

4. ДІАГНОСТУВАННЯ ТЕХНІЧНИХ СИСТЕМ

При діагностуванні вирішують задачі контролю технічних систем, пошуку місця і визначення причин відмов, а також прогнозування технічного стану [11,12].

Термін “технічне діагностування” застосовують у визначеннях понять, коли задачі технічного діагностування рівнозначні або основною задачею є пошук місця і визначення причини відмов. Термін “контроль технічного стану” застосовують, коли основною задачею діагностування є визначення виду технічного стану.

Технічне діагностування здійснюється в системі технічного діагностування (СТД), яка являє собою сукупність засобів і об'єкта діагностування (ОД). Ухвалення рішення про стан системи і віднесення його до одному з видів – працездатного чи непрацездатного може здійснюватись тільки в процесі вимірювання і зіставлення з нормами сукупності ознак – діагностичних параметрів ДП, які характеризують цей стан.

Більшість ДП за своїм призначенням може мати подвійну природу, будучи одночасно діагностичними і технічними (або параметрами функціонального використання). Саме ці параметри звичайно піддаються безпосередньому вимірюванню, і для них найпростіше встановити норми і допуски, вихід за межі яких характеризує відмову системи [11].

Процес діагностування складається з окремих послідовно реалізованих у СТД кроків або частин, які називаються *елементарними перевірками*. Кожна елементарна перевірка передбачає:

- формування цілеспрямованих керуючих дій на ОД;
- вимірювання відгуку (реакції) ОД на керуючі дії;
- зіставлення результатів вимірювання з еталонними значеннями;
- визначення відповідності результатів вимірювання і НТП;

– формування рішення про вид технічного стану.

Сукупність елементарних перевірок, їх послідовність та правила обробки результатів визначають *алгоритм діагностування*.

4.1. Діагностична модель технічної системи

Системи, пропоновані в домашніх завданнях для дослідження, тобто для оцінювання надійності і діагностування, у вихідних даних представлені структурними схемами і складаються з декількох аналогових і цифрових конструктивно-функціональних модулів, які є технологічними елементами замін системи. Є можливість подачі стимулюючих (керуючих) дій x_i на входи кожного модуля, а при функціональному діагностуванні діагностичні параметри звичайно збігаються з технічними характеристиками модулів, які визначаються значеннями сигналів на виходах y_j і в контрольних точках z_j модулів. Прийmemo умову, за якої одночасна поява відмов у двох і більше модулях малоймовірна, тобто кожний непрацездатний стан системи пов'язаний з відмовою якогось одного КФМ. Таким чином, кількість непрацездатних станів системи дорівнює n -кількості модулів у її складі.

Сукупність значень y_j і z_j назвемо *результатом елементарної перевірки* R_j ; у цьому випадку справедливе співвідношення

$$R_j^{(i)} = A_j^{(i)} x_j, \quad i \in \overline{1, N}, \quad (4.1)$$

де $R_j^{(i)}$ – результат елементарної перевірки ОД, який перебуває в i -тому технічному стані.

Замість виразу (4.1) можна записати :

– для працездатного ОД, який перебуває в стані S_0 , знаходиться місце події $R_j^0 = A_j^0(\pi_j)$, $i \in \overline{1, n}$ або опускаючи верхній індекс “0” ,

$$R_j = A_j(\pi_j); \quad (4.2)$$

– для ОД, що має відмову i -того КФМ, тобто перебуває в стані $S_i \in S$

$$R_j^{(i)} = A_j^{(i)}(\pi_j), \quad i \in \overline{1, n}. \quad (4.3)$$

Система рівнянь (4.2), (4.3), задана для всієї сукупності елементарних перевірок $\pi_j \in \{II\}$ і всіх можливих технічних станів $S_i \in \{S, i \in \overline{0, n}\}$, являє собою формалізований опис системи, необхідний для вирішення задач діагностування (контролю), і є *діагностичною моделлю* системи (ОД). Формалізований опис може бути представлений в аналітичній, табличній, графічній та в інших формах.

Найпростішою діагностичною моделлю є табличне представлення рівнянь (4.2) і (4.3), яке називається *таблицею станів* (TS) (рис. 4.1).

Стовпці TS відповідають станам S_i з множини S , а рядка – елементарним перевіркам π_j з множини II . У клітину (ji) записують результат $R_j^{(i)}$ елементарної перевірки об'єкта діагностування, який перебуває в технічному стані S_i . Якщо під час виконання елементарної перевірки ДП перебуває у полі допуску, то $R_j^{(i)}=1$; у противному разі $R_j^{(i)}=0$.

При реалізації множини перевірок II стовпець S_0 таблиці станів задає поведінку працездатного ОД, тобто функцію (4.2), а інші її стовпці – поведінку ОД, який перебуває у відповідних непрацездатних станах.

Аналіз TS дозволяє сформулювати дві властивості множини елементарних перевірок II , на яких засновано вирішення задач технічного діагностування :

- властивість виявлення будь-якої відмови з множини S ;
- властивість усіх відмов з множини S .

R		S				
		o	..	i	..	s
	π_1		R_1 ..		$R_1^{(i)}$..	$R_1^{(s)}$
	π_j	j	..	$R_j^{(i)}$..	$R_j^{(s)}$
	π_n	n	..		$R_n^{(i)}$..	$R_n^{(s)}$

Рис. 4.1. Таблиця станів

Властивість виявлення формулюється так :

Для будь-якої відмови $S_i \in \{S\}$ можна знайти хоча б одну елементарну перевірку, $\pi_j \in \Pi$, таку $R_j \neq R_j^{(i)}$.

Наявність цієї властивості еквівалентно тому, що стовпець S_0 таблиці станів відрізняється від кожного з інших стовпців S_i , $i \in \overline{1, n}$.

На підставі цієї властивості можна зробити висновок про технічний стан ОД – працездатний чи непрацездатний.

Властивість розрізнення формулюється так :

Для кожної пари відмов $S_i, S_k \in \{S\}$, (за умови $i \neq k$) можна знайти хоча б одну елементарну перевірку $\pi_j \in \Pi$, таку, при якій $R_j^{(i)} \neq R_j^{(k)}$.

Наявність властивості розрізнення еквівалентно тому, що всі стовпці TS, які представляють непрацездатні стани, попарно можна розрізняти.

Для одержання табличної діагностичної моделі ОД на основі його структурної схеми застосовують так звані функціонально-логічні моделі (ФЛМ), які можна розглядати як інструмент для заповнення таблиці станів.

4.2. Функціонально-логічні моделі технічних систем

При побудові функціонально-логічної моделі системи модулі в складі її структурної схеми замінюють блоками, кожний з яких має один вихід і суттєві для даного виходу входи. Якщо вихідний сигнал якогось модуля системи характеризується декількома параметрами, то у ФЛМ кожний з цих параметрів представлений окремим виходом блоку; це стосується також і вхідних сигналів. Так, якщо модуль системи має один вхідний сигнал і один вихідний (рис. 4.2, *а*) і кожен з них характеризується двома параметрами (наприклад, амплітудою і частотою електричного струму), то у ФЛМ системи цей модуль буде представлений двома блоками Q_1 і Q_2 , кожний з яких має по одному виходу, а вхідний сигнал “розщеплюється” на два входи (за напругою і за частотою, як це показано на рис. 4.2, *б*).

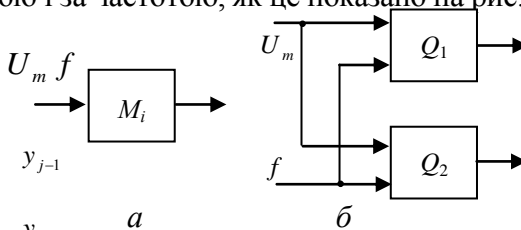


Рис. 4.2. Модуль M_i системи, сигнал y_{j-1} , які залежать від двох параметрів, (*а*) і їхнє зображення у вигляді блоків Q_1 і Q_2 (*б*)

“Розщеплення” входів і виходів у ФЛМ дозволяє визначити фізичний зміст елементарних перевірок π_j (вимірювання чи амплітуди або частоти перемінного струму у певних діапа-

зонах, обумовлених експлуатаційними допусками на параметри). В деяких випадках, коли всі модулі мають по одному виходу, і кожний з них характеризується одним фізичним параметром, ФЛМ може збігатися зі структурною схемою системи.

Значення виходу y_i блоку Q_j залежить від того, чи працездатний цей блок, а також від кон'юнкції вхідних сигналів x_k . Прийmemo логічний вислів: "Блок Q_j працездатний" і позначимо його символом Q_j . Тоді для працездатного блоку $Q_j=1$ і $Q_j=0$ у противному разі. Отже, для кожного блоку може бути записана умова (функція) появи вихідного сигналу:

$$y_j = Q_j \cdot \bigcap_{k=1}^l x_k, \quad (4.4)$$

де \bigcap і l – символ кон'юнкції і кількість сигналів x на вході блоку відповідно.

Більшість систем має таку властивість: функція появи вихідного сигналу приймає значення, яке дорівнює одиниці лише в тому випадку, коли значення вхідних змінних допустимі (тобто дорівнюють одиниці). Такі функції називаються монотонними; для монотонних функцій мінімальна форма єдина і, крім того, не містить змінних з запереченнями. Для структури без резерву функція y_i є кон'юнкцією вхідних змінних без заперечення і символу Q_j

Пропоновані для дослідження системи є звичайно багаторежимними об'єктами, коли робочий алгоритм їхнього функціонування складається з декількох підалгоритмів. Істотним є те, що в реалізації кожного підалгоритмів функціонування (у кожному режимі роботи) беруть участь різні сукупності модулів і зв'язків. Тому при вирішенні задач діагностування кожен режим функціонування системи необхідно розглядати окремо.

Стійкість керування в технічних системах забезпечується шляхом застосування від'ємних зворотних зв'язків (ОС). Представлення ОД його функціонально-логічною моделлю не дозволяє розрізнити між собою відмови блоків, охоплених

ОС. Це є наслідком простоти і недосконалості (невисокої точності) логічної моделі. Відмови блоків у контурі ОС можна буде розрізнати, якщо в режимі діагностування ці зв'язки “розірвати”, причому в ”розрив” у напрямку дії ОС включаються виходи засобу діагностування з відповідними стимулюючими сигналами, адекватними робочим сигналам відрегульованої по НТП працездатної системи. Іншими словами, у режимі діагностування організується так званий “керований розрив” контуру зворотного зв'язку ОД. Стимулюючі сигнали формуються функціональними генераторами засобів діагностування за відомою фізичною моделлю ОД.

Характерною ознакою досліджуваних систем є їхнє структурне резервування як засіб забезпечення високої відмовостійкості. У ФЛМ (функціонально-логічній моделі) таких систем деякі функції вихідних сигналів блоків, залишаючись монотонними, не задовольняють (4.4), а мають, наприклад, такий вигляд:

$$y_j = Q_j \cdot (x_1 \& x_2 \vee x_1 \& x_3 \vee x_2 \& x_3 \vee x_1 \& x_2 \& x_3), \quad (4.5)$$

відображаючи роботу кворуму-елемента за алгоритмом “2/3”.

Для вихідного сигналу структури з загальним двократним резервуванням:

$$y_j = Q_j \cdot (x_1 \vee x_2 \vee x_3 \vee (x_1 \& x_2) \vee (x_1 \& x_3) \vee (x_2 \& x_3) \vee (x_1 \& x_2 \& x_3)) \quad (4.6)$$

З огляду на однозначну відповідність між контрольними точками на виході блоків і елементарними перевірками множини Π , слід записати функції вихідних сигналів блоків ФЛМ (умови появи логічної одиниці) і на підставі послідовного аналізу визначити результат $R_j^{(i)}$ кожної елементарної перевірки π_j для таблиці станів.

4.3. Синтез алгоритму діагностування на основі функції, що розрізняє

На основі властивостей виявлення і розрізнення табличної діагностичної моделі може бути отримана так звана *функція, що розрізняє*, яка визначається в такий чином:

Функцією F_Δ , що розрізняє, називається кон'юнкція диз'юнкцій $\&V(\Pi\Sigma)$, яка отримана шляхом багатьох перевірок π_j , таких,
 $R_j^{(i)} \neq R_j^{(k)}$, $i \neq k$, для всіх $i \in \overline{0, n}$ і $k \in \overline{0, n}$.

Доведено,¹ що при перетворенні функцією F_Δ , що розрізняє, F_Δ , тобто логічного добутку логічних сум (кон'юнкції диз'юнкцій $\&V$) у диз'юнкцію кон'юнкцій $V\&$ (у логічну суму логічних добутків) кожна кон'юнкція отриманого перетворення являє собою мінімальну послідовність елементарних перевірок, достатню для вирішення задач діагностування системи. Іншими словами, перетворення функції, що розрізняє, за схемою

$$\&V \rightarrow V\& \quad (4.4)$$

дає нам оптимальні за критерієм $\min\{\Pi\}$ алгоритми діагностування системи.

Як приклад синтезуємо алгоритм пошуку відмов у системі електропостачання (СЕР) змінного струму, поданій структурною схемою на рис. 4.3.

Напряга на виході генератора характеризується двома параметрами, тому модуль Γ у функціонально-логічній моделі необхідно представити двома блоками. ФЛМ СЕР у режимі діагностування з розімкнутими, але керованими зворотними зв'язками наведена на рис. 4.4. Запишемо логічні функції умов роботи блоків ФЛМ для всіх y_j : $y_1 = Q_1 \cdot u_1 \cdot y_6$; $y_2 = Q_2 \cdot y_1 \cdot y_4$; $y_3 = Q_3 \cdot y_3$; $y_4 = Q_4 \cdot y_2$; $y_5 = Q_5 \cdot y_2 \cdot y_3$; $y_6 = Q_6 \cdot y_3$ станів, отримавши таким чином СЕР (табл. 4.1).

¹ С.В.Яблонский. Логический способ контроля работы логических схем./ Труды математического института им.В.А.Стеклова, т.51, 1958г.

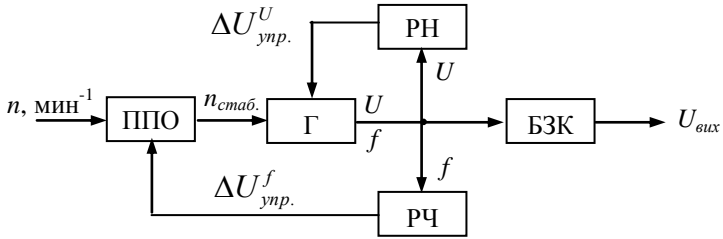


Рис. 4.3. Структурна схема СЕП: (ПСО – привід сталих обертів; Г – генератор; РН – регулятор напруги; РЧ – регулятор частоти; БЗК – блок захисту і керування)

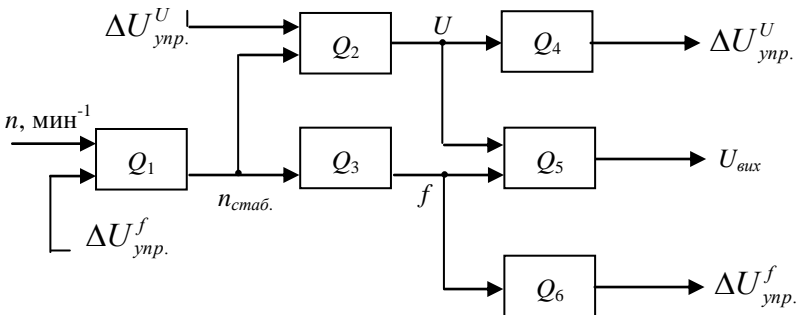


Рис. 4.4. Функціонально-логічна модель СЕП.

Таблиця 4.1

Таблиця станів СЕП

$S_i \backslash y_j$	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
y_1	1	0	1	1	1	1	1
y_2	1	0	0	1	1	1	1
y_3	1	0	1	0	1	1	1
y_4	1	0	0	1	0	1	1
y_5	1	0	0	0	1	0	1
y_6	1	0	1	0	1	1	0

Складемо функцію, що розрізняє, для даної моделі :

$$F_{\partial} = \&V(\Pi\Sigma) \Rightarrow (0-1) \Rightarrow (1v2v3v4v5v6) \&$$

$$(0-2) \Rightarrow \& (2v4v5) \&$$

$$(0-3) \Rightarrow \& (3v5v6) \&$$

$$(0-4) \Rightarrow \& 4 \&$$

$$(0-5) \Rightarrow \& 5 \&$$

$$(0-6) \Rightarrow \& 6 \&$$

$$(1-2) \Rightarrow \& (1v3v6) \&$$

$$(1-3) \Rightarrow \& (1v2v4) \&$$

$$(1-4) \Rightarrow \& (1v2v3v5v6) \&$$

$$(1-5) \Rightarrow \& (1v2v3v4v6) \&$$

$$(1-6) \Rightarrow \& (1v2v3v4v5) \& \quad (4.5)$$

$$(2-3) \Rightarrow \& (2v3v4v6) \&$$

$$(2-4) \Rightarrow \& (2v5) \&$$

$$(2-5) \Rightarrow \& (2v4) \&$$

$$(2-6) \Rightarrow \& (2v4v5v6) \&$$

$$(3-4) \Rightarrow \& (3v4v5v6) \&$$

$$(3-5) \Rightarrow \& (3v6) \&$$

$$(3-6) \Rightarrow \& (3v5) \&$$

$$(4-5) \Rightarrow \& (4v5) \&$$

$$(4-6) \Rightarrow \& (4v6) \&$$

$$(5-6) \Rightarrow \& (5v6) \&$$

Перехід за схемою (4.4) виконується з урахуванням відомих з алгебри – логіки законів і правил :

$$y\&u = y; yVv = y; y(yVx) = y; (yVx)\&(zVx) = y\&zVx.$$

Застосувавши (4.5) і керуючись цими правилами, отримаємо:

$$(1V2V3V4V5V6)\&4 = 4; 4\&(2V4) = 4; (1V3V6)\&6 = 6 \text{ і т.д.}$$

Остаточний результат перетворення – один доданок логічної суми у вигляді кон'юнкції $\pi_4 \cdot \pi_5 \cdot \pi_6 = A_{\partial}$, який і є алгоритмом діагностування вихідної структури з мінімальною кількістю вхідних у нього елементарних перевірок.

Отриманий алгоритм діагностування є безумовним, – кожна наступна елементарна перевірка виконується незалежно від результату (1 або 0) попередньої.

Діагностичною таблицею (DT) назвемо частину таблиці станів, яка містить алгоритм діагностування, тобто ті елементарні перевірки, що входять в алгоритм діагностування.

Отриманий вище результат представимо діагностичною таблицею (табл. 4.2).

Таблиця 4.2.
Діагностична таблиця СЕП

$A_{\delta} \backslash S_i$	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6
π_4	1	0	0	1	0	1	1
π_5	1	0	0	0	1	0	1
π_6	1	0	1	0	1	1	0

Стовпці DT являють собою всі можливі в заданій множині технічних станів $\{S\}$ реалізації алгоритму діагностування розглянутої структури. Отриманий алгоритм діагностування реалізує обидві властивості таблиці станів :

- виявлення (ідентифікацію) ТС: S_0 і S_i ($i \in 1,6$), тобто визначення виду ТС (працездатне чи непрацездатне) ;
- розрізнення всіх i -тих ТС, що відповідають відмові одного будь-якого блоку з шести, тобто локалізацію відмов.

Отже, даний алгоритм вирішує дві задачі технічного діагностування :

- контроль працездатності СЕП.
- пошук модуля, що відмовив, у структурі СЕП.

Функція F_{δ} , що розрізняє, містить у загальному випадку $M = 0.5 \cdot N \cdot (N + 1)$ диз'юнктивних співмножників (кон'юнкцій), де N – кількість блоків структурно-логічної моделі діагностованої структури. У розглянутому прикладі $N = 6$, отже, F_{δ}

містить $M = 21$ співмножник. Але вже при $N = 12$ кількість диз'юнктивних співмножників зростає до 78.

Перетворення $\&V(V\&$ являє собою, по суті, метод повного перебору, що вимагає вже для відносно нескладних схем застосування обчислювальної техніки.

Аналіз виразу (4.5) дозволяє визначити кількість входжень W_j кожної елементарної перевірки π_j до складу функції F_δ , що розрізняє: $F_\delta = \&V$. Результати обчислень наведено в табл. 4.3.

Таблиця 4.3

Число входжень W_j						
π_j	π_1	π_2	π_3	π_4	π_5	π_6
W_j	6	10	10	12	11	11

До складу алгоритму діагностування $A_\delta = \pi_4 \cdot \pi_5 \cdot \pi_6$ увійшли перевірки, які мають максимальну кількість входжень у функцію, що розрізняє.

На цій основі розроблені прості формальні методи синтезу мінімальних алгоритмів діагностування, таких, як:

- метод “гілок і границь”;
- метод інформаційного критерію;
- інженерний метод синтезу.

Їхні описи наведено в рекомендованій літературі.

Приклад синтезу алгоритму діагностування інженерним методом наведено у розд. 5.

4.4. Діагностування цифрових модулів технічних систем

В сучасних комп'ютерно-інтегрованих системах (КІС) проблему забезпечення надійності цифрових моделей вирішують шляхом створення засобів автоматичного діагностування несправних станів. У КІС застосовують як вбудовані, так і зовнішні спеціалізовані засоби діагностування. Вони дозволяють КІС самостійно локалізувати відмови і збої за умови справності *діагностичного ядра*, тобто тієї частини апарату-

тури, яка повинна бути гарантовано працездатною до початку процесу діагностування.

При діагностуванні КІС найбільш широке поширення одержав *принцип розкручування*, або принцип областей, які розширюються [5]. Цей принцип полягає в тому, що на кожному етапі діагностування ядро й апаратура вже перевірених працездатних цифрових модулів КІС являють собою засоби тестового діагностування, а апаратура наступної області, яку перевіряють, є об'єктом діагностування. Процес діагностування за принципом розкручування показано на рис.4.5. Діагностичне ядро перевіряє апаратуру першої області, далі перевіряється апаратура другої області з використанням ядра і вже перевіреної першої області і т.д.

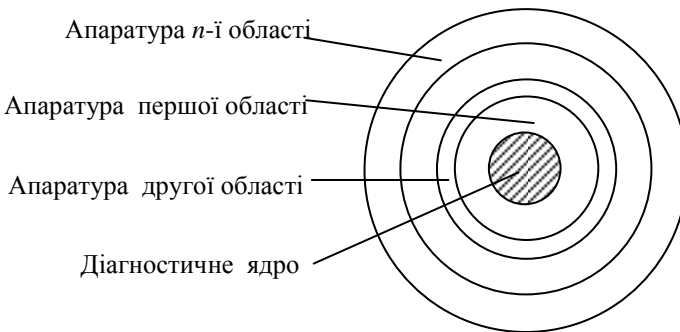


Рис. 4.5. Процес діагностування за принципом розкручування

Для виконання діагностування КІС у своєму складі має пристрій уведення (ПВ) і нагромаджувачі (Н) діагностичної інформації (тестові дії, очікувані відгуки, закодовані алгоритми діагностування), блок керування (БК) зчитуванням і видачею тестових дій, зчитуванням відгуку, аналізом і видачею результатів діагностування, блок комутації (БК), який дозволяє з'єднувати виходи діагностованого модуля з блоком порівняння, блок порівняння (БП) і пристрій виведення результатів діагностування (ПВР). На рис. 4.6 наведено структурну схему вбудованих засобів тестового діагностування.

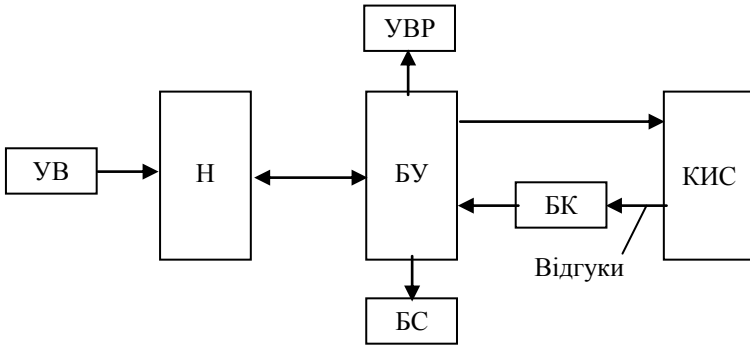


Рис. 4.6. Структурна схема убудованих засобів тестового діагностування

Показані на схемі блоки і пристрої можуть бути частково або повністю сполучені з апаратурою КІС. З розвитком інтегральної мікроелектроніки і створенням мікропроцесорів і мікроЕОМ їх почали використовувати як засоби діагностування КІС. Такі спеціалізовані процесори, які використовують з метою обслуговування і діагностування КІС, одержали назву *сервісних процесорів*, що реалізують різні методи діагностування. Кожен метод діагностування характеризується об'єктом елементарної перевірки, а також способом подачі дії *у* і зняття відгуку.

Тестове діагностування КІС реалізується такими методами:

- командного ядра;
- рівня логічних схем;
- еталонних станів;
- мікродіагностування;
- діагностування, орієнтованого на перевірку змінних блоків.

Методи функціонального діагностування КІС реалізують за допомогою засобів вбудованого контролю, самоперевіряемого дублювання та за реєстрацією станів. Відповідно до варіанта домашнього завдання пропонується докладно описати один з методів тестового або функціонального діагностування.

5. ПРИКЛАДИ РОЗВ'ЯЗАННЯ ЗАДАЧ ДОМАШНІХ ЗАВДАНЬ

Домашні завдання містять оцінювання і розрахунок показників надійності різних технічних систем (ДЗ-1), опис методів діагностування і синтез алгоритмів діагностування (ДЗ-2). У даному розділі на конкретних прикладах розглянуто методики розв'язання таких задач з використанням довідкового матеріалу Додатків.

5.1. Оцінка ефективності модернізації технічної системи

В процесі експлуатації технічної системи накопичується значна статистична інформація з відмов. Аналіз причин відмов дозволяє виявити прорахунки конструкторів, відхилення від заданого технологічного режиму при виготовленні, а також і від вимог нормативної документації під час експлуатації системи. За результатами аналізу причин відмов здійснюється модернізація (доробка) систем, спрямована на підвищення їхньої надійності і, отже, на збільшення терміну служби [4]. У даному Додатку ефективність проведеної доробки визначається виграш у надійності системи стосовно того чи іншого показника і не торкається витрат на модернізацію системи.

Результати обробки статистичної інформації з відмов можуть бути представлені у різній формі. Розглянемо можливі варіанти рішення задачі.

5.1.1. Оцінювання ефективності модернізації невідновлюваних систем

Нехай статистика відмов до модернізації системи представлена таблицею 5.1, а після модернізації – таблицею 5.2.

Таблиця 5.1

Результати обробки статистики відмов

$t \cdot 10^{-2}$ год	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$\lambda(t) \cdot 10^4$ год ⁻¹	0	0,34	9,93	20,7	26,8	29,9	31,6	32,6	33,2	33,5	33,6

Таблиця 5.2

Безвідмовність модернізованої системи

$t \cdot 10^{-2}$ год	0	2	4	6	8	10	12	14	16	18	20
$f_m(t) \cdot 10^4$ год ⁻¹	0	0,04	1,43	6,08	8,99	8,94	7,39	5,53	3,91	2,66	1,78

Необхідно оцінити ефективність модернізації системи стосовно середнього наробітку до відмови, тобто знайти значення $E_{T_1} = \frac{T_1}{T_{1M}}$. Задача зводиться до реалізації двох переходів:

$$\lambda(t) \Rightarrow T_1 \quad \text{і} \quad f_m(t) \Rightarrow T_{1M},$$

які виконуються на основі фундаментальних співвідношення теорії надійності:

$$P(t) = \exp\left[-\int_0^t \lambda(t) dt\right], \quad P(t) = 1 - \int_0^t f(t) dt \quad \text{і} \quad T_1 = \int_0^{\infty} P(t) dt \quad (5.1)$$

за схемами $\lambda(t) \Rightarrow P(t) \Rightarrow T_1$ і $f_m(t) \Rightarrow P_m(t) \Rightarrow T_{1M}$. Оскільки функції безвідмовності $\lambda(t)$ і $f_m(t)$ задані таблично і їхні аналітичні апроксимації невідомі, зазначені переходи доцільно виконати шляхом графічного інтегрування, перенісши на графіки табличні дані.

Якщо статистика відмов за тривалий період може бути описана DN -розподілення наробітку до відмов, то після модернізації системи досить провести випробування на безвідмовність малої серії (декілька зразків) за планом $[NUN]$, і за отриманими наробітками до відмови $\{t_i\}$ оцінити параметри DN -моделі відмов за формулами [8]:

$$\mu = \frac{1}{n} \cdot \sum_{i=1}^n t_i; \quad G = n \cdot \left(\sum_{i=1}^n \frac{1}{t_i}\right)^{-1}; \quad v = \left(\frac{\mu}{G} - 1\right)^{0.5}, \quad (5.2)$$

де n – кількість випробуваних зразків;

G – проміжний параметр.

Подальший розрахунок усіх функцій безвідмовності модернізованої системи виконується залежностями (1.7), (1.8), (3.5), (3.6) і (3.10). Функції безвідмовності: $P(t)$, $Q(t)$, t та щільність розподілення наробітку до відмови $f(t)$ модернізованої системи обчислюють за допомогою програми “GRAF.BAS.”, наведеної в Додатку 5; коментарі до програми не мають потребу в поясненнях. Для оцінювання ефективності модернізації використовують відношення конкретних показників безвідмовності системи до і після доробки.

Оскільки інтенсивність і ймовірність відмовлень є функціями наробітку системи, то й ефективність модернізації стосовно цих показників залежить від тривалості експлуатації модернізованої системи:

$$E_Q(t) = \frac{Q(t)}{Q_M(t)}, \quad E_\lambda(t) = \frac{\lambda(t)}{\lambda_M(t)}. \quad (5.3)$$

Результати розрахунків ефективності модернізації системи слід представити у вигляді таблиць і графіків.

5.1.2. Оцінка ефективності модернізації відновлюваних систем

Вихідними даними є статистичні значення середніх наробітків до відмови конструктивно-функціональних модулів (КФМ), що утворюють досліджувану структуру – $\mu_{мес}$; відомі також значення цього параметра після доробки системи. Ефективність модернізації оцінюються за показниками як безвідмовності, так і довговічності відновлюваної системи, визначення яких дано в розд. 2. Нехай для системи з 9-ти модулів маємо середні наробітки до відмови всіх модулів (табл. 5.3):

Таблиця 5.3

Статистика по безвідмовності КФМ системи

КФМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu_{\text{кфм}}$ год	16550	23400	18700	19270	26540	15000	20000	21300	17050

Після доробки системи середні наробітки модулів до відмови збільшилися в середньому на 17%.

Для визначення $E_{\Omega}(t)$, $E_{\omega}(t)$ чи $E_{T_2}(t)$ необхідно обчислити функції безвідмовності $\Omega(t)$ і $\Omega_m(t)$, $\omega(t)$ і $\omega_m(t)$ або $T_2(t)$ і $T_{2m}(t)$, використовуючи залежності (2.7), (2.9), (2.12) і Додатки 2, 3 та 4. Діапазон зміни наробітку t повинен охоплювати весь період “життя” модернізованої системи і скласти 30000...50000 годин. Задача істотно спрощується за допомогою РС. В Додатку 5 наведена програма “RASEX.BAS”, що забезпечує одержання усіх функцій безвідмовності відновленої системи. Скористаємося цією програмою для розв’язання поставленої задачі.

Введемо у програму:

- кількість модулів (типономіналів) $N = 9$;
- значення середніх наробітків до відмов $T_0(1) \dots T_0(9)$ кожного модуля згідно з даними табл. 5.3;
- значення коефіцієнтів варіації наробітків модулів до відмови $i(1) \dots i(9)$, які дорівнюють одиниці, оскільки в умові задачі інформація про параметр форми DN -розподілення відсутня [] ;
- початкове значення наробітку t_0 , з якого починається обчислення функцій безвідмовності; припускаємо, що $t_0 = 0$ годин;
- кількість обчислювальних точок $k = 16$;
- крок між розрахунковими точками $\Delta t = 2000$ годин.

Нижче наведено таблицю функцій безвідмовності досліджуваної системи до проведення доробки.

Таблиця 5.4

Результати обчислювань за програмою RASEX.BAS

t , год	$M[m(t)]$	$\omega(t)$, год ⁻¹	$T_2(t)$, год
2000	0,05537	5,537	18059,7
4000	0,66205	33,102	3020,9
6000	1,63800	48,798	2049,3
8000	2,69022	52,611	1900,7
10000	3,74293	52,636	1899,8
12000	4,78298	52,002	1923,0
14000	5,80976	51,339	1947,8
16000	6,82483	50,754	1970,3
18000	7,82994	50,255	1989,8
20000	8,82659	49,832	2006,7
22000	9,81598	49,470	2021,4
24000	10,79915	49,158	2034,3
26000	11,77716	48,901	2045,0
28000	12,75077	48,680	2054,2
30000	13,72004	48,464	2063,4
32000	14,68613	48,304	2070,2

Значення $\omega(t)$ збільшені в 10^5 ;

Повторимо обчислення за програмою “RASEX. BAS” для модернізованої системи, яка відрізняється від вихідної тим, що після модернізації середні наробітки КФМ до відмови збільшилися на 17% (табл. 5.5).

Таблиця 5.5

Показники безвідмовності КФМ системи після доробки

КФМ	1	2	3	4	5	6	7	8	9
$\mu_{кфм}$, год	19364	27378	21879	22546	30947	17550	23400	24921	19949

Обчислені значення функції безвідмовності модернізованої системи наведено в табл. 5.6

Таблиця 5.6

Результати розрахунків за програмою RASEX.BAS

t , год	$M[m(t)]$	$\omega(t)$, год ⁻¹	$T_2(t)$, год
2000	0,02492	2,492	40133,7
4000	0,42636	21,318	4690,8
6000	1,19398	38,381	2605,5
8000	2,07726	44,164	2264,3
10000	2,98030	45,152	2214,8
12000	3,87849	44,910	2226,7
14000	4,76700	44,426	2251,0
16000	5,64577	43,938	2275,9
18000	6,51577	43,500	2298,8
20000	7,37813	43,118	2319,2
22000	8,23379	42,783	2337,4
24000	9,08369	42,495	2353,2
26000	9,92850	42,240	2367,4
28000	10,76882	42,016	2380,0
30000	11,60541	41,830	2390,6
32000	12,43856	41,657	2400,5

Значення $\omega(t)$ збільшені в 10^5

За даними 5.4 і 5.6 неважко обчислити ефективність модернізації систем:

$$E_{\Omega} = \frac{\Omega(t)}{\Omega_m(t)}, \quad E_{\omega} = \frac{\omega(t)}{\omega_m(t)}, \quad E_{T_2} = \frac{T_{2,m}(t)}{T_2(t)}, \quad (5.4)$$

значення якої наведені в табл. 5.7.

Для визначення ефективності модернізації показником довговічності доцільно побудувати графічні залежності $\omega(t)$ і $\omega_m(t)$ і знайти значення показників довговічності – середніх термінів служби T_{cl} і $T_{cl,m}$ для заданого критерію граничного стану ω_{2p} .

Таблиця 5.7

Залежність ефективності модернізації від наробітку

t , год	$E_{\Omega}(t)$	$E_{\omega}(t)$	$E_{T_2}(t)$	t , год	$E_{\Omega}(t)$	$E_{\omega}(t)$	$E_{T_2}(t)$
2000	2,222	2,222	2,222	18000	1,202	1,155	1,155
4000	1,553	1,553	1,553	20000	1,196	1,156	1,156
6000	1,372	1,271	1,271	22000	1,192	1,156	1,156
8000	1,295	1,191	1,191	24000	1,189	1,157	1,157
10000	1,256	1,166	1,166	26000	1,186	1,158	1,158
12000	1,233	1,158	1,158	28000	1,184	1,159	1,159
14000	1,219	1,156	1,156	30000	1,182	1,159	1,159
16000	1,209	1,155	1,155	32000	1,181	1,1620	1,160

5.2. Розрахунок відмовостійкості і необхідної кратності резервування системи

Необхідна кратність резервування r авіаційного обладнання за умови заданого рівня вимог до відмовостійкості систем, які проектують і прийнятому значенні сумарного наробітку до відмови визначається з виразу для ймовірності безвідмовної роботи, який у DN -моделі відмовлень має вигляд:

$$P(t, r) = \Phi\left(\frac{\mu(r) - t}{v(r) \cdot \sqrt{t \cdot \mu(r)}}\right) - \exp\left(-\frac{2}{\langle v(r) \rangle^2}\right) \cdot \Phi\left(-\frac{\mu(r) + t}{v(r) \cdot \sqrt{t \cdot \mu(r)}}\right). \quad (5.5)$$

Розв'язання трансцендентного рівняння (7.1) відносно r доцільно виконати графічним методом. Для цього необхідно обчислити показник відмовостійкості для діапазону практично реалізованих значень r і t для різних можливих і доцільних схем резервування.

На рис. 5.1 наведені залежності $P(r, t)$ для навантаженого резерву при $\mu_3 = 12500$ рік, $v_3 = 0,72$ і показано, що для забезпечення відмовостійкості АТ до $t_{\Sigma} = 30000$ год при $P_{mp} = 0,9995$ необхідна кратність r не менша, ніж 3.

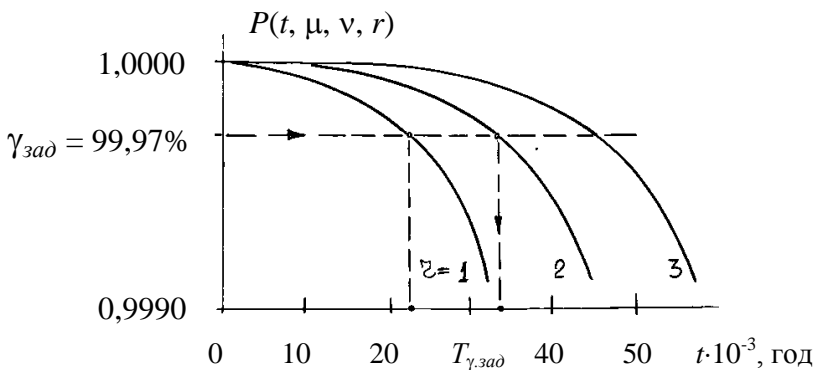


Рис. 5.1 Схема вибору необхідної кратності r навантаженого резерву

Аналогічним чином здійснюється вибір алгоритму A_{k-e} роботи кворум-елемента.

Оскільки резервовані фрагменти структури включені послідовно з кворум-елементом, до його надійності ставлять вельми високі вимоги – ймовірність безвідмовної роботи кворум – елемента повинна бути вищою заданого рівня P_{mp} .

5.3. Синтез алгоритму діагностування інженерним методом

Розглянемо послідовність дій при синтезі алгоритму діагностування інженерним методом. Метод ґрунтується на підрахунку кількості включень W_j , які обчислюються для кожної елементарної перевірки π_j , і виборі до складу алгоритму діагностування тих з них, що мають $\max W_j$.

Нехай діагностований об'єкт – система автоматичного керування польотом (САКП) в режимі стабілізації приладної швидкості (рис. 5.2). Розглянемо взаємодію модулів системи у заданому режимі функціонування.

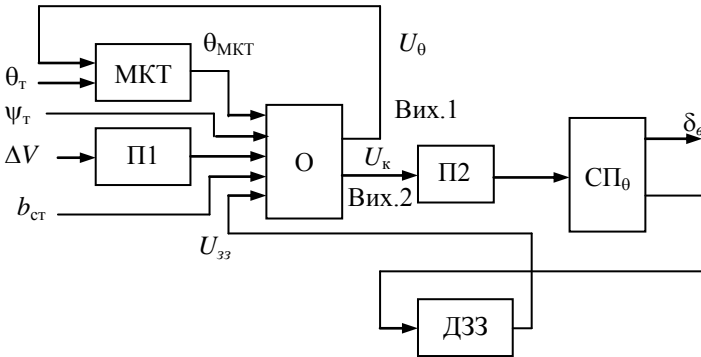


Рис. 5.2. САУП в режимі стабілізації швидкості (θ_T і Ψ_T – поточні значення кутів тангажа и курса; $\Delta V = V_{np} - V_{зад}$ відхилення приборної швидкості польоту от заданной; b_{ct} – положення стабілізатора; U_{33} – сигнал зворотного зв’язку)

В розглянутому режимі САУП взаємодіють слідуєчи структурні модулі: МКТ – механізм управління тангажом; ПІ – підсилювач сигналу відхилення від заданої швидкості; О – обчислювач-формуєч сигналу управління по тангажу; П2 – підсилювач сигналу управління по тангажу; СП₀ – сервопривод руля висоти; ДЗЗ – датчики зворотного зв’язку.

Сельсин МКТ формує сигнал $\theta_{МКТ}$ такої величини, щоб у сталому польоті з заданою швидкістю і при $\theta = const$ сигнал на Вих.1 обчислювача дорівнював нулю, причому на Вих.2 діє сигнал, що забезпечує необхідний кут відхилення рулів висоти δ_B . При відхиленні V_{np} від $V_{зад}$ сигналів неузгодженості ΔV після підсилення у ПС1 перетворюється обчислювачем з урахуванням параметрів на його вході і через ПС2 надходить у рульовий агрегат СП₀. Змінюється кут відхилення руля висоти δ_B . Одночасно сигнал з обчислювача надходить у МКТ, в якому електродвигун повертає ротор сельсина, який приймає сигнал від центральної гіровертикалі (ЦГВ). Поворот ротора сельсина частково компенсує сигнал від ЦГВ, який змінюється при новому кутовому положенні літака вна-

слідок зміни δ_B . Рух літака з кутом тангажа θ , що змінився, приводить до зміни його швидкості і компенсації сигналу неузгодженості ΔV .

Складемо для системи, яку діагностують, функціонально-структурну модель, яка забезпечує перехід до адекватної діагностичної моделі у вигляді таблиці станів, причому врахуємо, що обчислювач і рульовий агрегат мають по два виходи з різними сигналами, отже, кожний з них буде зображений у ФСМ (функціонально-структурній моделі) двома блоками. Функціонально-структурна модель діагностовано системи наведена на рис. 5.3. Ґрунтуючись на цій ФСМ запишемо систему логічних рівнянь для вихідних сигналів блоків:

$$\begin{aligned}
 y_1 &= Q_1 \theta \quad y_{3-1}; \quad y_2 = Q_2 \Delta V; \quad y_3 = Q_3 \delta_{cm} \theta \quad \varphi \quad y_1 \quad y_3 \quad y_{8-1}; \\
 y_4 &= Q_4 \delta_{cm} \theta \quad \varphi \quad y_1 y_3 \quad y_{8-1}; \quad y_5 = Q_5 y_4; \\
 y_6 &= Q_6 y_5; \quad y_7 = Q_7 y_5; \quad y_8 = Q_8 y_6 y_7, \\
 &\text{і заповнимо стовпці таблиці станів (табл. 5.8).}
 \end{aligned}$$

Таблиця 5.8

Діагностична модель САУП у режимі стабілізації V_{np}

	S_0	S_1	S_2	S_3	S_4	S_5	S_6	S_7	S_8	W
y_1	1	0	1	1	1	1	1	1	1	8
y_2	1	1	0	1	1	1	1	1	1	8
y_3	1	0	0	0	1	1	1	1	1	18
y_4	1	0	0	1	0	1	1	1	1	18
y_5	1	0	0	1	0	0	1	1	1	20
y_6	1	0	0	1	0	0	0	1	1	20
y_7	1	0	0	1	0	0	1	0	1	20
y_8	1	0	0	1	0	0	0	0	0	14

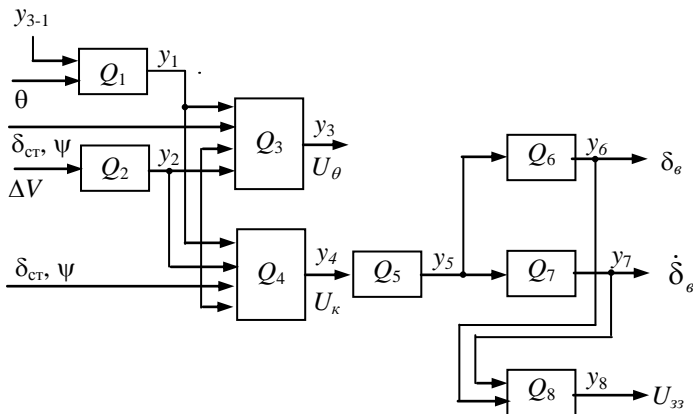


Рис.5.3. Функціонально-логічна модель системи, яку діагностують

Синтез алгоритму діагностування виконаємо у такій послідовності.

1. Доповнимо таблицю станів одним стовпцем праворуч, позначивши його W . У цьому стовпці запишемо кількість входжень елементарних перевірок у функцію, що розрізняє. Кількість входжень визначається добутком кількості одиниць m_j і числа нулів n_j , записаних в рядку j -ї елементарної перевірки, тобто $W_j = m_j \cdot n_j$. Так, для π_1 : $m_1=8$, $n_1=1$ і $W_1 = 8$; для π_8 : $m_8=2$, $n_8=7$ і $W_8 = 14$ (табл. 5.8)

2. В алгоритм діагностування для першої перевірки вибираємо таку π_j , кількість входжень якої у функцію, що розділяє, максимальна. У нашому прикладі перевірок три: π_5 , π_6 і π_7 . В алгоритм слід вибрати ту, яка легше реалізувати практично; нехай це буде π_5 – змінна напруга на виході підсилювача каналу тангажа.

3. Після проведення перевірки π_5 множина можливих станів $\{S_0 \dots S_8\}$ поділяється на дві підмножини: при позитивному результаті перевірки, тобто при $y_5=1$, дійсний стан системи перебуває у підмножині $\{S_0, S_3, S_6, S_7, S_8\}$, а при нега-

тивному результату, тобто при $y_5 = 0$, – у підмножині $\{S_1, S_2, S_4, S_5\}$. Це положення ілюструється схемою на рис. 5.4, за якою вибирається друга перевірка в алгоритм діагностування.

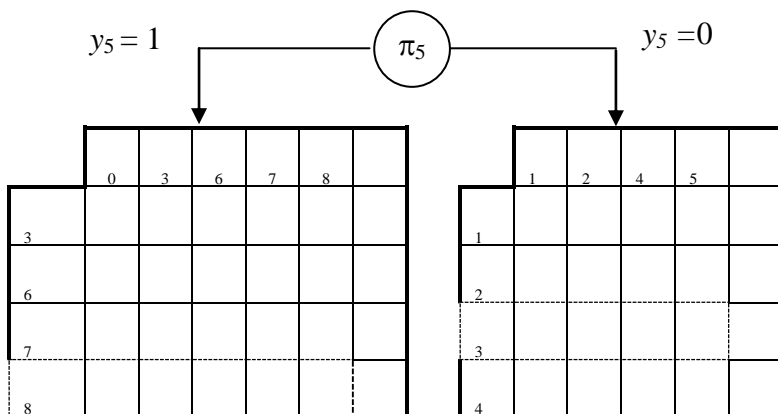


Рис. 5.4. Результати першої перевірки

З рис.5.4 випливає, що синтезований алгоритм діагностування є **умовним**: наступна (друга) перевірка вибирається (визначається) за результатом, отриманим при реалізації попередньої (першої) перевірки. Максимальна кількість входжень у функцію, що розрізняє, мають π_8 і π_3 відповідно, які і включають як другі перевірки в алгоритм діагностування.

4. Кожна з цих перевірок відповідно до отриманого результату поділяє згадані підмножини **станів** системи також на дві частини, як це показано на рис. 5.5 і 5.6.

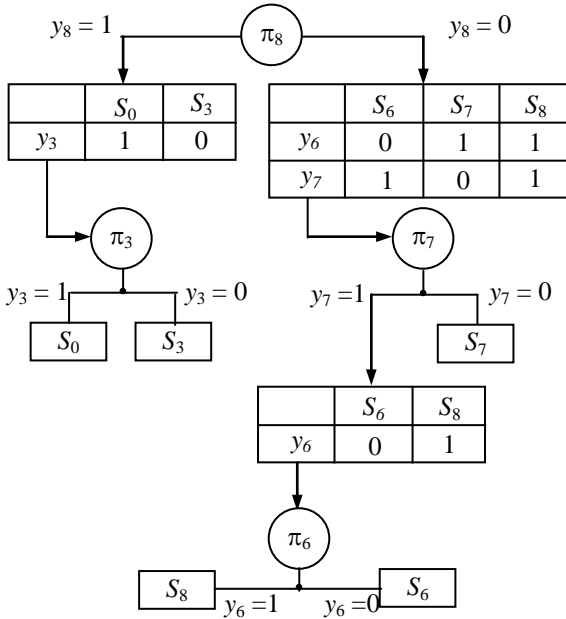


Рис. 5.5. Послідовність вибору третьої і четвертої перевірок при $y_5 = 1$

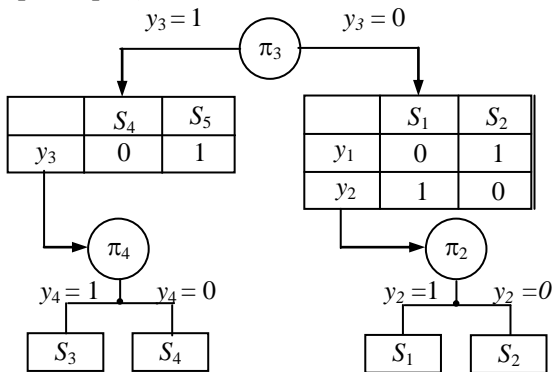


Рис. 5.6. Послідовність вибору третьої перевірки при $y_5 = 0$

Зазначимо, що з матриць станів на рис. 5.4. . .5.6 виключено ті елементарні перевірки π_j , для яких $W_j = 0$. За чотири послідовних кроки ідентифіковані всі задані моделлю відмовлень технічні стани системи. Умовний алгоритм діагностування наведено на рис. 5.7.

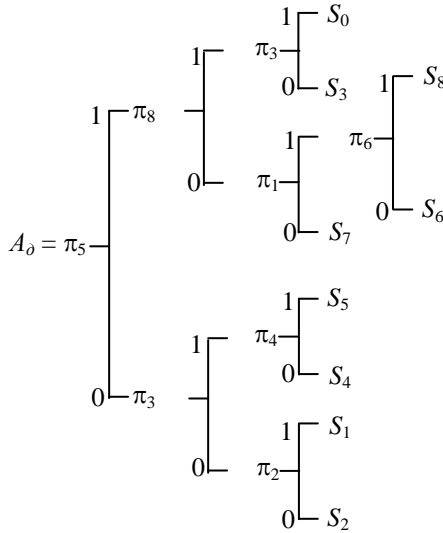


Рис. 5.7. Алгоритм діагностування САКП

5.4. Опис методу діагностування цифрових модулів по реєстрації станів

Ускладнення структур КІС, підвищення ступеня інтеграції і швидкодії елементної бази призводить до збільшення відносної частки збоїв у загальній кількості помилок системи.

Помилка звичайно є наслідком несправностей. Несправність призводить до помилки лише в тому випадку, якщо вона змінює знак сигналу на протилежний, тобто помилка свідчить про наявність несправності. Доти, доки це не відбудеться, несправність залишається *захованою*.

Несправності звичайно класифікують за джерелом походження, ступенем поширення і за тривалістю.

За джерелом надходження розрізняють:

1 – внутрішні	2 – зовнішні
---------------	--------------

несправності;

до перших належать несправності електронних компонентів схеми, а до других – різні наведення, перешкоди й електромагнітна радіація.

За відповідністю рівням розглядають:

1 – детерміновані	2 – недетерміновані
-------------------	---------------------

несправності;

перші відповідають рівню логічного нуля або одиниці, другі можуть сприйматися і як 0, і як 1.

За ступенем поширення розрізняють:

1 – локальні(одиночні)	2 – поширені (кратні)
------------------------	-----------------------

несправності;

Якщо перші звичайно стосуються однією логічної змінної, то другі – декількох. Поширені несправності – найбільш ймовірний тип несправностей у ВІС (велика інтегральна схема) і НВІС (над велика інтегральна схема), тому що внаслідок малих розмірів електронних схем відмов звичайно виникає у декількох ланцюгах, за отже, стосується декількох логічних змінних.

За тривалістю розрізняють:

1-постійні	2-випадкові	3-переміжні
------------	-------------	-------------

несправності .

Випадкових несправності спричиняє короткочасна зміна параметрів, яка виникає внаслідок коливання температури, зміну затримок, магнітна радіація, перешкоди у живленні, вплив α -часток на напівпровідникові схеми.

Переміжні несправності є наслідком сталих несправностей, які виявляються за умови рідкісного небезпечного поєднання логічних змінних. Інші причини – напружена (критична за затримками) часова діаграма, рідкісні випадки змагань у схемах, нестійкі контакти у рознімах тощо.

У зв'язку з викладеним важливо вміти локалізувати причину збоїв за ситуацією, зафіксованою в момент їх виявлення. Таку можливість надає метод діагностування за ресстрацією станів.

Цей метод діагностування характеризується тим, що несправність чи збій локалізується за зареєстрований в момент виявлення помилки результатами інформації про стан КІС (стан схем контролю, реєстрів цифрових модулів в КІС, адрес мікрокоманд, що передують моменту помилки тощо). Місце виникнення помилки визначається за зареєстрованим станом шляхом простежування траси помилки від місця її виявлення до місця її виникнення. Діагностування виконується за допомогою програмних засобів мікропроцесорами самої КІС (сервісним процесором), якщо локалізується збій, або зовнішнім комп'ютером, – якщо діагностується відмова.

Для цифрових систем пілотажно-навігаційних комплексів необхідно виявляти помилки з максимальною часовою і роздільною здатністю, тобто максимально близько від місця її виникнення і з мінімальною затримкою за часом. На рис. 5.8 показано типовий процес виявлення помилки. Інтервал часу між моментами появи і виявлення помилки називається періодом виявлення помилки. Тривалість цього періоду має визначальний вплив на ймовірність і ступінь спотворення інформації в системі.

Системи, які використовують цей метод діагностування, називають також системами прогнозування відмов, тому що відмовам інтегральних мікросхем звичайно передуює погіршення їхніх характеристик. Подібний (проміжний між справним і несправним) стан інтегральної мікросхеми виявляється у збільшенні кількості збоїв.

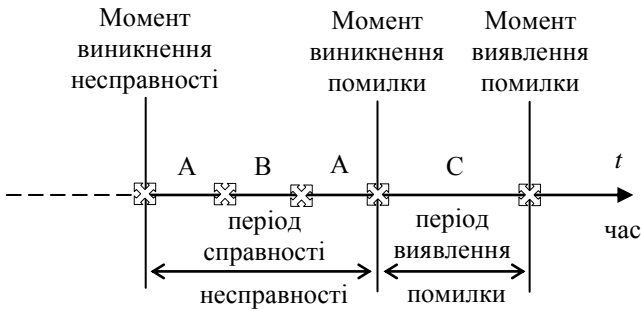


Рис. 5.8. Процес виявлення помилки (період А: в системі існує активна несправність; період В: несправність стала пасивною; період С: в системі є помилка)

Погіршення характеристик переходить у відмову лише через певний час. Локалізація таких схем дозволяє запобігти їхнім відмовам шляхом заміни ТЕЗС під час профілактичних регламентних робіт.

Для діагностування за реєстрацією стану необхідно, щоб система контролю КІС забезпечувала:

- безперервність контролю;
- блокування поширення помилок;
- розміщення точок контролю у вузлових точках системи;
- реєстрацію стану КІС у момент появи помилки у спеціальному буфер-реєстрації;
- зберігання передісторії мікропрограми у вигляді адрес і вмісту мікрокоманд, виконаних після виявлення помилки і до моменту реєстрації;
- однозначна відповідність між мікрокомандою, на який була виявлена помилка, і тактом зупинки КІС для її реєстрації;
- перехід на резервні ЦМ для відновлення КІС основного каналу після збою шляхом повторення команд.

При виконанні цих вимог помилка, виявлена схемами контролю, залишає слід, який починається в місці виникнення помилки і закінчується в місці її виявлення. Цей слід вияв-

ляється у вигляді невідповідності контрольних та інформаційних біт і одиничного стану тригерів помилок.

Аналіз стану КІС, зареєстрованого під час виявлення помилки, дозволяє виявити схеми, які могли спричинити помилку. У тому випадку, коли помилка могла поширитися різними шляхами, до аналізу залучається також і код мікрооперації, яка виконувалася в момент виявлення помилки. Це дозволяє визначити шлях поширення помилки і місце її виникнення. Такий основний зміст методу діагностування за реєстрацією стану.

ЛІТЕРАТУРА

1. АБРАМОВИЧ О.О. Розробка методики розрахунку надійності відновлюємої апаратури на основі *DN*-розподілення: Дипломна робота. – Київ: НАУ 2001 – 100с.

2. ВИРОБИ електронної техніки. Методи розрахунку надійності. ДСТУ 2992-95.– К.: Держстандарт України, 1995.–78 с.

3. ГРИБОВ В.М., КОЗАРУК В.В. Основы теории надежности авиационной техники. Конспект лекций.– К.: КМУГА, 1994.–268с.

4. ДАЛЕЦКИЙ С.В. Проектирование систем технического обслуживания и ремонта ВС ГА. – М.: МАИ, 2001.

5. КАГАН Б.М., МКРТУМЯН И.Б. Основы эксплуатации ЭВМ. Учебное пособие. – М.: Энергоатомиздат, 1988.– 430с.

6. КОЗАРУК В.В. Навигационно-пилотажный комплекс самолёта Ту-154 и его эксплуатация. Учебное пособие. – М.: Машиностроение, 1993.– 312с.

7. НАДІЙНІСТЬ та експлуатація систем та комплексів авіаційного обладнання. Терміни та визначення. ДСТУ 3589-97. – К.: Держстандарт України, 1997.–33 с.

8. НАДІЙНІСТЬ техніки. Моделі відмов. Основні положення. ДСТУ 3433-96. – К.: Держстандарту України, 1996.– 42 с.

9. НАДІЙНІСТЬ техніки. Терміни та визначення: ДСТУ 2860-94 – Київ: Держстандарт України, 1995. – 90 с.

10. СТРЕЛЬНИКОВ В.П. Оценка и прогнозирование надёжности электронных элементов и систем. Монография. – К.: Логос, 2002.

11. ТЕХНИЧЕСКАЯ эксплуатация авиационного оборудования. Учебник / Под ред. В.Г. Воробьёва.– М.: Транспорт, 1990. – 296 с.

12. ТЕХНІЧНЕ діагностування та контроль технічного стану. Терміни та визначення. ДСТУ 2389-94.– К.: Держстандарт України, 1994. – 24с.