

4.5. Методи підвищення надійності. Основні поняття та види резервів

Серед методів підвищення надійності, які передбачаються при проектуванні, особливе місце займає використання надмірності, тобто введення додаткових коштів або можливостей понад мінімально необхідних для виконання об'єктом заданих функцій. Сам же метод підвищення надійності об'єкту шляхом введення надмірності прийнято називати резервуванням.

Резервування – застосування додаткових засобів і можливостей з метою збереження працездатного стану об'єкта при відмові одного або декількох його елементів.

Принцип резервування подібним розглянутому раніше паралельному з'єднанню елементів і з'єднанню типу "m з n", де за рахунок надлишковості можливе забезпечення більш високої надійності системи, її елементів.

Класифікація видів резервів

В залежності від типу створюваної в технічному об'єкті надмірності, розрізняють резервування:

структурне, яке передбачає використання надлишкових елементів у структурі об'єкта (введенням додаткових вузлів, блоків та елементів аналогічних наявними);

часове, коли використовується надлишковий час, який може бути закладений на додаткову інформацію або час на проведення додаткових функцій, процесів. Резерви часу можуть бути використані для усунення відмов, технічного обслуговування та інше. Резерв часу в технологічних системах може бути забезпечений різними способами:

- а) збільшенням оперативного часу (за рахунок зменшення часу на обслуговування, планованих простоїв, підвищення змінності роботи);
- б) створенням запасу продуктивності;

в) наданням системі властивості функціональної інерційності. *Функціональна інерційність* – властивість системи, що характеризує її здатність допускати перерви в роботі без втрати вихідного ефекту. Функціональна інерційність технологічній системі може бути забезпечена застосуванням міжопераційних накопичувачів (буферів).

інформаційне, яке передбачає використання надмірності інформації, що надходить на об'єкт. Реалізується введенням надлишкових кодів і символів при передачі, обробці і відображенні інформації (наприклад, додаткові одиниці інформації, що дозволяють виявляти і усувати помилки в передачі інформації: корегувальні коди, контрольні суми, перевірки на парність тощо).

функціональне, що означає використання здатності елементів і вузлів об'єкта виконувати додаткові функції; резервування з застосуванням функціональних резервів. При цьому способі резервування система будується таким чином, що задана функція може виконуватися різними способами і (або) технічними засобами.

навантажувальне, що передбачає використання здатності об'єкта і його елементів сприймати додаткове навантаження. Суть принципу навантажувального резервування (параметричної надмірності) полягає в розширенні області працездатності об'єкта, при цьому область станів об'єкта віддаляється від меж області працездатності, які визначаються граничними допустимими значеннями вихідних параметрів об'єкта. Це реалізується за рахунок створення запасів міцності, зносостійкості (збільшення допусків на знос, збільшення площі опорних поверхонь, застосування зносостійких матеріалів тощо), жорсткості, вібростійкості, теплостійкості. Навантажувальне резервування дозволяє безперервно підвищувати надійність систем до необхідного рівня за рахунок підвищення працездатності та стійкості до відмов окремих елементів систем

В даному навчальному посібнику розглянемо тільки структурне резервування, оскільки інші види відносяться до специфічних умов

експлуатації технічних об'єктів. Варто зауважити, що в деяких випадках в об'єкті може бути використано декілька видів резервування одночасно (структурне і навантажувальне, структурне і часове тощо).

Основними поняттями, які варто розглянути при структурному резервуванні є:

основний елемент – елемент структури об'єкта, мінімально необхідний для виконання об'єктом заданих функцій;

резервний елемент – елемент, призначений для забезпечення працездатності об'єкта в разі відмови основного елемента. Природно, що резервний елемент повинен володіти характеристиками, аналогічними основному елементу. Тому при резервуванні використовують рівні за надійністю елементи.

Резервний елемент завжди включається паралельно до основного. До одного основного елемента може бути підключено безліч резервних. Розумна кількість резервних елементів визначається рівнем надійності, який варто забезпечити, затратами на резервування, масо-габаритними показниками тощо.

Кратність резервування – відношення кількості резервних елементів до кількості основних елементів об'єкта. Розрізняють однократне резервування, кратність якого дорівнює одиниці, і багатократне, кратність якого більше одиниці. Багатократне резервування застосовують у тих випадках, коли необхідно забезпечити досить високі показники надійності.

Резервування одного основного елемента одним резервним (тобто з кратністю 1:1) називається **дублюванням**.

Розглянемо тепер основні види структурного резервування.

За способом включення резерву виділяють:

Пасивне резервування – вид резерву, при якому відмова одного чи кількох об'єктів не впливає на його роботу. Пасивне резервування ще називають постійним резервуванням, оскільки при виході з ладу основного елемента і переході на резервний не відбувається перебудови в структурі

об'єкта (резервні елементи працюють нарівні з основними). При пасивному резервуванні елемент, що відмовив, не відключається, тому на етапі проектування варто врахувати, що може відбутися перерозподіл навантаження на елементи;

За цією ознакою виділяють три види об'єктів з пасивним резервом:

1) *системи з незмінним навантаженням*, у яких при відмові одного або декількох елементів не змінюється навантаження на елементи, що залишилися працездатними;

2) *системи з перерозподілом навантаження*, в яких при відмові хоча б одного елемента змінюється (зазвичай збільшується) навантаження на елементи, що залишилися працездатними;

3) *системи з резервуванням за навантаженням*, у яких при відмові хоча б одного елемента система виходить з ладу, але інтенсивність відмов елементів зменшена за рахунок того, що навантаження, яке повинен був сприймати один елемент, сприймається декількома елементами.

Оскільки резервні елементи функціонують нарівні з основними, тобто несуть навантаження, то такий резерв називають навантаженим.

Основними перевагами постійного резервування є: простота включення і миттєва готовність резерву до роботи, оскільки немає необхідності в підключенні резерву замість основного об'єкта (елемента).

Недолік постійного резервування полягає в тому, що з появою відмов у резерві змінюються параметри всієї системи, а це в свою чергу може привести до зміни режимів роботи.

При пасивному резервуванні найбільший виграш в надійності досягається в системах з незмінним навантаженням, найменший – у системах з резервуванням по навантаженню.

Динамічне резервування, вид резерву, при якому при відмові елемента відбувається перебудова структури схеми. Цей вид резерву ще називають *активним резервуванням*, при якому структура об'єкта така, що при появі відмови вона розбудовується і об'єкт відновлює свою працездатність

(відбувається саморемонт об'єкта). При цьому об'єкт активно реагує на появу відмови. У системах з активним резервуванням відбувається порушення роботи системи на час з моменту відмови робочого елемента (ділянки системи) до моменту включення резервного елемента. Там, де така перерва в роботі неприпустима принципово, метод пасивного резервування є єдино можливим.

Активне резервування свою чергу підрозділяється:

а) *резервування заміщенням*, при якому функції основного елемента передаються резервному тільки після відмови основного (частинний випадок активного резервування). При резервуванні заміщенням обов'язкова наявність комутуючого пристрою для підключення резервних елементів в момент виходу з ладу основного елемента. Переваги резервування заміщенням полягають в тому, що в більшій мірі може зберігатися ресурс роботи резервних елементів, не змінюються режими роботи об'єкта (елементів) при відмовах, відпадає необхідність у спеціальних регулюваннях при відмовах, з'являється можливість використовувати один резервний елемент для резервування декількох однотипних основних елементів.

До недоліків слід віднести: необхідність комутуючого пристрою для підключення резерву, додаткового часу на перемикання резерву і вихід його на режим (полегшений і ненавантажений резерви). Включення резервних елементів може здійснюватися вручну або автоматично (автоматичне резервування);

б) *ковзке резервування*, при якому декілька основних елементів резервується одним або декількома резервними, кожен з яких може замінити будь-який основний (тобто групи основних і резервних елементів ідентичні). Ковзне резервування дозволяє при відносно невеликих витратах (так як кількість резервних блоків менше кількості основних) і незначних збільшеннях ваги і габаритів приладу підвищити надійність об'єкта.

За станом резерву:

- **навантажене резервування**, при якому резервні елементи (або один з них) постійно працюють в режимі основного елемента, тобто загальне навантаження елемента, блоку чи системи розділене на основні та резервні елементи. Час переходу резервних елементів в робочий стан найменший;

- **полегшене резервування**, при якому резервні елементи (принаймні один з них) працюють в менш навантаженому режимі порівняно з основними. Ресурс роботи резервних елементів витрачається з моменту включення об'єкта в роботу, але інтенсивність витрати до підключення значно нижче ніж у основних елементів. Тому закон розподілу часу їх безвідмовної роботи дещо відрізняється від розподілу часу безвідмовної роботи основних елементів. Час переходу резервних елементів в робочий стан більше, ніж при навантаженому резерві;

- **ненавантажене резервування**, резервування, при якому резервні елементи до початку виконання ними функцій знаходяться в ненавантаженому режимі. Ресурс роботи ненавантаженого резерву починає витрачатися лише з моменту його включення. Закон розподілу часу безвідмовної роботи резервних елементів такий же, як і в аналогічних типів елементів у режимі зберігання. Час переходу резервних елементів в робочий стан найбільший.

За схемою включення резерву виділяють:

Загальне резервування, що передбачає резервування об'єкта в цілому. В даному випадку резервним елементом буде ідентичний об'єкт РЕА;

Загальне резервування має деякі модифікації. **Автономне резервування** є одним з варіантів загального. Воно полягає в застосуванні декількох незалежних об'єктів, що виконують одну і ту ж задачу. Кожен з цих об'єктів має свій вхід та вихід і зазвичай незалежні джерела живлення. Прикладом системи з автономним резервуванням може служити сукупність пристроїв телевимірювання, які виконують одну і ту ж задачу, але кожен пристрій має свої вхідні датчики, записуючі (вихідні) блоки і джерела живлення.

Автономне резервування зазвичай застосовується при проведенні експериментів в системах відповідального призначення.

Автономне резервування завжди є пасивним видом резервування. Різниця між загальним і автономним резервуванням наведена на рис. 4.2.



а) Загальне резервування функціональної ланки системи

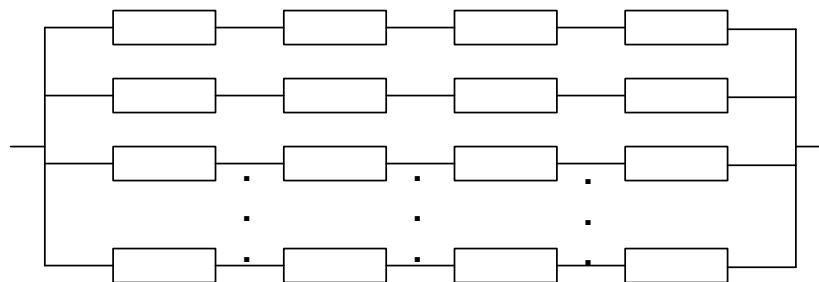


б) Автономне резервування функціональної ланки системи

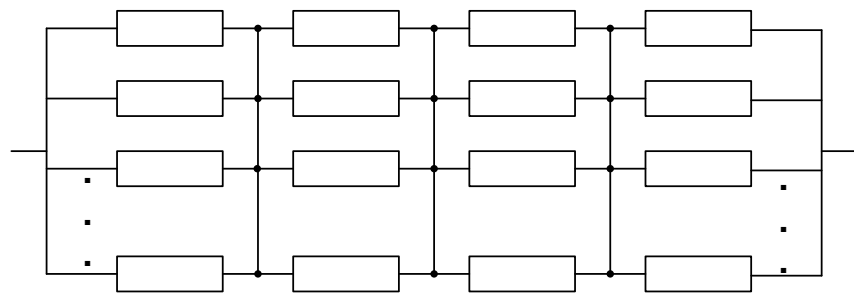
Рис. 4.2. Види загального резервування технічних систем

Роздільне резервування, передбачає резервування окремих елементів об'єкта або груп елементів (рис. 4.3.).

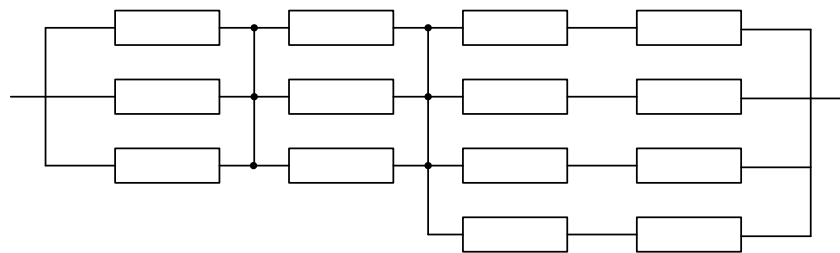
Змішане резервування, яке передбачає поєднання різних видів резервування.



а) Загальний резерв



б) Роздільний резерв



в) Змішаний резерв

Рис. 4.3. Види резервування за схемою включення резерву

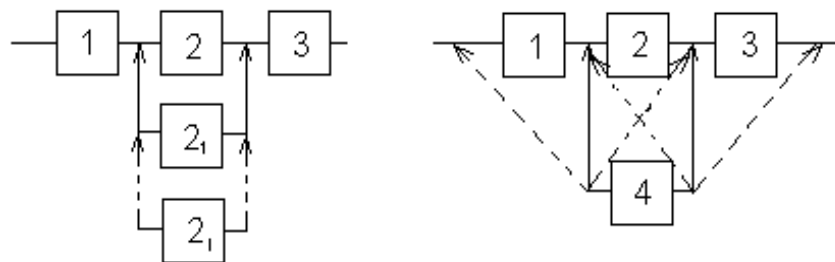


Рис. 4.4. Ковзке резервування

На рис. 4.4 показана схема ковзного резервування.

4.6. Розрахунок надійності систем з резервуванням

Розрахунок кількісних характеристик надійності систем з резервуванням окремих елементів або груп елементів багато в чому визначається видом резервування. Нижче розглядаються схеми розрахунків для найбільш поширених випадків простого резервування, до яких шляхом перетворень може бути приведена і структура змішаного резервування. При цьому розрахункові залежності отримані без урахування надійності перемикаючих пристроїв, що забезпечують перерозподіл навантаження між

основними та резервними елементами (тобто для "ідеальних" перемикачів). В реальних умовах введення перемикачів в структурну схему необхідно враховувати і в розрахунку надійності систем.

Розрахунок систем з навантаженим резервом здійснюється за формулами послідовного і паралельного з'єднання елементів аналогічно розрахунку комбінованих систем. При цьому вважається, що резервні елементи працюють у режимі основних як до, так і після їх відмови, тому надійність резервних елементів не залежить від моменту їх переходу з резервного стану в основний і дорівнює надійності основних елементів.

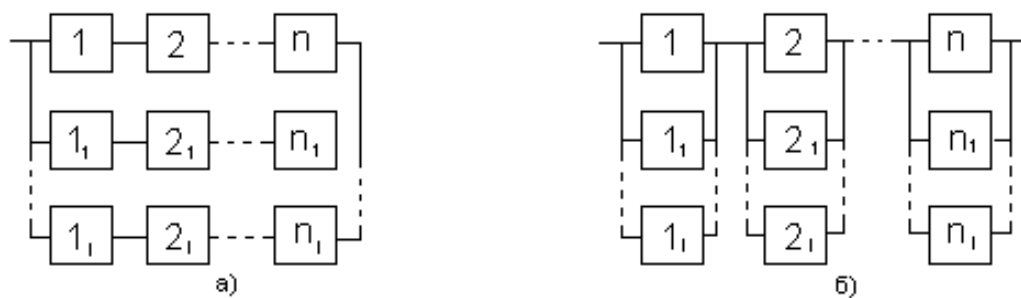


Рис. 4.5. Загальний та роздільний навантажений резерв

$$q_i = \prod_{j=1}^m q_j = \prod_{j=1}^m (1 - p_j) \quad p_i = 1 - q_i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j) \quad p_{\Sigma} = 1 - \prod_{i=1}^m \left[1 - \prod_{j=1}^n p_j \right]$$

для випадку рівнонадійних елементів

$$p_{\Sigma} = 1 - \left[1 - (1 - q)^n \right]^m$$

З отриманих виразів випливає, що імовірність безвідмовної роботи системи з загальним резервуванням при нескінченному числі послідовно з'єднаних елементів гілки зменшується до нуля навіть у тому випадку, коли число паралельних гілок збільшується до нескінченності.

Випадок роздільного резервування представлений на рис. 4.5 б. В даному випадку для окремої групи з m паралельно включених елементів може бути застосоване вираз:

$$p_i = 1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j) = 1 - \prod_{i=1}^m q_i \quad p_{\Sigma} = \prod_{i=1}^n p_i = \prod_{i=1}^n \left[1 - \prod_{j=1}^m (1 - p_j) \right] = \prod_{j=1}^m \left(1 - \prod_{i=1}^n q_i \right)$$

для випадку рівнонадійних елементів

$$p_{\Sigma} = \left[1 - (1 - p)^m \right]^n = (1 - q^m)^n .$$

З отриманого виразу випливає, що імовірність безвідмовної роботи наближається до одиниці при безмежному збільшенні числа резервних елементів у групах, навіть якщо число послідовно з'єднаних груп також наближається до нескінченності, тобто роздільне резервування володіє певною перевагою перед загальним в сенсі підвищення надійності.

Імовірність появи відмови:

$$Q_{\text{обц}} = \left[1 - (1 - q)^n \right]^m \quad Q_{\text{раз}} = 1 - (1 - q^m)^n .$$

Розкладаючи праві частини рівності в степеневий ряд і враховуючи, що при нормальній експлуатації $q \ll 1$, отримуємо спрощені вирази:

$$Q_{\text{обц}} \approx n^m q^m \quad Q_{\text{раз}} \approx n q^m ,$$

остаточно для кількісної оцінки способів резервування можна записати

$$Q_{\text{обц}} / Q_{\text{раз}} \approx n^m q^m / n q^m = n^{m-1} .$$

З отриманого виразу випливає, що роздільне резервування дає вигреш в безвідмовності.

На практиці може виникнути завдання, обернене розглянутим: відома імовірність безвідмовної роботи однієї гілки P , потрібно знайти число паралельних гілок m .

Для випадку загального резервування скористаємося виразом

$$1 - p_{\text{общ}} = (1 - p)^{m_{\text{общ}}} \Rightarrow m_{\text{общ}} = \frac{\lg(1 - p_{\text{общ}})}{\lg(1 - p)}$$

$p_{\text{общ}} = p_z$ – необхідна імовірність безвідмовної роботи зарезервованого об'єкта. Для випадку роздільного резервування скористаємося виразом

$$p^{1/n_{\text{раз}}} = 1 - (1 - p)^{m_{\text{раз}}} \Rightarrow m_{\text{раз}} = \frac{\lg(1 - p^{1/n_{\text{раз}}})}{\lg(1 - p)}$$

$p_{\text{общ}} = p_z$ – необхідна імовірність безвідмовної роботи зарезервованого об'єкта.

Порівнюючи між собою різні системи резервування, неважко прийти до висновку, що при загальному резервуванні для повної відмови об'єкта досить, щоб в кожному з ланцюгів вийшло з ладу по одному елементу.

При роздільному і змішаному резервування відмова об'єкта відбувається тільки в тому випадку, якщо в кожній групі вийдуть з ладу всі елементи.

На закінчення відзначимо, що резервування може бути з відновленням будь-якого основного і резервного елемента в процесі експлуатації об'єкта, так зване резервування з відновленням, і без відновлення елементів, так зване резервування без відновлення. Сам резервний елемент може бути відновлюваним і невідновлювальним.

Кількісно підвищення надійності системи в результаті резервування або застосування високонадійних елементів можна оцінити **за коефіцієнтом виграшу надійності**, що визначається як відношення показника надійності до резервування та після резервування системи. Наприклад, для системи з n послідовно з'єднаних елементів після резервування одного з елементів (k -го) аналогічним по надійності елементом коефіцієнт виграшу надійності по імовірності безвідмовної роботи складе

$$G_p = \frac{P'}{P} = \frac{p_1 p_2 \dots p_{k-1} [1 - (1 - p_k)^2] p_{k+1} \dots p_n}{p_1 p_2 \dots p_{k-1} p_k p_{k+1} \dots p_n} = \frac{1 - (1 - p_k)^2}{p_k} = 2 - p_k.$$

З формули випливає, що ефективність резервування тим більша, чим менша надійність резервного елемента. Отже, при структурному резервуванні максимального ефекту можна досягти при резервуванні найбільш ненадійних елементів або груп елементів.

У загальному випадку при виборі елемента або групи елементів для підвищення надійності або резервування необхідно виходити з умови забезпечення при цьому максимального ефекту.

Представляє практичний інтерес облік впливу надійності пристрою комутації на загальну надійність резервної системи. Будемо вважати відмови комутуючого пристрою і ланцюгів незалежними. Для цього випадку справедливо

$$P_{p.o} = P_{рез} P_{\kappa}$$

де $P_{рез}$ – імовірність безвідмовної роботи ланцюгів резервування; P_{κ} – імовірність безвідмовної роботи комутуючого пристрою.

Скориставшись виразом, для випадку загального резервування можна записати

$$P_{p.o.общ} = 1 - \prod_{u=1}^m \left(1 - p_{\kappa} \prod_{j=1}^n p_j \right) = 1 - \prod_{i=1}^m \left[1 - (1 - Q_{\kappa}) \prod_{j=1}^n (1 - q_i) \right]$$

для випадку роздільного резервування

$$P_{p.o.раз} = \prod_{j=1}^n p_j = \prod_{j=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{\kappa} p_i) \right) = \prod_{j=1}^n \left(1 - \prod_{i=1}^m (1 - (1 - Q_{\kappa})(1 - q_i)) \right)$$

$$\text{де } p_j = 1 - \prod_{i=1}^m (1 - p_{\kappa} p_i)$$

При виведенні вирази передбачалося, що комутуючі пристрої є у всіх ланцюгах і вони всі рівнонадійні. До комутаторів висувають певні вимоги по швидкодії та надійності. В ідеалі, перемикачі повинні бути абсолютно надійними (мати імовірність безвідмовної роботи наближену до одиниці).

Порівнюючи два способи резервування (загальне і роздільне), неважко прийти до висновку, що при роздільному резервуванні знадобиться більша кількість комутуючих пристроїв. У той же час роздільне резервування дозволяє отримати суттєві переваги у підвищення безвідмовності порівняно з загальним резервуванням, дозволяє застосовувати більш гнучкі та економічні схеми резервування з використанням пристроїв для аналізу відмов і вибору резерву.

Внаслідок цього виникають певні вимоги до надійності комутуючих пристроїв, оскільки їх низька надійність може істотно вплинути на надійність всього об'єкта. Очевидно, що роздільне резервування заміщенням буде виправданим тільки тоді, коли надійність таким чином зарезервованого об'єкта буде не нижче надійності об'єкта з загальним резервуванням, тобто повинна виконуватися нерівність $P_{раз} > P_{общ}$.

Для відновлюваного об'єкта при найпростішому потоці відмов і безвідмовному комутуючим пристрої імовірність безвідмовної роботи при ковзному резервування визначається виразом

$$P_c(k) = \prod_{i=0}^{n-1} \Lambda_j \sum_{i=0}^{n-1} \frac{e^{-\Lambda_i}}{\Lambda_i \prod_{\substack{l=0 \\ l \neq i}}^{n-1} (\Lambda_l - \Lambda_i)}$$

де k – число основних функціонально необхідних елементів;

$n-1$ – число резервних елементів;

Λ_j – інтенсивність переходу об'єкта з стану H_j в стан H_{j+1} . Кількість станів відповідає числу елементів, що вийшли з ладу.

Для випадку рівнонадійних комутуючих пристроїв і ненавантаженого резерву вираз прийме вигляд:

$$P^{н.н.}_c(k) = e^{-k(\lambda - \lambda_k)t} \sum_{j=0}^{n-1} \frac{[k(\lambda + \lambda_k)t]^j}{j!}.$$

Доцільність застосування ковзного резервування встановлюється порівнянням надійності об'єкта з резервом і без нього.

Для системи з послідовним з'єднанням n елементів при загальному резервуванні з кратністю l

$$P_{o\sigma} = 1 - (1 - P)^{l+1} = 1 - (1 - \prod_{i=1}^n p_i)^{l+1}.$$

Зокрема, при дублюванні ($l=1$)

$$P_{o\sigma} = 1 - (1 - P)^2 = P(2 - P).$$

При роздільному резервуванні

$$P_{раз} = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)^{l+1}],$$

а при роздільному дублюванні ($l=1$)

$$P_{\text{раз}} = \prod_{i=1}^n [1 - (1 - p_i)^2] = \prod_{i=1}^n p_i (2 - p_i) = p \prod_{i=1}^n (2 - p_i).$$

Тоді коефіцієнти виграшу надійності по імовірності безвідмовної роботи при дублюванні

$$G_{\text{об}} = \frac{P_{\text{об}}}{P} = 2 - P, \quad G_{\text{раз}} = \frac{P_{\text{раз}}}{P} = \prod_{i=1}^n (2 - p_i),$$

звідки випливає, що роздільне резервування ефективніше загального.

Якщо резервні елементи до їх включення абсолютно надійні, то для системи з ненавантаженим резервом кратності l (всього елементів $l+1$)

$$Q = \frac{1}{(l+1)!} \prod_{i=1}^{l+1} q_i; \quad P = 1 - \frac{1}{(l+1)!} \prod_{i=1}^{l+1} (1 - p_i),$$

тобто ймовірність відмови в $(l+1)!$ разів менше, ніж при навантаженому.

Для ідентичних по надійності основного і резервного елементів

$$P = 1 - \frac{1}{(l+1)!} (1 - p)^{l+1}.$$

При експоненціальному розподілі напрацювання (найпростішому потоці відмов) в випадку $\lambda t \ll 1$ можна скористатися наближеною формулою

$$P \approx 1 - \frac{(\lambda t)^{l+1}}{(l+1)!}.$$

При ненавантаженому резервуванні середнє напрацювання на відмову

$$T = \sum_{i=1}^{l+1} T_{0i},$$

а для ідентичних елементів $T_0 = nT_{0i}$.

Полегшене резервування використовується при інерційність перехідних процесів, що відбуваються в елементі при його переході з резервного в основний режим, і недоцільність застосування навантаженого резервування через недостатній вигравш в надійності. Очевидно, полегшений резерв займає проміжне положення між навантаженим і ненавантаженим.

Точні вирази для розрахунку надійності систем при полегшеному резервуванні досить громіздкі і неоднозначні, однак при експоненціальному розподілі напрацювання справедлива наближена формула

$$\begin{aligned} P &= \frac{1}{(l+1)!} \lambda (\lambda + \lambda_0)(\lambda + 2\lambda_0) \dots [\lambda + l\lambda_0] \cdot t^{l+1} = \\ &= \frac{t^{l+1}}{(l+1)!} \prod_{i=0}^l (\lambda + i\lambda_0), \end{aligned}$$

де λ_0 – інтенсивність відмов елементів в полегшеному режимі, l - кратність резервування.

Ковзне резервування використовується для резервування кількох однакових елементів системи одним або декількома однаковими резервними. Очевидно, відмова системи станеться, якщо із загальної кількості ідентичних елементів (основних та резервних) число відмовивших елементів перевищує число резервних. Розрахунок імовірності безвідмовної роботи систем з ковзним резервуванням аналогічний розрахунку систем типу "m з n".