6. Надійність відновлюваних систем

Складні технічні об'єкти (системи), розраховані на тривалий термін служби, створюються, як правило, ремонтованими. У даному розділі розглядається методика аналізу надійності відновлюваних систем при різних схемах включення елементів.

Перехід системи з непрацездатного (граничного) стану в працездатний здійснюється за допомогою операцій відновлення або ремонту. До перших, в основному, відносяться операції ідентифікації відмови (визначення його місця і характеру), заміни, регулювання, заключних операцій контролю працездатності системи в цілому. Перехід системи з граничного стану в працездатний здійснюється за допомогою ремонту, при якому відбувається відновлення ресурсу системи в цілому. Розглянемо, приміром, вакуумний вимикач. Вакуумна камера, що не підлягає відновленню, при відмові заміняється справною, тобто відновлення працездатності вимикача відбувається шляхом заміни камери, що відмовила. При відмові в тім же вимикачі електромагнітного (або пружинного) привода відновлення працездатності вимикача може відбуватися шляхом ремонту привода або заміни його справним. В обох випадках потрібно зробити регулювання привода і перевірити функціонування вимикача в цілому, здійснивши контрольні операції «ввімкнути»- «вимкнути».

6.1. Надійність відновлюваної одноелементної системи

При аналізі використовується ряд найбільших допущень, що часто вводяться. Потік відмов у системі найпростіший, тобто виконуються вимоги ординарності, стаціонарності і відсутності наслідку.

Потік відновлень найпростіший, тобто $\mu = \frac{1}{\tau_в} = const.$

Відновлення відбувається шляхом ремонту або заміни з наступним настроюванням і перевіркою працездатності або справності системи за той самий час $\tau_в$

Розрахункова схема надійності відновлюваної одноелементної системи представлена на рис. 6.1.

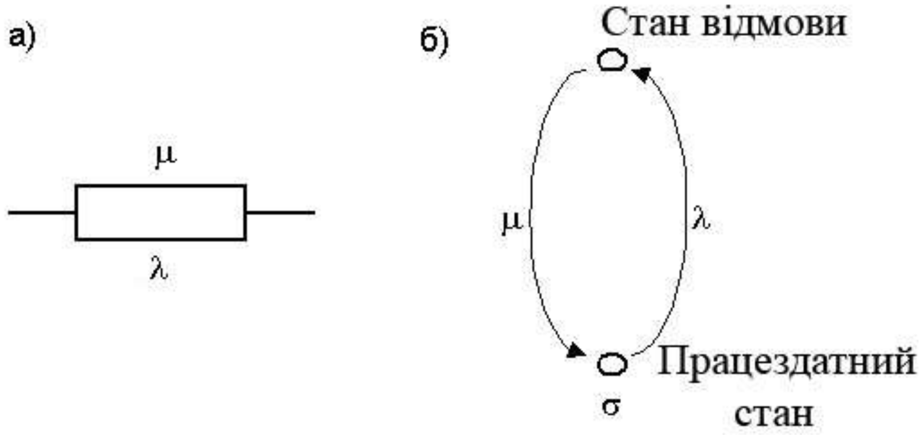

Рис.6.1. До розрахунку надійності відновлюваної основної системи: а - розрахункова схема; б – схема функціонування

Дана система з інтенсивністю λ прагне прийняти стан відмов, а з інтенсивністю μ – перейти в працездатний стан.

У табл. 6.1 надані заводські параметри для силової високовольтної апаратури.

Таблиця 6.1

Параметри λ і μ для деяких високовольтних пристроїв

Пристрій (елемент)	Параметр потоку відмов , 1/рік	Середній час відновлення $\tau_в$, ч
Трансформатор силовий, $U_{1н}$ = 110 кв.	0,015	10^{-2}
Вимикач масляний, $U_{1н}$ = 110 кв.	0,02	$5\cdot10^{-2}$
Вимикач масляний, $U_н$ = 35 кв.	0,015	10^{-1}
Роз'єднувач, $U_н$ = 35...220 кв.	0,01	$5\cdot10^{-2}$
Віддільник, $U_н$ = 110–220 кв.	0,03	10^{-1}
Короткозамикач, $U_н$ = 110–220 кв.	0,02	10^{-1}

Позначимо стійкі стани системи індексами:

1 – відмова, тобто система знаходиться в стані відновлення з інтенсивністю відновлення μ = const;

0 – працездатний стан з параметром потоку відмов λ = const,.

Для аналізованої системи з урахуванням прийнятих допущень можливі чотири види переходу зі стану в момент часу t у стан в момент часу $(t+\Delta t)$:

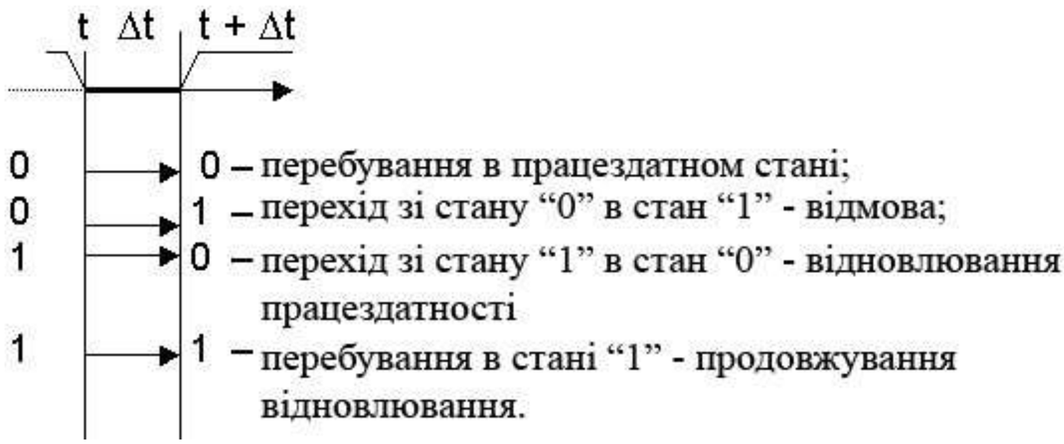

Рис. 6.1.1. Чотири види переходу зі стану в момент часу t у стан в момент часу $(t+\Delta t)$.

Зазначені переходи можна представити у вигляді графа переходу станів системи з відновленням (рис. 6.2).

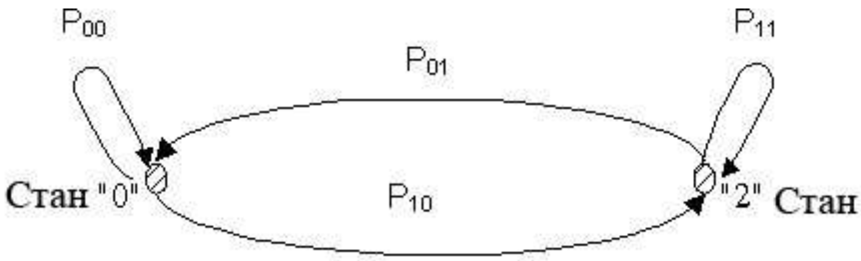

Рис.6.2. Граф переходу станів системи

Графові переходу станів відповідає матриця перехідних імовірностей 2x2:

$$\begin{pmatrix} P_{00}(\Delta t) & P_{01}(\Delta t) \\ P_{10}(\Delta t) & P_{11}(\Delta t) \end{pmatrix} \tag{6.1}$$

Діагональні елементи цієї матриці відповідно визначаться як імовірність безвідмовної роботи на відрізку Δ t:

$$P_{00}(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t},$$

імовірність продовження відновлення системи на відрізку Δt :

$$P_{11}(\Delta t) = e^{\mu \Delta t}.$$

Скористаємося формулою розкладання функції в ряд Тейлора:

$$e^{-x} = 1 - x + \frac{x^2}{2!} - \frac{x^3}{3!} + \ldots = \sum_{k=0}^{\infty} (-1)^k \cdot \frac{x^k}{k!}.$$

У високонадійних елементів $\lambda < 10^{-5}$ 1/год, тоді при розкладанні в ряд функції $P_{00}(\Delta t)$, зберігаючи високу точність розрахунку можна обмежитися тільки двома першими членами ряду. Нехай $\lambda = 10^{-4}$ 1/година, Δt = 1 година, потому

$$e^{-\lambda \Delta t} = 1 - 10^{-4} + \frac{10^{-8}}{2} - \frac{10^{-12}}{6} + \ldots + 0(\Delta t) \to 0$$

Таким чином, запишемо

$$P_{00}(\Delta t) = e^{-\lambda \Delta t} = 1 - \lambda \Delta t + 0(\Delta t).$$

Відповідно

$$P_{11}(\Delta t) = 1 - \mu \Delta t + 0(\Delta t).$$

Із властивостей матриці випливає, що сума елементів кожного рядка матриці дорівнює одиниці, як сума імовірностей появи несумісних складових, повну групу подій, відкіля випливає:

$$P_{00}(\Delta t) + P_{01}(\Delta t) = 1; \; P_{01}(\Delta t) + P_{00}(\Delta t) = \lambda\Delta t + 0(\Delta t);$$
$$P_{11}(\Delta t) + P_{10}(\Delta t) = 1; \; P_{10} = 1 - P_{11}(\Delta t) = \mu\Delta t + 0(\Delta t).$$

Для складання рівнянь імовірностей станів системи варто записати формулу повної імовірності для кожного стовпця матриці:

$$P_0(t+\Delta t) = P_0(t) \times P_{00}(\Delta t) + P_1(t) \times P_{10}(\Delta t) \text{ – для першого стовпця;}$$
$$P_1(t+\Delta t) = P_0(t) \times P_{01}(\Delta t) + P_1(t) \times P_{11}(\Delta t) \quad \text{– для другого стовпця,}$$

де $P_0(t)$ – імовірність перебування системи в нульовому (працездатному) стані в момент часу t; $P_1(t)$ – імовірність перебування системи в стані “1” (відмови) у момент часу t.

Використовуємо запис похідної функції f(x):

$$f'(x) = \lim_{\Delta x \to 0} \frac{f(x+\Delta t) - f(x)}{\Delta x}$$

і за аналогією з цим виразом для нашого випадку запишемо:

$$P_0'(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_0(t+\Delta t) - P_0(t)}{\Delta t},$$
$$P_1'(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_1(t+\Delta t) - P_1(t)}{\Delta t}.$$

У ці вирази підставимо розкриті формули повних імовірностей $P_0(t+\Delta t)$ і $P_1(t+\Delta t)$, зробимо відповідні перетворення й одержимо систему двох диференціальних рівнянь щодо імовірностей перебування системи в станах “0” і “1”:

$$\begin{aligned} P'_0(t) &= -\lambda \cdot P_0(t) + \mu P_1(t) \\ P'_0(t) &= \lambda \cdot P_0(t) - \mu P_1(t) \end{aligned} \qquad (6.2)$$

При початкових умовах $P_0(t = 0) = 1$; $P_1(t = 0) = 0$, у початковий момент часу (t = 0) відновлювана система працездатна – знаходиться в стані “0”. Рішення диференційних рівнянь дає:

$$P_0(t) = G(t) = \frac{\mu}{\lambda + \mu}\left[1 + \frac{\lambda}{\mu} \cdot e^{-(\lambda+\mu)t}\right]. \tag{6.3}$$

Імовірність працездатного стану системи в момент часу t являє собою функцію готовності G(t). Функція готовності – це імовірність працездатного стану відновлюваної системи у визначений момент часу t. Цей показник є комплексним показником надійності, що оцінює дві властивості системи – безвідмовність і ремонтнопридатність. Помітимо, що G(t) дає оцінку не за весь період від 0 до t, а тільки в заданий момент часу t, оскільки до цього система могла знаходитися як у працездатному (0), так і в непрацездатному (1) станах.

На рис. 6.3 побудований графік: $G(t) = f(\lambda \cdot t)$ при $\frac{\lambda}{\mu} = const$.

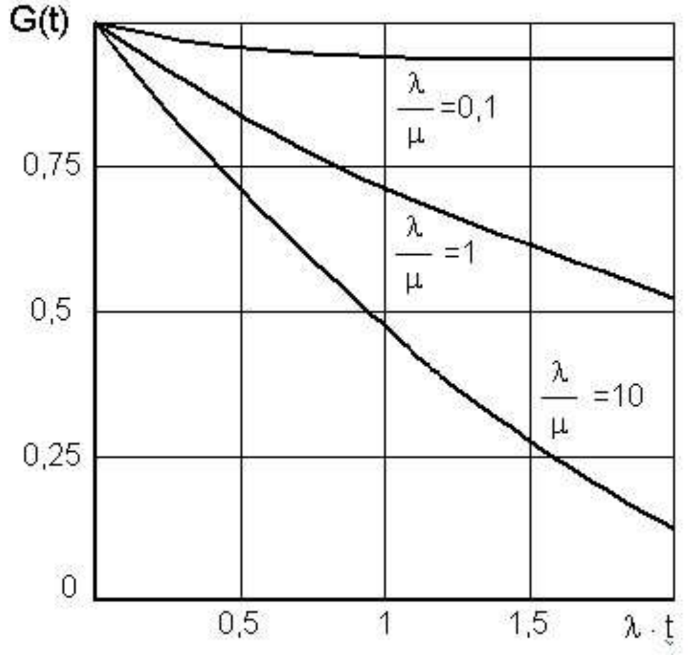

Рис. 6.3. Функція готовності відновлюваної системи без резервування при різних значеннях λ/μ

Припустивши $\lambda = const$ можна наочно побачити наскільки підвищиться надійність системи за рахунок збільшення μ для визначеного часу t. Наприклад, при збільшенні μ у десять разів для моменту $\lambda \cdot t = 1$ надійність підвищиться з G(t) = 0,41 до G(t) = 0,95. Для високонадійних систем, наприклад, трансформатора, коли: $\lambda < 10^{-5}$ 1/ч, $\mu > 10^{-2}$ 1/год, оцінку надійності доцільно визначати за рік експлуатації. У цьому випадку зручно користуватися коефіцієнтом готовності.

Визначимо граничне значення G(t) по виразу (6.4):

$$\lim_{t\to\infty} G(t) = \frac{\mu}{\lambda+\mu} = K_г. \qquad (6.4)$$

Асимптотичне значення функції готовності при $t \to \infty$ і є коефіцієнт готовності.

Таким чином, коефіцієнт готовності являє собою імовірність того, що система виявиться працездатною в довільний момент часу, крім планованих періодів, протягом яких використання системи по призначенню не передбачається.

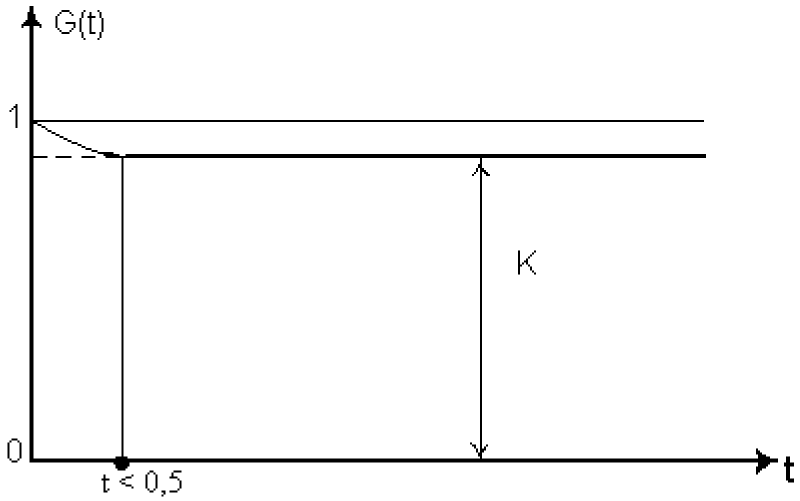

Рис. 6.4. Графік функції G(t)

Приклад. Маємо відновлювану систему, у якої параметр потоку відмов $\lambda = 10^{-5}$ 1/год = const, середня інтенсивність відновлення $\mu = 10^{-2}$ 1/ч. Визначити, до скількох підвищиться надійність цієї системи за рахунок більш високої організації роботи ремонтного персоналу, якщо інтенсивність відновлення системи підвищилася вдвічі (скоротився вдвічі час відновлення).

Рішення. $\tau_{в1} = 100$год.; $\tau_{в2} = 50$год. Коефіцієнт готовності системи до поліпшення організації праці ремонтного персоналу складав

$K_{г_1} = \frac{\mu}{\lambda+\mu} = \frac{10^{-2}}{10^{-5}+10^{-2}} = \frac{0,01}{0,00001+0,01} = 0,999.$

При поліпшеній організації праці

$K_{г_2} = \frac{2\mu}{\lambda+2\mu} = \frac{0,02}{0,00001+0,02} = 0,9995.$

По сумі витрат, зв'язаних з поліпшенням організації праці й економічного ефекту від підвищення надійності (поліпшення ремонтопридатності), можна зробити висновок про доцільність такого способу підвищення надійності системи.

6.2. Надійність нерезервованої системи з послідовно включеними відновлюваними елементами

Система, що складається з N послідовних відновлюваних елементів, відмовляє, коли відмовляє кожний з елементів системи. Передбачаються найпростіші потоки відмов і відновлень $\lambda_i = const, \mu_i = const$. Як показано, при заданих припущеннях і відомих значеннях коефіцієнтів готовності кожного з послідовно включених елементів , коефіцієнт готовності системи визначається по виразу, і значеннях коефіцієнтів готовності кожного з послідовно включених елементів $K_{\tilde{A}_i}$, коефіцієнт готовності системи визначається по виразу.

$K_г = \frac{1}{1+\sum_{i=1}^{n}\left(\frac{1}{K_{г_i}}-1\right)}; K_{г_i} = \frac{\mu_i}{\lambda_i+\mu_i}$

і відповідно при заданих, λ_i

$K_г = \frac{1}{1+\sum\frac{\lambda_i}{\mu_i}}.$

Приклад. Відновлювана система складається із трьох послідовно включених елементів з параметрами надійності:

$K_{г_1}$= 0,6; $K_{г_2}$= 0,8; $K_{г_3}$= 0,7. Відомо, що $\lambda_i = const, \mu_i = const$.

Визначити коефіцієнт надійності.

Рішення. Підставивши задані значення коефіцієнтів готовності у вираз Кг системи, одержимо

$$K_г = \frac{1}{1+\left[\left(\frac{1}{0,6}-1\right)+\left(\frac{1}{0,8}-1\right)+\left(\frac{1}{0,7}-1\right)\right]} = 0,4.$$

Тут же відзначимо, що в розрахунковій практиці нерідко користуються формулою імовірності безвідмовної роботи не ремонтованої системи з основним з'єднанням елементів, коли

$$P(t) = P_1(t) \cdot P_2(t) \cdot P_3(t).$$

У цьому випадку $K_г = K_{г_1} \cdot K_{г_2} \cdot K_{г_3} = 0,6 \cdot 0,8 \cdot 0,7 = 0,335$, що, як бачимо, сполучено із грубою помилкою. Добуток імовірностей безвідмовної роботи елементів неремонтованої системи є математична оцінка факту збігу працездатного стану трьох, що становлять систему невідновлюваних елементів, тобто працездатного стану системи. Добуток коефіцієнтів готовності ремонтованих елементів факту збігу працездатних станів елементів не відображає.

6.3. Надійність відновлюваної дубльованої системи

Розглянемо систему, для забезпечення надійності якої використовується дублювання: основній системі додається паралельно така ж система. В обох системах (ланцюгах) параметри потоків відмов однакові, λ= const, така ж картина й для потоку відновлень, тобто μ = const. Така дубльована система може перебувати в трьох станах:

“0” - обидві системи (ланцюги) працездатні;

“1” - один ланцюг відновлюється, інший працездатний;

“2” – обидва ланцюги відновлюються. З погляду виконання функціональних завдань, покладених на систему, стан “2” відповідає відмові. У цієї системи можливі сім видів переходу зі стану в момент часу t у стан в момент часу $(t + \Delta t)$:

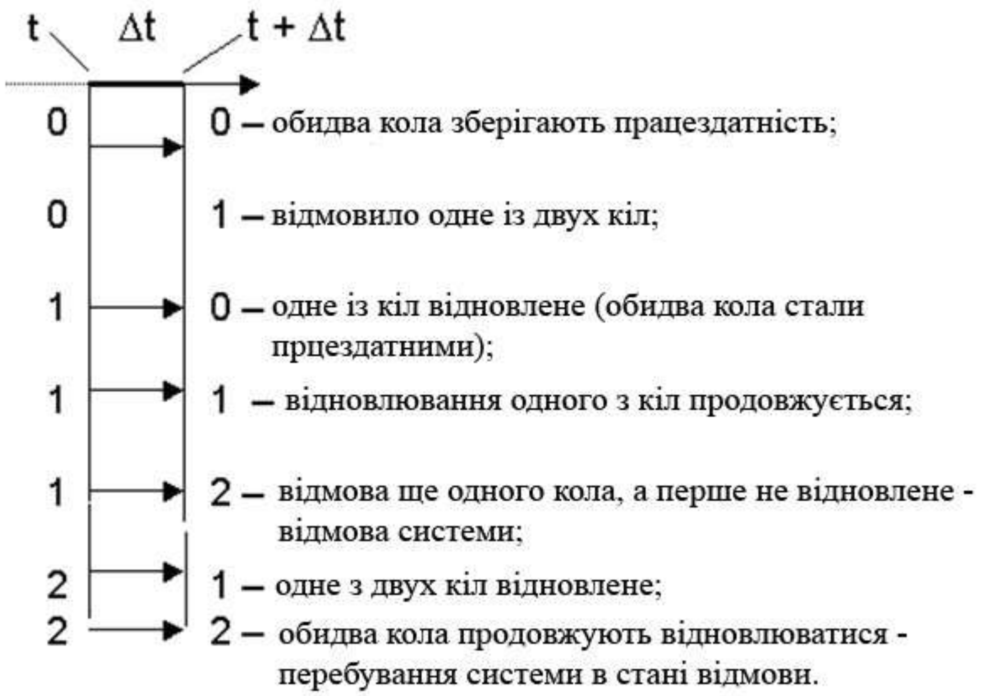

Рис.6.4.1. Сім видів переходу зі стану в момент часу t у стан у момент часу $\left(t+\Delta t\right)$

Зазначені переходи зображені на рис. 6.4. у вигляді графа переходів станів.

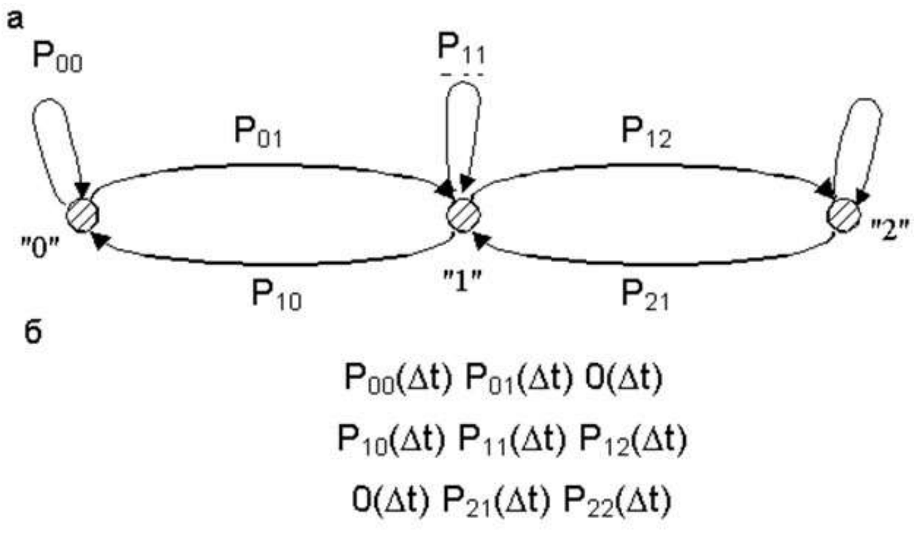

Рис.6.5. До розрахунку надійності відновлюваної дубльованої системи: а – граф переходів станів дубльованої системи; б – матриця перехідних імовірностей

Графові переходів відповідає матриця перехідних імовірностей 3×3.

Крайні елементи побічної діагоналі матриці мають порядок 0(Δt), тому що по вихідному припущенню потік відмов у системі найпростіший, і час відновлення розподілений за експонентним законом. Відповідно до найпростішого потоку в першому рядку матриці виключається ситуація, коли за час Δt система може перейти зі стану “0” у стан “2”, $P_{02}(\Delta t) = 0$. Міркуючи аналогічно, по третьому рядку матриці запишемо $P_{20}(\Delta t) = 0$. При найпростішому потоці система за час Δ t може зі стану “0” з імовірністю $P_{01}(\Delta t)$ перейти в стан “1” або з імовірністю $P_{00}(\Delta t)$ залишитися в стані “0”. Точно така ж картина відповідає стану “2”. З імовірністю $P_{21}(\Delta t)$ система може перейти в стан “1” (один ланцюг відновиться) або з імовірністю $P_{22}(\Delta t)$ залишиться перебувати в стані “2” (обидва ланцюги непрацездатні – стан відмови). Елементи першого рядка матриці перехідних імовірностей залежать від режиму використання резервного ланцюга. Так при навантаженому резерві, що працюють в обох ланцюгах, інтенсивність потоку відмов дорівнює 2λ , а при ненавантаженому – λ (незавантажений ланцюг завжди готовий до роботи і своїх характеристик не міняє, λ = const). Тому

$$P_{00}\left(\Delta t\right) = e^{-\left(y+1\right)\lambda\cdot\Delta t}, \tag{6.5}$$

де y - коефіцієнт, що враховує стан резерву (y = 0 при ненавантаженому режимі й y = 1 при навантаженому).

Використовуючи розкладання статичної функції в ряд, з урахуванням наближення суми відкинутих членів ряду до нуля, запишемо

$$P_{00}(\Delta t) = 1 - \left(y+1\right)\lambda\Delta t\,. \tag{6.6}$$

З обліком того, що для першого рядка матриці

$$P_{00}\left(\Delta t\right) + P_{01}\left(\Delta t\right) = 1.$$

Одержимо

$$P_{01}(\Delta t) = 1 - P_{00}(\Delta t) = \left(y+1\right)\lambda\Delta t\,. \tag{6.7}$$

Елементи другого рядка матриці перехідних імовірностей відповідно запишуться так:

$$P_{10}(\Delta t)+P_{11}(\Delta t)+P_{12}(\Delta t)=1;$$

$$P_{10}(\Delta t)=1-e^{-\mu\Delta t}=\mu\Delta t, \tag{6.8}$$

$$P_{12}(\Delta t)=1-e^{-\lambda\Delta t}=\lambda\Delta t, \tag{6.9}$$

$$P_{11}(\Delta t)=1-\left[P_{10}(\Delta t)+P_{12}(\Delta t)\right]=1-(\lambda+\mu)\Delta t. \tag{6.10}$$

Елементи третього рядка аналізованої матриці, з урахуванням кількості ремонтних бригад і багаторазового відновлення ланцюгів, що відмовили, відповідно визначаться так:

$$P_{21}(\Delta t)+P_{22}(\Delta t)=1;$$

$$P_{22}(\Delta t)=e^{-r\mu\Delta t}=1-r\mu\Delta t, \tag{6.11}$$

$$P_{21}(\Delta t)=1-P_{22}(\Delta t)=r\mu\Delta t, \tag{6.12}$$

де r - число ремонтних бригад (r = 1 або r = 2).

При дублюванні з відновленням можливі шість варіантів завдань аналізу надійності такої системи:

1) система з навантаженим резервом до першої відмови (y = 1, r = 0);

2) система з ненавантаженим резервом до першої відмови (y = 0, r = 0);

3) багаторазово відновлювана система з навантаженим резервом і однією ремонтною бригадою (y = 1, r = 1);

4) багаторазово відновлювана система з навантаженим резервом і двома ремонтними бригадами (y = 1, r = 2);

5) багаторазово відновлювана система з ненавантаженим резервом і двома ремонтними бригадами (y = 1, r = 2);

6) багаторазово відновлювана система з ненавантаженим резервом і однією ремонтною бригадою (y = 0, r = 1).

Для визначення $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)=f(\lambda,\mu,r,y,t)$ необхідно скласти й вирішити систему трьох диференційних рівнянь:

$$\begin{aligned} &P'_0(t) = f(\lambda, \mu, r, y, t);\\ &P'_1(t) = f(\lambda, \mu, r, y, t);\\ &P'_2(t) = f(\lambda, \mu, r, y, t), \end{aligned} \qquad (6.13)$$

де λ, μ, r, y – постійні коефіцієнти.

Для цього на основі властивостей стовпців матриці необхідно записати вирази формул повних імовірностей $P_0(t + \Delta t)$, $P_1(t + \Delta t)$, $P_2(t + \Delta t)$, потім записати похідні для виразів імовірностей знаходження системи в станах “0”, “1”, “2” і звести їх у систему рівнянь:

$$\begin{aligned} &P'_0(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_0(t + \Delta t) - P_0(t)}{\Delta t};\\ &P'_1(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_1(t + \Delta t) - P_1(t)}{\Delta t};\\ &P'_2(t) = \lim_{\Delta t \to 0} \frac{P_2(t + \Delta t) - P_2(t)}{\Delta t}. \end{aligned} \qquad (6.14)$$

Формули повних імовірностей запишуться на основі матриці відповідно:

по першому стовпцю:

$$P_0(t + \Delta t) = P_0(t) \cdot P_{00}(\Delta t) + P_1(t) \cdot P_{10}(\Delta t);$$

по другому стовпцю:

$$P_1(t + \Delta t) = P_1(t) \cdot P_{11}(\Delta t) + P_0(t) \cdot P_{01}(\Delta t) + P_2(t) \cdot P_{12}(\Delta t);$$

по третьому стовпцю:

$$P_2(t + \Delta t) = P_2(t) \cdot P_{22}(\Delta t) + P_1(t) \cdot P_{12}(\Delta t) \ .$$

Підставивши в ці вирази відповідні значення перехідних імовірностей, одержимо систему із трьох диференційних рівнянь із чотирма постійними коефіцієнтами μ , λ , r, y.

Визначення шуканих імовірностей перебування системи в станах “0”, “1” і “2” у момент часу t виконується при наступних початкових умовах: $P_0(t = 0) = 1$; $P_1(t = 0) = 0$; $P_2(t = 0) = 0$, тобто система спочатку включається в роботу з обома справними ланцюгами. Рішення системи (6.14) докладно викладено в спеціальній літературі. Шуканий вираз функції готовності аналізованої системи при знайдених значеннях $P_0(t)$, $P_1(t)$, $P_2(t)$ на основі відомої властивості $P_0(t)+P_1(t)+P_2(t)=1$ зручніше записати у вигляді:

$$G(t)=1-P_2(t).$$

Аналізована система виходить високонадійною. Навіть у нерезервованій відновлюваній системі при $\frac{\lambda}{\mu}\le 0{,}01$ $G(t\ge 0{,}5 года)\ge 0{,}999$, і значення цієї функції швидко наближається до коефіцієнта готовності. У зв'язку зі сказаним, оцінку надійності відповідальних систем, розрахованих на тривалий термін експлуатації, доцільно робити за допомогою коефіцієнта готовності.

Запишемо коефіцієнти готовності дубльованої системи з багаторазовим відновленням з однієї (r = 1) і двома (r = 2) ремонтними бригадами:

$$K_{г(r=1)}=\frac{(y+1)\lambda\mu+\mu^2}{(y+1)\lambda^2+(y+1)\lambda\mu+\mu^2};$$

$$K_{г(r=2)}=\frac{2(y+1)\lambda\mu+2\mu^2}{(y+1)\lambda^2+2(y+1)\lambda\mu+2\mu^2}.$$

На рис. 6.6 представлені графіки коефіцієнта готовності $K_г=f\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)$ для різних схем використання резерву й кількості ремонтних бригад.

Із графіка видно, що введення резервування у відновлювану систему дає істотне збільшення надійності системи при відносно невисокій надійності основного ланцюга. Наприклад, при $\frac{\lambda}{\mu}\ge 0{,}1$ помітний приріст надійності навіть при введенні другої ремонтної бригади (r = 2). Але в міру росту надійності вихідних ланцюгів ефект від введення другої бригади знижується, а при $\frac{\lambda}{\mu}\le 0{,}01$ на графіку вже неможливо побачити розходження значень коефіцієнта готовності не тільки при зміні кількості ремонтних бригад, але й при переході зі схеми навантаженого дублювання до дублювання заміщенням. Так при $\frac{\lambda}{\mu} \le 0,01$ відношення значення коефіцієнта готовності схеми дубльованої заміщенням до значення коефіцієнта готовності схеми навантаженого дублювання, при одній ремонтній бригаді в обох варіантах дорівнює:

$\frac{K_в(r=1,y=0)}{K_в(r=1,y=1)} = 1,0001.$

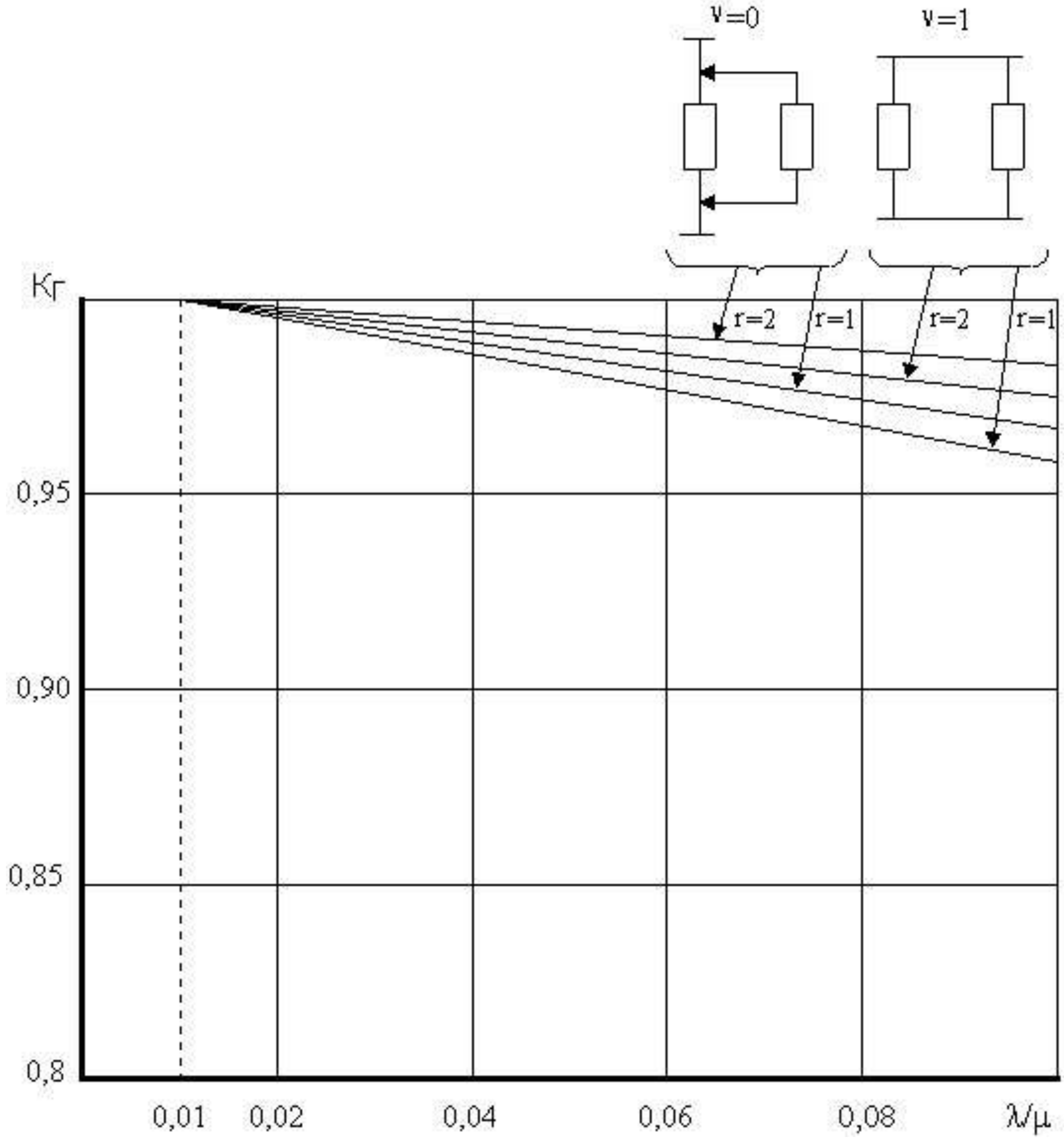

Рис.6.6. Залежність коефіцієнта готовності резервної дубльованої системи $K_г = f\left(\frac{\lambda}{\mu}\right)$ $y = const$ і $\tau = const$

Наприклад, у високовольтній електроустановці з показниками безвідмовності й ремонтопридатності Т = 20000 годин, $\tau_в$ = 100 год ($\frac{\lambda}{\mu} = \frac{\tau_в}{T} = 0,005$), використання схеми навантаженого дублювання підвищує надійність установки до $К_{Г_{(r=1)}} = 0{,}99995$, а при дублюванні заміщенням до $К_{г_{(r=1)}} = 0{,}99995$.

Таким чином, при відносно високому рівні надійності вихідної системи (схеми) виграш у надійності при перекладі схеми з режиму у = 1 на режим

у = 0 відчутного результату не дає. При експлуатації, наприклад двохтрансформаторної підстанції, коли середня інтенсивність відмов (параметр потоку відмов) одного трансформаторного ланцюга $\lambda < 0{,}2$ 1/рік, інтенсивність відновлення $\mu > 0{,}01$ 1/ч, ($\frac{\lambda}{\mu} \leq 0{,}0023$) схема включення резервного трансформатора підстанції (навантажене дублювання або дублювання заміщенням) повинна визначатися за фактичним значенням втрати потужності в трансформаторах, а не за рівнем надійності. Як відомо, втрата потужності в трансформаторі:

$$\Delta P_m = \Delta P_{ст} + \Delta P_м,$$

де $\Delta P_{ст}$– втрата потужності в магнітній системі (у сталі магнітопровода) трансформатора , від навантаження не залежить; $\Delta P_м$– втрата потужності в міді (алюмінії) обмоток трансформатора , залежить від квадрата струму.

Вибирати необхідно таку схему включення трансформаторів, що пов'язана з меншою втратою потужності. Якщо підстанція має протягом доби навантаження то високе, то низьке в чітко виражені інтервали часу, то виникає економічна доцільність часто змінювати схему включення трансформаторів. Розрахунки показують, що в сучасних трансформаторах напругою 35; 10,5; 6,3 кВ і потужністю до 10 тис. кВа, при навантаженні підстанції, що перевищує 0,7 потужності одного трансформатора, економічно вигідно переходити на схему навантаженого дублювання (режим в = 1). Для забезпечення такого режиму роботи підстанції необхідні циклостійкі вимикачі (наприклад вакуумні), здатні перемикатися під робочим навантаженням тисячі разів. Це особливо характерно для підстанцій, де переважає комунально-побутове навантаження, при якому яскраво виражені години максимального навантаження (звичайно з 7.00 до 9.00 і з 18.00 до 21.00 години місцевого часу). У залишок часу доби навантаження багаторазово знижується, і тоді вигідно включати тільки один трансформатор (режим в = 0). У зв'язку із цим слід зазначити, що в установках, де часто міняється навантаження в широкому діапазоні особливо ефективні будуть тиристорні вимикачі робочих струмів, у яких немає технічних обмежень по кількості операцій (циклів) «ввімкнути»- «вимкнути».

Такі високовольтні відновлювані дубльовані установки, як кабельні лінії і повітряні лінії електропередач повинні працювати за схемою навантаженого дублювання. При цьому, як це було показано вище, досягається економічний ефект від зниження втрат енергії, і зберігається висока надійність електропередачі.

6.4. Надійність відновлюваної системи при різних способах резервування елементів

При вирішенні завдань забезпечення надійності складних систем, що складаються з ряду ланок, коли кожна ланка може мати свою, відмінну від сусідніх, схему включення резерву, процедура розрахунків багаторазово ускладнюється.

У системах електропостачання завдання ускладнюється від того, що в кожній з ланок, наприклад у трансформаторній підстанції, застосовуються секційні вимикачі, що утворюють «мостові» схеми. У результаті реальна система має таку структуру з'єднання або взаємодії елементів, що не може бути зведена ні до паралельно-послідовної, ні до послідовно-паралельної схеми. Методи оцінки різних показників надійності складної системи досить специфічні і чисто аналітичний розрахунок на основі імовірнісних моделей, викладених вище, практично неприйнятний.

Для вирішення завдань надійності в складних системах використовуються такі методи як логіко-імовірнісний розрахунок за допомогою дерева відмов, таблично-логічний метод розрахунку, експертно-факторний аналіз надійності.