4. Структурно-логічний аналіз технічних систем

4.1. Основні визначення.

Кінцевою метою розрахунку надійності технічних пристроїв є оптимізація конструктивних рішень і параметрів, режимів експлуатації, організація технічного обслуговування і ремонтів. Тому вже на ранніх стадіях проектування важливо оцінити надійність об'єкта, виявити найбільш ненадійні вузли і деталі, визначити найбільш ефективні міри підвищення показників надійності. Рішення цих задач можливо після попереднього структурно-логічного аналізу системи.

Більшість технічних об'єктів, у тому числі пристроїв автоматизації, є складними системами, що складаються з окремих вузлів, деталей, пристроїв контролю, управління і т. д. Технічна система (ТС) – це сукупність технічних пристроїв (елементів), призначених для виконання визначеної функції або функцій. Відповідно елемент – складова частина системи.

Розчленовування ТС на елементи (аналіз складної системи) досить умовно і залежить від постановки задачі розрахунку надійності. Наприклад, під час аналізу працездатності системи управління технологічним процесос її елементами можуть вважатися датчики, реле, регулятори, підсилювачі, перетворювачі сигналу тощо. У свою чергу реле також можуть вважатися технічними системами і під час розрахунку їх надійності повинні бути розділені на елементи.

Визначаючи структуру ТС, в першу чергу необхідно оцінити вплив кожного елемента та його працездатності на працездатність системи в цілому. Із цієї позиції доцільно розділити всі елементи на чотири групи:

1. Елементи, відмова яких практично не впливає на працездатність системи (наприклад, деформація корпусу, знос пофарбованності поверхні і т.п.).

2. Елементи, працездатність яких за час експлуатації практично не змінюється та їхня імовірність безвідмовної роботи близька одиниці (корпусні деталі, елементи з великим запасом міцності).

3. Елементи, для яких можливо виконувати ремонт або відновлення ресурсу у разі роботи пристрою або під час планового технічного обслуговування.

4. Елементи, відмова яких сама по собі, або в сполученні з відмовами інших елементів приводить до відмови системи.

Для розрахунків параметрів надійності зручно використовувати структурно-логічні схеми надійності ТС, що графічно відображають взаємозв'язок елементів та їх вплив на працездатність системи в цілому. Структурно-логічна схема являє собою сукупність раніше виділених елементів, з'єднаних один з одним послідовно, паралельно або змішано. Критерієм для визначення виду з'єднання елементів під час побудови схеми є вплив їхньої відмови на працездатність ТС.

Послідовним (з погляду надійності) вважається з'єднання, при якому відмова будь-якого елементу призводить до відмови всієї системи (рис. 4.1).

Паралельним (з погляду надійності) вважається з'єднання, при якому відмова будь-якого елемента не спричиняє відмову системи, поки не відмовлять усі з'єднані елементи (рис. 4.2).

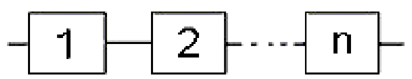


Рис. 4.1. Послідовне з’єднання елементів

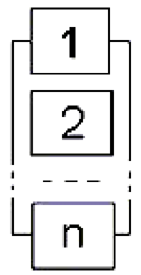


Рис. 4.2. Паралельне з’єднання елементів

Тут проглядається аналогія з ланцюгом, складеним з провідникових елементів (справний елемент пропускає струм, а той, що відмовив, – не пропускає): працездатному станові ТС відповідає можливість протікання струму від входу до виходу ланцюга.

Прикладом послідовного з'єднання елементів структурно-логічної схеми може бути систему автоматичного підтримання температури в печі. В ній відмова кожного елемента (датчик температури, контролер (ПЛК), виконавчий механізм) призводить до відмови системи управління в цілому. Відмовив наприклад датчику ("залип" на одному значенні або обірвався) призводить до отримання контролером хибних даних і прийняття неправильних рішень (або не приймає жодного) – система відмовила.

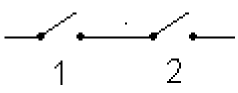
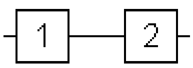
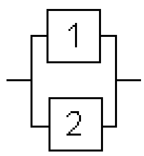
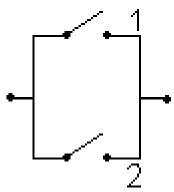
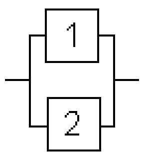
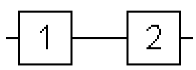
Прикладом паралельного з’єднання елементів (системи з резервуванням) є, наприклад, з’єднання джерел в системах безперебійного живлення.

Однак, не завжди структурна схема надійності аналогічна конструктивній або електричній схемі розташування елементів. Наприклад, підшипники на валу редуктора працюють конструктивно паралельно один з одним, однак вихід з ладу кожного з них призводить до відмови системи. Зазначені елементи з погляду надійності утворюють послідовне з'єднання.

Крім того, на структуру схеми надійності може впливати і вид виникаючих відмов. Наприклад, в електричних системах для підвищення надійності в ряді випадків застосовують паралельне або послідовне з'єднання комутаційних елементів (табл. 4.1.). Відмова таких систем може відбуватися за двох умов: обриві (тобто неможливості замикання ланцюга) і замикання (тобто неможливості розриву з'єднання). У випадку відмови типу «обрив» схема надійності відповідає електричній схемі системи (при «обриві» будь-якого комутатора у разі послідовного з'єднання виникає відмова, при паралельному – усі функції управління буде виконувати справний комутатор). У випадку відмови типу «замикання» схема надійності протилежна електричній (при паралельному включенні втратиться можливість відключення струму, а в послідовному загальна відмова не відбувається).

Таблиця 4.1

Електричні і структурні схеми надійності комутаційних елементів при різних видах відмов

Електрична схема	Структурна схема надійності при відмовленні типу	
	обрив	замикання
		
		

У цілому , аналіз структурної надійності ТС, як правило, включає такі операції:

1. Аналізуються пристрої і виконувані системою та її складовими части-

нами функції, а також взаємозв'язок складових частин.

2. Формується зміст поняття «безвідмовної роботи» для даної конкретної системи.

3. Визначаються можливі відмови складових частин і системи, їх причини і можливі наслідки.

4. Оцінюється вплив відмов складових частин системи на її працездатність.

5. Система розділяється на елементи, показники надійності яких відомі.

6. Складається структурно-логічна схема надійності технічної системи, що є моделлю її безвідмовної роботи.

7. Складаються розрахункові вирази для визначення показників надійності ТС із використанням даних надійності її елементів і з урахуванням структурної схеми.

В залежності від поставленої задачі, на підставі результатів розрахунку характеристик надійності ТС формулюються висновки і приймаються рішення про необхідність зміни або доробки елементної бази, резервування окремих елементів або вузлів, профілактичного обслуговування, про номенклатуру і кількість запасних елементів для ремонту і т. д.

4.2. Розрахунки структурної надійності систем

Розрахунки показників безвідмовності технічних систем (ТС) звичайно проводяться за припущення, що вся система і будь-який її елемент можуть бути тільки в одному з двох можливих станів – працездатному і непрацездатному, а відмова елементів системи – незалежні події. Стан системи визначається станом елементів та їх сполученням. Тому, теоретично розрахунок безвідмови будь-якої ТС можливо звести до перебору всіх можливих комбінацій станів елементів, до визначення імовірності кожного з них і додавання ймовірностей працездатних станів системи.

Такий метод практично універсальний і може використовуватися при розрахунку будь-яких ТС. Однак, у разі великої кількості елементів системи n такий шлях стає нереальним через великий обсяг обчислень (наприклад, при n=10 число можливих станів системи складає 2^n = 1024; при n=20 перевищує 10^6, при n=30 – більш 10^9). Тому на практиці використовують більш ефективні та економічні методи розрахунку, не пов'язані з великим обсягом обчислень. Можливість застосування таких методів пов'язана зі структурою ТС.

4.2.1. Системи з послідовним з'єднанням елементів

Системою з послідовним з'єднанням елементів називається система, у якій відмова будь-якого елемента приводить до відмови всієї системи. Таке з'єднання елементів у техніці зустрічається найбільш часто, тому його називають основним з'єднанням.

У системі з послідовним з'єднанням для безвідмовної роботи під час деякого наробітку t необхідно і досить, щоб кожний з її n елементів працював безвідмовно. Вважаючи відмову елементів незалежною, імовірність одночасної безвідмовної роботи n елементів визначається за теоремою множення ймовірностей: імовірність спільної появи незалежних подій дорівнює добутку ймовірностей цих подій

$$P(t) = p_1(t)\,p_2(t)...p_n(t) = \prod_{i=1}^{n} p_i(t) = \prod_{i=1}^{n}(1 - q_i(t)) \tag{4.1}$$

(далі аргумент t у дужках , що показує залежність показників надійності від наробітку, опускаємо для скорочення записів формул). Відповідно імовірність відмови такої ТС

$$Q = 1 - P = 1 - \prod_{i=1}^{n} p_i = 1 - \prod_{i=1}^{n}(1 - q_i). \tag{4.2}$$

Якщо система складається з рівно надійних елементів ($p_i = p$), то

$$P = p_i^n, \quad Q = 1 - (1 - q)^n. \tag{4.3}$$

Із формул (4.1) – (4.3) очевидно, що навіть за високої надійності елементів надійність системи у разі послідовного з'єднання тим нижча, чим більше число елементів (наприклад, при $p = 0{,}95$ і $n = 10$ маємо $P = 0{,}60$, при $n = 15$ $P = 0{,}46$, а при $n = 20$ $P = 0{,}36$). Крім того, оскільки всі співмножники в правій частині виразу (3.1) не перевищують одиниці, імовірність безвідмовної роботи ТС за умови послідовного з'єднання не може бути вище імовірності безвідмовної роботи самого ненадійного з її елементів (принцип «гірше гіршого») і з малонадійних елементів не можна створити надійну ТС із послідовним з'єднанням.

Якщо всі елементи системи працюють у періоді нормальної експлуатації і має місце найпростіший потік відмов, наробіток на відмову елементів і системи підпорядковується експонентному розподілові і на підставі (4.1) можна записати

$$P = \prod_{i=1}^{n} \exp(-\lambda_i t) = \exp\left[-\left(\sum_{i=1}^{n} \lambda_i\right) t\right] = \exp(-\Lambda t), \qquad (4.4)$$

$$\text{де , } \Lambda = \lambda_1 + \lambda_2 + ... + \lambda_n = \sum_{i=1}^{n} \lambda_i = \text{const} \qquad (4.5)$$

є інтенсивність відмов системи. Таким чином, інтенсивність відмов системи у разі послідовного з'єднання елементів і найпростішого потоку відмов дорівнює сумі інтенсивностей відмов елементів. За допомогою виразів, можуть бути визначені середній і γ – відсотковий наробіток.

Із (4.4) – (4.5) випливає, що для системи з *n* рівно надійних елементів ($\lambda_i = \lambda$)

$$\Lambda = n\lambda, \qquad T_0 = \frac{T_{0i}}{n}. \qquad (4.6)$$

Таким чином, інтенсивність відмов у *n* разів більша, а середній наробіток у *n* раз менший, ніж в одного елемента.

4.2.2. Системи з паралельним з'єднанням елементів

Системою з паралельним з'єднанням елементів називається система, відмова якої відбувається тільки у випадку відмови всіх її елементів (див. рис. 4.2). Такі схеми надійності характерні для ТС, у яких елементи дублюються або резервуються, тобто паралельне з'єднання використовується як метод підвищення надійності. Однак, такі системи зустрічаються і як самостійні (наприклад, паралельне включення діодів у силових випрямляючих пристроях).

Для відмови системи з паралельним з'єднанням елементів протягом наробітку t необхідно і досить, щоб усі її елементи відмовили протягом цього наробітку. Так що відмова системи полягає в спільній відмові всіх елементів, імовірність чого (за умови допущення незалежності відмов) може бути знайдена за теоремою множення ймовірностей, як добуток імовірностей відмови елементів

$$Q = q_1 q_2 ... q_n = \prod_{i=1}^{n} q_i = \prod_{i=1}^{n} (1 - p_i). \tag{4.7}$$

Відповідно імовірність безвідмовної роботи

$$P = 1 - Q = 1 - \prod_{i=1}^{n} q_i = 1 - \prod_{i=1}^{n} (1 - p_i). \tag{4.8}$$

Для систем з рівнонадійних елементів ($p_i = p$)

$$Q = q^n \quad , \quad P = 1 - (1 - p)^n, \tag{4.9}$$

Таким чином, надійність системи з паралельним з'єднанням підвищується із збільшенням числа елементів (наприклад, при $p = 0{,}9$ і $n = 2$ $P = 0{,}99$, а при $n = 3$ $P = 0{,}999$).

Оскільки $q_i < 1$, добуток у правій частині (4.7) завжди менше кожного зі співмножників, тобто імовірність відмови системи може бути вище імовірності самого надійного її елемента («краще кращого») і навіть з порівняно ненадійних елементів можна побудувати цілком надійну систему.

При експонентному розподілі наробітку вираз (4.9) приймає вигляд

$$P = 1 - [1 - \exp(-\lambda\ t)]^n, \tag{4.10}$$

звідки, після інтегрування і перетворень середній наробіток системи визначається як

$$T_0 = \frac{1}{\lambda} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i} = T_{0i} \sum_{i=1}^{n} \frac{1}{i}\ , \tag{4.11}$$

де, $T_{0i} = 1/\lambda_i$ – середній наробіток елемента. У разі великих значень n справедлива наближена формула

$$T_0 = T_{0i}(\ln n + \frac{1}{2n} + 0,577). \quad (4.12)$$

Таким чином, середній наробіток системи з паралельним з'єднанням більше середнього наробітку її елементів (наприклад, при $n = 2$ $T_0 = 1,5T_{0i}$; при $n = 3$ $T_0 = 1,83T_{0i}$).

4.2.3. Системи типу «m із n»

Систему типу «*m і*з *n*» можна розглядати як варіант системи з паралельним з'єднанням елементів, відмова якої відбудеться, якщо з *n* елементів, з'єднаних паралельно, працездатними виявляться менше *m* елементів ($m < n$).

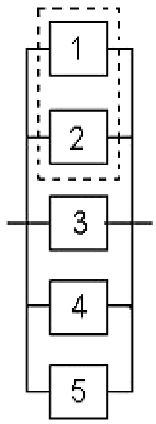


Рис. 4.3 Система «2 з 5»

На рис. 4.3 показана система «2 з 5», яка працездатна, якщо з п'яти її елементів працюють будь-які два, три, чотири або всі п'ять (на схемі пунктиром обведені функціонально необхідні два елементи, причому виділення елементів 1 і 2 зроблено умовно, у дійсності всі п'ять елементів рівнозначні).

Для розрахунку надійності систем типу «*m і*з *n*» з порівняно невеликою кількістю елементів можна скористатися методом прямого перебору. Він полягає у визначенні працездатності кожного з можливих станів системи, що визначаються різними співвідношеннями працездатних і непрацездатних станів елементів.

Усі стани системи «2 з 5» занесено в табл. 4.2 (у таблиці працездатні стани елементів і системи відзначені знаком «+», непрацездатні – знаком «–»). Для даної системи працездатність визначається лише кількістю працездатних елементів. За теоремою множення ймовірностей, імовірність будь-якого стану визначається як добуток ймовірностей станів, у яких перебувають елементи . Наприклад, у рядку 9 описаний стан системи, у якій відмовили елементи 2 і 5, а інші працездатні. При цьому умова «2 з 5» виконується, так що система в цілому працездатна. Імовірність такого стану $P_9 = p_1 q_2 p_3 p_4 q_5 = p^3 q^2$ (передбачається, що всі елементи рівнонадійні). Імовірність безвідмовної роботи системи може бути знайдена за теоремою додавання ймовірностей усіх працездатних з'єднань. Оскільки в табл. 4.2 кількість непрацездатних станів менша, ніж працездатних, простіше обчислити імовірність відмови системи. Для цього додаються імовірності непрацездатних станів (де не виконується умова «2 з 5»)

$$
\begin{aligned}
Q &= P_{32} + P_{27} + P_{28} + P_{29} + P_{30} + P_{31} = q^5 + 5pq^4 = \\
&= (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5.
\end{aligned} \tag{4.13}
$$

Тоді імовірність безвідмовної роботи системи:

$$
P = 1 - q = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \tag{4.14}
$$

Розрахунок надійності системи «*m* *і*з *n*» може проводитись комбінаторним методом, в основі якого лежить формула біноміального розподілу. Біноміальному розподілові підпорядковується дискретна випадкова величина k – число появ деякої події в серії з n дослідів, якщо в окремому досліді імовірність появи події складає p. При цьому імовірність появи події рівна k раз визначається

$$
P_k = C_n^k p^k (1-p)^{n-k}, \tag{4.15}
$$

де C_n^k – біноміальний коефіцієнт, що називається «числом сполучень по k з n»,

$$C_n^k = \frac{n!}{k!(n-k)!}. \tag{4.16}$$

Значення біноміальних коефіцієнтів приведено в додатку.

Оскільки для відмови системи «m *і*з n» досить, щоб кількість справних елементів була менше m, імовірність відмови може бути знайдена за теоремою додавання ймовірностей для $k = 0, 1, \ldots (m-1)$:

$$Q = \sum_{k=0}^{m-1} P_k = \sum_{k=0}^{m-1} C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \tag{4.17}$$

Аналогічно можна знайти імовірність безвідмовної роботи як суму (4.15) для $k = m, m+1, \ldots, n$:

$$P = \sum_{k=m}^{n} P_k = \sum_{k=m}^{n} C_n^k p^k (1-p)^{n-k}. \tag{4.18}$$

Очевидно, що $Q+P=1$, тому в розрахунках варто вибирати ту з формул (4.17), (4.18), що у даному конкретному випадку містить менше число доданків.

Для системи «2 з 5» (рис. 4.3) за формулою (4.18) одержимо:

$$\begin{aligned} P &= C_5^2 p^2 (1-p)^3 + C_5^3 p^3 (1-p)^2 + C_5^4 p^4 (1-p) + C_5^5 p^5 = 10p^2(1-p)^3 + \\ &+ 10p^3(1-p)^2 + 5p^4(1-p) + p^5 = 10p^2 - 20p^3 + 15p^4 - 4p^5. \end{aligned} \tag{4.19}$$

Імовірність відмови тієї ж системи за (4.17):

$$\begin{aligned} Q &= C_5^0 (1-p)^5 + C_5^1 p(1-p)^4 = (1-p)^5 + 5p(1-p)^4 = \\ &= 1 - 10p^2 + 20p^3 - 15p^4 + 4p^5, \end{aligned} \tag{4.20}$$

Таблиця 4.2

Таблиця станів системи «2 з 5»

№ стану	Стан елементів					Стан системи	Імовірність стану системи
	1	2	3	4	5		
1	+	+	+	+	+	+	p^5
2	+	+	+	+	–	+	$p^4q^1 = p^4(1-p)$
3	+	+	+	–	+	+	
4	+	+	–	+	+	+	
5	+	–	+	+	+	+	
6	–	+	+	+	+	+	
7	+	+	+	–	–	+	$p^3q^2 = p^3(1-p)^2$
8	+	+	–	+	–	+	
9	+	–	+	+	–	+	
10	–	+	+	+	–	+	
11	+	+	–	–	+	+	
12	+	–	+	–	+	+	
13	–	+	+	–	+	+	
14	+	–	–	+	+	+	
15	–	+	–	+	+	+	
16	–	–	+	+	+	+	
17	+	+	–	–	–	+	$p^2q^3 = p^2(1-p)^3$
18	+	–	+	–	–	+	
19	–	+	+	–	–	+	
20	+	–	–	–	+	+	
21	–	+	–	–	+	+	
22	–	–	–	+	+	+	
23	+	–	–	+	–	+	
24	–	+	–	+	–	+	
25	–	–	+	–	+	+	
26	–	–	+	+	–	+	
27	+	–	–	–	–	–	$p^1q^4 = p^1(1-p)^4$

№ стану	Стан елементів					Стан	Імовірність
	1	2	3	4	5	системи	стану системи
28	–	+	–	–	–	–	
29	–	–	+	–	–	–	
30	–	–	–	+	–	–	
31	–	–	–	–	+	–	
32	–	–	–	–	–	–	$q^5 = (1-p)^5$

що, як видно, дає той же результат для імовірності безвідмовної роботи.

У табл. 4.3 наведені формули для розрахунку імовірності безвідмовної роботи систем типу «*m і*з *n*» при $m \le n \le 5$. Очевидно, при m=1 система перетворюється в звичайну систему з паралельним з'єднанням елементів, а при *m* = *n* – з послідовним з'єднанням.

Таблиця 4.3

Формули для розрахунку імовірності безвідмовної роботи систем типу «m з n»

m	Загальне число елементів , n				
	1	2	3	4	5
1	p	$2p - p^2$	$3p - 3p^2 +$ $+p^3$	$4p - 6p^2 +$ $+4p^3 - p^4$	$5p - 10p^2 + 10p^3 -$ $-5p^4 + p^5$
2	–	p^2	$3p^2 - 2p^3$	$6p^2 - 8p^3 + 3p^4$	$10p^2 - 20p^3 +$ $+15p^4 - 4p^5$
3	–	–	p^3	$4p^3 - 3p^4$	$10p^3 - 15p^4 + 6p^5$
4	–	–	–	p^4	$5p^4 - 4p^5$
5	–	–	–	–	p^5

4.2.4. Мостові схеми

Мостова структура (рис. 4.4, а, б) не зводиться до паралельного або послідовного типу з'єднання елементів, а являє собою паралельне з'єднання послідовних ланцюгів елементів з діагональними елементами, включеними між вузлами різних паралельних відгалужень (елемент 3 на рис. 4.4, а; елементи

3 і 6 на рис. 4.4, б). Працездатність такої системи визначається не тільки кількістю елементів, що відмовили, але і їхнім положенням у структурній схемі. Наприклад, працездатність ТС, схема якої наведена на рис. 4.2, а буде втрачена при одночасній відмові елементів 1 і 2, або 4 і 5, або 2, 3 і 4 і т. д. У той же час відмова елементів 1 і 5, або 2 і 4, або 1, 3 і 4, або 2, 3 і 5 до відмови системи не призводить.

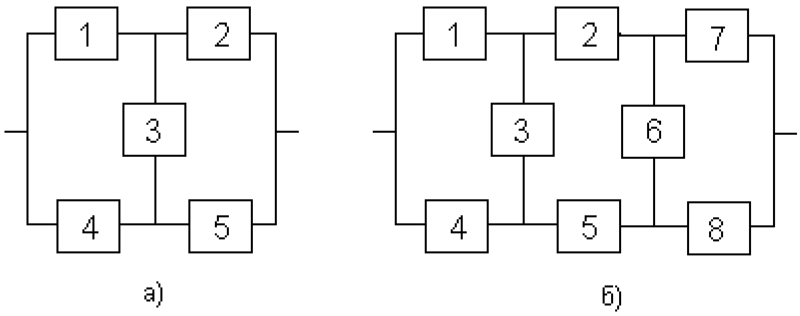


Рис. 4.4. Мостові схеми

Для розрахунку надійності мостових систем можна скористатися методом прямого перебору, як це було зроблено для систем «*m із n*», але аналізуючи працездатність кожного стану системи, необхідно враховувати не тільки кількість елементів, що відмовили, але і їх положення в схемі (табл. 4.4). Імовірність безвідмовної роботи системи визначається як сума ймовірностей усіх станів:

$$\begin{aligned} P = {} & p_1p_2p_3p_4p_5 + p_1p_2p_3p_4q_5 + p_1p_2p_3q_4p_5 + p_1p_2q_3p_4p_5 + \\ & + p_1q_2p_3p_4p_5 + q_1p_2p_3p_4p_5 + p_1p_2q_3p_4q_5 + p_1q_2p_3p_4q_5 + \\ & + q_1p_2p_3p_4q_5 + p_1p_2q_3q_4p_5 + p_1q_2p_3q_4p_5 + q_1p_2p_3q_4p_5 + \\ & + p_1q_2q_3p_4p_5 + q_1p_2q_3p_4p_5 + q_1q_2q_3p_4p_5 + p_1q_2q_3p_4q_5. \end{aligned} \tag{4.21}$$

У випадку рівнонадійних елементів

$$P = p^5 + 5p^4q + 8p^3q^2 + 2p^2q^3 = 2p^5 - 5p^4 + 2p^3 + 2p^2. \tag{4.22}$$

Метод прямого перебору ефективний тільки для малої кількості елементів n, про що говорилося на початку п.3, оскільки число станів системи складає 2^n. Наприклад, для схеми на рис. 4.4,б їхня кількість складе вже 256. Деяке спрощення досягається, якщо в таблицю станів включати тільки сполучення, що відповідають працездатному (або тільки непрацездатному) станові системи в цілому.

У ряді випадків аналізу надійності ТС можливо скористатися методом розкладання щодо особливого елемента, який засновано на відомій у математичній логіці теоремі про розкладання функції логіки за будь-яким аргументом. Відповідно до неї можна записати:

$$P = p_i P(p_i = 1) + q_i P(p_i = 0), \tag{4.23}$$

де, p_i і $q_i = 1 - p_i$ – імовірності безвідмовної роботи і відмови i-го елемента, $P(p_i = 1)$ і $P(p_i = 0)$ – імовірності працездатного стану системи за умови, що i-й елемент абсолютно надійний і що i-й елемент відмовив.

Для мостової схеми (рис. 4.4, а) як особливий елемент доцільно вибрати діагональний елемент 3. При $p_3 = 1$ мостова схема перетворюється в паралельно-послідовне з'єднання (рис.4.5, а), а при $p_3 = 0$ – у послідовно-паралельне (рис. 4.5, б).

Для перетворених схем можна записати:

$$P(p_3 = 1) = \left[1 - (1 - p_3)(1 - p_2)\right] \cdot \left[1 - (1 - p_4)(1 - p_5)\right], \tag{4.24}$$

$$P(p_3 = 0) = 1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5). \tag{4.25}$$

Тоді на підставі формули (4.27) одержимо:

$$\begin{aligned} P = p_3\left[1 - (1 - p_1)(1 - p_2)\right] \cdot \left[1 - (1 - p_4)(1 - p_5)\right] + \\ +(1 - p_3)\left[1 - (1 - p_1 p_4)(1 - p_2 p_5)\right]. \end{aligned} \tag{4.26}$$

Легко переконатися, що для рівнонадійних елементів формула (4.26) перетворюється в (4.22).

Таблиця 4.4

Таблиця станів мостової системи

Номер стану	Стан елементів					Стан системи	Імовірність стану	
	1	2	3	4	5		у загальному випадку	у разі рівнонадійних елементів
1	+	+	+	+	+	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	p^5
2	+	+	+	+	–	+	$p_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	$p^4 q = p^4(1-p)$
3	+	+	+	–	+	+	$p_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
4	+	+	–	+	+	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
5	+	–	+	+	+	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
6	–	+	+	+	+	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 p_5$	
7	+	+	+	–	–	–	$p_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	$p^3 q^2 = p^3(1-p)^2$
8	+	+	–	+	–	+	$p_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
9	+	–	+	+	–	+	$p_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
10	–	+	+	+	–	+	$q_1 p_2 p_3 p_4 q_5$	
11	+	+	–	–	+	+	$p_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
12	+	–	+	–	+	+	$p_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
13	–	+	+	–	+	+	$q_1 p_2 p_3 q_4 p_5$	
14	+	–	–	+	+	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
15	–	+	–	+	+	+	$q_1 p_2 q_3 p_4 p_5$	
16	–	–	+	+	+	–	$q_1 q_2 p_3 p_4 p_5$	
17	+	+	–	–	–	–	$p_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	$p^2 q^3 = p^2(1-p)^3$
18	+	–	+	–	–	–	$p_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
19	–	+	+	–	–	–	$q_1 p_2 p_3 q_4 q_5$	
20	+	–	–	–	+	–	$p_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	
21	–	+	–	–	+	+	$q_1 p_2 q_3 q_4 p_5$	
22	–	–	–	+	+	–	$q_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	
23	+	–	–	+	–	+	$p_1 q_2 q_3 p_4 p_5$	

Номер стану	Стан елементів					Стан системи	Імовірність стану	
	1	2	3	4	5		у загальному випадку	у разі рівнонадійних елементів
24	–	+	–	+	–	–	$q_1 p_2 q_3 p_4 q_5$	
25	–	–	+	–	+	–	$q_1 q_2 p_3 q_4 p_5$	
26	–	–	+	+	–	–	$q_1 q_2 p_3 p_4 q_5$	
27	+	–	–	–	–	–	$p_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	$p\ q^4 = p\ (1-p)^4$
28	–	+	–	–	–	–	$q_1 p_2 q_3 q_4 q_5$	
29	–	–	+	–	–	–	$q_1 q_2 p_3 q_4 q_5$	
30	–	–	–	+	–	–	$q_1 q_2 q_3 p_4 q_5$	
31	–	–	–	–	+	–	$q_1 q_2 q_3 q_4 p_5$	
32	–	–	–	–	–	–	$q_1 q_2 q_3 q_4 q_5$	$q^5 = (1-p)^5$

а) б)

Рис. 4.5. Перетворення мостової схеми за умови абсолютно надійного особливого елементу (а) та відмови особливого елемента (б)

Цим методом можна скористатися і при розкладанні щодо декількох «особливих» елементів. Наприклад, для двох елементів (i, j)

$$P = p_i p_j P(p_i = 1, p_j = 1) + p_i q_j\ P(p_i = 1, p_j = 0) + \\ + q_i p_j P(p_i = 0, p_j = 1) + q_i q_j P(p_i = 0, p_j = 0). \tag{4.27}$$

Імовірність безвідмовної роботи мостової схеми (рис. 4.2, б) у разі розкладання щодо діагональних елементів 3 і 6 за (4.27) визначиться як

$$P = p_3 p_6 P(p_3 = 1, p_6 = 1) + p_3 q_6\ P(p_3 = 1, p_6 = 0) + \\ + q_3 p_6 P(p_3 = 0, p_6 = 1) + q_3 q_6 P(p_3 = 0, p_6 = 0). \tag{4.28}$$

Імовірності $P(p_3 p_6)$ легко обчислити, виконавши попередні перетворення схем подібно рис. 4.5, а, б.

4.2.5. Комбіновані системи

Більшість реальних ТС має складну комбіновану структуру, частина елементів якої утворює послідовне з'єднання, інша частина – паралельне, окремі галузі елементів або галузі структури утворюють мостові схеми або типу «m із n».

Метод прямого перебору для таких систем практично не може бути реалізованим. Більш доцільно в цих випадках попередньо зробити декомпозицію системи, розбивши її на прості підсистеми – групи елементів, методика розрахунку надійності яких відома. Потім ці підсистеми в структурній схемі надійності заміняються квазіелементами з ймовірностями безвідмовної роботи, рівними обчисленим ймовірностям безвідмовної роботи цих підсистем. При необхідності таку процедуру можна виконати кілька разів доки квазіелементи, що залишилися, не утворять структуру, методика розрахунку надійності якої також відома.

Як приклад розглянемо комбіновану систему, зображену на рис. 4.4. Тут елементи 2 і 5, 4 і 7, 9 і 12, 11 і 14 попарно утворюють один з одним послідовні з'єднання. Замінимо ці елементи відповідно квазіелементами *A, B, C, D*, для яких розрахунок надійності елементарно виконується за формулами. Елементи 15, 16, 17 і 18 утворять паралельне з'єднання, а елементи 3, 6, 8, 10 і 13 – систему «3 з 5». Відповідні квазіелементи позначимо *E* і *F*. У результаті перетворена схема прийме вигляд, показаний на рис. 3.5, а. У ній, у свою чергу, елементи *A, B, C, D, F* утворять мостову схему, яку заміняємо квазіелементом 6. Схема, отримана після таких перетворень утворить послідовне з'єднання елементів 1, *G, E,* 19. Відзначимо, що за методом прямого перебору для вихідної системи потрібно розглянути $2^{19} = 524288$ можливих станів.

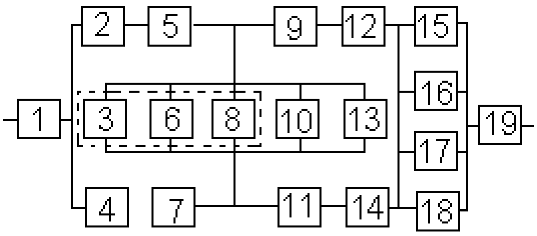


Рис. 4.6. Первинна система

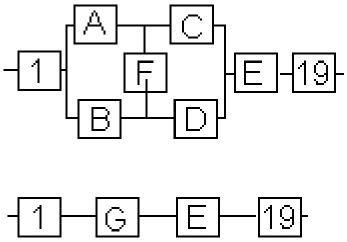
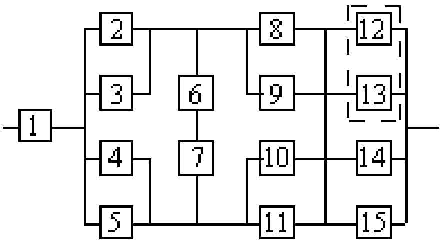


Рис. 4.7. Перетворення системи

4.3. Приклад розрахунку надійності

Структурна схема надійності показана на рис. 4.8. Значення інтенсивності відмов елементів дані в 10^{-6} 1/год.



$$\lambda_1 = 0,001$$
$$\lambda_2 = \lambda_3 = \lambda_4 = \lambda_5 = 0,1$$
$$\lambda_6 = \lambda_7 = 0,01$$
$$\lambda_8 = \lambda_9 = \lambda_{10} = \lambda_{11} = 0,2$$
$$\lambda_{12} = \lambda_{13} = \lambda_{14} = \lambda_{15} = 0,2$$
$$\gamma = 50\%$$

Рис. 4.8. Вихідна схема системи

1. У вихідній схемі елементи 2 і 3 утворюють паралельне з'єднання. Заміняємо їх квазіелементом *A*. З огляду на те, що $p_2 = p_3$, одержимо

$$p_A = 1 - q_2 q_3 = 1 - q_2^2 = 1 - (1 - p_2)^2 . \tag{4.29}$$

2. Елементи 4 і 5 також утворюють паралельне з'єднання, замінимо його елементом *B* і з огляду на те, що $p_4 = p_5 = p_2$, одержимо

$$p_B = 1 - q_4 q_5 = 1 - q_2^2 = p_A . \tag{4.30}$$

3. Елементи 6 і 7 у вихідній схемі з'єднані послідовно. Заміняємо їх елементом *C*, для якого при $p_6 = p_7$

$$p_C = p_6 p_7 = p_6^2. \tag{4.31}$$

4. Елементи 8 і 9 утворюють паралельне з'єднання. Заміняємо ці елементи елементом *D*, для якого при $p_8 = p_9$. Одержимо

$$p_D = 1 - q_8 q_9 = 1 - q_8^2 = 1 - (1 - p_8)^2. \tag{4.32}$$

5. Елементи 10 і 11 з паралельним з'єднанням заміняємо елементом *E*, причому $p_{10} = p_{11} = p_8$. Тоді

$$p_E = 1 - q_{10} q_{11} = 1 - q_{10}^2 = 1 - (1 - p_{10})^2 = p_D. \tag{4.33}$$

6. Елементи 12, 13, 14 і 15 утворюють з'єднання «2 з 4». Ці елементи замінюємо елементом *F*. Враховуючи те, що $p_{12} = p_{13} = p_{14} = p_{15}$, для визначення імовірності безвідмовної роботи елемента *F* можна скористатися комбінаторним методом :

$$\begin{aligned} p_E &= \sum_{k=2}^{4} p_k = \sum_{k=2}^{4} C_4^k p_{12}^k (1 - p_{12})^{4-k} = \\ &= \frac{4!}{2!2!} p_{12}^2 (1 - p_{12})^2 + \frac{4!}{3!1!} p_{12}^3 (1 - p_{12}) + \frac{4!}{4!0!} p_{12}^4 = \\ &= 6 p_{12}^2 (1 - p_{12})^2 + 4 p_{12}^3 (1 - p_{12}) + p^4 = 6 p_{12}^2 - 8 p_{12}^3 + 3 p_{12}^4. \end{aligned} \tag{4.34}$$

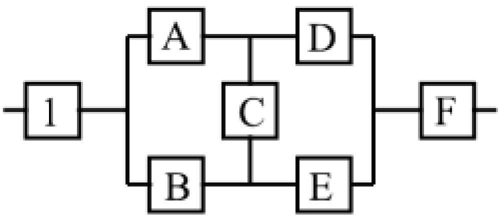


Рис. 4.9. Перетворена схема

7. Перетворена схема зображена на рис. 4.9.

8. Елементи *A, B, C, D* і *E* утворять (рис. 4.9.) мостову систему, яку можна замінити квазіелементом *G*. Для розрахунку імовірності безвідмовної роботи скористаємося методом розкладання щодо особливого елемента, за який виберемо елемент *C*. Тоді

$$p_G = p_C p_G(p_C = 1) + q_C p_C(p_C = 0), \qquad (4.35)$$

де $p_G(p_C = 1)$ – імовірність безвідмовної роботи мостової схеми при абсолютно надійному елементі C (рис. 4.8, а), $p_G(p_C = 0)$ – імовірність безвідмовної роботи мостової схеми за умови, що елемент С відмовив (рис. 4.10, б).

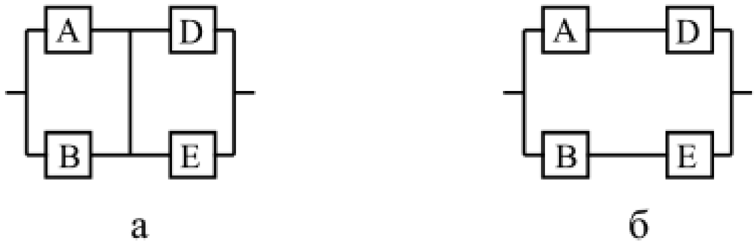


Рис. 4.10. Перетворення мостової схеми за абсолютно надійного елемента С (а) та за умови, що елемент С відмовив (б)

З огляду на те, що $p_B = p_A$, одержимо

$$\begin{aligned} p_G &= p_C\left[1-(1-p_A)(1-p_B)\right]\cdot\left[1-(1-p_D)(1-p_E)\right]+ \\ &+(1+p_C)\left[1-(1-p_A p_B)(1-p_D p_E)\right]= \\ &= p_C\left[1-(1-p_A)^2\right]\cdot\left[1-(1-p_D)^2\right]+(1-p_C)\left[1-(1-p_A^2)(1-p_D^2)\right]= \qquad (4.36) \\ &= p_C(2p_A-p_A^2)(2p_D-p_D^2)+(1-p_C)(p_A^2+p_D^2-p_A^2p_D^2)= \\ &= p_A p_C p_D(2-p_A)(2-p_D)+(1-p_C)(p_A^2+p_D^2-p_A^2p_D^2). \end{aligned}$$

9. Після перетворень схема, зображена на рис. 4.9, приймає вигляд, який зображено на рис. 4.11.

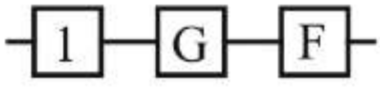


Рис.4.11. Перетворена схема

10. У перетвореній схемі (рис.4.11) елементи 1, G і F утворюють послідо-

вне з'єднання. Тоді імовірність безвідмовної роботи всієї системи

$$P = p_1 p_G p_F. \tag{4.37}$$

11. Приймаючи до уваги, що за завданням всі елементи системи працюють у періоді нормальної експлуатації, імовірність безвідмовної роботи елементів з 1 по 15 (рис. 4.8) підкоряється експонентному законові:

$$p_i = \exp(-\lambda_i t). \tag{4.38}$$

12. Результати розрахунків ймовірностей безвідмовної роботи елементів 1…15 вихідної схеми за формулою (4.38) для наробітку до $3 \cdot 10^6$ годин представлені в табл. 4.5.

13. Результати розрахунків ймовірностей безвідмовної роботи квазіелементів *A*, *B*, *C*, *D*, *E*, *F* і *G* за формулами (4.29) – (4.34) і (4.36) також представлені в табл. 4.4.

14. На рис. 4.12 представлений графік залежності імовірності безвідмовної роботи системи *P* від часу (наробітку) *t*.

15. За графіком (рис. 4.12, крива *P*) знаходимо для $\gamma = 50\,\%$ $(P_\gamma = 0,5)$ γ – відсотковий наробіток системи $T_\gamma = 1,9 \cdot 10^6$ годин.

16. Перевірочний розрахунок при $t = 1,9 \cdot 10^6$ годин показує (табл.4.5), що $P_\gamma = 0,4923 \approx 0,5$.

17. За умовами завдання підвищено γ – відсотковий наробіток системи $T'_\gamma = 1,5 \cdot T_\gamma = 1,5 \cdot 1,9 \cdot 10^6 = 2,85 \cdot 10^6$ годин.

Таблиця 4.5.

Розрахунок імовірності безвідмовної роботи системи

Елемент	λ_i, год$^{-1}$	Наробіток *t*, × 10^6 год.							
	×10^{-6}	0,5	1,0	1,5	2,0	2,5	3,0	1,9	2,85
1	0,001	0,9995	0,9990	0,9985	0,9980	0,9975	0,9970	0,9981	0,9972
2 – 5	0,1	0,9512	0,9048	0,8607	0,8187	0,7788	0,7408	0,8270	0,7520
6,7	0,01	0,9950	0,9900	0,9851	0,9802	0,9753	0,9704	0,9812	0,9719
8 – 11	0,2	0,9048	0,8187	0,7408	0,6703	0,6065	0,5488	0,6839	0,5655

12 – 15	0,5	0,7788	0,6065	0,4724	0,3679	0,2865	0,2231	0,3867	0,2405
A, B	–	0,9976	0,9909	0,9806	0,9671	0,9511	0,9328	0,9701	0,9385
C	–	0,9900	0,9801	0,9704	0,9608	0,9512	0,9417	0,9628	0,9446
D, E	–	0,9909	0,9671	0,9328	0,8913	0,8452	0,7964	0,9001	0,8112
F	–	0,9639	0,8282	0,6450	0,4687	0,3245	0,2172	0,5017	0,2458
G	–	0,9924	0,9888	0,9863	0,9820	0,9732	0,9583	0,9832	0,9594
P	–	0,9561	0,8181	0,6352	0,4593	0,3150	0,2075	0,4923	0,2352
12` – 15`	0,322	0,8513	0,7143	0,6169	0,5252	0,4471	0,3806	0,5424	0,3994
F'	–	0,9883	0,9270	0,8397	0,7243	0,6043	0,4910	0,7483	0,5238
P'	–	0,9803	0,9157	0,8270	0,7098	0,5866	0,4691	0,7343	0,5011
16 – 18	0,5	0,7788	0,6065	0,4724	0,3679	0,2865	0,2231	0,3867	0,2405
F''	–	0,9993	0,9828	0,9173	0,7954	0,6413	0,4858	0,8233	0,5311
P''	–	0,9912	0,9708	0,9034	0,7795	0,6226	0,4641	0,8079	0,5081

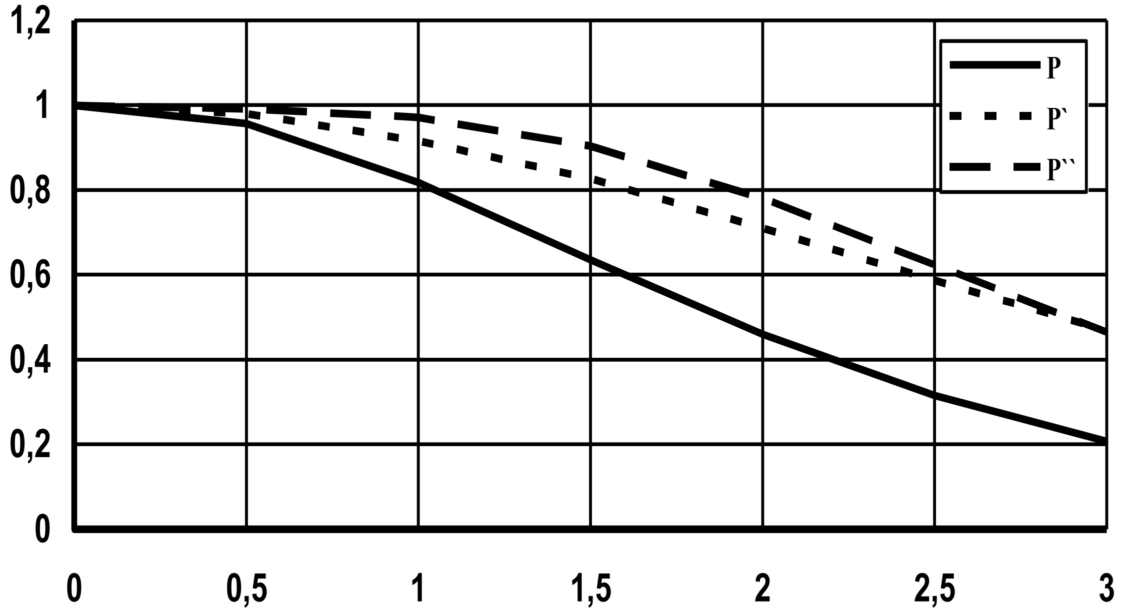


Рис 4.12. Зміна імовірності безвідмовної роботи вихідної системи (Р), системи з підвищеною надійністю (P') і системи зі структурним резервуванням елементів (P'').

18. Розрахунок показує (табл. 4.5), що при $t = 2{,}85 \cdot 10^6$ год. для елементів перетвореної схеми (рис. 4.11) $p_1 = 0{,}9972$, $p_G = 0{,}9594$ і $p_F = 0{,}2458$. Отже, із трьох послідовно з'єднаних елементів мінімальне значення імовірності безвідмовної роботи має елемент F (система «2 з 4» у вихідній схемі (рис. 4.10) і саме збільшення його надійності дасть максимальне збільшення надійності системи в цілому.

19. Для того, щоб при $T'_\gamma = 2{,}85 \cdot 10^6$ год. система в цілому мала імовірність безвідмовної роботи $P_\gamma = 0{,}5$, необхідно, щоб елемент F мав імовірність безвідмовної роботи (див. (4.37))

$$p_F = \frac{p_\gamma}{p_1 p_G} = \frac{0{,}5}{0{,}9972 \cdot 0{,}9594} = 0{,}5226. \tag{4.39}$$

При цьому значенні елемент F залишиться самим ненадійним у схемі (рис. 4.13) і обґрунтування залишаться вірними.

Очевидно, значення p_F, отримане за формулою (4.39), є мінімальним для виконання умови збільшення наробітку не менш, ніж у 1,5 рази. У разі більш високих значень p_F збільшення надійності системи буде великим.

20. Для визначення мінімально необхідної імовірності безвідмовної роботи елементів 12 – 15 (рис. 4.10) необхідно вирішити рівняння (4.36) відносно p_{12} при $p_F = 0{,}5226$. Однак тому що аналітичний вираз цього рівняння зв'язаний з визначеними труднощами, більш доцільно використовувати графоаналітичний метод. Для цього за даними табл. 4.5 будуємо графік залежності $p_F = f(p_{12})$. Графік представлений на рис. 4.13.

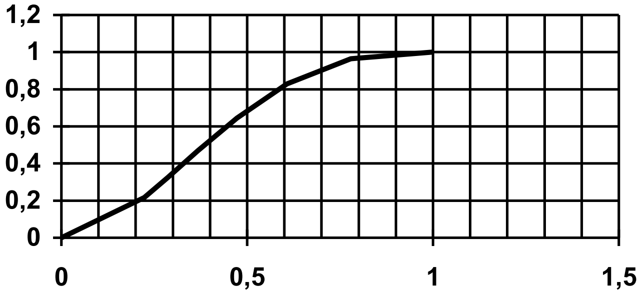


Рис. 4.13. Залежність імовірності безвідмовної роботи системи

«2 з 4»від імовірності безвідмовної роботи її елементів

21. За графіком при $p_F = 0,5226$ знаходимо $p_{12} \approx 0,4$.

22. Приймаючи до уваги, що за умовами завдання всі елементи працюють у періоді нормальної експлуатації і підпорядковуються експонентному законові (4.10) для елементів 12 – 15 при $t = 2,85 \cdot 10^6$, знаходимо

$$\lambda'_{12} = \lambda'_{13} = \lambda'_{14} = \lambda'_{15} = -\frac{\ln p_{12}}{t} = -\frac{\ln 0.4}{2,85 \cdot 10^6} = 0,322 \cdot 10^6 \text{год.} \qquad (4.40)$$

23. Таким чином, для збільшення γ – відсоткового наробітку системи необхідно збільшити надійність елементів 12, 13, 14 і 15 і знизити інтенсивність їх відмов з $0,5$ до $0,322 \cdot 10^{-6}$год. , тобто в 1,55 рази.

24. Результати розрахунків для системи зі збільшеною надійністю елементів 12, 13, 14 і 15 приведені в табл. 4.5. Там також наведені розрахункові значення імовірності безвідмовної роботи системи «2 з 4», *F’* і системи в цілому *P’*. При $t = 2,85 \cdot 10^6$год. імовірність безвідмовної роботи системи $P' = 0,5011 \approx 0,5$, що відповідає умовам завдання. Графік приведений на рис 4.10.

25. Для другого способу збільшення імовірності безвідмовної роботи системи – структурного резервування за тим же міркуванням також вибираємо елемент *F*, імовірність безвідмовної роботи якого після резервування повинна бути не нижче $p''_F = 0,5226$.

26. Для елемента *F* – системи «2 з 4» – резервування означає збільшення загального числа елементів. Аналітично визначити мінімально необхідну кількість елементів неможливо, тому що число елементів повинно бути цілим і функція $p_F = f(n)$ дискретна.

27. Для підвищення надійності системи «2 з 4» додаємо до неї елементи, ідентичні за надійністю вихідним елементам 12–15 доки імовірність безвідмовної роботи квазіелемента *F* не досягне заданого значення.

Для розрахунку скористаємося комбінаторним методом:

- додаємо елемент 16, одержуємо систему «2 з 5»:

$$q_F = \sum_{k=0}^{1} C_5^k p_{12}^k (1-p_{12})^{5-k} = C_5^0 (1-p_{12})^5 + C_5^1 p_{12}(1-p_{12})^4 =$$
$$= (1-p_{12})^5 + 5p_{12}(1-p_{12})^4 = 0,6528, \tag{4.41}$$

$$p_F = 1 - q_F = 1 - 0,6528 = 0,3472 < 0,5226; \tag{4.42}$$

- додаємо елемент 17, одержуємо систему «2 з 6»:

$$q_F = \sum_{k=0}^{1} C_6^k p_{12}^k (1-p_{12})^{6-k} = C_6^0 (1-p_{12})^6 + C_6^1 p_{12}(1-p_{12})^5 =$$
$$= (1-p_{12})^6 + 6p_{12}(1-p_{12})^5 = 0,5566, \tag{4.43}$$
$$p_F = 1 - q_F = 1 - 0,5566 = 0,4434 < 0,5226; \tag{4.44}$$

- додаємо елемент 18, одержуємо систему «2 з 7»:

$$q_F = \sum_{k=0}^{1} C_7^k p_{12}^k (1-p_{12})^{7-k} = C_7^0 (1-p_{12})^7 + C_7^1 p_{12}(1-p_{12})^6 =$$
$$= (1-p_{12})^7 + 7p_{12}(1-p_{12})^6 = 0,4689, \tag{4.45}$$

$$p_F = 1 - q_F = 1 - 0,4689 = 0,5311 > 0,5226; \tag{4.46}$$

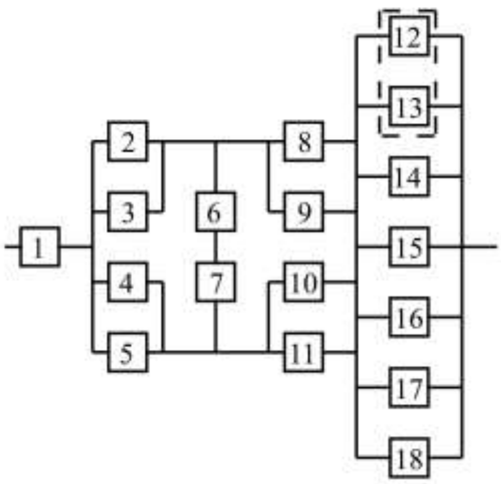


Рис. 4.14. Структурна схема системи після структурного резервування

28. Таким чином, для підвищення надійності до необхідного рівня необхідно у вихідній схемі (див. рис. 4.8) систему «2 з 4» добудувати елементами 16, 17 і 18 до системи «2 з 7» (рис. 4.14).

29. Результати розрахунків імовірностей безвідмовної роботи системи «2 з 7», F''` і системи в цілому P'' представлені в табл. 4.5.

30. Розрахунки показують, що при $t = 2{,}85 \cdot 10^6$год. $P'' = 0{,}5081 > 0{,}5$, що задовольняє умові завдання.

31. На рис. 4.12 нанесені криві залежностей імовірності безвідмовної роботи системи після підвищення надійності елементів 12...15 (крива P') і після структурного резервування (крива P'').

Висновки:

1. На рис. 4.12 представлена залежність імовірності безвідмовної роботи системи (крива P). Із графіка видно, що 50 %- вий наробіток вихідної системи складає $1{,}9 \cdot 10^6$год.

2. Для підвищення надійності і збільшення 50 %-вого наробітку системи в 1,5 рази (до $2{,}85 \cdot 10^6$годин) запропоновані два способи:

а) підвищення надійності елементів 12, 13, 14 і 15 і зменшення їх відмов з $0{,}5$ до $0{,}322 \cdot 10^{-6}$ год. ;

б) навантажене резервування основних елементів 12, 13, 14 і 15 ідентичними за надійністю резервними елементами 16, 17 і 18 (рис. 4.12).

3. Аналіз залежностей імовірності безвідмовної роботи системи від часу (наробітку) (див. рис. 4.12) показує, що другий спосіб підвищення надійності системи (структурне резервування) переважає над першим, тому що в період наробітку до $2{,}85 \cdot 10^6$ годин імовірність безвідмовної роботи системи за умови структурного резервування (крива P'') вище, ніж у разі підвищення надійності елементів (крива P').

4. Розрахунок структурної надійності систем

4.1. Поняття, схожість і відмінність, достоїнства і недоліки, розрахунків структурної і функціональної надійності систем.
4.2. Поняття структурної схеми надійності, її призначення.
4.3. Поняття послідовного з'єднання по надійності, показники надійності відновлюваних і невідновлюваних об'єктів.
4.4. Області зміни вірогідності безвідмовної роботи системи з послідовним з'єднанням залежно від числа елементів.
4.5. Поняття паралельного з'єднання по надійності, функції надійності і ненадійності, їх обчислення.
4.6. Обчислення математичного очікування наробітку до відмови, інтенсивності відмов при паралельному по надійності з'єднанні.
4.7. Області зміни вірогідності безвідмовної роботи систем з паралельним з'єднанням залежно від числа елементів
4.8. Поняття перетворення «зірка — трикутник» і область, його застосування.
4.9. Поняття перетворення «трикутник — зірка», і область його застосування.
4.10. Розрахунок надійності системи з двох елементів з використанням графів станів і переходів, обчислення показників надійності.
4.11. Поняття вузлів і гілок мережі.
4.12. Поняття графа мережі.
4.13. Оцінка надійності методом перетворених мереж.
4.14. Допущення методу мінімальних шляхів і перетинів.
4.15. Поняття методу мінімальні шляхів і перетинів.
4.16. Матриця шляхів, її застосування.
4.17. Матриця перетинів, її застосування.
4.18. Розрахунок вірогідності відмови методом мінімальних шляхів і перетинів.
4.19. Облік навмисних відключень в методі мінімальних шляхів і перетинів.
4.20. Особливості, які необхідно враховувати при розрахунку надійності об'єктів, розподілених в просторі.
4.21. Непараметричний розрахунок надійності протяжних об'єктів.
4.22. Параметричний розрахунок надійності протяжних об'єктів.