}, s_k);$$

$$\delta_p^{(1)}(i, c_{ij}, s_k) = \delta_p(i, c_{ij}, s_k);$$

$$\delta_p^{(2)}(i, c_{ij}, s_k) = -\delta_p(i, c_{ij}, s_k).$$

Проведені перетворення дозволяють звести завдання визначення комбінацій несправностей у складному об'єкті діагностування беручи за

основу логічну модель (2.10) з метою знаходження бівалентного вектора значень змінних $(x_{ijk} | k = \overline{1, \lambda}; i \in I_k; j \in J_{ik})$, що задовольняє систему нерівностей (2.15).

Суть шуканих змінних інтерпритують наступним чином: якщо в результаті розв'язання системи (2.15) деяка змінна $x_{i^*j^*k^*}$ ($1 \leq k^* \leq \lambda$, $i^* \in I_{k^*}$, $j^* \in J_{i^*k^*}$) приймає значення 1, це означає, що в j^* -й підсистемі i^* -го рівня ОД трапилась несправність k^* -го виду; при $x_{i^*j^*k^*} = 0$ дане твердження є невірним. Сукупність незалежних змінних, що приймають значення 1, визначає місце виникнення (рівні ОД, підсистеми) та види несправностей, що виникають (одночасно, послідовно та послідовно-паралельно) у досліджуваному об'єкті на момент діагностування.

Як можна побачити, система нерівностей (2.15) має лінійну структуру та носить комбінаторний характер. Бівалентність шуканих змінних, що входять до даної системи, надає можливості використовувати для її вирішення модифіковані алгоритми послідовного аналізу та відсіювання варіантів, адаптовані до структури вказаної моделі [13-15].

3. Якщо наслідки комбінацій несправностей, які виникають у будь-якій підсистемі того чи іншого рівня ОД, не поширюються на підсистеми інших рівнів, то з правої частини виразів логічної моделі (2.2) виключають вислів $F_3^{(r)}$:

$$Y_q \rightarrow \bigwedge_{\mu=0}^v F_{\mu}^{[r(q)]}; q = \overline{1, w}; v = 2. \quad (2.16)$$

У цьому випадку завдання діагностування можна вирішити для кожного рівня ОД окремо, а вирази, що входять до логічної моделі (2.2), набувають спрощеної форми:

$$Y_q = \bigvee_{r \in R_q} \bigwedge_{j \in J^{(r)}} \bigwedge_{k \in K_j^{(r)}} X(c_j, s_k);$$

$$F_0^{(r)} = D[z_{p_0(r)}, h_{p_0(r)}^{(r)}];$$

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

$$F_2^{(r)} = \bigwedge_{j \in \overline{J}^{(r)}} \bigwedge_{p \in P_j^{(r)}} D[z_p, h_p^{(r)}]; \quad q = \overline{1, w}; \quad r \in R_q,$$

де $J^{(r)}$ – множина ідентифікаторів підсистем ОД, характеристики стану яких змінюються під впливом r -ї комбінації несправностей; $r = \overline{1, \rho}$;

$K_j^{(r)}$ – множина видів несправностей j -ї підсистемі ОД, що входять до складу r -ї типової комбінації; $r = \overline{1, \rho}$; $j \in J^{(r)}$;

$P_j^{(r)}$ – множина номерів характеристик стану j -ї підсистемі ОД, що змінюють свої значення під впливом r -ї комбінації несправностей; $r = \overline{1, \rho}$; $j \in J^{(r)}$;

$X(c_j, s_k)$ – простий предикат, що описує несправності k -го виду у j -ї підсистемі ОД; $j = \overline{1, n}$; $k \in K_j$;

n – кількість підсистем, що входять до складу ОД;

K_j – множина видів несправностей, що можуть виникати у j -ї підсистемі ОД; $j = \overline{1, n}$.

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

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

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

$$\overline{J}^{(r)} = J^{(r)} \setminus \{j_0(r)\}; \quad r = \overline{1, \rho}.$$

Параметри $p_0(r)$ та $j_0(r)$ зберігають попередню суть. Проте, при встановленні першого згідно з виразом (2.1) повна множина номерів характеристик стану ОД, що змінюють свої значення в результаті виникнення r -ї комбінації несправностей, формується за простішою формулою:

$$P^{(r)} = \bigcup_{j \in J^{(r)}} P_j^{(r)}; \quad r = \overline{1, \rho}.$$

Д

ругий із вказаних параметрів формується за ознакою:

$$p_0(r) \in P_{j_0(r)}; \quad 1 \leq j_0(r) \leq n.$$

Тотожні пертворення, які базуються на виразі (2.3), дозволяють представити модель (2.16) у більш компактній формі:

$$Y^{(r)} \rightarrow \bigwedge_{\mu=0}^v F_\mu^{(r)}; \quad r = \overline{1, \rho}; \quad v = 2, \quad (2.17)$$

де

$$Y^{(r)} = \bigwedge_{j \in J^{(r)}} \bigwedge_{k \in K_j^{(r)}} X(c_j, s_k),$$

а тотожність (2.4) дає можливість замінити модель (2.17) еквівалентною за змістом системою простіших виразів:

$$\bigwedge_{j \in J^{(r)}} \bigwedge_{k \in K_j^{(r)}} X(c_j, s_k) \rightarrow D[z_p, h_p^{(r)}]; \quad (2.18)$$

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

Це дозволяє сформулювати дане завдання наступним чином: спираючись на значення характеристик стану ОД, які спостерігаємо, $z = (z_p | p = \overline{1, u})$ визначаємо значення предикатів $X(c_j, s_k)$; $j = \overline{1, n}$; $k \in K_j$, що задовольняють систему (2.18).

Для перетворення моделі (2.18) у комбінаторну форму необхідно виконати наступні дії:

1) Кожному предикату $X(c_j, s_k)$, що описує несправності k -го виду у j -й підсистемі ОД, поставити у відповідність булеву змінну $x_{jk} \in \{0, 1\}$, $j = \overline{1, n}$; $k \in K_j$.

2) Кожному виразу моделі (2.18) співставити систему комбінаторних рівнянь:

$$\prod_{j \in J^{(r)}} \prod_{k \in K_j^{(r)}} h_p^{(r)} x_{jk} = \delta_p^{(r)} ; \quad (2.19)$$

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

Вектор значень незалежних булевих змінних $(x_{jk} | j = \overline{1, n}; k \in K_j)$, що задовольняє систему нелінійних комбінаторних рівнянь (2.18), визначає комбінацію несправностей у ОД, які приводять до його аномального стану.

З метою врахування ефекту «накладання» наслідків множини факторів аномального стану ОД систему рівнянь (2.19) представлено у інтегративному виді:

$$\sum_{r \in R(p)} \prod_{j \in J^{(r)}} \prod_{k \in K_j^{(r)}} h_p^{(r)} x_{jk} = \delta_p ; p = \overline{1, u} . \quad (2.20)$$

Необхідність врахування погрешностей різного виду при оцінюванні значень характеристик стану ОД обумовлює зображення комбінаторної моделі (2.20), у вигляді системи нелінійних нерівностей:

$$\left\{ \begin{array}{l} \sum_{r \in R(p)} \prod_{j \in J^{(r)}} \prod_{k \in K_j^{(r)}} (h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)}) x_{jk} \leq \delta_p \\ \sum_{r \in R(p)} \prod_{j \in J^{(r)}} \prod_{k \in K_j^{(r)}} (h_p^{(r)} + \xi_p^{(r)}) x_{jk} \geq \delta_p \end{array} \right. ; p = \overline{1, u}. \quad (2.21)$$

З метою більш компактного зображення системи нерівностей (2.21) введемо наступні позначення:

$$a_{rp}^{(1)} = h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)} ; a_{rp}^{(2)} = -h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)} ; \delta_p^{(1)} = \delta_p ; \delta_p^{(2)} = -\delta_p.$$

Тоді, систему (2.21) можна зобразити у наступному вигляді:

$$\sum_{r \in R(p)} \prod_{j \in J^{(r)}} \prod_{k \in K_j^{(r)}} a_{rp}^{(\omega)} x_{jk} \leq \delta_p^{(\omega)} ; \quad (2.22)$$

$$p = \overline{1, u} ; \omega \in \{1, 2\}.$$

Виконані перетворення дозволяють звести завдання визначення комбінацій несправностей у складному об'єкті діагностування на основі логічної моделі (2.16) до визначення бівалентного вектора значень змінних $(x_{jk} \mid j = \overline{1, n}; k \in K_j)$, який задовольняє ситему нерівностей (2.22).

Суть шуканих змінних інтерпретують наступним чином: якщо в результаті вирішення системи (2.22) деяка змінна $x_{j^*k^*}$ ($1 \leq j^* \leq n, k^* \in K_{j^*}$) приймає значення 1, це означає, що в j^* -й підсистемі ОД сталася несправність k^* -го виду; при $x_{j^*k^*} = 0$ дане твердження є невірним. Сукупність незалежних змінних, які прийняли значення 1, визначає місця виникнення (підсистеми ОД) та види більшості несправностей, які виникли (одночасно, послідовно чи послідовно-паралельно) у об'єкті, який досліджується на момент діагностування. Як ми бачимо, система нерівностей (2.22) має нелінійну структуру та носить комбінаторний

характер. Бівалентність шуканих змінних, що входять до даної системи, дає можливість використовувати для її вирішення модифіковані алгоритми послідовного аналізу та відсіювання варіантів, адаптовані під структуру вказаної комбінаторної моделі [16-18].

4. У випадку, коли дві наступних умови виконуються одночасно:

а) комбінації несправностей, що викликають однакові зміни значень однакових характеристик стану ОД, відсутні або апріорно не встановлені;

б) наслідки комбінацій несправностей, що виникають в будь-якій підсистемі того чи іншого рівня ОД не поширюються на підсистеми інших рівнів,

– логічна модель початково може бути побудована за формулою (2.17).

При цьому відповідна комбінаторна модель зберігає вигляд системи комбінаторних нерівностей (2.22).

5. Якщо наступні умови виконуються одночасно:

а) неможливо апріорно встановити множину типових комбінацій несправностей;

б) відсутні різні несправності, що викликають однакові зміни значень однакових характеристик стану ОД;

в) наслідки несправностей, які виникають у будь-якій підсистемі того чи іншого рівня ОД не поширюються на підсистеми інших рівнів:

– ліва частина виразів логічної моделі формується з одиничних предикатів, які описують несправності, а об'єкт діагностування розглядають як однорівневу систему.

Нехай K_j – множина видів несправностей, що можуть виникати у j -й підсистемі ОД; $j = \overline{1, n}$;

K – множина видів несправностей, що можуть виникати у всіх підсистемах ОД:

$$K = \bigcup_{j=1}^n K_j; \lambda = |K|;$$

J_k – множина ідентифікаторів підсистем ОД, у яких можуть виникати несправності k -го виду; $k = \overline{1, \lambda}$;

$J(c_{j^*}, s_k)$ – множина підсистем ОД, характеристики стану яких змінюють своє значення під впливом несправності k -го виду, що виникла у j^* -й підсистемі; $k = \overline{1, \lambda}$; $j^* \in J_k$;

P_j – множина характеристик стану j -ї підсистеми ОД; $j = \overline{1, n}$;

$P_j(c_{j^*}, s_k)$ – множина характеристик стану j -ї підсистеми ОД, що змінюють своє значення під впливом несправності k -го виду, що виникла у j^* -й підсистемі; $k = \overline{1, \lambda}$; $j^* \in J_k$; $j \in J(c_{j^*}, s_k)$;

$P(c_{j^*}, s_k)$ – множина характеристик стану ОД, які змінюють своє значення під впливом несправності k -го виду в j^* -й підсистемі:

$$P(c_{j^*}, s_k) = \bigcup_{j=1}^m P_j(c_{j^*}, s_k);$$

$$k = \overline{1, \lambda}; j^* \in J_k;$$

$h_p(c_{j^*}, s_k)$ – величина, що характеризує зміну характеристики z_p стану ОД під впливом несправності k -го виду, що виникає у j^* -й підсистемі; $k = \overline{1, \lambda}$; $j^* \in J_k$; $p \in P(c_{j^*}, s_k)$;

$p_0^{\max} = p_0(c_{j^*}, s_k)$ – номер характеристики стану ОД, яка зазнає найбільш відносних змін у результаті виникнення несправності k -го виду у j^* -й підсистемі та може бути встановлена за ознакою:

$$\left| \frac{h_{p_0^{\max}}(c_{j^*}, s_k)}{\varepsilon_{p_0^{\max}}} \right| = \max \left\{ \left| \frac{h_p(c_{j^*}, s_k)}{\varepsilon_p} \right| ; p \in P(c_{j^*}, s_k) \right\};$$

$$k = \overline{1, \lambda}; j^* \in J_k;$$

$j_0^{\max} = j_0(c_{j^*}, s_k)$ – ідентифікатор підсистеми ОД, множина характеристик стану якої включає характеристику $p_0^{\max} = p_0(c_{j^*}, s_k)$; $k = \overline{1, \lambda}$; $j^* \in J_k$.

Параметр j_0^{\max} визначаємо за ознакою:

$$p_0^{\max} \in P_{j_0^{\max}}; 1 \leq j_0^{\max} \leq n.$$

Логічна модель діагностування складного об'єкта за вище згаданих умов набуває наступного вигляду:

$$X(c_{j^*}, s_k) \rightarrow \bigwedge_{\mu=0}^v F_{\mu}(c_{j^*}, s_k); \quad (2.23)$$

$$k = \overline{1, \lambda}; j^* \in J_k; v = 2,$$

де $X(c_{j^*}, s_k)$ – простий предикат, який описує несправність k -го виду у j^* -й підсистемі ОД; $k = \overline{1, \lambda}$; $j^* \in J_k$;

$F_0(c_{j^*}, s_k)$ – простий логічний вислів, який відображає зміну характеристики p_0^{\max} стану ОД під впливом несправності k -го виду у j^* -й підсистемі;

$F_1(c_{j^*}, s_k)$ – складний вираз, який описує зміни значень інших (за виключенням p_0^{\max} -ї) характеристик стану j_0^{\max} -ї підсистеми ОД у результаті появи несправності k -го виду у j^* -й підсистемі;

$F_2(c_{j^*}, s_k)$ – складний вираз, що відображає зміни значень характеристик стану інших підсистем ОД, які взаємодіють з j_0^{\max} -ю підсистемою, під впливом несправності k -го виду у j^* -й підсистемі.

Перераховані вирази визначають за наступними формулами:

$$F_0(c_{j^*}, s_k) = D[z_{p_0^{\max}}, h_{p_0^{\max}}(c_{j^*}, s_k)];$$

$$F_1(c_{j^*}, s_k) = \bigwedge_{p \in \bar{P}_{j^*, k}} D[z_p, h_p(c_{j^*}, s_k)];$$

$$F_2(c_{j^*}, s_k) = \bigwedge_{j \in \bar{J}_k} \bigwedge_{p \in P_{jk}} D[z_p, h_p(c_{j^*}, s_k)];$$

де

$$\bar{P}_{j^*, k} = P_{j^*}(c_{j^*}, s_k) \setminus \{p_0(c_{j^*}, s_k)\};$$

$$\bar{J}_k = \{j : 1 \leq j \leq n\} \setminus \{j_0(c_{j^*}, s_k)\};$$

$$P_{jk} = \bigcup_{j \in \bar{J}_k} P_j(c_{j^*}, s_k).$$

Спираючись на тотожність (2.4) логічну модель (2.23) можна замінити на систему спрощених виразів:

$$X(c_j, s_k) \rightarrow D[z_p, h_p(c_j, s_k)]; \quad (2.24)$$

$$k = \overline{1, \lambda}; j \in J_k; p \in P_j(c_j, s_k).$$

За формальною постановкою дане завдання полягає в наступному: беручи за основу значення характеристик стану ОД, які спостерігаємо

$z = (z_p | p = \overline{1, u})$ визначити значення предикатів $X(c_j, s_k)$; $k = \overline{1, \lambda}$; $j \in J_k$, що задовольняють систему логічних виразів (2.24).

Процедура перетворення моделі (2.24) у комбінаторну форму передбачає виконання наступних дій:

1) Кожному предикату $X(c_j, s_k)$, що описує несправність k -го виду у j -й підсистемі ОД, ставлять у відповідність булеву змінну $x_{jk} \in \{0, 1\}$; $k = \overline{1, \lambda}$; $j \in J_k$.

2) Кожному виразу моделі (2.24) співставляють систему комбінаторних рівнянь:

$$h_p(c_j, s_k)x_{jk} = \delta_p(c_j, s_k); \quad (2.25)$$

$$k = \overline{1, \lambda}; j \in J_k; p \in P_j(c_j, s_k),$$

де $\delta_p(c_j, s_k)$ – фактичне відхилення поточного значення характеристики стану z_p від еталонного рівня, що викликане виникненням несправності k -го виду у j -й підсистемі ОД.

Вектор значень незалежних булевих змінних $(x_{jk} | k = \overline{1, \lambda}; j \in J_k)$, що задовольняє систему лінійних комбінаторних рівнянь (2.25), визначає множину несправностей у об'єкті діагностування, що приводять до його аномального стану.

З метою врахування можливого ефекту «накладання» наслідків одночасних несправностей система рівнянь (2.25) представлена у інтегративному виді:

$$\sum_{j \in J_p} \sum_{k \in K_{jp}} h_p(c_j, s_k)x_{jk} = \delta_p(c_j, s_k); p = \overline{1, u}, \quad (2.26)$$

де J_p – множина ідентифікаторів підсистем ОД, несправності у яких приводять до зміни значення характеристики стану z_p :

$$J_p = \{j: (1 \leq j \leq n) \& (\exists k \in K_j)[p \in P(c_j, s_k)]\};$$

K_{jp} – множина видів несправностей, що можуть виникати у j -й підсистемі ОД та приводити до зміни характеристики стану z_p :

$$K_{jp} = \{k \in K_j : p \in P(c_j, s_k)\}.$$

Похибки у оцінці значень характеристик стану ОД обумовлюють необхідність подання комбінаторної моделі (2.26) у вигляді системи лінійних нерівностей:

$$\begin{cases} \sum_{j \in J_p} \sum_{k \in K_{jp}} [h_p(c_j, s_k) - \xi_p(c_j, s_k)] x_{jk} \leq \delta_p(c_j, s_k) \\ \sum_{j \in J_p} \sum_{k \in K_{jp}} [h_p(c_j, s_k) + \xi_p(c_j, s_k)] x_{jk} \geq \delta_p(c_j, s_k) \end{cases}; p = \overline{1, u}, \quad (2.27)$$

де $\xi_p(c_j, s_k)$ – допустима розузгодженість між фактичним та заданим експертами відхиленням значення характеристики z_p , що викликане появою несправності k -го виду у j -й підсистемі ОД; $p = \overline{1, u}$; $j \in J_p$; $k \in K_{jp}$.

Компактніше систему нерівностей (2.27) можна подати у наступному вигляді:

$$\sum_{j \in J_p} \sum_{k \in K_{jp}} a_p^{(\omega)}(c_j, s_k) x_{jk} \leq \delta_p^{(\omega)}(c_j, s_k); \quad (2.28)$$

$$p = \overline{1, u}; \quad \omega \in \{1, 2\},$$

де

$$a_p^{(1)}(c_j, s_k) = h_p(c_j, s_k) - \xi_p(c_j, s_k);$$

$$a_p^{(2)}(c_j, s_k) = -h_p(c_j, s_k) - \xi_p(c_j, s_k);$$

$$\delta_p^{(1)}(c_j, s_k) = \delta_p(c_j, s_k);$$

$$\delta_p^{(2)}(c_j, s_k) = -\delta_p(c_j, s_k).$$

Проведені перетворення дозволяють звести завдання визначення комбінацій несправностей у складному об'єкті діагностування на основі логічної моделі (2.23) до знаходження бівалентного вектора значень змінних $(x_{jk} \mid k = \overline{1, \lambda}; j \in J_k)$, що задовольняє систему нерівностей (2.28).

Суть шуканих змінних інтерпритують наступним чином: якщо внаслідок вирішення системи (2.28) деяка змінна $x_{j^*k^*}$ ($1 \leq k^* \leq \lambda$, $j^* \in J_{k^*}$) приймає значення 1, це означає, що у j^* -й підсистемі ОД трапилась несправність k^* -го виду; при $x_{j^*k^*} = 0$ дане твердження є невірним. Сукупність незалежних змінних, які прийняли значення 1, визначає місця появи (підсистеми ОД) та види несправностей, що виникли (одночасно, послідовно або послідовно-паралельно) у об'єкті на момент його діагностування.

Як ми бачимо, система нерівностей (2.28) має лінійну структуру та носить комбінаторний характер. Бівалентність шуканих змінних, що входять до даної системи дає можливість використовувати для її вирішення модифіковані алгоритми послідовного аналізу та відсіювання варіантів, адаптовані під структуру вказаної комбінаторної моделі [16-18].

6. Якщо наслідки комбінацій несправностей, що виникають у будь-якій підсистемі того чи іншого рівня ОД не поширюються не лише на підсистеми інших рівнів, а й на інші підсистеми того рівня, де відбуваються

ці несправності, то з правої частини виразів логічної моделі (2.2) виключають вирази $F_2^{(r)}$ і $F_3^{(r)}$.

При цьому логічна модель діагностування складного об'єкта може бути представлена як наступна:

$$Y_q \rightarrow F_0^{[r(q)]} \& F_1^{[r(q)]}; q = \overline{1, w} \quad (2.29)$$

У такому випадку завдання діагностування можна вирішувати для кожної підсистеми ОД окремо, вважаючи кожну з підсистем ОД автономним та неподільним об'єктом діагностування.

Вирази, що входять до логічної моделі (2.2), набувають спрощеного виду:

$$Y_q = \bigvee_{r \in R_q} \bigwedge_{k \in K^{(r)}} X(s_k);$$

$$F_0^{(r)} = D[z_{p_0(r)}, h_{p_0(r)}^{(r)}];$$

$$F_1^{(r)} = \bigwedge_{p \in \overline{P}^{(r)}} D[z_p, h_p^{(r)}]; q = \overline{1, w}; r \in R_q,$$

де $K^{(r)}$ – множина видів несправностей у ОД, що входять до складу r -ї типової комбінації; $r = \overline{1, \rho}$;

$P^{(r)}$ – множина номерів характеристик стану ОД, що змінюють свої значення під впливом r -ї комбінації несправностей; $r = \overline{1, \rho}$;

$X(s_k)$ – простий предикат, що описує несправності k -го виду у ОД; $k = \overline{1, \lambda}$;

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

$$\overline{P}^{(r)} = P^{(r)} \setminus \{p_0(r)\}; r = \overline{1, \rho}.$$

Параметр $p_0(r)$ зберігає свою попередню суть та обирається відповідно до формули (2.1) серед елементів $p \in P^{(r)}$.

Тотожні перетворення, що базуються на виразі (2.3), дозволяють подати модель (2.29) у більш компактному вигляді:

$$Y^{(r)} \rightarrow F_0^{(r)} \& F_1^{(r)}; r = \overline{1, \rho}, \quad (2.30)$$

де

$$Y^{(r)} = \bigwedge_{k \in K^{(r)}} X(s_k),$$

а тотожність (2.4) надає можливості замінити модель (2.30) еквівалентною за змістом системою спрощених виразів:

$$\bigwedge_{k \in K^{(r)}} X(s_k) \rightarrow D[z_p, h_p^{(r)}]; \quad (2.31)$$

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

Це дозволяє сформулювати дане завдання наступним чином: беручи за основу значення характеристик стану ОД, які спостерігаємо, $z = (z_p \mid p = \overline{1, u})$ визначити значення предикатів $X(s_k)$; $k = \overline{1, \lambda}$, що задовольняють систему (2.31).

Для перетворення моделі (2.31) у комбінаторну форму необхідно виконати наступні дії:

1) Кожному предикату $X(s_k)$, який описує несправність k -го виду у ОД, поставити у відповідність булеву змінну $x_k \in \{0, 1\}$, $k = \overline{1, \lambda}$.

2) Кожному виразу моделі (2.31) співставити систему комбінаторних рівнянь:

$$\prod_{k \in K^{(r)}} h_p^{(r)} x_k = \delta_p^{(r)} ; \quad (2.32)$$

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

Вектор значень незалежних булевих змінних $(x_k | k = \overline{1, \lambda})$, що задовольняє систему нелінійних комбінаторних рівнянь (2.32), визначає комбінацію несправностей у об'єкті діагностування, що приводять до його аномального стану.

З метою врахування ефекту «накладання» наслідків множини факторів аномального стану ОД систему рівнянь (2.32) представлено у інтегративній формі:

$$\sum_{r \in R(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} h_p^{(r)} x_k = \delta_p ; p = \overline{1, u} . \quad (2.33)$$

Необхідність врахування різного роду похибок при оцінці значень характеристик стану ОД обумовлює подання комбінаторної моделі (2.33), у вигляді системи нелінійних нерівностей:

$$\begin{cases} \sum_{r \in R(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} (h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)}) x_k \leq \delta_p \\ \sum_{r \in R(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} (h_p^{(r)} + \xi_p^{(r)}) x_k \geq \delta_p \end{cases} ; p = \overline{1, u} . \quad (2.34)$$

З метою компактнішого подання системи нерівностей (2.34) введемо наступні позначення:

$$a_{rp}^{(1)} = h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)} ; a_{rp}^{(2)} = -h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)} ; \delta_p^{(1)} = \delta_p ; \delta_p^{(2)} = -\delta_p .$$

Тоді систему (2.34) можна представити у наступному вигляді:

$$\sum_{r \in R(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} a_{rp}^{(\omega)} x_k \leq \delta_p^{(\omega)}; \quad (2.35)$$

$$p = \overline{1, u}; \quad \omega = \{1, 2\}.$$

Проведені перетворення дозволяють звести завдання визначення комбінацій несправностей у складному об'єкті діагностування на основі логічної моделі (2.29) до знаходження бівалентного вектора значень змінних $(x_k | k = \overline{1, \lambda})$, що задовольняє систему нерівностей (2.35).

Суть шуканих змінних можна інтерпретувати наступним чином: якщо в результаті вирішення системи (2.22) деяка змінна x_{k^*} ($1 \leq k^* \leq \lambda$) приймає значення 1, це означає, що у ОД трапилася несправність k^* -го виду; при $x_{k^*} = 0$ дане твердження є невірним. Сукупність незалежних змінних, які прийняли значення 1, визначає види множини несправностей, що виникли (одночасно, послідовно або послідовно-паралельно) у досліджуваному об'єкті на момент його діагностування.

Як бачимо, система нерівностей (2.35) має нелінійну структуру та носить комбінаторний характер. Бівалентність шуканих змінних, що входять до даної системи, надає можливості використовувати для її вирішення модифіковані алгоритми послідовного аналізу та відсіювання варіантів, адаптовані під структуру вказаної комбінаторної моделі [16-18].

7. У випадку, коли одночасно виконуються наступні умови:

а) комбінації несправностей, що викликають однакові зміни значень однакових характеристик стану ОД, відсутні або апріорно не визначені;

б) наслідки комбінацій несправностей, що виникають у будь-якій підсистемі того чи іншого рівня ОД, не поширюються на підсистеми інших рівнів, а також на інші підсистеми того рівня, на якому відбуваються ці несправності, логічна модель початково може будуватися за формулою (2.30).

При цьому відповідна комбінаторна модель зберігає форму системи комбінаторних нерівностей (2.35).

8. Якщо одночасно виконуються наступні умови:

а) апріорно встановити множину типових комбінацій несправностей неможливо;

б) різні несправності, що викликають однакові зміни значень одних і тих же характеристик стану ОД, відсутні;

в) наслідки комбінацій несправностей, що виникають у будь-якій підсистемі того чи іншого рівня ОД, не поширюються на підсистеми інших рівнів, а також на інші підсистеми того рівня, де ці несправності виникають:

– ліва частина виразів логічної моделі формується з одиничних предикатів, що описують несправності, а кожна підсистема ОД розглядається як автономний і неподільний об'єкт діагностування.

Нехай $P(s_k)$ – множина характеристик стану ОД, що змінюють свої значення під впливом несправності k -го виду; $k = \overline{1, \lambda}$;

$h_p(s_k)$ – величина, яка характеризує зміну характеристики z_p стану ОД під впливом несправності k -го виду; $k = \overline{1, \lambda}$; $p \in P(s_k)$;

$p_0^{\max} = p_0(s_k)$ – номер характеристики стану ОД, яка зазнає найбільш відносних змін в результаті виникнення несправностей k -го виду та визначається за ознакою:

$$\left| \frac{h_{p_0^{\max}}(s_k)}{\varepsilon_{p_0^{\max}}} \right| = \max \left\{ \left| \frac{h_p(s_k)}{\varepsilon_p} \right|; p \in P(s_k) \right\}; k = \overline{1, \lambda}.$$

Логічна модель діагностування складного об'єкта за вищевказаних умов набуває наступного вигляду:

$$X(s_k) \rightarrow F_0(s_k) \& F_1(s_k); k = \overline{1, \lambda}, \quad (2.36)$$

де $F_0(s_k)$ – простий логічний вислів, який відображає зміну характеристики p_0^{\max} стану ОД під впливом несправності k -го виду:

$$F_0(s_k) = D[z_{p_0^{\max}}, h_{p_0^{\max}}(s_k)]; k = \overline{1, \lambda};$$

$F_1(s_k)$ – складний вислів, який описує зміну значень інших (за виключенням p_0^{\max} -ї) характеристик стану ОД в результаті виникнення несправності k -го виду:

$$F_1(s_k) = \bigwedge_{p \in \overline{P}_k} D[z_p, h_p(s_k)]; k = \overline{1, \lambda};$$

де

$$\overline{P}_k = P(s_k) \setminus \{p_0(s_k)\}.$$

Опираючись на тотожність (2.4) логічну модель (2.36) можна замінити системою спрощених виразів:

$$\begin{aligned} X(s_k) &\rightarrow D[z_p, h_p(s_k)]; & (2.37) \\ k &= \overline{1, \lambda}; p \in P(s_k). \end{aligned}$$

За формальною постановкою дане завдання полягає у наступному: на основі спостережуваних значень характеристик стану ОД $z = (z_p | p = \overline{1, u})$ визначити значення предикатів $X(s_k); k = \overline{1, \lambda}$, що задовольняють систему логічних виразів (2.37).

Процедура перетворення моделі (2.37) до комбінаторної форми передбачає виконання наступних дій:

1) Кожному предикату $X(s_k)$, який описує несправність k -го виду в ОД, ставлять у відповідність булеву змінну $x_k \in \{0,1\}$; $k = \overline{1,\lambda}$.

2) Кожен вираз моделі (2.37) співставляють з системою комбінаторних рівнянь:

$$\begin{aligned} h_p(s_k)x_{jk} &= \delta_p(s_k); \\ k &= \overline{1,\lambda}; p \in P(s_k), \end{aligned} \quad (2.38)$$

де $\delta_p(s_k)$ – фактичне відхилення поточного значення характеристики стану z_p від еталонного рівня, викликане появою у ОД несправності k -го виду.

Вектор значень незалежних булевих змінних $(x_k | k = \overline{1,\lambda})$, який задовольняє систему лінійних комбінаторних рівнянь (2.38), визначає множину несправностей у об'єкті діагностування, що приводять до його аномального стану.

З метою врахування можливого ефекту «накладання» наслідків одночасних несправностей система рівнянь (2.38) представлена у інтегративному вигляді:

$$\sum_{k \in K_p} h_p(s_k)x_k = \delta_p(s_k); p = \overline{1,u}, \quad (2.39)$$

де K_p – множина видів несправностей, які можуть виникати у ОД та приводити до зміни значень характеристики стану z_p :

$$K_p = \{k : (1 \leq k \leq \lambda) \& [p \in P(s_k)]\}; p = \overline{1,u}.$$

Похибки у оцінці значень характеристик стану ОД обумовлюють необхідність подання комбінаторної моделі (2.39) у вигляді системи лінійних нерівностей:

$$\begin{cases} \sum_{k \in K_p} [h_p(s_k) - \xi_p(s_k)]x_k \leq \delta_p(s_k) \\ \sum_{k \in K_p} [h_p(s_k) + \xi_p(s_k)]x_k \geq \delta_p(s_k) \end{cases}; p = \overline{1, u}, \quad (2.40)$$

де $\xi_p(s_k)$ – допустиме розузгодження між фактичним та заданим експертами відхиленням значення характеристики z_p , яке викликане появою несправності k -го виду в ОД; $p = \overline{1, u}$; $k \in K_p$.

Компактніше систему нерівностей (2.40) можна подати у наступному вигляді:

$$\sum_{k \in K_p} a_p^{(\omega)}(s_k)x_k \leq \delta_p^{(\omega)}(s_k); \quad (2.41)$$

$$p = \overline{1, u}; \omega \in \{1, 2\},$$

де

$$a_p^{(1)}(s_k) = h_p(s_k) - \xi_p(s_k); a_p^{(2)}(s_k) = -h_p(s_k) - \xi_p(s_k);$$

$$\delta_p^{(1)}(s_k) = \delta_p(s_k); \delta_p^{(2)}(s_k) = -\delta_p(s_k).$$

Проведені перетворення дозволяють звести задачу визначення комбінацій несправностей у складному об'єкті діагностування на основі логічної моделі (2.36) до відшукування бівалентного вектора значень змінних, $(x_k | k = \overline{1, \lambda})$, що задовольняють систему нерівностей (2.41).

Сенс шуканих змінних інтерпритуємо таким чином: якщо в результаті вирішення системи (2.41) деяка змінна $(x_{k^*} | 1 \leq k^* \leq \lambda)$ приймає значення 1, це означає, що в ОД виникла несправність k^* -го виду; при $x_{k^*} = 0$ дане твердження є невірним. Сукупність незалежних змінних, які прийняли значення 1, визначає види несправностей, що виникли (одночасно, послідовно або послідовно-паралельно) в досліджуваному об'єкті на момент його діагностування.

Як бачимо, система нерівностей (2.41) має лінійну структуру і носить комбінаторний характер. Бівалентність шуканих змінних, що входять до даної системи, дає можливість використовувати для її вирішення модифіковані алгоритми послідовного аналізу та відсіювання варіантів, адаптовані під структуру зазначеної комбінаторної моделі [16-18].

9. Якщо наслідки комбінацій несправностей, які виникають у будь-якій підсистемі того чи іншого рівня ОД не поширюються на:

- а) підсистеми інших рівнів;
- б) інші підсистеми того рівня, де виникають несправності;

в) інші характеристики стану підсистеми, у якій виникають ці несправності, за виключенням характеристики, яка є основною для тієї чи іншої комбінації, то кожен з підсистем ОД розглядають як автономний та неподільний об'єкт діагностування, а з правої частини виразів логічної моделі (2.2) виключають висловлювання $F_1^{(r)}$, $F_2^{(r)}$ та $F_3^{(r)}$.

При цьому логічна модель діагностування подається у наступному вигляді:

$$Y_q \rightarrow F_0^{[r(q)]}; q = \overline{1, w}, \quad (2.42)$$

де

$$Y_q = \bigvee_{r \in R_q} \bigwedge_{k \in K^{(r)}} X(s_k);$$

$$F_0^{(r)} = D[z_{p_0(r)}, h_{p_0(r)}^{(r)}]; q = \overline{1, w}; r \in R_q.$$

Тотожні претворення, що базуються на виразі (2.3), дозволяють представити модель (2.29) у компактнішому виді:

$$\bigwedge_{k \in K^{(r)}} X(s_k) \rightarrow D[z_{p_0(r)}, h_{p_0(r)}^{(r)}]; \quad (2.43)$$

$$r = \overline{1, \rho}.$$

Це дозволяє сформулювати дане завдання наступним чином: на основі спостережуваних значень характеристик стану ОД $z = (z_p | p = \overline{1, u})$ визначити значення предикатів $X(s_k); k = \overline{1, \lambda}$, які задовольняють систему (2.43).

Для перетворення моделі (2.43) у комбінаторну форму необхідно виконати наступні дії:

1) Кожному предикату $X(s_k)$, який описує несправність k -го виду в ОД, поставити у відповідність булеву змінну $x_k \in \{0, 1\}$, $k = \overline{1, \lambda}$.

2) Кожен з виразів моделі (2.44) співставити з комбінаторними рівняннями:

$$\prod_{k \in K^{(r)}} h_{p_0(r)}^{(r)} x_k = \delta_{p_0(r)}^{(r)} ; r = \overline{1, \rho}. \quad (2.44)$$

Вектор значень незалежних булевих змінних $(x_k | k = \overline{1, \lambda})$, що задовольняє систему нелінійних комбінаторних рівнянь (2.44), визначає комбінацію несправностей у об'єкті діагностування, що приводять його до аномального стану.

З метою врахування ефекту «накладання» наслідків множини факторів аномального стану ОД система рівнянь (2.44) подається в інтегративному вигляді:

$$\sum_{r \in R_0(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} h_p^{(r)} x_k = \delta_p ; p \in P_0, \quad (2.45)$$

де P_0 – множина номерів характеристик стану ОД, яка зазнає найбільш відносних змін внаслідок появи комбінацій несправностей, які розглядаються:

$$P_0 = \{p_0(r); r = \overline{1, \rho}\};$$

$R_0(p)$ – множина комбінацій несправностей, що приводять до зміни значення характеристики z_p стану ОД:

$$R_0(p) = \{r : (1 \leq r \leq \rho) \& [p = p_0(r)]\}; p \in P_0.$$

Необхідність врахування похибок при оцінюванні значень характеристик стану ОД обумовлює подання комбінаторної моделі (2.45), у вигляді системи нелінійних нерівностей:

$$\begin{cases} \sum_{r \in R_0(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} (h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)}) x_k \leq \delta_p \\ \sum_{r \in R_0(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} (h_p^{(r)} + \xi_p^{(r)}) x_k \geq \delta_p \end{cases}; p \in P_0. \quad (2.46)$$

З метою компактнішого подання системи нерівностей (2.46) введемо наступні позначення:

$$a_{rp}^{(1)} = h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)}; a_{rp}^{(2)} = -h_p^{(r)} - \xi_p^{(r)}; \delta_p^{(1)} = \delta_p; \delta_p^{(2)} = -\delta_p.$$

Тоді систему (2.46) можна представити у наступному вигляді:

$$\begin{aligned} \sum_{r \in R_0(p)} \prod_{k \in K^{(r)}} a_{rp}^{(\omega)} x_k \leq \delta_p^{(\omega)}; \\ p = \overline{1, u}; \omega \in \{1, 2\}. \end{aligned} \quad (2.47)$$

Виконані перетворення дозволяють звести завдання визначення комбінацій несправностей у складному об'єкті діагностування на основі логічної моделі (2.42) до знаходження бівалентного вектора значень змінних $(x_k | k = \overline{1, \lambda})$, що задовольняє систему нерівностей (2.47).

Суть шуканих змінних інтерпретують наступним чином: якщо в результаті вирішення системи (2.47) деяка змінна x_{k^*} ($1 \leq k^* \leq \lambda$) приймає значення 1, це означає, що у ОД виникла несправність k^* -го виду; при $x_{k^*} = 0$ дане твердження є невірним. Сукупність незалежних змінних, що

прийняли значення 1, визначає види множини несправностей, які виникли (одночасно, послідовно або послідовно-паралельно) у досліджуваному об'єкті на момент його діагностування.

Як можна побачити, система нерівностей (2.47) має нелінійну структуру та носить комбінаторний характер. Бівалентність шуканих змінних, що входять до даної системи, дає можливість використовувати для її вирішення модифіковані алгоритми послідовного аналізу та відсіювання варіантів, адаптовані під структуру вказаної комбінаторної моделі [16-18].

10. При одночасному виконанні наступних умов:

а) комбінації несправностей, що викликають однакові зміни значень однакових характеристик стану ОД, відсутні або апріорно не визначені;

б) наслідки комбінацій несправностей, що виникають у будь-якій підсистемі того чи іншого рівня ОД, не поширюються на підсистеми інших рівнів, на інші підсистеми того рівня, де виникають несправності, а також на інші характеристики стану підсистеми, у якій виникають несправності, за виключенням характеристики, що є основною для тієї чи іншої комбінації,

– логічна модель може бути початково побудована за формулою:

$$\bigwedge_{k \in K^{(r)}} X(s_k) \rightarrow D[z_{p_0(r)}, h_{p_0(r)}^{(r)}]; r = \overline{1, \rho},$$

де $p_0(r)$ – номер єдиної характеристики стану ОД, яка змінює своє значення під впливом r -ї комбінації несправностей.

Взаємно однозначна відповідність між комбінацією несправностей та єдиною характеристикою стану ОД, яка змінює своє значення, виключає ефект «накладання» наслідків та робить завдання діагностування тривіальним та таким, що не являє собою наукового інтересу. Тому, подальша деталізація загальної моделі діагностування є беззмістовною.

2.4. Висновки до другого розділу

1. 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 апіорного 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.

2. 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.

Основні результати дисертаційної роботи, представлені в розділі 2, опубліковані в працях автора [1-12].

Список використаних джерел до другого розділу

1. Е. Нечипорук, «Особенности построения обобщенной логической модели диагностирования сложных систем», *Проблеми інформатизації і управління*, Вип. 1(41), С. 65-68, 2013.
2. Нечипорук, «Налаштування експертної моделі діагностування багаторівневого технічного об'єкта», *Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу: Міжнар. наук.-техн. конф.*, Київ, 2017, С.6-8.
3. 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.
4. N. Marchenko, O. 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 centuru*» *Safety in Aviation and Space Technologies: Proceeding the first world congress*, Kyiv, 2012, Vol.1, pp. 1.11.27-1.11.31.
5. 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.
6. 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.
7. Marchenko, O. Nechyporuk, «Digital orthogonal filtration of spatiotemporal signals in multichannel correlation systems», *The Advanced Science Open Access Journal*, № 5, pp.115-119, 2012.

8. Н. Марченко, В. Нечипорук, О. Нечипорук, Ю. Пепа, Методи оцінювання точності інформаційно-вимірjuвальних систем діагностики. *Монографія. Київ: «Задруга», 2014, 200 с.*
9. О. 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.
10. 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.
11. О. Литвиненко, О. Нечипорук, Логіко-математичні методи діагностування складних систем. *Монографія. Київ: «Артмедіа принт», 2016, 166 с.*
12. 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.
13. В. Михалевич, В. Волкович, Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. *Москва: «Наука», 1982, 288 с.*
14. Х. Пападимитриу, К. Стайглиц, Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. *Москва: «Мир», 1985, 512 с.*
15. Ю. Зак, «Методы направленного перебора в задачах целочисленного линейного программирования с булевыми переменными», *Кибернетика*, №4, С. 72-81, 1977.
16. А. Литвиненко, «Комбинаторный метод выработки решений в экспертных системах управления сложными объектами», *Кибернетика и системный анализ*, № 5, С.81-86, 1992.
17. А. Литвиненко, «Метод решения экстремальных комбинаторных задач с нелинейной структурой», *Кибернетика*, № 5, С.83-87, 1983.

18. В. Волкович, А. Волошин, «Об одной схеме метода последовательного анализа и отсеивания вариантов», *Кибернетика*, №4, С. 98-105, 1978.
19. Д. Поспелов, *Логико-лингвистические модели в системах управления*. Москва: «Энергоиздат», 1981, 232 с.
20. Т. Гаврилова, В. Хорошевский, *Базы знаний интеллектуальных систем: Учебник для вузов*. Санкт Петербург.: «Питер», 2000, 144 с.
21. Ж.-Л. Лорьер, *Системы искусственного интеллекта*. Москва: «Мир», 1991, 116 с.
22. Н. Нильсон, *Искусственный интеллект. Методы поиска решений*. Москва: «Мир», 1973, 128 с.
23. Н. Нильсон, *Принципы искусственного интеллекта*. Москва: «Радио и связь», 1985, 112 с.
24. Е. Барзилович, *Модели технического обслуживания сложных систем*. Москва: «Высшая школа», 1982, 232 с.
25. Р. Алиев, Н. Абдикеев, *Производственные системы с искусственным интеллектом*. Москва: «Радио и связь», 1990, 112 с.
26. Б. Одинцов, *Проектирование экономических экспертных систем*. Москва: «ЮНИТИ», 1996, 136 с.
27. В. Чикул, *Основы искусственного интеллекта*. Москва: «Диалог МГУ», 2000, 164 с.
28. Ю. Шрейдер, А. Шаров, *Системы и модели*. Москва: «Радио и связь», 1982, 112 с.

РОЗДІЛ 3

МЕТОДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ДІАГНОСТУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

3.1. Метод трансформації комбінаторної моделі до канонічного виду систем нерівностей лінійної та нелінійної структури з булевими змінними

У попередньому розділі було доведено, що комбінаторні моделі завдань діагностування складних багаторівневих об'єктів являють собою системи комбінаторних нерівностей, причому системи (2.9), (2.22), (2.35) та (2.47) мають нелінійну структуру, а системи (2.15), (2.28) та (2.41) – лінійну.

Бівалентність шуканих змінних, що входять до перерахованих систем, надає можливість використовувати для їх вирішення модифіковані алгоритми послідовного аналізу та відсіювання варіантів, адаптовані під структуру кожної з цих моделей [8-15]. Проте, для цього вони повинні бути перетворені до відповідних канонічних форм, на які орієнтовано вказані алгоритми. Система нелінійних нерівностей з булевими змінними представлена у наступному загальному вигляді, який можна вважати канонічним для подібних завдань [1-6]:

$$g_j(x) \leq b_j; \quad j = \overline{1, n}, \quad (3.1)$$

де x – m -вимірний вектор незалежних булевих змінних:

$$x = (x_i | i = \overline{1, m}); \quad x_i \in \{0, 1\};$$

$g_j(x)$ – функція незалежних змінних, яка має нелінійну структуру:

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

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

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

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_{j_r}, 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 (3.1).

Метод перетворення нелінійної комбінаторної моделі завдання діагностування (2.9) до виду (3.1) полягає в наступному:

1) перенумерувати шукані змінні $x_{i'j'k}$, $i' = \overline{1, m'}$, $j' \in J_{i'}$, $k \in K_{i'j'}$, що входять до системи нерівностей (2.9), числами натурального ряду від 1 до m , де

$$m = \sum_{i'=1}^{m'} \sum_{j' \in J_{i'}} |K_{i'j'}|;$$

m' – кількість ієрархічних рівнів ОД;

2) кожній змінній $x_{i'j'k} \in \{0, 1\}$, $i' = \overline{1, m'}$, $j' \in J_{i'}$, $k \in K_{i'j'}$, поставити у відповідність змінну $x_i \in \{0, 1\}$; $i = \overline{1, m}$;

3) ввести нові позначення шуканих змінних x_i ; $i = \overline{1, m}$ у вирази (2.9) замість вихідних змінних $x_{i'j'k}$, $i' = \overline{1, m'}$, $j' \in J_{i'}$, $k \in K_{i'j'}$;

4) перенумерувати всі обмеження системи (2.9) числами натурального ряду від 1 до n , де $n = 2u$;

5) зформуванати множини x -добутків, що відрізняються одна від одної та входять до системи нерівностей (2.9), та пронумерувати їх числами натурального ряду від 1 до q : $\{\varphi_r(x); r = \overline{1, q}\}$;

6) визначити сукупність підмножин номерів незалежних змінних, що утворюють x -добутки: $\{I_r; r = \overline{1, q}\}$;

7) визначити сукупність підмножин номерів x -добутків, що входять до нерівностей системи (2.9): $\{R_j; j = \overline{1, n}\}$;

8) змінити позначення коефіцієнтів нерівностей системи (2.9), замінивши символи $a_{rp}^{(\omega)}$; $p = \overline{1, u}$; $\omega \in \{1, 2\}$; $r \in R(p)$ символами a_{jr} ; $j = \overline{1, n}$; $r \in R_j$ з відповідною індексацією;

9) змінити позначення правих частин нерівностей системи (2.9), замінивши символи $\delta_p^{(\omega)}$; $p = \overline{1, u}$; $\omega \in \{1, 2\}$ символами b_j ; $j = \overline{1, n}$ з відповідною індексацією.

Формально наскрізна перенумерація змінних $x_{i'j'k}$, $i' = \overline{1, m'}$, $j' \in J_{i'}$, $k \in K_{i'j'}$, що входять до початкової системи нерівностей (2.9), полягає в тому, що кожній трійці індексів (i', j', k) ставлять у відповідність певний номер (i) змінної x_i ; $i = \overline{1, m}$, що входить до канонічної форми (3.1). Це дозволяє за результатами розв'язання завдання (3.1) однозначно визначити шукане вирішення завдання діагностування.

Отримані результати вирішення завдання (3.1) можуть бути інтерпретовані наступним чином. Якщо деяка змінна x_i ; $1 \leq i \leq m$ в результаті реалізації алгоритму послідовного аналізу та 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:

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

Метод трансформації комбінаторної моделі до канонічного виду представлено на рис. 3.1.

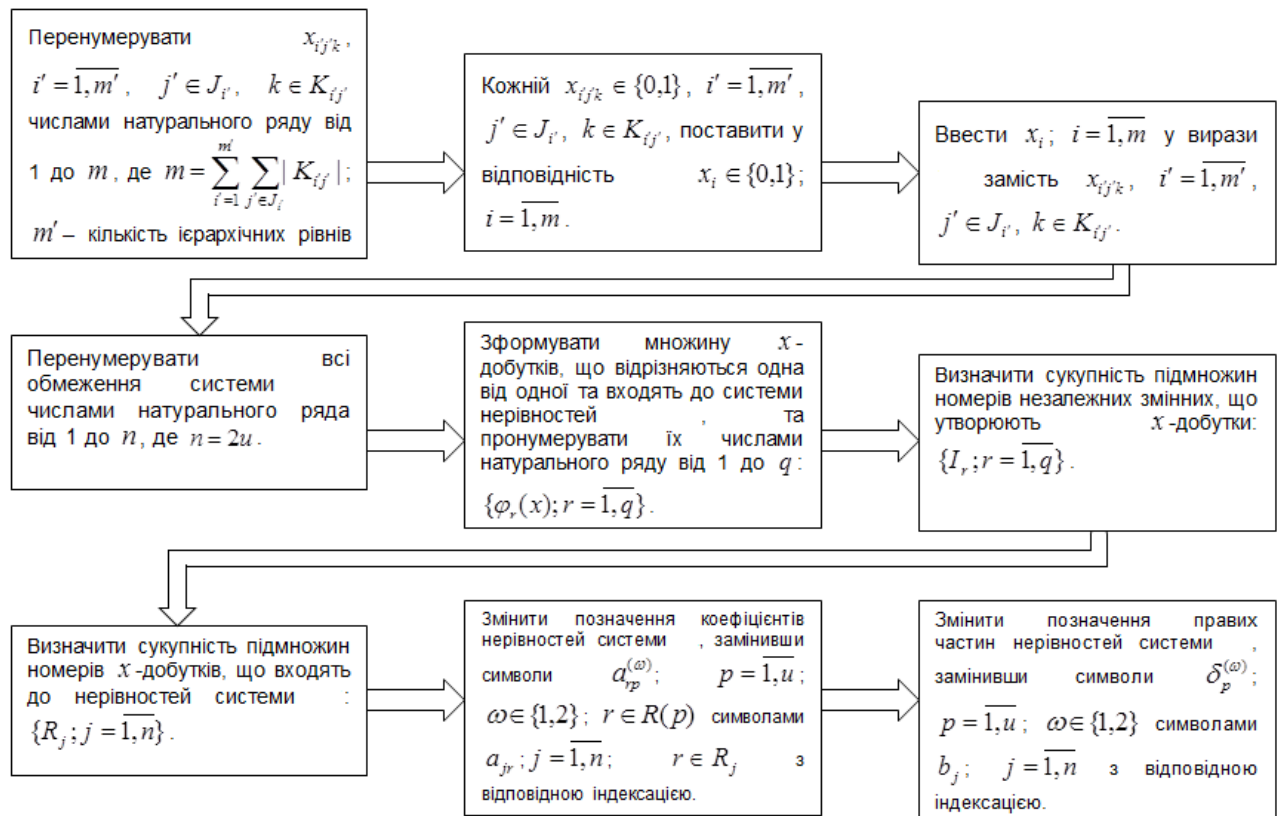


Рис. 3.1. Трансформація комбінаторної моделі до канонічного виду

Зформований 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 вирішення завдання діагностування. Аналогічно, до канонічної форми (3.1) перетворюється система нерівностей (2.22). Відмінність полягає лише в тому, що нові змінні

$x_i; i = \overline{1, m}$ приводять у відповідність до вихідних двоіндексних змінних $x_{jk}; j' = \overline{1, n'}; k \in K_{j'}$, кількість яких можна вирахувати за формулою:

$$m = \sum_{j'=1}^{n'} |K_{j'}|.$$

Перетворення до канонічного виду (3.1) систем нерівностей (2.35) та (2.47) зумовлює просте перепозначення одноіндексних змінних, що входять до вказаних систем: вихідні змінні $x_k; k = \overline{1, \lambda}$ замінюють на нові змінні $x_i; i = \overline{1, m}$; де $m = \lambda$. Всі інші дії описаної процедури залишаються попередніми.

Система лінійних нерівностей з булевими змінними може бути подана у наступному (канонічному) вигляді:

$$g_i(x) \leq b_i; i = \overline{1, m}, \quad (3.2)$$

де x – n -мірний вектор незалежних булевих змінних:

$$x = (x_j | j = \overline{1, n}); x_j \in \{0, 1\};$$

$g_i(x)$ – лінійна функція у незалежних змінних:

$$g_i(x) = \sum_{j \in J_i} a_{ij} x_j; i = \overline{1, m};$$

J_i – множина номерів незалежних змінних, що входять до i -ї нерівності; $i = \overline{1, m}$;

$$a_{jr}, b_j \text{ – дійсні числа; } i = \overline{1, m}; j \in J_i.$$

Необхідно визначити вектор значень бівалентних змінних $x = (x_j | j = \overline{1, n})$, що задовольнятиме систему нерівностей (3.2).

Для перетворення лінійної комбінаторної моделі завдання діагностування (2.15) до форми (3.2) необхідно виконати наступні дії:

1) перенумерувати шукані змінні $x_{i'j'k}$; $k = \overline{1, \lambda}$; $i' \in I_k$; $j' \in J_{i'k}$, що входять до системи нерівностей (2.15), числами натурального ряду від 1 до n , де

$$n = \sum_{k=1}^{\lambda} \sum_{i \in I_k} |J_{i'k}|;$$

2) кожній змінній $x_{i'j'k} \in \{0,1\}$; $k = \overline{1, \lambda}$; $i' \in I_k$; $j' \in J_{i'k}$ поставити у відповідність змінну $x_j \in \{0,1\}$; $j = \overline{1, n}$;

3) ввести нові позначення шуканих змінних x_j ; $j = \overline{1, n}$ у вирази (2.15) замість вихідних змінних $x_{i'j'k}$; $k = \overline{1, \lambda}$; $i' \in I_k$; $j' \in J_{i'k}$;

4) перенумерувати всі обмеження системи (2.15) числами натурального ряду від 1 до m , де $m = 2u$;

5) змінити позначення коефіцієнтів нерівностей системи (2.15), замінивши символи $a_{rp}^{(\omega)}$; $p = \overline{1, u}$; $\omega \in \{1, 2\}$ символами a_{ij} ; $i = \overline{1, m}$; $j \in J_i$ з відповідною індексацією;

6) змінити позначення правих частин нерівностей системи (2.9), замінивши символи $\delta_p^{(\omega)}$; $p = \overline{1, u}$; $\omega \in \{1, 2\}$ символами b_j ; $i = \overline{1, m}$ з відповідною індексацією.

Аналогічно, до канонічного вигляду (3.2) перетворюємо систему нерівностей (2.28). Відмінність полягає лише в тому, що нові змінні x_j ; $j = \overline{1, n}$ приводять у відповідність до вихідних двоіндексних змінних $x_{j'k}$; $k = \overline{1, \lambda}$; $j' \in J_k$, кількість яких можна обчислити за формулою:

$$n = \sum_{k=1}^{\lambda} |J_k|.$$

Перетворення до канонічного вигляду (3.2) системи нерівностей (2.41) обумовлює просте перепозначення одноіндексних змінних, що входять до вказаної системи: вихідні змінні x_k ; $k = \overline{1, \lambda}$ замінюють на нові змінні x_j ; $j = \overline{1, n}$, де $n = \lambda$. Всі інші дії описаної процедури залишаються попередніми.

Інтерпретація результатів вирішення систем комбінаторних нерівностей (3.1) та (3.2) відносно завдань діагностування (2.22), (2.35), (2.47), (2.15), (2.28) та (2.41) аналогічна до тієї, що була описана вище стосовно завдання (2.9).

3.2. Метод розв'язання систем комбінаторних нерівностей з нелінійною структурою

3.2.1 Основні поняття та визначення

Необхідність дослідження систем нелінійних нерівностей з булевими змінними (комбінаторних нерівностей) виникає при виведенні рішень в експертних системах керування складними організаційно-технологічними процесами, а також у системах діагностування складних технічних об'єктів, в яких можуть виникати комбінації несправностей з ефектом «накладання» їх наслідків [1-7, 12, 13].

Крім того, системи нерівностей з булевими змінними входять до складу математичних моделей множинних прикладних задач комбінаторної оптимізації, до яких належать завдання маршрутизації транспортних потоків, складання розкладів, впорядкування та календарного планування комплексу взаємопов'язаних робіт, проектування складних об'єктів та інші [11-12].

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 вирішення завдання не вдається знайти, хоча воно об'єктивно існує.

Прагнення поставити процес вирішення систем нелінійних нерівностей з булевими змінними на строгу математичну основу зумовило розробку нового методу, що реалізує стратегію послідовного аналізу та відсіювання варіантів [13-15].

Система нелінійних нерівностей з булевими змінними представлена за формою (3.1).

Метод послідовного аналізу та відсіювання варіантів дозволяє скоротити до мінімуму кількість кроків реалізації алгоритма, та, відповідно, тривалість вирішення системи нерівностей (3.1) за рахунок високого ступеню спрямованості та максимального звуження зони пошуку вектора значень булевих змінних $x = (x_i | i = \overline{1, m})$, що задовольняє дану систему.

Метод полягає у послідовному дробленні 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:

- виявлення та виключення з подальшого розгляду підмножин, які не вміщують допустимих планів;
- виявлення та виключення з подальшого розгляду нерівностей, що втратили у процесі вирішення завдання якість активності відносно планів аналізованої підмножини варіантів;
- виявлення та фіксація змінних, які для забезпечення допустимості доповнюючих планів аналізованої підмножини варіантів можуть приймати лише безальтернативні значення (лише 0 або лише 1).

Нехай до початку деякого етапу вирішення завдання (3.1) у повній множині G варіантів виділено λ підмножин G_k , що не пересікаються, та вміщують допустимі плани; $k = \overline{1, \lambda}$.

Позначимо символами I_k^0 та I_k^1 множини номерів шуканих змінних, що отримали у планах k -ї підмножини варіантів значення 0 та 1, а символом I_k – сукупність номерів змінних, значення яких в G_k не зафіксовані.

Набір значень змінних $x_i, i \in I_k^0 \cup I_k^1$, такий що:

$$(\forall i \in I_k^0)(x_i = 0) \& (\forall i \in I_k^1)(x_i = 1),$$

називається частковим планом k -ї підмножини варіантів.

Любий набір значень змінних $x_i, i \in I_k$, що задовольняють умову бівалентності $x_i \in \{0,1\}$, називається доповнюючим планом підмножини G_k .

Введемо наступні позначення:

R_k^0 та R_k^1 – множини номерів функцій $\varphi_r(x)$, перетворених частковим планом k -ї підмножини варіантів відповідно у 0 та 1:

$$R_k^0 = \{r : I_r \cap I_k^0 \neq \emptyset\}, R_k^1 = \{r : I_r \subseteq I_k^1\};$$

R_k – сукупність номерів функцій $\varphi_r(x)$, що не перетворені частковим планом підмножини G_k в константу:

$$R_k = \{1, \dots, q\} \setminus (R_k^0 \cup R_k^1).$$

Склад множин R_{jk} та $R_{jk}^1, j = \overline{1, n}$, аналогічний тим, що були згадані вище, але стосуються j -ї нерівності системи (3.1), визначається відповідно до формул:

$$R_{jk} = R_j \cap R_k; R_{jk}^1 = R_j \cap R_k^1.$$

Нерівність системи (3.1), яку не задовольняє хоча б один з доповнюючих планів підмножини G_k , називається активною відносно

планів даної підмножини. Сукупність номерів таких нерівностей позначимо символом J_k ; $J_k \subseteq \{1, 2, \dots, n\}$.

Кожній k -й підмножині варіантів відповідає окрема система нерівностей, яка випливає з загальної моделі (3.1) як результат підставлення в неї часткового плану даної підмножини:

$$g_{jk}(x) \leq b_{jk}; \quad j \in J_k; \quad (3.3)$$

де

$$g_{jk}(x) = \sum_{r \in R_{jk}} a_{jr} \varphi_{rk}(x);$$

$$x_i \in \{0, 1\}.$$

Тут $\varphi_{rk}(x)$ – функція незалежних змінних, що являє собою добуток аргументів функції $\varphi_r(x)$, які в планах k -ї підмножини варіантів не мають фіксованих значень:

$$\varphi_{rk}(x) = \prod_{i \in I_{rk}} x_i; \quad r \in R_k;$$

I_{rk} та m_{rk} – множина номерів та кількість таких аргументів, відповідно:

$$I_{rk} = I_r \cap I_k; \quad m_{rk} = |I_{rk}| \quad r \in R_k;$$

b_{jk} – вільний член j -ї нерівності системи (3.1), зменшений на суму коефіцієнтів, з якими до цієї нерівності входили x -добутки, перетворені частковим планом підмножини G_k до одиниці:

$$b_{jk} = b_j - \sum_{r \in R_{jk}^1} a_{jr}, \quad j \in J_k.$$

I_{jk} – множина номерів незалежних змінних, що входять до j -ї нерівності системи (3.3):

$$I_{jk} = \bigcup_{r \in R_{jk}} I_{rk}; \quad j \in J_k.$$

На множинах R_{jk} та I_{jk} , $j \in J_k$ виділяють наступні підмножини, необхідні для аналізу системи нерівностей (3.3):

R_{jk}^2, R_{jk}^3 – сукупності номерів x -добутків, що входять до j -ї нерівності системи (3.3) з від'ємними та додатними коефіцієнтами відповідно:

$$R_{jk}^2 = \{r \in R_{jk} : a_{jr} < 0\}, \quad R_{jk}^3 = \{r \in R_{jk} : a_{jr} > 0\};$$

I_{jk}^2 – множина номерів незалежних змінних, добутки яких входять до j -ї нерівності системи (3.3) з від'ємними коефіцієнтами:

$$I_{jk}^2 = \bigcup_{r \in R_{jk}^2} I_{rk};$$

$R_{jk}^2(r')$ – множина номерів x -добутків, що входять до j -ї нерівності системи (3.3) з від'ємними коефіцієнтами, які не перевищують значення коефіцієнту $a_{jr'}$ ($r' \in R_{jk}^2$):

$$R_{jk}^2(r') = \{r'\} \bigcup \{r \in R_{jk}^2 : a_{jr} \leq a_{jr'}\};$$

$I_{jk}^2(r')$ – множина номерів незалежних змінних, добутки яких входять до j -ї нерівності системи (3.3) з від'ємними коефіцієнтами, які не перевищують значення $a_{jr'}$ ($r' \in R_{jk}^2$):

$$I_{jk}^2(r') = \bigcup_{r \in R_{jk}^2(r')} I_{rk};$$

$R_{jk}^3(r'')$ – множина номерів x -добутків, що входять до j -ї нерівності системи (3.3) з додатними коефіцієнтами, які не менші ніж $a_{jr''}$ ($r'' \in R_{jk}^3$):

$$R_{jk}^3(r'') = \{r''\} \cup \{r \in R_{jk}^3 : a_{jr} \geq a_{jr''}\};$$

R_{jk}^4 – сукупність номерів функцій $\varphi_{rk}(x)$, що входять до j -ї нерівності системи (3.3) з додатними коефіцієнтами та являють собою добутки незалежних змінних з підмножини $\{x_i, i \in I_{jk}^2\}$:

$$R_{jk}^4 = \{r \in R_{jk}^3 : I_{rk} \subseteq I_{jk}^2\};$$

I_{jk}^4 – сукупність номерів аргументів функцій з множини $\{\varphi_{rk}(x); r \in R_{0k}^4\}$:

$$I_{jk}^4 = \bigcup_{r \in R_{jk}^4} I_{rk};$$

$R_{jk}^4(r')$ – сукупність номерів функцій $\varphi_{rk}(x)$, що входять до j -ї нерівності системи (3.3) з додатними коефіцієнтами та являють собою добутки незалежних змінних з множини $\{x_i; i \in I_{jk}^2(r')\}$:

$$R_{jk}^4(r') = \{r \in R_{jk}^3 : I_{rk} \subseteq I_{jk}^2(r')\};$$

$R_{jk}^5(r'')$ – множина номерів функцій $\varphi_{rk}(x)$, що входять до j -ї нерівності системи (3.3) з додатними коефіцієнтами, які не менші $a_{jr''}$ ($r'' \in R_{jk}^3$), та мають єдиний аргумент:

$$R_{jk}^5(r'') = \{r \in R_{jk}^3 : m_{rk} = 1\};$$

$I_{jk}^5(r'')$ – сукупність номерів незалежних змінних, що є аргументами функцій з множини $\{\varphi_{rk}(x); r \in R_{jk}^5(r'')\}; r'' \in R_{jk}^3$:

$$I_{jk}^5(r'') = \bigcup_{r \in R_{jk}^5(r'')} I_{rk};$$

$R_{jk}^6(r'')$ – сукупність номерів функцій $\varphi_{rk}(x)$, що входять до j -ї нерівності системи (3.3) з від'ємними коефіцієнтами та вміщують аргументи з множини $\{x_i; i \in I_{jk}^5(r'')\}, r'' \in R_{jk}^3$:

$$R_{jk}^6(r'') = \{r \in R_{jk}^2 : I_{rk} \cap I_{jk}^5(r'') \neq \emptyset\}.$$

Нехай $s_{jk}^{(2)}$ та $s_{jk}^{(3)}$ – суми від'ємних та додатних коефіцієнтів функції $g_{jk}(x)$, відповідно:

$$s_{jk}^{(2)} = \sum_{r \in R_{jk}^2} a_{jr}; \quad s_{jk}^{(3)} = \sum_{r \in R_{jk}^3} a_{jr}; \quad j \in J_k;$$

$s_{jk}^{(4)}(r')$ та $s_{jk}^{(6)}(r'')$ – суми коефіцієнтів, з якими функції з множин $\{\varphi_{rk}(x), x \in R_{jk}^4(r')\}$ та $\{\varphi_{rk}(x), x \in R_{jk}^6(r'')\}$ відповідно входять до j -го обмеження системи (3.3):

$$s_{jk}^{(4)}(r') = \sum_{r \in R_{jk}^4(r')} a_{jr}; \quad s_{jk}^{(6)}(r'') = \sum_{r \in R_{jk}^6(r'')} a_{jr};$$

$$r' \in R_{jk}^2; \quad r'' \in R_{jk}^3; \quad j \in J_k.$$

3.2.2 Аналіз підмножин варіантів

Аналіз будь-якої підмножини варіантів G_k ($k = \overline{1, \lambda}$) базується на встановленні того факту, що можливості або неможливості дотримання необхідних умов існування допустимих розв'язків системи нерівностей (3.3), відповідає даній підмножині. При цьому необхідно враховувати «побічний ефект»: безальтернативні (з точки зору виконання конкретної нерівності) значення тих чи інших змінних можуть виявитися абсолютно недопустимими для іншої нерівності тієї ж системи.

Очевидно, вказані властивості підмножин варіантів розв'язку завдання визначаються властивостями нерівностей, що входять до відповідних цим підмножинам окремі системи нерівностей (3.3).

Необхідною умовою виконання кожної j -ї ($j \in J_k$) нерівності системи (3.3) є належність вільного члена b_{jk} відрізка числової вісі, що обмежений мінімальним значенням лівої частини нерівності, яка розглядається:

$$\min g_{jk}(x) \leq b_{jk}.$$

При певному ступені наближення в якості $\min g_{jk}(x)$ можна приймати суму від'ємних коефіцієнтів функції $g_{jk}(x)$:

$$s_{jk}^2 = \min g_{jk}(x).$$

Властивості кожної k -ї підмножини варіантів формулюються у вигляді наступних тверджень, очевидність яких позбавляє від необхідності їх доведення.

Твердження 1. Підмножина G_k не вміщує допустимих планів, якщо для деякої j -ї ($j \in J_k$) нерівності системи (3.3) виконується одна з наступних умов:

- a) $(R_{jk}^2 = \emptyset) \& (b_{jk} < 0)$;
- b) $(R_{jk}^2 \neq \emptyset) \& (s_{jk}^{(2)} > b_{jk})$;
- c) $(R_{jk}^2 \neq \emptyset) \& (\exists r' \in R_{jk}^2) \{ [R_{jk}^4(r') \neq \emptyset] \& [s_{jk}^{(2)} - a_{jr'} > b_{jk}] \& [s_{jk}^{(2)} + s_{jk}^{(4)}(r') > b_{jk}] \}$;
- d) $(R_{jk}^3 \neq \emptyset) \& (\exists r'' \in R_{jk}^3) \{ [R_{jk}^6(r'') \neq \emptyset] \& [s_{jk}^{(2)} + a_{jr''} > b_{jk}] \& [s_{jk}^{(2)} - s_{jk}^{(6)}(r'') > b_{jk}] \}$.

Твердження 2. Нерівність за номером j ($j \in J_k$) системи (3.3) не є активною відносно планів підмножини G_k , якщо для неї виконується умова:

$$(R_{jk}^3 = \emptyset) \& (b_{jk} \geq 0) \vee (R_{jk}^3 \neq \emptyset) \& (s_{jk}^{(3)} \leq b_{jk}).$$

Твердження 3. Якщо $R_{jk}^2 \neq \emptyset$ ($j \in J_k$) та для деякого $r' \in R_{jk}^2$ виконується одна з наступних умов:

- a) $[R_{jk}^4(r') = \emptyset] \& [s_{jk}^{(2)} \leq b_{jk} < s_{jk}^{(2)} - a_{jr'}]$;
- b) $[R_{jk}^4(r') \neq \emptyset] \& [s_{jk}^{(2)} + s_{jk}^4(r') \leq b_{jk} < s_{jk}^{(2)} - a_{jr'}]$,

то з доповнюючи планів підмножини G_k допустимими можуть бути лише ті, у яких

$$[\forall r \in R_{jk}^2(r')][\varphi_{rk}(x) = 1].$$

Твердження 4. Якщо $R_{jk}^3 \neq \emptyset$ ($j \in J_k$) та для деякого $r'' \in R_{jk}^3$ виконується одна з наступних умов:

- a) $(R_{jk}^2 = \emptyset) \& (0 \leq b_{jk} < a_{jr''});$
- b) $(R_{jk}^2 \neq \emptyset) \& [R_{jk}^6(r'') = \emptyset] \& [s_{jk}^{(2)} \leq b_{jk} < s_{jk}^{(2)} + a_{jr''}];$
- c) $[R_{jk}^{(6)}(r'') \neq \emptyset] \& [s_{jk}^{(2)} - s_{jk}^{(6)}(r'') \leq b_{jk} < s_{jk}^{(2)} + a_{jr''}],$

то з доповнюючи планів підмножини G_k допустимими можуть бути лише ті, у яких:

$$[\forall r \in R_{jk}^3(r'')][\varphi_{rk}(x) = 0].$$

Процедура аналізу k -ї підмножини варіантів вирішення завдання полягає у почерговій перевірці виконання умов кожного зі сформульованих тверджень для всіх нерівностей системи (3.3). Залежно від результатів цієї перевірки у циклі аналізу здійснюють ту чи іншу послідовність дій.

1) Якщо для деякої нерівності $j \in J_k$ виконується одна з умов твердження 1, то підмножину G_k виключають з подальшого розгляду.

2) Нерівності $j \in J_k$, для яких виконуються умови твердження 2, з метою економії машинного часу виключається з системи (3.3), а їх номери – зі складу множини J_k . Скоригована таким чином множина номерів нерівностей, активних відносно планів k -ї підмножини варіантів, у подальшому позначатимемо символом J_k^* .

3) Зробимо припущення, що для деякого $r' \in R_{jk}^2$, $j \in J_k^*$, виконується одна з умов твердження 3. У такому випадку змінні $x_i; i \in I_{jk}^2(r')$ набувають значення одиниці. Ці значення підставляють до всіх активних (відносно планів підмножини G_k) нерівностей, після чого здійснюється повторний цикл

аналізу k -ї підмножини варіантів. Перевірку виконання умов твердження 1 для j -ї нерівності в повторному циклі можна пропустити.

4) Зробимо припущення, що для деякого $r'' \in R_{jk}^3$, $j \in J_k^*$, виконується одна з умов твердження 4. У такому випадку змінні $x_i; i \in I_{jk}^5(r'')$ набувають значення нуля. Ці значення підставляють до всіх активних (відносно планів підмножини G_k) нерівності, після чого здійснюють повторний цикл аналізу k -підмножини варіантів. Перевірка виконання умов твердження 1 для j -ї нерівності в повторному циклі пропускається.

Перевірку виконання умов твердження 3 для чергової j -ї нерівності ($j \in J_k^*$) доцільно починати, розглядаючи у якості величини $a_{jr'}$ мінімальний (від'ємний) коефіцієнт функції $g_{jk}(x)$:

$$a_{jr'} = \min\{a_{jr}; r \in R_{jk}^2\}.$$

Якщо жодна з умов даного твердження при цьому не виконується, то вони не будуть виконуватися і для інших можливих значень $a_{jr'}$. В протилежному випадку шляхом послідовного аналізу варто визначити максимальний з від'ємних коефіцієнтів функції $g_{jk}(x)$ який при заміщенні $a_{jr'}$ задовольняє нерівність

$$s_{jk}^{(2)} - a_{jr'} > b_{jk}.$$

Саме цей коефіцієнт доцільно використовувати в подальшому у якості $a_{jr'}$:

$$a_{jr'} = \max\{a_{jr}; (r \in R_{jk}^2) \& (s_{jk}^2 - a_{jr} > b_{jk})\}.$$

Виконання умов твердження 4 для чергової j -ї нерівності ($j \in J_k^*$) спочатку перевіряють для випадку, коли в якості величини $a_{jr'}$ виступає максимальний (додатній) коефіцієнт функції $g_{jk}(x)$

$$a_{jr''} = \max\{a_{jr'}; r \in R_{jk}^3\}.$$

Якщо жодна з умов даного твердження при цьому не виконується, то вони не будуть виконуватися і для інших можливих значень $a_{jr''}$. В протилежному випадку шляхом послідовного аналізу визначається мінімальний з додатних коефіцієнтів функції $g_{jk}(x)$, котрий при підстановці замість $a_{jr''}$ задовольняє нерівність

$$s_{jk}^2 + a_{jr''} > b_{jk}.$$

В подальшому цей коефіцієнт використовують у якості величини $a_{jr''}$:

$$a_{jr''} = \min\{a_{jr'} : (r \in R_{jk}^3) \& (s_{jk}^{(2)} + a_{jk} > b_{jk})\}.$$

Вибір коефіцієнтів $a_{jr'}$ та $a_{jr''}$ визначає значення елементів $r' \in R_{jk}^2$ та $r'' \in R_{jk}^3$. Описаний спосіб їх знаходження є найбільш раціональним, так як забезпечує відрізання G_k максимальних за потужністю підмножин варіантів, які не вміщують допустимих планів.

Процедура аналізу k -ї підмножини варіантів вирішення завдання зупиняється, якщо:

- а) виявляється, що аналізована підмножина G_k не вміщує допустимих планів;
- б) множина J_k^* номерів нерівностей, активних відносно планів даної підмножини, стає пустою;
- в) у останньому циклі аналізу жодна зі змінних $x_i, i \in I_k$ не набуває фіксованого значення.

Схема алгоритму аналізу підмножини варіантів представлена на рис.

3.2.

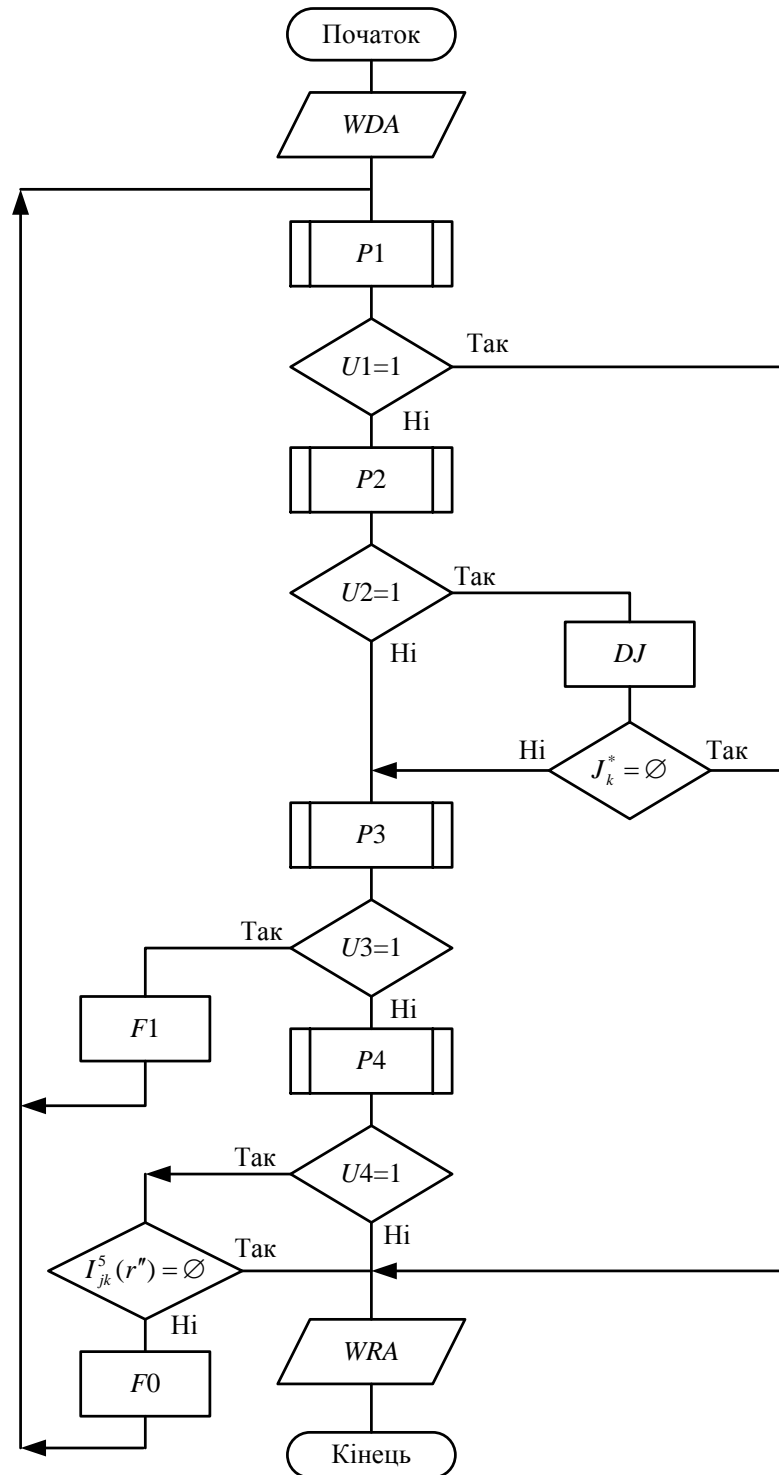


Рис. 3.2. Схема алгоритму аналізу підмножини варіантів

Блок WDA формує робочий масив вихідних даних, що необхідні для виконання процедури аналізу k -ї підмножини варіантів. Він вміщує:

- підмножину J_k номерів нерівностей активних відносно планів підмножини G_k ;
- підмножини R_{jk}^2 та R_{jk}^3 , $j \in J_k$ номерів x -добутків, що входять до j -ї нерівності з від'ємними та додатними коефіцієнтами відповідно;
- сукупність підмножин I_{rk} , $r \in R_k$, що визначають склад x -добутків;
- набір векторів коефіцієнтів нерівностей $(a_{jr} \mid r \in R_{jk})$, $j \in J_k$;
- вектор вільних членів нерівностей $(b_{jk} \mid j \in J_k)$.

Блоки $P1$, $P2$, $P3$ та $P4$ реалізують уніфіковані процедури послідовної перевірки умов тверджень 1-4 для кожної нерівності окремої моделі, що відповідає підмножині варіантів G_k . Результати цієї перевірки відображають значеннями параметрів $U1$, $U2$, $U3$ та $U4$, які використовуються як показники виконання чи невиконання умов того або іншого твердження.

Якщо для деякої нерівності аналізованої системи блок $P1$ встановлює факт виконання умов першого твердження, то $U1=1$, в протилежному випадку $U1=0$. При $U1=1$ процедура аналізу закінчується, тому що аналізована підмножина варіантів не вміщує допустимих планів, і керування передається до блоку виведення результатів аналізу WRA . При $U1=0$ активізується блок $P2$, що здійснює перевірку виконання умов твердження 2.

Якщо для деякої нерівності виконуються умови другого твердження, то $U2=1$, в протилежному випадку $U2=0$. Всі обмеження, для яких $U2=1$, виключаються з системи як ті, що втратили властивість активності відносно планів підмножини G_k . По мірі знаходження таких нерівностей блок DJ видаляє їх номери зі складу підмножини J_k , після чого кожного разу перевіряють наявність у ньому значущих елементів. Якщо виявляється, що $J_k^* = \emptyset$, процедура аналізу зупиняється та керування передається блоку виведення результатів аналізу WRA . В протилежному випадку ініціюється блок $P3$, який перевіряє виконання умов твердження 3.

Якщо для деякого обмеження системи, що розглядається, виконуються умови третього твердження, то $U3=1$, в протилежному випадку $U3=0$. При $U3=1$ блок $F1$ надає безальтернативним змінним значення одиниці, виконує відповідні перетворення аналізованої системи обмежень та передає керування блокові $P1$ для повторного циклу аналізу перетвореної моделі. При $U3=0$ активується блок $P4$, який перевіряє виконання умов твердження 4.

Якщо для деякої нерівності виконуються умови четвертого твердження, то $U4=1$, в протилежному випадку $U4=0$. При $U4=1$ та $I_{jk}^5(r'') \neq \emptyset$ ініціюється блок $F0$, що надає безальтернативним змінним значення нуля, виконує відповідні перетворення аналізованої системи нерівностей та передає керування блокові $P1$ для повторного циклу аналізу перетвореної моделі. При $U4=0$ або $U4=1$, але $I_{jk}^5(r'') = \emptyset$, процедура аналізу підмножини варіантів G_k завершується і керування передається блокові виведення результатів WRA .

3.2.3 Структура методу

Метод розв'язання системи нерівностей (3.1), який реалізує стратегію послідовного аналізу та відсіювання варіантів, передбачає виконання на кожному етапі обчислювального процесу наступної послідовності дій:

- вибір підмножини варіантів, що підлягає подальшому розбиттю;
- вибір змінної, значення якої підлягають фіксації;
- розбиття підмножини варіантів на дві непересічних підмножини;
- аналіз нових отриманих підмножин варіантів;
- перевірка умов завершення обчислювального процесу.

3.2.3.1 Вибір підмножини варіантів, яка підлягає подальшому розбиттю.

Оскільки завдання, яке розглядається, не є оптимізаційним, у якості критерію вибору підмножини варіантів для подальшого розбиття є умісним використовувати кількість змінних, які у підмножинах G_k , $k = \overline{1, \lambda}$ мають фіксовані значення. Це означає, що для подальшого розбиття обирають

підмножину варіантів G_{k^*} , $1 \leq k^* \leq \lambda$, якій відповідає частковому плану максимальної потужності:

$$\mu_{k^*} = \max\{\mu_k, k = \overline{1, \lambda}\}, \text{ де } \mu_k = |I_k^0 \cup I_k^1|.$$

Такий критерій відповідає прагненню досягти шуканого результату обчислень використовуючи мінімальну кількість кроків алгоритму.

3.2.3.2 Вибір змінної, значення якої підлягають фіксації.

Виходячи з міркувань, що наведені у попередньому пункті, для даної операції умісним є вибирати змінну, фіксація значень якої приводить або може привести у подальшому до суттєвого спрощення системи (3.3), яка відповідає підмножині варіантів G_{k^*} . Така якість може бути притаманна будь-якій зі змінних того x -добутку, який входить до системи нерівностей (3.3) з максимальним за модулем коефіцієнтом.

Отже, для присвоєння значень 0 та 1 вибирають довільну змінну $x_{i^*} \in I_{r^*k^*}$, що входить до x -добутку $\varphi_{r^*k^*}(x)$, таку що

$$|a_{jr^*}| = \max\{|a_{jr}|; j \in J_{k^*}; r \in R_{jk^*}\}.$$

3.2.3.3 Розбиття підмножини варіантів G_{k^*} .

Шляхом фіксації значень змінної x_{i^*} підмножину G_{k^*} розбивають на дві непересічних підмножини варіантів $G_{k^*}^0$ та $G_{k^*}^1$. У всіх планах першої з них $x_{i^*} = 0$, у планах другої $x_{i^*} = 1$. Ці значення по чергово підставляють до нерівності системи (3.3), внаслідок чого формують дві нові системи нерівностей, що відповідають двом новим підмножинам варіантів $G_{k^*}^0$ та $G_{k^*}^1$.

3.2.3.4 Аналіз підмножин варіантів $G_{k^*}^0$ та $G_{k^*}^1$.

Нові підмножини $G_{k^*}^0$ та $G_{k^*}^1$ по чергово піддають формальному аналізу згідно вище викладеної процедури. Після цього (якщо шуканого рішення не знайдено) всі підмножини варіантів, що залишилися, заново нумерують, починаючи з одиниці.

3.2.3.5. Перевірка умов завершення обчислювального процесу.

Обчислювальний процес завершено після знаходження розв'язку (множини розв'язків) системи нерівностей (3.1) або встановлення факту її несумісності.

Система нерівностей (3.1) має єдиний розв'язок, якщо після чергового етапу пошуку для розгляду залишається лише одна підмножина варіантів з єдиною нерівністю системи (3.3).

Формальною ознакою існування більш ніж одного розв'язку системи (3.1) служить відсутність у системі (3.3) нерівностей, що є активними відносно планів деякої підмножини варіантів, за наявності змінних, які ще не отримали фіксованих значень:

$$(\lambda \geq 1) \& (\exists k : 1 \leq k \leq \lambda) [(J_k = \emptyset) \& (I_k \neq \emptyset)].$$

А саме, якщо для деякої підмножини G_k , $1 \leq k \leq \lambda$, виконується умова $(J_k = \emptyset) \& (I_k \neq \emptyset)$, це означає, що дана підмножина містить стільки ж розв'язків системи нерівностей (3.1), скільки й доповнюючих планів.

Формальною ознакою несумісності системи нерівностей (3.1) служить відсутність підмножин варіантів, що залишилися для розгляду після виконання процедури аналізу на будь-якому етапі обчислювального процесу: $\lambda = 0$.

Якщо на поточному етапі умови завершення обчислювального процесу не виконуються, то здійснюють наступний етап реалізації описаного алгоритму.

Починати розв'язання завдання умісно з аналізу повної множини варіантів G . У деяких випадках це дозволяє без процедури розбиття визначити розв'язок системи нерівностей (3.1), встановити факт її несумісності, або, у крайньому випадку, суттєво звужити зону подальшого пошуку розв'язків.

Спрощену схему методу розв'язання систем комбінаторних нерівностей представлено на рис. 3.3.

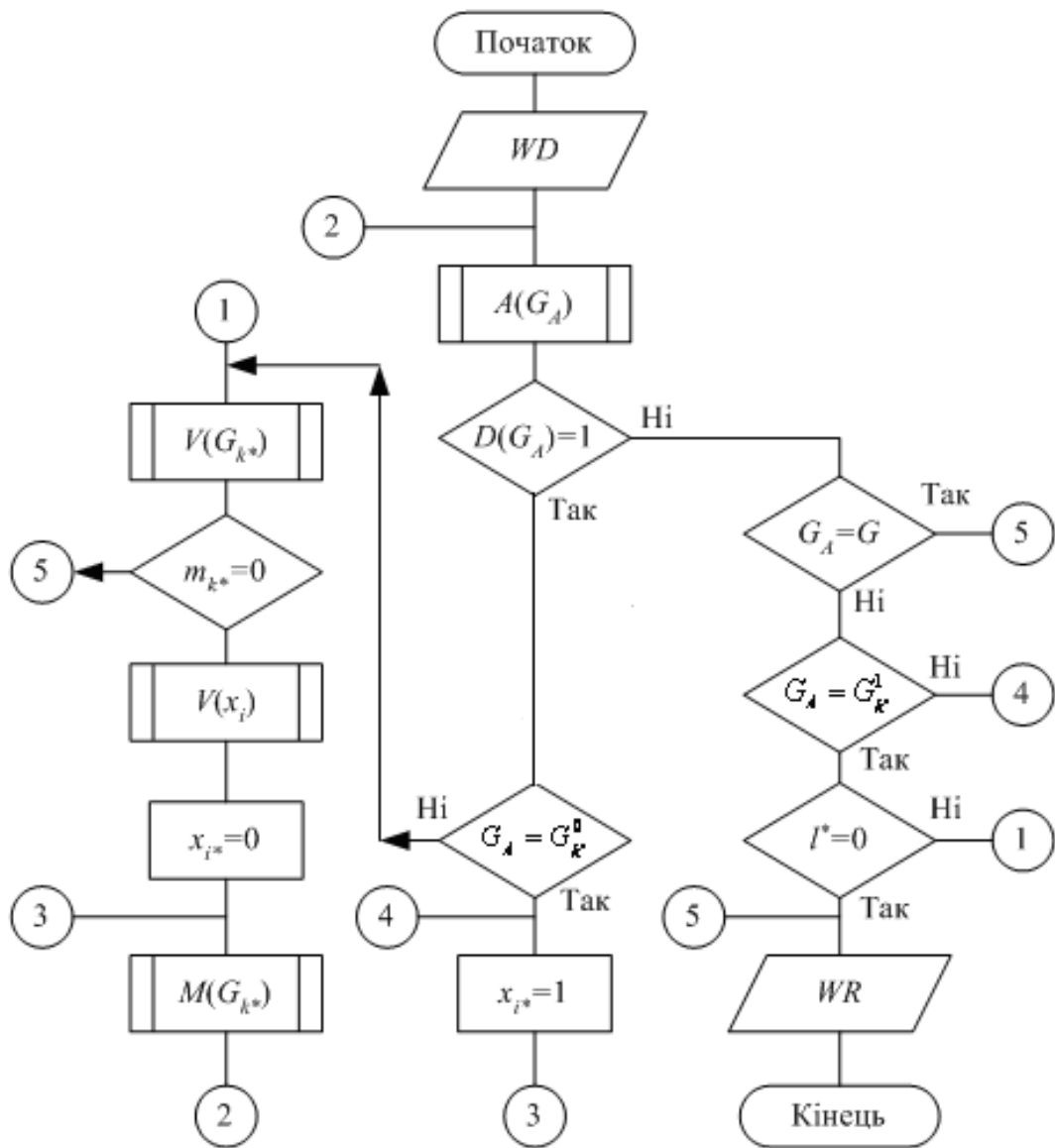


Рис. 3.3. Спрощена схема методу розв'язання систем комбінаторних нерівностей.

Будь-яка підмножина варіантів розв'язання завдання визначається власним частковим планом. Для подання часткового плану кожної підмножини варіантів G_k , $k = \overline{1, \lambda}$ зручно використовувати m -мірний вектор, у якому позиції з номерами $i \in I_k^0$ заповнені нулями, $i \in I_k^1$ – одиницями, а $i \in I_k$ – будь-якими символами, що відрізняються від 0 та 1.

Для збереження цих векторів у пам'яті комп'ютера організують спеціальний масив (файл) допустимих планів MDP .

З метою реалізації пояснювальних можливостей системи прийняття рішень, у масиві MDP також зберігаються упорядковані набори номерів незалежних змінних, що відображають послідовність набуття аргументами конкретних значень у процесі формування часкових планів кожної з виділених підмножин варіантів.

Блок WD формує робочий масив з вихідними даними, які описують завдання (3.1). До них належать наступні набори даних:

- сукупність $\{I_r; r = \overline{1, q}\}$ підмножин номерів незалежних змінних, похідні яких входять до моделі (3.1);

- сукупність $\{R_j; j = \overline{1, n}\}$ підмножин номерів x -добутків, що входять до кожної з нерівностей системи (3.1);

- сукупність $\{(a_{jr}; r \in R_j); j = \overline{1, n}\}$ векторів коефіцієнтів нерівностей системи (3.1);

- вектор $(b_j; j = \overline{1, n})$ правих частин нерівностей системи (3.1);

Блок $A(G_A)$ реалізує уніфіковану процедуру аналізу множини G_A варіантів вирішення завдання. У якості G_A може виступати повна множина варіантів G або будь-яка з підмножин $G_{k^*}^0$ та $G_{k^*}^1$, утворених внаслідок розбиття деякої попередньої підмножини варіантів G_{k^*} , $1 \leq k^* \leq \lambda$.

Результати аналізу множини G_A визначають значення параметру $D(G_A)$, який використовується як показник наявності (або відсутності)

допустимих планів у аналізованій підмножині. Якщо факт відсутності таких планів у G_A не встановлено, то $D(G_A)=1$; в протилежному випадку $D(G_A)=0$.

Якщо у якості аналізованої підмножини G_A виступала підмножина $G_{k^*}^0$, тоді змінній x_{i^*} , $i^* \in I_{k^*}$ надається значення одиниці. Після цього блок $M(G_{k^*})$ перетворює математичну модель, яка відповідає підмножині варіантів G_{k^*} , до виду, адекватного підмножині $G_{k^*}^1$. Після цього підмножина $G_{k^*}^1$ піддається аналізу у блоці $A(G_A)$.

Якщо ж у якості аналізованої підмножини G_A виступала повна підмножина варіантів G або підмножина $G_{k^*}^1$, то після занесення її часткового плану до масиву MDP ініціюється блок $V(G_{k^*})$.

Блок $V(G_{k^*})$ реалізує процедуру вибору підмножини варіантів розв'язання завдання для подальшого розбиття серед тих підмножин, часткові плани яких зафіксовано у масиві допустимих планів MDP .

Після вибору підмножини варіантів, яка підлягає розбиттю, перевіряють повноту її часткового плану. Якщо всі m незалежних змінних мають у частковому плані даної підмножини конкретні значення, та, відповідно, $m_{k^*}=0$, то саме цей план є розв'язком x^* завдання (3.1). У такому випадку ініціюють блок виведення результатів WR , оскільки у подальших обчисленнях немає необхідності.

Якщо ж $m_{k^*} > 0$, то ініціюють блок $V(x_{i^*})$, який реалізує процедуру вибору незалежної змінної x_{i^*} , $i^* \in I_{k^*}$, яка на даному етапі розв'язання завдання набуває конкретних значень.

Блок $V(x_{i^*})$ здійснює перетворення загальної моделі (3.1) до виду, адекватного підмножині варіантів G_{k^*} , якщо цього не було зроблено раніше

блоком $V(G_{k^*})$. За необхідності він виконує інші операції, передбачені правилом вибору змінної x_{i^*} .

Вибраній змінній спочатку надають значення нуля: $x_{i^*} = 0$. Після цього блок $M(G_{k^*})$ перетворює математичну модель, яка відповідає підмножині варіантів G_{k^*} , до виду, адекватного підмножині $G_{k^*}^0$. Після цього підмножина $G_{k^*}^0$ піддається аналізу у блоці $A(G_A)$.

Припустимо, що в процесі аналізу деякої множини варіантів G_A встановлено факт відсутності допустимих планів, і, як наслідок, $D(G_A) \neq 1$. Якщо у якості аналізованої множини G_A виступала повна множина варіантів G , то це означає, що система нерівностей (3.1) за умови бівалентності незалежних змінних є несумісною та завдання, яке розглядається не має вирішення. У такому випадку ініціюють блок виведення результатів WR , оскільки подальші обчислення не мають сенсу.

Якщо факт відсутності допустимих планів встановлено для підмножини варіантів $G_{k^*}^1$, то перевіряють наявність резервних часткових планів у масиві MDP . Якщо даний масив пустий ($\lambda^* = 0$), це також свідчить про відсутність розв'язків завдання (3.1) при бівалентних незалежних змінних. В протилежному випадку ($\lambda^* \neq 0$) ініціюють блок $V(G_{k^*})$, який реалізує процедуру вибору однієї з виділених підмножин варіантів для подальшого розбиття.

Якщо підмножиною, яка не вміщує допустимі плани виявляється підмножина варіантів $G_{k^*}^0$ (коли $G_A \neq G$ та $G_A \neq G_{k^*}^1$), ініціюється формування математичної моделі, яка є адекватною підмножині $G_{k^*}^1$.

Блок WR виводить наступні результати обчислень:

– допустимі плани зі вказанням послідовності надання незалежним змінним конкретних значень;

– повідомлення про відсутність розв’язків системи (3.1), що вміщують списки номерів нерівностей, які не можна виконати;

– текстову інформацію, яка пояснює логіку обчислювального процесу та інтерпретує отримані результати у термінах фізичної постановки завдання та ін.

Описаний метод розв’язання систем нелінійних комбінаторних нерівностей передбачає повторне виконання наступних процедур:

- аналіз підмножини варіантів;
- вибір підмножини варіантів для подальшого розбиття;
- вибір незалежної змінної для надання значень;
- перетворення комбінаторної моделі до виду, адекватного конкретній підмножині варіантів.

Під час програмної реалізації методу перераховані процедури умісно уніфікувати та представити у вигляді окремих підпрограм.

3.3. Метод розв’язання систем комбінаторних нерівностей з лінійною структурою

3.3.1 Основні поняття та визначення

Система лінійних нерівностей з булевими змінними представлена у формі (3.2).

Задача носить комбінаторний характер та належить до класу NP-повних задач, які вимагають при розв’язанні значних затрат машинного часу [14-17].

Запропонований метод дозволяє скоротити кількість кроків реалізації алгоритму, та, відповідно, тривалість розв’язання системи нерівностей (3.2) за рахунок високого ступеню спрямованості та звуження області пошуку вектора значень булевих змінних $x = (x_j | j = \overline{1, n})$, що задовольняє дану систему.

Нехай до початку деякого етапу вирішення завдання (3.2) у повній множині G варіантів виділені λ непересічних підмножин G_k , що вміщують допустимі плани; $k = \overline{1, \lambda}$.

Позначимо символами J_k^0 та J_k^1 множини номерів шуканих змінних, що отримали у планах k -ї підмножини варіантів значення 0 та 1, а символом J_k – сукупність номерів змінних, значення яких у G_k не зафіксовано.

Набір значень змінних $x_j, j \in J_k^0 \cup J_k^1$, такий що $(\forall j \in J_k^0)(x_j = 0)$ та $(\forall j \in J_k^1)(x_j = 1)$, називається частковим планом k -ї підмножини варіантів. Будь-який набір значень змінних $x_j, j \in J_k$, що задовольняють умові бівалентності $x_j \in \{0, 1\}$, називається доповнюючим планом підмножини G_k .

Нехай

$$J_{ik} = J_i \cap J_k; J_{ik}^1 = J_i \cap J_k^1.$$

Нерівність системи (3.2), якій не задовольняє хоча б один з доповнюючи планів підмножини G_k , називається активною по відношенню до планів даної підмножини. Сукупність номерів таких нерівностей позначимо символом $I_k; I_k \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$.

Система нерівностей (3.2), зведена у відповідність k -й підмножині варіантів, матиме наступну форму:

$$g_{ik}(x) \leq b_{ik}; i \in I_k; \quad (3.4)$$

де

$$g_{ik}(x) = \sum_{j \in J_{ik}} a_{ij} x_j;$$

$$x_j \in \{0, 1\}; j \in J_k;$$

b_{ik} – вільний член i -ї нерівності системи (3.2), зменшений на суму коефіцієнтів, з якими до цієї нерівності входили незалежні змінні, які отримали у частковому плані k -ї підмножини варіантів значення одиниці:

$$b_{ik} = b_i - \sum_{j \in J_{ik}^1} a_{ij}; i \in I_k.$$

Для дослідження моделі (3.4) на множинах $J_{ik}; i \in I_k$ виділяють наступні підмножини:

J_{ik}^2 та J_{ik}^3 – сукупності номерів незалежних змінних, що входять відповідно з негативними та позитивними коефіцієнтами до i -ї нерівності системи (3.4):

$$J_{ik}^2 = \{j \in J_{ik} : a_{ij} < 0\}; J_{ik}^3 = \{j \in J_{ik} : a_{ij} > 0\};$$

$J_{ik}^2(j')$ – множина номерів незалежних змінних, що входять до i -ї нерівності системи (3.4) з негативними коефіцієнтами, які не перевищують значення $a_{ij'}$ $j' \in J_{ik}^2$:

$$J_{ik}^2(j') = \{j'\} \cup \{j \in J_{ik}^2 : a_{ij} \leq a_{ij'}\};$$

$J_{ik}^3(j'')$ – множина номерів незалежних змінних, що входять до i -ї нерівності системи (3.4) з позитивними коефіцієнтами, що не менші ніж $a_{ij''}$ ($j'' \in J_{ik}^3$):

$$J_{ik}^3(j'') = \{j''\} \cup \{j \in J_{ik}^3 : a_{ij} \geq a_{ij''}\}.$$

Позначимо символами $s_{ik}^{(2)}$ та $s_{ik}^{(3)}$ суми негативних та позитивних коефіцієнтів i -ї нерівності системи (3.4), відповідно:

$$s_{ik}^{(p)} = \sum_{j \in J_{ik}^p} a_{ij}; \quad p \in \{2, 3\}; \quad i \in I_k.$$

3.3.2 Аналіз підмножин варіантів

Аналіз будь-якої підмножини варіантів G_k ($k = \overline{1, \lambda}$) базується на встановленні факту можливості або неможливості дотримання необхідної умови існування допустимих розв'язків системи нерівностей (3.4), що відповідає даній підмножині. При цьому необхідно враховувати «побічний ефект»: безальтернативні (з точки зору виконуваності конкретної нерівності) значення тих або інших змінних можуть виявитися абсолютно недопустимими для іншої нерівності тієї ж системи.

Необхідною умовою виконання кожної i -ї ($i \in I_k$) нерівності системи (3.4) є належність вільного члена b_{ik} відрізка числової осі, обмеженому мінімальним значенням лівої частини нерівності:

$$\min g_{ik}(x) \leq b_{ik}.$$

З певним ступенем наближення в якості $\min g_{ik}(x)$ можна приймати суму негативних коефіцієнтів функції $g_{ik}(x)$:

$$s_{ik}^2 = \min g_{ik}(x).$$

Очевидно, вказані властивості підмножин варіантів розв'язання завдання визначаються властивостями нерівностей, що входять до відповідних цим підмножинам часних систем нерівностей (3.4).

Властивості кожної k -ї підмножини варіантів формулюються у вигляді наступних тверджень, очевидність яких позбавляє від необхідності їх доказу.

Твердження 1. Підмножина G_k не вміщує допустимих планів, якщо для деякої i -ї ($i \in I_k$) нерівності системи (3.4) виконується наступна умова:

$$(J_{ik}^2 = \emptyset) \& (b_{ik} < 0) \vee (J_{ik}^2 \neq \emptyset) \& (s_{ik}^{(2)} > b_{ik}).$$

Твердження 2. Нерівність за номером i ($i \in I_k$) системи (3.4) не є активною відносно до планів підмножини G_k , якщо для неї виконується умова:

$$(J_{ik}^3 = \emptyset) \& (b_{ik} \geq 0) \vee (J_{ik}^3 \neq \emptyset) \& (s_{ik}^{(3)} > b_{ik}).$$

Твердження 3. Якщо $J_{ik}^2 \neq \emptyset$ ($i \in I_k$) та для деякої j' -ї ($j' \in J_{ik}^2$) нерівності системи (3.4) виконується умова:

$$s_{ik}^{(2)} \leq b_{ik} < s_{ik}^{(2)} - a_{ij'},$$

то з доповнюючи планів підмножини G_k допустимими можуть бути лише ті, у яких $[\forall j \in J_{ik}^2(j')][x_j = 1]$.

Твердження 4. Якщо $J_{ik}^3 \neq \emptyset$ ($i \in I_k$) та для деякої j'' -ї ($j'' \in J_{ik}^3$) нерівності системи (3.4) виконується умова:

$$(J_{ik}^2 = \emptyset) \& (0 \leq b_{ik} < a_{ij''}) \vee (J_{ik}^2 \neq \emptyset) \& (s_{ik}^{(2)} \leq b_{ik} < s_{ik}^{(2)} + a_{ij''}),$$

то з доповнюючи планів підмножини G_k допустимими можуть бути лише ті, у яких $[\forall j \in J_{ik}^3(j'')][x_j = 0]$.

Процедура аналізу k -ї підмножини варіантів розв'язання завдання полягає у послідовній перевірці виконання умов кожного твердження для всіх нерівностей системи (3.4). В залежності від результатів цієї перевірки у циклі аналізу здійснюється та чи інша послідовність дій.

1) Якщо для деякої нерівності системи (3.4) виконується умова твердження 1, то аналізована підмножина варіантів G_k виключається з

подальшого розгляду як та, що не містить допустимих планів, а процедура аналізу на цьому закінчується. У протилежному випадку здійснюється перехід до наступного пункту даної процедури.

2) Якщо для i^* -ї ($i^* \in I_k$) нерівності системи (3.4) виконується умова твердження 2, то воно виключається з даної системи, оскільки воно не здатне впливати на вибір доповнюючого плану k -ї підмножини варіантів. Після цього коригується склад множини I_k , елементи якої ідентифікують нерівності, активні відносно планів G_k . Оновлений склад цієї множини визначається відповідно до формули:

$$I_k^* = I_k \setminus \{i^*\}.$$

Далі, якщо розглянута нерівність не є останньою в системі (3.4), умову твердження 2 перевіряють для наступної нерівності і т.д.

Якщо виявляється, що $I_k^* = \emptyset$, це означає, що систему нерівностей (3.4) задовольняють всі доповнюючі плани підмножини варіантів G_k . На цьому обчислювальний процес закінчується, оскільки розв'язок вихідної системи нерівностей (3.3) знайдено. Таким розв'язком є вектор значень шуканих змінних, що складається з часткового та будь-якого доповнюючого планів підмножини G_k .

Якщо ж після перевірки виконання умови твердження 2 для всіх нерівностей системи (3.4) виявляється, що $I_k^* \neq \emptyset$, то здійснюється перехід до наступного пункту процедури аналізу підмножини варіантів G_k .

3) Якщо для i -ї ($i \in I_k^*$) нерівності системи (3.4) та деякого $j' \in J_{ik}^2$ виконується умова твердження 3, то змінні $x_j, j \in J_{ik}^2(j')$ набувають значень 1. Ці значення підставляються до всіх активних (відносно до планів підмножини G_k) нерівностей системи (3.4). Після цього виконується повторний цикл аналізу k -ї підмножини варіантів, починаючи з першого

пункту. Перевірка виконання умови твердження 1 для даної нерівності у повторному циклі пропускається.

В протилежному випадку здійснюється перехід до наступного пункту процедури аналізу підмножини G_k .

4) Якщо для i -ї ($i \in I_k^*$) нерівності системи (3.4) та деякого $j'' \in J_{ik}^3$ виконується умова твердження 4, то змінні $x_j, j \in J_{ik}^3(j'')$ отримують значення 0. Ці значення підставляють до всіх активних (відносно до планів підмножини G_k) нерівностей системи (3.4). Після цього виконують повторний цикл аналізу k -ї підмножини варіантів, починаючи з першого пункту. Перевірка виконання умови твердження 1 для даної нерівності у повторному циклі пропускається.

В протилежному випадку здійснюється перехід до наступного пункту процедури аналізу підмножини G_k .

Перевірку виконання умов твердження 3 для чергової i -ї нерівності рекомендують починати з розгляду у якості $a_{ij'}$ мінімального (негативного) коефіцієнту функції $g_{ik}(x)$:

$$a_{ij'} = \min\{a_{ij}; j \in J_{ik}^2\}.$$

Надалі, якщо при такому виборі $a_{ij'}$ умова даного твердження виконується, то в якості цього параметру доцільно використовувати максимальний негативний коефіцієнт функції $g_{ik}(x)$, для якого виконується умова $s_{ik}^2 - a_{ij'} > b_{ik}$:

$$a_{ij'} = \max\{a_{ij} : (j \in J_{ik}^2) \& (s_{ik}^{(2)} - a_{ij} > b_{ik})\}.$$

Виконання умов твердження 4 для чергової i -ї нерівності спочатку перевіряється для випадку, коли у якості $a_{ij''}$ виступає максимальний (позитивний) коефіцієнт функції $g_{ik}(x)$:

$$a_{ij''} = \max\{a_{ij}; j \in J_{ik}^3\}.$$

Якщо при такому виборі $a_{ij''}$ виконується умова даного твердження, то в подальшому у якості цього параметру розглядається мінімальний позитивний коефіцієнт функції $g_{ik}(x)$, який задовольняє умову $s_{ik}^2 + a_{ij''} > b_{ik}$:

$$a_{ij''} = \min\{a_{ij} : (j \in J_{ik}^3) \& (s_{ik}^{(2)} + a_{ij} > b_{ik})\}.$$

Такий вибір параметрів $a_{ij'}$ та $a_{ij''}$ забезпечує відсікання від G_k найбільших за потужністю підмножин варіантів, що не вміщують допустимих планів.

Процедура аналізу підмножини варіантів G_k закінчується у наступних випадках:

- а) виявляється, що підмножина G_k не вміщує допустимих планів;
- б) множина номерів нерівностей, активних по відношенню до планів k -ї підмножини варіантів, стає пустою;
- в) у останньому циклі аналізу жодна зі змінних x_j , $j \in J_k$, не отримує фіксованого значення.

Схема методу аналізу підмножин варіантів аналогічна до тієї, що було наведено вище для систем нелінійних нерівностей. Відмінність полягає лише у складі вихідних даних, необхідних для виконання процедури аналізу k -ї підмножини варіантів. Для систем лінійних нерівностей він вміщує наступну інформацію:

- підмножина I_k номерів нерівностей, активних відносно планів підмножини G_k ;
- набір векторів коефіцієнтів нерівностей $(a_{ij} | j \in J_{ik})$, $i \in I_k$;
- вектор вільних членів нерівностей $(b_{ik} | i \in I_k)$.

3.3.3. Структура методу

Метод розв'язання системи нерівностей (3.2), який реалізує стратегію послідовного аналізу та відсіювання варіантів, передбачає виконання на кожному етапі обчислювального процесу наступної послідовності дій [13-15]:

- вибір підмножини варіантів, що підлягає подальшому розбиттю;
- вибір змінної, значення якої підлягають фіксації;
- розбиття підмножини варіантів на дві непересічних підмножини;
- аналіз щойно отриманих підмножин варіантів;
- перевірка умов закінчення обчислювального процесу.

3.3.3.1 Вибір підмножини варіантів, що підлягає розбиттю.

Оскільки завдання, яке розглядається не є оптимізаційним, у якості критерію вибору підмножини варіантів для подальшого розбиття доцільно використовувати кількість змінних, які у підмножинах G_k , $k = \overline{1, \lambda}$ мають фіксовані значення. Це означає, що для подальшого розбиття обирають підмножину варіантів G_{k^*} , $1 \leq k^* \leq \lambda$, якій відповідає частковий план максимальної потужності:

$$\mu_{k^*} = \max\{\mu_k, k = \overline{1, \lambda}\}, \text{ де } \mu_k = |J_k^0 \cup J_k^1|.$$

Такий критерій відповідає прагненню досягти шуканого результату обчислень за мінімальну кількість кроків алгоритму.

3.3.3.2 Вибір змінної, значення якої підлягають фіксації.

Виходячи з міркувань, які наведено у попередньому пункті, для даної операції доцільним є вибирати змінну, фіксація значень якої приводить, або може привести у подальшому до суттєвого спрощення системи (3.4), яка відповідає підмножині варіантів G_{k^*} . Таку якість може мати будь-яка змінна, що входить до системи нерівностей (3.4) з максимальним за модулем коефіцієнтом.

Відповідно, для присвоєння значень 0 та 1 вибирають довільну змінну $x_{j^*} \in J_{k^*}$, таку що

$$|a_{ij^*}| = \max\{|a_{ij}|; i \in I_{k^*}; j \in J_{ik^*}\}.$$

3.3.3.3 Розбиття підмножини варіантів G_{k^*} .

Шляхом фіксації значень змінної x_{j^*} підмножина G_{k^*} розбивається на дві непересічних підмножини варіантів $G_{k^*}^0$ та $G_{k^*}^1$. У всіх планах першої з них $x_{j^*} = 0$, в планах другої $x_{j^*} = 1$. Ці значення по чергово підставляються до нерівності системи (3.4), внаслідок чого формуються дві нові системи нерівностей, що відповідають двом новим підмножинам варіантів $G_{k^*}^0$ та $G_{k^*}^1$.

3.3.3.4 Аналіз підмножин варіантів $G_{k^*}^0$ та $G_{k^*}^1$.

Нові підмножини $G_{k^*}^0$ та $G_{k^*}^1$ по чергово піддаються формальному аналізу згідно викладеної вище процедури. Після цього (якщо шуканий розв'язок не знайдено) усі підмножини варіантів, що залишилися у полі розгляду, знову нумеруються, починаючи з одиниці.

3.3.3.5 Перевірка умов закінчення обчислювального процесу.

Обчислювальний процес закінчується після знаходження розв'язку (множини розв'язків) системи нерівностей (3.2) або встановлення факту її несумісності [11-14, 23-32].

Система нерівностей (3.2) має єдиний розв'язок, якщо після чергового етапу пошуку у полі розгляду залишається лише одна підмножина варіантів з єдиною нерівністю системи (3.4).

Формальною ознакою існування більш ніж одного розв'язку системи (3.2) служить відсутність у системі (3.4) нерівностей, активних відносно до планів деякої підмножини варіантів, за наявності змінних, які ще не набули фіксованих значень.

А саме, якщо для деякої підмножини G_k , $1 \leq k \leq \lambda$, виконується умова $(I_k = \emptyset) \& (J_k \neq \emptyset)$, це означає, що дана підмножина вміщує стільки розв'язків системи нерівностей (3.1), скільки й доповнюючих планів.

Формальною ознакою несумісності системи нерівностей (3.2) служить відсутність підмножин варіантів, що залишилися у полі розгляду після виконання процедури аналізу на будь-якому етапі обчислювального процесу: $\lambda = 0$.

Якщо на даному етапі умови завершення обчислювального процесу не виконуються, то здійснюється наступний етап реалізації описаного алгоритму.

Доцільно починати розв'язання завдання з аналізу повної множини варіантів G . У деяких випадках це дозволяє без процедури розбиття визначити розв'язок системи нерівностей (3.2), встановити факт її несумісності, або, хоча б значно звузити область подальшого пошуку розв'язків.

Схема методу розв'язання систем лінійних комбінаторних нерівностей аналогічна до тієї, що було наведено вище для систем нерівностей з нелінійною структурою. Відмінність полягає лише у складі вихідних даних, що описують лінійну систему. В даному випадку вихідними даними служать:

– сукупність $\{(a_{ij} \mid j \in J_i); i = \overline{1, m}\}$ векторів коефіцієнтів системи нерівностей (3.2);

– вектор $(b_i; i = \overline{1, m})$ правих частин системи нерівностей (3.2).

3.4. Висновки до третього розділу

1. 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.

2. 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.

3. 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.

Задачі, які потребують розв'язання систем нелінійних нерівностей з булевими змінними, широко поширені у автоматизованих системах керування, проектування та діагностування складних об'єктів. Для розв'язання подібних завдань традиційно використовують різні евристичні алгоритми, що, через властиві їм відомі недоліки, мають обмежене практичне використання.

4. Модифіковано метод послідовного аналізу та відсіювання варіантів, розповсюджений на розв'язання систем комбінаторних нерівностей лінійної та нелінійної структури. Запропонований метод дозволяє скоротити кількість кроків реалізації алгоритму, та, відповідно, тривалість розв'язання систем комбінаторних нерівностей за рахунок високого ступеню спрямованості та звуження області пошуку вектора значень булевих змінних, що задовольняє дані системи нерівностей.

Основні результати дисертаційної роботи, представлені в розділі 3, опубліковані в працях автора [1-6].

Список використаних джерел до третього розділу

1. 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.
2. А. Литвиненко, Е. Нечипорук, «Метод діагностирования сложных объектов с множественными отказами», *«Black sea» scientific journal of academic research*, Vol. 8, Iss. 1, pp. 58-62, 2014.
3. О. Нечипорук, Н. Марченко, «Діагностика віброакустичних сигналів електричних машин», *«Black sea» scientific journal of academic research*, Vol.11, Iss. 4, pp.72-77, 2014.
4. А. Литвиненко, Е. Нечипорук, «Метод діагностирования сложных объектов с многоуровневой структурой», *«Black sea» scientific journal of academic research*, Vol. 12, Iss. 5, pp. 36-43, 2014.
5. О. Литвиненко, О. Нечипорук, Логіко-математичні методи діагностування складних систем. *Монографія. Київ: «Artmedia print»*, 2016, 166 с.
6. 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.

7. О. Литвиненко, «Математичний метод визначення множинних відмов в складних технічних системах», *Вісник НАУ*, №4, С. 143-150, 2002.

8. В. Михалевич, В. Волкович, Вычислительные методы исследования и проектирования сложных систем. *Москва: «Наука»*, 1982, 288 с.

9. Х. Пападимитриу, К. Стайглиц, Комбинаторная оптимизация. Алгоритмы и сложность. *Москва: «Мир»*, 1985, 512 с.

10. Ю. Зак, Методы направленного перебора в задачах целочисленного линейного программирования с булевыми переменными. – *Кибернетика*, №4, С. 72-81, 1977.

11. А. Литвиненко, «Комбинаторный метод выработки решений в экспертных системах управления сложными объектами», *Кибернетика и системный анализ*, № 5, С.81-86, 1992.

12. А. Литвиненко, «Метод решения экстремальных комбинаторных задач с нелинейной структурой», *Кибернетика*, № 5, С.83-87, 1983.

13. В. Волкович, А. Волошин, «Об одной схеме метода последовательного анализа и отсеивания вариантов», *Кибернетика*, №4, С. 98-105, 1978.

14. В. Михалевич, «Последовательные алгоритмы оптимизации и их применение», *Кибернетика*, №1, №2, 1965.

15. В. Михалевич, Н. Шор, Численное решение многовариантных задач по методу последовательного анализа вариантов. *Москва: Изд. ЛЭММ АН СССР*, 1962.

16. Г. Гнатієнко, В. Снитюк, Експертні технології прийняття рішень. *Монографія. Київ: ТОВ «Маклаут»*, 2008, 444 с.

17. А. Литвиненко, «Определение класса истинности логических формул методом направленного перебора», *Кибернетика и системный анализ*, № 5, С. 23-31, 2000.

18. И. Биргер, Техническая диагностика. *Москва: «Машиностроение»*, 1978, 240 с.

19. H. Ammar, B. Cukic, C. Fuhrman, A. Mili, «A Comparative Analysis of Hardware and Software Reliability Engineering», *Institute for Software Research Fairmont, USA*, 1999.
20. S. Karen Kurasaki, «Intercoder Reliability for Validating Conclusions Drawn from Open-Ended Interview Data Field Methods», Vol. 12, Iss. 3, pp.179-194, 2000.
21. R. Thorhuus, «Software Fault Injection Testing», *Master of Science Thesis in Electronic System Design*, Stockholm, 2000.
22. П. Глущенко, Диагностирование электротехнических объектов на основе моделей. *Санкт Петербург: СПГУВК*, 1996.
23. Е. Емельянов, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик, Теория и практика эволюционного моделирования. *Монография. Москва: «Физматлит»*, 2003, 432 с.
24. Д. Батищев, Д. Коган, Вычислительная сложность экстремальных задач переборного типа. *Н.Новгород: Нижегород. гос. ун-т.*, 1994, 111 с.
25. Д. Батищев, Генетические алгоритмы решения экстремальных задач. *Воронеж: Нижегородский гос. ун-т. Воронеж*, 1995, 69 с.
26. Reliability Modeling and Prediction, *MIL-HDBK-756B*, 1982.
27. Reliability prediction of electronic equipment, *MIL-HDBK-217*, Revision F, Notice 2, Military Handbook, 1995.
28. R. Billinton, R. Allan, Reliability Evaluation of Power Systems, *Plenum press*, New York&London, 1984.
29. R. Sahner et al., Performance and Reliability Analysis of Computer Systems, *Kluwer Academic Publishers*, 1996.
30. Л. Гладков, В.М. Курейчик, В.В. Курейчик, Генетические алгоритмы. *Ростов-на-Дону: ООО «Росиздат»*, 2004, 400 с.
31. Д. Батищев, Поискные методы оптимального проектирования. *Москва: «Сов. Радио»*, 1975, 216 с.
32. Д. Батищев, Методы оптимального проектирования. *Москва: «Радио и связь»*, 1984, 248 с.

РОЗДІЛ 4

ІНФОРМАЦІЙНА ТЕХНОЛОГІЯ ДІАГНОСТУВАННЯ БАГАТОРІВНЕВИХ ТЕХНІЧНИХ ОБ'ЄКТІВ

4.1. Функціональна структура інформаційної технології діагностування технічних об'єктів з багаторівневою структурою

Безперервне ускладнення технічних об'єктів і зростання ступеня автоматизації процесу управління висувають на перший план проблему оптимальної організації експлуатації технічних об'єктів з багаторівневою структурою. Важливу роль при цьому відводять визначенню стану об'єктів, яке внаслідок впливу зовнішніх і внутрішніх факторів змінюється з часом [1-3, 17-19].

Рішенням всіх питань, пов'язаних з визначенням стану технічних об'єктів і характеру його зміни з плином часу, займається технічна діагностика, метою якої є встановлення стану об'єкта діагностування (рис. 4.1). Під час контролю здійснюється, як правило, якісна оцінка (працездатний, непрацездатний, є дефект, дефект відсутній і т.п.). Однак при вимірах і виконанні контрольних операцій можна отримати і кількісну оцінку (ступінь працездатності) [20-22, 30-31].

Розв'язання задач технічної діагностики доцільно починати в процесі проектування об'єкта. Виходячи з умов використання та експлуатації об'єкта, що проектується, розробляють діагностичні моделі, ефективність яких значною мірою залежить від ступеня пристосованості конструкції об'єкта до технічного діагностування, а також методів і засобів технічної діагностики? що застосовуються. Пристосованість конструкції об'єкта до технічного діагностування визначається як контролепридатність.

Детальний розгляд існуючих методів і інформаційних технологій, на основі яких побудована архітектура систем діагностування (розділ 1, п.1.3), приводить до висновку, що архітектура багатьох з них не відповідає

вимогам завдань діагностування великих технологічних об'єктів, що характеризуються складними технологічними процесами [24-29].

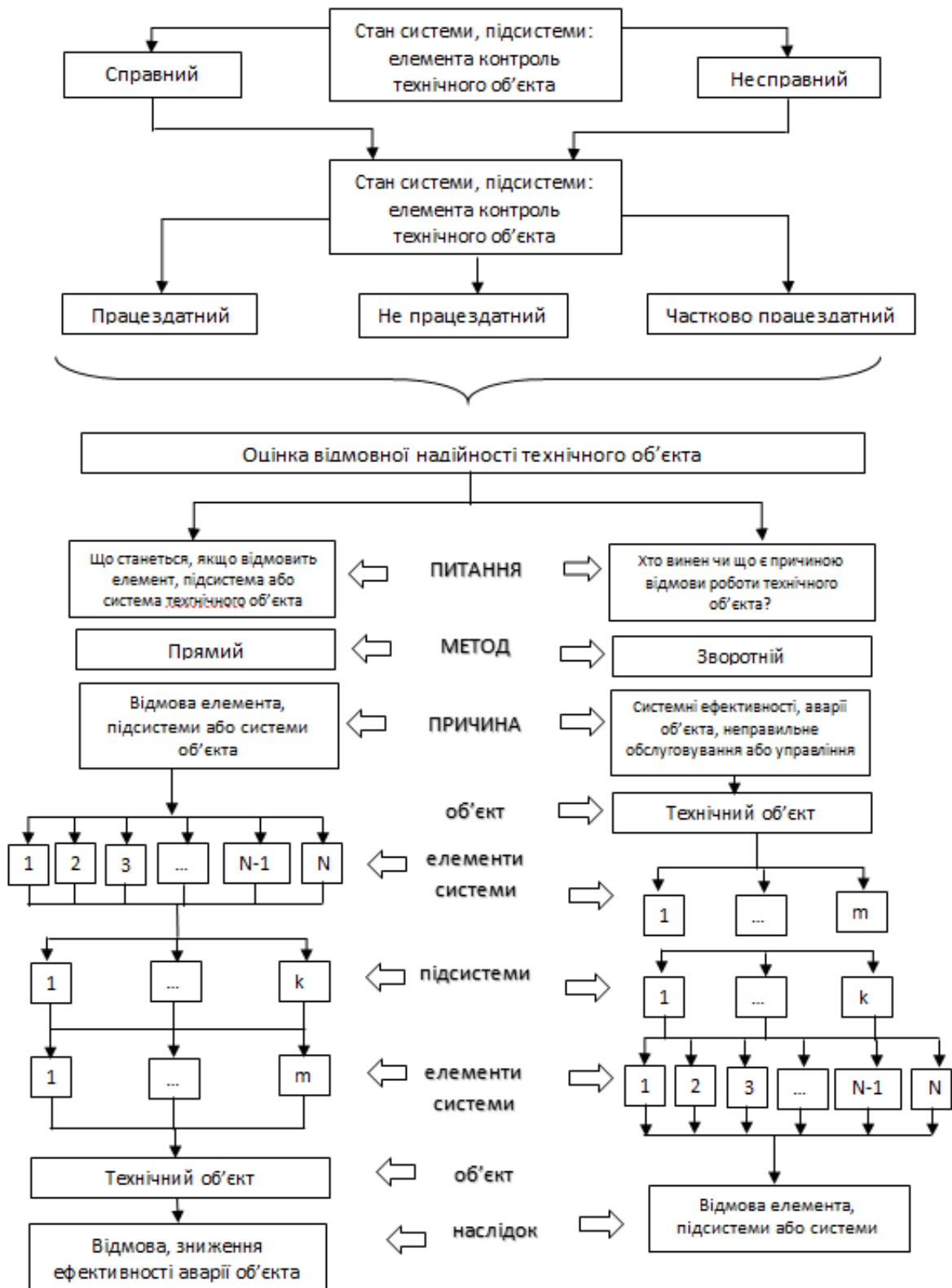


Рис. 4.1. Схема оцінки працездатності і контролю технічного об'єкта, що діагностується

Вибір архітектури системи діагностування, при методах прийняття рішень, є актуальною проблемою. Помилкові рішення, прийняті на етапі проектування систем діагностування, можуть стати причиною провалу проектів, особливо великих, таких як системи управління і діагностування газотранспортної та авіаційної галузі.

Складний технічний об'єкт діагностування є сукупністю технологічних підсистем, які, в свою чергу, складаються з більш дрібних функціональних технологічних вузлів, а ті з сукупності агрегатів і т.д [2, 32-36].

Існують також загальні принципи підвищення надійності будь-яких систем:

- Система повинна складатися з мінімального числа утворюючих її елементів.

- Елементи і рішення повинні бути ортогональні, тобто необхідний набір функцій повинен забезпечуватися суперпозицією мінімального набору базових елементів.

- Ієрархічні рівні в системі повинні бути автономні.

- Мінімальні розміри і простота прикладних програм, так як збільшення розмірів програм веде до експоненціального зростання числа помилок і складності їх тестування.

Для великих об'єктів діагностування функція, що вийшла з ладу, повинна бути відновлена без впливу на решту функціонуючих частин системи, тобто відновлення має здійснюватися в режимі гарячої заміни за мінімальний час.

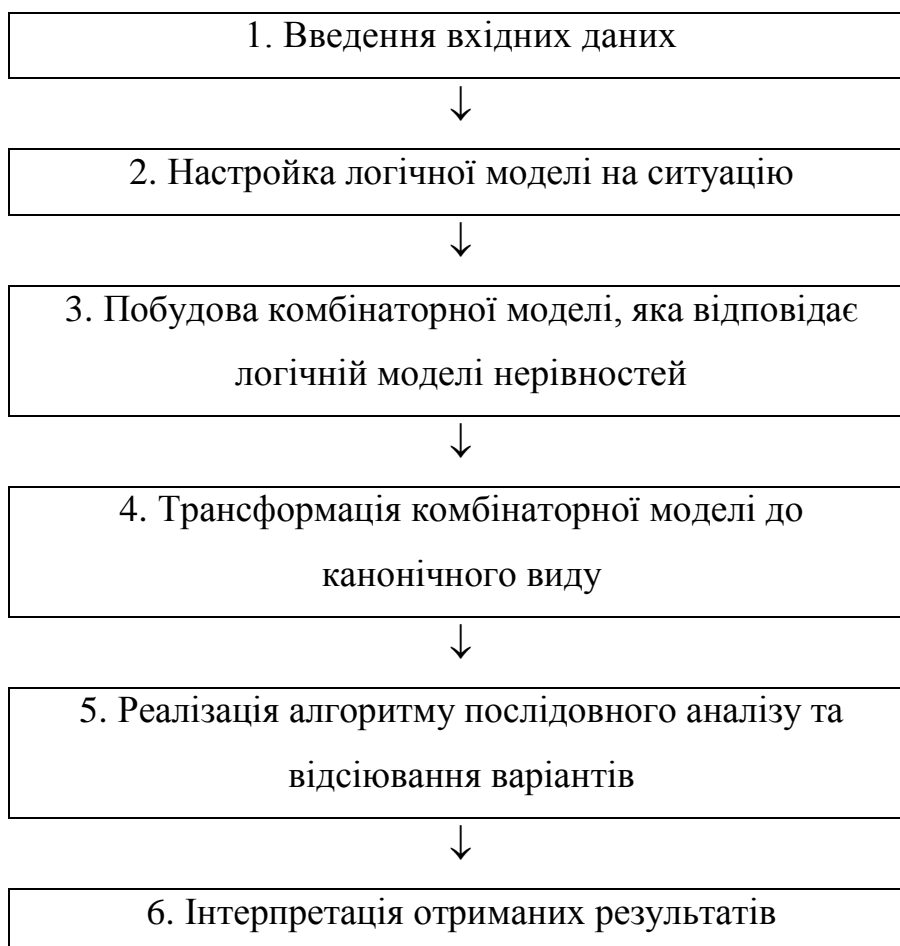
Аналіз сучасного стану діагностичного забезпечення складних систем в Україні дозволяє відзначити ряд проблем, що стримують його розвиток. Ці проблеми пов'язані як з методологічним і апаратним забезпеченням, так і з алгоритмічно-програмним забезпеченням [37-41].

Так, документами по експлуатації устаткування регламентований ряд заходів для визначення його технічного стану. Однак у більшості випадків

вони не розроблялися як єдина система з чіткими взаємозалежними окремими операціями, спрямованими на формування діагностичних висновків і рішень.

Навіть нове обладнання, що вводиться в експлуатацію, недостатньо оснащується засобами технічного контролю. Існуючі ж засоби не є в строгому змісті системами діагностики, оскільки їхня основна функція полягає у вимірі, первинній обробці і відображенні окремих параметрів, діагностичний висновок дається персоналом [42-45].

В даній дисертаційній роботі пропонується наступна загальна структура інформаційної технології діагностування технічних багаторівневих систем [13]:



Інформаційна технологія діагностування складних технічних об'єктів реалізується у вигляді побудови експертної системи. Під експертною системою діагностування технічних об'єктів з багаторівневою структурою

(ЕСДТОБС) розумітимемо програму, яка використовує знання фахівців (експертів) про деяку конкретну вузько спеціалізовану область і в межах цієї області здатна приймати рішення на рівні експерта-професіонала.

В останні роки все чіткіше виявляються основні розходження між системами керування і контролю складних технічних систем, з одного боку, і системами їхньої діагностики, з іншої сторони [46-52].

Досвід застосування експертних систем показав, що найбільшу ефективність вони можуть принести в тих випадках, коли вони використовують оперативну інформацію в процесі роботи обладнання й інтегровані в автоматизовану систему керування складним об'єктом [9].

Структурна схема ЕСДТОБС наведена на рис. 4.2.

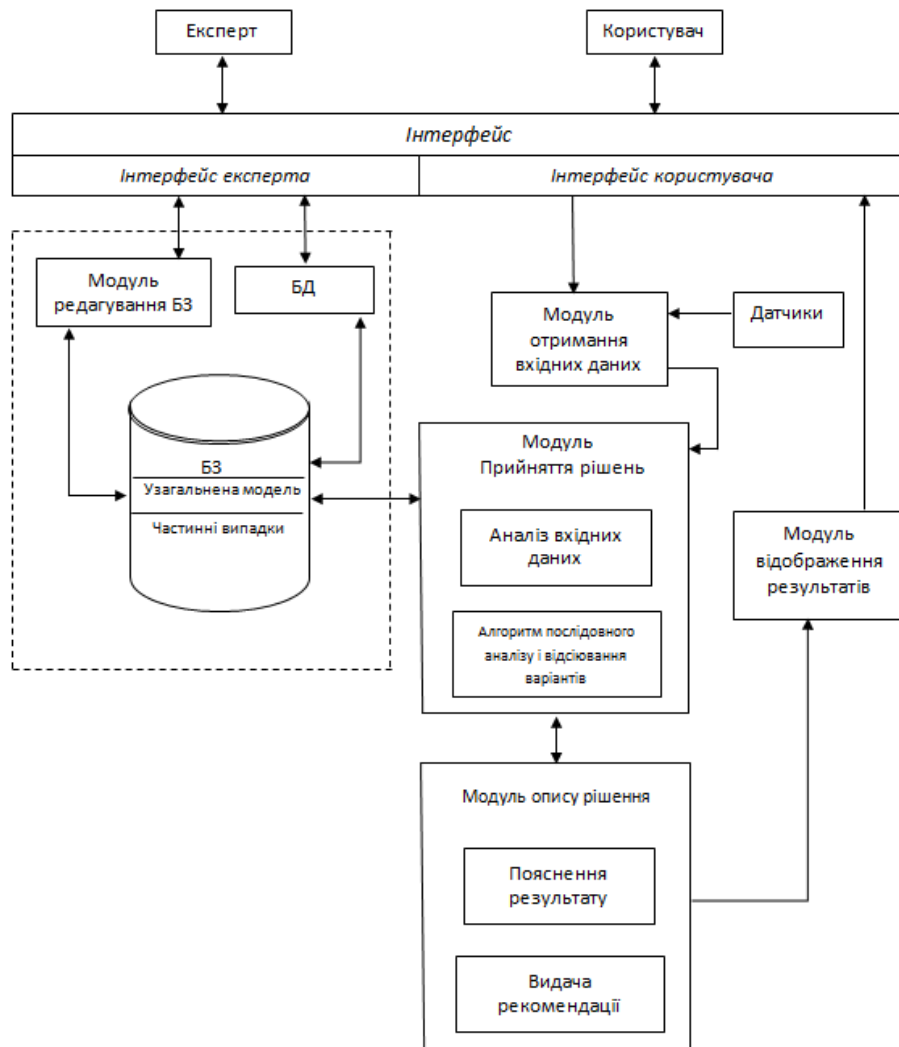


Рис. 4.2. Структурна схема експертної системи діагностування технічних об'єктів з багаторівневою структурою

На рисунку 4.3 приведена розширена функціональна структура експертної системи діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою [5, 8].

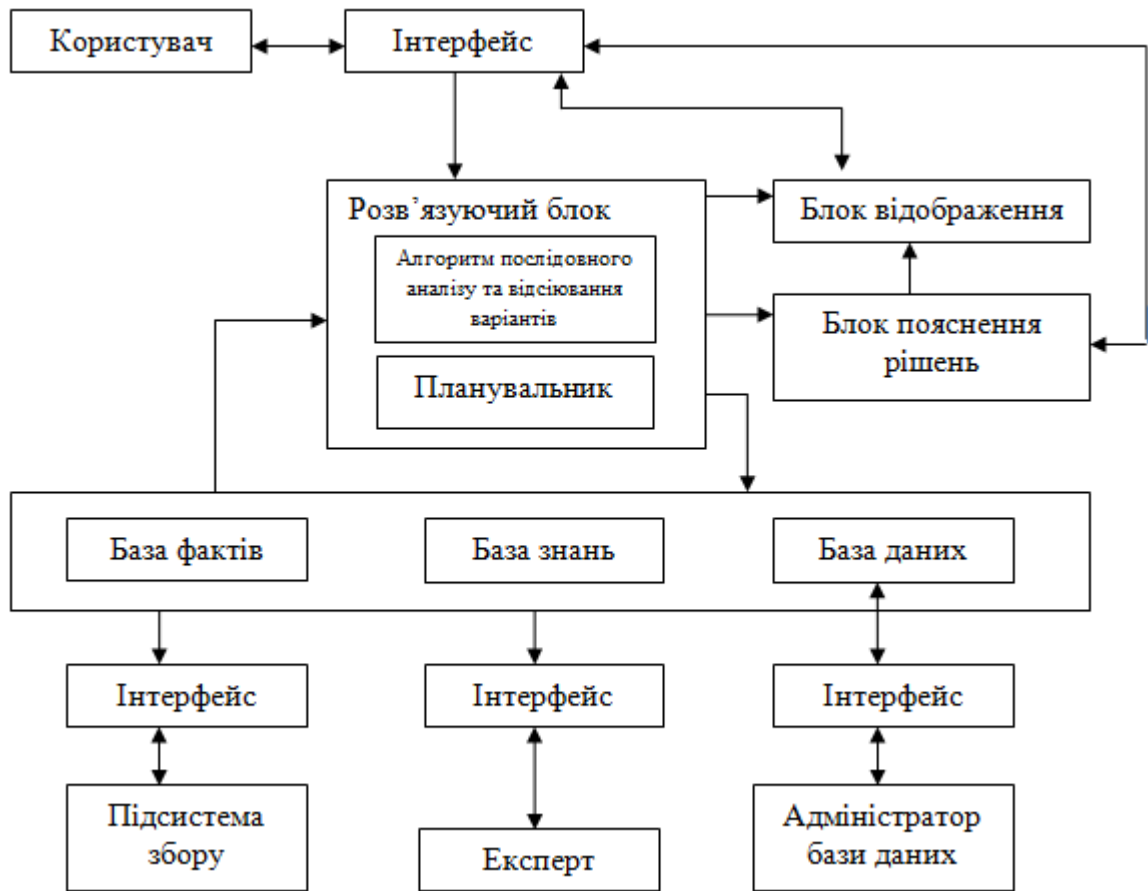


Рис. 4.3. Розширена структура ЕСДТОБС

Розроблена ЕСДТОБС відповідає вимогам, що пропонуються до архітектури експертних систем. Користувач взаємодіє з експертною системою через інтерфейс користувача. Цей інтерфейс являє собою систему меню, кнопок керування і графічних зображень. Правила роботи з інтерфейсом відповідають засобам роботи в операційній системі Windows.

Блок, що визначає несправності, складається з двох частин: планувальника завдань і логічного виведення результату (ухвалення рішення). За допомогою планувальника завдань здійснюється обґрунтування стратегії розв'язання завдання. Вибір стратегії прийняття

рішення здійснюється на основі аналізу описів зв'язків ситуацій, що описують причинно-наслідкові залежності.

Блок відображення необхідний для виведення результатів розв'язання задачі діагностування на екран дисплея. Для кращого сприйняття результатів використовуються структурні схеми, що відображають конструкцію об'єкта і допоміжних систем (графічне представлення інформації).

Згідно рисунку 4.3 випливає, що експертна система дозволяє не тільки отримати рішення на основі порівняння фактів і правил бази знань, не тільки відобразити рішення, а й дати пояснення, чому прийнято таке рішення. Інформаційна модель експертної системи являє собою базу фактів, даних, знань.

База даних ЕСДТОБС є частиною бази даних системи керування складного технічного об'єкта. У базі даних реалізована реляційна модель даних. База даних експертної системи діагностування містить ту інформацію про об'єкт і його допоміжні системи, яка необхідна в процесі прийняття рішення при аналізі ненормальної ситуації. До такої інформації відносяться нормативні дані по експлуатації об'єкта – граничні значення.

Джерелами інформації для бази фактів є система збору інформації від встановлених датчиків або результатів випробувань обладнання.

База знань поділяється на два рівня. Нижній рівень представляє набори продукційних правил, а верхній рівень – опис причинно-наслідкових ситуацій. Ці описи є логічною схемою протікання визначених порушень роботи об'єкта і систем, що забезпечують його роботу. Взаємодія персоналу з інформаційною моделлю здійснюється через відповідні інтерфейси.

Ведення бази знань пов'язано з використанням таблиць рішень, ідентифікаторів, що описують датчики, табло, реле-показчики і властивості складного технічного об'єкта діагностики. Підтримка цілісності бази знань, підвищення ефективності керування базою, зниження ймовірності внесення помилки персоналом є необхідними вимогами до роботи інтерфейсу.

Розроблена ЕС діагностики стану ТОВС може працювати як вузол локальної обчислювальної мережі, так і в складі автоматизованого робочого місця (АРМ) фахівця. ЕСДТОВС може функціонувати в двох режимах: автоматичному режимі і режимі «оперативного контролю».

В автоматичному режимі ПК постійно включена з метою контролю стану СТО. У цьому режимі програмне забезпечення управляє процесом передачі даних від системи збору інформації, контролює справність каналів вимірювання, виявляє відхилення контрольованих параметрів за граничні значення, виконує пошук причин аварійних відхилень, порівнюючи поточну інформацію з правил, укладеними в БЗ, формує рекомендації персоналу. ЕС використовує інформацію від датчиків, встановлених в різних вузлах діагностуємої системи.

При перевищенні параметром значення уставки запускається ЕС для аналізу ситуації.

Якщо не забезпечений режим автоматичного введення інформації в ПК, то оперативний персонал може вибрати з меню завдань експертної системи потрібне меню і ввести відповідну інформацію.

У режимі «оперативного контролю» забезпечується виконання таких функцій: контроль поточного стану діагностуємої системи, що забезпечують пошук причини відхилення параметрів за граничні значення.

Застосування методів, що реалізовано в даній експертній системі, дозволяє визначати місце виикнення і вид несправностей, що викликають зміну контрольованих параметрів. Програмне забезпечення, яке реалізує цю функцію, використовує логічні моделі та алгоритми інструментарію для створення експертної системи діагностування стану ТОВС.

Досвід застосування експертних систем показав, що найбільшу ефективність вони можуть принести в тих випадках, коли ними використовується оперативна інформація в процесі роботи обладнання і коли вони інтегровані в автоматизовану систему управління складним технічним об'єктом [6, 15, 32].

Метою даного розділу є вдосконалення інструментальної оболонки і баз знань експертної системи діагностування стану технічного багаторівневого об'єкта у вигляді комплексу програм і створення прикладної експертної системи.

Експертні системи діагностики різного устаткування досить широко поширені в різних сферах діяльності. Основна кількість таких систем проводить звичайний моніторинг, а інші можуть видати інформацію не тільки про контрольований об'єкт, а й констатують те чи інше ушкодження.

Новизна експертної системи, що втілює інформаційну технологію діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою, яка розроблена в даній роботі, в тому, що крім перерахованих вище особливостей вона має ще одну істотну перевагу, яка полягає у видачі користувачеві не тільки результатів моніторингу, а й факту несправності або ненормальності режиму роботи в умовах накладення наслідків несправностей. Це дає диспетчеру системи додаткову підтримку в прийнятті рішень щодо виконання оперативних дій.

Також ця експертна система може працювати в режимі симулятора, що дуже важливо, так як її можна використовувати для тренувань персоналу, для чого в базу даних експертної системи можна заносити різні ситуації, які потім моделюються.

4.2. Інформаційне забезпечення технології діагностування складних технічних об'єктів з багаторівневою структурою

Інформаційне забезпечення (ІЗ) є найважливішою складовою комплексу діагностики складних технічних систем. В розвитку ІЗ умовно можна виділити три етапи, тісно зв'язані з розвитком технічного забезпечення ОД.

Для першого характерна розробка окремих моделей, алгоритмів і програм. На цьому етапі були автоматизовані деякі ділянки науково-дослідницьких і дослідно-конструкторських робіт, пов'язані в основному з

трудомісткими інженерними розрахунками. Незважаючи на деякі досягнення механізації, основні проблеми проектування складних систем не були і не могли бути вирішені, зокрема, істотно не підвищилася продуктивність праці конструкторів. «Вузькі міста», наприклад проблеми збору, зберігання, обробки і передачі значної за обсягом інформації, що відображає стан проекту, залишалися [13].

Другий етап пов'язаний з інформаційним комплектуванням програмних засобів, з можливістю створення наскрізної технології проектування систем діагностики. З'являються так звані інтегровані системи діагностування складних технічних об'єктів (СДСТО), що дозволяють інформаційно об'єднувати діяльність колективу проектувальників на всіх стадіях роботи складної системи.

Однак і в рамках інтегрованих СДСТО найважливіша проблема підвищення якості проекту не знаходить належного розв'язку. Інформаційна інтеграція не забезпечує оптимізації параметрів і характеристик об'єкта, хоча і створює для неї відомі передумови. Вона досягається системною "ув'язкою" (координацією, узгодженням) проектно-конструкторських рішень, прийнятих на всіх рівнях ієрархії в системі діагностування.

На третьому етапі розвитку ІЗ СДСТО широко використовуються ієрархічні системи прийняття рішень, що приймаються на всіх стадіях і етапах проектування об'єкта та його підсистем. Рішення задач третього етапу неможливе без створення загальної теорії ієрархічних систем діагностування – спеціального розділу системного аналізу, теорії систем, теорії прийняття рішень і її додатків до конкретних предметних областей.

Загальна форма інформаційної технології діагностування технічних систем з багаторівневою структурою показана на рис. 4.4.



Рис. 4.4. Структура інформаційної технології діагностування ТОБС

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 невизначеності наслідків кожної окремої несправності, яка обумовлена накладанням змін контрольованих параметрів об'єкту діагностування від сукупності одночасних несправностей.

Функціональні рівні інформаційної технології діагностування технічних багаторівневих систем представлено на рис. 4.5 [13].

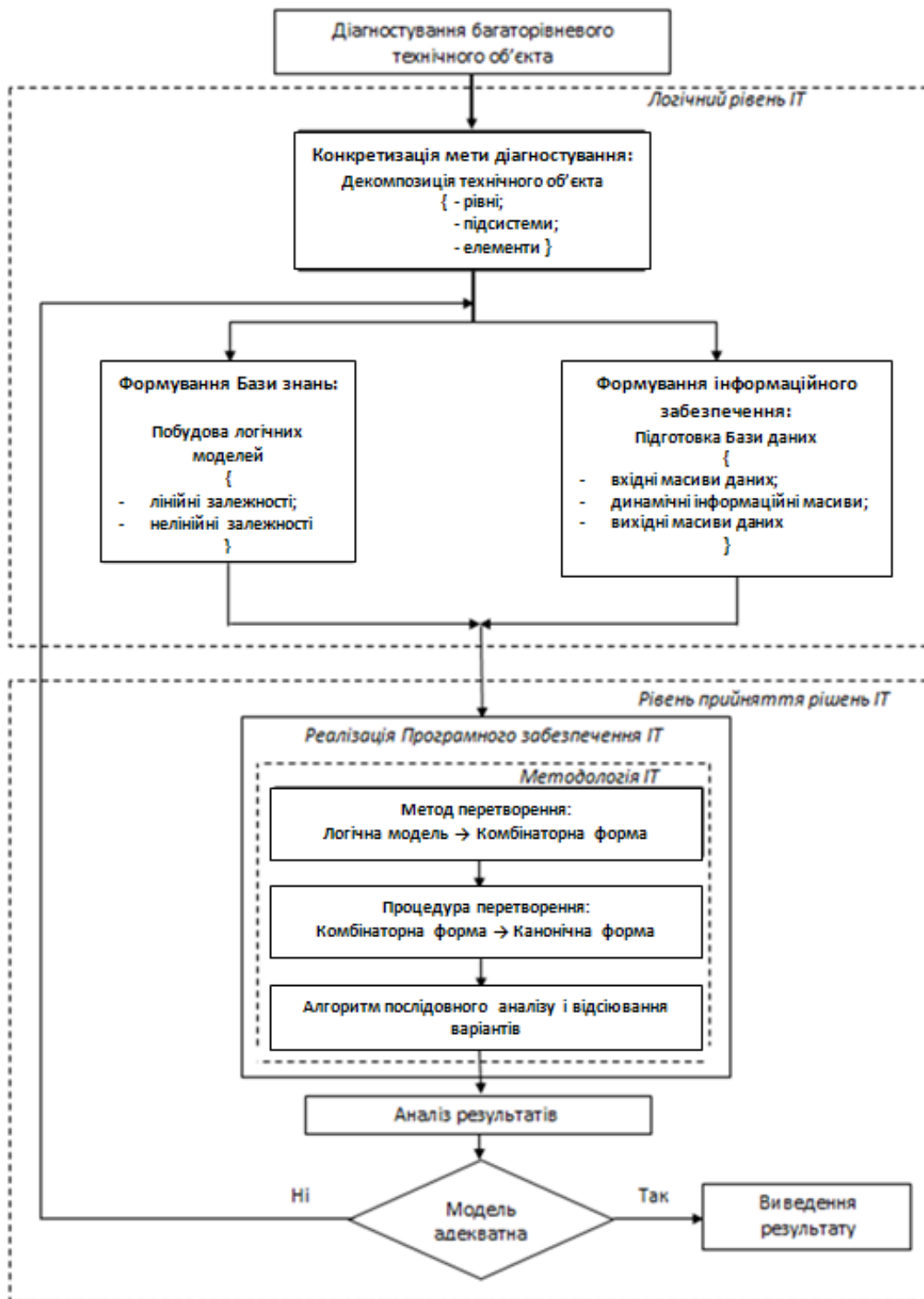
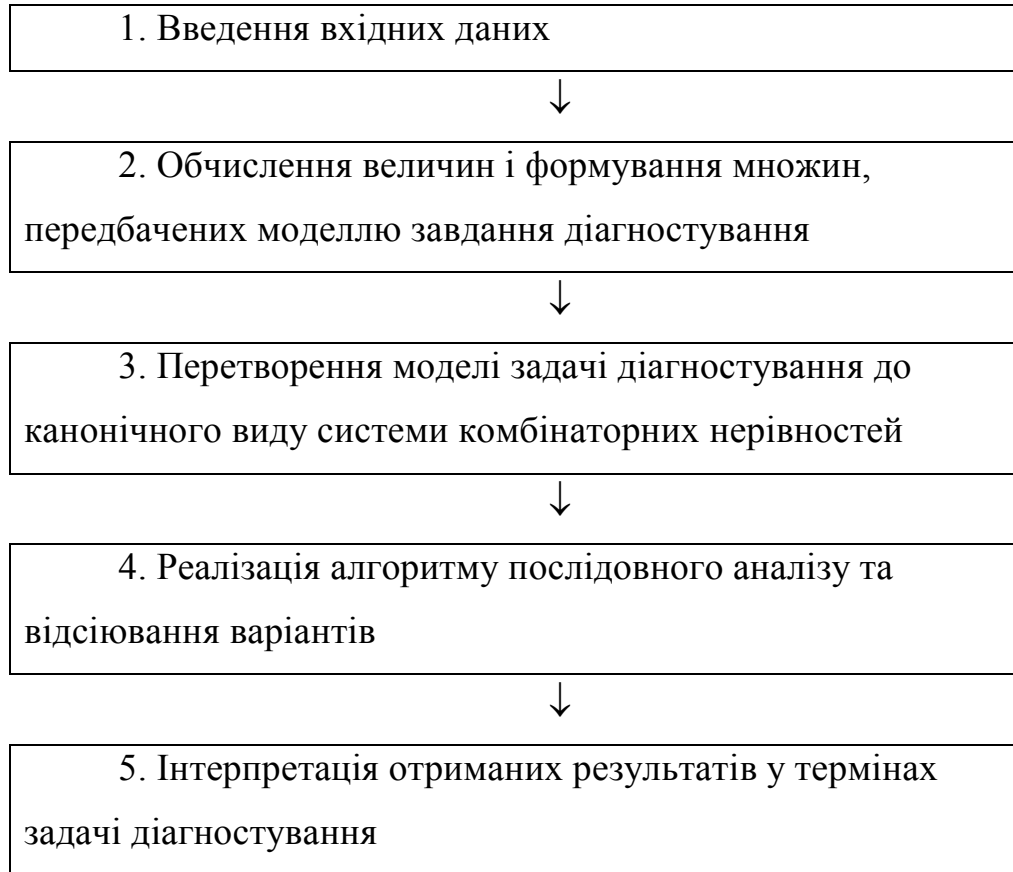


Рис. 4.5. Функціональні рівні інформаційної технології діагностування ТОБС

Відповідно до розроблених в даній роботі логічних моделей діагностування складних технічних систем можна виділити наступні два методи розв'язання задач діагностування.

4.2.1. Метод розв'язання задачі діагностування на основі нелінійної моделі

Метод розв'язання задачі діагностування включає наступні етапи [15]:



Вихідна модель:

$$\begin{cases} \sum_{\rho \in Q(p)} (h_p^{(\rho)} - \xi_p^{(\rho)}) \prod_{\beta \in B^{(\rho)}} \prod_{\eta \in J_{\beta}^{(\rho)}} \prod_{k \in K_{\beta\eta}^{(\rho)}} z_{\beta\eta k} \leq \delta_p \\ \sum_{\rho \in Q(p)} (-h_p^{(\rho)} - \xi_p^{(\rho)}) \prod_{\beta \in B^{(\rho)}} \prod_{\eta \in J_{\beta}^{(\rho)}} \prod_{k \in K_{\beta\eta}^{(\rho)}} z_{\beta\eta k} \leq -\delta_p \end{cases}; \quad (4.1)$$

$$p = \overline{1, u},$$

де $z_{\beta\eta k} \in \{0,1\}$, $\beta = \overline{1, \mu}$; $\eta \in J_{\beta}$; $k \in K_{\beta\eta}$.

Примітка: щоб не було плутанини при перетворенні вихідної моделі до канонічної форми, в формулу (4.1) внесено наступні зміни в системі позначень:

| Попередній символ | Новий символ |
|-------------------|--------------|
| i | β |
| I | B |
| j | η |
| r | ρ |
| R | Q |
| m | μ |
| x | z |

Канонічна форма:

$$g_j(x) = \sum_{r \in R_j} a_{jr} \varphi_r(x) \leq b_j; \quad j = \overline{1, n}, \quad (4.2)$$

де x – вектор незалежних булевих змінних:

$$x = (x_i; i = \overline{1, m}); \quad x_j \in \{0, 1\}; \quad i = \overline{1, m};$$

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

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

m – кількість незалежних змінних;

n – кількість нерівностей;

q – кількість різних x -добутків, що входять в систему нерівностей;

R_j – множина номерів x -добутків, що входять в j -ту нерівність;
 $j = \overline{1, n}$;

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

a_{jr} і b_j – дійсні числа, що виступають у якості коефіцієнтів (a_{jr}) і вільних членів (b_j) нерівностей; $j = \overline{1, n}$; $r \in R_j$.

Підготовчий етап – перетворення вихідної моделі (4.1) до канонічної форми (4.2).

1. Перенумерувати змінні $z_{\beta\eta k}$, $\beta = \overline{1, \mu}$; $\eta \in J_\beta$; $k \in K_{\beta\eta}$ числами натурального ряду від 1 до m :

$$m = \sum_{\beta=1}^{\mu} \sum_{\eta \in J_\beta} |K_{\beta\eta}|.$$

Для цього будується таблиця, наприклад:

$$\mu = 2; J_\beta = \{1, 2\}; K_{\beta\eta} = \{3, 4, 5, 6, 7\};$$

| Трійка індексів β, η, k | Номер трійки i | Трійка індексів β, η, k | Номер трійки i |
|-------------------------------------|------------------|-------------------------------------|------------------|
| 1, 1, 1 | 1 | 2, 4, 8 | 11 |
| 1, 1, 2 | 2 | 2, 5, 5 | 12 |
| 1, 1, 3 | 3 | 2, 5, 6 | 13 |
| 1, 2, 3 | 4 | 2, 5, 7 | 14 |
| 1, 2, 5 | 5 | 2, 6, 6 | 15 |
| 2, 3, 4 | 6 | 2, 6, 7 | 16 |
| 2, 3, 6 | 7 | 2, 6, 8 | 17 |
| 2, 3, 7 | 8 | 2, 6, 9 | 18 |
| 2, 4, 4 | 9 | 2, 7, 7 | 19 |
| 2, 4, 6 | 10 | 2, 7, 9 | 20 |

Номер трійки i в подальшому розглядається як індекс змінної x_i .

2. Перенумерувати нерівності системи (4.1) числами натурального ряду від 1 до $n = 2u$.

Оскільки система (4.2) складається з пар нерівностей, пропонується наступна нумерація нерівностей системи (4.1):

– спочатку числами від 1 до u нумеруються перші нерівності кожної пари:

$$\sum_{\rho \in Q(p)} (h_p^{(\rho)} - \zeta_p^{(\rho)}) \prod_{\beta \in B^{(\rho)}} \prod_{\eta \in J_{\beta}^{(\rho)}} \prod_{k \in K_{\beta\eta}^{(\rho)}} z_{\beta\eta k} \leq \delta_p;$$

– потім числами від $u + 1$ до n нумеруються другі нерівності кожної пари:

$$\sum_{\rho \in Q(p)} (-h_p^{(\rho)} - \zeta_p^{(\rho)}) \prod_{\beta \in B^{(\rho)}} \prod_{\eta \in J_{\beta}^{(\rho)}} \prod_{k \in K_{\beta\eta}^{(\rho)}} z_{\beta\eta k} \leq -\delta_p.$$

3. Визначити склад множин R_j , $j = \overline{1, n}$ системи (4.2).

Передбачається, що всі можливі комбінації несправностей, що призводять до зміни кожної p -й характеристики стану ОД, перенумеровані числами натурального ряду на етапі складання моделі (4.1). При цьому кожна множина $Q(p)$, $p = \overline{1, u}$ являє собою сукупність номерів можливих комбінацій, тбто чисел.

Тоді

$$R_j = R_{j+u} = Q(p); \quad j = p = \overline{1, u}.$$

4. Визначити склад множин I_r , $r = \overline{1, q}$ системи (4.2), де

$$q = \sum_{p=1}^u |Q(p)|.$$

Попередньо визначається множина трійок індексів змінних $z_{\beta\eta k}$, $\beta = \overline{1, \mu}$; $\eta \in J_{\beta}$; $k \in K_{\beta\eta}$, що входять в добуток

$$\prod_{\beta \in B^{(\rho)}} \prod_{\eta \in J_{\beta}^{(\rho)}} \prod_{k \in K_{\beta\eta}^{(\rho)}} z_{\beta\eta k}.$$

Наприклад, при $\mu = 2$; $J_{\beta} = \{1, 2\}$; $K_{\beta\eta} = \{3, 4, 5, 6, 7\}$

$$\prod_{\beta \in B^{(\rho)}} \prod_{\eta \in J_{\beta}^{(\rho)}} \prod_{k \in K_{\beta\eta}^{(\rho)}} z_{\beta\eta k} = z_{123} \cdot z_{125} \cdot z_{244} \cdot z_{246} \cdot z_{248} \cdot z_{277} \cdot z_{279}.$$

Потім по наведеній вище таблиці встановлюється склад відповідної множини I_r :

$$I_r = \{4, 5, 9, 10, 11, 19, 20\}.$$

5. Визначити коефіцієнти a_{jr} ; $j = \overline{1, n}$; $r \in R_j$ системи (4.2):

Для $j = \overline{1, u}$:

$$a_{jr} = h_p^{(\rho)} - \xi_p^{(\rho)};$$

Для $j = \overline{1+u, n}$:

$$a_{jr} = -h_p^{(\rho)} - \xi_p^{(\rho)}.$$

6. Визначити вільні члени b_j ; $r \in R_j$ системи (4.2):

Для $j = \overline{1, u}$:

$$b_j = \delta_p;$$

Для $j = \overline{1+u, n}$:

$$b_j = -\delta_p.$$

Опис канонічної форми (4.2).

В пам'яті ПК система (4.2) представляється наступним набором множин і векторів:

- сукупність $\{R_j; j = \overline{1, n}\}$ підмножин номерів x -добутків, що входять до кожної з нерівностей системи;
- сукупність $\{I_r; r = \overline{1, q}\}$ підмножин номерів незалежних змінних, добутки яких входять в систему;
- сукупність $\{(a_{jr}; r \in R_j); j = \overline{1, n}\}$ векторів коефіцієнтів нерівностей системи;
- вектор $(b_j; j = \overline{1, n})$ правих частин нерівностей системи.

Необхідно передбачити також зберігання λ векторів часткових планів $x_k^C = (x_{ki}^C | i = \overline{1, m})$, $k = \overline{1, \lambda}$ підмножин варіантів, на які в процесі розв'язання задачі буде декомпонуватись повна множина.

4.2.2. Метод розв'язання системи нелінійних комбінаторних нерівностей (спрощений варіант)

0-й крок – аналіз повної множини варіантів G .

Умовні позначення:

$$R_j^2 = \{r \in R_j : a_{jr} < 0\};$$

$$R_j^3 = \{r \in R_j : a_{jr} > 0\};$$

$$R_j^{31} = \{r \in R_j^3 : |I_r| = 1\};$$

$$s_j^{(2)} = \sum_{r \in R_j^2} a_{jr};$$

$$s_j^{(3)} = \sum_{r \in R_j^3} a_{jr};$$

$$a_{jr'} = \min\{a_{jr}; r \in R_j^2\};$$

$$a_{jr''} = \max\{a_{jr''}; r \in R_j^{31}\}.$$

0.1 Послідовно для кожної j -ої ($j = \overline{1, n}$) нерівності системи (4.2) перевіряється умова:

$$(R_j^2 = \emptyset) \& (b_j < 0) \vee (R_j^2 \neq \emptyset) \& (s_j^2 > b_j).$$

Якщо для будь-якого нерівності ця умова виконується, то процес завершується, оскільки завдання допустимих розв'язків не має.

В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

0.2 Послідовно для кожної j -ої ($j = \overline{1, n}$) нерівності системи (4.2) перевіряється умова:

$$(R_j^3 = \emptyset) \& (b_j \geq 0) \vee (R_j^3 \neq \emptyset) \& (s_j^{(3)} \leq b_j).$$

Якщо для будь-якого нерівності j^* , $1 \leq j^* \leq n$ ця умова виконується, то така нерівність виключається з системи (4.2). При цьому його номер видаляється з множини номерів нерівностей системи:

$$J^* = \{j : 1 \leq j \leq n\} \setminus \{j^*\}.$$

Після цього переходимо до наступної нерівності.

Після розгляду всіх нерівностей переходимо до наступного пункту.

0.3 Послідовно для кожної j -ої ($j \in J^*$) нерівності системи (4.2), в якій $R_j^2 \neq \emptyset$, перевіряється умова:

$$s_j^{(2)} \leq b_j < s_j^{(2)} - a_{j^*}.$$

Якщо для будь-якої нерівності дана умова виконується, то всім змінним x_i , $i \in I_{r'}$, $r' \in R_j^2$ присвоюється значення 1. Ці значення підставляються у всі (що залишилися в полі розгляду) нерівності системи (4.2).

При цьому виконуються наступні дії:

а) номери змінних, яким присвоюється значення 1, виключаються з підмножин $i \in I_r$; $r = \overline{1, q}$;

б) позиції вектора часткового плану $x^C = (x_i^C | i = \overline{1, m})$, що відповідають цим змінним, заповнюються значеннями 1;

в) коефіцієнт $a_{jr'}$ переноситься в ліву частину нерівності з протилежним знаком.

Після цього процедура аналізу повної множини варіантів повторюється, починаючи з пункту 0.1.

В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

0.4 Послідовно для кожної j -ої ($j \in J^*$) нерівності системи (4.2), в якій $R_j^{31} \neq \emptyset$, перевіряється умова:

$$(R_j^2 = \emptyset) \& (0 \leq b_j < a_{jr''}) \vee (R_j^2 \neq \emptyset) \& (s_j^{(2)} \leq b_j < s_j^{(2)} + a_{jr''}).$$

Якщо для будь-якої нерівності дана умова виконується, то змінній x_i , $i \in I_{r''}$, $r'' \in R_j^{31}$ присвоюється значення 0. Це значення підставляється у всі (що залишилися в полі розгляду) нерівності системи (4.2).

При цьому виконуються наступні дії:

а) номер змінної, якій присвоюється значення 0, виключається з підмножин $i \in I_r$; $r = \overline{1, q}$;

б) позиція вектора часткового плану $x^c = (x_i^c | i = \overline{1, m})$, що відповідає цій змінній, заповнюється значенням 0.

Після цього процедура аналізу повної множини варіантів повторюється, починаючи з пункту 0.1.

Процедура аналізу повної множини варіантів завершується в наступних випадках:

1) якщо для будь-якого нерівності системи (4.2) виконується умова пункту 0.1 (задача розв'язків не має);

2) якщо для всіх нерівностей системи (4.2) виконується умова пункту 0.2 і, отже, $J^* = \emptyset$ (системі задовольняє будь-який набір значень шуканих змінних);

3) знайдений один або кілька повних планів і при цьому $J^* = \emptyset$ (розв'язок або всі можливі розв'язки знайдені);

4) в останньому циклі аналізу повної множини варіантів жодній зі змінних не присвоєно фіксоване значення.

N-й крок ($N = 1, 2, \dots$)

Передбачається, що до моменту початку реалізації N-го кроку в полі розгляду знаходяться λ підмножин варіантів G_k , $k = \overline{1, \lambda}$, кожна з яких характеризується частковим планом $x_k^c = (x_{ki}^c | i = \overline{1, m})$.

Умовні позначення:

I_k^0 і I_k^1 – множина номерів незалежних змінних, що отримали в планах k-ої підмножини варіантів значення 0 і 1 відповідно; $k = \overline{1, \lambda}$;

I_k – сукупність номерів змінних, значення яких в G_k не зафіксовані; $k = \overline{1, \lambda}$;

R_k^1 – множина номерів x -добутків (іншими словами – функцій $\varphi_r(x)$), які перетворені частковим планом k-ої підмножини варіантів в 1:

$$R_k^1 = \{r : (1 \leq r \leq q) \& (I_r \subseteq I_k^1)\};$$

$$R_{jk}^1 = R_j \cap R_k^1;$$

R_k – сукупність номерів творів змінних, які не перетворюються частковим планом підмножини G_k в константу:

$$R_k = \{r : (1 \leq r \leq q) \& (I_r \cap I_k^0 = \emptyset) \& (I_r \cap I_k \neq \emptyset)\};$$

$$R_{jk} = R_j \cap \overline{R_k}; \quad j = \overline{1, n};$$

J_k – сукупність номерів обмежень, активних по відношенню до планів підмножини G_k ; $J_k \subseteq \{1, \dots, n\}$;

$$R_{jk}^2 = \{r \in R_{jk} : a_{jr} < 0\};$$

$$R_{jk}^3 = \{r \in R_{jk} : a_{jr} > 0\};$$

$$R_{jk}^{31} = \{r \in R_{jk}^3 : |I_{rk}| = 1\};$$

$$s_{jk}^{(2)} = \sum_{r \in R_{jk}^2} a_{jr};$$

$$s_{jk}^{(3)} = \sum_{r \in R_{jk}^3} a_{jr};$$

$$a_{jr'} = \min\{a_{jr}; r \in R_{jk}^2\};$$

$$a_{jr''} = \max\{a_{jr''}; r \in R_{jk}^{31}\}.$$

Система нерівностей (4.2), приведена у відповідність k -ій підмножині варіантів шляхом підстановки в неї часткового плану даної підмножини:

$$g_{jk}(x) = \sum_{r \in R_{jk}} a_{jr} \cdot \varphi_{rk}(x) \leq b_{jk}; \quad j \in J_k; \quad (4.3)$$

$$x_i \in \{0, 1\}; \quad i \in I_k,$$

де $I_{rk} = I_r \cap I_k$; $r \in R_k$; $b_{jk} = b_j - \sum_{r \in R_{jk}^1} a_{jr}$, $j \in J_k$.

N.1 Вибір підмножини варіантів, що підлягає розбиттю

Для подальшого розбиття обирається підмножина G_{k^*} , якій відповідає частковий план максимальної довжини:

$$|I_{k^*}^0 \cup I_{k^*}^1| = \max\{|I_k^0 \cup I_k^1|; k = \overline{1, \lambda}\}.$$

N.2 Вибір незалежної змінної, значення якої підлягають фіксації

Для фіксації значень вибирається будь-яка змінна x_{i^*} , $i^* \in I_{r^*k^*}$ з числа аргументів функції $\varphi_{r^*k^*}(x)$, $r^* \in R_{k^*}$, яка входить в j^* -у нерівність ($j^* \in J_{k^*}$) системи (4.3) з максимальним за модулем коефіцієнтом:

$$|a_{j^*r^*}| = \max\{|a_{jr}|; j \in J_{k^*}; r \in R_{k^*}\}.$$

N.3 Розбиття підмножини варіантів G_{k^*}

Шляхом фіксації значень обраної змінної x_{i^*} підмножини G_{k^*} розбивається на дві непересічні підмножини: $G_{k^*}^0$ і $G_{k^*}^1$.

В частковому плані першої з них в позицію номера i^* заноситься 0, а в частковий план другої в таку ж позицію записується 1.

Ці значення змінної x_{i^*} по чергово підставляються в систему (4.3), в результаті чого отримують дві різні системи нерівностей.

ПРИМІТКИ.

1. Зберігати в пам'яті ПК опис всіх часткових систем нерівностей форми (4.3) видається недоцільним. Досить зберігати опис загальної системи

(4.2) і часткові плани всіх підмножин варіантів. При необхідності частковий план підставляється в загальну форму (4.2) і після відповідних перетворень ми отримаємо цікаву для нас часткову систему.

2. Коли ми говоримо «значення змінної підставляється в систему», то під цим слід розуміти коригування складу множин $(I_k^0, I_k^1, I_k, R_{jk}^1, R_k, I_{rk})$ і вектора вільних членів (b_{jk}) , що описують систему.

N.4 Аналіз підмножин $G_{k^*}^0$ і $G_{k^*}^1$

Аналіз знов отриманих підмножин варіантів $G_{k^*}^0$ і $G_{k^*}^1$ здійснюється почергово згідно з наступною процедурою, викладеною для деякої умовної підмножини G_k .

N.4.1 Послідовно для кожної j -ої ($j \in J_k$) нерівності системи (4.3) перевіряється умова:

$$(R_{jk}^2 = \emptyset) \& (b_{jk} < 0) \vee (R_{jk}^2 \neq \emptyset) \& (s_{jk}^{(2)} > b_{jk}).$$

Якщо для будь-якої нерівності ця умова виконується, то процес завершується, оскільки аналізована підмножина допустимих планів не містить.

В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

N.4.2 Послідовно для кожної j -ої ($j \in J_k$) нерівності системи (4.3) перевіряється умова:

$$(R_{jk}^3 = \emptyset) \& (b_{jk} \geq 0) \vee (R_{jk}^3 \neq \emptyset) \& (s_{jk}^{(3)} \leq b_{jk}).$$

Якщо для якої-небудь нерівності $j^* \in J_k$ ця умова виконується, то така нерівність виключається із системи (4.3). При цьому її номер видаляється з множини номерів нерівностей системи:

$$J_k^* = J_k \setminus \{j^*\}.$$

Після цього переходимо до наступної нерівності.

Після розгляду всіх нерівностей переходимо до наступного пункту.

Н.4.3 Послідовно для кожної j -ої ($j \in J_k^*$) нерівності системи (4.3), в якій $R_{jk}^2 \neq \emptyset$, перевіряється умова:

$$s_{jk}^{(2)} \leq b_{jk} < s_{jk}^{(2)} - a_{jr'}.$$

Якщо для будь-якої нерівності дана умова виконується, то всім змінним x_i , $i \in I_{r'k}$, $r' \in R_{jk}^2$ присвоюється значення 1. Ці значення підставляються у всі (що залишилися в полі розгляду) нерівності системи (4.3).

При цьому виконуються наступні дії:

а) номери змінних, яким присвоюється значення 1, виключаються з підмножин $i \in I_{rk}$; $r \in R_k$;

б) позиції вектора часткового плану $x_k^C = (x_{ki}^C \mid i = \overline{1, m})$, що відповідають цим змінним, заповнюються значеннями 1;

в) коефіцієнт $a_{jr'}$ переноситься в ліву частину нерівності з протилежним знаком.

Після цього процедура аналізу k -ої підмножини варіантів повторюється, починаючи з пункту Н.4.1.

В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

Н.4.4 Послідовно для кожної j -ої ($j \in J_k^*$) нерівності системи (4.3), в якій $R_{jk}^{31} \neq \emptyset$, перевіряється умова:

$$(R_{jk}^2 = \emptyset) \& (0 \leq b_{jk} < a_{jr''}) \vee (R_{jk}^2 \neq \emptyset) \& (s_{jk}^{(2)} \leq b_{jk} < s_{jk}^{(2)} + a_{jr''}).$$

Якщо для будь-якої нерівності дана умова виконується, то змінній x_i , $i \in I_{r''_k}$, $r'' \in R_{jk}^{31}$ присвоюється значення 0. Це значення підставляється у всі (що залишилися в полі розгляду) нерівності системи (4.3).

При цьому виконуються наступні дії:

а) номер змінної, якій присвоюється значення 0, виключається з підмножин $i \in I_{r_k}$; $r \in R_k$ $r \in R_k$;

б) позиція вектора часткового плану $x_k^C = (x_{ki}^C | i = \overline{1, m})$, що відповідає цій змінній, заповнюється значенням 0.

Після цього процедура аналізу k -ої підмножини варіантів повторюється, починаючи з пункту N.4.1.

Процедура аналізу k -ої підмножини варіантів завершується в наступних випадках:

1) якщо для будь-якої нерівності системи (4.3) виконується умова пункту N.4.1 (аналізована підмножина допустимих планів не містить);

2) якщо для всіх нерівностей системи (4.3) виконується умова пункту N.4.2 і, отже, $J_k^* = \emptyset$ (системі задовольняє будь-який доповнюючий план даної підмножини варіантів);

3) знайдений один або кілька повних планів і при цьому $J_k^* = \emptyset$;

4) в останньому циклі аналізу k -ої множини варіантів жодній зі змінних не присвоєно фіксоване значення.

Аналіз підмножин варіантів $G_{k^*}^0$ і $G_{k^*}^1$ може призвести до наступних висновків:

- жодна з цих підмножин не містить допустимі плани;
- допустимі плани містить лише одна з даних підмножин;
- допустимі плани містять обидві підмножини.

У будь-якому випадку після аналізу всі, що залишилися в полі розгляду підмножини варіантів заново перенумеровуються числами натурального ряду від 1 до λ (очевидно, число λ може змінюватися від ітерації до ітерації).

N.5 Перевірка умови закінчення обчислень

Реалізація алгоритму завершується в наступних випадках:

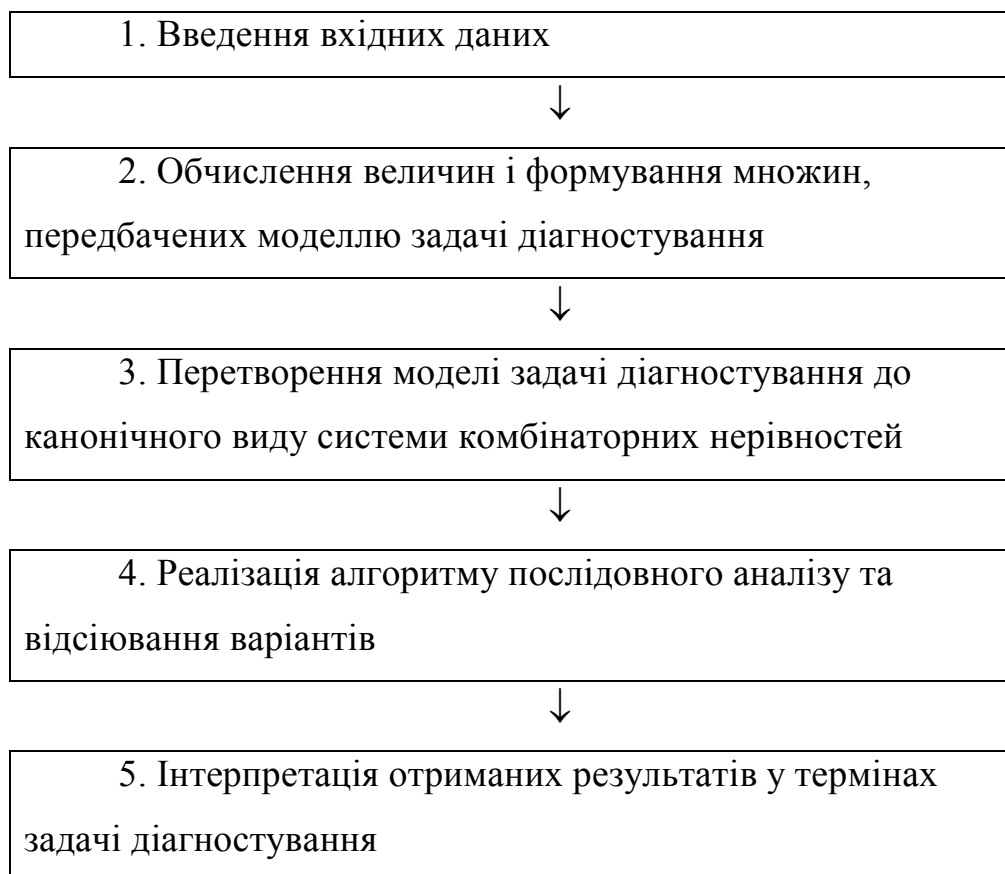
1) у полі розгляду не залишилося жодної підмножини варіантів ($\lambda = 0$), але допустимі плани не встановлено. Це свідчить про те, що завдання розв'язків не має.

2) не залишилося жодної підмножини варіантів, в яких зберігаються не зафіксовані змінні і при цьому знайдено хоча б один допустимий план:

$$(\forall k : 1 \leq k \leq \lambda)(I_k = \emptyset).$$

4.2.3. Метод розв'язання задачі діагностування на основі лінійної моделі

Метод розв'язання задачі діагностування включає наступні етапи [15]:



Вихідна модель:

$$\begin{cases} \sum_{\beta \in B^{(p)}} \sum_{\eta \in H_{\beta}^{(p)}} \sum_{l \in L_{\beta\eta}^{(p)}} [h_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l) - \xi_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l)] z_{\beta\eta l} \leq \delta_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l) \\ \sum_{\beta \in B^{(p)}} \sum_{\eta \in H_{\beta}^{(p)}} \sum_{l \in L_{\beta\eta}^{(p)}} [-h_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l) - \xi_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l)] z_{\beta\eta l} \leq -\delta_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l) \end{cases}; \quad (4.4)$$

$$p = \overline{1, u},$$

де $z_{\beta\eta l} \in \{0, 1\}$; $l = \overline{1, r}$; $\beta \in B_l$; $\eta \in H_{\beta l}$.

Примітка: щоб не було плутанини при перетворенні вихідної моделі до канонічної форми, в формулу (4.4) внесено наступні зміни в системі позначень:

| Попередній символ | Новий символ |
|-------------------|--------------|
| i | β |
| I | B |
| j | η |
| J | H |
| s | σ |
| k | l |
| K | L |
| λ | r |
| m | μ |
| x | z |

Канонічна форма:

$$\sum_{j \in J_i} a_{ij} x_j \leq b_i; i = \overline{1, m}, \quad (4.5)$$

де x – n -мірний вектор незалежних булевих змінних:

$$x = (x_j | j = \overline{1, n}); x_j \in \{0, 1\};$$

n – кількість незалежних змінних;

m – кількість нерівностей;

J_i – множина номерів незалежних змінних, що входять в i -у нерівність; $i = \overline{1, m}$;

a_{ij}, b_i – дійсні числа; $i = \overline{1, m}$; $j \in J_i$.

Підготовчий етап – перетворення вихідної моделі (4.4) до канонічної форми (4.5).

1. Перенумерувати змінні $z_{\beta\eta l} \in \{0, 1\}$; $l = \overline{1, r}$; $\beta \in B_l$; $\eta \in H_{\beta l}$ числами натурального ряду від 1 до n :

$$n = \sum_{l=1}^r \sum_{\beta \in B_l} |H_{\beta l}|.$$

Для цього будується відповідна таблиця.

Наприклад, для випадку: $r = 7$; $B_1 = \{1\}$; $B_2 = \{1, 2\}$; $B_3 = \{1, 2\}$; $B_4 = \{2\}$; $B_5 = \{2\}$; $B_6 = \{2\}$; $B_7 = \{2\}$; $H_{11} = \{2\}$; $H_{12} = \{2\}$; $H_{13} = \{2\}$; $H_{22} = \{4\}$; $H_{23} = \{7\}$; $H_{24} = \{4\}$; $H_{25} = \{7\}$; $H_{26} = \{4\}$; $H_{27} = \{7\}$;

| Трійка індексів β, η, l | Номер трійки i |
|-------------------------------------|------------------|
| 1, 2, 1 | 1 |
| 1, 2, 2 | 2 |
| 2, 4, 2 | 3 |
| 1, 2, 3 | 4 |
| 2, 7, 3 | 5 |
| 2, 4, 4 | 6 |
| 2, 7, 5 | 7 |
| 2, 4, 6 | 8 |
| 2, 7, 7 | 9 |

Номер трійки i надалі розглядається як індекс змінної x_i .

2. Перенумерувати нерівності системи (4.4) числами натурального ряду від 1 до $m = 2u$.

Оскільки система (4.5) складається з пар нерівностей, пропонується наступна нумерація нерівностей системи (4.4):

– спочатку числами від 1 до u нумеруються перші нерівності кожної пари:

$$\sum_{\beta \in B^{(p)}} \sum_{\eta \in H_{\beta}^{(p)}} \sum_{l \in L_{\beta\eta}^{(p)}} [h_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l) - \xi_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l)] z_{\beta\eta l} \leq \delta_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l);$$

– далі числами від $u + 1$ до m нумеруються другі нерівності кожної пари:

$$\sum_{\beta \in B^{(p)}} \sum_{\eta \in H_{\beta}^{(p)}} \sum_{l \in L_{\beta\eta}^{(p)}} [-h_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l) - \xi_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l)] z_{\beta\eta l} \leq -\delta_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l).$$

3. Визначити склад множин J_i , $i = \overline{1, m}$ системи (4.5).

Попередньо визначається множина трійок індексів змінних $z_{\beta\eta l}$; $l = \overline{1, r}$; $\beta \in B_l$; $\eta \in H_{\beta l}$, що входять в суму

$$\sum_{\beta \in B^{(p)}} \sum_{\eta \in H_{\beta}^{(p)}} \sum_{l \in L_{\beta\eta}^{(p)}} z_{\beta\eta l}.$$

Наприклад, при $B^{(p)} = \{1, 2\}$;

$$H_1^{(p)} = \{1, 2\}; H_2^{(p)} = \{3, 4, 5, 6, 7\};$$

$$L_{12}^{(p)} = \{1, 2, 3\}; L_{24}^{(p)} = \{2, 4, 6\}; L_{27}^{(p)} = \{3, 5, 7\};$$

$$\sum_{\beta \in B^{(p)}} \sum_{\eta \in H_{\beta}^{(p)}} \sum_{l \in L_{\beta\eta}^{(p)}} z_{\beta\eta l} = z_{121} + z_{122} + z_{123} + z_{242} + z_{244} + z_{246} + z_{273} + z_{275} + z_{277}.$$

Потім по наведеній вище таблиці встановлюється склад відповідної множини J_i :

$$J_i = \{1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8, 9\}.$$

4. Визначити коефіцієнти $a_{ij}; i = \overline{1, m}$; системи (4.5):

Для $i = \overline{1, u}$:

$$a_{ij} = h_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l) - \xi_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l);$$

$$a_{ij} = -h_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l) - \xi_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l).$$

5. Визначити вільні члени $b_i; i = \overline{1, m}$ системи (4.5):

Для $i = \overline{1, u}$:

$$b_i = \delta_p(\beta, c_{\beta\mu}, \sigma_l);$$

Для $i = \overline{1+u, m}$:

$$b_i = -\delta_p(\beta, c_{\beta\eta}, \sigma_l).$$

Опис канонічної форми (4.5).

У пам'яті ПК система (4.5) представляється наступним набором множин і векторів:

– сукупність $\{J_i; i = \overline{1, m}\}$ підмножин номерів незалежних змінних, що входять в кожну нерівність;

– сукупність $\{(a_{ij}; j \in J_i); i = \overline{1, m}\}$ векторів коефіцієнтів нерівностей системи;

– вектор $(b_i; i = \overline{1, m})$ правих частин нерівностей системи.

Необхідно передбачити також зберігання λ векторів часткових планів $x_k^C = (x_{kj}^C | j = \overline{1, n})$, $k = \overline{1, \lambda}$ підмножин варіантів, на які в процесі виконання завдання буде декомпонувати повна множина.

4.2.4. Метод розв'язання системи лінійних комбінаторних нерівностей (спрощений варіант).

0-й крок – аналіз повної множини варіантів G .

Умовні позначення:

$$J_i^2 = \{j \in J_i : a_{ij} < 0\};$$

$$J_i^3 = \{j \in J_i : a_{ij} > 0\};$$

$$s_i^{(2)} = \sum_{j \in J_i^2} a_{ij};$$

$$s_i^{(3)} = \sum_{j \in J_i^3} a_{ij};$$

$$a_{ij} = \min\{a_{ij}; j \in J_i^2\};$$

$$a_{ij} = \max\{a_{ij}; j \in J_i^3\}.$$

0.1 Послідовно для кожної i -ї ($i = \overline{1, m}$) нерівності системи (4.5) перевіряється умова:

$$(J_i^2 = \emptyset) \& (b_i < 0) \vee (J_i^2 \neq \emptyset) \& (s_i^{(2)} > b_i).$$

Якщо для будь-якої нерівності ця умова виконується, то процес завершується, оскільки задача допустимих розв'язків не має.

В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

0.2 Послідовно для кожної i -ї ($i = \overline{i, m}$) нерівності системи (4.5) перевіряється умова:

$$(J_i^3 = \emptyset) \& (b_i < 0) \vee (J_i^3 \neq \emptyset) \& (s_i^{(3)} > b_i).$$

Якщо для будь-якої нерівності i^* , $1 \leq i^* \leq m$, ця умова виконується, то така нерівність виключається з системи (4.5). При цьому її номер видаляється з множини номерів нерівностей системи:

$$I^* = \{i : 1 \leq i \leq m\} \setminus \{i^*\}.$$

Після цього переходимо до наступної нерівності.

Після розгляду всіх нерівностей переходимо до наступного пункту.

0.3 Послідовно для кожної i -го ($i \in I^*$) нерівності системи (4.5), в якій $J_i^2 \neq \emptyset$, перевіряється умова:

$$s_i^{(2)} \leq b_i < s_i^{(2)} - a_{ij'}$$

Якщо для будь-якого нерівності дана умова виконується, то змінній x_j присвоюється значення 1. Це значення підставляється в (залишившихся в полі розгляду) нерівності системи (4.5).

При цьому виконуються наступні дії:

а) номер змінної, якій присвоюється значення 1, виключається з підмножин J_i ; $i \in I^*$;

б) позиція вектора часткового плану $x^C = (x_j^C \mid j = \overline{1, n})$, відповідна цій змінній, заповнюється значенням 1;

в) коефіцієнт $a_{ij'}$ переноситься в ліву частину нерівності з протилежним знаком.

Після цього процедура аналізу повної множини варіантів повторюється, починаючи з пункту 0.1.

В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

0.4 Послідовно для кожної i -ї ($i \in I^*$) нерівності системи (4.5), в якій $J_i^3 \neq \emptyset$, перевіряється умова:

$$(J_i^2 = \emptyset) \& (0 \leq b_i < a_{ij'}) \vee (J_i^2 \neq \emptyset) \& (s_i^{(2)} \leq b_i < s_i^{(2)} + a_{ij'}).$$

Якщо для будь-якого нерівності дана умова виконується, то змінній x_j присвоюється значення 0. Це значення підставляються у всі (що залишилися в полі розгляду) нерівності системи (4.5).

При цьому виконуються наступні дії:

а) номер змінної, якій присвоюється значення 0, виключається з підмножин J_i ; $i \in I^*$;

б) позиція вектора часткового плану $x^C = (x_j^C | j = \overline{1, n})$, що відповідає цій змінній, заповнюється значенням 0.

Після цього процедура аналізу повної множини варіантів повторюється, починаючи з пункту 0.1.

Процедура аналізу повної множини варіантів завершується в наступних випадках:

1) якщо для будь-якої нерівності системи (4.5) виконується умова пункту 0.1 (задача розв'язків не має);

2) якщо для всіх нерівностей системи (4.5) виконується умова пункту 0.2 і, отже, $I^* = \emptyset$ (системі задовольняє будь-який набір значень шуканих змінних);

3) знайдений один або кілька повних планів і при цьому $I^* = \emptyset$ (розв'язок або всі можливі розв'язки знайдено);

4) в останньому циклі аналізу повної множини варіантів жодній зі змінних не присвоєно фіксоване значення.

N-й крок ($N = 1, 2, \dots$)

Передбачається, що до моменту початку реалізації N-го кроку в полі розгляду знаходяться λ підмножин варіантів G_k , $k = \overline{1, \lambda}$, кожна з яких характеризується частковим планом $x_k^C = (x_{kj}^C | j = \overline{1, n})$.

Умовні позначення:

J_k^0 і J_k^1 – множини номерів незалежних змінних, які отримали в планах k-ї підмножини варіантів значення 0 і 1 відповідно; $k = \overline{1, \lambda}$;

J_k – сукупність номерів змінних, значення яких в G_k не зафіксовані; $k = \overline{1, \lambda}$;

$$J_{ik} = J_i \cap J_k; J_{ik}^1 = J_i \cap J_k^1;$$

I_k – сукупність номерів обмежень, активних по відношенню до планів підмножини G_k ; $I_k \subseteq \{1, 2, \dots, m\}$;

$$J_{ik}^2 = \{j \in J_{ik} : a_{ij} < 0\};$$

$$J_{ik}^3 = \{j \in J_{ik} : a_{ij} > 0\};$$

$$s_{ik}^{(2)} = \sum_{j \in J_{ik}^2} a_{ij};$$

$$s_{ik}^{(3)} = \sum_{j \in J_{ik}^3} a_{ij};$$

$$a_{ij'} = \min\{a_{ij}; j \in J_{ik}^2\};$$

$$a_{ij''} = \max\{a_{ij}; j \in J_{ik}^3\}.$$

Система нерівностей (4.5), приведена у відповідність k -й підмножині варіантів шляхом підстановки в неї часткового плану даної підмножини:

$$\sum_{j \in J_{ik}} a_{ij} x_j \leq b_{ik}; \quad i \in I_k; \quad (4.6)$$

$$x_j \in \{0, 1\} \quad j \in J_k,$$

де

$$b_{ik} = b_i - \sum_{j \in J_{ik}^1} a_{ij}; \quad i \in I_k.$$

N.1 Вибір підмножини варіантів, що підлягає розбиттю

Для подальшого розбиття обирається підмножина G_{k^*} , якій відповідає частковий план максимальної довжини:

$$|J_{k^*}^0 \cup J_{k^*}^1| = \max\{|J_k^0 \cup J_k^1|; k = \overline{1, \lambda}\}.$$

N.2 Вибір незалежної змінної, значення якої підлягають фіксації

Для фіксації значень вибирається змінна x_{j^*} , $j^* \in J_{k^*}$, яка входить в i^* -у нерівність ($i^* \in I_{k^*}$) системи (4.6) з максимальним по модулю коефіцієнтом:

$$|a_{i^*j^*}| = \max\{|a_{ij}|; i \in I_{k^*}; j \in J_{k^*}\}.$$

N.3 Розбиття підмножини варіантів G_{k^*}

Шляхом фіксації значень обраної змінної x_{i^*} підмножина G_{k^*} розбивається на дві непересічні підмножини: $G_{k^*}^0$ і $G_{k^*}^1$.

В частковий план першої з них в позицію номер i^* заноситься 0, а в частковий план другої в таку ж позицію записується 1.

Ці значення змінної x_{i^*} по чергово підставляються в систему (4.6), в результаті чого отримують дві різні системи нерівностей.

ПРИМІТКИ.

1. Зберігати в пам'яті ПК опис всіх часткових систем нерівностей форми (4.6) видається недоцільним. Досить зберігати опис загальної системи (4.5) і часткові плани всіх підмножин варіантів. При необхідності частковий план підставляється в загальну форму (4.5) і після відповідних перетворень ми отримаємо цікаву для нас частну систему.

2. Коли ми говоримо «значення змінної підставляється в систему», то під цим слід розуміти коригування складу множин $(J_k^0, J_k^1, J_k, J_{ik}^1, J_{ik})$ і вектора вільних членів (b_{ik}) , що описують систему.

N.4 Аналіз підмножин $G_{k^*}^0$ і $G_{k^*}^1$

Аналіз знову отриманих підмножин варіантів $G_{k^*}^0$ і $G_{k^*}^1$ здійснюється по чергово згідно з наступною процедурою, викладеною для деякої умовної підмножини G_k .

Н.4.1 Послідовно для кожної i -ї ($i \in I_k$) нерівності системи (4.6) перевіряється умова:

$$(J_{ik}^2 = \emptyset) \& (b_{ik} < 0) \vee (J_{ik}^2 \neq \emptyset) \& (s_{ik}^{(2)} > b_{ik}).$$

Якщо для будь-якої нерівності ця умова виконується, то процес завершується, оскільки аналізована підмножина допустимих планів не містить.

В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

Н.4.2 Послідовно для кожної i -ї ($i \in I_k$) нерівності системи (4.6) перевіряється умова:

$$(J_{ik}^3 = \emptyset) \& (b_{ik} \geq 0) \vee (J_{ik}^2 \neq \emptyset) \& (s_{ik}^{(3)} > b_{ik}).$$

Якщо для будь-якої нерівності $i^* \in I_k$ ця умова виконується, то така нерівність виключається із системи (4.6). При цьому його номер видаляється з множини номерів нерівностей системи:

$$I_k^* = I_k \setminus \{i^*\}.$$

Після цього переходимо до наступної нерівності.

Після розгляду всіх нерівностей переходимо до наступного пункту.

Н.4.3 Послідовно для кожної i -ї ($i \in I_k^*$) нерівності системи (4.6), в якій $J_{ik}^2 \neq \emptyset$, перевіряється умова:

$$s_{ik}^{(2)} \leq b_{ik} < s_{ik}^{(2)} - a_{ij}.$$

Якщо для будь-якої нерівності дана умова виконується, то змінній x_j присвоюється значення 1. Це значення підставляється в (залишилися в полі розгляду) нерівності системи (4.6).

При цьому виконуються наступні дії:

а) номер змінної, якій присвоюється значення 1, виключається з підмножин J_{ik} ; $i \in I_k^*$;

б) позиція вектора часткового плану $x_k^C = (x_{kj}^C | j = \overline{1, n})$, відповідна цій змінній, заповнюється значенням 1;

в) коефіцієнт $a_{ij'}$ переноситься в ліву частину нерівності з протилежним знаком.

Після цього процедура аналізу повної множини варіантів повторюється, починаючи з пункту 0.1.

В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

Після цього процедура аналізу k -ї підмножини варіантів повторюється, починаючи з пункту N.4.1.

В іншому випадку переходимо до наступного пункту.

N.4.4 Послідовно для кожної i -ї ($i \in I_k^*$) нерівності системи (4.6), в якій $J_{ik}^3 \neq \emptyset$, перевіряється умова:

$$(J_{ik}^2 = \emptyset) \& (0 \leq b_{ik} < a_{ij'}) \vee (J_{ik}^2 \neq \emptyset) \& (s_{ik}^{(2)} \leq b_{ik} < s_{ik}^{(2)} + a_{ij'}).$$

Якщо для будь-якої нерівності дана умова виконується, то змінній $x_{j'}$ присвоюється значення 0. Це значення підставляється в (залишилися в полі розгляду) нерівності системи (4.6).

При цьому виконуються наступні дії:

а) номер змінної, якій присвоюється значення 0, виключається з підмножин J_{ik} ; $i \in I_k^*$;

б) позиція вектора часткового плану $x_k^C = (x_{kj}^C | j = \overline{1, n})$, відповідна цій змінній, заповнюється значенням 0.

Після цього процедура аналізу k -ї підмножини варіантів повторюється, починаючи з пункту N.4.1.

Процедура аналізу k -ї підмножини варіантів завершується в наступних випадках:

1) якщо для будь-якої нерівності системи (4.6) виконується умова пункту N.4.1 (аналізована підмножина допустимих планів не містить);

2) якщо для всіх нерівностей системи (4.6) виконується умова пункту N.4.2 і, отже, $I_k^* = \emptyset$ (системі задовольняє будь-який доповнюючий план даної підмножини варіантів);

3) знайдений один або кілька повних планів і при цьому $I_k^* = \emptyset$;

4) в останньому циклі аналізу k -ї множини варіантів жодній зі змінних не присвоєно фіксоване значення.

Аналіз підмножин варіантів $G_{k^*}^0$ і $G_{k^*}^1$ може призвести до наступних висновків:

- жодна з цих підмножин не містить допустимі плани;
- допустимі плани містить лише одна з даних підмножин;
- допустимі плани містять обидві підмножини.

У будь-якому випадку після аналізу всі, що залишилися в полі розгляду підмножини варіантів заново перенумеровуються числами натурального ряду від 1 до λ (очевидно, число λ може змінюватись від ітерації до ітерації).

N.5 Перевірка умов завершення обчислень

Реалізація алгоритму завершується в наступних випадках:

1) у поле розгляду не залишилося жодної підмножини варіантів ($\lambda = 0$), але допустимі плани не встановлені. Це свідчить про те, що задача розв'язків не має.

2) не залишилося жодної підмножини варіантів, в яких зберігаються зафіксовані змінні і при цьому знайдено хоча б один допустимий план:

$$(\forall k : 1 \leq k \leq \lambda)(J_k = \emptyset).$$

4.2.5. Структура бази даних та бази знань ЕСДТОБС

У зв'язку з розвитком комп'ютерної техніки експлуатаційний персонал усе більше уваги приділяє до технологій оперативної діагностики,

які швидко почали розвиватися в останні роки. Далеко не усі новітні технології пропонуються для впровадження на складних технічних об'єктах у країнах Європи та США настільки активно, як експертні системи.

Експертні системи призначені для моделювання або імітації поведінки досвідчених фахівців-експертів при вирішенні завдань з якого-небудь вузького питання. Таким чином, експертні системи являють собою комп'ютерні програми, що трансформують досвід експертів в якій-небудь галузі знань у форму евристичних правил. В експертних системах ми маємо справу з використанням такого компонента інформаційних технологій як бази знань, яка містить факти, що описують проблемну область, а також логічний взаємозв'язок цих фактів [55, 61-62].

Експертна система повинна бути заснована на використанні бази даних, бази знань і правил та інформації від систем збору.

База даних розробленої ЕСДТОБС представлена наступними таблицями [12]:

Таблиця 4.1

Рівні ТОБС

| № | Назва рівня |
|-------|-------------------------------|
| 1 | <i>Level1</i> |
| 2 | <i>Level2</i> |
| ... | |
| μ | <i>Level μ</i> |

μ – кількість рівнів досліджуваного багаторівневого об'єкта.

Таблиця 4.2

Підсистеми ТОБС

| № | Назва підсистеми |
|---|-------------------|
| 1 | <i>Subsystem1</i> |

| № | Назва підсистеми |
|----------|--------------------|
| 2 | <i>Subsystem2</i> |
| ... | |
| <i>m</i> | <i>Subsystem m</i> |

m – кількість підсистем всього в складному технічному об'єкті.

Таблиця 4.3

Перелік несправностей ТОВС

| № | Назва несправності |
|----------|--------------------|
| 1 | <i>Damage1</i> |
| 2 | <i>Damage2</i> |
| ... | |
| <i>n</i> | <i>Damage n</i> |

n – кількість видів відмов всього можливих в системі.

Таблиця 4.4

Характеристики ТОВС

| № | Назва характеристики | Допустиме відхилення | Розузгодження |
|----------|----------------------|----------------------|---------------|
| 1 | <i>Value1</i> | 0,01 | 0,001 |
| 2 | <i>Value2</i> | 0,005 | 0,0001 |
| ... | | | |
| <i>u</i> | <i>Value u</i> | 0,01 | 0,001 |

u – кількість характеристик всього;

У базі знань знаходяться файли (таблиці), в яких зберігаються таблиці рішень, в них взаємопов'язані умови оцінки, правила, що описують можливі стани та необхідні дії персоналу. Програмна складова експертної системи

повинна обробляти інформацію від датчиків та інформацію з бази даних і знань і формувати рекомендації оперативному персоналу.

Оснoву розробленої ЕС складає підсистема логічного виведення, яка використовує інформацію з бази знань (БЗ) та бази даних (БД), генерує рекомендації за розв'язком поставленого завдання. Її мета – узгоджена обробка даних з об'єктами зовнішнього середовища. При цьому використовується БЗ для отримання кінцевого результату. Під зовнішнім середовищем розуміється технічна система, інформацію про яку ЕС отримує через датчики або операторів. У результаті висуваються і перевіряються гіпотези, виробляються нові дані, формуються запити на введення нових даних, формуються рішення, що носять рекомендаційний або такий, що управляє характер [63-66].

База знань містить факти, що описують проблемну область, а також логічний взаємозв'язок цих фактів. Таким чином, розроблена система управління базою знань може бути представлена наступною структурною схемою (рис. 4.6).

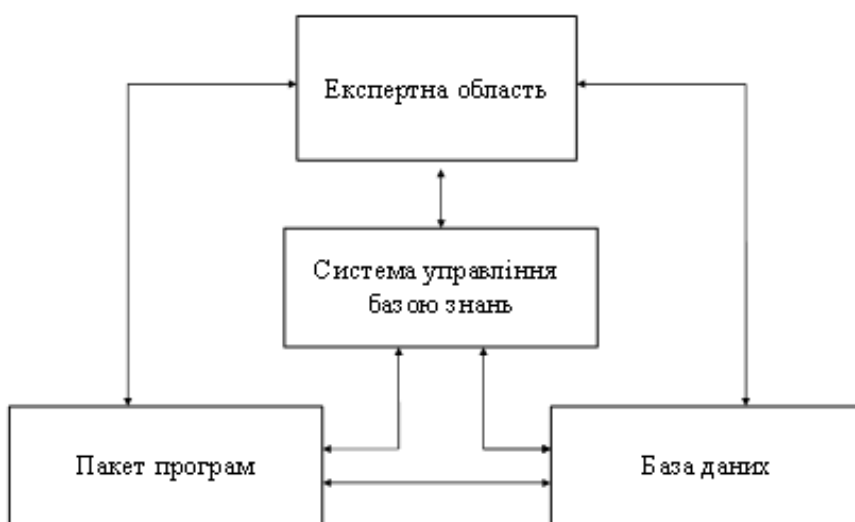


Рис. 4.6. Структурна схема системи управління БЗ

В даній роботі пропонується підхід, що реалізує завдання поділу інформації, що збережена в загальній базі даних і безпосередньо в базі

знань (набір таблиць рішень). Це універсальний підхід для створення систем діагностування будь-якого об'єкта.

Для реалізації цього підходу пропонується використання зв'язуючих змінних (таблиць зв'язку). За допомогою цих таблиць зв'язку буде здійснюватись зв'язок змінної з бази знань з даними що зберігаються в загальній базі даних по обладнанню та його експлуатації, а також здійснюється зв'язок з набором універсальних змінних, які будуть використовуватись в програмному середовищі. Універсальні змінні будуть зарезервовані в програмному середовищі для характеристики контрольованих параметрів і станів досліджуваного об'єкта. На рис. 4.7. відображено структуру БД ЕСДТОБС [12].

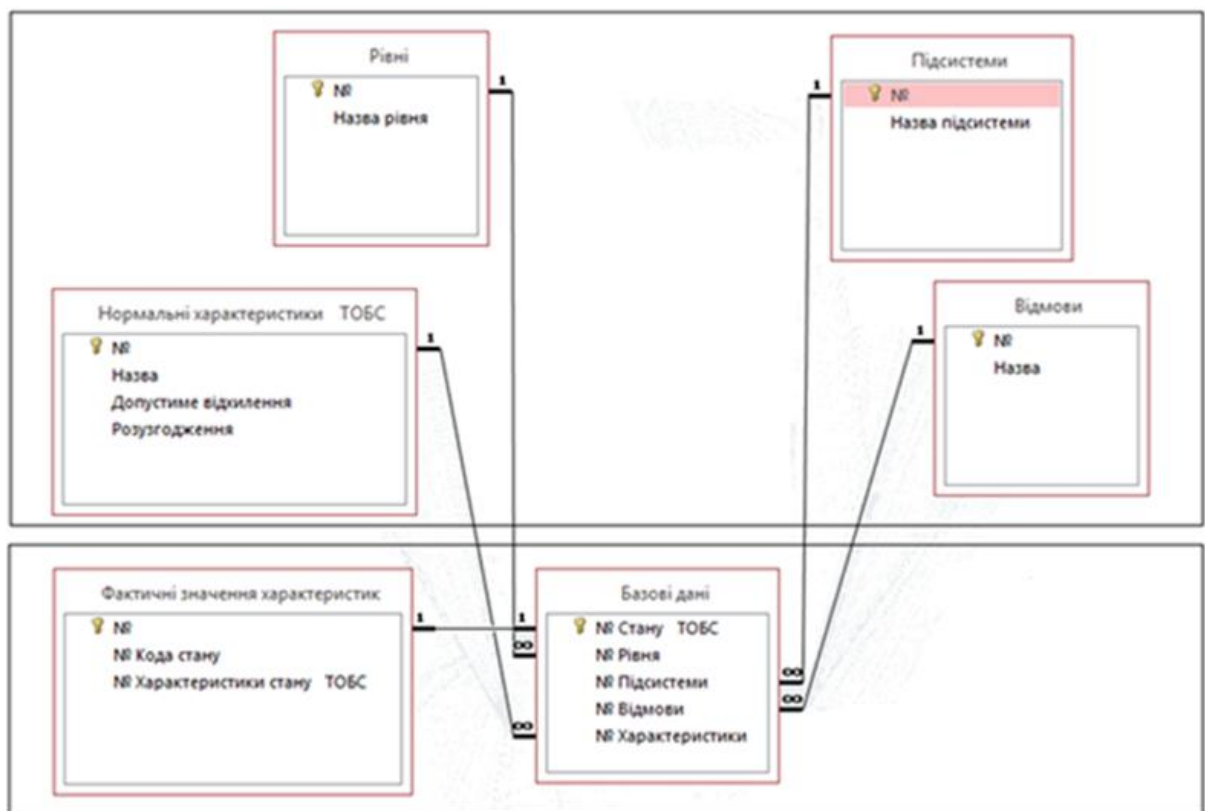


Рис. 4.7. БД ЕСДТОБС

Одним із складних завдань побудови ЕС є побудова бази знань системи і її заповнення. Ці два етапи взаємонаправлені, можливе

повернення з другого етапу на перший, у зв'язку з тим, що отримані знання від експерта не укладаються в рамки первинної БЗ.

Ведення бази знань зв'язано з використанням таблиць рішень, ідентифікаторів, що описують датчики, табло, реле-показчики і властивості об'єкта й систем. Підтримка цілісності бази знань, підвищення ефективності керування базою, зниження імовірності внесення помилки персоналом є необхідними вимогами до роботи інтерфейсу ведення бази знань, та бази даних.

Сукупність виразів (2.2) утворює базу знань експертної системи діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою [11].

Для функціонування інтелектуальної експертної системи вимагаються наступні знання:

1. Знання про процес рішення задачі (знання, що управляють, використовувані інтерпретатором).
2. Знання про мову спілкування і способи організації діалогу, використовувані лінгвістичним процесором.
3. Знання про способи представлення і модифікації знання, що використовують компоненти придбання знань.
4. Підтримувальні структурні знання, використовувані пояснювальною компонентою.

Підсистема пояснення рішення служить в ЕС для пояснення користувачеві логічних дій системи, тобто для забезпечення прозорості ЕС. Підсистема пояснення рішення забезпечує у будь-який момент часу:

- повну видачу даних про поточний стан системи;
- по запиті користувача повідомляє результати раніше виконаних дій.

Редактор знань (РЗ). Призначений для допомоги інженерові по знаннях при заповненні БЗ в процесі роботи з експертами. БЗ – це файлова система, і РЗ представляє транслятор з деякої підмножини природної мови, використовуваної інженером по знаннях, в спеціальний код, орієнтований на підсистему логічного виведення.

Редактор знань реалізує будь-яку структуру знань, передбачену складом БЗ; дозволяє коригувати елементи БЗ без зміни структури; забезпечує "дружній інтерфейс" з інженером по знаннях.

База знань розробленої в даній роботі ЕСДТОБС складається з фактів і правил (якщо <посилка> то <заклучення>). Якщо ЕС визначає, що посилка вірна, то правило визнається відповідним для цієї консультації і воно запускається в дію. Запуск правила означає прийняття заклучення цього правила як складової частини процесу консультації [11].

Кожній таблиці розв'язків відповідає чотири файли бази знань (рис. 4.8).

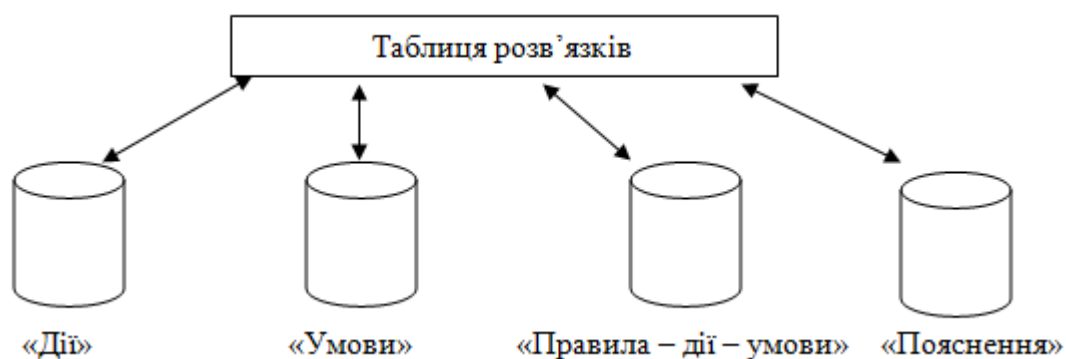


Рис. 4.8 – Схема бази знань ЕСДТОБС

У таблицях 1 і 2 описані структури запису відносин БЗ, що відповідають таблицям розв'язків.

Кількість записів у файлі «Умови» дорівнює числу полів кодів умов, що містять значення логічних виразів умов, у файлі «Правила - дії - умови».

Кількість записів у файлі «Дії» дорівнює кількості записів у файлі «Правила - дії - умови».

Таблиця 4.5

Структура запису відносин «Дії»

| Пояснення для поля запису | Ім'я поля | Тип поля | Довжина | Точність |
|---------------------------|-----------|----------|---------|----------|
| Код дії | K_D | C | 2 | |

| Пояснення для поля запису | Ім'я поля | Тип поля | Довжина | Точність |
|---------------------------|-----------|----------|---------|----------|
| Ознака дії | P_D | C | 2 | |
| Причина дії | I_D | C | 60 | |

Таблиця 4.6

Структура запису відносин «Умови»

| Пояснення для поля запису | Ім'я поля | Тип поля | Довжина | Точність |
|------------------------------|-----------|----------|---------|----------|
| Код умови | K_U | C | 2 | |
| Логічний вираз (зміст умови) | S_U | C | 65 | |

Таблиця 4.7

Структура запису відносин «Правила - дії - умови»

| Пояснення для поля запису | Ім'я поля | Тип поля | Довжина | Точність |
|---------------------------|-----------|----------|---------|----------|
| Код правила | Pr | C | 2 | |
| Код умови 1 | U1 | C | 2 | |
| Код умови 2 | U2 | C | 2 | |
| | | | | |
| Код умови n | Un | C | 2 | |

На рис. 4.9 показано зв'язок відносин, які відповідають таблиці розв'язків.



Рис. 4.9. Схема зв'язків відносин бази знань ЕСДТОБС

Розроблена ЕСДТОБС призначена для виявлення несправностей (комбінацій несправностей) в технічному об'єкті з багаторівневою структурою в умовах накладення їх наслідків. В програмі поєднані як вхідні, так і довідкові дані. До вхідних даних відносяться відхилення характеристик стану ТОБС, до довідкових даних – назви відмов, що можуть виникати в ТОБС, місця виникнення відмов, а також загальний перелік характеристик стану ТОБС.

Під інтерфейсом користувача в даній системі мається на увазі комплекс програм, який реалізує діалог користувача з експертною системою, як на стадії введення, так і отримання результатів, а інтелектуальний редактор бази знань – це програма, яка дає можливість експерту створювати базу знань в режимі діалогу.

Крім традиційного джерела інформації – знань експерта, можуть бути й інші джерела, а саме інформація про обладнання (дані довідника). Тому структура експертної системи діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою може мати більш складний характер з множиною різних джерел інформації і розв'язків.

4.3. Програмне забезпечення інформаційної технології діагностування складних технічних об'єктів з багаторівневою структурою.

Для роботи програмної системи використовується віртуальний сервер *NGINX* та РСУБД *MySQL*. Запуск програми здійснюється за допомогою веб-браузера або терміналу консолі з використанням команди *<php >*.

У головному вікні програми користувач має можливість ознайомитись зі змістом бази даних (рис. 4.10) [4].

| Data Base | | | | | | | | | |
|-----------|--------|------------|------------|---------|---------|---------------|--------|---------------------|----------|
| Levels | | Subsystems | | Damages | | Normal values | | | |
| id | Name | id | Name | id | Name | id | Name | Allowable Deviation | Mismatch |
| 1 | Level1 | 1 | Subsystem1 | 1 | Damage1 | 1 | Value1 | 0,3 | 0,1 |
| 2 | Level2 | 2 | Subsystem2 | 2 | Damage2 | 2 | Value2 | 0,4 | 0,1 |
| | | 3 | Subsystem3 | 3 | Damage3 | 3 | Value3 | 0,1 | 0,1 |
| | | 4 | Subsystem4 | 4 | Damage4 | 4 | Value4 | 0,5 | 0,1 |
| | | 5 | Subsystem5 | 5 | Damage5 | 5 | Value5 | 0,2 | 0,1 |
| | | 6 | Subsystem6 | 6 | Damage6 | 6 | Value6 | 0,7 | 0,1 |
| | | 7 | Subsystem7 | 7 | Damage7 | 7 | Value7 | 0,6 | 0,1 |

Рис. 4.10. Фрагмент бази даних

База даних складається з чотирьох таблиць, які описують можливі рівні системи, підсистеми, несправності та характеристики стану системи. Для того щоб додати новий запис до даних таблиць необхідно записати дану інформацію в відповідне до таблиці поле введення та натиснути кнопку «Додати».

Структура бази знань формується під час заповнення бази даних (записів таблиці «Normal values»). Фрагмент бази знань зображено на рис.

4.11 та рис. 4.12.

| Knowledge Base | | | | | | | | | | | | | | | | |
|----------------|-------|-----------|--------|----------|---------------|-----------------|----------|---------------|-----------------|----------|---------------|-----------------|----------|---------------|-----------------|--|
| Base data | | | | | | | | | | | | | | | | |
| id | Level | Subsystem | Damage | z1 value | z1 mismatchUp | z1 mismatchDown | z2 value | z2 mismatchUp | z2 mismatchDown | z3 value | z3 mismatchUp | z3 mismatchDown | z4 value | z4 mismatchUp | z4 mismatchDown | |
| 1 | 1 | 2 | 1 | -0,4 | 0,01 | -0,01 | 0,4 | 0,01 | -0,01 | 0,2 | 0,01 | -0,01 | 0,4 | 0,01 | -0,01 | |
| 2 | 1 | 2 | 2 | 0,3 | 0,01 | -0,01 | 0,5 | 0,01 | -0,01 | 0,3 | 0,01 | -0,01 | 0,7 | 0,01 | -0,01 | |
| 3 | 1 | 2 | 3 | 0,45 | 0,01 | -0,01 | -0,7 | 0,01 | -0,01 | 0,1 | 0,01 | -0,01 | 0,5 | 0,01 | -0,01 | |
| 4 | 2 | 4 | 2 | -0,29 | 0,01 | -0,01 | 0,1 | 0,01 | -0,01 | -0,1 | 0,01 | -0,01 | 0,8 | 0,01 | -0,01 | |
| 5 | 2 | 4 | 4 | 0,5 | 0,01 | -0,01 | -0,2 | 0,01 | -0,01 | 0,6 | 0,01 | -0,01 | 0,2 | 0,01 | -0,01 | |
| 6 | 2 | 4 | 6 | 0,4 | 0,01 | -0,01 | 0,25 | 0,01 | -0,01 | 0,7 | 0,01 | -0,01 | 0,1 | 0,01 | -0,01 | |
| 7 | 2 | 7 | 3 | 0,31 | 0,01 | -0,01 | -0,9 | 0,01 | -0,01 | 0,1 | 0,01 | -0,01 | 0,2 | 0,01 | -0,01 | |
| 8 | 2 | 7 | 5 | 0,6 | 0,01 | -0,01 | 0,4 | 0,01 | -0,01 | 0,3 | 0,01 | -0,01 | 0,6 | 0,01 | -0,01 | |
| 9 | 2 | 7 | 7 | 0,8 | 0,01 | -0,01 | 0,7 | 0,01 | -0,01 | 0,2 | 0,01 | -0,01 | 0,5 | 0,01 | -0,01 | |

| | | | | |
|-----------|-----------------|-----------------|-----------------|-----------------|
| Level | z1 value | z2 value | z3 value | z4 value |
| Subsystem | z1 mismatchUp | z2 mismatchUp | z3 mismatchUp | z4 mismatchUp |
| Damage | z1 mismatchDown | z2 mismatchDown | z3 mismatchDown | z4 mismatchDown |

Рис. 4.11. Фрагмент бази знань

Для того щоб експерт мав можливість додати новий запис в таблицю «Базові дані» йому необхідно у відповідні поля ввести номери рівня, підсистеми та несправності та у згенеровані поля для опису характеристик стану ввести їх значення та натиснути кнопку «Додати».

Для того щоб експерт мав можливість додати новий запис та сформувати причинно-наслідковий зв'язок між елементами системи потрібно сформувати комбінації можливих несправностей в системі за допомогою випадального списку та кнопок логічного зв'язку «AND» та «OR» та натиснути кнопку «Ввести».

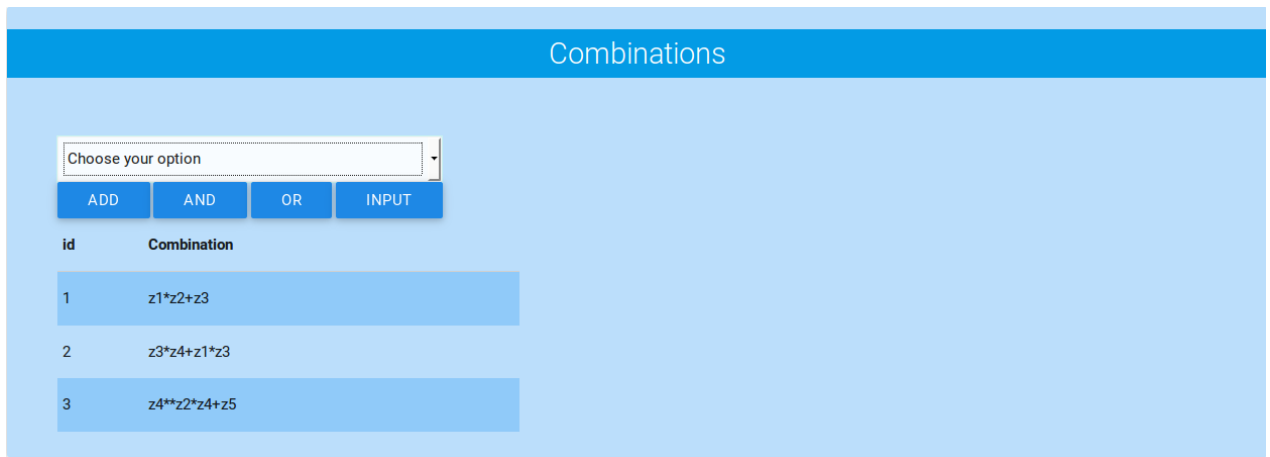


Рис. 4.12. База знань, введення комбінацій характеристик

Для початку процесу діагностування необхідно ввести значення характеристик стану, які отримані в ході практичної експлуатації об'єкта на момент діагностування та натиснути кнопку «Solve». Форма введення даних зображена на рис. 4.13.

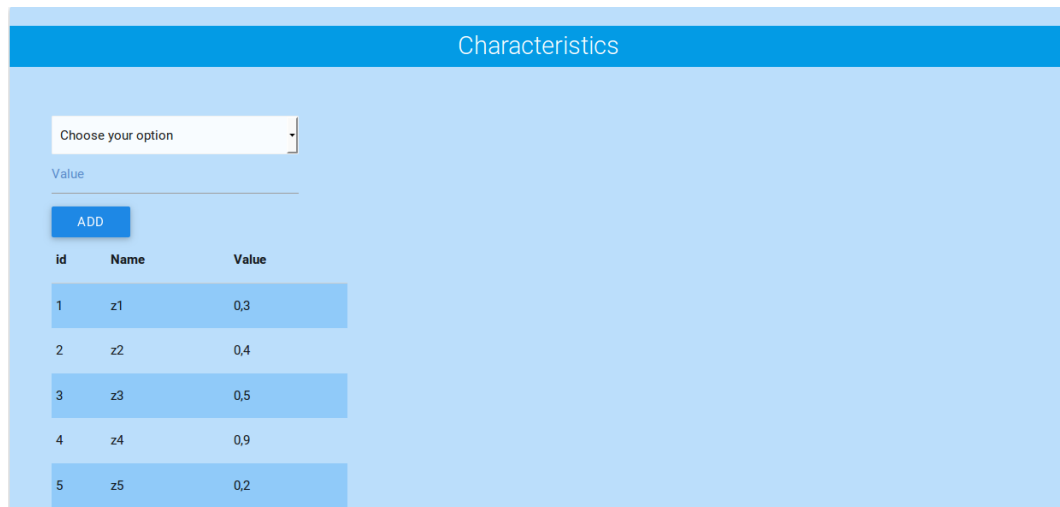


Рисунок 4.13. Форма введення значень характеристик

Як результат роботи модуля отримуємо вікно системи, яке відображає наступні параметри: номер рівня, номер підсистеми та види несправностей, які відбулись в системі на момент діагностування.

Форма результатів роботи програми показана на рис. 4.14.

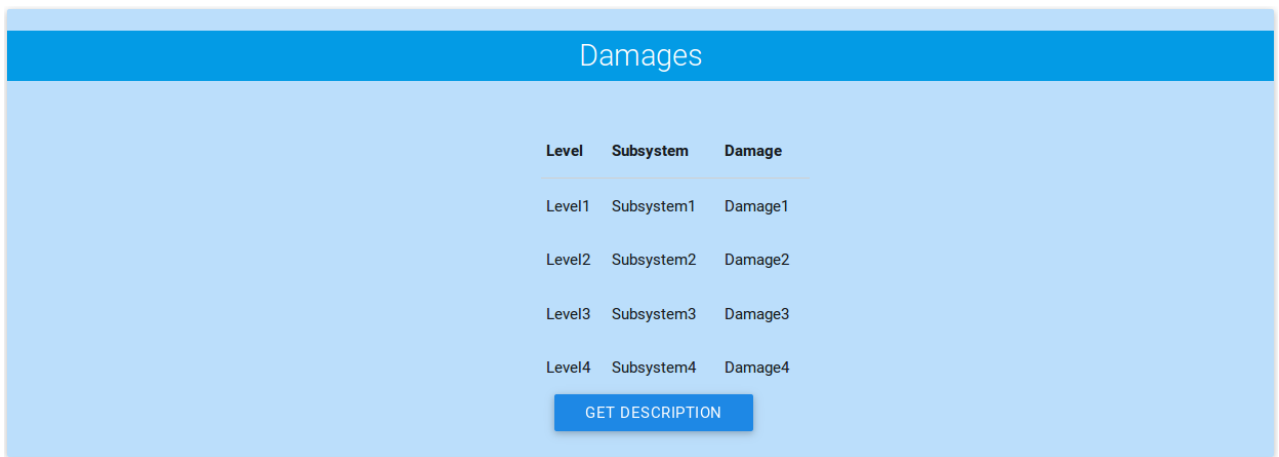


Рис. 4.14. Форма результатів роботи програми, виявлення несправностей

Якщо всі введені значення характеристик стану знаходяться в допустимих межах, то об'єкт є в нормальному робочому стані, про що повідомляє попередження в системі яке відображено на рисунку рис. 4.15.

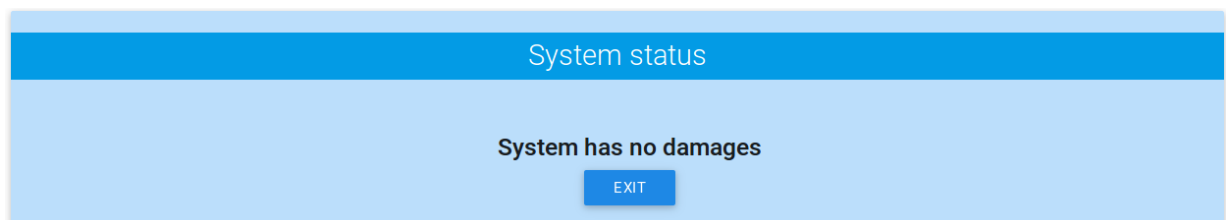


Рисунок 4.15. Вікно попередження про відсутність несправностей

Отримати розгорнуте пояснення можна натиснувши кнопку «GET DESCRIPTION».

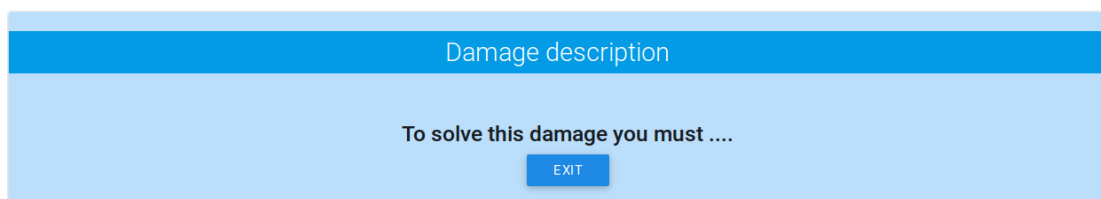


Рисунок 4.16. Вікно рекомендацій

Розроблена ЕСДТОБС призначена для виявлення несправностей (комбінацій несправностей) в технічному об'єкті з багаторівневою структурою. В програмі поєднані як вхідні так і довідкові дані. До вхідних даних відносяться відхилення характеристик стану ТОБС, до довідкових даних – назви несправностей, що можуть виникати в ТОБС, місця виникнення несправностей, а також загальний перелік характеристик стану ТОБС.

Під інтерфейсом користувача в даній системі мається на увазі комплекс програм, який реалізує діалог користувача з експертною системою, як на стадії введення, так і отримання результатів, а інтелектуальний редактор бази знань – це програма, яка дає можливість експерту створювати базу знань в режимі діалогу. Крім традиційного джерела інформації – знань експерта, можуть бути й інші джерела, а саме інформація про обладнання (дані довідника). Тому структура експертної системи діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою може мати більш складний характер з множиною різних джерел інформації і розв'язків.

4.4. Висновки до четвертого розділу

1. 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.

2. 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.

3. 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.

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 інформаційна система до бази знань 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.

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.

Основні результати дисертаційної роботи, представлені в розділі 4, опубліковані в працях автора [1-16].

Список використаних джерел до четвертого розділу

1. Н. Марченко, В. Нечипорук, О. Нечипорук, Ю. Пепа, Методи оцінювання точності інформаційно-вимірювальних систем діагностики. *Монографія. Київ: «Задруга», 2014, 200 с.*
2. 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.
3. 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.
4. 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.
5. 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.*, София, Болгария, 2014, Т. 12, С. 3-5.
6. 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.
7. 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, 2014Б.

8. О. Нечипорук, Б. Масловський, «Функціональні завдання при моделюванні складних систем», *Інтелектуальні технології лінгвістичного аналізу: Міжнар. наук.-техн. конф.*, Київ, 2014. – С. 35.
9. О. Нечипорук, В. Лейких, В. Сігаєв, «Проектування експертних систем діагностування технічного об'єкта з багаторівневою структурою», *Динамика современной науки: Междун. науч.-практ. конф.*, Софія, Болгарія, 2015, Т. 5, С. 34-35.
10. О. Нечипорук, В. Лейких, В. Сігаєв, «Методи прийняття рішень в експертних системах», *Прикладные научные разработки: Междун. науч.-практ. конф.*, Прага, Чешская Республіка, 2015, Т. 5, С. 49-51.
11. 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.
12. О. Нечипорук, Н. Тисько, В. Лейких, та ін., «Розробка бази даних експертної системи діагностування багаторівневих технічних об'єктів», *Наука: теория и практика: XI Междун. науч.-практ. конф.*, Перемишль, Республіка Польща, 2015, Т. 7, С. 31-33.
13. 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.
14. 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.
15. 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.

16. О. Литвиненко, О. Нечипорук, Логіко-математичні методи діагностування складних систем. *Монографія*. Київ: «Артмедіа принт», 2016, 166 с.

17. Д. Батищев, Поисковые методы оптимального проектирования. *Москва: «Сов. Радио»*, 1975, 216 с.

18. Д. Батищев, Методы оптимального проектирования. *Москва: «Радио и связь»*, 1984, 248 с.

19. В. Давиденко, В. Курейчик, Генетический алгоритм для трассировки двухслойных каналов, *Автоматизация проектирования*, №1, 1999.

20. A. Watson, T. McCabe, Structured Testing: A Testing Methodology Using the Cyclomatic Complexity Metric. *NIST Special Publication 500235*, Ed. By Wallace D.R. Gaithersburg, National Institute of Standards and Technology, 1996, 123 p.

21. Ю. Гаранин, В. Сагунов, «Минимизация числа точек съема диагностической информации», *Системы обработки информации и управления*, С. 44-45, 1997.

22. В. Сагунов, М. Бушуева, Э. Соколова, «О поиске кратных ошибок в программных модулях», *Контроль и диагностика*, №8, С. 11-13, 2001.

23. В. Сагунов, Э. Соколова, «Автоматизированный алгоритм тестирования программных модулей выделением полного состава базовых структур графа программы», *Информационные системы и технологии: Всероссийская научно-техн. конф., Н.Новгород*, 2002, С.102-103.

24. Э. Соколова, Д. Дмитриев, «Обнаружение дефектов в процессе проектирования и эксплуатации программ», *Успехи современного естествознания*, №2, С. 74-76, 2004.

25. В. Промыслов, А. Антонов, С. Масолкин и др., «Оценка надежности программного обеспечения на различных этапах жизненного цикла сложных программ», *Идентификация систем и задачи управления (SICPRO): Труды V Междунар. конф.*, Москва, 2006, С. 1300-1304.
26. В. Липаев, Надежность программных средств. *Москва: «Синтез»*, 1998.
27. Software maintenance. *Standard IEEE 1219-1998*.
28. Software for computers in the safety systems of nuclear power stations. *IEC 60880 Ed. 1.0 b: 1986*.
29. Reference information for software verification and validation process. *NIST 500-234 1996*.
30. М. Згуровский, Н. Панкратова, Основы системного анализа. – *Київ: «Видавнична група BHV»*, 2007, 544 с.
31. E. Henley, H. Kumamoto, Reliability Engineering and Risk Assessment, *Prentice-Hall*, New York, 1982.
32. Л. Мироновский, Функциональное диагностирование динамических систем. *Москва*, 1998, 256 с.
33. И.Рябинин, Надежность и безопасность структурно-сложных систем. *Санкт Петербург: «Политехника»*, 2000, 248 с.
34. Э. Попов, Экспертные системы: решение неформализованных задач в диалоге с ЭВМ. *Москва: «Наука»*, 1987, 288 с.
35. Д. Поспелов, Искусственный интеллект: Модели и методы. *Москва: «Радио и связь»*, Кн. 2, 1990, 304 с.
36. В. Вагин, Дедукция и обобщение в системах принятия решений. *Москва: «Наука»*, 1988, 384 с.
37. Качество программных средств. Термины и определения. *ГОСТ 28806-90*, 1990.
38. Э. Соколова, С. Капранов, «Разработка моделей и методов обеспечения контролепригодности систем с помощью эволюционного

моделирования», *Идентификация систем и задачи управления (SICPRO): Труды IV Международной конференции*, Москва, 2005, С. 637-658.

39. Н. Хренов, Основы комплексной диагностики северных газопроводов. *Москва: «Газоил пресс»*, 2003, 352 с.

40. И. Черноруцкий, Методы оптимизации и принятия решений. *Санкт Петербург: «Лань»*, 2001, 384 с.

41. Ю. Курочкин, А. Смирнов, В. Степанов, Надежность и диагностирование цифровых устройств и систем. *Санкт Петербург: «Изд-во С.-Петербургского ун-та»*, 1993, 320 с.

42. Д. Ионин, Е. Яковлев, Современные методы диагностики магистральных газопроводов. *Москва: «Недра»*, 1987, 232 с.

43. А. Соловьев, Е. Турута, обеспечения отказоустойчивости распределенных систем управления со случайным потоком заявок и статическим распределением задач. Управление ресурсами в интегральных сетях. *Москва: «Наука»*, 1991, С. 109116.

44. Ю. Малышенко, В. Чипулис, С. Шаршунов, Автоматизация диагностирования электронных устройств. *Москва: «Энергоатомиздат»*, 1986, 212 с.

45. А. Мозгалевский, А. Койда, Вопросы проектирования систем диагностирования. *Ленинград: «Энергоиздат»*, 1985, 112 с.

46. Д. Поспелов,. Логико-лингвистические модели в системах управления. *Москва: «Энергоиздат»*, 1981, 232 с.

47. Т. Гаврилова, В. Хорошевский, Базы знаний интеллектуальных систем. Санкт Петербург: «Изд-во «Питер», 2000, 144 с.

48. Ж.-Л. Лорьер, Системы искусственного интеллекта. *Москва: «Мир»*, 1991, 116 с.

49. Н. Нильсон, Принципы искусственного интеллекта. *Москва: «Радио и связь»*, 1985, 112 с.

50. К. Таусенд, Д. Фохт, Проектирование и программная реализация экспертных систем на персональных ЭВМ. *Москва: «Финансы и статистика»*, 1990, 136 с.
51. Ю. Шрейдер, А. Шаров, Системы и модели. *Москва: «Радио и связь»*, 1982, 112 с.
52. К. Нейлор, Как построить свою экспертную систему. *Москва: «Энергоиздат»*, 1991, 96 с.
53. Э. Кьюсиак, Искусственный интеллект. Применение в интегрированных производственных системах. *Москва: «Машиностроение»*, 1991, 136 с.
54. Р. Форсайт, Экспертные системы. Принципы работы и примеры. *Москва: «Радио и связь»*, 1987, 124 с.
55. Ф. Хейес-Рот, Д. Уотермен, Д. Ленат, Построение экспертных систем. *Москва: «Мир»*, 1987, 204 с.
56. В. Сафонов, Экспертные системы – интеллектуальные помощники специалистов. *Санкт Петербург: «Санкт-Петербургская организация общества «Знания»*, 1992, 96 с.
57. В. Дубровин, С. Субботин, А. Богуслаев, Интеллектуальные средства диагностики и прогнозирования надежности авиадвигателей. *Запорожье: ОАО «Мотор-Сич»*, 2003, 279 с.
58. Е. Барзилович, Модели технического обслуживания сложных систем. *Москва: «Высшая школа»*, 1982, 232 с.
59. Т. Гаврилова, В. Хорошевский, Базы знаний интеллектуальных систем. *Санкт Петербург: «Питер»*, 2000, 216 с.
60. Р. Алиев, Н. Абдикеев, Производственные системы с искусственным интеллектом. *Москва: «Радио и связь»*, 1990, 112 с.
61. В. Крисевич, Л. Кузьмич, Экспертные системы для персональных компьютеров: методы, средства, реализации. *Москва: «Высшая школа»*, 1990, 216 с.

62. Д. Поспелов, Экспертные системы: состояние и перспективы. Москва: «Наука», 1989, 164 с.
63. А. Грешилов, Математические методы принятия решений. МГТУ им. Н. Э. Баумана, 2006, 116 с.
64. В. Захарова, В. Хорошевского, Искусственный интеллект: Программные и аппаратные средства. Москва: «Радио и связь», Кн.3, 1990, 368 с.
65. В. Дианов, Диагностика и надежность автоматических систем. Москва: МГИУ, 2004, 164 с.
66. А. Горбань, В. Дунин-Барковский, А. Кирдин, Нейроинформатика. Новосибирск: «Наука», 1998, 296 с.

РОЗДІЛ 5

ПРАКТИЧНЕ ЗАСТОСУВАННЯ РЕЗУЛЬТАТІВ ДОСЛІДЖЕННЯ

5.1. Діагностування газотранспортної системи України

В даній роботі пропонується розглянути в якості складної багаторівневої системи газотранспортну систему України в цілому та її підсистеми на усіх рівнях [16-22].

Було проведено натурний експеримент з залученням експертів в газотранспортній галузі для побудови моделей діагностування газотранспортної системи [13, 23-27]. При цьому виявлено залежність зміни значень характеристик стану елементів системи від комбінацій несправностей, що відбулись в системі на момент діагностування (Додаток 6,7). На кожному етапі експерименту експертам були поставлені наступні запитання:

1. На які рівні та підсистеми можна поділити ГТС?
2. Які несправності або їх комбінації можуть відбуватись на кожному рівні та в кожній підсистемі ГТС?
3. Які є контрольовані параметри (характеристики стану) на кожному рівні ГТС?

Відповідно до цих запитань було проведено дослідження структури ГТС, визначено основні рівні цієї системи, визначено підсистеми на кожному з рівнів ГТС та їх елементи.

Газотранспортна система (ГТС) України складається з магістральних газопроводів, розподільних мереж, газосховищ, компресорних і газовимірювальних станцій. Газотранспортна система України є другою в Європі і однією з найбільших в світі.

ГТС «Укртрансгаза» складається з магістральних газопроводів протяжністю 37,6 тис. км в однопітквовому численні, 71 компресорній станції загальною потужністю 5405 МВт [18].

Загальна протяжність газопроводів України складає 283,2 тис. км.

Природний газ поступає на Україну по 22 магістральним газопроводам («Союз», «Прогрес», «Уренгой – Помари – Ужгород» та ін.), а виходить за межі України – по 15. Протяжність газопроводів – 37,1 тис. км., у тому числі 14 тис. км. – трубопроводи найбільшого діаметру (1020–1420 мм).

Магістральні газопроводи – призначені для транспортування газу на великі відстані. Через певні інтервали на магістралі встановлені газокомпресорні станції, що підтримують тиск в трубопроводі. У кінцевому пункті магістрального газопроводу розташовані газорозподільні станції, на яких тиск знижується до рівня, необхідного для постачання споживачів [22].

Газопроводи розподільних мереж призначені для доставки газу від газорозподільних станцій до кінцевого споживача. Система об'єднує 72 компресійних станції (122 компресорних цехи) і 13 підземних сховищ з найбільшим в Європі активним об'ємом газу – більше 32 млрд куб. м або 21,3 % від загальноєвропейської активної ємкості. Мережу підземного зберігання газу включає чотири комплекси: Західноукраїнський (Передкарпатський), Київський, Донецький і Південноукраїнський. «Газовимірювальна Станція» (ГВС) – станція, на якій виробляється вимір кількості і визначення якості передаваного природного газу. Облік газу, що поступає на Україну, здійснюється на дев'яти газовимірювальних станціях (ГВС) і двох пунктах виміру газу: дві ГВС на території Білорусії, останні – в РФ. Облік газу, що транспортується за межі України, здійснюється на десяти прикордонних ГВС. З них дев'ять знаходяться на території України і одна в РФ. По одній ГВС – на кордонах з Польщею, Словаччиною, Угорщиною і Росією, дві ГВС – на кордоні з Румунією («Орловка»), три – з Молдовою («Гребеникі»). («Берегово», «Гребеникі» (на кордоні з Молдовою), «Дроздовічи», «Орловка» (Одеська обл.), «Теково», «Ужгород»).

Газ, що добувається Україною, після обробки потрапляє в ГТС України через ГВС, ПРГ і ГРС: 68 станцій ДК «Укргазвидобування», 13

станцій ВАТ «Укрнафта» і безпосередньо споживачам через 177 газорозподільних станцій (ГРС). Передача газу з газотранспортної системи в газорозподільну мережу відбувається на 1416 ГРС.

Так як вся ГТС є однотиповою на окремих ділянках, то в даній роботі розглянемо ділянку ГТС між сусідніми компресорними станціями (рис. 5.1).

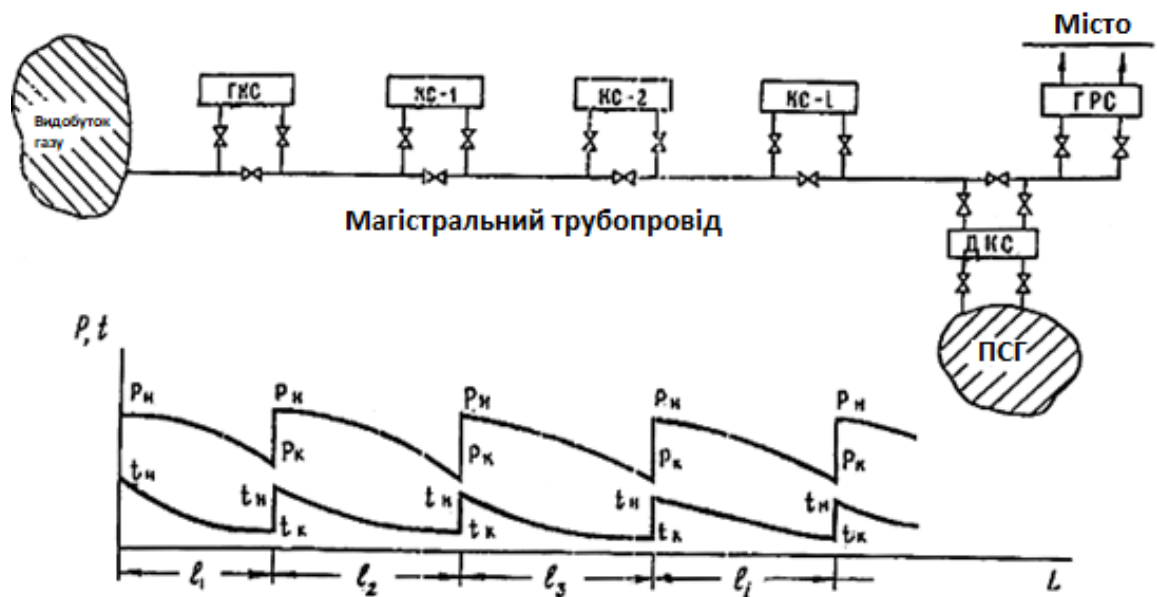


Рис. 5.1. Схема газопроводу та зміни тиску і температури газу уздовж траси.

Виходячи з вищевикладеного, експертами виділені наступні складні підсистеми 1-го рівня в газотранспортній системі України [1, 7-13]:

1. Компресорна станція (КС) $c_{1,1}$.
2. Газорозподільча станція (ГРС) $c_{1,2}$.
3. Трубопровід $c_{1,3}$.
4. Запірна арматура $c_{1,4}$.
5. Підземні сховища газу (ПСГ) $c_{1,5}$.
6. Газовимірювальна станція (ГВС) $c_{1,6}$.

Експертами обрано наступні контролюємі характеристики стану ГТС на 1-му рівні:

1. Тиск газу на вході в КС $z_{1,1}$.
2. Температура газу на вході в КС $z_{1,2}$.
3. Витрата газу в трубопроводі $z_{1,3}$.
4. Тиск газу на виході з КС $z_{1,4}$.
5. Температура газу на виході з КС $z_{1,5}$.

Також експертами визначені наступні види несправностей на 1-му рівні ГТС:

8. Повна зупинка станції $s_{1,1}$.
8. Самовільне закриття $s_{1,2}$.
8. Розрив $s_{1,3}$.
8. Витік $s_{1,4}$.
8. Гідратна пробка $s_{1,5}$.
8. Водяна пробка $s_{1,6}$.

Відповідно до запропонованої в розділі 2 логічної моделі діагностування та за допомогою опитування експертів побудовано експериментальну модель діагностування ділянки ГТС України:

$$X(1, c_{1,1}, s_{1,1}) \rightarrow D(z_{1,1}, \uparrow) \wedge D(z_{1,2}, \uparrow) \wedge D(z_{1,3}, \downarrow) \wedge D(z_{1,4}, \downarrow) \wedge D(z_{1,5}, \downarrow) \quad (5.1)$$

$$X(1, c_{1,1}, s_{1,1}) \rightarrow D(z_{1,1}, \text{значно } \downarrow) \wedge D(z_{1,2}, \text{значно } \downarrow) \wedge D(z_{1,3}, \text{значно } \uparrow) \wedge D(z_{1,4}, \uparrow) \wedge D(z_{1,5}, \uparrow) \quad (5.2)$$

Друга залежність прямо пов'язана з обсягом споживання газу даної ГРС. Експертами встановлено факт розгляду даної залежності відповідно до кількісних змін контрольованих характеристик системи. Якщо споживання газу на ГРС незначне, то дана залежність не враховується в комплексному розгляді ГТС.

$$X(1, c_{1,5}, s_{1,1}) \rightarrow D(z_{1,1}, \text{значно } \downarrow) \wedge D(z_{1,2}, \text{значно } \downarrow) \wedge D(z_{1,3}, \text{значно } \uparrow) \wedge D(z_{1,4}, \text{значно } \uparrow) \wedge D(z_{1,5}, \text{значно } \uparrow) \quad (5.3)$$

Третя залежність враховується в комплексному розгляді ГТС тільки при режимах закачування газу в ПСГ.

$$X(1, c_{1,5}, s_{1,1}) \rightarrow D(z_{1,1}, \downarrow) \wedge D(z_{1,2}, \downarrow) \wedge D(z_{1,3}, \downarrow) \wedge D(z_{1,4}, \downarrow) \wedge D(z_{1,5}, \downarrow) \quad (5.4)$$

Можливі несправності в підсистемі $c_{1,6}$ (ГВС) не мають значного впливу на контрольовані параметри (характеристики стану) ГТС, тому можуть бути не враховані в даній моделі.

$$X(1, c_{1,4}, s_{1,2}) \rightarrow D(z_{1,4}, \text{значно } \uparrow) \wedge D(z_{1,5}, \uparrow) \wedge D(z_{1,3}, \downarrow) \wedge D(z_{1,1}, \text{значно } \downarrow) \wedge D(z_{1,2}, \downarrow) \quad (5.5)$$

Як результат $X(1, c_{1,4}, s_{1,2})$ є термінове реагування персоналу щодо усунення негативного впливу даної несправності.

$$X(1, c_{1,3}, s_{1,3}) \rightarrow D(z_{1,4}, \downarrow) \wedge D(z_{1,1}, \uparrow) \quad (5.6)$$

$$X(1, c_{1,3}, s_{1,4}) \rightarrow D(z_{1,4}, \downarrow) \wedge D(z_{1,1}, \downarrow) \wedge D(z_{1,1}, \uparrow) \wedge D(z_{1,4}, \downarrow) \wedge D(z_{1,3}, \uparrow) \quad (5.7)$$

$X(1, c_{1,3}, s_{1,4})$ – витік газу з трубопроводу – це несправність, прояв якої дуже тривалий в часі і складно ідентифікується системами контролю при умовах накладення наслідків інших несправностей.

$$X(1, c_{1,3}, s_{1,5}) \vee X(1, c_{1,3}, s_{1,6}) \rightarrow D(z_{1,1}, \uparrow) \wedge D(z_{1,4}, \downarrow) \wedge D(z_{1,3}, \downarrow) \quad (5.8)$$

Дана логічна модель ((5.1)-(5.8)) будується відповідно до різних ділянок ГТС та заданих їм режимів роботи при визначених експертами градієнтах зміни контрольованих параметрів (характеристик стану) ГТС [15].

Наступним кроком в побудові комплексної моделі діагностування ГТС України є детальний розгляд підсистем 2-го рівня, якими є складові підсистем ГТС 1-го рівня.

Основною підсистемою ГТС 1-го рівня є компресорна станція, на її прикладі розглянемо перехід в структурі ГТС до підсистем нижніх рівнів.

5.2. Діагностування компресорної станції

При транспорті газу по трубопроводу відбувається втрата тиску із-за різного гідравлічного опору по довжині газопроводу. Падіння тиску викликає зниження пропускної спроможності газопроводу. Одночасно знижується температура газу, що транспортується, головним чином, із-за передачі теплоти від газу через стінку трубопроводу в ґрунт або атмосферу [26-33].

Для підтримки заданої витрати газу, що транспортується, шляхом підвищення тиску через певні відстані уздовж траси газопроводу, як наголошувалося вище, встановлюються компресорні станції.

Перепад тиску на ділянці між КС визначає міру підвищення тиску в газоперекачуючих агрегатах. Тиск газу в газопроводі в кінці ділянки дорівнює тиску на вході в газоперекачуючий агрегат, а тиск на початку ділянки дорівнює тиску на виході з АВО газу.

Сучасна компресорна станція (КС) – це складна інженерна споруда, що забезпечує основні технологічні процеси по підготовці і транспорту природного газу [18-26].

Принципова схема розташування КС уздовж траси магістрального газопроводу приведена на рис. 5.1, де одночасно схематично показані зміни тиску і температури газу між компресорними станціями.

Компресорна станція – невід’ємна і складна частина магістрального газопроводу, що забезпечує транспорт газу за допомогою енергетичного устаткування, встановленого на КС.

Вона служить елементом, що управляє, в комплексі споруд, що входять в магістральний газопровід. Саме параметрами роботи КС визначається режим роботи газопроводу. Наявність КС дозволяє регулювати режим роботи газопроводу при коливаннях вжитку газу, максимально використовуючи при цьому акумулюючу здатність газопроводу.

На рис. 5.2 показана принципова схема компоновки основного устаткування компресорної станції, що складається з 3 ГПА.

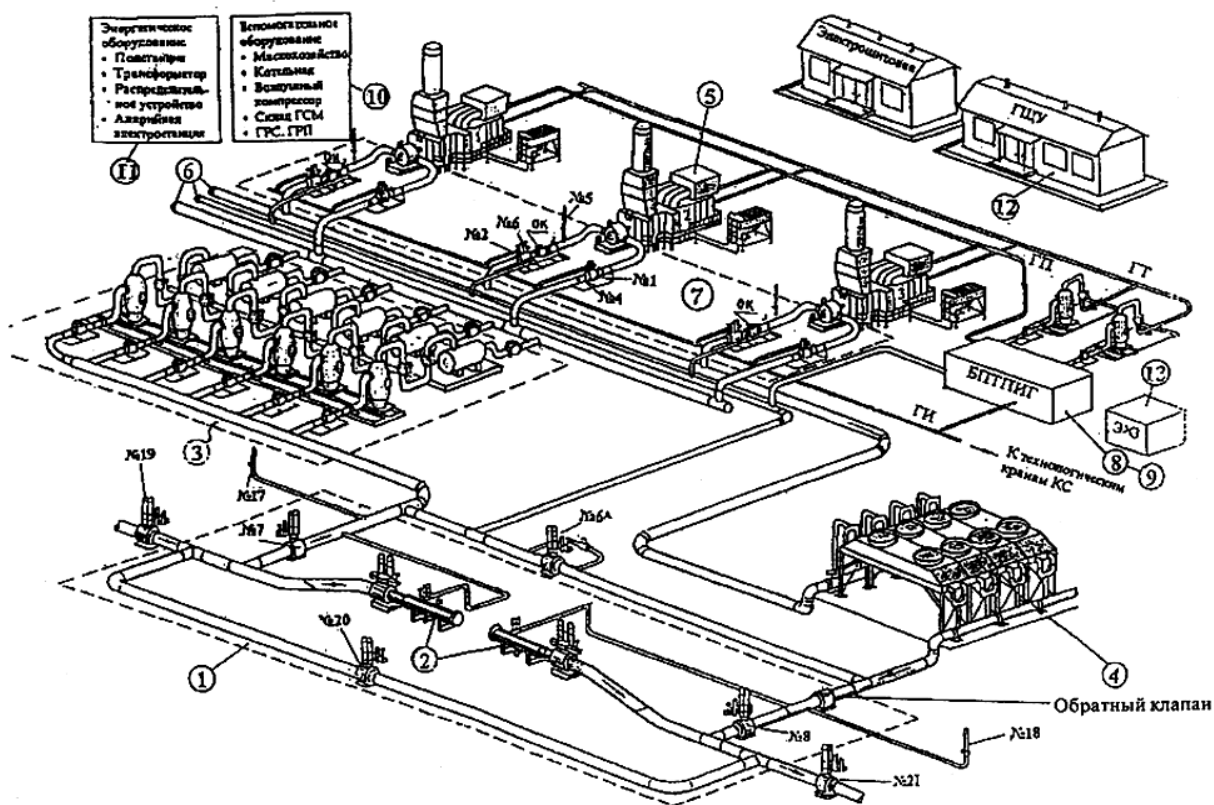


Рис. 5.2. Принципова схема компоновки основного устаткування компресорної станції

Для КС МГ «Союз» на стадії проектування прийнята наявність 7 ГПА (5 – в роботі, один – в резерві, один – в ремонті).

Відповідно до рис. 5.2 до складу основних підсистем КС входять:

1. Вузол підключення КС до магістрального газопроводу $c_{2,1}$;
2. Камери запуску і прийому очисного пристрою магістрального газопроводу $c_{2,2}$;
3. Установа очищення технологічного газу, що складається з пиловловлювачів і фільтру-сепараторів $c_{2,3}$;
4. Установа охолодження технологічного газу $c_{2,4}$;
5. Газоперекачуючі агрегати $c_{2,5}-c_{2,11}$;
6. Технологічні трубопроводи обв'язування компресорної станції $c_{2,12}$;
7. Замочна арматура технологічних трубопроводів обв'язування агрегатів $c_{2,13}$;
8. Установа підготовки пускового і паливного газу $c_{2,14}$;
9. Установа підготовки імпульсного газу $c_{2,15}$;
10. Різне допоміжне устаткування $c_{2,16}$;
11. Енергетичне устаткування $c_{2,17}$;
12. Головний щит управління і система телемеханіки $c_{2,18}$;
13. Устаткування електрохімічного захисту трубопроводів обв'язування КС $c_{2,19}$.

На магістральних газопроводах розрізняють три основних типи КС: головні компресорні станції, лінійні компресорні станції і дотискні компресорні станції.

Головні компресорні станції (ГКС) встановлюються безпосередньо по ходу газу після газового родовища. У міру видобутку газу відбувається падіння тиску в родовищі до рівня, коли транспортувати його у необхідній кількості без компресування вже не можна. Тому для підтримки

необхідного тиску і витрати будуються головні компресорні станції. Призначенням ГКС є створення необхідного тиску технологічного газу для його подальшого транспорту по магістральних газопроводах. Принциповою відмінністю ГКС від лінійних станцій є висока міра стискування на станції, що забезпечується послідовною роботою декілька ГПА з відцентровими нагнітачами або поршневіми газомото-компресорами. На ГКС пред'являються підвищені вимоги до якості підготовки технологічного газу.

Лінійні компресорні станції встановлюються на магістральних газопроводах, як правило, через 100-150 км. Призначенням КС є компресування природного газу, що поступає на станцію, з тиску входу до тиску виходу, обумовлених проектними даними. Тим самим забезпечується постійна задана витрата газу по магістральному газопроводу.

Дотискні компресорні станції (ДКС) встановлюються на підземних сховищах газу (ПГС). Призначенням ДКС є подача газу в підземне сховище газу від магістрального газопроводу і відбір природного газу з підземного сховища (як правило, в зимовий період часу) для подальшої подачі його в магістральний газопровід або безпосередньо споживачам газу. ДКС будуються також на газовому родовищі при падінні пласта тиску нижче тиску в магістральному трубопроводі. Відмітною особливістю ДКС від лінійних КС є висока міра стискування 2-4, покращувана підготовка технологічного газу (осушувачі, сепаратори, пиловловлювачі), що поступає з підземного сховища з метою його очищення від механічних домішок і вологи, що виноситься з газом.

Біля споживачів газу будуються також газорозподільні станції (ГРС), де газ редукується до необхідного тиску (1,2; 0,6; 0,3 МПа) перед подачею його в мережі газового господарства.

Експертами обрано наступні характеристики стану стосовно КС (2-й рівень ГТС):

1. Тиск газу на вході в КС $z_{2,1} = z_{1,1}$.
2. Тиск газу на виході з КС $z_{2,2} = z_{1,4}$.
3. Температура газу на вході в КС $z_{2,3} = z_{1,2}$.
4. Температура газу на виході з КС $z_{2,4} = z_{1,5}$.
5. Навантаження загальностанційне агрегатів $z_{2,5}$.
6. Ступінь стискування $z_{2,6}$.

Також експертами виділені наступні види несправностей на 2-му рівні ГТС:

1. Механічна несправність $s_{2,1}$.
2. Аварійна зупинка $s_{2,2}$.

Відповідно до зазначених даних можна побудувати залежність зміни контрольованих параметрів від комбінацій несправностей, що вказані експертами:

$$X(2, c_{2,4}, s_{2,1}) \rightarrow D(z_{1,5}, \uparrow) \quad (5.9)$$

$$X(2, c_{2,5}, s_{2,2}) \vee X(2, c_{2,6}, s_{2,2}) \vee X(2, c_{2,5}, s_{2,7}) \vee X(2, c_{2,8}, s_{2,2}) \vee X(2, c_{2,9}, s_{2,2}) \rightarrow \\ \rightarrow D(z_{1,1}, \uparrow) \wedge D(z_{1,4}, \downarrow) \wedge D(z_{1,5}, \downarrow) \wedge D(z_{2,5}, \uparrow) \quad (5.10)$$

З побудованих залежностей (5.9)-(5.10) видно, що несправності підсистем одних рівнів впливають на зміну значень характеристик стану підсистем інших рівнів ГТС [15-16].

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

5.3. Діагностування газоперекачуючих агрегатів.

Газоперекачуючий агрегат – складна енергетична установка, призначена для компресування природного газу, що поступає на КС по магістральному газопроводу. На рис. 5.3 приведена принципова схема ГПА з газотурбінним приводом, де показані всі основні вузли, що входять в агрегат [25]:

1. Повітрязабірна камера (ПЗК) потрібна для підготовки циклового повітря, що поступає з атмосфери на вхід осевого компресора. На різних типах ГПА повітрязабірні камери мають різні конструкції, але всі призначено для очищення повітря, що поступає, і пониження рівня шуму в районі ПЗК.

2. Пусковий пристрій (турбодетандер, повітряний або електричний стартер) необхідний для первинного розкручування осевого компресора (ОК) і турбіни високого тиску (ТВТ) у момент пуску ГПА.

3. Осьовий компресор призначений для подачі необхідної кількості повітря в камеру згорання газотурбінної установки.

4. Турбіна високого тиску служить приводом осевого компресора і знаходиться з ним на одному валу.

5. Турбіна низького тиску (ТНТ) служить для приводу відцентрового нагнітача.

6. Нагнітач природного газу є відцентровим газовим компресором без наявності проміжного охолодження і призначений для компресування природного газу.

7. Крани обв'язування ГПА.

8. Регенератором (повітряпідігрівачем) є теплообмінний апарат для підвищення температури повітря, що поступає після ОК в камеру згорання (КЗ), і тим самим зниження витрати паливного газу по агрегату.

9. Камера згорання призначена для спалювання паливного газу в потоці повітря і здобуття продуктів згорання з розрахунковими параметрами (тиск, температура) на вході в ТВТ.

10. Блоком підготовки пускового і паливного газу є комплекс пристроїв, за допомогою яких частина газу, що відбирається з магістрального газопроводу, очищається від механічних домішок і вологи, доводиться до необхідних параметрів, обумовлених вимогами експлуатації газоперекачуючих агрегатів.

11. Апарати повітряного охолодження масла призначені для охолодження змащувального масла після підшипників турбін і нагнітача.

Крім того, кожен ГПА забезпечений системою регулювання основних параметрів агрегату, системами агрегатної автоматики, автоматичного пожежогасіння, виявлення загазованості приміщення і ін.

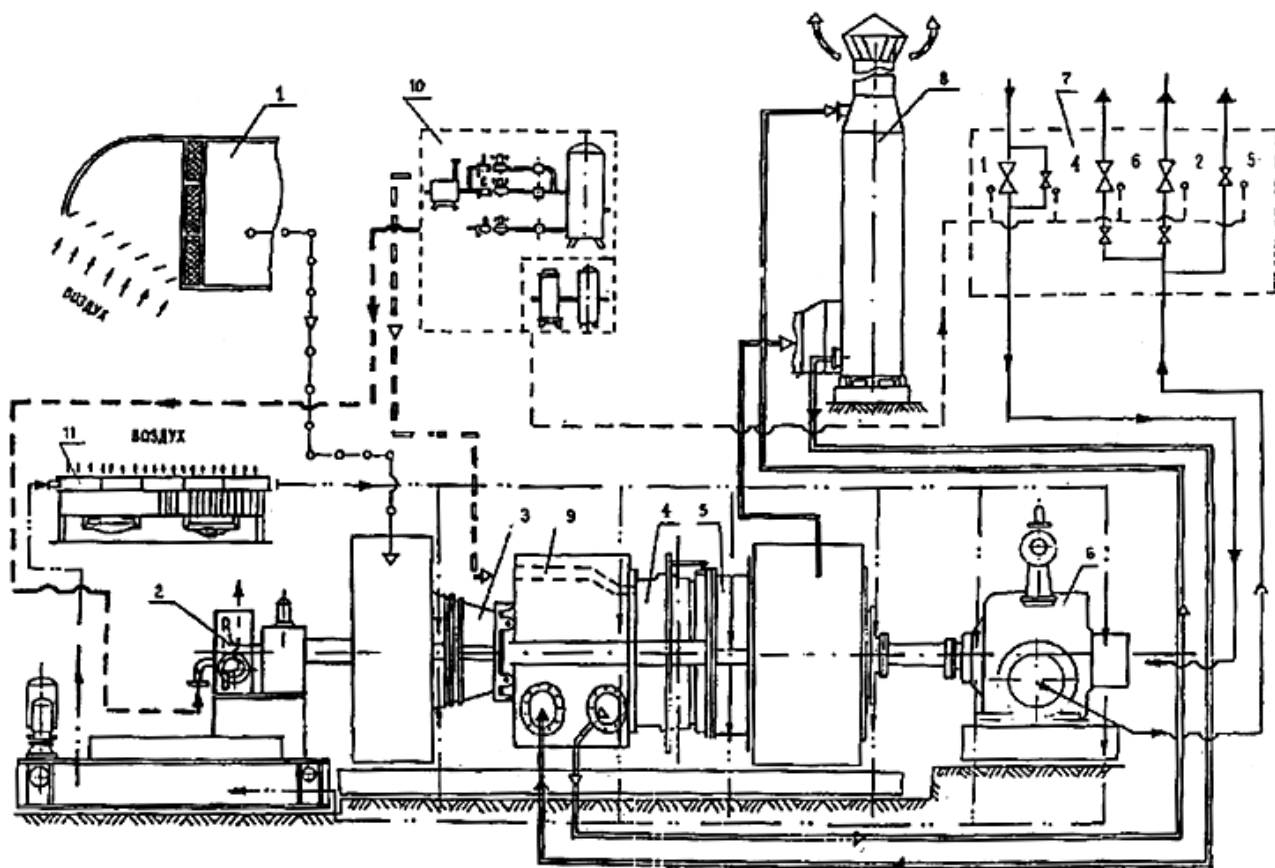
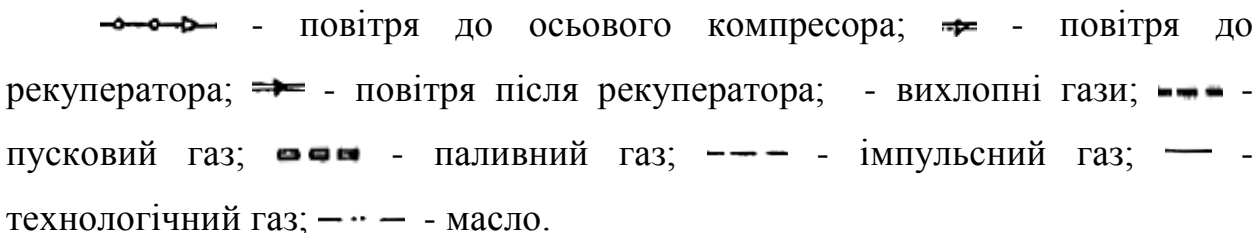










Рис. 5.3. Принципова схема компоновки ГПА

Опис рис. 5.3: 1 - повітрязабірна камера (ПЗК); 2 - турбодетандер; 3 - осьовий компресор, 4 - турбіна високого тиску (ТВТ); 5 - турбіна низького тиску (ТНТ); 6 - нагнітач; 7 - технологічні крани обв'язування агрегату; 8 - рекуператор; 9 - камера згорання; 10 - блок підготовки паливного, пускового і імпульсного газу; 11 - апарат повітряного охолодження масла.

 - повітря до осьового компресора;  - повітря до рекуператора;  - повітря після рекуператора;  - вихлопні газ;  - пусковий газ;  - паливний газ;  - імпульсний газ;  - технологічний газ;  - масло.

Типи газоперекачувальних агрегатів, що використовують на КС.

Газоперекачувальні агрегати, що використовують для компресування газу на компресорних станціях, за типом приводу підрозділяються на три основні групи: газотурбінні установки (ГТУ), електрогазопривідні агрегати (ЕГПА) і газомотокомпресорні установки (ГМКУ).

До першої групи відносяться ГПА з приводом від відцентрового нагнітача газової турбіни; до другої – агрегати з приводом від електродвигуна і до третьої групи – агрегати з приводом від поршневих двигунів внутрішнього згорання, що використовують як паливо природний газ.

До агрегатів першої групи – основного вигляду приводу компресорних станцій, відносяться: стаціонарні, авіаційні і суднові газотурбінні установки.

ГТУ фірми Дженерал Електрик (США) виготовляються на різних заводах світу: АСГ-Каніс (Німеччина), Ново-Піньоне (Італія), Джон Браун (Великобританія), Міцубіси (Японія). До установок цієї фірми відносяться: ГТК-10И (Ms-3002) з нагнітачами фірм: Купер-бессемер (США), Ново-Піньоне (Італія), Інгерсол Ренд (Великобританія). ККД установки 25,7%, потужність $N = 10,3$ МВт, 150 шт.

На сьогоднішній день поширеним агрегатом, використовуваним на газопроводах України, є агрегат ГТК-10И (Ms-3002) фірми Дженерал Електрик (США) заводу АЄГ-Каніс (Німеччина) (характерний для газопроводу «Союз»).

До авіапривідних газотурбінних установок відносяться ГПА, приводом яких служить газова турбіна авіаційного типу, спеціально реконструйована для використання на компресорних станціях.

Характеристика газоперекачуючого агрегату ГТК-10И.

Газотурбінна установка ГТК-10И виробництва фірми «Дженерал Електрик», серії Ms-3002, оснащена рекуператором фірми «Нуово-Піньоне» працює по регенеративному циклу і призначена для приводу відцентрових нагнітачів природного газу типів: RF 2bb «Купер-бессемер»; PCL 802/24 «Нуов, о-Піньоне»; Cdp-224 «Інтерсол-Ренд».

Виходячи з вищевикладеного визначені наступні підсистеми ГТК-10И [28-33]:

1. Двигун ($c_{3,1}$), який можна розбити на наступні підсистеми:
 - 1.1. П'ятнадцятиступінчатий осьовий компресор (ОК);
 - 1.2. Повітрозбірник (приймає стисле компресором повітря і направляє його в рекуператор);
 - 1.3. Перший колектор згорання, який у свою чергу можна розбити на підсистеми:
 - 1.3.1. Перша камера згорання;
 - 1.3.2. Друга камера згорання;
 - 1.3.3. Третя камера згорання.
 - 1.4. Другий колектор згорання, який у свою чергу можна розбити на підсистеми:
 - 1.4.1. Четверта камера згорання;
 - 1.4.2. П'ята камера згорання;
 - 1.4.3. Шоста камера згорання;
 - 1.5. Системи трубопроводів для регенеративного циклу;

- 1.6. Одноступінчата осьова реактивна турбіна високого тиску (ТВТ);
- 1.7. Одноступінчата осьова турбіна низького тиску (ТНТ);
- 1.8. Повітрязабірна камера (ПЗК);
- 1.9. Вхідний тракт;
- 1.10. Вихлопний тракт;
- 1.11. Опорно-упорний підшипник ротора турбокомпресора;
- 1.12. Опорний підшипник ротора турбокомпресора;
- 1.13. Опорний підшипник ротора ТНТ;
- 1.14. Опорно-упорний підшипник ТНТ.

2. Система управління, сигналізації і захисту ($c_{3,2}$), з підсистемами:

- 2.1. Контур управління паливом на запуску;
- 2.2. Контур регулювання частоти обертання ротора ТНТ;
- 2.3. Контур регулювання температури за ТНТ;
- 2.4. Контур регулювання 99-100% частот обертання ротора ТВТ;
- 2.5. Контур регулювання тиску паливного газу перед регулюючим клапаном;
- 2.6. Контур захисту нагнітача від помпажа.
- 2.7. Система захисту по вібрації і осьовому зрушенню.

3. Система електропостачання агрегату ($c_{3,3}$), з підсистемами:

- 3.1. Електродвигуни насосів і вентиляторів системи охолодження змащувального масла;
- 3.2. Електродвигуни допоміжних насосів мастила і гідропітанія, аварійного насоса мастила, насосів ущільнення, витяжного вентилятора турбінного відсіку, калориферів відсіку турбіни і допоміжного устаткування;
- 3.3. Електроприводи лінії пускового газу;
- 3.4. Електроприводи лінії паливного газу;
- 3.5. Електродвигунів сепараторів пилу ПЗК;

3.6. Електроприводів регулюючих клапанів систем антиобморожувача і утилізації;

3.7. Приладів освітлення і обігріву відсіків турбіни і допоміжного устаткування.

4. Система пожежогасіння вуглекислим газом ($c_{3,4}$) з підсистемами:

4.1.-4.14. Балони з вуглекислим газом;

4.15.-4.24. Випускні форсунки-розпилювачі;

4.25.-4.33. Контактні датчики пожежі.

5. Система змащувального масла ($c_{3,5}$).

6. Система гідравлічного масла ($c_{3,6}$) з підсистемами:

6.1. Головний гідравлічний насос з приводом від вспомогательного редуктора;

6.2. Вспомогательний гідравлічний насос з електроприводом;

6.3. Вузол гідравлічного колектора;

6.4.-6.5. Фільтри високого тиску;

6.6. Перемикальний клапан між фільтрами високого тиску;

6.7. Контрольно-вимірювальні прилади;

6.8. Гідравлічні реле;

6.9. Соленоїдний клапан;

6.10. Привідні гідроциліндри муфти турбодетандера.

7. Система ущільнювача масла ($c_{3,7}$) з підсистемами:

7.1. Основний масляний насос високого тиску;

7.2. Резервний масляний насос високого тиску;

7.3. Гідроаккумулятор масла ущільнювача;

7.4. Регулювальник витрати;

- 7.5. Регулювальник перепаду;
- 7.6.-7.7. Масляні пастки масловідведення (поплавцеві камери);
- 7.8. Бак дегазатора (газовіддільник);
- 7.9. Контрольно-вимірювальні прилади;
- 7.10. Температурні реле;
- 7.11. Реле тиску;
- 7.12. Відключаюча арматура;
- 7.13. Запобіжна арматура;
- 7.14. Замочна арматура;
- 7.15. Маслопроводи;
- 7.16. Газопроводи.

8. Система подачі рідини, що охолоджує ($c_{3,8}$) з підсистемами:

- 8.1. Блок охолодження з підсистемами:
 - 8.1.1. Зрівняльний бак з релерівня;
 - 8.1.2. Водяний для повітря теплообмінник з оребреними трубками;
 - 8.1.2.-8.1.3. Насоси рідини, що охолоджує, з приводом від електродвигунів;
 - 8.1.4.-8.1.5. Осьові вентилятори з приводом від електродвигунів;
 - 8.1.6. Фільтр;
 - 8.1.7. Температурні реле;
 - 8.1.8. Реле тиску.
- 8.2.-8.3. Занурювальні маслоохолоджувачі маслобака;
- 8.4. Клапан VTR-1.

9. Система повітря, що охолоджує і ущільнює ($c_{3,9}$), з підсистемами:

- 9.1. Вантажний блокувальний клапан з кінцевим вимикачем;
- 9.2. Очисник повітря відцентрового типу;
- 9.3.-9.57. Повітряні ежектори;
- 9.58. Трубопроводи;

9.59. Обмежуючі діафрагми.

10. Система пускового газу ($c_{3,10}$) з підсистемами:

10.1. Регулюючий клапан пускового газу;

10.2. Запобіжний клапан;

10.3.-10.4. Соленіодні клапани;

10.5. Редукційний клапан;

10.6. Автомат безпеки;

10.7. Датчик швидкості;

10.8. Фільтр пускового газу.

11. Система паливного газу ($c_{3,11}$) з підсистемами:

11.1. Сітчастий паливний фільтр;

11.2. Блок газових клапанів останову/співвідношення і регулюючого;

11.3. Паливні форсунки (сопла);

11.4. Реле тиску паливного газу;

11.5. Датчик тиску паливного газу;

11.6. Соленоїдний клапан скидання.

12. Система анти обмороження ($c_{3,12}$) з підсистемами:

12.1. Регулюючий електроприводний клапан;

12.2. Режим ручного управління кнопками (ручний привід);

12.3. Механічний індикатор положення штока;

12.4. Кінцевий вимикач;

12.5. Електронний позиціонер;

12.6. Ручний кран;

12.7. Шафа управління з підсистемами:

12.7.1. Контроллери;

12.7.2. Перетворювачі;

- 12.7.3. Світлова сигналізація;
- 12.7.4. Звукова сигналізація;
- 12.8. Мікропроцесорний контроллер.
- 13. Система очищення циклового повітря ГТУ ($c_{3,13}$).
- 14. Система технологічних кранів нагнітача ($c_{3,14}$).
- 15. Нагнітач ($c_{3,15}$).
- 16. Система пожежогасіння ГПА «Галон» ($c_{3,16}$).

Газоперекачувальний агрегат ГТК-10И характеризується швидким запуском: час до виходу на режим холостого ходу 3-3,5 хв., час до прийняття повного навантаження 7-8 хв.

Турбіна високого тиску виводиться на максимальну частоту обертання протягом 3-3,5 хв. Настільки швидке прискорення валу турбокомпресора при пуску можливо завдяки поворотному направляючому апарату силової турбіни, який збільшує прохідний перетин і розподіляє велику частину енергії на ТВТ. Лише після досягнення ТВТ 99-100% повної частоти обертання закриваються соплові лопатки і починається завантаження силової турбіни. Швидке наростання температури газів, що відходять, відповідне ще більшій швидкості підйому температури газів перед турбіною, зв'язано із застосуванням точної і швидкодіючої системи регулювання. Інакше температура може виявитися вище за граничне її значення 540 (за ТНТ). Типова робоча характеристика установки, що показує зміну потужності і ефективності турбіни залежно від частоти обертання силового валу, представлена на діапазоні 59. З характеристики видно, що навіть при зниженні навантаження до 70% паливна ефективність (ККД) міняється трохи, тобто на 10-15%. Ця перевага також реалізується завдяки поворотному сопловому апарату турбіни.

Окрім відмінностей в геометрії проточної частини і газодинамічних характеристик кожна турбіна має свою індивідуальну настроювальну

характеристику, яка зв'язує міру стискування і температуру на виході при певній температурі зовнішнього повітря, температурі перед турбіною і частоті обертання роторів ТВТ і ТНТ. Проте для всіх турбін існує гранична температура на виході 540, яка не дає можливість підтримувати розрахункову потужність при температурах вище +30 .

Повніший вплив температури зовнішнього повітря на основні параметри ГТУ представлений на діапазон 61. Підвищення температури зовнішнього повітря призводить до зниження його щільності, а значить і до зменшення витрати циклового повітря і міри стискування. Це, у свою чергу, приводить до ще різкішого падіння потужності ГТУ і супроводиться зниженням к.п.д. і збільшенням питомої витрати палива. Підвищення температури зовнішнього повітря на 1 зв'язане з падінням потужності на 0,7% і к.п.д. на 0,2%. При пониженні температури зовнішнього повітря до -20 установка може розвивати граничну потужність 120% (подальше збільшення потужності не допускається за умовами міцності деталей, що обертаються).

Для більш повного задоволення вимог продуктивності і міри стискування компресорних станцій, встановлених на різних ділянках газопроводів, необхідно встановлювати відцентрові нагнітачі, що відрізняються в першу чергу діаметром коліс і числом рівнів.

Так, нагнітачі фірми «Нуово-Піньоне» марки PCL поставляють з трьома модифікаціями 500, 800 і 1000, вказуючими діаметр робочих коліс (у мм.). Типова характеристика двоступінчатого нагнітача фірми «Нуово-Піньоне» представлена на діапазоні 62. По горизонтальній осі відкладена продуктивність нагнітача, по вертикальній осі у верхній частині характеристики – міра стискування нагнітача, в нижній частині осі – потребляемая нагнітачем потужність.

Характеристики продуктивності – міри стискування і продуктивності – споживаній потужності представлені у вигляді сімейства кривих, кожна з яких представляє лінію постійних величин частоти обертання. При роботі

на розрахунковому режимі (тиск на вході 49,7 кгс/см і температура +150С) з частотою обертання ротора 6200 об/хв нагнітач забезпечує продуктивність 17,1 млн. м³/сут при мірі стискування 1,513. Споживана при цьому потужність складає 9580 кВт, що нижче потужності ГТУ, яку маємо в своєму розпорядженні, а це означає, що агрегат має певний резерв потужності для ефективної роботи при підвищених температурах зовнішнього повітря. При максимальній частоті обертання нагнітача (6830 об/хв) можна отримати вищу продуктивність і міру стискування, але для цього потрібна велика потужність.

Характеристика представлена на діапазоні, відповідає конкретним вихідним параметрам газу, що транспортується, і стандартним параметрам (+150С і 760 мм рт.ст.) зовнішнього повітря. Для зручності користування характеристиками в умовах, що відрізняються від розрахункових, прийнято користуватися приведеними розрахунковими характеристиками нагнітачів.

Обслуговування ГПА в процесі пуску, зупинки і роботи здійснює оперативний черговий персонал, яким керує змінний інженер (диспетчер) [25]. Процес експлуатації ГПА не існує самостійно. Експлуатація компресорного цеху здійснюється як єдиний технологічний комплекс, взаємозв'язаний з лінійною частиною газопроводу і роботою сусідніх КС. Тому кількість працюючих ГПА і режим їх роботи визначається центральною диспетчерською службою (ЦДС) підприємства. Відповідно до її завдання оперативний персонал зобов'язаний забезпечувати оптимальний режим перекачування газу через компресорну станцію. Контроль за станом основного і допоміжного устаткування зводиться до періодичної реєстрації експлуатаційних параметрів, аналізу причин їх зміни і відхилення від нормальних величин і запобігання аварійним режимам роботи. Будь-які відхилення параметрів роботи від встановлених інструкціями з експлуатації ГПА повинні негайно з'ясуватися і усуватися. При неможливості визначити причину порушення агрегат має бути зупинений, а замість нього пущений інший, що знаходиться в резерві.

Технічна діагностика газоперекачувальних агрегатів.

Діагностика походить від грецького слова *diagnostikos* – здатність розпізнавати. Відповідно до ГОСТ 20911-75 технічна діагностика покликана розробляти методи і прилади для визначення технічного стану об'єктів діагностування (агрегатів) по параметрах, що характеризують протікання процесів в цьому агрегаті.

Залежно від постановки завдання можна розрізняти наступні види діагностики: функціональну, пов'язану з визначенням зміни основних енергетичних показників агрегату (наприклад, його потужності і ККД); структурну, оцінюючу характер і міру несправностей деталей механізму; візуальну, оцінюючу причини руйнування деталей при їх огляді, і прогнозуючу, яка передбачає характер протікання зносу деталей і час поломки.

В даний час в експлуатаційних умовах в тій чи іншій мірі застосовують наступні види діагностики: параметричну, вібраційну, по аналізу відпрацьованого масла, оптичні і акустичні методи для обстеження вузлів і деталей ГТУ та ін.

В умовах оцінки стану і роботи ГТУ на газопроводах важливе значення мають практично всі види діагностики, перш за все тому, що агрегати на КС безперервно працюють протягом багатьох сотень і тисяч годин без зупинки. Саме у цих умовах, не маючи можливості у ряді випадків по технологічних причинах зупинити агрегат, особливо важливо оцінити його поточний стан і передбачити хід зміни його основних характеристик (потужність, ККД) на перспективу.

В умовах КС в даний час закладена система виміру параметрів працюючих агрегатів, що постійно діє, по ГТУ і нагнітачеві. На станціях періодично вимірюють параметри робочого тіла Р, Т по тракту ГТУ, параметри газу Р, Т по тракту нагнітача, параметри доквілля. Проте на КС ще не організована до кінця надійна система комплексної оцінки стану агрегатів, наприклад, по потужності або по витраті паливного газу і тому

подібне, перш за все із-за складності достовірного визначення витрати робочого тіла по ГТУ або газу, що транспортується по нагнітачеві..

Слід зазначити, що стан агрегатів можна і доцільно оцінювати не лише значеннями вимірюваних параметрів, такими як Р і Т, але і такими характеристиками, як шум, вібрація, витоки робочого тіла по тракту агрегату тощо.

Виходячи з вищевикладеного в даній роботі експертним шляхом визначені наступні контрольовані параметри (характеристики стану) ГПА:

1. Температура на виході ГПА $z_{3,1}$.
2. Навантаження ГПА $z_{3,2}$.
3. Температура змащувального масла до підшипників $z_{3,3}$.
4. Температура змащувального масла на сливі з підшипника $z_{3,4}$.
5. Вібрація нагнітача $z_{3,5}$.
6. Тиск газу на вході нагнітача $z_{3,6}$.
7. Тиск газу на виході нагнітача $z_{3,7}$.
8. Вібрація двигуна $z_{3,8}$.
9. Тиск змащувального масла в колекторі $z_{3,9}$.
10. Тиск масла ущільнювача $z_{3,10}$.
11. Перепад масло/газ $z_{3,11}$.
12. Тиск паливного газу $z_{3,12}$.
13. Температура паливного газу $z_{3,13}$.
14. Тиск масла управління $z_{3,14}$.
15. Температура зовнішнього середовища $z_{3,15}$.

Однією з найважливіших експлуатаційних характеристик газоперекачувального агрегату є його надійність.

Під поняттям надійність агрегату розуміється його властивість виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених

експлуатаційних показників в заданих межах, відповідних режимам і умовам використання, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування.

Як видно з приведеного визначення, надійність агрегату є комплексною властивістю, яка залежно від призначення і умов роботи агрегату включає такі поняття, як працездатність, несправність, напрацювання на відмову, ремонтпридатність. Надійність агрегату в загальному випадку визначається надійністю його елементів, систем, його обслуговуючих, і характером їх взаємодії.

Під поняттям працездатність експлуатації агрегату розуміється здатність агрегату виконувати задані функції експлуатації в межах, допустимих нормативно-технічною документацією і інструкціями з його експлуатації.

Під поняттям несправність агрегату розуміється стан, при якому агрегат не відповідає хоч би одній з вимог, встановлених нормативно-технічною документацією, навіть в тому випадку, якщо ця несправність і не приводить відразу до несправності в його роботі.

Під поняттям відмова розуміється подія, що полягає в повній або частковій втраті працездатності агрегату. Тому безвідмовністю агрегату називається його властивість безперервно зберігати працездатність протягом заданого часу експлуатації.

Несправність в роботі агрегату на КС виникають з різних причин: через недоліки в конструкції вузла або агрегату, так звані конструктивні несправності; через порушення правил технології виготовлення або монтажу агрегату на станції, так звані технологічні несправності, і експлуатаційні несправності – через порушення правил експлуатації агрегатів на станції. Звідси і виникає таке дуже важливе для експлуатації поняття як напрацювання на відмову, одне з основних понять надійності агрегатів при їх експлуатації на газопроводах.

Окрім приведених визначень несправностей в роботі устаткування, можна розрізняти ще несправності систематичні, повні, часткові, раптові і поступові.

До систематичних несправностей можна віднести несправності елементів, вузлів і обслуговуючих допоміжних систем ГПА, довговічність яких у багато разів менша, ніж довговічність самого агрегату, наприклад, робота систем різного роду ущільнень, знос масляних і повітряних фільтрів і тому подібне, що вимагають періодичного ремонту і заміни; зазвичай ці дефекти усуваються на станції силами обслуговуючого персоналу.

Під поняттям повної відмови розуміється порушення працездатного стану агрегату в цілому, що вимагає тривалої його зупинки, заміни або складного ремонту.

Під поняттям часткової несправності розуміється стан, після виникнення якого, агрегат може використовуватися за призначенням, але з меншою ефективністю, наприклад, при розгерметизації регенераторів, витоку масла і тому подібне

Раптова відмова характеризується стрибкоподібною зміною одного або декількох параметрів, що визначають роботу ГПА. Раптова відмова практично миттєво переводить агрегат з працездатного стану в стан відмови.

Поступова відмова характеризується монотонною зміною одного або декількох заданих параметрів ГПА, наприклад, зниженням потужності агрегату із-за зносу вузлів і деталей.

У даній роботі введено поняття комбінацій несправностей, яке включає сукупність вищеперелічених типів відмов і несправностей в умовах накладення їх наслідків.

За допомогою того або іншого методу діагностики ГПА можна і вельми доцільно прогнозувати зміну технічного стану агрегату з метою запобігання вимушеним зупинкам ГПА, підвищенню ефективності їх експлуатації, визначенню видів і термінів проведення ремонтів.

Технічний стан газоперекачуючого агрегату істотним чином позначається на всій технології транспорту газів по газопроводу. Можна завжди стверджувати, що, якщо при даній витраті паливного газу по агрегату знизилася продуктивність нагнітача, то за інших рівних умов це могло статися із-за погіршення стану ГТУ, нагнітача або того і іншого разом.

В даний час у зв'язку з переходом до ринкової економіки і зростанням цін на електроенергію доля електроприводних ГПА в загальному об'ємі експлуатованих агрегатів в газовій промисловості зменшується, а доля газотурбінних ГПА декілька збільшується, що приводить до збільшення витрат природного газу на його транспортування.

Відомо, що основний вжиток природного газу на власні потреби КС доводиться на паливний газ, використовуваний як паливо в газотурбінній установці і що становить приблизно 8-10 % загального об'єму газу, який транспортується. У зв'язку з цим основне завдання зниження енергетичних витрат на КС полягає, перш за все, в економії паливного газу на власні потреби КС магістральних газопроводів.

Газотурбінні установки, використовувані як привід нагнітача природного газу, найбільш чутливі до зміни технічного стану своїх елементів в порівнянні з іншими типами теплових двигунів. З погіршенням технічного стану ГТУ для забезпечення потужності, необхідної для транспорту одного і того ж об'єму газу, як правило, потрібне збільшення витрати паливного газу. Основними джерелами погіршення технічного стану ГТУ є:

- забруднення проточної частини осьового компресора;
- збільшення радіальних зазорів в турбомашинах і в кінцевих ущільненнях;
- викривлення і прогар жарової труби камери згорання і, як наслідок, збільшення нерівномірності температурного поля на вході в турбіну;
- витоки повітря в регенераторі.

До забруднення проточної частини компресора схильні практично всі типи експлуатованих ГПА, причому різні типи ГТУ в однакових умовах по інтенсивності забруднення мають різне зниження потужності. Агрегат ГТК-10И, імеючий постійну частоту обертання турбокомпресора, найбільш чутливий до забруднення проточної частини компресора. Практикою встановлено, що найбільшу ефективність відновлення параметрів ГТУ має періодичне чищення компресора через кожних 1-2 тисячі годинників напрацювання, при цьому вдається відновити до 80 % зниження потужності ГТУ.

Збільшення радіальних зазорів у турбомашинах і кінцевих ущільненнях пов'язане головним чином з недосконалістю конструкції і підвищеною чутливістю до режимів пуску і зупинки, тобто до різких змін температури робочого тіла.

У зв'язку з цим виникає проблема виникнення комбінацій несправностей на загальному фоні чинників непрацездатності ГПА. Такі несправності можуть відбуватися одночасно в різних місцях (підсистемах) ГПА, мати неоднорідний характер і викликати ефект «накладення» наслідків. Існують типові комбінації несправностей, які в сукупності визначаються як множинні несправності, властиві даному ГПА. Означені комбінації призводять до певних змін тих або інших контрольованих параметрів системи. Поодинокі несправності, які складають подібні комбінації, визначаються експериментальним шляхом, а також їх ряд доповнюється знаннями експертів даної галузі.

Для укрупнення схеми взаємозв'язків підсистем різних рівнів газотранспортної системи розглянемо відносно ГПА наступні види несправностей:

1. Механічна несправність $s_{3,1}$.
2. Негерметичність $s_{3,3}$.
3. Зміна атмосферних умов $s_{3,3}$.

4. Збій електропостачання $s_{3,4}$.

Одним з основних напрямів технічної діагностики ГПА є метод параметричної діагностики як найбільш перспективний значний досвід використання в авіаційній і інших галузях промисловості. Основою методу параметричної діагностики є визначення зміни параметрів технічного стану агрегату або його окремих елементів по зміні технологічних і паливоенергетичних показників: потужності, продуктивності, ККД приводу і нагнітача в процесі експлуатації.

Про зміну технічного стану агрегату або його окремих елементів судять по зміні характеристик їх робочих режимів. Сама зміна зазвичай оцінюється порівнянням характеристик, побудованих для даного моменту, і часу, прийнятого як початкове. За початковий може бути прийнятий час проведення стендових, здавальних або інших видів випробувань агрегату. Незмінність характеристик агрегату говорить про його нормальний стан; «розшарування» характеристик свідчатиме про зміни, що відбуваються в ГПА.

Але існують ситуації в системі (при тій або іншій комбінації несправностей), коли подібне «розшарування» характеристик до моменту проведення діагностики повертається у вихідний стан (характеристика/характеристики стану об'єкту знову знаходиться в допустимому діапазоні), що є результатом накладення наслідків подій в контрольованому об'єкті неодиничних несправностей. У подібній ситуації локалізація комбінацій пошкоджень вимагає вживання нетрадиційних методів діагностування, подібних тим, які використовуються в експертних системах.

Відносно ГПА можна побудувати наступну експертну модель діагностування за наслідками зміни характеристик стану з причини певної сукупності комбінацій несправностей [13, 15]:

$$(X(3, c_{3,1}, s_{3,1}) \wedge X(3, c_{3,8}, s_{3,1})) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,3}, \uparrow) \vee D(z_{3,15}, \uparrow) \quad (5.11)$$

$$X(3, c_{3,11}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,12}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,1}, \uparrow) \quad (5.12)$$

$$X(3, c_{3,6}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,11}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,1}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,2}, \uparrow\downarrow) \quad (5.13)$$

$$X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,5}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,1}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,4}, \uparrow) \quad (5.14)$$

$$X(3, c_{3,15}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,5}, \uparrow) \quad (5.15)$$

$$X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,14}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,6}, \uparrow\downarrow) \vee D(z_{3,7}, \uparrow\downarrow) \quad (5.16)$$

$$X(3, c_{3,1}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,8}, \uparrow) \quad (5.17)$$

$$X(3, c_{3,5}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,3}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,9}, \downarrow) \quad (5.18)$$

$$X(3, c_{3,7}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,5}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,3}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,10}, \downarrow) \quad (5.19)$$

$$X(3, c_{3,7}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,5}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,15}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,11}, \uparrow\downarrow) \quad (5.20)$$

$$X(3, c_{3,11}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,6}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,5}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,1}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,12}, \downarrow) \quad (5.21)$$

$$X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,13}, \downarrow) \quad (5.22)$$

$$\begin{aligned} & X(3, c_{3,5}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,6}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,1}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,4}, s_{3,1}) \vee \\ & X(3, c_{3,7}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,11}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,13}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,15}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,16}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,14}, \downarrow) \end{aligned} \quad (5.23)$$

$$X(3, c_{3,1}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,2}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,15}, \uparrow) \quad (5.24)$$

$$X(3, c_{3,5}, s_{3,1}) \rightarrow D(z_{3,14}, \downarrow) \wedge D(z_{3,4}, \uparrow) \wedge D(z_{3,9}, \downarrow) \wedge D(z_{3,10}, \downarrow) \wedge D(z_{3,11}, \uparrow\downarrow) \wedge D(z_{3,12}, \uparrow\downarrow) \quad (5.25)$$

Вираз (5.15) показує, що несправність системи змащувального масла ГПА веде до зміни значень відразу шести описаних характеристик стану ГПА. Розглянемо детальніше систему змащувального масла. Це підсистема 3-го рівня ГТС, отже, її підсистеми є підсистемами 4-го рівня ГТС.

Система змащувального масла (СЗМ) ($c_{3,5}$) складається з наступних підсистем:

1. Головний масляний насос ($c_{4,1}$);
2. Допоміжний масляний насос ($c_{4,2}$);
3. Аварійний масляний насос ($c_{4,3}$);
- 4.- 5. Головні повнопотокові фільтри змащувального масла ($c_{4,4}$)-($c_{4,5}$);
6. Перемикальний клапан між головними повнопотоковими фільтрами змащувального масла ($c_{4,6}$);
7. Регулююча арматура ($c_{4,7}$);
8. Запобіжна арматура ($c_{4,8}$);
9. Замочна арматура ($c_{4,9}$);
10. Контрольно-вимірювальні прилади ($c_{4,10}$);
11. Маслоохолоджувачі ($c_{4,11}$);
12. Система маслопроводів ($c_{4,12}$).
13. Маслбак ($c_{4,13}$).
14. Електродвигуни насосів ($c_{4,14}$).
15. Підігрівач масла ($c_{4,15}$).
- 16.-19. Підшипники ($c_{4,16}$)-($c_{4,19}$).

До характеристик стану СЗМ експерти відносять:

1. Об'єм масла $Z_{4,1}$.
2. Тиск на виході насосів $Z_{4,2}$.
3. Перепад тиску на фільтрах $Z_{4,3}$.
4. Тиск масла в колекторі підшипника $Z_{4,4}$.
5. Температура масла на подачі в підшипнику $Z_{4,5}$.
- 6-9. Температура масла на сливі з кожного підшипника $Z_{4,6} - Z_{4,9}$.
10. Температура масла в маслобаке $Z_{4,10}$.

В системі змащувального масла експертами вказані наступні відмови:

1. Механічна несправність $s_{4,1}$.
2. Засмічення $s_{4,2}$.
3. Збій первинного перетворювача (несправність датчика) $s_{4,3}$.
4. Збій електропостачання $s_{4,4}$.
5. Витік $s_{4,5}$.
6. Зміна рівня $s_{4,6}$.
7. Зміна атмосферних умов $s_{4,7}$.
8. Негерметичність $s_{4,8}$.

Виходячи з вищепереліченого, можна побудувати наступну експериментальну модель діагностування системи змащувального масла ГПА КС ГТС:

$$X(4, c_{4,12}, s_{4,8}) \vee X(3, c_{3,6}, s_{3,2}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,2}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \rightarrow D(z_{4,1}, \downarrow) \quad (5.26)$$

$$X(4, c_{4,11}, s_{4,8}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \rightarrow D(z_{4,1}, \uparrow) \quad (5.27)$$

$$X(4, c_{4,13}, s_{4,6}) \vee X(4, c_{4,12}, s_{4,8}) \vee X(4, c_{4,7}, s_{4,8}) \vee X(4, c_{4,9}, s_{4,8}) \vee \\ \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \vee X(4, c_{4,1}, s_{4,1}) \vee X(4, c_{4,2}, s_{4,1}) \vee X(4, c_{4,2}, s_{4,4}) \rightarrow D(z_{4,2}, \downarrow) \quad (5.28)$$

$$X(4, c_{4,7}, s_{4,1}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \rightarrow D(z_{4,2}, \uparrow) \wedge D(z_{4,4}, \uparrow) \quad (5.29)$$

$$X(4, c_{4,8}, s_{4,2}) \vee X(4, c_{4,4}, s_{4,2}) \vee X(4, c_{4,5}, s_{4,2}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \rightarrow D(z_{4,3}, \uparrow) \quad (5.30)$$

$$X(4, c_{4,12}, s_{4,8}) \vee X(4, c_{4,13}, s_{4,6}) \vee X(3, c_{3,6}, s_{3,2}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,2}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \vee X(4, c_{4,14}, s_{4,4}) \rightarrow \\ \rightarrow D(z_{4,4}, \downarrow) \quad (5.31)$$

$$X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,3}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \rightarrow D(z_{4,5}, \uparrow \downarrow) \quad (5.32)$$

$$X(4, c_{4,16}, s_{4,1}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,4}) \rightarrow D(z_{4,6}, \uparrow) \quad (5.33)$$

$$X(4, c_{4,17}, s_{4,1}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,4}) \rightarrow D(z_{4,7}, \uparrow) \quad (5.34)$$

$$X(4, c_{4,18}, s_{4,1}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,4}) \rightarrow D(z_{4,6}, \uparrow) \quad (5.35)$$

$$X(4, c_{4,19}, s_{4,1}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,7}, s_{3,4}) \rightarrow D(z_{4,6}, \uparrow) \quad (5.36)$$

$$X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,3}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \vee X(4, c_{4,16}, s_{4,1}) \vee \\ \vee X(4, c_{4,17}, s_{4,1}) \vee X(4, c_{4,18}, s_{4,1}) \vee X(4, c_{4,19}, s_{4,1}) \vee X(3, c_{3,8}, s_{3,4}) \rightarrow D(z_{4,10}, \uparrow) \quad (5.37)$$

$$X(3, c_{3,8}, s_{3,1}) \vee X(4, c_{4,10}, s_{4,3}) \rightarrow D(z_{4,10}, \downarrow) \quad (5.38)$$

Отримана експериментальним шляхом експертна модель (5.1)-(5.38) діагностування газотранспортної системи демонструє взаємозв'язок

підсистем різних рівнів складної технічної системи, а також вплив комбінацій несправностей на зміни значень контрольованих характеристик системи.

5.4. Результати експериментів

Однією з найважливіших експлуатаційних характеристик газоперекачувального агрегату є його надійність. Під поняттям надійність агрегату розуміється його властивість виконувати задані функції, зберігаючи в часі значення встановлених експлуатаційних показників у заданих межах, що відповідають режимам та умовам використання, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування.

Як видно з наведеного визначення, надійність агрегату є комплексною властивістю, яка в залежності від призначення і умов роботи агрегату включає в себе такі поняття, як працездатність, несправність, напрацювання на відмову, ремонтпридатність. Надійність агрегату в загальному випадку визначається надійністю його елементів, систем, що його обслуговують, і характером їх взаємодії.

Під поняттям працездатність експлуатації агрегату розуміється здатність агрегату виконувати задані функції експлуатації в межах, допустимих нормативно-технічною документацією та інструкціями по його експлуатації.

Під поняттям несправність агрегату розуміється стан, при якому агрегат не відповідає хоча б одній з вимог, встановлених нормативно-технічною документацією, навіть в тому випадку, якщо ця несправність і не приводить відразу до відмови в його роботі.

Під поняттям відмови розуміється подія, що полягає в повній або частковій втраті працездатності агрегату. Тому безвідмовністю агрегату називається його властивість безупинно зберігати працездатність протягом заданого часу експлуатації.

Відмови в роботі агрегату на КС виникають з різних причин: через недоліки в конструкції вузла або агрегату, так звані конструктивні відмови; через порушення правил технології виготовлення або монтажу агрегату на станції, так звані технологічні відмови, і експлуатаційні відмови – через порушення правил експлуатації агрегатів на станції. Звідси і виникає дуже важливе для експлуатації поняття, як напрацювання на відмову, одне з основних у надійності агрегатів при їх експлуатації на газопроводах.

Крім наведених визначень відмов у роботі обладнання, можна розрізняти ще відмови систематичні, повні, часткові, раптові і поступові. До систематичних відмов можна віднести відмови елементів, вузлів і обслуговуючих допоміжних систем ГПА, довговічність яких у багато разів менше, ніж довговічність самого агрегату, наприклад, робота систем різного роду ущільнень, знос масляних і повітряних фільтрів і т. п., що вимагають періодичного ремонту і заміни; зазвичай ці дефекти усуваються на станції силами обслуговуючого персоналу.

Під поняттям повної відмови розуміється порушення працездатного стану агрегату в цілому, що вимагає тривалої його зупинки, заміни або складного ремонту.

Під поняттям часткової відмови розуміється стан, після виникнення якого агрегат може використовуватися за призначенням, але з меншою ефективністю, наприклад, при розгерметизації регенераторів, витоку масла і т. п.

Раптова відмова характеризується стрибкоподібною зміною одного або декількох параметрів, що визначають роботу ГПА. Раптова відмова практично миттєво переводить агрегат з працездатного стану в стан відмови.

Поступова відмова характеризується монотонною зміною одного або декількох заданих параметрів ГПА, наприклад, зниженням потужності агрегату через зношування вузлів і деталей.

Під поняттям довговічність розуміється здатність агрегату зберігати свою працездатність при встановленій системі технічного обслуговування і

ремонту до настання граничного стану. Під граничним станом агрегату розуміється стан, коли його подальша експлуатація повинна бути припинена внаслідок непереборного відхилення заданих параметрів від установлених меж або невіправного зниження ефективності експлуатації нижче допустимої, або невіправного порушення вимог техніки безпеки, або необхідності проведення капітального ремонту.

Під поняттям ремонтпридатність агрегату розуміється його пристосованість до попередження і виявлення причин виникнення відмов, несправностей, і усунення їх наслідків шляхом проведення ремонтів і технічного обслуговування.

Під поняттям «збереженість» розуміється властивість агрегатів зберігати справний і працездатний стан протягом зберігання і після транспортування.

В даний час оцінка показників надійності ГПА на газопроводах здійснюється системою показників, заснованих на визначенні часу знаходження агрегату в тому чи іншому експлуатаційному стані: сумарному часу знаходження агрегату в роботі T_p за звітний період T_K ; часу знаходження агрегату в резерві $T_{PEЗ}$; часу знаходження агрегату в плановому ремонті $T_{ПР}$; часу вимушеного простою T_B агрегату за звітний період T_K , зазвичай, за звітний період приймається календарний рік [22, 25]:

$$T_{Л} = T_p + T_{PEЗ} + T_{ПР} + T_B = 365 \text{ днів} . \quad (5.54)$$

На основі зіставлення наведених тимчасових станів агрегату і визначаються показники його надійності:

1. Коефіцієнт технічного використання агрегату, який визначається як відношення часу перебування ГПА в роботі на час перебування агрегату в працездатному стані, часу його вимушених простоїв і ремонтів за розглянутий період експлуатації:

$$T_p = \frac{T_p}{T_p + T_{IP} + T_B}; \quad (5.55)$$

2. Коефіцієнт готовності агрегату, який визначається як відношення часу знаходження ГПА в працездатному стані до суми часу знаходження його в робочому стані і часу вимушеного простою:

$$K_{\Gamma} = \frac{T_p}{T_p + T_B}; \quad (5.56)$$

3. Коефіцієнт оперативної готовності, який визначається як відношення часу знаходження ГПА в роботі або в резерві, до загального календарному відрізьку часу:

$$K_{OG} = \frac{T_p + T_{PE3}}{T_K}; \quad (5.57)$$

4. Коефіцієнт, що характеризує середнє напрацювання агрегату на число відмов (r) в звітному відрізьку часу:

$$T_0 = \frac{T_p}{r}; \quad (5.58)$$

5. Коефіцієнт, що характеризує час відновлення працездатності агрегату, який визначається як відношення загального часу вимушеного простою ГПА до числа відмов за аналізований відрізок часу:

$$K_B = \frac{T_B}{r}. \quad (5.59)$$

Досвід експлуатації газотурбінних агрегатів на газопроводах показує: чисельні значення коефіцієнтів технічного використання для ГПА різних типів змінюються в діапазоні 0,75-0,95; коефіцієнт готовності в діапазоні 0,80-0,96; коефіцієнт оперативної готовності – в діапазоні 0,84-0,88 [30-32].

Напрацювання газотурбінних ГПА на одну відмову в цілому по парку агрегатів знаходиться в середньому за останні п'ять років експлуатації на рівні 2600-2900 год.

За типами агрегатів цей показник, як один з основних показників надійності ГПА в умовах експлуатації, розподіляється приблизно таким чином (Табл. 5.1) [19, 22].

Таблиця 5.1

Напрацювання на відмову у ряду ГПА з газотурбінним приводом

| Тип ГПА | Кількість ГПА, шт. | Напрацювання на відмову, год. |
|----------|--------------------|-------------------------------|
| ГТ-750-6 | 100 | 4500 |
| ГТ-6-750 | 140 | 9800 |
| ГТН-6 | 80 | 11500 |
| ГТК-10 | 790 | 7900 |
| ГПУ-10 | 270 | 6200 |

Досвід експлуатації агрегатів на газопроводах показує, що в даний час до агрегатів нового покоління, що надходять на газопроводи, можуть бути пред'явлені наступні вимоги (не менше): коефіцієнт технічного використання на рівні 0,93-0,95; коефіцієнт готовності на рівні 0,98-0,985; коефіцієнт напрацювання на відмову на рівні 3,5-4,5 тис. год.; ресурс між середніми ремонтами 10-13 тис. год; ресурс між капітальними ремонтами 20-25 тис. год; повний ресурс до списання ГПА 100 тис. год.

Основним показником (формула 5.54), зменшення якого підвищить рівень надійності ГПА є час вимушеного простою T_B . Саме на випередження вимушеного простою спрямована значна частина досліджень в області діагностування технічних систем.

В даному дослідженні проведено ряд експериментів, в ході яких було визначено причини вимушених остановів ГПА на компресорній станції (Акт провадження).

Було опрацьовано статистику по 1 компресорній станції, що містить 7 ГПА: 5 – в роботі, 1 – в резерві, 1 – в ремонті. Відповідно до побудованої моделі (п.5.3.) в ході експерименту виявлено несправності, які зафіксовано у статистичних даних, а також деякі несправності, які були сховані через накладання їх наслідків (таблиця 5.2).

Таблиця 5.2

Виявлені несправності по 7 ГПА за рік

| Години | Кількість відомих несправностей | З урахуванням схованих несправностей |
|--------|---------------------------------|--------------------------------------|
| 744 | 3 | 8 |
| 1416 | 3 | 2 |
| 2160 | 2 | 4 |
| 2880 | 3 | 4 |
| 3624 | 3 | 4 |
| 4344 | 3 | 4 |
| 5088 | 7 | 10 |
| 5832 | 4 | 5 |
| 6552 | 4 | 8 |
| 7296 | 3 | 4 |
| 8016 | 3 | 3 |
| 8760 | 4 | 6 |

На рис. 5.4 відображено зміну кількості несправностей впродовж звітнього періоду.

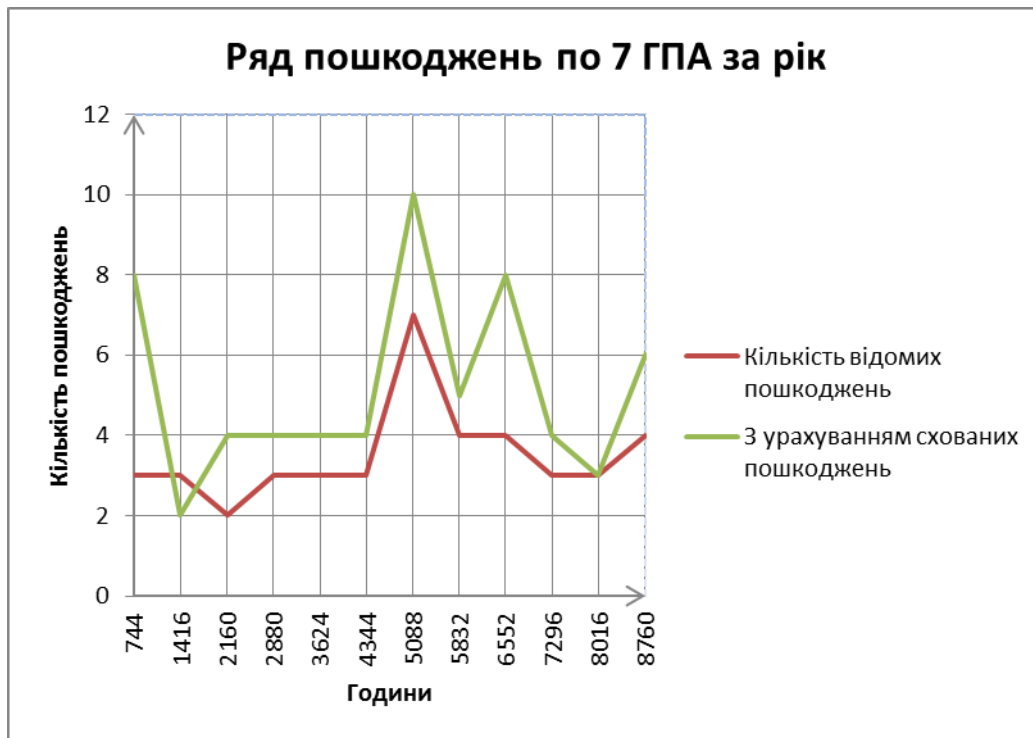


Рис. 5.4. Зміна кількості несправностей

На рисунку 5.5 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.

Жовтим кольором виділено несправності, які відомі у статистичних даних.

Коричневим кольором виділено несправності, які визначені за допомогою побудованої технології виявлення комбінацій 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.

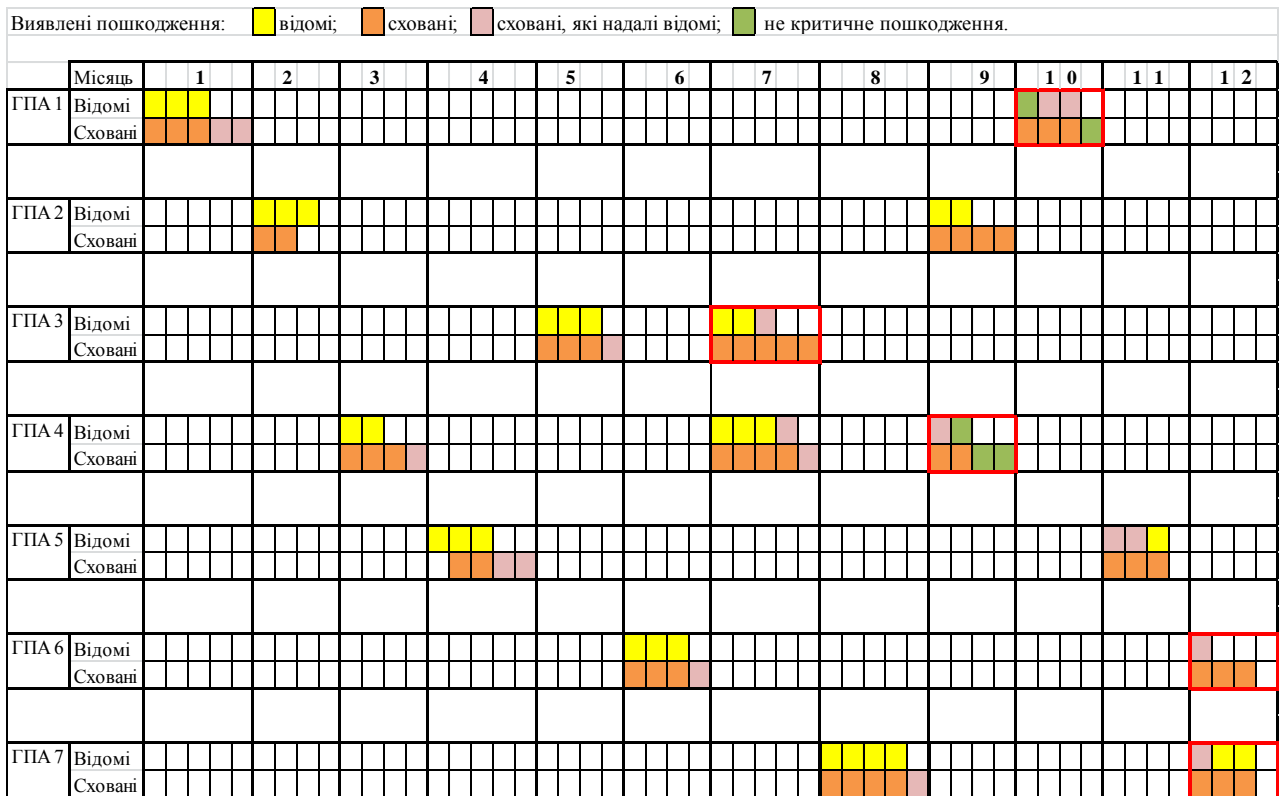


Рис. 5.5. Виявлені несправності при планових ремонтах та вимушених остановах ГПА

Аналіз отриманих практичних даних показав, що логіко-математичні моделі, які були 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 ефект 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 ефект накладання 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.

5.5. Висновки до п'ятого розділу

1. 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).

2. 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.

3. 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.

4. 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 ТОВС. Результати наукових досліджень впроваджено у виробничий процес ДП "Завод №410 ЦА" (Додаток 2, акт впровадження грудень 2013 р.); УМГ "Черкаситрансгаз" (Додаток 3, акт впровадження лютий 2014 р.); АТ «Укртрансгаз» (Додаток 4, акт впровадження березень 2020 р.), а також у науково-дослідну роботу в Національному авіаційному університеті (Додаток 1, 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.

Основні результати дисертаційної роботи, представлені в розділі 5, опубліковані в працях автора [1-16].

Список використаних джерел до п'ятого розділу

1. 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.
2. 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.
3. N. Marchenko, O. 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.

4. 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.
5. 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.
6. Н. Марченко, В. Нечипорук, О. Нечипорук, Ю. Пепа, Методи оцінювання точності інформаційно-вимірювальних систем діагностики. *Монографія. Київ: «Задруга», 2014, 200 с.*
7. 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.
8. О. Нечипорук, Н. Марченко, «Діагностика віброакустичних сигналів електричних машин», *«Black sea» scientific journal of academic research*, Vol.11, Iss. 4, pp.72-77, 2014.
9. 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.
10. 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.
11. 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.

12. 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.
13. Е. Нечипорук, А. Попов, «Экспериментальная логико-лингвистическая модель диагностирования сложных систем», *Авиационно-космическая техника и технология*, №10/117, С. 154-158, 2014.
14. Н. Марченко, О. Нечипорук, «Диагностика виброакустических сигналов электрических машин», *Современная наука: проблемы, прогнозы и решения: междунар. науч.-практ. конф.*, Тбилиси, Грузия, 2014, С. 72-77.
15. О. Литвиненко, О. Нечипорук, Логіко-математичні методи діагностування складних систем. *Монографія*. Київ: «Артмедіа принт», 2016, 166 с.
16. 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.
17. Г. Бордюгов, А. Апостолов, А. Бордюгов, Фигурные потери природного газа. *Газовая промышленность*, № 10, 1997.
18. М. Волков, А. Михеев, К. Конев, Справочник работника газовой промышленности. *Москва: «Недра»*, 1989.
19. А. Козаченко, Основы эксплуатации газотурбинных установок на магистральных газопроводах. *Москва: ГПНГ им. И.М.Губкина*, 1996.
20. А. Козаченко, В. Никишин, Термодинамические характеристики природных газов. *Москва: ГПНГ им. И.М.Губкина*, 1995.
21. А. Козаченко, В. Никишин, Основы ресурсоэнергосберегающих технологий трубопроводного транспорта природных газов. *Москва: ГАНГ им. И.М.Губкина*, 1996.
22. К. Отт, Основы технической эксплуатации компрессорных цехов с газотурбинным приводом (ОТЭ). *Москва: ИРЦ Газпром*, 1996.

23. Б. Поршаков, Б. Романов, Основы термодинамики и теплотехники. *Москва: «Недра», 1988.*
24. А. Седых, Потери газа на объектах магистрального газопровода. *Москва: ИРЦ Газпром, 1993.*
25. В. Щуровский, Ю. Зайцев, Газотурбинные газоперекачивающие агрегаты. *Москва: «Недра», 1994.*
26. Б. Поршаков, А. Лопатин, А. Назарьина, А. Рябченко, Повышение эффективности эксплуатации энергопривода компрессорных станций. *Москва: «Недра», 1992.*
27. А. Ермошкин, И. Радчик, В. Федосеев, Зарубежные газоперекачивающие агрегаты. *Москва: «Недра», 1979 г.*
28. Б. Баммерт, У. Занстеде, «Исследование влияния шероховатости поверхности и изменений профилей лопаток на характеристики газовой турбины», *Труды американского общества инженеров-механиков. Серия Энергетические машины и установки. №3, С. 39-45, 1972.*
29. Б. Баммерт, А. Воелк, «Влияние шероховатости поверхности лопаток на аэродинамические и рабочие характеристики осевого компрессора», *Труды американского общества инженеров-механиков. Серия Энергетические машины и установки, №2, С. 59-65, 1990.*
30. С. Дмитриев, Дж. Агарвал, Е. Путятин, «Классификация состояний ГТД с глубиной диагностирования до узла», *Авиационно-космическая техника и технология, Вып.19, С. 358-364, 2000.*
31. Н. Кулик С. Параметрические методы оценки технического состояния авиационных ГТД в эксплуатации. *Киев: КИИГА, 1993, 139 с.*
32. А. Козаченко, Основы эксплуатации газотурбинных установок на магистральных газопроводах. *Москва: ГАНГ им. И. М. Губкина, 1996.*
33. К. Отт, Основы технической эксплуатации компрессорных цехов с газотурбинным приводом (ОТЭ). *Москва: ИРЦ Газпром, 1996.*

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 апіорного 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.

Результати впровадження підтверджено відповідними актами.

ДОДАТОК А. Документи, що підтверджують впровадження результатів дисертації

ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник головного інженера
Філії "Оператор газотранспортної
системи України"



Михалевич О.Т.

03 20 20р.

ДОВІДКА ПІДТВЕРДЖЕННЯ результатів науково-дослідної роботи

Ми, що нижче підписалися, начальник науково-технічного управління АТ «Укртрансгаз» к.т.н. Орлов І.О., завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління НАУ д.т.н., професор Литвиненко О.Є.

склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою докторської дисертаційної роботи Нечипорук Олени Петрівни «Інформаційна технологія діагностування багаторівневих технічних систем» підтверджують вірність наукових положень запропонованої інформаційної технології

| Результат і досягнутий фактичний ефект | Форма впровадження |
|--|--|
| Результат діагностування багаторівневої технічної системи – виявлення комбінацій несправностей, які 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. | Інформаційна технологія ідентифікації комбінацій прихованих несправностей в багаторівневих технічних системах на основі налаштування узагальненої інтелектуальної моделі діагностування на ситуацію. Адекватність побудованих експертних моделей діагностування компонентів газотранспортної системи підтверджено дослідженнями. |

Даний акт не є підставою для фінансових розрахунків

Завідувач кафедри КСУ НАУ

 О.Є. Литвиненко

Начальник науково-технічного управління АТ «Укртрансгаз»

 І.О. Орлов

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор Національного авіаційного
університету з наукової роботи

В. П. Харченко

2014 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Директор
УМГ «Черкаситрансгаз»

А.А. Мандра

2014 р.



**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів науково-дослідної роботи**

Ми, що нижче підписалися, головний інженер УМГ «Черкаситрансгаз» Кучерук М.В., завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління НАУ Литвиненко О.Є.

склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою докторської дисертаційної роботи Нечипорук Олени Петрівни "Інформаційні технології діагностування складних систем"

використовуються у виробничому процесі транспортування природного газу УМГ «Черкаситрансгаз»

| Найменування впровадженого результату | Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект |
|---|--|
| Результати дисертаційного дослідження, які базуються на використанні технології діагностування складних технічних систем, що дозволяє ідентифікувати множинні відмови в умовах накладення їх наслідків. | Методика визначення комбінацій елементарних відмов в складних об'єктах газотранспортної системи на основі побудови експертної логіко-лінгвістичної моделі діагностування складних систем та реалізації стратегії спрямованого пошуку при визначенні місця і виду відмов. |

Завідувач кафедри КСУ НАУ

Головний інженер
УМГ «Черкаситрансгаз»

 О.Є. Литвиненко

 М.В. Кучерук

«Затверджую»
 Директор УМГ «Черкаситрансгаз»
 Мацдра А.А.



План

проведення наукових досліджень за темою докторської дисертаційної роботи
 Нечипорук Олени Петрівни «Інформаційні технології діагностування складних систем»
 на базі УМГ «Черкаситрансгаз»

Науковий керівник: д.т.н., проф. Литвиненко О.С.
 Виконавці: Нечипорук О.П., Нечипорук В.В.
 Експерти: Качур В.В. – заступник головного диспетчера УМГ «Черкаситрансгаз»,
 Сташинський О.П. – інженер I кат. відділу експлуатації компресорних станцій,

Мета: перевірка адекватності моделювання несправного стану підсистем першого рівня газотранспортної системи (ГТС).

| № | Етапи наукових досліджень | Очікувані результати | Прим. |
|---|---|--|-------|
| 1 | Визначення структури першого рівня ГТС (основні підсистеми першого рівня). | Встановлення причинно-наслідкових взаємозв'язків між підсистемами першого рівня ГТС. | |
| 2 | Визначення контрольованих параметрів (характеристик) стану підсистем першого рівня ГТС. | Встановлення експертним шляхом величини зміни значення тієї чи іншої характеристики стану, що викликана окремою типовою комбінацією елементарних відмов/пошкоджень. | |
| 3 | Визначення комбінацій пошкоджень, що відбуваються в підсистемах першого рівня ГТС та впливають на зміну значення контрольованих параметрів стану підсистем, що розглядаються. | Встановлення залежності зміни значення характеристик стану елементів підсистем першого рівня від комбінацій елементарних відмов/пошкоджень, що відбулись в системі на момент діагностування. | |

Відповідальний виконавець

 Нечипорук О.П.

«Узгоджено»
 Головний інженер

 Качур М.В.



«Затверджую»
 Начальник Кременчуцького ЛВУМГ
 Кучерук В.М.
 « 22 » 20 14 р.

План

проведення наукових досліджень за темою докторської дисертаційної роботи
 Нечипорук Олени Петрівни «Інформаційні технології діагностування складних систем»
 на базі Кременчуцького ЛВУМГ

Науковий керівник: д.т.н., проф. Литвиненко О.Є.

Виконавці: к.т.н., доц. Нечипорук О.П., к.т.н., доц. Нечипорук В.В.

Експерти: провідний диспетчер з транспортування газу Черніков І.Є.,
диспетчер з транспортування газу 1-ї категорії Кот А.П.,
інженер з ремонту технологічного устаткування Рожко О.Б.

Мета: перевірка адекватності моделювання несправного стану підсистем нижніх рівнів газотранспортної системи (ГТС).

| № | Етапи наукових досліджень | Очікувані результати | Прим. |
|---|---|--|-------|
| 1 | Визначення структури підсистем нижніх рівнів ГТС на прикладі підсистем 2-го, 3-го та 4-го рівнів: компресорна станція (КС), газоперекачувальний агрегат (ГПА), система змащувального мастила (СЗМ). | Встановлення причинно-наслідкових взаємозв'язків між елементами підсистем нижніх рівнів ГТС. | |
| 2 | Визначення контрольованих параметрів (характеристик) стану підсистем нижніх рівнів ГТС. | Встановлення експертним шляхом величини зміни значення тієї чи іншої характеристики стану, що викликана окремою типовою комбінацією елементарних відмов/пошкоджень. | |
| 3 | Визначення комбінацій пошкоджень, що відбуваються в підсистемах нижніх рівнів ГТС та найбільш суттєво і безпосередньо впливають на зміну значення кожної з контрольованих характеристик стану підсистем, що розглядаються. | Встановлення залежності зміни значення характеристик стану елементів підсистем нижніх рівнів від комбінацій елементарних відмов/пошкоджень, що відбулись в системі на момент діагностування. | |
| 4 | Визначення комбінацій пошкоджень, що відбуваються в підсистемах нижніх рівнів ГТС та викликають зміну значень не тільки «основної» (для даної комбінації), але і інших контрольованих характеристик стану підсистеми, до якої відноситься «основна» характеристика. | Виявлення побічного ефекту першого роду. | |

Продовження додатку А

| № | Етапи наукових досліджень | Очікувані результати | Прим. |
|---|---|---|-------|
| 5 | Визначення комбінацій пошкоджень, що відбуваються в підсистемах нижніх рівнів ГТС та викликають зміну значення не тільки «основної» контрольованої характеристики стану тієї чи іншої підсистеми визначеного рівня, але й зміну значень деяких характеристик стану інших підсистем даного рівня, які взаємодіють з підсистемою, що розглядається. | Виявлення побічного ефекту другого роду. | |
| 6 | Визначення комбінацій пошкоджень, що відбуваються в підсистемах нижніх рівнів ГТС та викликають зміну значення не тільки «основної» контрольованої характеристики стану тієї чи іншої підсистеми будь-якого рівня, але й зміну значень деяких характеристик стану підсистем інших рівнів, які взаємодіють з підсистемою, що розглядається. | Виявлення побічного ефекту третього роду. | |
| 7 | Визначення комбінацій пошкоджень, що відбуваються в підсистемах нижніх рівнів ГТС та викликають однакові наслідки. | Встановлення однакових змін значень тих чи інших контрольованих параметрів. | |
| 8 | Визначення комбінацій пошкоджень, що відбуваються в підсистемах нижніх рівнів ГТС та викликають протилежні за знаком зміни значень одних і тих самих характеристик стану підсистем (ефект накладення наслідків). | Виявлення ефекту накладення наслідків комбінацій пошкоджень, що відбуваються в підсистемах нижніх рівнів ГТС. | |

Відповідальний виконавець

докторант кафедри комп'ютеризованих
систем управління Національного
авіаційного університету

 Нечипорук О.П.

«Узгоджено»

Начальник компресорної станції

«Кременчук»

 Коваль В.М.

ЗАТВЕРДЖУЮ

Проректор Національного авіаційного
університету з наукової роботи

В. П. Харченко

2013 р.



ЗАТВЕРДЖУЮ

Заступник генерального директора
– технічний директор
ДП «ЗАВОД №410 ЦА»

В.В. Жигинас

2013 р.



**АКТ ВПРОВАДЖЕННЯ
результатів науково-дослідної роботи**

Ми, що нижче підписалися, перший заступник технічного директора –
головний технолог ДП «Завод №410 ЦА» Кіпров О.В., завідувач кафедри
комп'ютеризованих систем управління НАУ Литвиненко О.С.

склали цей акт про те, що результати наукових досліджень за темою
докторської дисертаційної роботи Нечипорук Олени Петрівни
“Інформаційні технології діагностування складних систем”
використовуються у виробничому процесі ДП «Завод №410 ЦА»

| Найменування впровадженого результату | Форма впровадження і досягнутий фактичний ефект |
|--|---|
| Результати дисертаційного дослідження, які базуються на використанні технології визначення комбінацій пошкоджень в складних системах (поглиблений аналіз даних). | Методика визначення комбінацій пошкоджень в складних системах на основі побудови експертної логічної моделі діагностування при незалежності відхилень характеристик стану окремих елементів та формальній неподільності складної системи. |

Завідувач кафедри КСУ НАУ

Перший заступник технічного
директора – головний технолог

О.С. Литвиненко

О.В. Кіпров

«ПОГОДЖЕНО» Проректор з навчальної роботи НАУ
 «ЗАТВЕРДЖУЮ» Проректор з наукової роботи НАУ
 А. Полухін В. Харченко
 «16» 09 2014 р. «16» 09 2014 р.



АКТ

впровадження результатів докторської дисертаційної роботи
 Нечипорук Олени Петрівни на тему: «Інформаційні технології діагностування складних систем» у науково-дослідну роботу в Національному авіаційному університеті

Ми, що нижче підписалися, директор Інституту комп'ютерних інформаційних технологій, д.т.н., проф. Юдін О.К. та завідувач кафедри комп'ютеризованих систем управління, д.т.н., проф. Литвиненко О.Є. склали акт про те, що результати докторської дисертації Нечипорук Олени Петрівни впроваджені в науково-дослідну роботу № 782-ДБ12 «Розробка моделюючої системи польоту БПЛА у комбінованому режимі» (держ. реєстр. № 0112U002051).

| Форма впровадження | Ефективність від впровадження |
|--|--|
| Логіко-лінгвістичні моделі діагностування багаторівневих систем, які визначають комбінації пошкоджень, що відбуваються в підсистемах різних рівнів та впливають на зміну значення контрольованих параметрів стану системи. | 1. Підвищення достовірності визначення місця виникнення пошкоджень і виду пошкоджень в багаторівневих технічних системах. 2. Скорочення часу локалізації пошкоджень в багаторівневих технічних системах. 3. Встановлення достовірної залежності зміни значення характеристик стану елементів підсистем різних рівнів від комбінацій елементарних відмов/пошкоджень, що відбулись в системі на момент діагностування. |

Завідувач кафедри
 комп'ютеризованих систем управління,
 д.т.н., проф.

 О. Литвиненко

Директор Інституту
 комп'ютерних інформаційних технологій,
 д.т.н., проф.

 О. Юдін



