



УДК 621.3.019.3

Ю.П. БУЦЕНКО*, Ю.Г. САВЧЕНКО*

САМОКОНТРОЛЬ ТЕХНІЧНОГО СТАНУ В ЕЛЕКТРОННИХ ПРИСТРОЯХ ІЗ СТРУКТУРНОЮ НАДЛИШКОВІСТЮ

*Національний технічний університету України «Київський політехнічний інститут імені Ігоря Сікорського», м. Київ, Україна

Анотація. У більшості випадків введення апаратної надлишковості використовується як засіб підвищення надійності невідновлювального обладнання, тобто такого, яке неможливо за конструктивними особливостями або умовами експлуатації ремонтувати. У цьому випадку можна покращити не лише ймовірність безвідмовної роботи, але й збільшити час напрацювання до відмови. У статті показано, що у випадку введення надлишковості для відновлюваної апаратури виникають додаткові можливості для організації самоконтролю (самодіагностики) технічного стану обладнання. На прикладі популярної структури NonStop фірми Tandem розглянуто конкретні рішення для утворення сигналів індикації технічного стану структури в реальному часі у разі виникнення перед аварійних та аварійних ситуацій. Показано, що зазначені додаткові можливості практично відсутні в мажоритарних структурах у випадку 3-кратної надлишковості та суттєво покращуються зі збільшенням рівня надлишковості. Ще одна важлива та корисна особливість таких структур – це адаптація алгоритму відновлення сигналів при відмові частини обладнання у структурі. Так, структура типу «тандем» після відмови одного з компонентів при такій адаптації переходить до процедури відновлення «2 з 3», що збільшує ймовірність безвідмовної роботи за рахунок збільшення кількості працездатних станів. Проведено аналіз структур типу «тандем» для різних стартових технічних станів. Отримані аналітичні вирази для середнього часу переходу із схеми «тандем» до схеми із трикратною надлишковою надлишковою та у подальшому до наступного технічного стану без надлишковості, для середнього часу зворотних переходів при наявності процедур відновлення. Отримані вирази для відповідних коефіцієнтів готовності.

Ключові слова: структурна надлишкова надлишкова, відмовостійкість, самоконтроль, адаптація до відмов.

Аннотация. Введение аппаратной избыточности в большинстве случаев используется как метод повышения надежности неремонтируемого (невосстанавливаемого) оборудования. В этом случае может быть достигнуто не только улучшение такого показателя, как вероятность безотказной работы, но и увеличение наработки до отказа. В статье показано, что в случае введения избыточности для восстанавливаемой аппаратуры возникают дополнительные возможности для организации самоконтроля (самодиагностики) технического состояния оборудования. На примере популярной структуры NonStop фирмы Tandem рассмотрены конкретные решения для выработки сигналов индикации в реальном времени технического состояния структуры в случае возникновения предаварийных и аварийных ситуаций. Показано, что указанные дополнительные возможности практически отсутствуют в мажоритарных структурах в случае 3-кратной избыточности и существенно улучшаются при переходе к структурам с большей избыточностью. Еще одна важная и полезная особенность таких структур – это адаптация алгоритма восстановления сигналов при отказе части оборудования в структуре. Так, структура типа «тандем» после отказа одного из компонентов при такой адаптации переходит к процедуре восстановления «голосованием «2 из 3», что увеличивает вероятность безотказной работы за счет увеличения количества работоспособных состояний. Проведен анализ структур типа «тандем» для различных стартовых технических состояний. Получены аналитические выражения для среднего времени перехода из схемы «тандем» к схеме с трехкратной избыточностью и в дальнейшем к следующему безыз-

быточному состоянию, для среднего времени обратных переходов при наличии восстанавливающих процедур. Получены выражения для соответствующих коэффициентов готовности.

Ключевые слова: структурная избыточность, отказоустойчивость, самоконтроль, адаптация к отказам.

Abstract. The introduction of hardware redundancy in most cases is used as a method of increasing a reliability of non-repairable (non-recoverable) equipment. In this case, not only the improvement of such an indicator as the probability of failure-free operation can be achieved, but an increase in MTBF as well. The article shows that in the case of introducing redundancy for the restored equipment, additional opportunities arise for organizing self-diagnosis (self-monitoring) of the technical condition of the equipment. On the example of the structure of the popular NonStop solution derived by the Tandem company, specific proposals for the development of real-time signals for indicating the current technical state of the structure in the event of pre-emergency or emergency situations are considered. It is shown, that aforementioned possibilities are practically absent in the majority structures in the case of triple redundancy and significantly improve upon the transition to structures of higher redundancy. Another important and useful feature of such structures is the ability to adapt the signal generation algorithm when a part of the equipment fails in the structure. In the case of “Tandem”-type structure after the failure of one of the elements, the implementation of the adaptation algorithm leads to a structure with triple redundancy of the majority type, which has significant advantages over double-redundant. The analysis of “Tandem”-type structures for various starting positions was carried out. Analytical expressions are obtained for the average transition times from the “Tandem” scheme to the triple redundancy scheme (hereinafter, to the double redundancy scheme with subsequent absence of redundancy), the average reverse transition times in the presence of recovery possibilities, and, based on them, coefficients of readiness are calculated.

Keywords: hardware redundancy, failure-free operation, self-diagnosis, adaptation to failures.

DOI: 10.34121/1028-9763-2020-1-140-148

1. Вступ

Від першої революційної на той час публікації [1], де була сформульована проблема синтезу надійних електронних пристроїв із ненадійних компонентів та запропоновано рішення цієї проблеми, минуло досить багато часу. Але й сьогодні так званий мажоритарний метод залишається одним із найбільш популярних щодо реального практичного застосування завдяки його простоті та ефективності з точки зору суттєвого підвищення показників надійності апаратури або електронних систем у цілому. Ідея методу Джона фон Неймана доволі проста і полягає у введенні структурної надлишковості шляхом заміни одного компонента системи n компонентами, а сигнал на виході структури утворювати як результат «голосування» вихідних сигналів компонентів за принципом простої більшості (рис. 1). На цьому рисунку $n = 3$, а ВО – це так званий відновлюючий орган, який здійснює процедуру «голосування» вхідних сигналів x_1, x_2, x_3 .

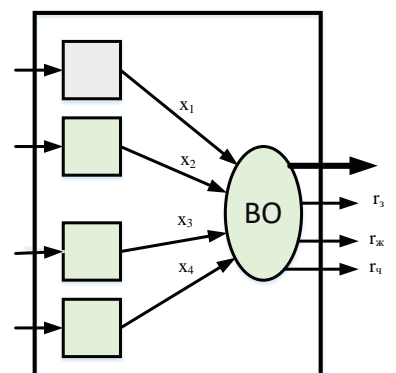
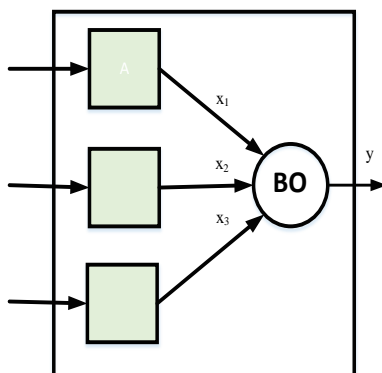


Рисунок 1 – Мажоритарна структура Рисунок 2 – Структура типу «тандем»

Компонентами структури можуть бути пристрої різноманітної складності від найпростіших логічних схем до комп'ютерів або сегментів телекомунікаційних мереж, окремих серверів тощо. Так, наприклад, за аналогічним принципом побудовані кластери «високої готовності», що широко застосовуються у банківській сфері. До речі, одна з найбільш поширених технологій побудови так званих промислових комп'ютерів базується саме на застосуванні мажоритарного методу (Tandem Integrity). У системах фірми Stratus [2] основна увага зосереджена на забезпеченні ймовірності безвідмовної роботи структури на основі 2-кратної надлишковості.

Слід зауважити, що застосування мажоритарних структур із самого початку було орієнтовано, в основному, на апаратуру, яка не обслуговується, тобто за призначенням та умовами експлуатації компоненти, що відмовили, не можуть бути замінені справними (новими). Сьогодні ситуація значною мірою змінилася, і структурна надлишковість використовується також у відновлювальних (таких, що можуть ремонтуватися) системах. У цих випадках надлишкові компоненти природно розглядати як «запасні», а рівень надлишковості – як рівень «запасу міцності» по аналогії з механічними конструкціями.

Мета статті – проаналізувати особливості структур з апаратною надлишковістю саме з точки зору поліпшення умов експлуатації за рахунок можливості організації сигналізації ознак зміни технічного стану (ТС) системи та підвищити рівень безпеки автоматизованих систем керування реальними об'єктами при виникненні аварійних та перед аварійних станів.

2. Порівняльний аналіз структур із надлишковістю

Якщо розглядати структуру (рис. 1) як електронний елемент або модуль, неподільний на менші (дрібніші) компоненти, то ймовірність того, що сигнал на його виході є правильним, складає

$$P = p^3 + 3p^2(1 - p),$$

де p – ймовірність безвідмовної роботи одного із трьох компонентів структури.

Ймовірність помилки в результаті виникнення несправності відповідно буде

$$Q = 1 - P = (1 - p)^3 + 3(1 - p)^2 p.$$

Для реальних значень p та часових інтервалів t , для яких ця ймовірність обчислюється, величина Q може бути доволі малою та такою, що задовольняє виробника або користувача. Наприклад, якщо $P = 0,999$, то $Q = 0,001$. Але, на наш погляд, необхідно ще обов'язково зважати на особливості застосування або призначення відповідної апаратури. Мова йде про небезпеку, яка з'являється при виникненні несправності. Справа у тому, що умовний чи реальний користувач не знає (та не може у принципі знати), чи сигнал на виходах пристрою правильний, чи помилковий, оскільки за логікою роботи мажоритарної схеми немає різниці між станом, коли із трьох компонентів структури (рис. 1) справними є два або три, або ці ж компоненти відмовили і сигнал на виходах є помилковим, а, відповідно, кінцевий результат на виходах структури теж помилковий (наприклад, для двійкових сигналів 0 замість 1 або 1 замість 0). Природно такі помилки назвати *прихованими*.

Слід пояснити більш детально, що таке прихована помилка (несправність), наприклад, конкретно у мажоритарних структурах. Якщо рівень надлишковості $n = 3$, при виникненні помилки на одному із трьох компонентів структури на входах відновлюючого органу (ВО) може бути одна з таких комбінацій: 011, 101, 110, 100, 010, 001. Комбінаціям 011, 101, 011 відповідає відновлений сигнал $y = 1$, а комбінаціям 100, 010, 001 – $y = 0$. Тобто, результуючий сигнал y залишається правильним. Але при виникненні подвійної або потрійної помилки (коли два або усі три компоненти структури відмовлять) сигнал на виході

буде помилковим. Але ж жодних ознак виникнення помилки (можливо, дуже небезпечної) немає, оскільки доступним залишається лише сигнал на виході структури.

Головне, на що необхідно наголосити, ця ситуація є надзвичайно небезпечною у випадках, коли мажоритарна схема використовується як засіб автоматичного керування або регулювання реальними фізичними об'єктами, наприклад, на залізничному транспорті при зміні колії, по якій рухається потяг, або в інших аналогічних за рівнем небезпеки ситуаціях. Виникає питання, як запобігти такій ситуації?

Виявляється, ситуацію можна суттєво змінити, якщо збільшити рівень надлишковості до $n = 4$. Розглянемо відповідну структуру (рис. 2), яка на сьогодні стала практично класичною схемою забезпечення відмовостійкості Tandem. У випадку її застосування вхідна інформація обробляється паралельно двома парами ідентичних процесорів, результати обчислень у кожній парі неперервно порівнюються, і в разі неспівпадіння результатів відповідна пара миттєво вимикається від участі в утворенні результату. Це схема, яка відповідає лінії так званої Nonstop. Розглянемо більш детально логіку формування результату для спрощення на прикладі однобітових сигналів на виходах компонентів, які утворюють структуру (табл. 1).

Таблиця 1 – Істинності функцій ВО

x_1	x_2	x_3	x_4	y	r_3	$r_{жс}$	r_4
0	0	0	0	0	1	0	0
0	0	0	1	0	0	1	0
0	0	1	0	0	0	1	0
0	0	1	1	?	0	0	1
0	1	0	0	0	0	1	0
0	1	0	1	?	0	0	1
0	1	1	0	?	0	0	1
0	1	1	1	1	0	0	1
1	0	0	0	0	0	1	0
1	0	0	1	?	0	0	1
1	0	1	0	?	0	0	1
1	0	1	1	1	0	1	0
1	1	0	0	?	0	0	1
1	1	0	1	1	0	1	0
1	1	1	0	1	0	1	0
1	1	1	1	1	1	0	0

Знаки запитання в таблиці природно інтерпретувати як ознаку невизначеності щодо утворення відновленого сигналу. Такі ситуації однозначно можна віднести до аварійних, і будь-яке використання вихідних сигналів має бути заблоковано.

Інші сигнали будемо вважати ознаками відповідних технічних станів структури з надлишковістю. Так, стан, коли всі чотири сигнали однакові (0000 або 1111), відповідає ситуації, коли всі компоненти структури справні і вихідний сигнал правильний, помилки немає. Якщо передбачити сигнал сигналізації про технічний стан структури в цілому, то природно цей стан вважати «зеленим», тобто таким, що дозволяє використовувати сигнал на інформаційному виході структури за призначенням. Відповідну логічну функцію можна записати у вигляді

$$r_3 = x_1 x_2 x_3 x_4 \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} . \quad (1)$$

Комбінації сигналів 0011, 0101, 0110, 1001, 1010, 1100 явно свідчать про несправність структури і тому мають бути заборонені для подальшого використання. Це «червона» сигналізація. Відповідна функція

$$r_4 = x_1 x_2 \bar{x}_3 \bar{x}_4 \vee \bar{x}_1 \bar{x}_2 x_3 x_4 \vee (x_1 \oplus x_2)(x_3 \oplus x_4) . \quad (2)$$

Нарешті третя група технічних станів. Це комбінації 0010, 0001, 0100, 1000, 0111, 1000, 1011, 1101, 1110. Поява їх відповідає наявності несправності в одній із пар структури, але інформаційний сигнал утворюється ще правильний. Вочевидь, сигнал сигналізації для цієї групи технічних станів має бути умовно «жовтим». Відповідні логічні функції для утворення сигналів, що інформують про технічний стан структури, задаються таблицею, яку у цьому випадку слід інтерпретувати як таблицю істинності. Відповідна логічна функція

$$r_{жс} = \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \vee \overline{x_1 x_2 x_3 x_4} \quad (3)$$

Повернемось тепер до прихованих помилок. Для оцінки ймовірності їх появи буде-мо розглядати лише «зелену» та «жовту» групи технічних станів. Для першої із груп мож-на записати

$$Q_3 = (1 - p)^4 + p^4.$$

Для другої

$$Q_{жс} = 4p(1 - p)^3 + 4p^3(1 - p).$$

Для утворення відповідних сигналів, які блокують автоматичне керування об'єктом або попереджають про відмову частини обладнання (зменшення запасу надійності), крім схем відновлення інформаційного сигналу, структура повинна бути доповнена логічними схемами, що реалізують функції (1), (2) та (3). Зазначимо тут, що наведені міркування від-повідують припущенню, що поява несправностей у компонентах є подією незалежною, тому ситуації, коли одночасно виникає дві або три несправності, є малоймовірною по-дією і тому нею можна знехтувати. Звичайно, таке припущення не завжди відповідає дійс-ності, але заради спрощення аналізу його можна прийняти.

Для відновлювальних електронних систем (тобто таких, які допускають обслугову-вання в період виконання системою заданих функцій) надійність, очевидно, повинна ви-значатись з урахуванням не лише функції розподілу ймовірності безвідмовної роботи ком-понентів, а й функції розподілу часу відновлення (заміни несправних компонентів у «жов-тій» та « червоній» зонах технічних станів). У цьому випадку наявність допоміжної сига-лізації може суттєво поліпшити загальні показники надійності за рахунок кардинального скорочення часу пошуку несправних компонентів. З практики обслуговування електронної апаратури добре відомо, що у більшості випадків лівова частина часу на відновлення при-падає саме на пошук несправного компонента, а сама процедура відновлення шляхом за-міни несправного компонента справним займає порівняно мало часу. Тому, коли мова йде не лише про ймовірність безвідмовної (безпомилкової) роботи, але й коефіцієнт готовності, який за існуючими стандартами є основним показником надійності для систем цього класу, то фактор часу відновлення справного технічного стану виявляється, по суті, вирішальним.

Розглянемо структуру (рис. 2) з точки зору організації контролю за її технічним станом. Будемо вважати, що початковою конфігурацією системи є «тандем»: дві пари од-накових компонентів, рішення про ТС контрольованої системи приймається за умови, що в початковий момент обидві пари видають на своїх виходах однакові сигнали. В той же час система знаходиться під впливом потоку відмов, який вважатимемо Пуассонівським одно-рідним, інтенсивності, залежної від кількості елементів у системі (структурі). Алгоритм функціонування тандема відрізняється від традиційного алгоритму відключення пари ком-понентів, у яких не співпадають сигнали на виходах: після відмови одного з компонентів пари система переходить в мажоритарну структуру «2 з 3» (триканального резервування з голосуванням виходів).

Нехай контрольована система може функціонувати у різних режимах, які у загаль-ному випадку відрізняються інтенсивністю потоків відмов. Розглянемо процес деградації системи за відсутності умов відновлення (заміни або ремонту компонентів, що відмовили).

Функціонування системи відбувається у режимі дискретного часу, інтенсивності потоків відмов є $4\lambda_1$ та $4\lambda_2$ (для повного складу системи та різних режимів функціонуван-ня). Відповідно, для проміжку часу Λ між включеннями системи контролю ймовірності відмов є P_1 та P_2 . Тоді можна виділити такі варіанти.

I. Переключення режимів відбувається детермінованим чином у моменти включення. Час до виникнення першої відмови (переходу з режиму тандем до триканального режиму) є випадкова величина, розподіл якої має такий вигляд за припущенням, що в початковий момент система знаходиться у режимі тандема:

$$\begin{aligned} P\{\xi_1 = \Lambda\} &= P_1, P\{\xi_1 = 2\Lambda\} = (1 - P_1)P_2, \dots \\ P\{\xi_1 = (2k + 1)\Lambda\} &= (1 - P_1)^k (1 - P_2)^k P_1, P\{\xi_1 = (2k + 2)\Lambda\} = \\ &= (1 - P_1)^{k+1} (1 - P_2)^k P_2. \end{aligned}$$

Звідки маємо $M\xi_1 = \frac{2 - P_1}{P_1 + P_2 - P_1P_2} \Lambda$.

Значимо, що у випадку, коли початковий режим інший, то аналогічним чином маємо

$$M\xi_2^2 = \frac{(2 - P_2)\Lambda}{P_1 + P_2 + P_1P_2},$$

а коли початковий (стартовий) стан не є повністю визначеним (з імовірністю Q – перший, з імовірністю $1 - Q$ – другий), отримуємо

$$M\xi_3 = \frac{2 - QP_1 - (1 - Q)P_2}{P_1 + P_2 - P_1P_2} \Lambda.$$

Як зазначалося вище, відмова одного з компонентів тандема призводить до структури з потрійним резервуванням.

Позначивши випадковий час деградації структури із триканальної до двоканальної через ξ_3 , аналогічно до попереднього можна записати

$$M\xi_3 = \frac{2 - Q_1P_1^* - (1 - Q_1)P_2^*}{P_1^* + P_2^* - P_1^*P_2^*} \Lambda.$$

Зауважимо, що ймовірності P_1^* та P_2^* істотно відрізняються від P_1 та P_2 у випадку найпростішого однорідного потоку з інтенсивністю 3λ на відміну від попереднього випадку.

З теоретичної точки зору, можна було б розглядати й процес подальшої деградації системи, тобто переходу до двоканальних та одноканальних структур. Але практично вже двоканальну структуру слід вважати фінальною в тому розумінні, що поява на входах відновлюючого органу двох неспівпадаючих сигналів унеможливує відновлення правильного сигналу і свідчить про відмову структури в цілому. Тобто, двоканальний варіант має право на життя лише як спосіб підвищення достовірності отриманого результату обробки інформації, а не ймовірності безвідмовної роботи. Очевидно, в ситуації, коли на виходах пари компонентів, які ще залишилися, умовно кажучи, «живими», сигнали не співпадають, без додаткової інформації про їх технічний стан неможливо віддати перевагу жодному із двох сигналів як правильному. (До речі, таку додаткову інформацію можна отримати лише від засобів апаратного самоконтролю компонента структури, але такі конфігурації у цій статті ми не розглядаємо). Тобто, якщо вважати, що інформація про технічний стан компонента структури обмежена для ВО лише значеннями інформаційних сигналів на його виході, то слід обмежити розгляд деградаційного процесу переходом структури у двоканальний режим.

II. Розглянемо тепер більш загальний випадок. Нехай існує N режимів функціонування структури R_1, R_2, \dots, R_N , для кожного з яких характерний стаціонарний потік подій з інтенсивністю $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_N$ відповідно, що викликає відмову одного з компонентів структури протягом одного проміжку часу з імовірностями $p_1^{(k)}, p_2^{(k)}, \dots, p_N^{(k)}$, $k = 2, 3, 4$ є кількість функціонуючих на даному проміжку часу компонентів. Припустимо, що на довільному проміжку дискретного часу ймовірність роботи в одному з указаних режимів складає q_1, q_2, \dots, q_N відповідно. Зазначимо, що такий підхід дозволяє уникнути розгляду системи у припущенні про переключення режимів керуючим ланцюгом Маркова, веде до невиправданого збільшення фазового простору задачі. На практиці можна стверджувати про існування у вищезгаданого керуючого ланцюга стаціонарного розподілу $\bar{S} = \{\rho_1, \rho_2, \dots, \rho_N\}$. У такому випадку функціонування структури описується ланцюгом Маркова з дискретним часом та станами A_1, A_2, A_3, A_4 (описують функціонування структури з чотирма, трьома, двома та одним працездатним компонентом відповідно). Перехідна матриця при цьому має вигляд

$$P = \begin{pmatrix} p_{11}p_{12} & 0 & 0 \\ 0 & p_{22}p_{23} & 0 \\ 0 & 0 & p_{33}p_{34} \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}, \text{ де}$$

$$p_{12} = \sum_{k=1}^N q_k p_k^{(4)}, \quad p_{11} = 1 - p_{12},$$

$$p_{23} = \sum q_k p_k^{(3)}, \quad p_{22} = 1 - p_{23},$$

$$p_{34} = \sum q_k p_k^{(2)}, \quad p_{33} = 1 - p_{34}.$$

Стан A_4 є поглинаючим, середній час еволюції системи до попадання у нього є математичним сподіванням часів, необхідних для переходу з A_1 до A_2 , з A_2 до A_3 та A_3 до A_4 :

$$M = M_{12} + M_{23} + M_{34},$$

$$M_{12} = \sum_{k=1}^{\infty} k p_{11}^{k-1} p_{12} = \frac{p_{12}}{(1-p_{11})^2} = \frac{1}{p_{12}},$$

$$M_{23} = \sum_{k=1}^{\infty} k p_{22}^{k-1} p_{23} = \frac{p_{23}}{(1-p_{22})^2} = \frac{1}{p_{23}},$$

$$M_{34} = \sum_{k=1}^{\infty} k p_{33}^{k-1} p_{34} = \frac{p_{34}}{(1-p_{33})^2} = \frac{1}{p_{34}}.$$

Розглянемо, аналогічно до попереднього, марковську модель відновлення структури. Виходячи з попередньо розглянутого, можна припустити, що “відновлюючий” компонент починає виконувати свої функції у момент, коли структура містить один, два чи три непрацездатні компоненти. Поглинаючим станом для цієї ситуації буде “нульовий”. Елементи, які підлягають відновленню, відсутні, структура переходить у непрацездатний (“сплячий”) стан. Випадок наявності «гарячого резерву» ми не розглядаємо, оскільки у випадку

необмеженості такого ресурсу він співпадає з попереднім, а у випадку наявності обмежень є детально дослідженим, наприклад, у [3].

Отже, маємо ланцюг Маркова з дискретним часом та матрицею перехідних імовірностей:

$$P^* = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ p_k^{*(1)} & 1-p_k^{*(1)} & 0 & 0 \\ 0 & p_k^{*(2)} & 1-p_k^{*(2)} & 0 \\ 0 & 0 & p_k^{*(3)} & 1-p_k^{*(3)} \end{pmatrix},$$

де рядки відповідають наявності у структурі відновлення 0,1,2,3 компонентів, нижній індекс вказує на режим функціонування системи, а верхній - на потенційну продуктивність інструментів відновлення за наявності «черги» на відновлення (у багатьох випадках необхідно враховувати і людський фактор, зокрема, кваліфікацію персоналу). Аналогічно до попереднього, середній час відновлення першого елемента, який вийшов з ладу, дорівнює $\frac{1}{p_k^{*(1)}}$, перших двох - $\frac{1}{p_k^{*(1)}} + \frac{1}{p_k^{*(2)}}$, перших трьох - $\frac{1}{p_k^{*(1)}} + \frac{1}{p_k^{*(2)}} + \frac{1}{p_k^{*(3)}}$, що дозволяє, використовуючи стаціонарний розподіл імовірностей режимів у момент початку відновлення, визначити величини

$$r_1 = \sum_{k=1}^N \frac{q_k}{p_k^{*(1)}}, \quad r_2 = \sum q_k \left(\frac{1}{p_k^{*(1)}} + \frac{1}{p_k^{*(2)}} \right), \quad r_3 = \left(\frac{1}{p_k^{*(1)}} + \frac{1}{p_k^{*(2)}} + \frac{1}{p_k^{*(3)}} \right)$$

– середні часи відновлення з урахуванням випадковості технічного стану структури у поточний момент часу. Наведені формули дозволяють визначити коефіцієнти готовності для різних варіантів, а величини r_1, r_2, r_3 можуть розглядатися як керовані параметри для досягнення оптимального рівня надійності.

Коефіцієнти готовності:

$$K_1 = \frac{M_{12}}{M_{12} + r_1}, \quad K_2 = \frac{M_{23}}{M_{23} + r_{2,1}}, \quad K_3 = \frac{M_{34}}{M_{34} + r_{3,2}},$$

$$\text{де } r_{2,1} = \sum_{k=1}^N q_k \frac{1}{p_k^{*(2)}}, \quad r_{3,2} = \sum_{k=1}^N q_k \frac{1}{p_k^{*(3)}}.$$

У випадку $N = 1$ (система може знаходитись у єдиному можливому режимі функціонування) отримуємо

$$K_1 = \frac{p^{*(1)}}{p^{*(1)} + p^{*(4)}}, \quad K_2 = \frac{p^{*(2)}}{p^{*(2)} + p^{*(3)}}, \quad K_3 = \frac{p^{*(3)}}{p^{*(3)} + p^{*(2)}}.$$

Якщо, наприклад, необхідно забезпечити рівень K_1 , то це означає необхідність виконання нерівності

$$\frac{p^{(4)}}{p^{*(1)}} \leq \frac{1-K_1}{K_1},$$

або, що теж саме, $r_1 \leq \frac{1-K_1}{K_1} M_{12}$.

3. Висновки

Зазначимо, що, використовуючи термін «деградація», ми надаємо процесу функціонування пристрою або обладнання дещо песимістичного забарвлення, хоча можна цей процес розглядати з іншого боку. Насправді ж, якщо функціонування електронного пристрою зі структурною надлишковістю розглядати разом із засобами відновлення, то можна говорити про адаптацію пристрою до відмов і переходу, по суті, до реконфігурації структури в залежності від зміни її технічного стану (частини обладнання, яка вже відмовила). Такий погляд дозволяє оптимістично дивитися на процес зміни технічних станів апаратури. З цієї точки зору можна зробити такі висновки.

1. До функції ВО, яка полягає власне у відновленні інформаційних сигналів, доцільно додати функції визначення реального технічного стану структури з надлишковістю. Цей технічний стан слід визначати у термінах «запасу міцності» структури, тобто, у кількості компонентів, що утворюють структуру і залишаються працездатними. Такі можливості виникають саме у надлишкових структурах та розширюються із зростанням рівня надлишковості.

2. У разі, коли обладнання обслуговується (відновлюване) у процесі експлуатації, така інформація є ключовою для мінімізації часу відновлення і дозволяє суттєво збільшити коефіцієнт готовності апаратури за рахунок зменшення часу на пошук компонентів, які необхідно замінити (відновити).

3. І, нарешті, головне, на думку авторів, це створення умов для виявлення прихованих помилок у сигналах на виходах структури в цілому. Це набуває першорядного значення у випадках, коли такі сигнали використовують для безпосереднього керування реальними фізичними об'єктами.

СПИСОК ДЖЕРЕЛ

1. Neumann V.J. Probabilistic Logics and Synthesis of Reliable Organisms from Unreliable Components. *Automata Studies* / eds. C. Shannon, J. McCarthy. Princeton University Press, 1956. P. 43–98.
2. Федухин А.В., Сеспедес Гарсія П.Д. К вопросу о структурах отказоустойчивых компьютеров фирмы Stratus Computer Inc. *Математичні машини і системи*. 2018. № 4. С. 87–100.
3. Дружинин Г.В. Надежность автоматизированных производственных систем. М.: Энергоатомиздат, 1986. 480 с.

Стаття надійшла до редакції 08.01.2020