

1.2. Побудування та аналіз діагностичних моделей електричних систем

1.2.1. Побудування та аналіз функціональної діагностичної моделі

Діагностична модель (ДМ) – абстрактна форма надання об'єкта діагностування, яка дозволяє визначити діагностичні тести та побудувати алгоритми діагностування на підставі ознаки розрізнюваності її станів. Діагностична модель може надаватися в графічному, табличному або аналітичному вигляді.

Для електричних систем та пристроїв застосовуються переважно функціональні, дискретні та цифрові діагностичні моделі.

Функціональна діагностична модель – модель блочної структури, в якій кожний блок виконує певну функцію перетворення вхідного сигналу X у вихідний Y . Припускається, що кожний блок моделі може знаходитися у двох станах – дієздатному або несправному. Функціональна діагностична модель дозволяє локалізувати несправність до рівня функціонального блока.

Щоб задати функціональну ДМ системи, що розглядається, необхідно виконати такі операції:

1. Перелічити всі можливі для даної системи комбінації елементів, які відмовили водночас (можливі стани).

2. Вказати, які комбінації допустимих впливів X_i необхідно додати до кожного блока Q_i для одержання допустимої реакції Y_i . Під допустимою реакцією розуміють значення вихідного параметра блока, що знаходиться в дієздатному стані.

3. Задати схему об'єкта із зазначенням блоків і зв'язків між ними.

При побудові функціональної ДМ необхідно дотримуватися такої вимоги: функціональний блок може мати декілька входів (вхідних параметрів – аргументів функції), але тільки один вихід (вихідний параметр – функцію). На рис. 1.2.1, а, б показана допустима інтерпретація блоків технічної системи.

Прикладом об'єкта, що інтерпретується простим функціональним блоком, може бути формувальне коло, двохобмотковий трансформатор, коло корекції, згладжуючий фільтр і т. ін.

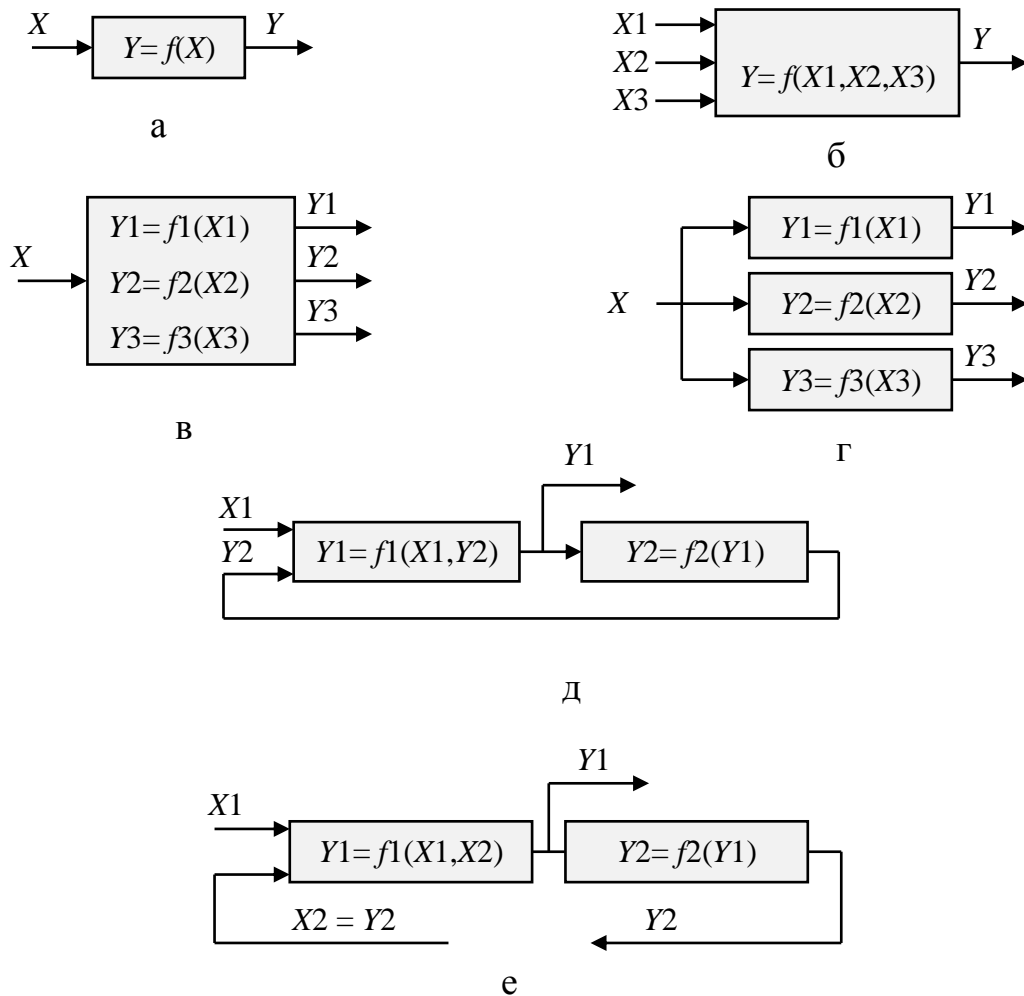


Рис. 1.2.1. Фрагменти функціональної схеми та діагностичної моделі:
а – простий блок функціональної схеми (моделі);
б – багато параметричний блок схеми (моделі);
в – багатфункціональний блок схеми;
г – багатфункціональний блок моделі;
д – функціональна схема із зворотним зв'язком;
е – позбавлення зворотного зв'язку у функціональній моделі

За допомогою багатопараметричного блока можна представити більш складні пристрої, такі як логічна схема, модулятор, компаратор і т.ін. Наприклад, для отримання вихідного сигналу останнього необхідно задати три допустимі впливи (стимули): подати напругу живлення, напругу опорного рівня, напругу керуючого сигналу.

Багатфункціональні блоки (рис. 1.2.1, в) в ДМ надаються багатопараметричними або простими функціональними блоками (рис. 1.2.1, г), згідно з вимогами, що пред'являються до ДМ. Прикладом

багатофункціонального блока може бути джерело живлення з різноманітними вихідними напругами, подільник напруги і т. ін.

При моделюванні технічних систем функціональна ДМ може мати окремі структури, для яких математична обробка моделі значно спрощується. До таких моделей відносять моделі з послідовною структурою, моделі, в яких допускається відмова будь-якого, але тільки одного блока, моделі без зворотних зв'язків. Якщо в системі зі зворотним зв'язком допустимо реалізувати обрив кола зворотного зв'язку та імітацію її сигналу, то модель може бути представлена структурою без зворотного зв'язку (рис. 1.2.1, д, е). Побудована ДМ може бути представлена в універсальній абстрактній формі у вигляді таблиці несправностей.

Таблиця несправностей (ТН) – таблиця, в якій у рядках записані технічні стани з множини станів S_i , у стовпцях – елементарні перевірки із множини перевірок Π_j .

Таблиця несправностей може бути отримана за допомогою аналітичних розрахунків діагностичної моделі або експериментально, шляхом моделювання відповідних несправних станів об'єкта діагностування та контролю його діагностичних параметрів.

Приклад функціональної ДМ наведено на рис. 1.2.2. Використовуючи функції алгебри логіки, для наведеної моделі можна скласти вираз для вихідних функцій кожного блока.

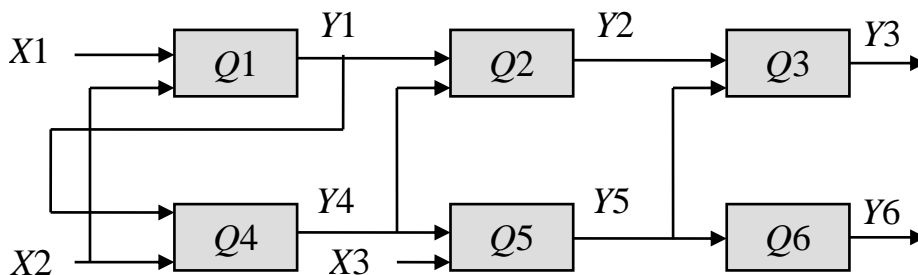


Рис. 1.2.2. Функціональна діагностична модель

$Y1 = X1 \cdot X2 \cdot Q1$ (значення функції $Y1$ – допустиме «1», якщо одночасно допустимі «1» значення вхідних сигналів $X1$, $X2$ та блок $Q1$ справний «1»). Аналогічно визначають функції інших блоків

$$Y_2 = Y_1 \cdot Y_4 \cdot Q_2, \quad Y_3 = Y_2 \cdot Y_5 \cdot Q_3, \quad Y_4 = X_2 \cdot Y_1 \cdot Q_4, \\ Y_5 = Y_4 \cdot X_3 \cdot Q_5, \quad Y_6 = Y_5 \cdot Q_6.$$

Методом підстановки вирази для функцій зводяться до вигляду $Y_i = X_i Q_i$

$$Y_1 = X_1 \cdot X_2 \cdot Q_1, \quad Y_2 = X_1 \cdot X_2 \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_4, \\ Y_3 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 \cdot Q_4 \cdot Q_5, \\ Y_4 = X_1 \cdot X_2 \cdot Q_1 \cdot Q_4, \quad Y_5 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot Q_1 \cdot Q_4 \cdot Q_5, \\ Y_6 = X_1 \cdot X_2 \cdot X_3 \cdot Q_1 \cdot Q_4 \cdot Q_5 \cdot Q_6.$$

На підставі отриманих функцій формується *матриця станів* (бінарна таблиця несправностей) (табл. 1.2.1).

Таблиця 1.2.1

Матриця станів функціональної моделі

Стани S_i	Π_j					
	П1	П2	П3	П4	П5	П6
S_0	1	1	1	1	1	1
S_1	0	0	0	0	0	0
S_2	1	0	0	1	1	1
S_3	1	1	0	1	1	1
S_4	1	0	0	0	0	0
S_5	1	1	0	1	0	0
S_6	1	1	1	1	1	0

Заповнювати таблицю можна рядками або стовпцями. Множина станів S_i в таблиці несправностей розглядається як перелік несправних блоків $Q_i = \langle 0 \rangle$, а множина перевірок Π_j – як значення функцій Y_j . Приймається, що входні параметри X_1, X_2, X_3 – мають допустиме значення «1». Стан S_0 відповідає справному стану системи (всі блоки Q_i – справні). Зміст першого стовпця можна прокоментувати так. Результат перевірки $\Pi_1(Y_1)$ має недопустиме значення «0» тільки в разі несправності блока $Q_1(S_1)$. Зміст першого рядка пояснюється так. Якщо блок $Q_1(S_1)$ несправний, то перевірки $\Pi_1 \dots \Pi_6$ ($Y_1 \dots Y_6$) дадуть негативний результат.

1.2.2. Побудування та аналіз дискретної діагностичної моделі

Поняття дискретна модель можна розуміти як модель пристрою, який виготовлений на дискретних елементах, або як модель системи, сигнали якої представлені дискретними рівнями. В даному посібнику розглядається дискретна модель в першому розумінні.

Дискретна діагностична модель – модель, яка представлена електричною схемою гальванічних вмикачів дискретних елементів з елементарними функціями перетворення (опір, ємність, індуктивність, вентиль та джерело ЕРС), в якій неможливо об'єднати групи елементів у функціональні блоки (модель з неявно вираженою блочною структурою). Передбачається, що кожний елемент моделі може знаходитися більше ніж у двох розрізнявальних станах (справний, в обриві, замкнутий, з параметрами, що змінилися). Дискретна ДМ дозволяє локалізувати несправність до рівня дискретного елемента та причини його несправності. Для того щоб задати дискретну ДМ схеми, що розглядається, необхідно виконати такі дії:

1. Задати параметр, який використовується як діагностичний.
2. Створити схему моделі, заміщуючи реальні дискретні елементи їх діагностичними еквівалентами (схеми заміщення).
3. Перерахувати можливі несправності елементів схеми або їх діагностичних еквівалентів.
4. Вказати номінальні значення параметрів елементів схеми або їх діагностичних еквівалентів.
5. Вказати точки контролю ДП у структурі моделі.

На рис. 1.2.3 показана вихідна схема електрична принципова (рис. 1.2.3, а) та її дискретна модель (рис. 1.2.3, б) при використанні в якості ДП опору постійному струму (вимірювання за допомогою омметра). Згідно з наведеними на схемі заміщення позначеннями: вентилі $p-n$ – відображають фізичну сутність $p-n$ переходів напівпровідникових пристроїв; r_b , r_k , r_e – опори зон транзистора VT ; r_d , U_P – значення опору та напруги стабілітрона VD ; $E_{ок}$, $E_{ое}$ – потенціальні бар'єри колекторного та емітерного переходів транзистора.

В доступних вузлах монтажу схеми проставлені номери контрольних точок вимірювання ДП. Якщо в якості ДП вибрати опір змінному струму, то модель необхідно доповнити значенням ємнос-

ті конденсатора $C1$, а при значних частотах вимірювального сигналу – ємностями $p-n$ переходів C_{p-n} .

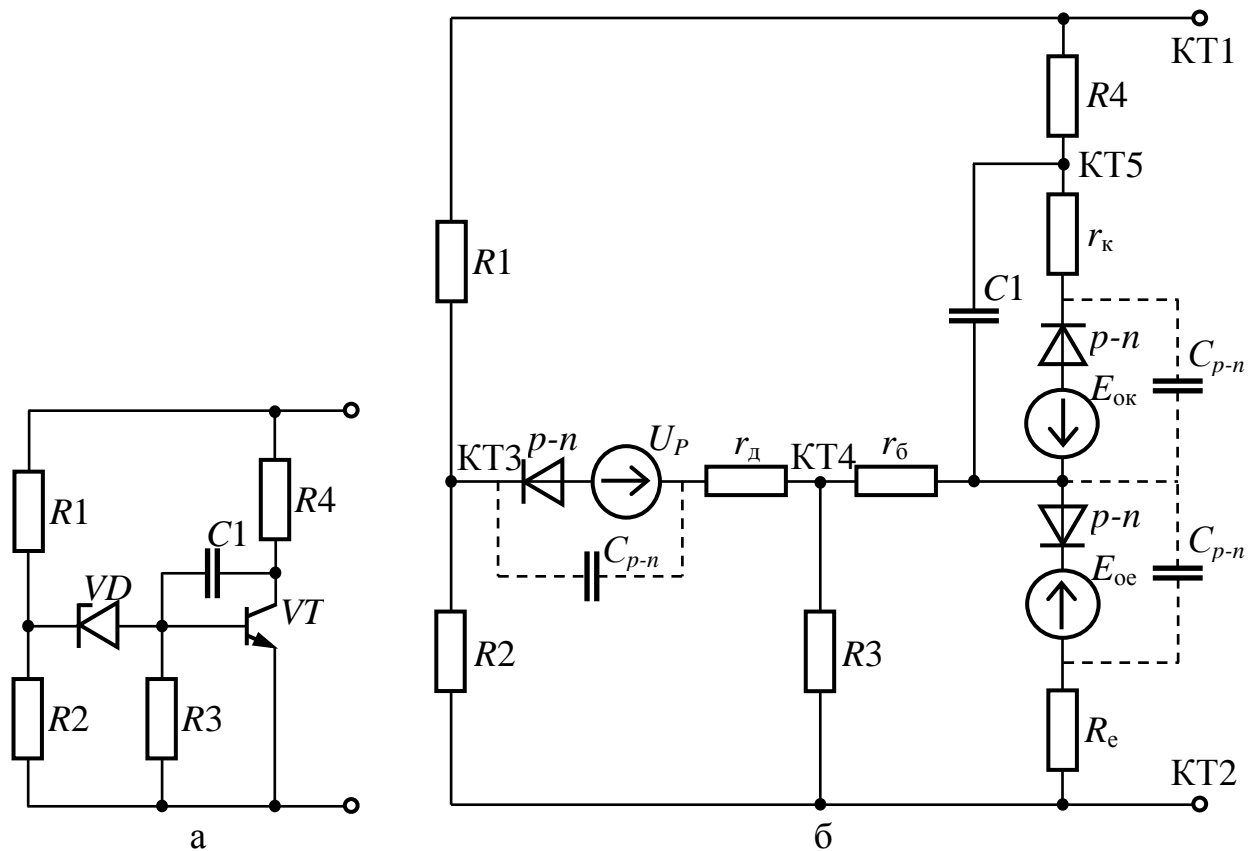


Рис. 1.2.3. Вимірювальна частина регулятора напруги:
а – схема електрична принципова;
б – дискретна діагностична модель

Якщо ж в якості ДП вибрати напругу, що вимірюється відносно загальної точки при ввімкнутій схемі, то її діагностична модель значно спроститься.

Таким чином, можна зазначити, що тип дискретної ДМ однієї й тієї ж схеми (пристрою) в багатьох випадках визначається типом параметра, що вибирається як діагностичний.

Проаналізуємо дискретну модель на прикладі схеми, наведеної на рис.1.2.4. За діагностичний параметр виберемо опір постійному струму. Можливі стани схеми: $S0$ – схема справна; $S1$ – пробитий діод VD ; $S2$ – діод VD в обриві; $S3$ – пробитий конденсатор C ; $S4$ – пробитий резистор $R1$; $S5$ – резистор $R1$ в обриві; $S6$ – пробитий резистор $R2$; $S7$ – резистор $R2$ в обриві; $S8$ – резистор $R1$ змінив значення опору; $S9$ – резистор $R2$ змінив значення опору.

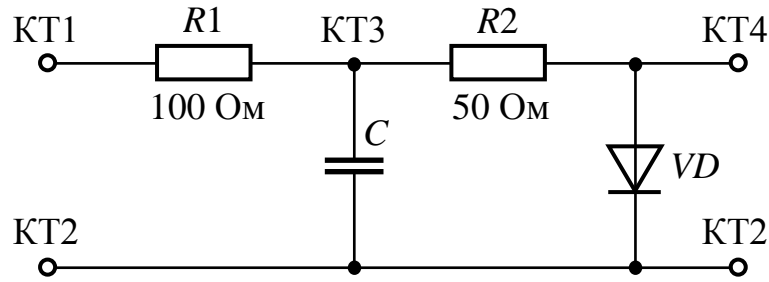


Рис. 1.2.4. Дискретна діагностична модель

Розглянемо тільки перші шість станів, як найбільш імовірні. Для вибраних станів складаємо таблицю опорів (табл. 1.2.2). Опори, що вимірюються між контрольними точками схеми, відповідають перевіркам R_{ij} , причому в точці i приймаємо додатне підключення омметра «+», а в точці j – від’ємне «-».

Таблиця 1.2.2

Опори дискретної моделі

Стани S_i	R_{ij}											
	R_{12}	R_{21}	R_{13}	R_{31}	R_{14}	R_{41}	R_{23}	R_{32}	R_{24}	R_{42}	R_{34}	R_{43}
S_0	150	∞	100	100	150	150	∞	50	∞	0	50	50
S_1	150	150	100	100	150	150	50	50	0	0	50	50
S_2	∞	∞	100	100	150	150	∞	∞	∞	∞	50	50
S_3	100	100	100	100	150	150	0	0	50	0	50	50
S_4	50	∞	0	0	50	50	∞	50	∞	0	50	50
S_5	∞	∞	∞	∞	∞	∞	∞	50	∞	0	50	50

На підставі табл. 1.2.2 складаємо бінарну таблицю несправностей (матрицю станів). Матриця станів (МС) заповнюється таким чином (табл. 1.2.3). В рядку, що відповідає справному стану S_0 про- ставляють «1» як задовільний результат перевірки. Далі проводять порівняння результатів кожного вимірювання (перевірки) кожного стану S_i з результатами вимірювань у стані S_0 . Якщо порівняльні результати співпадають, то цю позицію таблиці заповнюють «1», якщо ні – «0».

Матриця станів ДМ

Стани S_i	R_{ij}											
	R_{12}	R_{21}	R_{13}	R_{31}	R_{14}	R_{41}	R_{23}	R_{32}	R_{24}	R_{42}	R_{34}	R_{43}
S_0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S_1	1	0	1	1	1	1	0	1	0	1	1	1
S_2	0	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
S_3	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1
S_4	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1
S_5	0	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1

В отриманій матриці є два однакових рядки. Це означає, що стани S_4 та S_5 не розрізняються на множині перевірок R_{ij} і локалізувати пробій або обрив резистора R_1 за допомогою таблиці несправностей неможливо. Стани, які не розрізняються в матриці станів (S_4 , S_5), можна розрізнити за результатами вимірювання ДП в таблиці опорів (див. табл. 1.2.2). Якщо стани не розрізняються за значеннями ДП (опорів), то необхідно збільшити кількість перевірок (вимірювань) шляхом задавання додаткових контрольних точок або діагностичних розривів кіл.

1.2.3. Вирішення нерозрізнюваності станів в таблицях несправностей

Найбільш універсальним способом вирішення нерозрізнюваності є метод, що використовує квантування ДП за допустимими значеннями. Згідно з цим методом перевірки значень ДП призначають за двостороннім обмеженням. Фактично це свідчить про те, що значення ДП можуть знаходитись у діапазоні, який визначається розкидом параметрів елементів схеми або точністю вимірювального (діагностичного) приладу.

Проведемо апробацію методу на прикладі таблиці опорів (табл. 1.2.2). Для цього задають межі допустимих значень опорів ($\pm 10\%$) та призначають перевірки за двостороннім обмеженням (табл. 1.2.4).

Таблиця 1.2.4

Допустимі значення опорів схеми у справному стані

	R_{ij}											
	R_{12}	R_{21}	R_{13}	R_{31}	R_{14}	R_{41}	R_{23}	R_{32}	R_{24}	R_{42}	R_{34}	R_{43}
$R_{ном}$	150	∞	100	100	150	150	∞	50	∞	0	50	50
R_{max}	165	∞	110	110	165	165	∞	55	∞	5	55	55
R_{min}	135	165	90	90	135	135	165	45	165	0	45	45

$$\begin{array}{lll}
 \text{П1} - R_{12} > 135; & \text{П6} - R_{14} > 135; & \text{П11} - R_{24} > 165; \\
 \text{П2} - R_{12} < 165; & \text{П7} - R_{14} < 165; & \text{П12} - R_{42} < 5; \\
 \text{П3} - R_{21} > 165; & \text{П8} - R_{23} > 165; & \text{П13} - R_{34} > 45; \\
 \text{П4} - R_{13} > 90; & \text{П9} - R_{32} > 45; & \text{П14} - R_{34} < 55. \\
 \text{П5} - R_{13} < 110; & \text{П10} - R_{32} < 55; &
 \end{array}$$

Мінімальні значення опорів при вимірюванні обірваного кола ($R_{21} = \infty$) призначають за максимально допустимим значенням R_{ij} . Максимальні значення опору при вимірюванні замкнутого кола ($R_{42} = 0$) призначають за мінімальним допустимим значенням R_{ij} або виходячи з допустимої похибки омметра.

З переліку призначених перевірок вилучають зустрічні перевірки (R_{31} , R_{41} , R_{43}), що не мають на маршруті вимірювання вентиля VD . Далі складають таблицю опорів та перетворюють її в матрицю станів за прийнятою методикою (табл. 1.2.5).

Таблиця 1.2.5

Вихідна матриця станів

Стани S_i	П _j													
	П1	П2	П3	П4	П5	П6	П7	П8	П9	П10	П11	П12	П13	П14
S_0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1
S_1	1	1	0	1	1	1	1	0	1	1	0	1	1	1
S_2	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	1	0	1	1
S_3	0	1	0	1	1	1	1	0	0	1	0	1	1	1
S_4	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1
S_5	1	0	1	1	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1

В отриманій таким чином матриці станів всі задані стани схеми – розрізняються (немає однакових рядків). Матриця станів може бути скорочена без втрати діагностичних властивостей за такими правилами:

1. Якщо в МС є перевірки (стовпці), що мають тільки «0» або тільки «1», то їх можна видалити.

2. Якщо в МС є однакові стовпці, то їх можна звести в один.

Після остаточного скорочення кількість перевірок в таблиці несправностей значно зменшиться (табл. 1.2.6).

Таблиця 1.2.6

Скорочена матриця станів

Стани S_i	Π_j						
	Π_1	Π_2	Π_3	Π_4	Π_5	Π_9	Π_{10}
S_0	1	1	1	1	1	1	1
S_1	1	1	0	1	1	1	1
S_2	1	0	1	1	1	1	0
S_3	0	1	0	1	1	0	1
S_4	0	1	1	0	1	1	1
S_5	1	0	1	1	0	1	1

Позбутися нерозрізняваності станів в таблиці несправностей при розрізняванні вимірюваннях в таблиці опорів можна за допомогою методу негативної перевірки.

Такий метод полягає в наступному. Для двох нерозрізняваних станів в таблиці несправностей обирають перевірку з негативним результатом «0» для обох станів, які до того ж мають різні значення опорів (діагностичного параметра). Проводять заміну обраної перевірки на перевірку відповідності значень діагностичного параметра одному з негативних результатів несправного стану системи. В результаті в одному з несправних станів для негативної перевірки в таблиці отримують позитивний результат – «1», а в другому – негативний «0». Таким чином в таблиці несправностей досягають розрізняваності двох нерозрізняваних станів. При використанні методу негативної перевірки необхідно слідкувати за тим, щоб сформована негативна перевірка не призвела до виникнення в таблиці несправностей нових нерозрізняваних станів.

Метод негативної перевірки випробуємо на вихідній таблиці опорів (табл. 1.2.2), для якої сформована таблиця несправностей (табл. 1.2.3). Бінарна таблиця несправностей має нерозрізнювані стани S_4, S_5 . Згідно з таблицею опорів для станів S_4, S_5 розрізняваними є перевірки з негативними результатами $R_{12}, R_{13}, R_{31}, R_{14}, R_{41}$. В якості «негативної» призначаємо перевірку $R_{12} = 50$. Тоді у вихідній таблиці несправностей змінюються бінарні атрибути цієї перевірки. Для стану S_4 результат «негативної» перевірки буде позитивним – «1», а для стану S_5 – негативним «0». Для наочності аналізу, таблицю несправностей можна скоротити за прийнятими правилами. Після скорочення таблиці (табл. 1.2.7) видно, що стани S_4, S_5 стали розрізняваними на перевірці R_{12} та формування негативної перевірки не привело до виникнення нових нерозрізнюваних станів.

Таблиця 1.2.7

Матриця станів отримана за методом негативної перевірки

Стани S_i	R_{ij}				
	$R_{12}=50$	$R_{21}=\infty$	$R_{13}=100$	$R_{32}=50$	$R_{42}=0$
S_0	0	1	1	1	1
S_1	0	0	1	1	1
S_2	0	1	1	0	0
S_3	0	0	1	0	1
S_4	1	1	0	1	1
S_5	0	1	0	1	1

1.2.4. Особливості побудування цифрових діагностичних моделей

Цифрова діагностична модель – модель, що представлена у вигляді електричної схеми, яка побудована на логічних елементах. Як стимули та відгуки такої моделі є сигнали з двома дискретними рівнями – логічний нуль «0» та логічна одиниця «1».

Взагалі цифровий (логічний) пристрій можна аналізувати як функціональну модель, якщо є можливість знімати відгуки з виходів її функціональних блоків (окремих логічних елементів). Для цифрової ДМ вважають, що всередині її структури немає контрольних

точок, а вхідні та вихідні сигнали можуть бути подані або зняті через цілком визначені виводи.

Щоб задати цифрову діагностичну модель логічного пристрою необхідно виконати такі дії:

1. Скласти схему моделі, структуровану до рівня логічних елементів з позначенням зв'язків між ними.
2. Пронумерувати позиції логічних елементів, що входять до складу пристрою в напрямку руху інформації.
3. Визначити вхідні та вихідні виводи пристрою на ДМ.
4. Перерахувати можливі несправності у вигляді їх прояву.

Діагностування логічних пристроїв, що представлені цифровою моделлю, використовують, наприклад, на етапі відлагодження виробництва інтегральних мікросхем, де підключення діагностичної апаратури до точок у середині структури напівпровідникового кристалу неможливо. Цифрова ДМ також може бути використана і при діагностуванні пристроїв, що складаються з окремих конструктивно закінчених елементів (мікросхем). На рис. 1.2.5 представлено цифровий пристрій, що виконує функції мультиплектора.

На входи $D0 - D3$ ($X1 - X4$) надходить інформація у вигляді двійкового чотирирозрядного слова, а на адресні входи $A1, A2$ ($X5, X6$) – двохрозрядний двійковий код, що визначає адресу входу, з якого інформація передається на вихід мультиплектора (рис. 1.2.5, в). Ставиться завдання – визначити несправний логічний елемент моделі, задаючи на входах X_i цифрові тести у вигляді шестирозрядного слова шляхом реєстрації одного двійкового сигналу (реакції) $Y7$ на виході Q .

Щоб визначити необхідні діагностичні тести, цифрову ДМ структурного типу (рис. 1.2.5, б) інтерпретують до вигляду аналітичного виразу, використовуючи алгебру логіки. Для розглянутого мультиплектора функція логічних перетворень має вигляд

$$\begin{aligned} Y7 &= Y3 + Y4 + Y5 + Y6 = \\ &= X1 \cdot \overline{X5} \cdot \overline{X6} + X2 \cdot \overline{X5} \cdot X6 + X3 \cdot \overline{X6} \cdot X5 + X4 \cdot X5 \cdot X6 \end{aligned} \quad (1.1)$$

Доповнюючи цю формулу позиціями функціональної прив'язки, отримаємо цифрову модель, що представлена еквівалентною нормальною формою (1.2).

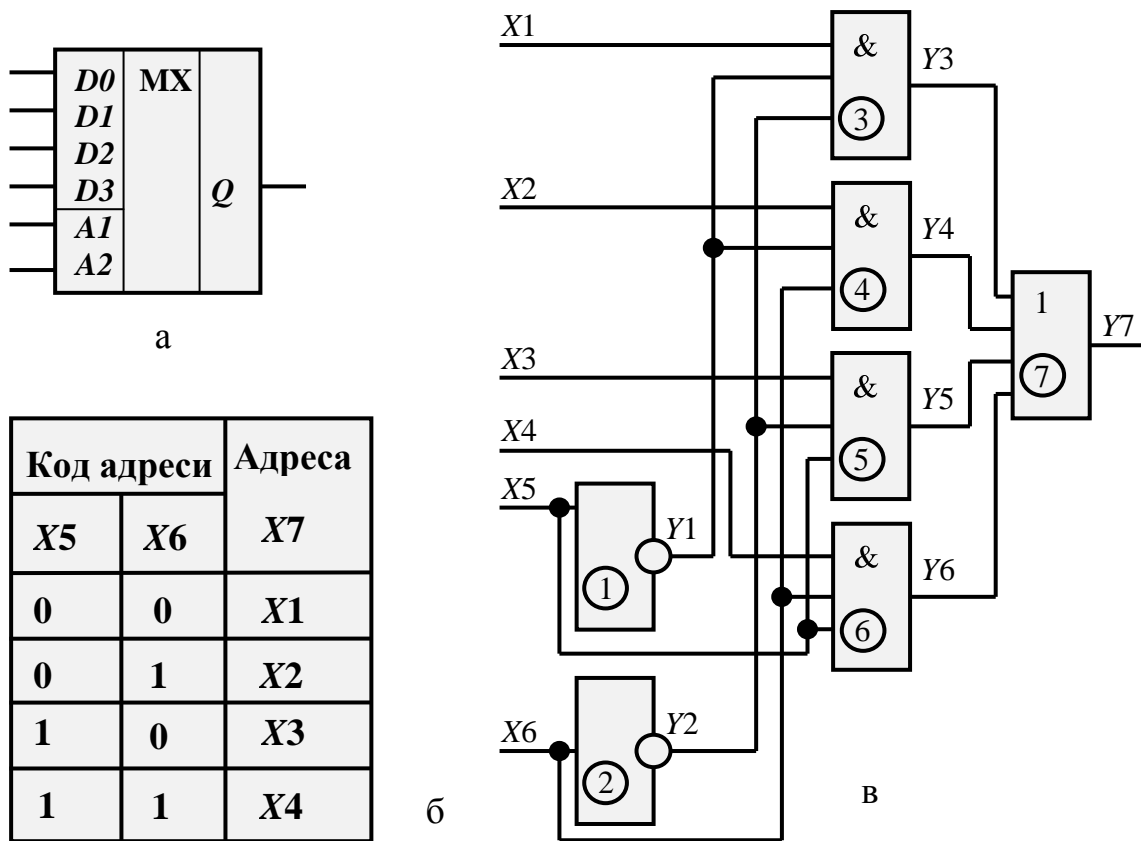


Рис. 1.2.5. Мультиплексор: а – умовне позначення мікросхеми; б – таблиця адресів; в – цифрова діагностична модель

Еквівалентна нормальна форма (ЕНФ) цифрової ДМ – аналітичний вираз у вигляді логічної суми, складові якої представлені логічними добутками вхідних сигналів, які доповнені індексами функціональної прив'язки.

Функціональна прив'язка вхідного параметра – це число, яке визначає послідовність позицій функціональних елементів моделі у порядку руху інформації (до отримання сигналу). Згідно з наведених визначень ЕНФ для моделі мультиплексора набуває вигляду

$$\begin{aligned}
 Y7 = & X1_{3,7} \cdot \overline{X5}_{1,3,7} \cdot \overline{X6}_{2,3,7} + X2_{4,7} \cdot \overline{X5}_{1,4,7} \cdot X6_{4,7} + \\
 & + X3_{5,7} \cdot \overline{X6}_{2,5,7} \cdot X5_{5,7} + X4_{6,7} \cdot X5_{6,7} \cdot X6_{6,7}
 \end{aligned}
 \tag{1.2}$$

Для систем, що складаються з окремих цифрових пристроїв (мікросхем), ДМ, що представлена у вигляді ЕНФ, будують аналогічно.