

Житомирська політехніка	МІНІСТЕРСТВО ОСВІТИ І НАУКИ УКРАЇНИ ДЕРЖАВНИЙ УНІВЕРСИТЕТ «ЖИТОМИРСЬКА ПОЛІТЕХНІКА» Система управління якістю відповідає ДСТУ ISO 9001:2015	Ф-20.09- 05.01/152.00.1/Б/ВК6.2-2021
	Екземпляр № 1	Арк 52 / 1

## ЗАТВЕРДЖЕНО

Науково-методичною радою  
Державного університету  
«Житомирська політехніка»

протокол від \_\_\_\_\_ 20\_\_ р.  
№ \_\_\_\_\_

### КОНСПЕКТ ЛЕКЦІЙ з навчальної дисципліни «НАДІЙНІСТЬ, ДІАГНОСТИКА ТА АВТОМАТИЗОВАНИЙ КОНТРОЛЬ ІНФОРМАЦІЙНО-ВИМІРЮВАЛЬНИХ СИСТЕМ»

спеціальності 152 «Метрологія та інформаційно-вимірвальна техніка»  
освітньо-професійна програма «Комп'ютеризовані інформаційно-вимірвальні  
системи»

факультет комп'ютерно-інтегрованих технологій, мехатроніки і робототехніки

кафедра метрології та інформаційно-вимірвальної техніки

Схвалено на засіданні кафедри  
метрології та інформаційно-  
вимірвальної техніки  
27 серпня 2021 р., протокол № 9

Завідувач кафедри  
\_\_\_\_\_ Юрій ПОДЧАШИНСЬКИЙ

Розробник: к.т.н., доц. кафедри метрології  
та інформаційно-вимірвальної техніки ЧЕПЮК Ларіна

Житомир  
2021 – 2022 н.р

## ЗМІСТ

Лекція №1. Мета і завдання технічної діагностики.....	3
Лекція №2. Системи діагнозу технічного стану.....	9
Лекція №3. Математичні моделі об'єктів і систем діагнозу.....	14
Лекція №4. Таблиця функцій несправностей об'єктів діагнозу.....	20
Лекція №5. Способи і засоби реалізації алгоритмів діагнозу .....	27
Лекція №6. Безперервні об'єкти діагнозу.....	36
Лекція №7. Графи причинно-наслідкових зв'язків.....	39
Лекція №8. Діагноз технічного стану об'єкта з урахуванням можливих несправностей датчиків.....	45

## **ЛЕКЦІЯ 1. Мета і завдання технічної діагностики.**

### **План лекції:**

1. Загальні поняття технічної діагностики.
2. Засоби діагностики.
3. Алгоритми технічної діагностики.
4. Взаємозв'язок завдань діагностики і проектування.

### **1. Загальні поняття технічної діагностики.**

**Діагноз** у перекладі із грецького «диагносис» означає розпізнавання, визначення. У медицині, наприклад, це – визначення стану людини, а в техніці – визначення стану об'єкта технічної природи. Об'єкт, стан якого визначається, будемо називати *об'єктом діагнозу*. Діагноз являє собою процес дослідження об'єкта діагнозу. Завершенням цього дослідження є одержання *результату діагнозу*, тобто висновку про стан об'єкта діагнозу. Характерними прикладами результатів діагнозу стану технічного об'єкта є висновки виду: ***об'єкт справний, об'єкт несправний, в об'єкті є така-то несправність.***

**Діагностика** є галузь знань, що включає в себе теорію й методи організації процесів діагнозу, а також принципи побудови засобів діагнозу. Коли об'єктами діагнозу є об'єкти технічної природи, говорять про *технічну діагностику*.

Щоб більш чітко побачити область, охоплювану технічною діагностикою, розглянемо три типи завдань по визначенню стану технічних об'єктів.

До першого типу відносяться завдання по визначенню стану, у якому перебуває об'єкт у даний момент часу. Це — ***завдання діагнозу***. Завданнями другого типу є завдання по прогнозуванню стану, у якому виявиться об'єкт у деякий майбутній момент часу. Це — ***завдання прогнозу*** (від грецького «прогносис» — передбачення, пророкування). Нарешті, до третього типу відносяться завдання визначення стану, у якому перебував об'єкт у деякий момент часу в минулому. За аналогією можна говорити, що це ***завдання генеза*** (від грецького «генезис» — народження, виникнення).

Завдання першого типу формально варто віднести до *технічної діагностики*, а другого типу — до *технічної прогностики* (або, як частіше говорять, до технічного прогнозування). До завдань технічної прогностики ставляться, наприклад, завдання, пов'язані з визначенням терміну служби об'єкта або із призначенням періодичності його профілактичних перевірок і ремонтів. Вирішуються ці завдання шляхом визначення можливих або ймовірних еволюцій стану об'єкта, що починаються в даний момент часу.

Тоді галузь знання, що повинна займатися рішенням завдань третього типу, природно назвати *технічною генетикою* (по грецьки термін «генетикос» означає «народження, походження»).

Завдання технічної генетики виникають, наприклад, у зв'язку з розслідуванням аварій і їхніх причин, коли справжній стан об'єкта в результаті появи першопричини, що викликала аварію, істотно відрізняється від стану, у якому він був у минулому. Вирішуються ці завдання шляхом визначень можливих або ймовірних передісторій, що ведуть в сучасний (теперішній) стан об'єкта.

### **Приклади:**

1. Поточна діагностика телевізора, комп'ютера, автомобіля. Результат – об'єкт діагностики справний (виконує всі належні функції), або несправний (не виконує хоча б одну якусь функцію).
2. Прогнозування технічного стану (нормальної роботи) атомної електростанції, міжнародної космічної станції, автомобіля на декілька років наперед після проведення поточної діагностики. Результат – АЕС, МКС, автомобіль при передбачених умовах з імовірністю 90% (70%, 80%) зможуть виконувати свої функції до 2020-го року.

3. Поточна діагностика (державна комісія з розслідування авіакатастрофи) проаналізувала стан обломків літака, переговори диспетчерів з екіпажем літака, стан «чорних скриньок» літака) встановлює причини, що привели до катастрофи.

**Таким чином**, знання стану в даний момент часу є обов'язковим як для генеза, так і для прогнозу. Тому технічна діагностика являє собою основу технічної генетики й технічної прогностики, і природно, що останні розвиваються в тісному зв'язку з першою.

Посилення інтересу до технічної діагностики в останні роки пояснюється створенням і застосуванням у світовому господарстві усе більше складних виробів, пристроїв і систем (об'єктів) при безперервному збільшенні темпів їх виробництва, росту інтенсивності їх використання і підвищенні вимог до їх надійності. У цих умовах інтуїтивні методи й ручні способи визначення стану складних об'єктів виявляються малоефективними або навіть непридатними.

В «житті» будь-якого об'єкта завжди можна виділити два етапи: *етап виробництва*, коли об'єкт створюється, і *етап експлуатації*, коли об'єкт застосовується по призначенню (виконує визначений йому робочий алгоритм функціонування), піддається профілактичним перевіркам, перевіркам перед застосуванням або після застосування, ремонту й т.п. Іноді доцільно виділяти в якості самостійного також *етап зберігання* об'єкта або перебування його в резерві.

Для будь-якого об'єкта на кожному етапі його життя задаються певні технічні вимоги. Бажано, щоб об'єкт завжди відповідав цим вимогам. Однак в об'єкті можуть виникати несправності, що порушують зазначену відповідність. Тоді завдання полягає в тому, щоб створити спочатку (на етапі виробництва) або відновити порушене несправністю (на етапах експлуатації або зберігання) відповідність об'єкта технічним вимогам. Рішення цього завдання можливо без періодичного або безперервного діагнозу стану об'єкта.

У багатьох випадках необхідно переконуватися в тому, що об'єкт справний, тобто в ньому немає жодної несправності. Це – *перевірка справності* об'єкта. **На етапі виробництва**, наприклад, перевірка справності дозволяє визнати, чи містить створений об'єкт дефектні компоненти (деталі, елементи, блоки, вузли й т.п.), а їхній монтаж – помилки. Помітимо, що перевірка справності лежить в основі діяльності виробничих відділів технічного контролю. **В умовах ремонту** перевірка справності дозволяє переконатися, чи дійсно усунуті при ремонті всі несправності, що були в об'єкті, а в умовах зберігання - чи не виникли які-небудь несправності за час зберігання об'єкта.

**На етапі експлуатації** при профілактиці об'єкта, перед застосуванням його по призначенню або після такого застосування в ряді випадків необхідно переконуватися в тому, що об'єкт у стані виконувати всі функції, передбачені його робочим алгоритмом функціонування. Це – *перевірка працездатності* об'єкта. Перевірка працездатності може бути менш повною, чим перевірка справності, тобто може залишати невиявленими несправності, що не перешкоджають застосуванню об'єкта по призначенню. Наприклад, резервованій об'єкт може бути працездатним незважаючи на наявність несправностей у резервних компонентах або зв'язках.

На етапі експлуатації в процесі виконання об'єктом його робочого алгоритму функціонування часто необхідно виконувати *перевірку правильності функціонування* об'єкта, тобто стежити за тим, чи не з'явилися в об'єкті несправності, що порушують його нормальну роботу в даний момент часу. Перевірка правильності функціонування дає можливість виключити неприпустимий для нормальної роботи об'єкта вплив несправностей, що виникають у процесі застосування об'єкта по призначенню. Перевірка правильності функціонування, загалом кажучи, менш повна, чим перевірка працездатності, тому що дозволяє переконуватися тільки в тому, що *об'єкт правильно функціонує в даному режимі роботи в цей момент часу*. Іншими словами: у правильно функціонуючому об'єкті можуть бути несправності, які не до-

звolyать йому правильно працювати в інших режимах. Працездатний об'єкт буде правильно функціонувати у всіх режимах і протягом усього часу його роботи.

**Таким чином**, справний об'єкт завжди працездатний і функціонує правильно, а неправильно функціонуючий об'єкт завжди непрацездатний і несправний, правильно функціонуючий об'єкт може бути непрацездатним, і виходить, несправним. Працездатний об'єкт також може бути несправним.

Одним з найважливіших завдань діагнозу стану об'єкта є *пошук несправностей*, тобто вказівка місць і, можливо, причин виникнення наявних в об'єкті несправностей. Пошук несправностей необхідний для виявлення й заміни дефектних компонентів або зв'язків об'єкта, для усунення помилок монтажу й т.п. Після усунення несправності об'єкт стає справним, працездатним або правильно функціонуючим. Пошук несправностей є істотною складовою діяльності служб налагодження на етапі виробництва й ремонтних служб на етапах експлуатації або зберігання об'єктів.

Справний і всі несправні стани об'єкта утворюють множину *E* його технічних станів. Завдання перевірки справності, перевірки працездатності, перевірки правильності функціонування й пошуку несправностей являють собою окремі випадки загального завдання діагнозу технічного стану об'єкта.

На рис. 1 множину технічних станів об'єкта діагнозу умовно обмежено замкнутої кривою, причому справний стан позначений малим кружком, а несправні стани — хрестиками. Результатами перевірки справності (рис. 1,а), перевірки працездатності (рис. 1,б) і перевірки правильності функціонування (рис. 1,в) є одержання двох підмножин технічних станів. Одне з них (ліве на рис. 1) містить або тільки справний стан (при перевірці справності), або крім справного стану також ті несправні стани, перебуваючи в яких об'єкт залишається працездатним або правильно функціонуючим. Друга підмножина містить або всі несправні стани (при перевірці справності), або такі, перебування в яких робить об'єкт непрацездатним або неправильно функціонуючим.

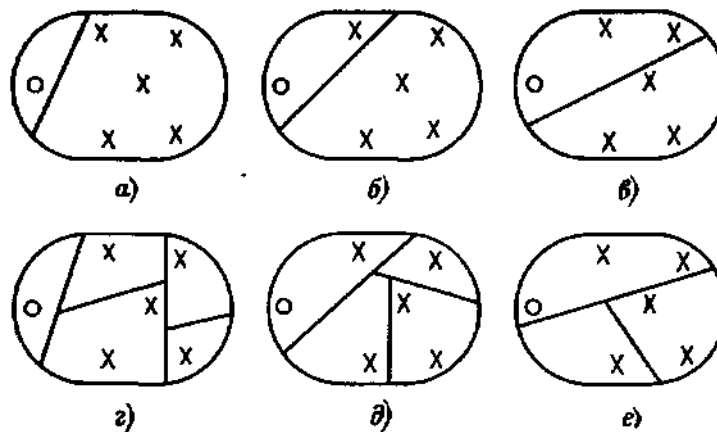


Рис. 1. Подання завдань діагнозу через розбивки множини технічних станів об'єкта.

Результатами пошуку несправностей (рис. 1, г, д, е) є розбивки на класи несправних станів других підмножин, що не розрізняються між собою. Число класів і, отже, числа несправних станів, що входять у них, визначають ступінь деталізації місць і складу наявних (або підозрюваних на наявність) в об'єкті несправностей, яку можна досягти. Цей ступінь деталізації прийнято називати *глибиною пошуку* або *глибиною діагнозу*.

Помітимо, що при перевірці правильності функціонування й при пошуку несправностей, що порушують правильне функціонування об'єкта, розбивки відносяться до певного моменту часу й тому можуть бути різними для різних моментів часу й різних режимів роботи об'єкта.

## 2. Засоби діагностики.

Діагноз технічного стану об'єкта здійснюється за допомогою тих або інших засобів діагнозу. Взаємодіючи між собою об'єкт і засоби діагнозу утворюють *систему діагнозу*. Процес, що протікає в системі діагнозу у загальному випадку, являє собою багаторазову подачу на об'єкт певних впливів (вхідних сигналів) і багаторазовий вимір і аналіз реакції об'єкта (відповідей, вихідних сигналів) на ці впливи. Впливи на об'єкт або надходять від засобів діагнозу, або є зовнішніми (стосовно системи діагнозу) сигналами, обумовленими робочим алгоритмом функціонування об'єкта. Вимір і аналіз відповідей об'єкта завжди здійснюється засобами діагнозу.

Будемо розрізняти *системи тестового діагнозу*, відмінна риса яких складається в можливості подачі на об'єкт діагнозу спеціально створених тестових впливів від засобів діагнозу, і *системи функціонального діагнозу*, у яких подача впливів на об'єкт від засобів діагнозу не виробляється (надходять тільки робочі впливи, передбачені робочим алгоритмом функціонування об'єкта).

*Системи тестового діагнозу* звичайно вирішують завдання перевірки справності, перевірки працездатності й пошуку несправностей (всіх або тільки тих, що порушують працездатність) і працюють тоді, коли об'єкт не застосовується по прямому призначенню. Використання систем тестового діагнозу при працюючому об'єкті також можливе, але при цьому тестові впливи можуть бути тільки такими, які не заважають нормальному функціонуванню об'єкта.

*Системи функціонального діагнозу* використовуються, як правило, для рішення завдань перевірки правильності функціонування й пошуку несправностей, що порушують нормальне функціонування. Ці системи працюють звичайно тоді, коли об'єкт застосовується по призначенню. У протилежному випадку потрібна імітація умов функціонування об'єкта (зокрема, імітація робочих впливів).

**Процес діагнозу** може складатися з окремих частин, кожна з яких характеризується подаванням на об'єкт тестових або робочих впливів і відповіддю, що знімається з об'єкта. Будемо називати такі частини *елементарними перевірками* об'єкта. Результатом елементарної перевірки є отримане при її реалізації значення відповіді об'єкта. Тоді формальний опис процесу діагнозу, тобто *алгоритм діагнозу* технічного стану об'єкта, являє собою безумовну або умовну послідовність елементарних перевірок і правил аналізу їхніх результатів.

Процес діагнозу можна розглядати як специфічний процес керування, метою якого є визначення технічного стану об'єкта. Це погоджується із сучасним розумінням керування як процесу здійснення цілеспрямованих управляючих впливів на керований об'єкт, а крім того, чітко визначає предмет досліджень і завдання технічної діагностики з позицій загальної теорії керування й контролю.

### 3. Алгоритми технічної діагностики.

*Основна мета технічної діагностики складається в організації ефективних процесів діагнозу технічного стану складних об'єктів.*

Одним з факторів, що істотно впливають на ефективність процесу діагнозу, є якість алгоритмів діагнозу.

Можливість оптимізації алгоритмів діагнозу визначається наступними обставинами. Число, елементарних перевірок, достатніх для рішення конкретного завдання діагнозу, як правило, менше числа всіх *припустимих* (тобто фізично можливих і реалізованих) елементарних перевірок даного об'єкта. Різні елементарні перевірки можуть вимагати різних витрат на їхню реалізацію й подавати різну інформацію про технічний стан об'єкта. Крім того, ті самі елементарні перевірки можуть бути реалізовані в різних послідовностях.

Тому для рішення одного й того ж завдання діагнозу (наприклад, для перевірки справності) можна побудувати кілька алгоритмів діагнозу, що розрізняються між собою або складом елементарних перевірок, або послідовністю їх реалізації, або тим і іншим разом, і тому, можливо, що вимагають різних витрат на їх реалізацію.

Необхідність скорочення часу на операції діагнозу, виявлення, пошуку й усунення несправностей, зменшення обсягів і складності засобів діагнозу викликає інтерес до розробки методів побудови оптимальних алгоритмів діагнозу, що вимагають мінімальних витрат на їх реалізацію. Побудова оптимальних алгоритмів у багатьох випадках пов'язана з великими обчислювальними труднощами, і тому найчастіше задовольняються квазіоптимальними алгоритмами діагнозу, витрати на реалізацію яких якимось зменшені, але не обов'язково мінімальні.

**Інтуїтивні методи** побудови алгоритмів діагнозу не можуть гарантувати одержання об'єктивного висновку про дійсний технічний стан об'єкта. Крім того, при інтуїтивному підході алгоритми діагнозу можуть містити надлишкові елементарні перевірки, послідовність реалізації яких може бути далекою від оптимальної, що в остаточному підсумку приводить до непродуктивних витрат на реалізацію алгоритмів у цілому.

Звідси випливає необхідність розробки формальних методів побудови алгоритмів діагнозу технічного стану об'єктів. Це особливо важливо для складних об'єктів, що нараховують сотні й тисячі функціонально й конструктивно взаємозалежних компонентів і найчастіше потребуючих багатьох годин для виявлення й пошуку несправностей інтуїтивними способами. Застосування формальних методів, крім того, дозволяє автоматизувати процеси побудови алгоритмів діагнозу за допомогою обчислювальних засобів.

**Ефективність процесів діагнозу** визначається не тільки якістю алгоритмів діагнозу, але й у не меншому ступені якістю засобів діагнозу. Ці засоби можуть бути апаратними або програмними, зовнішніми або вбудованими, ручними, автоматизованими або автоматичними, спеціалізованими або універсальними.

**Наявність** об'єктивних *статистичних даних* про ймовірності виникнення несправностей  $[p_i(t), \lambda_i]$ , а також про середні витрати на виявлення, пошук і усунення несправностей  $(\mu_i)$ , розширює можливість ефективної організації процесів діагнозу. Збір таких даних вимагає застосування надійно працюючих зовнішніх і вбудованих апаратних засобів діагнозу, що забезпечують високу точність вимірів і автоматичне документування даних. При цьому буде гарантована вірогідність результатів діагнозу, зведено до мінімуму вплив суб'єктивних факторів і спрощена статистична обробка результатів.

Ефективна організація процесів діагнозу технічного стану складних об'єктів на всіх етапах їхнього життя вимагає спільного застосування як систем функціонального, так і систем тестового діагнозу.

**Системи функціонального діагнозу** дають можливість миттєво реагувати на порушення правильності функціонування об'єкта й тим самим у багатьох випадках дозволяють шляхом заміни вузлів, що відмовили, включення резерву, повторного виконання операцій, переходу на інший режим функціонування й т.п., забезпечити нормальне або хоча б часткове (тобто із втратою якості) виконання об'єктом покладених на нього функцій навіть при наявності несправностей у ньому.

Без *систем тестового діагнозу* неможливо обійтися на етапі виготовлення й при ремонті об'єктів діагнозу. На етапі експлуатації позитивний результат тестової перевірки справності або працездатності об'єкта, отриманий безпосередньо перед застосуванням об'єкта по призначенню, підвищує ймовірність успішного виконання об'єктом покладених на нього функцій. У всякому разі, у зазначених умовах ця ймовірність вище, ніж тоді, коли тестова перевірка справності або працездатності об'єкта не проводиться.

#### 4. Взаємозв'язок завдань діагностики й проектування.

**У цей час** у більшості випадків **проектування** складних об'єктів ведеться без належного врахування того, як вони будуть перевірятися й налагоджуватися в умовах виробництва або ремонту, як буде організована перевірка працездатності, правильності функціонування й пошук несправностей в умовах їх експлуатації або зберігання. Недооцінка важливості своєчасної (на етапі проектування об'єктів) і глибокого пророблення питань організації ефективних процедур діагнозу, у тому числі автоматизації пошуку несправностей складних об'єктів,

веде до значних матеріальних витрат, витрат часу й кваліфікованої робочої сили при налагодженні, профілактиці й ремонті.

Серед об'єктивних причин такого положення варто назвати недостатній розвиток теорії й методів технічної діагностики, слабке пророблення принципів побудови технічних засобів діагнозу, а також відсутність налагодженого виробництва таких засобів. *Істотним є також психологічний фактор*, що складається в тім, що майже всі розроблювачі вважають творчою справою безпосередньо розробку об'єктів (виробів, пристроїв, агрегатів, систем), що виконують задані їм функції, і не надають належного значення питанням організації налагодження, профілактики й ремонту проєктованих об'єктів. Збільшується ця обставина тим, що *обов'язкове пророблення цих питань поки не регламентується офіційними вимогами до проєктів нових об'єктів*. Все це приводить до того, що часто складні об'єкти виявляються без добре організованих систем перевірки правильності їх функціонування, не говорячи вже про системи пошуку несправностей в умовах застосування по призначенню. Завдання перевірки справності, перевірки працездатності й пошуку несправностей в умовах виготовлення, профілактики, ремонту й зберігання в багатьох випадках вимушено вирішуються після того, як об'єкт уже спроектований або навіть виконаний «у металі». Такий підхід не дозволяє вчасно врахувати ті зміни й доповнення, які доцільно внести в об'єкт для того, щоб забезпечити простоту й зручність діагнозу його технічного стану на всіх етапах життя. При існуючому положенні турботи по створенню засобів діагнозу в значній мірі лягають на виготовлювачів, експлуатаційників і ремонтників. Створювані ними засоби, як правило, є спеціалізованими з усіма властивими «приставній автоматичі» недоліками. Витрати на розробку й створення таких засобів великі, а ефективність застосування низька.

Багато із зазначених недоліків будуть виключені, якщо завдання діагнозу вирішувати на етапі проєктування об'єктів. Інакше кажучи, розробку систем і засобів діагнозу варто вважати такою ж обов'язковою й важливою частиною проєкту нового об'єкта, як і розробку самого об'єкта або інших його систем і засобів керування.

При розробці й реалізації процесів діагнозу технічного стану об'єктів необхідно вирішувати ті ж завдання, які виникають при розробці й реалізації процесів керування взагалі. Це, у першу чергу, завдання вивчення фізичних властивостей об'єктів і можливих у них несправностей, завдання побудови математичних моделей об'єктів і моделей несправностей. Потім впливають завдання аналізу моделей об'єктів з метою одержання даних, необхідних для побудови алгоритмів діагнозу.

Другу чергу утворюють завдання, пов'язані з розробкою принципів побудови, експериментальним випробуванням і промисловим впровадженням технічних засобів діагнозу.

До третьої черги варто віднести завдання проєктування систем діагнозу в цілому й дослідження їх характеристик і властивостей.

Можна відмітити також, що більше 90% студентів, виконуючи дипломні проєкти, зовсім не приділяють уваги застосуванню в розроблюваних пристроях вбудованої системи діагностики або хоча б деяких її елементів. В результаті такого «проєктування» студент на захисті дипломного проєкту не може дати відповідь на питання: – «Як перевірити правильність функціонування розробленого Вами об'єкта (системи управління)?». Основна причина такої не ефективної підготовки проєкту знаходиться в тому, що майже ні один викладач-науковий керівник студента, не вказує в технічному завданні на розробку проєкта необхідність обов'язкового включення в проєкт хоча б деяких елементів системи діагностики.



## Лекція 2. Системи діагнозу технічного стану

### План лекції:

1. Принципи побудови систем технічної діагностики.
2. Діагностичні системи керування

### 1. Принципи побудови систем технічної діагностики.

На рис. 1 представлені узагальнені функціональні схеми системи тестового діагнозу й системи функціонального діагнозу технічного стану. Системи містять об'єкт діагнозу *ОД* і систему діагнозу у вигляді набору необхідних засобів діагностики. Схеми приведені в «однолінійному» зображенні.

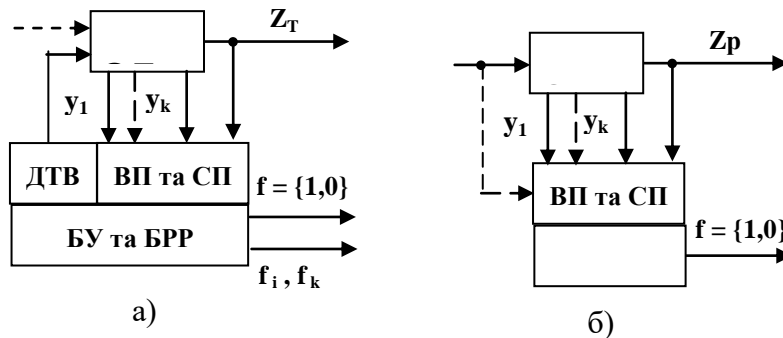


Рис.1. Узагальнені схеми системи діагностики:

а) схема тестової діагностики, б) схема функціональної діагностики.

Фізично кожна лінія схеми, що позначена стрілкою на кінці, може представляти кілька каналів передачі інформації або інших впливів (в залежності від типу об'єкта).

(Умовимося, що при розгляді завдань перевірки справності, перевірки працездатності або перевірки правильності функціонування об'єкта можна говорити не про засоби діагнозу, а про засоби перевірки, і при розгляді завдань пошуку несправностей – про засоби пошуку).

Як видно з рис. 1,а, у системах тестового діагнозу впливи на об'єкт  $X_T$  надходять від засобів діагнозу. Тому як склад, так і послідовність подачі цих впливів можна вибирати виходячи з умов ефективної організації процесу діагнозу. Більше того, кожен черговий вплив у процесі діагнозу може призначатися залежно від реакції (відповідей) об'єкта на попередні впливи. Впливи в системах тестового діагнозу будемо називати *тестовими*.

Тестові впливи можуть подаватися як у періоди часу, коли об'єкт не використовується по прямому призначенню, так і в процесі виконання ним його робочого алгоритму функціонування. Але, у другому випадку, тестовими впливами можуть бути тільки такі сигнали, які не заважають нормальній роботі об'єкта. Наприклад, при інерційних виконавчих механізмах деякого працюючого об'єкта можлива подача короткочасних імпульсних тестових впливів на схеми керування цими механізмами.

Тестові впливи можуть подаватися як на *основні входи об'єкта*, тобто на його входи, необхідні для застосування об'єкта по призначенню, так і на *додаткові входи*, організовані спеціально для цілей діагнозу.

У системах функціонального діагнозу (рис. 1,б) впливи, що надходять на основні входи об'єкта  $X_p$ , задані його робочим алгоритмом функціонування й тому, як правило, не можуть вибиратися виходячи з умов ефективної організації процесу діагнозу. Ці впливи будемо називати *робочими*.

Зазначена на рис. 1,б подача робочих впливів і на засоби діагнозу часто має місце в системах функціонального діагнозу, хоча й не є обов'язковою.

Відзначимо, що системи функціонального діагнозу можуть застосовуватися також у режимах імітації функціонування об'єкта. При цьому, природно, повинна бути забезпечена

імітація робочих впливів. Таке використання систем функціонального діагнозу доцільно при налагодженні або ремонті об'єкта.

Відповіді об'єкта (на тестові або на робочі впливи) в обох видах систем діагнозу надходять на засоби діагнозу. Відповіді можуть зніматися як з *основних виходів* об'єкта  $Z_T$ ,  $Z_R$ , тобто з виходів, необхідних для застосування об'єкта по призначенню, так і з *додаткових виходів*  $y_i$ , організованих спеціально для цілей діагнозу. Ці основні й додаткові виходи часто називають *контрольними точками*.

Як відзначалося, елементарні перевірки об'єкта характеризуються або робочими, або тестовими впливами, що подаються на об'єкт, і його відповідями на відповідні впливи; результатами елементарних перевірок є значення відповідей об'єкта.

Засоби діагнозу реалізують деякий алгоритм діагнозу, що задає склад і черговість реалізації елементарних перевірок, а також спосіб аналізу результатів цих перевірок об'єкта.

Реалізація елементарних перевірок полягає у формуванні й подачі на об'єкт вхідних сигналів (впливів) і в прийомі й вимірі відповідних вихідних сигналів (відповідей). Для реалізації цих операцій засоби діагнозу повинні містити *джерела тестових впливів* ДТВ (у системах тестового діагнозу), *вимірювальні пристрої* ВП, схеми порівняння СП відповідей ОД з еталонними і *пристрої зв'язку* джерел впливів і вимірювальних пристроїв з об'єктом.

Метою аналізу результатів елементарних перевірок є одержання результатів діагнозу, тобто визначення технічного стану, у якому фактично перебуває об'єкт.

Як було сказано вище, результати елементарних перевірок представлені у вигляді значень сигналів у контрольних точках. Результати ж діагнозу повинні бути представлені в іншій формі, більше зручної для практичного використання. Наприклад, при перевірці справності результатом діагнозу повинна бути одна з відповідей: «**об'єкт справний**» або «**об'єкт несправний**», а при пошуку несправностей — «**в об'єкті несправний такий-то конкретний компонент (вузол, блок, деталь)**». Інакше кажучи, потрібна розшифровка (аналіз, перетворення) результатів елементарних перевірок, отриманих у процесі реалізації алгоритму діагнозу.

У найпростішому випадку така розшифровка може являти собою звичайне порівняння фізичних значень сигналів у контрольних точках із заданими еталонними значеннями цих сигналів. В інших випадках операції розшифровки є більше складними. Помітимо, що при недостатньому рівні автоматизації процесу діагнозу, зокрема при використанні ручних засобів діагнозу, функції розшифровки результатів елементарних перевірок покладають на людину. В автоматизованих системах діагнозу цю функцію виконує блок розшифровки результатів вимірювання БРР.

Крім того, для виконання операцій аналізу результатів елементарних перевірок засоби діагнозу повинні мати певну інформацію про поведження справного (працездатного, правильно функціонуючого) об'єкта, а також, можливо, про його поведження в несправних станах. Апаратуру засобів діагнозу, що зберігає інформацію про поведження об'єкта, або інший носій цієї інформації будемо називати *фізичною моделлю об'єкта*. Наочним прикладом фізичної моделі об'єкта є еталонний, свідомо справний його екземпляр. Однак у багатьох випадках така фізична модель інформаційно надлишкова й найчастіше важко реалізована. У широко розповсюджених системах централизованого контролю, що є системами перевірки правильності функціонування, фізична модель об'єкта являє собою апаратуру для завдання припустимих значень (уставок) контрольованих параметрів, а також засоби комутації й підключення цієї апаратури до пристроїв порівняння допустимих значень параметрів з фактичними.

Засоби, що здійснюють порівняння інформації про об'єкт, що зберігається у фізичній моделі, з фактичними результатами елементарних перевірок і результати, що виробляють сигнал «результати діагнозу», *назвемо блоком розшифровки результатів*. Як і фізична модель об'єкта, блок розшифровки результатів може бути реалізований різними способами й засобами залежно від завдань і характеристик конкретних систем діагнозу.

Нарешті, засоби діагнозу повинні мати той або інший **носії алго-ритму діагнозу**. Носієм жорстких або рідко змінюваних алгоритмів діагнозу звичайно є апаратура, конструктивно об'єднана з іншою апаратурою засобів діагнозу. Для завдання змінних алгоритмів діагнозу часто застосовуються стандартні програмоносії – магнітні або оптичні диски, напівпровідникові постійні й репрограмуємі запам'ятовуючі пристрої й т.п. Природно, засоби діагнозу повинні містити відповідні пристрої зчитування інформації із програмоносій. По завершенні процесу визначення технічного стану об'єкта засоби діагнозу виробляють **сигнал «результати діагнозу»**. В багатьох технічних системах для цілей діагностики передбачено блок управління БУ процесом діагностики.

Знання технічного стану об'єкта може бути використане для різних цілей, у тому числі, наприклад, для вибору й застосування іншого алгоритму діагнозу, що дозволяє більш точно визначити технічний стан об'єкта, або ж для організації інших спеціальних впливів на об'єкт. Питання цілеспрямованого використання результатів діагнозу складних об'єктів ставляться до області організації так званих діагностичних систем керування, про які коротко буде сказано надалі.

## 2. Діагностичні системи керування

Результати діагнозу технічного стану необхідні для активних впливів на об'єкти діагнозу й на умови їхнього виготовлення, експлуатації або зберігання. Це можуть бути такі «прости» впливи, як ручне або автоматичне відключення, заміна або ремонт несправного компонента об'єкта або об'єкта в цілому, уведення резерву, перебудова структури об'єкта й т.п.

Прикладами більше складних впливів для певного класу об'єктів можуть служити заходи щодо зміни технології монтажу або якості комплектуючих виробів в умовах виробництва, впливу зовнішнього середовища або періодичності профілактичних робіт в умовах експлуатації або порівняння й т.п. Так чи інакше, у всіх випадках за результатами діагнозу приймаються й здійснюються певні рішення по подальшому використанню об'єктів. Це відповідає організації процесу керування, що містить у собі процес діагнозу технічного стану як складову частину. Системи, у яких реалізується такий процес керування і які мають у своїй основі систему діагнозу технічного стану, називають **діагностичними системами керування**. Питання дослідження таких систем представляють більшу складність, тому

обмежимося тим, що приведемо

функціональну схему діагностичної системи керування й розглянемо один приклад.

Функціональну схему діагностичної системи керування стосовно до розглянутого нижче прикладу можна представити так, як показано на рис. 2.

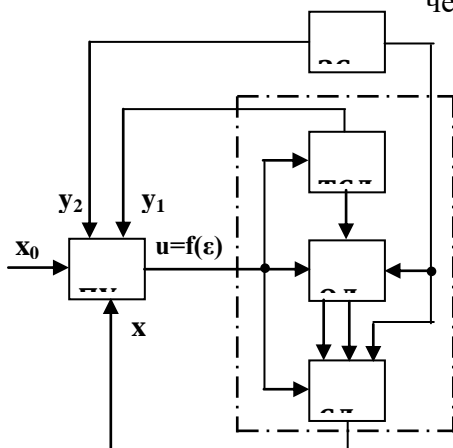


Рис. 2. Функціональна схема діагностичної системи керування.

На цьому рисунку прийняті наступні позначення: ОД — об'єкт діагнозу, СД — система (засоби) діагностики, ТС — технічні служби, ОУ-об'єкт управління, ПУ — пристрій управління, ЗС — зовнішнє середовище. Сигналами, що враховуються при формуванні управляючого впливу  $u(\epsilon)$  є:  $x_0$  — задана мета керування,  $x$  — результат діагнозу технічного стану об'єкта діагнозу,  $y_1$  — стан технічних служб,  $y_2$  — стан зовнішнього середовища,  $\epsilon = \psi(x_0, x, y_1, y_2)$  — розбіжність між бажаним станом ОД і результатом діагнозу.

Терміни «зовнішнє середовище» і «стан зовнішнього середовища» тут зовсім умовні й означають тільки те, що в процесі роботи системи враховується певна інформація, що надходить на систему ззовні.

**Приклад.** Розглянемо роботу діагностичної системи керування діяльністю деякого аеропорту. Об'єктами діагнозу ОД є літаки, технічний стан яких визначається перед вильотом засобами діагнозу СД, що реалізують визначені алгоритми діагнозу з урахуванням деяких параметрів зовнішнього середовища (наприклад, температури навколишнього повітря й атмосферного тиску). У процесі діагнозу здійснюється подача на бортові системи літака певних тестових впливів і одержання від нього відповідних реакцій, оброблюваних апаратурою засобів діагнозу. По закінченні процесу діагнозу отриманий результат  $x$ , що характеризує технічний стан літака (наприклад, справний, несправний, несправна така-то бортова система й т.п.), надходить у пристрій управління ПУ, що відповідно до заданої мети керування  $x_0$  й знанням стану  $y_1$  технічних служб і стану  $y_2$  зовнішнього середовища виробляє керуючий вплив  $u(\epsilon)$ .

Метою керування, наприклад, може бути вимога мінімальних відхилень від заданого розкладу вильотів літаків при заданому рівні безпеки польотів. До числа параметрів технічних служб, що враховуються при виробітку керуючого впливу, можуть ставитися такі, як наявність резервних, готових до вильоту літаків, час вильоту діагностуємого літака за розкладом, дані про дату проведення й глибині попереднього діагнозу й т.п.

Параметрами зовнішнього середовища, що враховуються, можуть бути дані про метеорологічну обстановку, інші умови на трасі польоту, наявність інших літаків у повітрі в районі аеропорта, що чекають посадки або вже знаходяться на взльотній смузі, й ін.

Керуючими впливами можуть бути наступні:

- 1) дозволити виліт літака;
- 2) зробити більш детальний діагноз технічного стану деякої бортової системи;
- 3) відправити літак у ремонт, замінивши його резервним, готовим до вильоту літаком;
- 4) подати із ангару вільний літак підходящого типу й виконати діагноз його технічного стану для можливої заміни несправного;
- 5) перейти до діагнозу технічного стану чергового літака.

Для дослідження й проектування діагностичних систем керування розглянутого в прикладі типу залучаються відповідні методи, описані в спеціальних розділах загальної теорії керування.

Для побудови математичних моделей об'єктів і оптимальних алгоритмів діагнозу в процесі проектування й створення систем діагнозу необхідно знати фізичні властивості й характеристики цих об'єктів. Велике значення має організація збору й обробки статистичних даних, особливо по імовірностях виникнення несправностей і по витратах (часу, енергії, або матеріальних коштів і т.д.) на відшукування несправностей і їх усунення. Відзначимо, що статистичні дані важливі не тільки для оптимізації алгоритмів діагнозу, але також для ефективного рішення завдань технічного прогнозування. Ми ж обмежимося самими загальними властивостями об'єктів діагнозу і їхніх несправностей.

Об'єктами, діагнозу можуть бути будь-які технічні вироби, пристрої або системи, щодо яких має сенс ставити й вирішувати завдання перевірки їх справності, працездатності, правильності функціонування або завдання пошуку несправностей.

Об'єкт перебуває в справному стані або називається справним, якщо він відповідає всім технічним вимогам до нього в даний конкретний період його життя (виготовлення, застосування по призначенню, ремонту, зберігання). У протилежному випадку об'єкт перебуває в несправному стані або називається несправним. Справний і всі несправні стани поєднуються терміном технічний стан об'єкта.

Наслідки будь-яких явищ або дій, які переводять об'єкт у деякий несправний стан, називаються фізичними несправностями об'єкта.

Об'єкт може складатися з компонентів – функціонально або конструктивно виділених частин. Тоді сукупність компонентів об'єкта, зв'язків між компонентами (внутрішніх зв'язків) і зв'язків об'єкта із зовнішнім середовищем (зовнішніх зв'язків) називають **структурою** об'є-

кта. Поняття справного й несправного станів, а також фізичної несправності, застосовуються до компонентів об'єкта, його внутрішнім і зовнішнім зв'язкам.

Взаємодія об'єкта із зовнішнім середовищем здійснюється через його основні й додаткові входи й виходи. Сигнали на входах і виходах об'єкта характеризуються параметрами тих фізичних величин, за допомогою яких передаються зазначені сигнали. Це – **вхідні й вихідні параметри** об'єкта. Часто виникає необхідність розглядати внутрішні параметри об'єкта, тобто такі параметри, які не є його вхідними або вихідними. Зокрема, коли об'єкт представлений сукупністю взаємозалежних компонентів, внутрішніми є параметри на тих входах і виходах компонентів, які не є входами або виходами об'єкта. Найчастіше вхідні й вихідні параметри об'єкта доступні для виміру, чого не можна сказати про внутрішні параметри.

Послідовності (або, в окремому випадку, сукупності) можливих значень вхідних параметрів утворюють безліч можливих **впливів** на об'єкт. Аналогічно, безліч **відповідей (реакцій)** об'єкта визначається послідовністю (або, сукупністю) значень його вихідних параметрів. Для наших цілей зручно прийняти, що впливи (відповіді) можуть визначатися значеннями або всіх, або тільки частини вхідних (вихідних) параметрів об'єкта. Це має місце тоді, коли значення деяких вхідних (вихідних) параметрів по тим або іншим причинам нас не цікавлять і можуть бути будь-якими. Аналогічно нас може не цікавити частина значень у послідовності значень деякого вхідного або вихідного параметра.

**Таким чином**, вплив на об'єкт (відповідь об'єкта) характеризується складом входів (виходів) і тими моментами часу, у які надходять задані значення параметрів на цих входах (виходах). Послідовність (сукупність) значень зазначених параметрів можна називати **значенням впливу (відповіді)**.

Як уже говорилося, елементарна перевірка являє собою деякий фізичний експеримент над об'єктом і визначається значенням впливу, що подається на об'єкт, а також відповіддю об'єкта на цей вплив. Значення відповіді об'єкта є результатом елементарної перевірки. Ясно, що об'єкт, який перебуває в різних технічних станах, може видати різні результати однієї й тієї ж елементарної перевірки. Поняття елементарної перевірки застосовано також до окремих компонентів об'єкта. У цьому випадку, природно, передбачається доступність входів і виходів компонента, що може вимагати організації додаткових входів і виходів об'єкта.

Отже, у кожний момент часу при зафіксованому складі виводів (контрольних точок) об'єкта елементарні перевірки можуть розрізнятися між собою тільки значеннями впливів. І навпаки, елементарні перевірки розрізняються між собою тільки складом виходів, якщо зафіксовано значення впливу на об'єкт.

Відзначимо, що в першому випадку завдання побудови алгоритму діагнозу зводиться до завдання вибору послідовності (сукупності) значень впливів, а в другому – до завдання вибору складу контрольних точок об'єкта. Перше із цих завдань характерне при розробці систем тестового діагнозу, а друге – при розробці систем функціонального діагнозу. У загальному випадку є можливість проводити вибір як значень впливів, так і контрольних точок.

### Лекція 3. Математичні моделі об'єктів і систем діагнозу

#### План лекції:

1. Математичні моделі об'єктів діагнозу.
2. Математична модель системи тестового діагнозу.
3. Математична модель системи функціонального діагнозу.

#### 1. Математичні моделі об'єктів діагнозу

Формалізація методів побудови алгоритмів діагнозу технічного стану деякого об'єкта припускає наявність формального опису об'єкта і його поводження в справному й несправних станах. Такий формальний опис (в аналітичній, табличній, векторній, графічній або іншій формі) будемо називати *математичною моделлю об'єкта діагнозу*. Математична модель об'єкта діагнозу може бути задана в явному або неявному вигляді.

*Явна модель* об'єкта діагнозу являє собою сукупність формальних описів справного об'єкта й усіх (точніше, кожної з розглянутих) його несправних модифікацій. Для зручності обробки всі зазначені описи бажано мати в одній і тій же формі.

*Неявна модель* об'єкта діагнозу містить який-небудь один формальний опис об'єкта, математичні моделі його фізичних несправностей і правила одержання за цими даними всіх інших описів, що цікавлять нас. Найчастіше заданою є математична модель справного об'єкта, по якій можна побудувати моделі його несправних модифікацій.

Загальні вимоги до моделей справного об'єкта і його несправних модифікацій, а також до моделей несправностей полягають у тому, що вони повинні з необхідною точністю описувати об'єкти, що представляються ними, і їхні несправності. У неявних моделях об'єктів діагнозу моделі несправностей, крім того, повинні задовольняти вимозі зручності їх “порівняння, співставлення” з наявним описом об'єкта й тим самим забезпечити досить прості правила одержання інших описів об'єкта.

Обумовимо можливість у вираженні “математична модель” опускати іноді перше слово. Крім того, там, де це не приведе до неправильного розуміння, будемо поряд з вираженнями “модель об'єкта” або “модель несправності” уживати більше короткі терміни “об'єкт” або “несправність” відповідно. Справний або несправний об'єкт може бути представлений як динамічна система, стан якої в кожний момент часу  $t$  визначається значеннями вхідних, внутрішніх і вихідних координат (параметрів). Часткою є випадок, коли стан об'єкта не залежить від часу.

Звернемо увагу на те, що термін “стан об'єкта” (як динамічної системи), позначає сукупність значень параметрів об'єкта в певний момент часу, і його не слід змішувати з терміном “технічний стан об'єкта”, що позначає наявність або відсутність несправності в об'єкті.

Об'єкти діагнозу розділимо на класи. Об'єкти, всі координати яких можуть приймати значення з континуальної безлічі значень, віднесемо до класу *безперервних об'єктів*. До класу *дискретних* об'єктів прилічимо об'єкти діагнозу, значення всіх координат яких задаються на кінцевих безлічах, а час відлічується дискретно. Якщо значення частини координат об'єкта задані на континуальних, а значення інших – на кінцевих безлічах, то об'єкт є *гібридним*.

Об'єкти будемо називати *комбінаційними* або об'єктами *без пам'яті*, якщо значення їхніх вихідних координат визначаються тільки значеннями їхніх вхідних координат. Об'єктами з *пам'яттю*, є об'єкти, у яких спостерігається залежність значень їхніх вихідних координат не тільки від значень вхідних координат, але й від часу.

Приведемо приклади простих об'єктів різних класів: резисторна електрична мережа – безперервний об'єкт без пам'яті; аналогова система регулювання зі зворотними зв'язками – неперервний об'єкт із пам'яттю; діодний дешифратор двійкових сигналів – дискретний комбінаційний об'єкт; двійковий лічильник – дискретний об'єкт із пам'яттю; аналого-цифровий перетворювач – гібридний об'єкт.

Часто вхідні і внутрішні координати об'єкта називають *вхідними* і відповідно *внутрішніми змінними*, а вихідні координати – *вихідними функціями*. Ми також будемо користува-

тися цими назвами. Помітимо, що вхідні змінні й вихідні функції можуть бути зіставлені як основним, так і відповідно додатковим входам і виходам об'єкта.

Позначимо символом  $X$   $n$ -мірний вектор, компонентами якого є значення  $n$  вхідних змінних  $x_1, x_2, \dots, x_n$ . Аналогічно  $Y$  є  $m$ -мірним вектором значень  $m$  внутрішніх змінних  $y_1, y_2, \dots, y_m$ , а  $Z$  –  $k$ -мірним вектором значень  $k$  вихідних функцій  $z_1, z_2, \dots, z_k$ .

Запис

$$Z = \psi(X, Y_{\text{поч}}, t) \quad (1)$$

будемо розглядати як деяку аналітичну, векторну, графічну, табличну або іншу форму подання системи передатних функцій справного об'єкта діагнозу, що відображають залежність реалізованих об'єктом вихідних функцій  $Z$  від його вхідних змінних  $X$ , початкового значення  $Y_{\text{поч}}$  внутрішніх змінних і від часу  $t$ . Система (1) є *математичною моделлю справного об'єкта*.

Виділимо для розгляду кінцеву безліч можливих несправностей об'єкта. Прийнято розрізняти одиночні й кратні несправності. Під *одинокую* розуміється несправність, яка приймається в якості елементарної, тобто такої, котра не може бути представлена сукупністю декількох інших, більше «дрібних» несправностей. *Кратна* несправність є сукупністю одночасно існуючих двох або більшого числа одиночних несправностей. Символом  $S$  будемо позначати безліч всіх розглянутих (не обов'язково всіх можливих) одиночних і кратних несправностей об'єкта, а символом  $O$  – безліч його одиночних несправностей. Очевидно,  $O \in S$ . Будемо говорити, що при наявності в об'єкті несправності  $s_i \in S, i = 1, 2, \dots, |S|$  (або  $o_i \in O, i = 1, 2, \dots, |O|$ ) він перебуває в  *$i$ -несправному* стані або є  *$i$ -несправним*.

Об'єкт діагнозу, що перебуває в  *$i$ -несправному* стані, реалізує систему передатних функцій

$$Z^i = \psi^i(X, Y^i_{\text{поч}}, t) \quad (2)$$

представлених у тій же формі, що й передатні функції (1). Помітимо, що початкове значення  $Y^i_{\text{поч}}$  внутрішніх змінних  *$i$ -несправного* об'єкта може не збігатися з їх початковим значенням  $Y_{\text{поч}}$  у справному об'єкті. Система (2) для фіксованого  $i \in S$  є *математичною моделлю  $i$ -несправного об'єкта*.

Умовимося запис фактично реалізованих об'єктом діагнозу передатних функцій позначати знаком \*:

$$Z^* = \psi^*(X, Y^*_{\text{поч}}, t). \quad (3)$$

Система (1) і сукупність систем (2) для всіх  $s_i \in S$  створюють явну модель об'єкта діагнозу. Будемо таку модель позначати записом  $(\psi, \{\psi^i\})$ .

Часто, як відзначалося вище, у явному вигляді задається тільки модель справного об'єкта, тобто залежність (1), а поведінка об'єкта в  *$i$ -несправних* станах представляється побічно через безліч  $S$  можливих несправностей. У цьому випадку неявну модель об'єкта діагнозу утворюють: залежність (1), безліч  $S$  можливих несправностей об'єкта (представлених їх математичними моделями) і, нарешті, спосіб обчислення залежностей (2) по залежності (1) для будь-якої несправності  $s_i$ . Таку неявну модель об'єкта діагнозу будемо позначати записом  $(\psi, S, \psi \xrightarrow{s_i} \psi^i)$ .

Якщо математичні моделі несправностей  $s_i$  відомі для всіх  $s_i \in S$ , то перетворенням  $\psi \xrightarrow{s_i} \psi^i$  можна одержати всі залежності (1-2) і тим самим від моделі  $(\psi, S, \psi \xrightarrow{s_i} \psi^i)$  перейти до явної моделі  $(\psi, \{\psi^i\})$ . Якщо ж математичні моделі деяких або навіть всіх несправностей з безлічі  $S$  невідомі, то залежності (2) можуть бути отримані в результаті фізичного експерименту безпосередньо над об'єктом діагнозу при наявності в ньому відповідних несправностей. Модифікацією цього підходу є використання при експерименті не самого об'єкта, а деякої його фізичної моделі.

При побудові неявної моделі об'єкта діагнозу математичними моделями фізичних несправностей найчастіше є певні перетворення залежності (1), наприклад зміна значень коефіцієнтів, фіксація константами деяких вхідних змінних, виключення наявних або додавання нових членів і т.п. При цьому одержання залежностей (2) відбувається в здійсненні відповідних перетворень залежності (1). Природно вимагати, щоб ці перетворення правильно відображали фізичні несправності об'єкта, тобто щоб одержувані залежності (2) дійсно представляли відповідні *i-несправні* об'єкта, причому для всіх розглянутих несправностей з безлічі  $S$ .

Зазначену вимогу не завжди можна здійснити, якщо залежність (1) є системою передатних функцій справного об'єкта, складених щодо його основних входів і основних виходів. Тому в багатьох випадках залежність (1) задається у вигляді, який враховує внутрішню будову об'єкта, і тим самим дозволяє більш точно представляти його фізичні несправності. Наприклад, при розгляді дискретних об'єктів діагнозу використовується прийом "розщеплення" тих вхідних змінних, для яких сигнали поширюються в об'єкті по декількох фізичних каналах. В інших випадках застосовується неявна модель об'єкта діагнозу, у якій заданий опис (позначимо його символом  $\tilde{\Psi}$ ) об'єкта містить додаткові фіктивні аргументи. Завданням значень цих аргументів можна одержати моделі як справного, так і всіх *i-несправних* об'єктів. Такі моделі  $(\tilde{\Psi}, S, \tilde{\Psi} \xrightarrow{s_i} \psi, \psi^i)$  будуть розглянуті в наступних лекціях.

Основним поняттям, використовуваним при рішенні завдань побудови й реалізації алгоритмів діагнозу, є *елементарна перевірка* об'єкта. Розглянемо питання завдання моделей об'єктів діагнозу в термінах елементарних перевірок об'єкта і їхніх результатів.

Позначимо символом  $\Pi$  безліч всіх припустимих елементарних перевірок  $\pi_j, j = 1, 2, \dots, |\Pi|$  об'єкта, тобто таких його перевірок, які фізично здійсненні в конкретних умовах проведення процесу діагнозу. Кожна елементарна перевірка, по визначенню, характеризується значенням впливу, що подається на об'єкт при реалізації елементарної перевірки, і відповіддю об'єкта на цей вплив. Значення  $\alpha_j$  впливу в елементарній перевірці  $\pi_j \in \Pi$  визначається складом вхідних змінних і послідовністю в часі  $t$  їхніх значень  $X_j$ , а також початковим значенням  $Y_j$  поч внутрішніх змінних. Відповідь об'єкта в елементарній перевірці  $\pi_j$  характеризується складом  $\{\gamma\}_j$  контрольних точок і значенням (результатом елементарної перевірки)  $R_j^i$ , що залежить від технічного стану об'єкта (відсутність індексу  $i$ , тобто  $R_j$ , відповідає справному об'єкту).

Таким чином, результат  $R_j^i$  елементарної перевірки представляється в загальному випадку послідовністю  $|\{\gamma\}_j|$ -мірних векторів і є функцією значення  $\alpha_j$  впливу:

$$R_j^i = \psi^i(a_j, \{\gamma\}_j).$$

Замість цього запису домовимося застосовувати більше короткий

$$R_j = \psi(\pi_j) \quad (4)$$

для справного об'єкта й

$$R_j^i = \psi^i(\pi_j) \quad (5)$$

для *i-несправних* об'єктів.

Опису фактичного поведіння об'єкта відповідає запис

$$R_j^* = \psi^*(\pi_j) \quad (6)$$

Зв'язок між моделями типу (1), (2) і типу (4), (5) полягає в тім, що останні можуть бути отримані шляхом підстановки в праві частини (1) і (2) значень  $X_j, Y_{поч}, t$  (для кожної елементарної перевірки  $\pi_j \in \Pi$ ) і наступного обчислення значень тих компонентів векторів  $Z$  і  $Z^i$  які зіставлені контрольним точкам з безлічі  $\{\gamma\}_j$ .

Явну модель об'єкта діагнозу, коли залежності (1-5) задані для всіх  $s_i \in S$ , будемо позначати, як і раніше, записом  $(\psi, \{\psi^i\})$ . Неявна модель об'єкта діагнозу в цьому випадку припускає заданими модель  $\psi$  справного об'єкта, безліч  $S$  несправностей, а також безліч  $\Pi$  припустимих елементарних перевірок і тому представляється записом

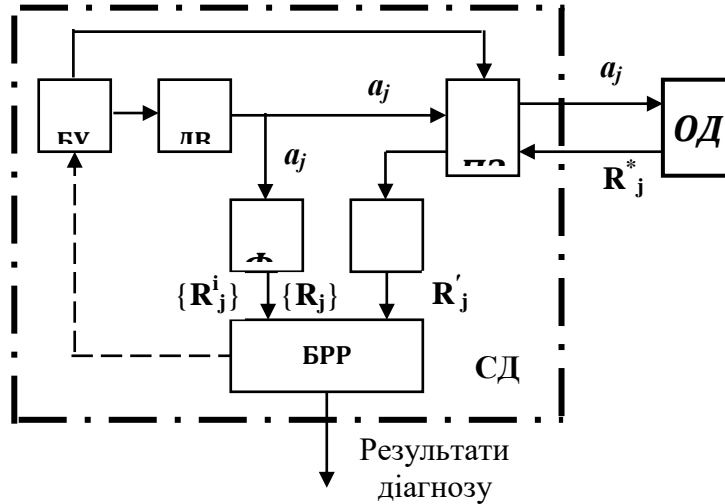


$$(\psi, S, \Pi, \psi \xrightarrow{s^i, \Pi} \psi^i).$$

Розглянемо тепер більш детально, можливі схеми систем тестового і функціонального діагнозу.

## 2. Математична модель системи тестового діагнозу

Будемо вважати, що алгоритм діагнозу, реалізований у тій або іншій системі діагнозу, заданий і містить безліч  $P \subseteq \Pi$  елементарних перевірок.



Функціональна схема системи тестового діагнозу показана на рис. 1.

Рис. 1. Схема системи тестового діагнозу.

По командах блоку управління **БУ**, що зберігає алгоритм діагнозу, джерело впливів **ДВ** виробляє впливи  $a_j$  елементарних перевірок  $p_j \in P$  і відповідно до алгоритму діагнозу в певній послідовності подає їх через пристрій зв'язку **ПЗ** на об'єкт діагнозу **ОД**, а також, можливо, на фізичну модель **ФМ** об'єкта. У загальному випадку пристрій зв'язку **ПЗ** може переключати (комутувати) канали зв'язку по сигналах блоку керування.

Якщо, наприклад, система рис. 4 вирішує завдання перевірки справності об'єкта, то реалізація фізичної моделі зводиться до подання функції

$$R_j = \psi(p_j) \quad (7)$$

для всіх  $p_j \in P$ . Для цього випадку на рис. 4 поруч із виходом фізичної моделі зазначена безліч сигналів  $\{R_j\}$ .

При пошуку несправностей об'єкта можливі різні варіанти організації процесу тестового діагнозу. Якщо до реалізації процесу невідомо, справний об'єкт чи несправний, то у фізичній моделі повинні бути представлені як залежність (7), так і залежності

$$R_j^i = \psi^i(p_j) \quad (8)$$

для всіх  $s_i \in S$  і всіх  $p_j \in P$ , тобто безліч вихідних сигналів фізичної моделі утворять безлічі  $\{R_j\}$  і  $\{R_j^i\}$

Часто процес тестового діагнозу організують у два етапи: спочатку реалізують алгоритм перевірки справності об'єкта й тільки у випадку одержання результату перевірки "об'єкт несправний" переходять до реалізації алгоритму пошуку несправностей. При наявності попередньої інформації про те, що об'єкт несправний, для рішення завдання пошуку несправностей досить, щоб фізична модель реалізувала тільки залежності (8), тобто видавала безліч сигналів  $\{R_j^i\}$ .

Таким чином, фізична модель об'єкта видає інформацію про можливі технічні стани об'єкта у вигляді можливих результатів  $R_j$ ,  $R_j^i$  елементарних перевірок з безлічі  $P$ . Ця інформація надходить у блок розшифровки результатів  $BPP$ .

Відповідями об'єкта діагнозу на впливи  $\alpha_j$  є фактичні результати  $R_j^*$  елементарних перевірок  $p_j \in P$ . Ці результати через пристрій зв'язку  $ПЗ$  надходять на вимірювальний пристрій  $ВП$  й потім з виходу останнього (у деякій, можливо, перетвореній формі) – на вхід блоку розшифровки результатів. Показаний на рис. 1 пунктиром зворотний зв'язок між блоком розшифровки результатів і блоком керування виконується тоді, коли реалізований у системі алгоритм діагнозу являє собою умовну послідовність елементарних перевірок. У цьому випадку чергова елементарна перевірка з безлічі  $P$  призначається залежно від фактичних результатів  $R_j^*$  попередніх їй елементарних перевірок.

У блоці розшифровки результатів виконується зіставлення (порівняння) можливих  $\{R_j\}$ ,  $\{R_j^i\}$  і фактичних  $R_j^*$  результатів елементарних перевірок, призначаються чергові елементарні перевірки й формуються результати діагнозу.

### 3. Математична модель системи функціонального діагнозу

Схема системи функціонального діагнозу показана на рис. 2.

Характерною рисою таких систем, як ми вже відзначали, є відсутність у засобах діагнозу джерела тестових впливів. Нагадаємо, що тепер об'єкт у процесі діагнозу застосовується по своєму призначенню або перебуває в режимі імітації такого застосування: впливи  $\alpha_j$  є робочими й надходять на основні входи об'єкта.

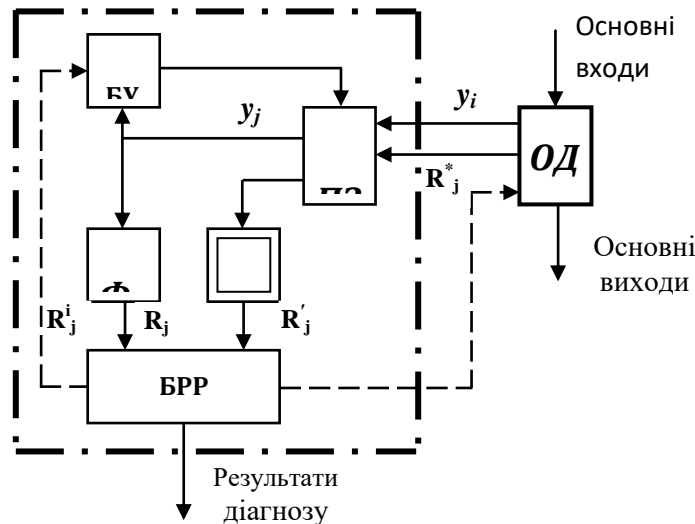


Рис. 2. Схема системи функціонального діагнозу.

З об'єкта знімаються, по-перше, сигнали керування (на рис. 2 вони позначені символом  $u_i$ ) засобами діагнозу й, по-друге, сигнали  $R_j^*$  реакцій об'єкта на впливи  $\alpha_j$ . Сигнали  $u_i$  потрібні тоді, коли є необхідність керування фізичною моделлю  $ФМ$  і блоком управління  $БУ$  залежно від режиму роботи об'єкта. Блок управління по сигналах  $u_i$ , а також, можливо, по сигналах зворотного зв'язку від блоку розшифровки результатів  $BPP$  здійснює комутацію каналів у пристрої зв'язку  $ПЗ$ . Якщо на систему функціонального діагнозу покладені також функції захисту об'єкта, то  $BPP$  видає команди на керування об'єктом.

Як і в системах тестового діагнозу, блок розшифровки результатів  $BPP$  робить зіставлення фактичних результатів  $R_j^*$  елементарних перевірок з можливими результатами  $\{R_j\}$ ,  $\{R_j^i\}$ , видаваними фізичною моделлю. Коли система вирішує завдання перевірки правильності функціонування об'єкта, досить, щоб фізична модель зберігала й видавала тільки безліч  $\{R_j\}$  результатів. При пошуку несправностей необхідне знання також результатів  $\{R_j^i\}$ .

Прикладом систем функціонального діагнозу є широко розповсюджені системи централізованого контролю, у яких про технічний стан об'єкта судять за результатами порівняння фактичних значень параметрів об'єкта з їх верхніми й нижніми припустимими значен-

нями. У цьому випадку фізичною моделлю об'єкта діагнозу є апаратура зберігання й видачі зазначених припустимих значень контрольованих параметрів.

На закінчення відзначимо, що тут були розглянуті загальні умови проведення процесів діагнозу. Не завжди в практиці потрібно або можливо проведення діагнозу із глибиною до кожної окремої несправності  $s_i \in S$  об'єкта (наприклад, часто немає необхідності розрізняти несправності такого ж самого резервного компонента об'єкта). Іноді корисно забезпечити можливість формувати результати тестового діагнозу по ходу процесу й тим самим припиняти його, не чекаючи реалізації всіх елементарних перевірок з безлічі  $P$ .

У системах функціонального діагнозу не завжди можна чітко відокремити апаратуру, що належить об'єкту діагнозу, від апаратури засобів діагнозу. Більше того, вбудовані засоби функціонального діагнозу можуть використовуватися для цілей тестового діагнозу, а структура функціонуючого об'єкта діагнозу може відрізнитися від його структури при тестовому діагнозі й т.п.

Представлені на рис. 1 і 2 схеми систем діагнозу можуть мати ті або інші зміни залежно від того, якими є ці системи – автоматичними, автоматизованими або ручними, які застосовуються в них засоби діагнозу – універсальні (керовані по змінній програмі) або спеціалізовані, програмні або апаратні й т.п.

## Лекція 4. Таблиця функцій несправностей об'єктів діагнозу

### План лекції:

1. Побудова таблиці функцій несправностей.
2. Алгоритми мінімізації таблиці функцій несправностей.
3. Шляхи зменшення розмірів таблиці функцій несправностей.

### 1. Побудова таблиці функцій несправностей.

Явну математичну модель об'єкта діагнозу типу  $(\Psi \{ \Psi^i \})$ , тобто сукупність функцій (4) і (5) (див. лекцію 3), можна представити в табличній формі.

Позначимо безліч технічних станів об'єкта символом  $E$ . Нехай  $e_o \in E$  позначає справний стан об'єкта, а  $e_i \in E$  – його *i-несправний* стан. Кожному *i-несправному* стану відповідає несправність  $s_i$  з безлічі  $S$ .

Побудуємо прямокутну таблицю, рядкам якої поставимо у відповідність припустимі елементарні перевірки  $\pi_j$  з безлічі  $\Pi$ , а стовпцям – технічні стани об'єкта з безлічі  $E$  або, що те ж саме – функції  $\Psi$  і  $\Psi^i$ ,  $i = 1, 2, \dots, |S|$ , реалізовані об'єктом, що перебуває в справному  $e_o$  або *i-несправному*  $e_i$  стані. У клітинці  $(j, i)$  таблиці, що перебуває на перетині рядка  $\pi_j$ , і стовпця  $e_i$  проставимо результат  $R_j^i$  елементарної перевірки  $\pi_j$  об'єкта, що перебуває в технічному стані  $e_i$ . Безліч всіх результатів  $R_j^i$ ,  $j = 1, 2, \dots, |\Pi|$ ;  $i = 0, 1, \dots, |S|$  позначимо символом  $R$ . Очевидно,  $|R| = |\Pi| \cdot (|S| + 1)$ . Побудовану таблицю 1 будемо називати **таблицею функцій несправностей (ТФН)** об'єкта діагнозу.

Помітимо відразу, що безпосереднє використання таблиці функцій несправностей, як форми подання інформації, при побудові й реалізації алгоритмів діагнозу та фізичних моделей об'єктів діагнозу, часто неможливе через високу розмірність таблиці. Однак як універсальна математична модель об'єкта діагнозу таблиця функцій несправностей дуже наочна й зручна під час обговорення й класифікації принципів, а також основних процедур побудови і реалізації алгоритмів діагнозу, навіть якщо ці принципи і процедури спочатку формулюються на мовах, відмінних від мови таблиць функцій несправностей.

Завдання таблиці функцій несправностей еквівалентно завданню системи функцій (4) і (5). Дійсно, стовпець  $e_o$  таблиці задає поведінку справного об'єкта, тобто функцію (4), а інші її стовпці – поведінку об'єкта, що перебуває у відповідних несправних станах, тобто функції (5).

Для визначеності приймемо тут, що безліч  $\Pi$  має **властивість виявлення** будь-якої несправності з безлічі  $S$ , тобто для будь-якої несправності  $s_j \in S$  знайдеться хоча б одна елементарна перевірка  $\pi_j \in \Pi$  – така, що  $R_j^i \neq R_j^k$ , а також **властивістю розрізнення** всіх несправностей з безлічі  $S$ , тобто для кожної пари несправностей  $s_i, s_k \in S$ ,  $i \neq k$ , знайдеться хоча б одна елементарна перевірка  $\pi_j \in \Pi$ , така, що  $R_j^i \neq R_j^k$ .

Таблиця 1.

**Таблиця функцій несправностей.**

П	E				
	$e_o$	...	$e_i$	...	$e_s$
$\pi_1$	$R_1$		$R_1^i$		$R_1^s$
...	...	...	...	...	...
$\pi_j$	$R_j$		$R_j^i$		$R_j^s$
...	...	...	...	...	...
$\pi_{\Pi}$	$R_{\Pi}$		$R_{\Pi}^i$		$R_{\Pi}^s$

Наявність у безлічі  $\Pi$  **властивості виявлення несправностей** еквівалентно тому, що стовпець  $e_o$  таблиці функцій несправностей відрізняється від кожного з інших її стовпців  $e_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, |S|$ , а **властивості розрізнення** – в тому, що всі стовпці таблиці, що представляють несправні стани, попарно різні.

Як усяка математична модель об'єкта діагнозу, **таблиця функцій несправностей потрібна для двох застосувань** – для побудови алгоритмів діагнозу при проектуванні систем діагнозу і для побудови фізичної моделі об'єкта при реалізації цих систем.

**Викладемо основні операції** процесу побудови алгоритма діагнозу по таблиці функцій несправностей.

Припустимо, що безліч  $S$  несправностей об'єкта містить або всі несправності (при розгляді завдань перевірки справності й пошуку всіх несправностей), або тільки ті з них, які порушують працездатність об'єкта (у завданнях перевірки працездатності й пошуку несправностей, що роблять об'єкт непрацездатним), або, нарешті, тільки несправності, які порушують правильне функціонування об'єкта (при перевірці правильності функціонування й при пошуку несправностей, що порушують функціонування об'єкта). Ця ж умова поширюється і на безліч  $E$  технічних станів об'єкта.

Завдання на побудову алгоритму діагнозу разом із вказівкою безлічі  $E$  можливих технічних станів об'єкта (або безлічі  $S$  його несправностей) повинне містити відомості про необхідну глибину діагнозу. Незалежно від призначення алгоритму діагнозу (для перевірки справності, працездатності, правильності функціонування або для пошуку несправностей) потрібну глибину діагнозу можна задати через фіксовану розбивку безлічі  $E$  на  $\lambda$  підмножин  $E_v$ , що не перетинаються,  $v = 1, 2, \dots, \lambda$ .

Тоді перевірці справності, працездатності або правильності функціонування відповідає мінімальна глибина діагнозу, при якій  $\lambda = 2$ , причому  $E_1 = \{e_0\}$  і  $E_2 = \{e_i / i = 1, 2, \dots, |S|\}$ . При пошуку несправностей з максимальною глибиною діагнозу (тобто з точністю до кожного окремого технічного стану)  $\lambda = |S| + 1$ ,  $E_1 = \{e_0\}$ ,  $E_v = \{e_i\}$ ,  $i = 1, 2, \dots, |S|$ . Проміжні значення глибини діагнозу характеризуються умовою  $2 < \lambda < |S| + 1$ .

Спосіб завдання глибини діагнозу розбивкою безлічі  $E$  технічних станів об'єкта на підмножини  $E_v$  є досить універсальним, але він незручний практично тоді, коли відсутня відповідність такої розбивки розбивці об'єкта на конструктивні складові частини. Значно зручніше необхідну глибину діагнозу задавати через розбивку безлічі конструктивних компонентів об'єкта на непересічні підмножини. **Наприклад**, широко відома вимога **проведення діагнозу із глибиною до змінного блоку** (вузла, компоненти) об'єкта.

Розглянемо особливості такого способу завдання глибини діагнозу.

Нехай об'єкт розбитий на  $N$  змінних блоків. Зіставимо  $l$ -му ( $l = 1, 2, \dots, N$ ) змінному блоку підмножину  $E_l$  технічних станів, кожний з яких визначається несправностями тільки цього блоку. Якщо передбачається, що в об'єкті може бути несправним тільки один блок, то об'єднання  $N$  підмножин  $E_l$  разом зі справним станом  $e_0$  об'єкта утворить безліч  $E$  всіх можливих технічних станів. Тому одержуємо:  $\lambda = N + 1$ ,  $E_1 = \{e_0\}$ ,  $E_v = E_l$ . Цей випадок відповідає розгляду одиночних несправностей об'єкта, якщо в якості останніх прийняти несправності кожного змінного блоку.

Інакше справа складається тоді, коли не можна виключити можливість одночасного існування несправностей у двох або більшому числі змінних блоків (кратних несправностей). При цьому, крім зазначеного вище формування підмножин  $E_l$ , необхідно кожній групі із двох, трьох і т. д. змінних блоків зіставити підмножини технічних станів, обумовлених одночасним існуванням несправностей у всіх блоках розглянутої групи. При цьому буде отримано  $2^N - 1$  непересічних підмножин технічних станів об'єкта, тобто (з урахуванням справного стану  $e_0$ )  $\lambda = 2^N$ .

Отже, нехай є таблиця функцій несправностей і задана тим чи іншим способом необхідна глибина діагнозу. Умовимося також, що в таблиці немає незаповнених клітинок.

Основу будь-якого алгоритму діагнозу становить сукупність  $\Pi$  вхідних елементарних перевірок (тестів). Для того, щоб забезпечити необхідну глибину діагнозу, ця сукупність повинна розрізняти кожну пару технічних станів, що належать різним підмножинам  $E_v$  і  $E_\mu$ ,  $v \neq \mu$ , хоча може не розрізняти будь-яку пару технічних станів, що належать тій самій підмножині  $E_v$ . Перша умова означає, що для кожної пари технічних станів  $e_i$  і  $e_k^*$ , що належать різним підмножинам  $E_v$  і  $E_\mu$ , серед елементарних перевірок сукупності  $\Pi$  знайдеться хоча б одна елементарна перевірка  $\pi_j$ ; результати  $R_j^i$  і  $R_j^k$  якої різні, тобто  $R_j^i \neq R_j^k$

(\* Один з них може бути справним станом  $e_0$ .)

Сукупність  $\Pi$  елементарних перевірок алгоритму діагнозу будемо називати **повною**, якщо вона забезпечує проведення діагнозу із заданою глибиною. Сукупність  $\Pi$  називається **не надлишковою**, якщо видалення з неї будь-якої однієї елементарної перевірки веде до зменшення глибини діагнозу.

По одній і тій же таблиці функцій несправностей і при заданій розбивці безлічі  $E$  на підмножини  $E_\nu$ , можна побудувати в загально-му випадку декілька повних не надлишкових сукупностей  $T$ . Ці сукупності можуть розрізнятися як складом, так і числом вхідних у них елементарних перевірок. Повні не надлишкові сукупності  $T$  з найменшим числом елементарних перевірок називаються **мінімальними**.

Побудова по таблиці функцій несправностей всіх повних не надлишкових сукупностей  $T$  можна здійснити, виконавши наступні **дві операції**:

1) перебором всіх можливих неупорядкованих пар стовпців таблиці функцій несправностей виділити пари  $e_i, e_k$  технічних станів, що належать різним підмножинам  $E_\nu, E_\mu$ , і для кожної такої пари перебором всіх рядків таблиці визначити підмножини  $\Pi_{ik}$  елементарних перевірок  $\pi_i$ , результати  $R^i_j$  і  $R^k_j$  яких для технічних станів  $e_i$  і  $e_k$ , різні  $R^i_j \neq R^k_j$ .

2) перебором всіх підмножин  $\Pi_{ik}$ , отриманих у результаті виконання операції 1, знайти всі такі сукупності  $T$  елементарних перевірок, щоб у кожній з них для кожної підмножини  $\Pi_{ik}$  знайшлася хоча б одна елементарна перевірка  $t_j$ , що належить цій підмножині  $\Pi_{ik}$  (тобто  $t_j \in \Pi_{ik}$ ).

## 2. Алгоритми мінімізації таблиці функцій несправності.

Блок-схема алгоритму  $A_1$  виконання операції 1 наведена на рис. 1. Вхідними даними  $A_1$  є таблиця функцій несправностей і розбивка безлічі  $E$  на підмножини  $E_\nu$ . Номера стовпців таблиці відзначаються індексами  $i = 0, 1, \dots, |S| - 1, k = i + 1, i + 2, \dots, |S|$ , а номера її рядків – індексом  $j = 1, 2, \dots, |\Pi|$ .

Формальний спосіб виконання операції 2 полягає в наступно-му. Позначимо символом  $U$  безліч всіх підмножин  $\Pi_{ik}$ , отриманих у результаті виконання операції 1. Нехай  $l$  – порядковий номер деякої підмножини  $\Pi_{ik}$  як елемента  $(\Pi_{ik})_l$  безлічі  $U, l = 1, 2, \dots, |U|$ . Візьмемо дві перших підмножини  $(\Pi_{ik})_1$  і  $(\Pi_{ik})_2$  і утворимо всі можливі пари вхідних у них елементарних перевірок. Серед цих пар зробимо наступні спрощення: кожну пару виду  $(\pi_j, \pi_i)$  замінимо однією елементарною перевіркою  $(\pi_j)$ ; при наявності однієї елементарної перевірки  $(\pi_j)$  і пар виду  $(\pi_j, \pi_q)$  видалимо останні. Отриману після таких спрощень безліч пар  $i$ , можливо, одиночних елементарних перевірок позначимо символом  $\Pi_1$ . Потім візьмемо безліч  $(\Pi_{ik})_3$  і побудовану безліч  $\Pi_1$  і утворимо всі можливі пари їхніх елементів. Після виконання серед цих пар спрощень, аналогічних зазначеним вище, одержуємо безліч  $\Pi_2$  і т.д. Підмножина  $(\Pi_{ik})_l$  і безліч  $\Pi_{l-1}$  дають безліч  $\Pi_l$ . Кожний елемент безлічі  $\Pi_{|U|}$  є повною ненадлишковою сукупністю  $T$  елементарних перевірок.

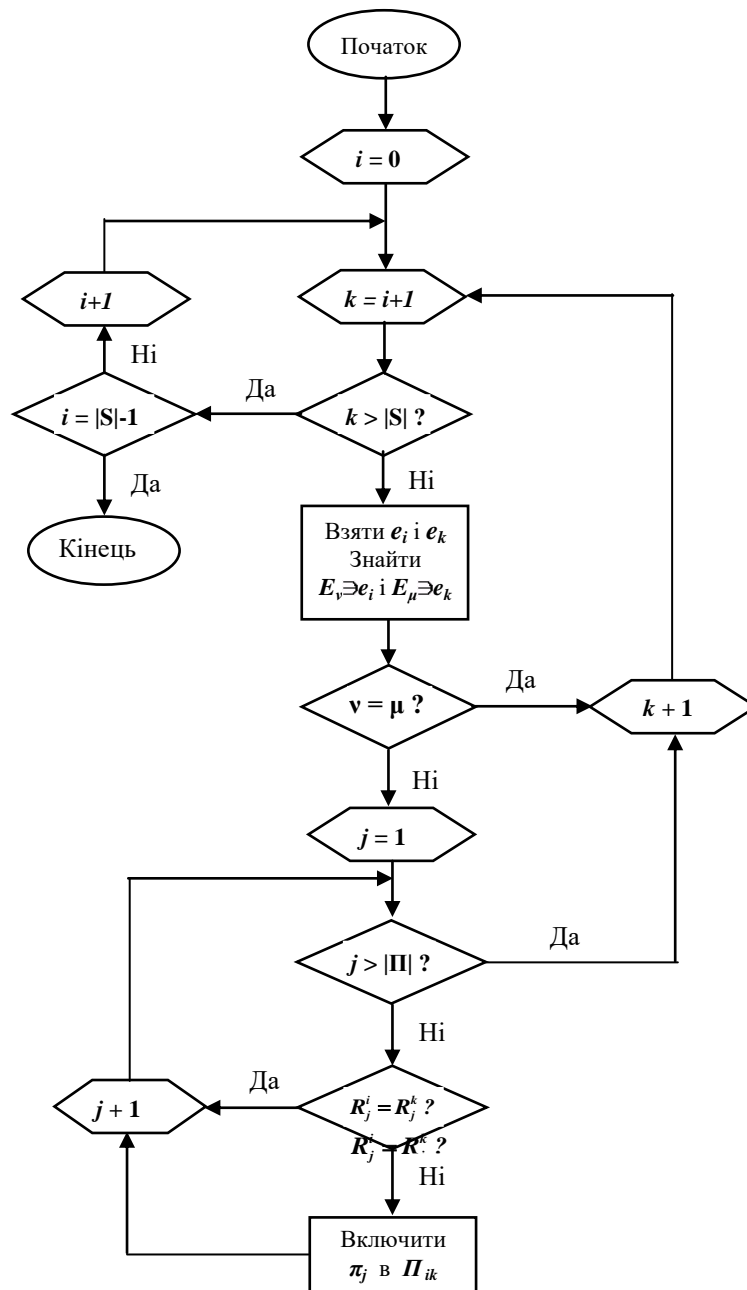


Рис. 1. Блок-схема алгоритму A1

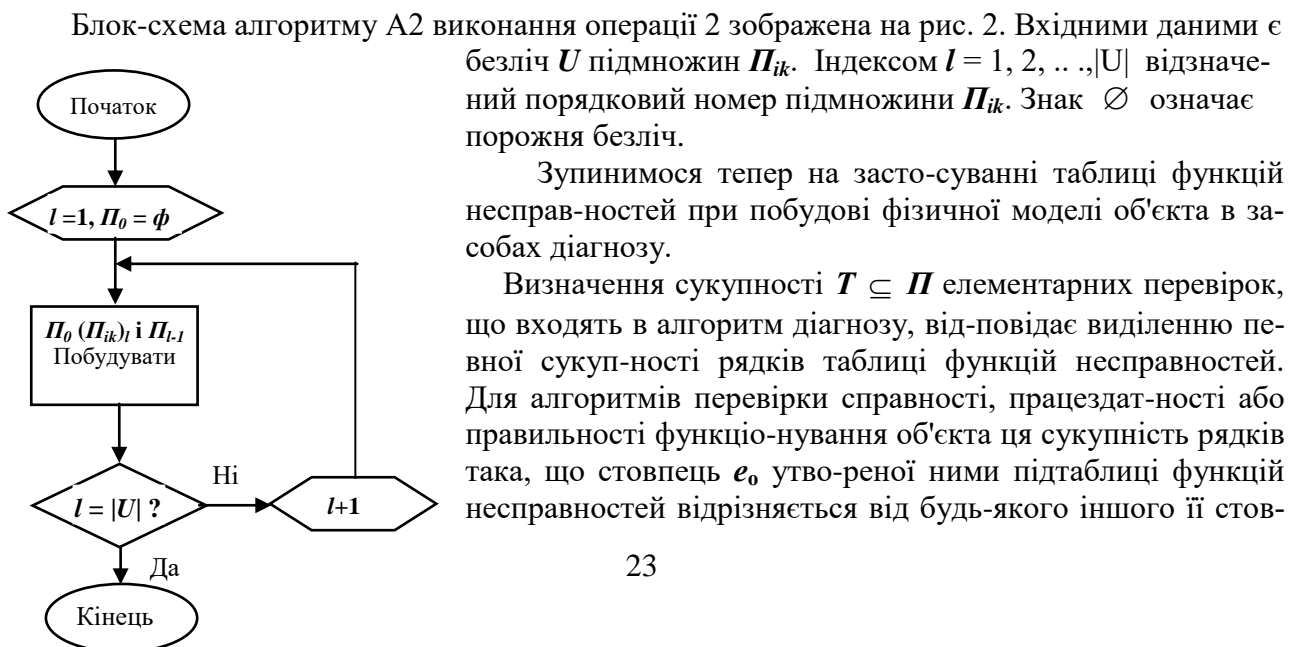


Рис. 2. Блок-схема алгоритму A2

Блок-схема алгоритму A2 виконання операції 2 зображена на рис. 2. Вхідними даними є безліч  $U$  підмножин  $\Pi_{ik}$ . Індексом  $l = 1, 2, \dots, |U|$  відзначений порядковий номер підмножини  $\Pi_{ik}$ . Знак  $\emptyset$  означає порожня безліч.

Зупинимося тепер на застосуванні таблиці функцій несправностей при побудові фізичної моделі об'єкта в засобах діагнозу.

Визначення сукупності  $T \subseteq \Pi$  елементарних перевірок, що входять в алгоритм діагнозу, відповідає виділенню певної сукупності рядків таблиці функцій несправностей. Для алгоритмів перевірки справності, працездатності або правильності функціонування об'єкта ця сукупність рядків така, що стовпець  $e_0$  утвореної ними підтаблиці функцій несправностей відрізняється від будь-якого іншого її стов-

пця. Аналогічно при пошуку несправностей з максимальною глибиною всі стовпці такої підтаблиці функцій несправностей попарно різні.

Підтаблицю, утворену сукупністю  $T$  рядків, будемо називати ***T*-таблицею**, функцій несправностей, щоб відрізнити її від вхідної таблиці функцій несправностей, яку можна називати ***P*-таблицею**.

Неважко бачити, що  $T$ -таблиця функцій несправностей є заданням функцій (7) і (8), що визначають фізичну модель об'єкта в засобах діагнозу. При поданні фізичної моделі об'єкта  $T$ -таблицею функцій несправностей процес розшифровки фактичних результатів  $R_j^*$  елементарних перевірок можна представити в такий спосіб.

Кожна реалізована елементарна перевірка  $t_j \in T$  виділяє відповідний рядок  $T$ -таблиці, а її фактичний результат  $R_j^*$  ділить безліч стовпців таблиці на дві підмножини. Ті стовпці  $e_i$ ,  $i = 0, 1, \dots, |S|$ , для яких  $R_j^i \neq R_j^*$  “викреслюються” з таблиці. Стовпці, що залишилися, для яких  $R_j^i = R_j^*$ , являють підмножину можливих технічних станів об'єкта. Завершенню процесу діагнозу відповідає момент, коли в таблиці залишиться єдиний “не викреслений” стовпець. Помітимо, що “викреслювання” стовпця  $e$  означає, що об'єкт діагнозу несправний.

Отже, чим менше число рядків  $T$ -таблиці функцій несправностей, тим простіше реалізація відповідного їй алгоритму діагнозу і фізичної моделі об'єкта, яку вона описує. Тому при проектуванні систем діагнозу часто прагнуть будувати алгоритми діагнозу з як можна меншим числом вхідних у них елементарних перевірок.

Чим більше різних елементарних перевірок у безлічі  $P$ , тим ширше можливості одержання алгоритмів діагнозу з малим числом елементарних перевірок. Однак, загалом кажучи, чим більше рядків (а також стовпців) містить  $P$ -таблиця функцій несправностей, тим більше потрібно операцій по її обробці для побудови оцудливих алгоритмів діагнозу. Звідси можна зробити висновок – чим більше зусиль буде витрачено при побудові алгоритму діагнозу, тим простіше буде технічна реалізація системи діагнозу.

Зокрема, ніяких зусиль не потрібно на побудову так званого тривіального алгоритму діагнозу, що містить всі елементарні перевірки безлічі  $P$ , але при цьому фізична модель повинна бути представлена  $P$ -таблицею функцій несправностей і тому буде максимально складною, а час і інші витрати на реалізацію алгоритму діагнозу будуть найбільшими.

Інша крайня, завжди бажана, але часто недосяжна ситуація полягає в одержанні всіх не надлишкових алгоритмів діагнозу з метою наступного вибору з них найкращого (наприклад, мінімального) алгоритму. Цього можна досягти, зокрема, застосуванням алгоритмів  $A1$  і  $A2$ , що представляють собою повний перебір всіх можливих рішень і тому потребуючого максимального обсягу операцій по обробці  $P$ -таблиці функцій несправностей. Між цими двома крайніми ситуаціями лежить ряд проміжних, що розрізняються обсягами обчислень і відповідно розмірами витрат на реалізацію систем діагнозу.

Найчастіше причиною змушеної відмови від одержання мінімальних алгоритмів діагнозу є великі розміри  $P$ -таблиці функцій несправностей. Розміри таблиці визначаються як числом її рядків і стовпців, так і розмірністю результатів  $R_j$ ,  $R_j^i \in R$  елементарних перевірок.

### 3. Шляхи зменшення розмірів таблиці функцій несправностей

Розглянемо шляхи зменшення розмірів  $P$ -таблиці функцій несправностей, тобто обсягів тої інформації, що задається в якості вхідної для побудови алгоритмів діагнозу, не маючи на увазі такі тривіальні можливості, як видалення повторюваних рядків і стовпців таблиці.



Почнемо зі **зменшення числа рядків шляхом укрупнення елементарних перевірок**. Елементарна перевірка вище була визначена як якийсь, у значній мірі довільний, експеримент над об'єктом діагнозу. Якщо в якості елементарної перевірки прийняти такий експеримент, реалізація якого дає достатній для діагнозу опис поведження об'єкта (у справному і всіх його несправних станах), то безліч  $\Pi$  стає одноелементною (таблиця функцій несправностей містить один рядок). Таке гранично можливе скорочення числа рядків  $\Pi$ -таблиці буде супроводжуватися збільшенням розмірності результатів елементарної перевірки, тому що опис поведження об'єкта буде максимально складним. При цьому втрачає зміст завдання мінімізації алгоритмів діагнозу, так-як існує єдиний тривіальний алгоритм діагнозу. **У цих умовах фізична модель і алгоритм діагнозу будуть досить складними**. Проте в ряді випадків подання математичної моделі об'єкта діагнозу у вигляді однорядкової таблиці функцій несправностей може мати практичне значення. Це має місце, наприклад, у тому випадку коли недоцільно або неможливо розчленувати експеримент над об'єктом на ряд елементарних перевірок.

**Інший шлях скорочення числа рядків  $\Pi$ -таблиці функцій несправностей** складається у виключенні частини елементарних перевірок із числа всіх припустимих. Прикладом може служити завдання тільки тих елементарних перевірок, впливи яких можуть зустрітися в процесі виконання об'єктом його робочого алгоритму функціонування. Ця множина елементарних перевірок може виявитися достатньою для рішення завдань перевірки справності, працездатності або правильності функціонування, чого не можна сказати щодо завдань пошуку несправностей об'єкта.

Ідеальним було б виключення з безлічі  $\Pi$  всіх тих елементарних перевірок, які свідомо не ввійдуть у мінімальні алгоритми діагнозу. Однак прості способи знаходження всіх таких “непотрібних” рядків  $\Pi$ -таблиці функцій несправностей, тобто способів, що не вимагають складних процедур аналізу складу і властивостей всіх елементарних перевірок безлічі  $\Pi$ , невідомі.

**Загальною вимогою при скороченні числа рядків таблиці функцій несправностей** є контроль за тим, щоб в обраній безлічі  $\Pi$  елементарних перевірок **зберігалася властивість повноти**. Варто також пам'ятати, що скорочення числа рядків  $\Pi$ -таблиці може привести до збільшення числа елементарних перевірок, що входять в алгоритм діагнозу.

**Скорочення числа стовпців** таблиці функцій несправностей відповідає зменшенню числа розглянутих технічних станів об'єкта діагнозу. У ряді випадків таке зменшення може бути визначено умовами розв'язуваного завдання. Наприклад, завдання діагнозу технічного стану об'єкта в умовах його експлуатації в ряді випадків можуть вирішуватися при розгляді тільки безлічі  $\Pi$  одиночних несправностей, коли ймовірності появи кратних несправностей приймаються рівними нулю.

Принципово можливо й завжди бажане виключення “непотрібних” стовпців таблиці, відсутність яких не знижує точності результатів (глибини) діагнозу. Знаходження всіх таких стовпців, на жаль, є складним завданням, рішення якого вимагає спеціальних досліджень і відомо тільки для ряду окремих випадків, при яких ураховуються як властивості структури об'єкта діагнозу, так і класи можливих несправностей.

У загальному випадку при зменшенні числа стовпців таблиці функцій несправностей варто мати на увазі, що алгоритми діагнозу, побудовані щодо деякої підмножини можливих технічних станів об'єкта, не завжди дозволяють визначити виключені з розгляду технічні стани. Більше того, необґрунтоване виключення стовпців таблиці може привести до одержання помилкових результатів діагнозу. Наприклад, при реалізації алгоритму перевірки справності, побудованого в припущенні наявності тільки одного несправного компонента, можна одержати помилковий сигнал справності об'єкта при фактичній наявності в ньому декількох несправних компонентів.

Тепер зупинимось на питанні **скорочення розмірності результатів  $R_j$ ,  $R_j^i \in R$**  елементарних перевірок. Результат елементарної перевірки  $\pi_j$ , як відзначалося вище, являє со-

бою послідовність  $\{\gamma\}$   $i$ -мірних векторів значень сигналів у контрольних точках об'єкта. Виходить, скорочення розмірності результатів елементарної перевірки можливо шляхом зменшення розмірності вектора значень зазначених сигналів, а також шляхом зменшення числа векторів у їх послідовності.

Максимальне скорочення розмірності результатів елементарних перевірок  $\Pi$ -таблиці функцій несправностей дає наступний прийом. У кожному рядку  $j$  таблиці всі результати елементарної перевірки  $\pi_j$ , що задовольняють умові  $R_j^i = R_j$ ,  $i = 1, 2, \dots, |S|$ , приймаються рівними 1. Інші результати цієї елементарної перевірки, для яких має місце нерівність  $R_j^i \neq R_j$  приймаються рівними 0, незалежно від того, різні вони між собою або однакові. При цьому результат будь-якої елементарної перевірки (безвідносно до фізичної природи впливів і відповідей, а також до складу й значень вхідних сигналів і сигналів у контрольних точках) може трактуватися тільки як позитивний ( $R_j^i = 1$ ) або як негативний ( $R_j^i = 0$ ).

Спрошену в такий спосіб таблицю функцій несправностей будемо називати **двійковою математичною моделлю** об'єкта діагнозу. Помітимо, що в цій моделі стовпець  $e_0$ , що відповідає справному стану об'єкта, містить тільки позитивні результати елементарних перевірок.

У загальному випадку **скорочення розмірності результатів елементарних перевірок знижує можливості розрізнення технічних станів об'єкта** й, як наслідок, може вимагати збільшення числа елементарних перевірок, що входять в алгоритм діагнозу. З іншого боку, скорочення розмірності результатів елементарних перевірок **веде до спрощення реалізації операцій передачі, виміру, порівняння й аналізу цих результатів** у системах діагнозу.

Отже, ефективних шляхів скорочення розмірів таблиці функцій несправностей практично немає. Таблиця залишається громіздкою й тому вимагає значних обсягів обчислень у процесі її обробки. У цьому складається основна причина пошуку й розробки різних більше ощадливих способів подання й обробки інформації, необхідної для побудови й реалізації алгоритмів діагнозу й фізичних моделей об'єктів діагнозу. У багатьох, випадках "платою" за цю економію є відмова від одержання точних (оптимальних або мінімальних) рішень.

Як вказувалося,  $\Pi$ -таблиця функцій несправностей є табличною формою завдання явної математичної моделі об'єкта діагнозу  $(\psi, \{\psi^i\})$ . Інформацію, що міститься в  $\Pi$ -таблиці, можна одержувати вроздріб, що відповідає роботі з неявною математичною моделлю об'єкта діагнозу  $(\psi, S, \Pi, \psi \xrightarrow{s_i} \psi^i)$ . У цьому випадку обчислювальні труднощі збільшуються в зв'язку з необхідністю проведення розрахунків при перетворенні передаточної функції справного об'єкта на всі моделі несправного об'єкта  $(\psi \xrightarrow{s_i} \psi^i)$ .

У наступних лекціях розглянемо інші способи рішення завдань діагнозу, алгоритми яких забезпечують зменшення обчислювальних труднощів, що викликаються великими розмірами  $\Pi$ -таблиці функцій несправностей.

## Лекція 5. Способи і засоби реалізації алгоритмів діагнозу

План лекції:

1. Алгоритми діагнозу
2. Класифікація засобів діагнозу.
3. Організація процесів діагнозу.

### 1. Алгоритми діагнозу

Алгоритм діагнозу задає сукупність елементарних перевірок, послідовність (чи послідовності) їх реалізації і правила обробки результатів реалізованих елементарних перевірок з метою одержання результатів діагнозу.

Сукупність вхідних в алгоритм діагнозу елементарних перевірок ми раніше позначили символом  $T$ . Для позначення довільної елементарної перевірки із сукупності  $T$  збережемо символ  $t_j$ .

Щоб більш наочно представити класифікацію алгоритмів діагнозу і характерні цільові функції їх оптимізації, розглянемо деякі питання представлення алгоритмів діагнозу у виді графів.

Результати будь-якої елементарної перевірки можуть бути використані як ознаки розбивки безлічі  $E$  технічних станів об'єкта чи підмножин цієї безлічі на класи. Про це йшла мова в лекції 4 (рис. 1) при розгляді прямих задач діагнозу. Використовуючи таке трактування елементарних перевірок і їх результатів, будь-який алгоритм діагнозу можна представити деяким орієнтованим графом. Тут ми обмежимося випадком, коли граф алгоритму діагнозу представляється деревом.

**Дерево** має вершини двох типів: вершини, з яких виходить хоча б одна дуга, і вершини, з яких не виходить ні однієї дуги. Приклад дерева даний на рис. 1, де вершини першого типу представлені зачерненими кружками, а вершини другого типу – світлими кружками. У дереві є єдина вершина першого типу, у яку не заводять жодна дуга. Ця вершина називається **початковою** або **коренем дерева** (на рис. 1 початкова вершина позначена символами  $t_0, E$ ). Вершини, з яких не виходить ні однієї дуги, називаються **кінцевими** або **висячими** вершинами.

Інші вершини дерева називаються **внутрішніми**. У кожному вершину дерева, крім його кореня, заходить тільки одна дуга. У дереві немає контурів. Заради простоти стрілки на дугах дерева вказувати не будемо.

**Рангом** вершини дерева називається число дуг шляху, що починається в початковій вершині  $t_0$  і закінчується в розглянутій вершині. **Мінімальним рангом**  $\rho_0$  дерева є ранг, для якого існує хоча б одна висяча вершина і не існує ні однієї висячої вершини рангу менше  $\rho_0$ . **Максимальним рангом**  $\rho_m$  дерева є ранг, для якого існує хоча б одна вершина рангу  $\rho_m$  не існує ні однієї вершини рангу більше  $\rho_m$ .

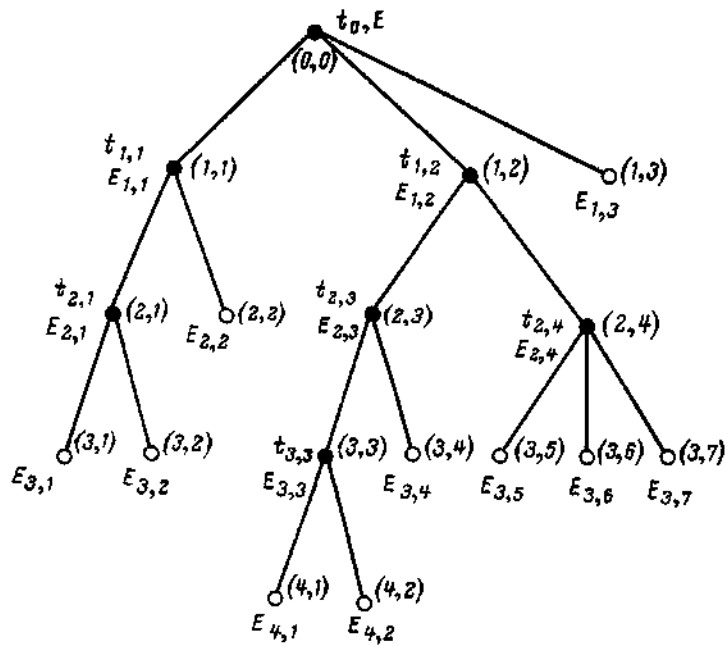


Рис. 1. Приклад дерева, що представляє алгоритм діагнозу.

Будемо нумерувати внутрішні і висячі вершини дерева (рис. 1) парою чисел у дужках  $(\rho, \sigma)$ , де  $\rho \in$  ранг вершини, а  $\sigma$  – її порядковий номер (наприклад, ліворуч праворуч у заданому графічному представленні дерева) серед усіх вершин того самого рангу. Початкову вершину будемо позначати парою  $(0, 0)$ .

Початковій і внутрішній вершинам дерева зіставимо елементарні перевірки безлічі  $T$ . Дугам дерева, що виходять з довільної його вершини, зіставимо можливі результати перевірки, що представляється цією вершиною. Крім того, початковій вершині дерева поставимо у відповідність безліч  $E$  можливих технічних станів об'єкта, а внутрішнім і висячим вершинам – підмножини технічних станів, що одержані як класи розбивок за результатами відповідних елементарних перевірок. Елементарну перевірку і підмножину технічних станів, зіставлених вершині  $(\rho, \sigma)$  дерева, будемо позначати символами  $t_{\rho,\sigma}$  і  $E_{\rho,\sigma}$  відповідно. Безліч елементарних перевірок  $t_{\rho,\sigma}$ , зіставлених початковій і усім внутрішнім вершинам дерева, позначимо символом  $T_d$ . З правил побудови дерева випливає, що об'єднання всіх підмножин технічних станів, зіставлених висячим вершинам дерева, є безліч  $E$  можливих технічних станів об'єкта. Кожному шляху в дереві відповідає послідовність елементарних перевірок, зіставлених вершинам шляху.

Звернемося до рис. 1 і розглянемо, як дерево представляє алгоритм діагнозу.

Початковій вершині дерева зіставлена елементарна перевірка  $t_0$  і безліч  $E$  всіх можливих технічних станів об'єкта діагнозу. Елементарна перевірка  $t_0$  має три можливих результати, тобто  $a(t_0) = 3$ , і тим самим розбиває безліч  $E$  на три підмножини  $E_{1,1}$ ,  $E_{1,2}$  і  $E_{1,3}$ , що не розрізняються цією перевіркою технічних станів. Перші дві з цих підмножин відповідають внутрішнім вершинам  $(1,1)$  і  $(1,2)$  і тому підлягають подальшій розбивці елементарними перевірками  $t_{1,1}$ , і  $t_{1,2}$  відповідно. Третя підмножина  $E_{1,3}$  відповідає висячій вершині  $(1, 3)$ , і тому розбивка її на підмножини алгоритмом діагнозу не передбачена. Далі, елементарна перевірка  $t_{1,1}$ , у якій  $a(t_{1,1}) = 2$ , розбиває підмножину  $E_{1,1}$  на дві підмножини  $E_{2,1}$  і  $E_{2,2}$ , що не розрізняються цією перевіркою технічних станів. Одна з них, а саме  $E_{2,1}$  представлена внутрішньою вершиною  $(2,1)$ , а друга  $E_{2,2}$  – висячою вершиною  $(2,2)$ . Аналогічно можна розглянути будь-яку іншу внутрішню вершину  $(\rho, \sigma)$  дерева, відповідні цій вершині елементарну перевірку  $t_{\rho,\sigma}$  і підмножину  $E_{\rho,\sigma}$ , а також розбивку останньої на  $a(t_{\rho,\sigma})$  підмножин.

Будемо поки вважати, що робота алгоритму діагнозу припиняється (тобто видаються результати діагнозу), як тільки в процесі реалізації вхідних в алгоритм елементарних переві-

рок буде досягнута висяча вершина дерева. Фактичний технічний стан  $e^*$  об'єкта діагнозу належить підмножині, зіставленій досягнутій висячій вершині.

У дереві представлені всі можливі реалізації алгоритму діагнозу і відповідні їм результати діагнозу. Кожної конкретної реалізації алгоритму діагнозу відповідає єдиний шлях у дереві, тобто єдина послідовність реалізації елементарних перевірок алгоритму. Наприклад, якщо фактичний технічний стан  $e^*$  належить підмножині  $E_{4,2}$  на рис. 1, то послідовність реалізації елементарних перевірок буде  $t_0, t_{1,2}, t_{2,3}, t_{3,3}$ .

Розглянемо деякий ненульовий ранг  $\rho$  дерева. У загальному випадку дерево може мати кілька внутрішніх вершин рангу  $\rho$ , наприклад дві вершини  $(\rho, \sigma_1)$  і  $(\rho, \sigma_2)$ . Це значить, що можливі дві різні послідовності реалізації елементарних перевірок, які розрізняються тим, що в одній з них на  $(\rho + 1)$ -м місці знаходиться елементарна перевірка  $t_{\rho,\sigma_1}$ , а в іншій – елементарна перевірка  $t_{\rho,\sigma_2}$ . Обидві ці перевірки можуть бути як однією і тією же елементарною перевіркою  $t_j$  безлічі  $T$ , так і різними елементарними перевірками цієї безлічі.

Якщо для кожного рангу дерева виконується умова, що усім внутрішнім вершинам цього рангу зіставлена та сама елементарна перевірка з безлічі  $T$ , то алгоритм діагнозу, який представляється таким деревом, називається **безумовним**. Це відповідає завданню однієї фіксованої послідовності реалізації елементарних перевірок з безлічі  $T$ , що не залежить від фактичного технічного стану об'єкта. Іншими словами, у безумовних алгоритмах діагнозу вибір чи призначення чергової елементарної перевірки, в послідовності їх реалізації, не залежить від результатів попередніх уже реалізованих елементарних перевірок.

Якщо ж у дереві знайдеться хоча б один ранг із декількома внутрішніми вершинами, яким зіставлені різні елементарні перевірки з безлічі  $T$ , то алгоритм діагнозу, який представляється цим деревом, називається **умовним**. Це відповідає тому, що є декілька різних реалізацій алгоритму діагнозу, які залежать від фактичного технічного стану об'єкта і які розрізняються складами реалізуємих елементарних перевірок, або послідовностями їх реалізації. Іншими словами, в умовних алгоритмах діагнозу вибір чи призначення деяких або усіх (крім  $t_0$ ) елементарних перевірок виконується з урахуванням результатів попередньої вже реалізованої елементарної перевірки.

Достоїнством безумовних алгоритмів є відносна простота їх представлення в засобах діагнозу: потрібно зберігати лише склад елементарних перевірок безлічі  $T_d$  і єдину послідовність їх реалізації. Для умовних же алгоритмів діагнозу необхідно зберігати крім складу елементарних перевірок безлічі  $T_d$  всі ознаки безумовних і умовних переходів від даної елементарної перевірки до наступної, тобто зберігати не одну, а кілька послідовностей реалізації елементарних перевірок з безлічі  $T_d$ . Таке ускладнення умовних алгоритмів діагнозу в порівнянні з безумовними дозволяє, однак, одержувати більш економічні процедури діагнозу завдяки вибору елементарних перевірок з урахуванням фактичного технічного стану об'єкта.

Безумовні алгоритми діагнозу можна класифікувати також по характеру їх зупинки, що по суті визначає спосіб реалізації алгоритму. Якщо видача результатів діагнозу передбачена тільки після реалізації всіх елементарних перевірок алгоритму, то останній є **алгоритмом з безумовною зупинкою**. Таким алгоритмам відповідають дерева, у яких усі висячі вершини мають однаковий ранг.

У багатьох випадках фактичний технічний стан об'єкта може бути визначений з необхідною глибиною діагнозу перш, ніж будуть реалізовані всі елементарні перевірки алгоритму діагнозу. Безумовні алгоритми, у яких передбачена можливість видачі результатів діагнозу після реалізації кожної елементарної перевірки, називаються **алгоритмами з умовною зупинкою**. Характерним для дерев, що представляють алгоритми з умовною зупинкою, є наявність не менше двох висячих вершин, ранги яких різні. Помітимо, що всі умовні алгоритми діагнозу по визначенню є алгоритмами з умовною зупинкою. У літературі в ряді випадків алгоритми з безумовною зупинкою називають комбінаційними (комбінаторними), а з умовною зупинкою – послідовними.

Розглянута класифікація алгоритмів діагнозу представлена на рис. 2.

Усі зазначені види алгоритмів діагнозу знаходять застосування в системах тестового діагнозу. У системах функціонального діагнозу послідовність реалізації елементарних перевірок алгоритму діагнозу визначається робочим алгоритмом функціонування об'єкта.

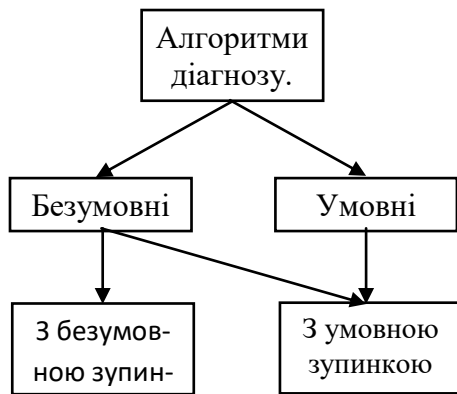


Рис. 2. Класифікація алгоритмів діагнозу.

У попередньому тексті результати елементарних перевірок  $\pi_j \in \Pi$  трактувалися як ознаки розбивок на класи підмножин або технічних станів, або несправностей об'єкта. Для алгоритмів пошуку несправностей із практичної точки зору було б зручно при діагнозі одержувати не класи технічних станів чи несправностей, а класи реальних компонентів або зв'язків об'єкта. Такий підхід завжди можливий, хоча і не завжди доцільний.

Розглянемо найпростіший випадок, коли несправним може бути тільки один компонент об'єкта, а результати елементарних перевірок можуть приймати тільки два значення. Така умова відповідає двійковій математичній моделі об'єкта діагнозу.

Нехай  $M$  – множина компонентів об'єкта. Кожній елементарній перевірці  $\pi_j$  можна зіставити сукупність  $K_j$  перевіряємих і сукупність  $\bar{K}_j$  неперевіряємих компонентів, або як іноді говорять, охоплюваних і неохоплюваних перевіркою компонентів. Компонента  $k_i$  перевіряється елементарною перевіркою  $\pi_j$ , якщо результат перевірки залежить від технічного стану цього компонента. Іншими словами, перевіряються ті компоненти, несправності яких виявляються відповідною елементарною перевіркою. У протилежному випадку компонент не перевіряється даною елементарною перевіркою. Таким чином, позитивний результат  $R_j$  елементарної перевірки  $\pi_j$  виділяє клас неперевіряємих, а негативний її результат  $R'_j$ , – клас компонентів, що перевіряються. Дійсно, у першому випадку всі компоненти, що перевіряються, справні і тому можуть бути виключені з подальшого розгляду, а в другому — несправний один з перевіряємих компонентів.

Поширення розглянутого підходу на випадок кратних несправностей не викликає ніяких труднощів тоді, коли можлива покомпонентна, або, як іноді говорять, поелементна перевірка об'єкта. При цьому кожна припустима елементарна перевірка з безлічі  $\Pi$  перевіряє технічний стан тільки одного «свого» компонента об'єкта. У загальному ж випадку при кратних несправностях необхідно розглядати розбивки не безлічі одиночних компонентів, а розбивки безлічі їх підмножин, що містять по одному, два, три і т.д. компоненти. Самим загальним є випадок, коли компоненти об'єкта для перевірки їх технічного стану вимагають декількох елементарних перевірок. Формально в цьому випадку варто розглядати розбивки на множини, елементами якої є пари «компонент – несправність» (при одиночних несправностях), або підмножини з однієї, двох, трьох і т.д. таких пар (при кратних несправностях).

Зупинимось тепер на цільових функціях оптимізації алгоритмів діагнозу.

Реалізація будь-якої елементарної перевірки  $\pi_j \in \Pi$  вимагає визначених витрат часу, матеріальних і енергетичних ресурсів, людських зусиль і т.п. Ці витрати необхідні для формування і подачі впливу  $a_j$ , прийому, виміру й аналізу відповіді  $R_j^*$  на цей вплив. Будемо називати ті чи інші витрати, що враховуються при конкретному розгляді, *ціною елементарної перевірки* і позначати їх  $c_j$ , або  $c(\pi_j)$ ,  $c(t_j)$ . При побудові оптимальних алгоритмів діагнозу

ціни елементарних перевірок можуть прийматися як однаковими для всіх елементарних перевірок безлічі  $\Pi$ , так і різними. У першому випадку для простоти звичайно приймають  $c_j = 1$ , а в другому (припускаючи, що реалізація будь-якої елементарної перевірки вимагає витрат)  $c_j > 0$  для усіх  $j = 1, 2, \dots, |\Pi|$ .

Нехай кожному технічному стану  $e_i \in E, i = 1, 2, \dots, |E|$ , об'єкта діагнозу приписане деяке позитивне число  $p_i$ , або, в іншому позначенні,  $p(e_i)$ , назване вагою технічного стану  $e_i$  і визначає «значимість» стану  $e_i$  серед інших станів безлічі  $E$ . Подібно цінам елементарних перевірок, ваги станів можуть прийматися як однаковими для всіх станів безлічі  $E$ , так і різними. Характерним є випадок, коли вагою технічного стану є імовірність, з якою об'єкт діагнозу може знаходитися в цьому технічному стані. При цьому  $0 < p(e_i) < 1$  і  $\sum_{e_i \in E} p(e_i) = 1$

У будь-якому алгоритмі діагнозу виділення підмножини технічних станів, що містять фактичний стан, і зіставлений висячій вершині дерева, здійснюється шляхом реалізації однієї чи декількох елементарних перевірок  $t_i \in T$ . Позначимо символом  $c(t_0, e_1)$  суму цін елементарних перевірок, реалізація яких у передбаченій алго-ритмом діагнозу послідовності, дозволяє виділити підмножину технічних станів, що містить стан  $e_i$ . У приведенному позначенні символом  $t_0$  названа елементарна перевірка, перша в послідовності їх реалізації.

Тоді як характеристику якості алгоритму можна прийняти середньозважені (середні) витрати на виділення одного стану об'єкта, тобто функцію

$$C(t_0, E) = \sum_{e_i \in E} c(t_0, e_i) p(e_i) \quad (1)$$

Будемо говорити, що ця функція задає *ціну алгоритму діагнозу*. Вона часто використовується як *цільова функція оптимізації* алгоритмів діагнозу і дозволяє оцінювати якість алгоритмів діагнозу будь-якого виду (безумовних, умовних, з безумовною й умовною зупинкою) при неоднакових і однакових цінах елементарних перевірок, неоднакових і однакових вагах технічних станів об'єкта діагнозу.

При однакових вагах технічних станів, коли  $p(e_i) = 1/E$  для всіх  $e_i \in E$ , замість (1) одержуємо більш просте вираження:

$$C(t_0, E) = \frac{1}{|E|} \sum_{e_i \in E} c(t_0, e_i)$$

При однакових цінах елементарних перевірок замість ціни алгоритму діагнозу говорять про *довжину алгоритму*, розуміючи під цим терміном середнє число  $L(t_0, E)$  елементарних перевірок, реалізація яких необхідна для виділення одного технічного стану.

У безумовних алгоритмах діагнозу з безумовною зупинкою послідовність реалізації елементарних перевірок єдина, причому число елементарних перевірок у цій послідовності дорівнює  $|T|$  Тому при однакових цінах елементарних перевірок  $C(t_0, e_i) = |T|$  для кожного  $e_i$  тобто

$$\sum_{e_i \in E} c(t_0, e_i) = |E| |T| \quad (2)$$

Тоді з (2) випливає:  $L(t_0, E) = |T|$ , тобто довжина алгоритму діагнозу з безумовною зупинкою при однакових цінах елементарних перевірок і однакових вагах технічних станів об'єкта дорівнює числу  $|T|$  елементарних перевірок цього алгоритму.

Таким чином, задача побудови оптимального алгоритму діагнозу складається у виборі такої безлічі  $T \subseteq \Pi$  елементарних перевірок і таких послідовностей їх реалізації, які забезпечують одержання мінімуму цільової функції (1).

В основі методів оптимізації алгоритмів діагнозу лежать або процедури повного перебору всіх можливих варіантів рішень, або процедури відсівання варіантів, що свідомо не дають оптимального рішення, або, нарешті, процедури поліпшення вихідного варіанта, що представляє в загальному випадку неоптимальне рішення. У процедурах побудови оптимальних алгоритмів діагнозу знайшли застосування методи обробки таблиць покриття, динамічне програмування, метод гілок і границь, різні градієнтні методи й ін. Усі ці методи вимагають перегляду більшого чи меншого числа варіантів рішень.

Перегляд і обробка великого числа варіантів рішень при побудові оптимальних алгоритмів діагнозу часто пов'язані з неприпустимо великими витратами часу або пам'яті обчислювальних засобів. Виходом з цього положення є застосування багатокрокових процедур одержання наближених рішень (процедур побудови оптимізованих алгоритмів діагнозу), у яких з числа можливих на кожному кроці часткових рішень вибирається одне, краще з точки зору екстремума деякої обраної чи призначеної функції переваги.

## 2. Класифікація засобів діагнозу.

Розрізняють *апаратурний, програмний* і *програмно-апаратурний* способи реалізації алгоритмів тестового й функціонального діагнозу.

Як показує назва апаратурного способу діагнозу, засобами його реалізації є апаратура (*апаратурні засоби діагнозу*). Апаратурні засоби діагнозу, виконані конструктивно незалежно від об'єкта діагнозу й які підключаються до нього тільки при здійсненні процесу діагнозу, називають *зовнішніми апаратурними засобами* діагнозу. Якщо ж апаратурні засоби становлять із об'єктом діагнозу конструктивно й, можливо, функціонально єдине ціле, то говорять про *вбудовані апаратурні засоби* діагнозу. При реалізації алгоритмів тестового діагнозу апаратурним способом найчастіше використовуються зовнішні апаратурні засоби. Зовнішні апаратурні засоби діагнозу завжди необхідні на етапі виробництва об'єктів, а також при ремонті, коли ні вбудовані апаратурні, ні програмні засоби (якщо навіть вони передбачені) ще не працюють і самі вимагають діагнозу їх технічного стану. У багатьох випадках застосування зовнішніх апаратурних засобів необхідно також на етапі зберігання складних об'єктів. Вбудовані апаратурні засоби діагнозу знайшли найбільш широке застосування при реалізації апаратурним способом алгоритмів функціонального діагнозу. Прикладом вбудованих апаратурних засобів можуть служити схеми контролю по модулю, широко використовувані при організації процесів функціонального діагнозу в обчислювальних машинах.

Зовнішні апаратурні засоби діагнозу можуть бути *ручними, автоматизованими й автоматичними*. Ручні засоби, як правило, виконуються *спеціалізованими*, тобто придатними для діагнозу технічного стану одного конкретного об'єкта. Головний недолік ручних засобів складається у відсутності гарантії одержання об'єктивних результатів діагнозу, особливо при великому числі повторюваних одноманітних елементарних перевірок. Крім того, продуктивність праці на операціях діагнозу при цьому дуже низька. Від цих недоліків вільні автоматичні й автоматизовані засоби. Автоматизовані й автоматичні зовнішні апаратурні засоби можуть бути як *спеціалізованими*, так і *універсальними*, тобто працюючими по змінній програмі й тому придатними для діагнозу технічного стану багатьох або декількох різних об'єктів. Спеціалізовані автоматичні або автоматизовані засоби володіють, як правило, високою швидкістю й надійні в роботі. Однак, коли об'єкти діагнозу міняються більш-менш часто, доцільно використовувати універсальні засоби. При цьому виключається необхідність розробки, створення й постійного налагодження нових спеціалізованих засобів, що вимагає витрат матеріальних засобів, часу й кваліфікованої праці. Крім того, в універсальних засобах легше реалізується ідея уніфікації їхніх основних вузлів і блоків.

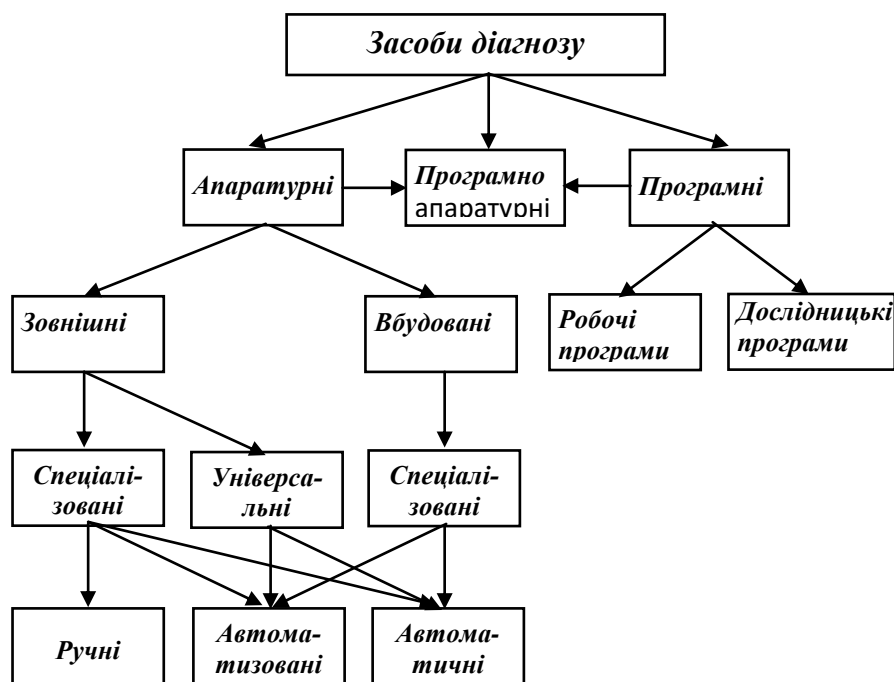
**Вбудовані апаратурні засоби** діагнозу майже завжди є спеціалізованими й автоматичними або автоматизованими, що визначається умовами їхнього застосування. Ці засоби поки важко піддаються уніфікації. Певне виключення із цього правила становлять застосовувані в обчислювальних пристроях вбудовані засоби контролю по модулю, а також найпростіші пристрої порівняння або голосування в об'єктах з резервуванням каналів передачі інформації. Високий рівень універсалізації й уніфікації засобів досягають також у системах оперативного (централізованого) контролю різних технологічних процесів. Ці й інші, подібні їм приклади, майже без винятку, є прикладами уніфікації вбудованих засобів систем перевірки правильності функціонування об'єктів. Автоматизація процесів проектування систем функціонального діагнозу (у тому числі систем пошуку несправностей при функціонуванні), підвищення ефективності виробництва апаратурних засобів діагнозу й



інші міркування викликають необхідність розробки загальних принципів побудови й уніфікації вбудованих апаратурних засобів діагнозу.

**Програмний спосіб діагнозу** на відміну від апаратурного способу, придатного для будь-яких об'єктів діагнозу, застосовується тільки для об'єктів, що працюють по змінній програмі. Прикладами таких об'єктів є універсальні або спеціалізовані обчислювальні, керуючі й логічні машини. Засобами реалізації програмного способу діагнозу (**тобто програмними засобами** діагнозу) є програми, записані на носії, з якими працює об'єкт діагнозу.

Програми, складені спеціально для цілей діагнозу технічного стану об'єкта, називають іспитовими програмами. Іспитові програми можуть не представляти, загалом кажучи, ніякого осмисленого завдання із класу завдань, розв'язуваних даним об'єктом діагнозу. Реалізація



іспитових програм вимагає перерви у функціонуванні об'єкта. Для цілей діагнозу можуть використовуватися також програми рішення робочих завдань (робочі програми). Робочі програми можуть використовуватися без яких-небудь змін, коли для деякого робочого завдання відомі правильні кінцеві й, можли-во, проміжні результати рішення. За фактичними результатами рішення такого завдання можна винести певні судження про технічний стан об'єкта діагнозу.

Рис. 3. Класифікація засобів діагнозу.

У ряді випадків у робочі програми вносяться спеціальні команди або групи команд, призначені для поліпшення умов проведення діагнозу технічного стану об'єкта. Як приклад можна вказати на робочі програми, що передбачають дворазове рішення завдання в цілому або окремих його частин і порівняння результатів.

Ефективність програмних засобів діагнозу істотно підвищується при сполученні їх з апаратурними засобами, тобто при реалізації **програмно-апаратурного** способу діагнозу. У таких випадках використовуються головним чином вбудовані апаратурні засоби. Прикладом реалізації програмно-апаратурного способу діагнозу може служити апаратурне й програмне втілення принципу надлишкового кодування інформації з використанням робочих програм, а також принципу самодіагнозу технічного стану об'єктів, що працюють по змінній програмі, коли іспитові програми сполучаються з вбудованими апаратурними засобами.

На рис. 3. представлено розглянуту тут класифікацію засобів діагнозу.

### 3. Організація процесів діагнозу.

Розглянемо питання організації процесів діагнозу заради визначеності в припущенні, що здійснюється тестовий діагноз, а задані алгоритми забезпечують максимальну глибину

діагнозу, тобто дозволяють визначити справний стан  $s_0$  й будь-який несправний стан  $s_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, |S|$ .

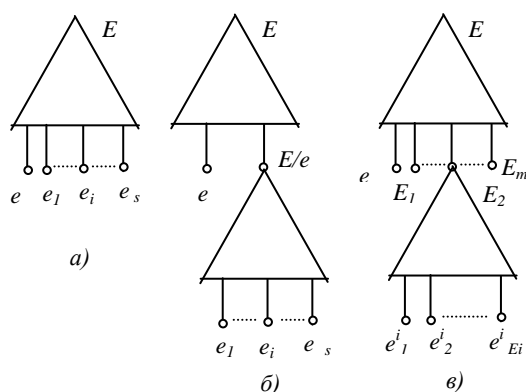


Рис. 4. Ілюстрація способів організації процесів діагнозу.

Три типових способи такої організації проілюстровані рис. 4. На цьому рисунку трикутниками зображені дерева, що представляють алгоритми діагнозу. Поруч із верхніми вершинами трикутників зазначені безлічі технічних станів, зіставлених корінням дерев (початковим вершинам). Під підставами трикутників показані висячі вершини дерев і зіставлені їм технічні стани або підмножини останніх.

Рисунок 4,а демонструє той випадок, коли застосовується **загальний алгоритм тестового діагнозу**, що вирішує як завдання перевірки справності об'єкта, так і завдання пошуку його несправностей. Застосування загальних алгоритмів діагнозу доцільно, тоді, коли ймовірності справного технічного стану об'єкта і його несправних технічних станів мало розрізняються між собою.

Якщо ймовірність справного стану об'єкта діагнозу істотно вище ймовірностей його несправних станів, то може виявитися вигідним відокремити процес перевірки справності об'єкта від процесу пошуку його несправностей. Незалежно від співвідношення зазначених ймовірностей така організація процесу діагнозу типова для служб технічного контролю в умовах виробництва. Цей спосіб організації процесу діагнозу ілюструється рис. 4,б. Верхній трикутник на цьому малюнку представляє алгоритм перевірки справності об'єкта, а нижній – алгоритм пошуку несправностей. Алгоритм перевірки справності об'єкта дає двозначний результат діагнозу – “об'єкт справний” ( $s_0$ ) або “об'єкт несправний” ( $S \setminus s_i$ ). Відповідно до цього алгоритм пошуку несправностей повинен забезпечити визначення фактичного несправного стану об'єкта серед безлічі ( $S \setminus s_i$ ) всіх його несправних станів.

Накінець, на рис. 4,в представлений спосіб організації процесу діагнозу, що займає деяке проміжне положення між розглянутими “крайніми” випадками, що відповідають рис. 4,а й 4,б. При цьому спочатку застосовується загальний алгоритм діагнозу (цьому алгоритму відповідає верхній трикутник на рис. 4,в), що забезпечує визначення справного стану  $s_0$  об'єкта, але, загалом кажучи, не забезпечує необхідної глибини пошуку несправностей. Коли об'єкт несправний, результатом діагнозу є виділення деякої підмножини  $S_j$  несправних станів об'єкта, що не розрізняються. Відповідно до цього реалізований потім алгоритм пошуку несправностей повинен визначити фактичний несправний стан об'єкта серед станів підмножини  $S_j$ .

При другому способі організації процесу діагнозу (рис. 4,б) проста реалізація алгоритму перевірки справності об'єкта, але алгоритм пошуку несправностей по складності близький до загального алгоритму діагнозу технічного стану по першому способі (рис. 4,а).

По третьому способі (рис. 4,в) реалізація процесу перевірки справності об'єкта більше складна, чим по другому способі, однак процес пошуку несправностей при цьому простіше. При виборі того або іншого способу організації процесу діагнозу варто враховувати як кількісні оцінки складності алгоритмів діагнозу, тобто їхньої ціни, так і якісні характеристики умов застосування систем діагнозу.

Все сказане вище щодо способів організації процесів діагнозу неважко узагальнити на випадок, коли задана глибина діагнозу від-різняється від максимальної. Аналогічно можуть бути організовані процеси функціонального діагнозу.

Другий і третій способи організації процесів діагнозу часто застосовуються при сполученні функціонального й тестового діагнозу. Спочатку алгоритм перевірки правильності функціонування (верхній трикутник на рис. 4,б и 4в) визначає наявність в об'єкті несправностей, що перешкоджають його нормальній роботі. Після цього вступає в роботу відповідний алгоритм тестового пошуку несправностей (нижні трикутники на рис. 4,б и 4в).

Відзначимо, що в процесі відновлення несправного об'єкта діагнозу (наприклад, в умовах його виготовлення або ремонту) звичайно потрібна кількаразова реалізація алгоритмів діагнозу. При кратних несправностях є принципова необхідність повторної реалізації алгоритмів. Потреба в цьому виникає з того, що одні несправності можуть перешкоджати прояву (а виходить, і виявленню) інших несправностей. Тому процес відновлення можна вважати закінченим тільки тоді, коли чергова реалізація алгоритму діагнозу дасть результат "об'єкт справний".

## Лекція 6. Безперервні об'єкти діагнозу

### План лекції:

1. Особливості діагностики безперервних об'єктів.
2. Побудова логічних моделей безперервних об'єктів діагнозу.

#### 1. Особливості діагностики безперервних об'єктів.

При діагнозі технічного стану безперервних об'єктів широке поширення одержали допускові способи (як найбільш прості й такі, що легко піддаються автоматизації), які характеризуються тим, що висновок про технічний стан об'єкта робиться за результатами оцінки значень сигналів у контрольних точках або, як часто говорять, – значень **контрольованих параметрів** об'єкта. Результати контролю параметрів у багатьох випадках при цьому приводяться до оцінок виду «у нормі – не в нормі», «у допуску – не в допуску». Тому для опису поведінки безперервних об'єктів, діагноз технічного стану яких проводиться допусковими способами, природно використовувати математичні моделі логічного типу, а для їх аналізу – різні логічні методи.

Вихідні форми подання об'єкта діагнозу, по котрим будуються математичні моделі логічного типу, можуть бути різними. Найбільше часто використовуються структурні, функціональні або принципіві схеми справного об'єкта, а також системи алгебраїчних, диференціальних або інших рівнянь, що задає залежності між вхідними, внутрішніми й вихідними координатами об'єкта. Однак для побудови моделей логічного типу найчастіше досить знання причинно-наслідкових зв'язків між координатами або параметрами об'єкта діагнозу.

У цій лекції обмежимося розглядом логічної моделі безперервного об'єкта діагнозу, одержаного по його заданій структурній або функціональній схемі. Розглянемо також подання об'єкта діагнозу у вигляді графа причинно-наслідкових зв'язків. Між логічною моделлю й графом причинно-наслідкових зв'язків є однозначна відповідність. Це дозволяє методи обробки логічних моделей поширити на графи причинно-наслідкових зв'язків.

Простота математичних моделей логічного типу є їх суттєвою перевагою. Однак внаслідок цієї простоти таких моделей деякі завдання діагнозу технічного стану неперервних об'єктів не мають рішення. Наприклад, за допомогою логічної моделі місце несправності може бути визначено лише із глибиною, не перевищуючою частини об'єкта, що поєднує в собі всі елементи замкнутого контуру зворотного зв'язку. Рішення такого роду завдань вимагає залучення математичних моделей, що є більше складними й завдяки цьому дають опис поведінки об'єкта більш точно, ніж моделі логічного типу. Прикладом може служити динамічна модель у вигляді сукупності диференціальних і інших рівнянь, які детально описують динаміку роботи безперервного об'єкта діагнозу. При рішенні завдань діагнозу технічного стану складних безперервних об'єктів треба в першу чергу використовувати моделі логічного типу й тільки при необхідності залучати більше складні математичні моделі, прагнучи використовувати їх не для об'єкта в цілому, а тільки для деяких його складових частин.

Застосування математичних моделей, що враховують динаміку роботи безперервних об'єктів, коротко розглянемо на наступних заняттях.

#### 2. Побудова логічних моделей безперервних об'єктів діагнозу

Опишемо спочатку формальну процедуру побудови логічної моделі, а потім приведемо приклади її побудови для деяких реальних пристроїв.

Нехай безперервний об'єкт діагнозу складається з  $N$  зв'язаних між собою компонентів (блоків, вузлів, агрегатів, складових частин і т.п.). Склад компонентів, зв'язки між ними й зовнішні зв'язки представляють **структуру** об'єкта.

Той самий об'єкт може бути представлений різними його структурами, що розрізняються між собою в першу чергу складом і числом компонентів. Завдання оптимальної розбивки об'єкта на компоненти становлять самостійний інтерес і тут не розглядаються. Помітимо тільки те, що з погляду діагнозу технічного стану об'єкта при його розбивці варто враховувати такі показники, як резервування компонентів, зручність виміру вихідних параметрів компонентів, конструктивні особливості й т.п.

Будемо вважати, що структура об'єкта задана й представлена структурною схемою. Компоненти структури будемо називати блоками.

Кожний вхідний і вихідний сигнал характеризується одним або декількома фізичними параметрами. Якщо який-небудь вхідний (вихідний) сигнал характеризується декількома параметрами, то кожний із цих параметрів представимо окремим входом (виходом) блоку.

Позначимо входи блоку  $P_i$ , що є зовнішніми входами об'єкта, символами  $x_{i1}, \dots, x_{ini}$ , його входи, що є виходами інших блоків, символами  $y_{i1}, \dots, y_{imi}$ , а виходи цього блоку символами  $z_{i1}, \dots, z_{iki}$ .

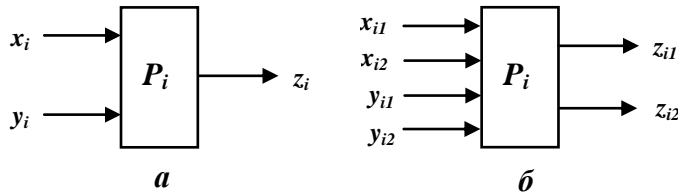


Рис. 1. Приклад «розщеплення» входів і виходів блоку.

Побудуємо функціональну схему об'єкта, у якій кожний блок  $P_i, i = 1, \dots, N$ , має число входів (виходів), рівне числу його вхідних (вихідних) параметрів. Наприклад, якщо блок  $P_i$  (рис. 1,а) має два вхідних сигнали  $x_i$  і  $y_i$  і один вихідний сигнал  $z_i$ , кожний з яких характеризується двома фізичними параметрами (наприклад, амплітудою і частотою електричної напруги або струму), то у функціональній схемі блок  $P_i$  буде мати 4 входи  $x_{i1}, x_{i2}, y_{i1}, y_{i2}$  і 2 виходи  $z_{i1}, z_{i2}$ , (рис. 1,б). Таким чином, деякі зв'язки структурної схеми виявляться на функціональній схемі «розщепленими». Якщо деякий вихід  $z_i$  блоку  $P_i$ , що є входом  $y_k$  блоку  $P_k$ , «розщеплюється» на кілька виходів  $z_{ij}$ , то вхід  $y_k$  також «розщеплюється» на таке ж число входів  $y_{kj}$ . Виконавши «розщеплення» входів і виходів всіх блоків  $P_i, i = 1, \dots, N$ , і з'єднавши між собою відповідні один одному «розщеплені» входи й виходи блоків, одержимо функціональну схему об'єкта. Досить часто функціональна схема об'єкта буває заданої поряд з його структурною схемою.

Будемо вважати, що для всіх вхідних і вихідних параметрів блоків завжди можна виділити області їхніх *припустимих значень*. У сталому режимі роботи об'єкта області припустимих значень параметрів звичайно визначаються постійними верхніми й нижніми межами (уставками) цих значень. Якщо ж діагноз технічного стану об'єкта проводиться в несталому режимі роботи об'єкта, то для деяких (або навіть для всіх) параметрів області припустимих значень повинні задаватися з урахуванням зміни цих значень у часі.

Помітимо, що при побудові функціональної схеми об'єкта зазначене вище «розщеплення» входів і виходів блоків структури не є обов'язковим, тобто може не виконуватися зовсім або виконуватися частково. Іншими словами, у функціональній схемі також можуть бути входи або виходи, сигнали яких характеризуються декількома фізичними параметрами.

Будемо говорити, що вхід або вихід блоку функціональної схеми є *припустимим*, якщо значення параметрів всіх його сигналів належать областям їх припустимих значень. Значення входу або виходу *неприпустимо*, якщо значення хоча б одного із зазначених параметрів не належить області його припустимих значень.

Позначимо логічне висловлення «значення входу припустиме» символом входу  $x$  (або  $y$ ), а висловлення «значення входу неприпустимо» – символом  $\bar{x}$  (або  $\bar{y}$ ). Тоді символи входів можна вважати двійковими логічними змінними, що приймають логічні значення “1” або “0”. Аналогічно символи виходів можна вважати двійковими логічними вихідними функціями, що приймають значення “1”, якщо значення відповідних їм виходів припустимі, і “0” – у протилежному випадку.

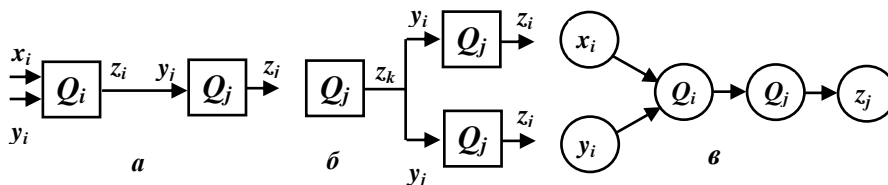
Переберемо всі можливі набори значень вхідних змінних справного блоку  $P_i$  і визначимо для кожного такого набору значення виходу  $z_{ij}, j = 1, 2, \dots, k_i$ . Якщо кожному набору вхідних змінних відповідає одне із двох значень виходу – 1 або 0, то отримана функція є буле-

вою. Назвемо її *функцією умов роботи блоку  $P_i$*  по виходу  $z_{ij}$  і позначимо символом  $F_{ij}$ . Булеву функцію можна записати у вигляді диз'юнктивної нормальної форми й потім відомими методами одержати її мінімальну форму. Таким чином, у результаті мінімізації для кожного з виходів  $z_{i1}, z_{i2}, \dots, z_{iki}$  блоку  $P_i$  буде отримана сукупність істотних (для даного виходу) входів.

Для одержання *логічної моделі* об'єкта кожний блок  $P_i$  функціональної схеми замінюється  $k_i$  блоками, кожний з яких має один вихід  $z_{ij}$  і істотні для даного виходу входи. Позначимо блоки логічної моделі об'єкта символами  $Q_1, Q_2, \dots, Q_h$ , де  $h = \sum_{i=1}^N k_i$

У загальному випадку кожному вихідному блоку у функціональній схемі відповідає підмножина блоків логічної моделі з безлічі  $\{Q_1, Q_2, \dots, Q_h\}$ . В окремому випадку, коли всі блоки мають по одному виходу, кожний з яких характеризується одним фізичним параметром, логічна модель може збігатися з функціональною схемою об'єкта.

Рис.2. Ілюстрація правильної логічної моделі.



Будемо називати логічну модель *правильною*, якщо по-перше, для будь-якої пари її блоків  $Q_i$  і  $Q_j$  – вихід  $z_i$  одного із блоків є входом  $y_j$  іншого (рис. 2,а), а також виконується умова: області припустимих значень входу  $y_j$  і виходу  $z_i$  і області їхніх неприпустимих значень відповідно збігаються й, по-друге, для будь-якої пари її блоків  $Q_i$  і  $Q_j$ , що мають входи  $y_i$  і  $y_j$ , які характеризуються одним і тим же параметром (рис. 2, б), виконується умова: області припустимих значень і відповідно області неприпустимих значень цих входів збігаються. Для правильної логічної моделі символи внутрішніх входів можна замінити на символи пов'язаних з ними виходів. На цьому завершується побудова логічної моделі.

Логічну модель можна розглядати як орієнтований граф. Вершинами графа є блоки логічної моделі, а також її зовнішні вхідні й вихідні полюси, а дугами – зв'язки між блоками й зовнішніми вхідними й вихідними полюсами. На рис. 2,в зображений граф, побудований по логічній моделі рис. 2,а. На цьому рисунку вхідні полюси  $x_i, y_i$  і вихідний полюс  $z_j$  представлені окремими вершинами.

Більшість справних безперервних об'єктів володіє такою властивістю, що функція умов роботи деякого блоку  $F_{ij}$  приймає значення, рівне одиниці, лише в тому випадку, коли значення істотних вхідних змінних на даному наборі – припустимі (тобто дорівнюють одиниці). Такі функції називаються монотонними; для монотонних функцій мінімальна форма єдина й, крім того, не містить змінних із запереченням. Надалі будемо вважати, що всі функції  $F_{ij}$  представлені такими мінімальними формами. У найпростішому випадку функція  $F_{ij}$  є кон'юнкцією (функцією І) вхідних змінних без заперечень.

Відзначимо, що для обробки логічних моделей, у яких функції умов роботи блоків не-монотонні (або навіть є не булевими, а безперервними функціями), можна застосувати методи, застосовувані до дискретних об'єктів діагнозу.

Безперервні об'єкти діагнозу умовно можна розділити на однорежимні й багаторежимні. *Однорежимним* є об'єкт, призначений для виконання одного робочого алгоритму функціонування, у реалізації якого беруть участь всі блоки й всі зв'язки функціональної схеми об'єкта. *Багаторежимним* називається об'єкт, робочий алгоритм функціонування якого складається з декількох підалгоритмів, кожний з яких може бути задіяний або вільний від реалізації, залежно від режиму роботи об'єкта. Істотно те, що в реалізації кожного підалгоритму функціонування (у кожному режимі роботи об'єкта) беруть участь різні сукупності бло-

ків і зв'язків функціональної схеми об'єкта. Тому кожний режим повинен розглядатися окремо, у тому числі з погляду виділення припустимих значень параметрів.

## Лекція 7. Графи причинно-наслідкових зв'язків

### План лекції:

1. Визначення і побудова ГПНЗ.
2. Приклад побудови й аналізу ГПНЗ.
3. Аналіз ГПСС при заданому переліку несправностей.

#### 1. Визначення і побудова ГПНЗ.

У тих випадках, коли об'єкт діагнозу не має явно виражених функціональних блоків, побудова його логічної моделі може викликати ряд практичних незручностей. Крім того, бувають ситуації, коли точні (аналітичні, табличні й ін.) залежності між параметрами об'єкта невідомі, а відомо лише про те, що один параметр якось впливає на інший чи якось залежить від іншого. Такого роду впливи і залежності добре погоджуються з поняттям причинно-наслідкових зв'язків, що до речі, охоплює також і строгі, формальні залежності між параметрами, подіями чи явищами.

**Графом причинно-наслідкових зв'язків** називається орієнтований граф, вершини якого представляють параметри, події чи явища, а дуги відбивають причинно-наслідкові зв'язки між відповідними вершинами. Напрямок дуги відповідає переміщенню від причини до наслідку.

Графи причинно-наслідкових зв'язків знайшли застосування при рішенні задач аналізу роботи різних електричних, гідравлічних, механічних і змішаних (наприклад, електромеханічних) пристроїв, механізмів і машин, а також різних технологічних процесів. Ряд таких застосувань графів причинно-наслідкових зв'язків зв'язаний з рішенням задач діагнозу технічного стану складних об'єктів.

Покажемо, що логічна модель об'єкта, який не містить багато-канальних блоків, може трактуватися як граф причинно-наслідкових зв'язків між вхідними, внутрішніми і вихідними параметрами об'єкта.

Побудуємо граф, вершини якого відповідають вихідним параметрам блоків моделі, а також її вхідним параметрам. Дуги графа нехай відповідають зв'язкам між блоками моделі, а також між зовнішніми входами і блоками моделі. Наявність дуги, що йде з вершини  $Q_i$  у вершину  $Q_j$ , нехай означає, що параметр  $z_j$  залежить (причинно впливає) від параметра  $z_i$ .

Отже, так побудований граф задовольняє визначенню графа причинно-наслідкових зв'язків. У даному випадку зазначений причинно-наслідковий зв'язок між параметрами  $z_i$  і  $z_j$  задано більш конкретно, а саме: якщо параметр  $z_i$  приймає неприпустиме значення, то таке ж значення приймає параметр  $z_j$ .

Відзначимо: для того щоб по графу причинно-наслідкових зв'язків можна було робити строго формальні висновки відносно технічного стану об'єкта діагнозу, який він представляє, повинні бути справедливими всі ті передумови, що були прийняті раніше при побудові логічної моделі. При цих умовах від графа причинно-наслідкових зв'язків можна однозначно перейти до логічної моделі і навпаки. Тому всі розглянуті вище методи обробки логічної моделі можна без яких-небудь змін викласти в термінах графів причинно-наслідкових зв'язків.

При побудові графа причинно-наслідкових зв'язків його вершинам можна зіставляти не параметри об'єкта діагнозу, а події, обумовлені логічними висловленнями типу «значення параметра  $z_i$  вийшло з заданої для нього області припустимих значень». З огляду на «негативний» характер такої події, умовимося істинність визначального його висловлення представляти значенням  $\mathbf{0}$ . Тоді  $\mathbf{1}$  позначає, що подія не наступила (параметр  $z_i$  має припустиме значення). Зазначена символіка в той же час збігається з тією, котра була прийнята раніше, при представленні об'єктів їх логічними моделями.

Помітимо ще, що при побудові графа причинно-наслідкових зв'язків можна, взагалі говорячи, представляти не усі вхідні, внутрішні і вихідні параметри (чи події, що відбивають



граничні припустимі значення цих параметрів) об'єкта, а тільки деякі з них, наприклад ті, котрі доступні для виміру.

Зупинимося тепер на деяких питаннях завдання можливих несправностей об'єкта діагнозу. Для логічної моделі об'єкта було прийнято, що можливою несправністю об'єкта є будь-яка його фізична несправність, така, що приводить до появи неприпустимого виходу хоча б одного блоку. Ця ж умова приймається для графа причинно-наслідкових зв'язків. При цьому обробка графа для побудови таблиці функцій несправностей і її обробка для побудови перевіряючих і розрізняючих сукупностей контрольованих параметрів, повинні здійснюватися так, як це було викладено вище. Однак у ряді випадків може виявитися доцільним обмежитися завданням по виявленню чи розрізненню несправностей об'єкта шляхом прямого перерахування деяких можливих несправностей. Таке завдання відповідає припущенню, що несправності, які не включені в перелік, або неможливі, або малоймовірні. Природно, скорочення числа розглянутих несправностей може супроводжуватися зменшенням числа контрольованих параметрів, що перевіряються, особливо в їх розрізняювальній сукупності.

Розглянемо побудову графа причинно-наслідкових зв'язків на наступному прикладі.

## 2. Приклад побудови й аналізу ГПНЗ.

**Приклад 1.** На рис. 1 представлена система змащення підшипників потужного редуктора. Вихідними параметрами системи є температури  $T_1$ ,  $T_2$  і  $T_3$  вкладишів підшипників вхідного проміжного і вихідного валів редуктора відповідно. Змащення здійснюється олією, циркуляцію якої забезпечує шестерний маслонасос (ШМС)

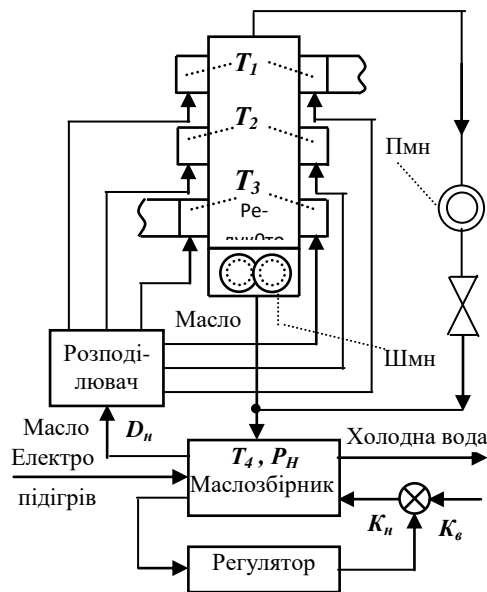


Рис.1. Система змащення підшипників потужного редуктора

- температура  $T_3$  вище припустимої,  $T_3 > H$ ;
- температура  $T_4$  вище припустимої,  $T_4 > H1$ ;
- температура  $T_4$  нижче припустимої,  $T_4 < H2$ ;
- тиск олії нижче норми,  $D_n$ ;
- рівень олії нижче норми,  $P_n$ ;
- клапан охолоджуючої води закритий,  $K_n$ ;
- клапан охолоджуючої води повністю відкритий,  $K_v$ .

Ці події визначають вершини графа. Тепер необхідно установити чи задати причинно-наслідкові зв'язки між обраними подіями. У багатьох практичних випадках це можна зробити інтуїтивно, залучаючи будь-яку наявну в розпорядженні інформацію про об'єкт. Особливо

При зниженні тиску олії в напірній магістралі нижче припустимого значення спрацьовує сигналізатор тиску  $D_n$ . Обігрів маслосборника системи здійснюється електропідігрівачем; при необхідності маслосборник охолоджується проточною водою. Подачею проточної води в сорочку маслосборника керує регулятор, що стабілізує температуру  $T_4$  у маслосборнику. Виконавчим органом регулятора є клапан, спряжений з кінцевими вимикачами  $K_n$  і  $K_v$ . Перший з них указує на досягнення нижнього рівня регулювання (клапан закритий), а другий – верхнього рівня регулювання (клапан цілком відкритий). У маслосборнику встановлений сигналізатор нижнього рівня олії  $P_n$ . Для підвищення рівня олії в маслосборнику виконується включення на визначений час пускового маслонасоса (ПМС).

Виберемо для представлення в графі причинно-наслідкових зв'язків наступні події:

- температура  $T_1$  вище припустимої,  $T_1 > H$ ;
- температура  $T_2$  вище припустимої,  $T_2 > H$ ;

цінним при цьому є знання функціональної схеми об'єкта, фізики його роботи і технологічних особливостей.

Так, для розглянутого приклада 1 системи змащення підшипників редуктора причинно-наслідкові зв'язки між обраними подіями визначаються наступними міркуваннями.

Перевищення припустимого значення температури  $T_1$ ,  $T_2$  і  $T_3$  може бути викликано однією з двох причин: температура  $T_4$  олії перевищила припустиме значення  $H_1$  чи тиск олії став нижче припустимого ( $D_H$ ). У свою чергу подія  $T_4 > H_1$  може відбутися внаслідок несправності регулятора, коли виявиться розімкнутим кінцевий вимикач  $K_B$ . Причинами зниження тиску олії  $D_H$  можуть бути зниження рівня олії  $P_H$  чи досягнення температурою  $T_4$  нижнього припустимого значення  $H_2$ . Нарешті, подія  $T_4 < H_2$  може бути викликана несправною роботою регулятора, на що вказує розмикання кінцевого вимикача  $K_H$ .

Отриманий граф причинно-наслідкових зв'язків показаний на рис. 2. Вершини графа представлені прямокутниками, у яких записані умовні позначки відповідних подій. (Прямокутники, крім того, позначені поруч розташованими символами  $Q_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, 9$ , а вихідні з них дуги – символами  $z_i$ , прийнятими для логічних моделей. Для графа причинно-наслідкових зв'язків показувати дуги, що виходять з кінцевих вершин, не потрібно, тому символи  $z_7$ ,  $z_8$  і  $z_9$  позначають такі дуги умовно.

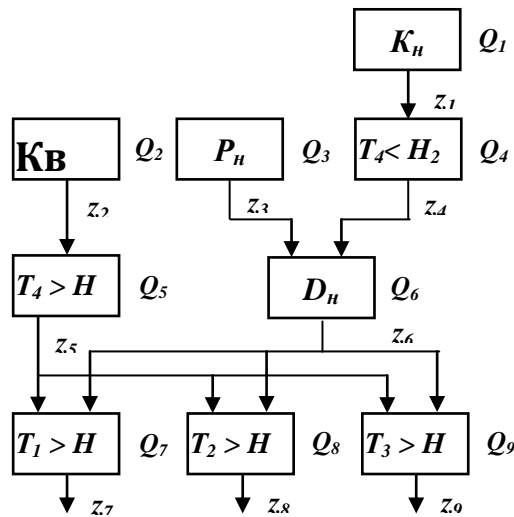


Рис. 2. Граф причинно-наслідкових зв'язків.

Перш ніж перейти до завдання несправностей і до обробки отриманого графа причинно-наслідкових зв'язків, помітимо, що в складних випадках (при великому числі розглянутих параметрів чи подій, при функціонально складному і маловивченому об'єкті і т.п.) для визначення причинно-наслідкових зв'язків варто застосовувати ті чи інші процедури упорядкованого перегляду параметрів чи подій, що представляються у графі. Для кожної пари параметрів чи подій варто визначити, зв'язані вони між собою чи ні, і в першому випадку вказати, що з них є причиною і що – наслідком. Для відповідей на ці питання варто використовувати не тільки згадану вище евристичну інформацію про об'єкт, але також відомі аналітичні чи інші залежності між параметрами чи подіями.

Щоб не завантажувати граф «зайвими» дугами, при зазначеному перегляді варто прагнути встановлювати тільки безпосереднє причинне проходження. Прикладами безпосередніх зв'язків є дуги, показані на рис. 2. Зайвою була б, наприклад, дуга з вершини  $K_H$  у вершину  $D_H$ . Можна показати, що поява «зайвих» зв'язків не приведе до яких-небудь помилкових висновків при обробці графа.

(Нехай можливими несправностями системи змащення є всі такі її несправності, які виявляються в тім, що настає кожне з представлених на графі рис. 2 подій. Нагадаємо, що це відповідає розгляду одиночних несправностей об'єкта по його логічній моделі. При цьому, як відзначалося вище, граф причинно-наслідкових зв'язків можна обробляти точно так само, як

логічну модель. У табл. 1 представлена таблиця функцій несправностей, побудована по графу рис. 2.

Таблиця 1

		V	V	V		V	V	V			
	<i>R</i>	<i>e</i>	<i>Q<sub>1</sub></i>	<i>Q<sub>2</sub></i>	<i>Q<sub>3</sub></i>	<i>Q<sub>4</sub></i>	<i>Q<sub>5</sub></i>	<i>Q<sub>6</sub></i>	<i>Q<sub>7</sub></i>	<i>Q<sub>8</sub></i>	<i>Q<sub>9</sub></i>
V	<i>z<sub>1</sub></i>	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
V	<i>z<sub>2</sub></i>	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
V	<i>z<sub>3</sub></i>	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
V	<i>z<sub>4</sub></i>	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
	<i>z<sub>5</sub></i>	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
	<i>z<sub>6</sub></i>	1	0	1	0	0	1	0	1	1	1
V	<i>z<sub>7</sub></i>	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
V	<i>z<sub>8</sub></i>	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
V	<i>z<sub>9</sub></i>	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0

Застосовуючи результати, отримані при розгляді логічних моделей, знаходимо, що мінімальна сукупність, яка перевіряє, містить виходи *z<sub>7</sub>*, *z<sub>8</sub>* і *z<sub>9</sub>*, тобто для перевірки справності (праце-здатності, правильності функціонування) системи змащення необхідно і достатньо контролювати температури *T<sub>1</sub>*, *T<sub>2</sub>* і *T<sub>3</sub>* підшипників.

Обов'язковими виходами для пошуку несправностей є виходи *z<sub>1</sub>*, *z<sub>2</sub>*, *z<sub>3</sub>*, *z<sub>4</sub>* (за правилом 1 викладеному вище) і виходи *z<sub>7</sub>*, *z<sub>8</sub>* і *z<sub>9</sub>*, (за правилом 2). Ці виходи і несправності, що розрізняються ними, відзначені знаками V ліворуч від табл. 1 і над нею відповідно. Нерозрізненими залишилися несправності блоків *z<sub>5</sub>* і *z<sub>6</sub>*. Легко бачити, що вони розрізняються на кожному з невідмічених виходів *z<sub>5</sub>* чи *z<sub>6</sub>*. З огляду на те, що контроль зниження температури *T<sub>4</sub>* олії є обов'язковим (вихід *z<sub>4</sub>*), виберемо вихід *z<sub>5</sub>*, що представляє сигнал підвищення темпера-

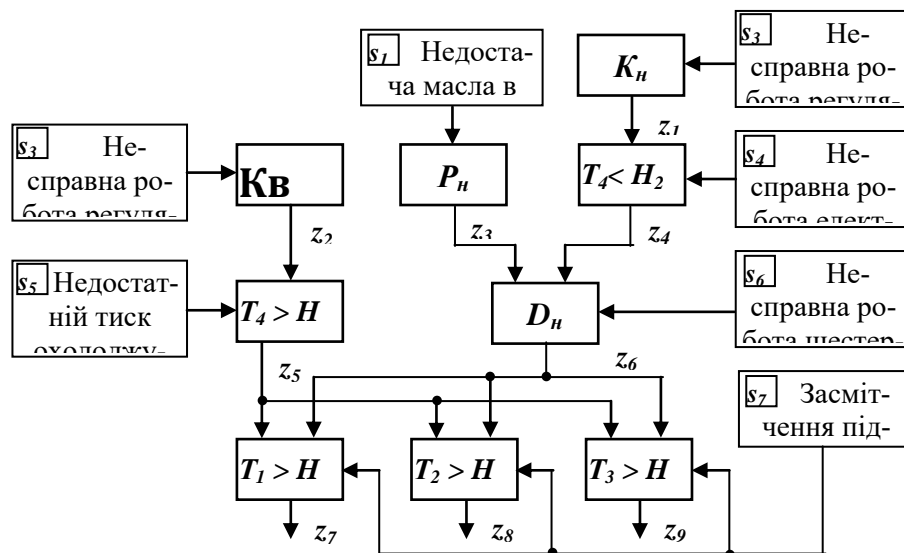


Рис. 3. Граф причинно-наслідкових зв'язків з несправностями.

тури *T<sub>4</sub>*.

Таким чином, для пошуку одиночних несправностей необхідно контролювати положення кінцевих вимикачів *K<sub>n</sub>* і *K<sub>b</sub>*, рівень *P<sub>n</sub>* і температуру *T<sub>4</sub>* олії в маслозбірнику, а також температури *T<sub>1</sub>*, *T<sub>2</sub>* і *T<sub>3</sub>* підшипників.

### 3. Аналіз ГПНЗ при заданому переліку несправностей

Нехай тепер можливими несправностями системи змащення вважаються наступні конкретні несправності: недостатній тиск охолоджувальної води; несправна робота регулятора; недолік олії в системі; несправна робота шестерного насоса; несправна робота електропідігрівання; засмічення підшипників.

Такого роду переліки несправностей є в більшому чи меншому ступені довільними (і в цьому складається недолік розглянутого способу завдання несправностей), хоча вони і складаються з урахуванням імовірностей виникнення і важливості виявлення конкретних несправностей.

Сформований перелік несправностей тепер необхідно «накласти» на граф причинно-наслідкових зв'язків. Це робиться шляхом розгляду кожної несправності з переліку (як причини) і визначення викликаних через її виникнення відхилень за норму параметрів чи подій (як наслідків) з числа включених у граф причинно-наслідкових зв'язків.

Наприклад, недостатній тиск охолоджувальної води може привести до підвищення температури олії  $T_4$  за припустимої межі  $H_1$ , а несправна робота регулятора – до спрацьовування одного з кінцевих вимикачів  $K_6$  чи  $K_7$  і т.д. На рис. 3 показаний граф причинно-наслідкових зв'язків з несправностями з приведеного вище переліку. Несправності зазначені в прямокутниках і позначені символами  $s_j$ ,  $j = 1, 2, \dots, 7$ . Дуги, які виходять із прямокутників, що представляють несправності, заходять у вершини виникнення, які є безпосередніми наслідками, що відповідають несправностям. Помітимо, що можна задавати як одиночні, так і кратні несправності об'єкта. Прикладом кратної несправності є засмічення підшипників ( $s_7$ ).

По графу причинно-наслідкових зв'язків з несправностями можна побудувати таблицю функцій несправностей (табл. 2), що відрізняється від побудованої вище табл. 1 тим, що її стовпці представляють несправності  $s_j$  накладені на граф, а не несправності блоків  $Q_i$ .

Таблиця 2

		V	V	V					
	R	e	$s_1$	$s_2$	$s_3$	$s_4$	$s_5$	$s_6$	$s_7$
V	$z_1$	1	1	0	1	1	1	1	1
V	$z_2$	1	1	1	0	1	1	1	1
V	$z_3$	1	0	1	1	1	1	1	1
V	$z_4$	1	1	0	1	0	1	1	1
	$z_5$	1	1	1	0	1	0	1	1
	$z_6$	1	0	0	1	0	1	0	1
	$z_7$	1	0	0	0	0	0	0	0
	$z_8$	1	0	0	0	0	0	0	0
	$z_9$	1	0	0	0	0	0	0	0

Побудова таблиці функцій несправності ведеться аналогічно її побудові по логічній моделі. Розходження складається лише в тім що тепер приймаються рівними нулю не кожний з виходів  $z_i$  по черзі, а тільки ті з них, неприпустимі значення яких безпосередньо викликаються заданими несправностями.

Наприклад, щоб заповнити стовпець  $s_1$ , табл. 2, необхідно задати  $s_3 = 0$  (див. рис. 3) і обчислити при цих умовах значення інших виходів. Помітимо, що деякі несправності можуть вимагати завдання неприпустимих значень декільком виходам. Наприклад, несправність  $s_7$  на рис. 3 вимагає прийняти  $s_7 = s_8 = s_9 = 0$  Останнє характерне для кратних несправ-

ностей об'єкта, а також для таких несправностей, безпосереднім наслідком виникнення яких є одночасно кілька подій графа.

Обробка табл. 2 показує, що є три мінімальні сукупності, що перевіряють стан контрольованих виходів. Кожна з них складається з одного виходу –  $z_7$ ,  $z_8$  чи  $z_9$ , тобто для перевірки справності (працездатності, правильності функціонування) системи змащення при заданих несправностях необхідно і достатньо контролювати або температуру  $T_1$ , або  $T_2$ , або  $T_3$  підшипників. Нагадаємо, що по табл. 1 мінімальна сукупність, що перевіряє, вимагала контролю кожної з цих температур. Таке розходження пояснюється тим, що (див. граф. рис. 3) наслідком несправності «засмічення підшипників» прийняте одночасне підвищення всіх трьох температур

$T_1$ ,  $T_2$  і  $T_3$ .

Зупинимося на застосуванні правил 1 і 2 для виділення обов'язкових рядків таблиць функцій несправностей, побудованих по графах причинно-наслідкових зв'язків з несправностями (типу табл. 2). Правило 2 можна застосовувати без яких-небудь його змін, тобто в сукупність, що розрізняє, завжди входять контрольовані виходи, що утворюють мінімальну сукупність, яка перевіряє. У нашому прикладі обов'язковим за правилом 2 є один з виходів  $z_7$ ,  $z_8$  чи  $z_9$ . Усі ці виходи позначені ліворуч від табл. 2 знаком V.

Однак застосування правила 1 вимагає деяких застережень. Нехай з вершини  $i$  графа причинно-наслідкових зв'язків виходить єдина дуга у вершину  $j$ . Тоді вихід  $z_i$  є обов'язковим, якщо обидві вершини  $i$  і  $j$  є безпосередніми наслідками різних несправностей. Відповідно до цього уточненого правила (назвемо його правилом 1') по графу рис. 2 виділяються обов'язкові виходи  $z_1$ ,  $z_2$ ,  $z_3$  і  $z_4$ . Відповідні цим виходам рядки табл. 2 також відзначені.

Перевіркою табл. 2 знаходимо, що на обов'язкових виходах не розрізняються несправності  $s_5$ ,  $s_6$  і  $s_7$ . Для їх розрізнення необхідні обидва невідмічені рядки  $z_5$  і  $z_6$ .

Таким чином, для пошуку несправностей системи змащення з заданого їх переліку необхідно і достатньо контролювати положення кінцевих вимикачів  $K_n$  і  $K_b$  (виходи  $z_1$  і  $z_2$ ), рівень  $P_n$  і тиск  $D_n$  масла (виходи  $z_3$  і  $z_6$ ), температуру  $T_4$  масла (виходи  $z_4$  і  $z_5$ ) і одну з температур  $T_1$ ,  $T_2$  і  $T_3$  підшипників (вихід  $z_7$ ,  $z_8$  або  $z_9$ ).

## Лекція 8. Діагноз технічного стану об'єкта з урахуванням можливих несправностей датчиків

### План лекції:

1. Пошук несправностей датчиків.
2. Діагноз технічного стану неперервних об'єктів, зі зворотніми зв'язками.
3. Фізичні методи діагнозу технічного стану об'єктів.

### 1. Пошук несправностей датчиків.

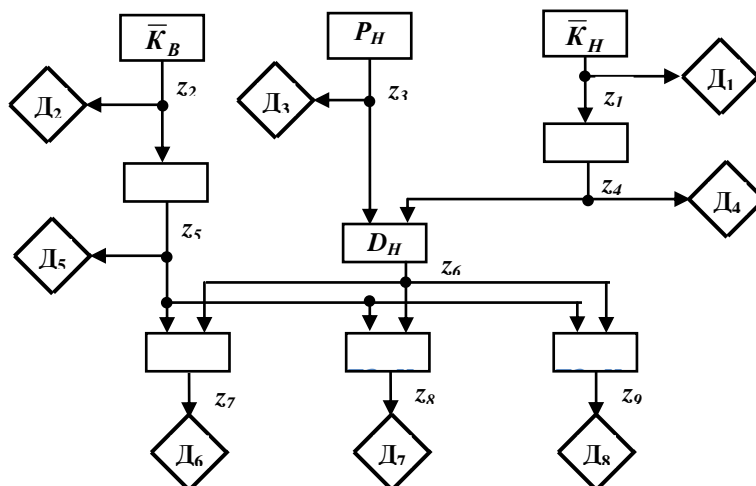
Розглянемо питання про пошук несправностей датчиків і сигналізаторів (будемо останні надалі також називати датчиками). Несправності датчиків можна розділити на 2 класи:

1) несправності, що приводять до встановлення на виході датчика сигналу, який свідчить про неприпустиме значення контрольованого параметра, у той час як параметр знаходиться в області припустимих значень;

2) несправності, що приводять до встановлення на виході датчика сигналу, який свідчить про припустиме значення контрольованого параметра, у той час як параметр вийшов з області припустимих значень.

Подальший розгляд проведемо на прикладі системи змащення (приклад 1), представленій графом причинно-наслідкових зв'язків, хоча все сказане нижче справедливе для всіх логічних моделей. При аналізі графа причинно-наслідкових зв'язків системи змащення було встановлено, що для перевірки справності (працездатності, правильності функціонування) і пошуку одиночних несправностей досить контролювати параметри  $K_H, K_B, P_H, T_4 < H_1, T_4 > H_1, T_1 > H, T_2 > H, T_3 > H$  (рис. 2). На рис. 4 приведений граф причинно-наслідкових зв'язків системи змащення, а також позначені датчики, що контролюють зазначені параметри (датчики  $D_1 - D_7$  позначені на рисунку ромбами).

Припустимо, що в датчику  $D_3$ , що контролює нижній рівень олії  $P_H$  у маслозбірнику, відбулася несправність, яка відноситься до першого класу. Це значить, що на виході датчика  $D_3$  з'явиться сигнал, який свідчить про те, що відбулася подія «рівень олії нижче норми». У дійсності рівень олії  $P_H$  знаходиться в області припустимих значень. У силу існуючих між подіями (параметрами) причинно-наслідкових зв'язків, обумовлених графом причинно-наслідкових зв'язків, значення параметрів на які впливає параметр  $P_H$ , будуть припустимими. Тому на виходах датчиків  $D_6, D_7, D_8$ , які контролюють параметри, що представляються на графі причинно-наслідкових зв'язків кінцевими вершинами, установляться сигнали, що



свідчать про припустимі значення параметрів  $T_1, T_2, T_3$ . Це дозволяє зробити висновок про несправність датчика  $D_3$ .

Рис. 4. Граф причинно-наслідкових зв'язків об'єкта, що містить датчики.

Припустимо далі, що несправність, яка відноситься до першого класу, відбулася в датчику, який контролює параметр, що представляється на графі причинно-наслідкових зв'язків

кінцевою вершиною (наприклад датчик  $D_7$ ). У цьому випадку за показниками інших датчиків не можна установити, несправний датчик  $D_7$ , чи в дійсності температура  $T_2$  вище припустимої.

Можна показати, що завжди несправності, які відносяться до першого класу, усіх датчиків, які контролюють параметри, що представляються на графі причинно-наслідкових зв'язків внутріш-німи (кінцевими) вершинами, можуть бути знайдені.

Для вирішення задачі пошуку несправного блоку в об'єкті з урахуванням можливих несправностей у контролюючих датчиках будемо користуватися таблицею функцій несправностей об'єкта, викресливши її рядки, які відповідають виходам блоків, що не вийшли в підмужину контрольних точок для перевірки справності і пошуку одиночних несправностей (іншими словами, з таблиці функцій несправностей виключаються рядки, яким відповідають параметри, не контрольовані за допомогою датчиків). Так, з таблиці функцій несправностей, побудованої для системи змащення підшипників редуктора (табл. 2), потрібно викреслити рядок  $z_6$ . Після викреслення буде отримана перетворена таблиця (табл. 3).

Таблиця 3

$R$	$e$	$Q_1$	$Q_2$	$Q_3$	$Q_4$	$Q_5$	$Q_6$	$Q_7$	$Q_8$	$Q_9$
$z_1$	1	0.	1	1	1	1	1	1	1	1
$z_2$	1	1	0	1	1	1	1	1	1	1
$z_3$	1	1	1	0	1	1	1	1	1	1
$z_4$	1	0	1	1	0	1	1	1	1	1
$z_5$	1	1	0	1	1	0	1	1	1	1
$z_7$	1	0	0	0	0	0	0	0	1	1
$z_8$	1	0	0	0	0	0	0	1	0	1
$z_9$	1	0	0	0	0	0	0	1	1	0

Припускаємо наявність в об'єкті однієї з перерахованих нижче несправностей:

- 1) одиночна несправність блоку  $Q_i$ ;
- 2) одиночна несправність датчика, що відноситься до першого класу (несправність  $D^1_i$ );
- 3) одиночна несправність датчика, що відноситься до другого класу (несправність  $D^2_i$ ).

Нехай при діагнозі технічного стану об'єкта на виходах датчиків встановився деякий набір значень контрольованих параметрів. У залежності від того, приналежать чи не приналежать ці значення областям припустимих значень відповідних параметрів, отриманий набір значень можна представити у вигляді двійкового набору з нулів і одиниць, який будемо називати контролюючим набором.

#### Розглянемо три можливих випадки.

**1.** Контролюючий набір складається з всіх одиниць. Усі функціональні блоки об'єкта справні. В об'єкті може існувати одиночна несправність датчика типу  $D^2_i$ .

Для виявлення несправностей датчиків типу  $D^2_i$  можна скористатися способом, що складається в подачі на блоки об'єкта вхідних сигналів, що знаходяться поза областями припустимих значень. При цьому значення параметрів на виходах усіх блоків будуть неприпустимими, що повинно привести до встановлення на виходах датчиків контролюючого набору, що складається з усіх нулів. Наявність у контролюючому наборі хоча б однієї одиниці свідчить про несправність відповідного датчика типу  $D^2_i$ . Такий спосіб перевірки датчиків можливий тільки при тестовому діагнозі технічного стану об'єкта.

При функціональному діагнозі технічного стану об'єкта несправність датчика типу  $D^2_i$  буде виявлена у тому випадку, якщо вийде з області припустимих значень деякий контрольований параметр, який причинно впливає на параметр, контрольований несправним датчиком. Припустимо, що в датчику  $D_5$  системи змащення (рис. 4) відбулася несправність типу  $D^2_5$ . Розглянемо шляхи на графі причинно-наслідкових зв'язків, що проходять через верши-

ну, яка відповідає параметру, контролюваному несправним датчиком. У нашому прикладі через вершину  $T_4 > H_1$  проходять шляхи, що містять дуги  $z_2, z_5, z_7, z_8, z_9$ . Нехай вийшов з області припустимих значень деякий контрольований параметр, причому цей параметр причинно впливає на параметр, контрольований несправним датчиком (наприклад, параметр  $K_6$ .) Відповідно до графа причинно-наслідкових зв'язків датчики  $D_2, D_5, D_6, D_7, D_8$ , що контролюють параметри  $K_6, T_4, T_1, T_2, T_3$ , повинні видавати сигнали про неприпустимі значення відповідних параметрів. Однак датчик  $D_5$  буде видавати сигнал про припустиме значення параметра  $T_4$ . Тим самим несправність датчика  $D_5$  буде виявлена.

2. Контролюючий набір складається з нулів і одиниць, причому в таблиці функцій несправностей знайшовся *i-й* стовпець, що збігається з отриманим контролюючим набором.

Якщо *i-й* стовпець містить всього один нуль, то несправним є або блок (параметр)  $Q_i$ , що відповідає *i-му* стовпцю, або датчик  $D_i$  (несправність типу  $D^I_i$ ). Єдиний нуль, що міститься в *i-м* стовпці, свідчить про те, що блок  $Q_i$  є кінцевим, і тому несправність блоку  $Q_i$  не відрізняється від несправності датчика типу  $D^I_i$ . Наприклад, набір, що контролює систему змащення містить один нуль і має наступний вигляд:

$$\begin{array}{cccccccc} z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 & z_7 & z_8 & z_9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1. \end{array}$$

У таблиці функцій несправностей (табл. 2) з цим набором збігається стовпець  $Q_7$ , причому блок  $Q_7$  є кінцевим, отже в об'єкті існує або несправність блоку  $Q_7$  (вийшов з області припустимих значень параметр  $T_1$ ), або несправність датчика типу  $D^I_6$ .

Якщо *i-й* стовпець містить більш одного нуля, то несправним є блок, який відповідає *i-му* стовпцю. Нехай, наприклад, набір що контролює систему змащення має вигляд:

$$\begin{array}{cccccccc} z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 & z_7 & z_8 & z_9 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 & 0 & 0 & 0. \end{array}$$

Цей контролюючий набір збігається зі стовпцем  $Q_6$  (табл. 2). Несправним є блок  $Q_6$  (параметр  $D_n$  вийшов з області припустимих значень).

3. Контролюючий набір складається з нулів і одиниць, причому в таблиці функцій несправностей немає стовпця, що збігає з контролюючим набором. Якщо вважати, що в об'єкті можуть існувати тільки одиночні несправності блоків і датчиків, то в цьому випадку контролюючий набір, що не збігається з жодним стовпцем таблиці функцій несправностей, може містити тільки один нуль. Справді, при одиночній несправності блоку контролюючий набір збігається з одним зі стовпців таблиці функцій несправностей, при одиночній несправності датчика типу  $D^I_i$  контролюючий набір містить один нуль, і при цьому в таблиці функцій несправностей може не виявитися стовпця, що збігає з контролюючим набором. У розглянутому випадку в датчику, що відповідає єдиному нулю контролюючого набору, існує несправність типу  $D^I_i$ .

Нехай, наприклад, набір що контролює систему змащення має вигляд:

$$\begin{array}{cccccccc} z_1 & z_2 & z_3 & z_4 & z_5 & z_7 & z_8 & z_9 \\ 1 & 1 & 1 & 0 & 1 & 1 & 1 & 1. \end{array}$$

У табл. 2 немає стовпця, що збігає з контролюючим набором, отже в датчику  $D_4$  існує несправність типу  $D^I_i$ .

## 2. Діагноз технічного стану неперервних об'єктів, з зворотніми зв'язками.

Простота математичних моделей логічного типу є їх перевагою. Однак, унаслідок цієї простоти, деякі задачі діагнозу технічного стану неперервних об'єктів при використанні таких моделей не мають рішення. Наприклад, за допомогою логічної моделі місця несправностей можуть бути визначені з глибиною, яка не перевищує частин об'єкта, які містять у собі замкнуті контури зворотного зв'язку. Рішення таких задач вимагає залучення більш складних математичних моделей, що описують поведження об'єкта більш точно, чим моделі логічного типу.

Тому при діагностиці технічного стану складних неперервних об'єктів можна в першу чергу використовувати моделі логічного типу і тільки при необхідності потім залучати більш



складні математичні моделі, прагнучи використовувати їх не для об'єкта в цілому, а тільки для деяких його складових частин.

Звичайно реальні об'єкти мають деякі відхилення (у межах допусків) для значень основних параметрів. Тому можна ввести поняття ступеня працездатності, що визначається по ступені відхилення контрольованих параметрів у межах встановлених допусків. Несправність розглядається як така зміна структури об'єкта чи параметрів його елементів, що призводить до неприпустимого зниження ступеня працездатності чи повній втраті працездатності об'єкта.

Реальні складні системи можуть мати як велике число параметрів, так і параметри, контроль яких виявляється досить складним. Усе це, природно, утрудняє аналіз працездатності системи. При розгляді таких систем приходиться обмежуватися, як правило, невеликим числом контрольованих параметрів. Для вибору обмеженого числа контрольованих параметрів усю сукупність параметрів доцільно упорядкувати по ступені їх впливу на працездатність системи.

Рішення задачі визначення працездатності системи крім вибору параметрів для контролю вимагає встановлення границь припустимих змін контрольованих параметрів. Визначити границі припустимих змін контрольованих параметрів можна, аналізуючи часові або частотні характеристики системи, і користаючись методами, викладеними в теорії автоматичного керування. Однак, цей шлях вимагає попереднього одержання цих характеристик, що зв'язано у ряді випадків з великою обчислювальною роботою. Альтернативою цього шляху є метод малого параметра, при використанні якого вважається, що умови працездатності визначаються границями областей припустимих переміщень коренів характеристичного рівняння системи. Цей метод дозволяє установити безпосередньо область припустимих змін контрольованого параметра, що відповідає переміщенням коренів характеристичного рівняння системи усередині заданої області, обумовленої умовами працездатності системи.

При діагнозі технічного стану функціонуючої системи її працездатність можна визначити за результатами порівняння реакції системи з реакцією еквівалентної моделі, що включається паралельно контрольованій системі. При побудові таких моделей використовуються аналітичні методи.

Для визначення динамічних характеристик систем як з постійними, так і з змінними параметрами застосовуються також спеціалізовані моделі-фільтри. Вони можуть бути ефективно використані для визначення характеристик системи невідомої структури безпосередньо в процесі її функціонування. Їх зручно застосовувати при наявності в системі зворотних зв'язків, коли аналітичні методи є занадто складними і не приводять до досить точних результатів.

Задачу діагностики неперервних об'єктів можна звести до побудови диференціального рівняння, що відповідає отриманій динамічній характеристиці. У тому випадку, коли структура діагностуємої системи відома, визначення диференціального рівняння зводиться до відшукування його коефіцієнтів. Якщо даних про структуру немає і не представляється доцільним робити які-небудь апріорні припущення, найбільш зручним для нестационарних систем виявляється відшукування системи диференціальних рівнянь першого порядку, що дозволяє представити діагностичну систему у виді сукупності елементарних ланок і, отже, визначити структуру моделі, ізоморфної по поводженню досліджуваному оригіналу. Існує значна кількість систем, у яких вихід має слабку «чутливість» до малих змін внутрішніх параметрів системи. У таких системах внутрішні параметри, плавно досягши деяких «критичних» значень, можуть різко змінити вихідні характеристики системи. Локалізація подібних змін параметрів у системі досягається за допомогою спеціальних функцій передачі між визначеними вузлами системи на діаграмі проходження сигналів. Для деяких класів систем можна побудувати спеціальну компенсаційну схему, з різним виходом при правильному і неправильному функціонуванні контрольованої системи. Відомі приклади побудови таких компенсаційних схем для лінійних систем автоматичного регулювання.

Варто сказати також про вибір режимів контролю для оцінки параметрів систем. Існують два підходи до вибору режиму контролю. Один з них припускає введення найбільш важкого режиму, інший – найбільш ймовірного. У практиці створення систем діагнозу загальноприйнятий вибір найбільш ймовірного режиму роботи системи. У випадку динамічних систем методика виміру параметрів базується на застосуванні статистичної теорії оптимальних систем.

***Вивчити самостійно !!!!!!!!!***

### **3. Фізичні методи діагнозу технічного стану об'єктів.**

Розглянемо загальні положення ряду спеціальних методів визначення технічного стану об'єктів діагнозу по різних фізичних показниках їхньої роботи. Це в першу чергу акустичні, теплові і рентгенотелевізійні методи. Такі методи в літературі називаються методами неруйнівного контролю.

#### **Акустичні методи діагнозу.**

Технічний стан різних механізмів і машин може бути оцінений по таких параметрах, як шум і вібрація в процесі їхньої роботи. Вибір цих параметрів обумовлений насамперед тим, що шумові характеристики роботи машин істотно залежать від багатьох властивостей їхніх вузлів і деталей, які приймають участь у роботі, у тому числі і таких властивостей працюючих частин машин, визначення яких по інших характеристиках неможливе (наприклад, стан тертьових поверхонь деталей).

Однією з основних задач, розв'язуваних у рамках акустичних методів діагнозу, є виділення корисного акустичного сигналу на фоні великої кількості перешкод, що маскують акустичний сигнал. Варто помітити, що той самий акустичний сигнал при діагнозі може виявитися в одному випадку корисним сигналом, а в іншому – перешкодою. Корисним є сигнал, що зв'язаний із шумом, який видає досліджувана деталь. Всі інші сигнали є перешкодою. У зв'язку з цим шум механізму чи машини можна розглядати як складний сигнал. Виділення корисної складової такого сигналу може бути здійснено способами часової селекції і фільтрації. Обидва ці способи використовуються в акустичних методах діагнозу.

Один з акустичних методів діагнозу заснований на вимірі середньої потужності шуму. Цей метод застосовується в основному для перевірки технічного стану об'єкта. В основі методу лежить припущення про те, що середня потужність шуму справного механізму нижче середньої потужності шуму зношеного чи несправного механізму. Однак у більшості реальних випадків рівні шумів при справному і несправному стані об'єкта близькі за значенням. У цьому випадку існує деяка імовірність прийняття справного об'єкта за несправний чи несправного за справний, тобто даний метод діагнозу може виявитися малоефективним.

До розповсюджених акустичних методів діагнозу належить метод, заснований на виявленні схованої періодичності в сигналі шуму. При дослідженні шумових характеристик різних механізмів (зокрема, коробки передач автомобілів, тракторів, редукторів верстатів) установлено, що при виникненні в механізмі несправності в акустичному сигналі з'являється періодична складова. Завдання полягає в тому, щоб виявити цю періодичну складову, котра маскується перешкодами. Слід зазначити, що якби корисний періодичний сигнал був досить потужним (наприклад, досить чутний стукіт у працюючому двигуні), то його виявлення не представляло б технічних труднощів. Однак, коли стукіт не прослуховується, тобто виникла несправність що не привела до помітного порушення роботи механізму, необхідно застосувати спеціальні методи аналізу шумових сигналів.

Для рішення цієї задачі використовуються кореляційні методи аналізу складних сигналів. Ці методи принципово дозволяють виявляти навіть дуже слабкі періодичні складові сигнали на фоні перешкод, що маскують (заглушають) сигнал. Період спеціально побудованої кореляційної функції дозволяє визначити несправну деталь механізму, а амплітуда цієї функції – ступінь руйнування деталі.

### **Методи теплового контролю.**

Останнім часом великий розвиток одержали методи теплового (інфрачервоного) контролю якості і надійності радіоелектронного устаткування. Ці методи засновані на аналізі теплового випромінювання деталей чи елементів пристроїв при їхньому функціонуванні. Інтенсивність теплового випромінювання залежить від електричних характеристик окремих елементів пристрою і його структур. Зміна характеристик теплового випромінювання свідчить про зміну режиму роботи пристрою. Для окремих деталей і елементів збільшення інтенсивності їхнього теплового випромінювання характеризує локальні теплові перегріви, зв'язані з наявністю дефектів або неоднородностей. Своєчасне виявлення цих дефектів дозволяє вжити заходів по попередженню виходу з ладу деталей елементів і пристроїв у цілому. Так, виключення з радіоелектронних пристроїв елементів і деталей, інтегральний рівень теплового випромінювання яких відрізняється від середнього (номінального) рівня, дозволяє помітно знизити число відмовлень.

Теплові методи по способу одержання характеристик випромінювання поділяються на контактні і неконтактні.

До контактних методів відносяться:

- методи виміру температури в різних точках об'єкта за допомогою термопар;
- методи, що засновані на використанні температурно-чутливих фарб і сумішей, які змінюють свій колір чи плавляться при визначеній температурі деталі, на яку вони нанесені;
- методи, що зв'язані з застосуванням рідиннокристалічних з'єднань, фарбування яких зворотньо міняється в залежності від температури;
- методи, що засновані на використанні властивості фотографічних емульсій змінювати швидкість прояву в залежності від температури.

Найбільш перспективними методами з перерахованих вище вважаються методи, що використовують рідиннокристалічні з'єднання. В даний час вони дозволяють вимірювати різниці температур порядку  $0,1^{\circ}\text{C}$ . За допомогою ряду холестеричних рідиннокристалічних з'єднань проводиться вимір температур від  $10$  до  $100^{\circ}\text{C}$ .

### **Інші неконтактні методи діагностики.**

Велике поширення одержали також наступні неконтактні методи:

- методи евапорографії, засновані на перетворенні теплового випромінювання об'єкта у видиме зображення шляхом випару чи конденсації рідини на тонкій мембрані;
- методи крайового поглинання, зв'язані з використанням залежності положення границі поглинання деяких напівпровідників від температури;
- методи, що використовують явища фотоемісії і вторинної емісії електронів;
- методи, що засновані на властивості люмінофорів змінювати інтенсивність світіння під дією температури;
- методи, що використовують сканування об'єму або поверхні електронним чи оптичним променем.

В даний час розроблений цілий ряд приладів, призначених для визначення теплового випромінювання об'єктів неконтактними методами. **Евапорографи**, які застосовуються для візуалізації теплового поля чи об'єктів, володіють високою розрізнявальною здатністю, що дозволяє одержувати зображення об'єктів, температура яких відрізняється від температури середовища на  $0,5^{\circ}\text{C}$ . Прилади, що працюють на принципі поглинання теплового випромінювання, мають при мінімальній різниці температур  $12^{\circ}\text{C}$  розрізнявальну здатність порядку 2 штрихів на міліметр і постійну часу близько  $0,5$  с. Розроблені також люмінесцентні

термографи, що змінюють яскравість світіння на 20% при зміні температури на 1°C. Широке поширення одержали різні скануючі системи. У цих системах послідовно проглядаються окремі частини схеми, теплове випромінювання яких перетворюється в електричні сигнали і потім у двовимірну картину об'єкта, що спостерігається візуально.

**Рентгенотелевізійні методи** діагнозу дозволяють виявляти приховані дефекти виробів і деталей у процесі їх виготовлення. Дефекти радіоелектронних виробів (напівпровідникових діодів, транзисторів, резисторів, мікромодулів і т.д.) можуть бути розділені на два основних класи:

дефекти форми, що виражаються в зміні конфігурації і порушенні геометричних розмірів;

дефекти неперервності, що утворюються за рахунок різних неоднорідностей, домішок, тріщин.

Наявність цих дефектів істотно впливає на працездатність виробів. Виявлення прихованих дефектів здійснюється за допомогою рентгенотелевізійних мікроскопів і стробоскопів. Призначення рентгенотелевізійного мікроскопа складається в одержанні рентгенівського зображення контрольованого виробу. Рентгенотелевізійні стробоскопи дають нерухомі зображення вібруючих виробів.

Існуюча рентгенотелевізійна апаратура дозволяє контролювати майже всю номенклатуру радіоелектронних виробів. Виключення складають занадто масивні вироби, а також вироби, що містять деякі дрібні деталі (наприклад, елементи окремих мікромодулів), що на екрані відеоконтрольного пристрою виявляються недостатньо помітними. Для визначення дефектів у виробах роблять порівняння одержуваних рентгенограм з еталонними чи рентгено-грамми з конструктивними кресленнями.

Результати контролю реєструються такими способами:

- описом дефектів, що спостерігаються на екрані;
- фотографуванням зображення виробу з екрана відеоконтрольного пристрою;
- рентгенографуванням виробу;
- електрографуванням у рентгенівських променях.

Рентгенотелевізійні мікроскопи дозволяють одержати на екрані зображення зі збільшенням до 50 разів при високій розрізняльній здатності (до 20 пар ліній на 1 мм).