

Разгонов С. А., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-1244-2047

Леснікова І. Ю., кандидат технічних наук, доцент, доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0002-2750-6031

Огліх В. В., кандидат фізико-математичних наук, доцент, вчений секретар
Інституту транспортних систем та технологій
ORCID: 0000-0001-8788-3771

Шаповалов О. В., кандидат технічних наук, старший науковий співробітник, доцент кафедри транспортних технологій та міжнародної логістики
Університету митної справи та фінансів
ORCID: 0000-0001-8788-3771

ПРО МОДЕЛЬ ФУНКЦІОНАЛЬНОЇ БЕЗПЕКИ КЕРОВАНИХ ОДНОКАНАЛЬНИХ ТРАНСПОРТНИХ ПРИСТРОЇВ

У статті розглянуто питання функціональної безпеки одноканальних транспортних пристроїв роботизованих бортових систем. Показано, що технічні пристрої на транспорті, які розробляються в даний час, в більшості своїй охоплені вбудованим контролем. Дослідженням безпеки та надійності одноканальних контрольованих пристроїв не приділено достатньої уваги. Так, у існуючих нормативних документах щодо надійності, комплексний показник надійності (коефіцієнт готовності пристрою) визначається у вигляді відношення середнього напрацювання на відмову до суми середнього напрацювання на відмову та середнього часу відновлення. Значення коефіцієнта готовності, визначене для умов роботи об'єкта, коли середній параметр потоку відмов і середня тривалість відновлення залишаються сталими. Таке трактування передбачає, будь-який відмова пристрою виявляється і потім відразу відновлюється, тобто вбудовані засоби контролю ідеальні. У реальних умовах складно створити засоби контролю, що забезпечують повну гарантію виявлення відмови. Розглянуто підхід, що формалізує прикладні проблеми функціональної безпеки та дає змогу знайти оптимальні рішення прикладних завдань. Технічні пристрої на транспорті, що розробляються в даний час, у більшості своїй охоплені вбудованим контролем. Дослідженням безпеки та надійності одноканальних контрольованих пристроїв не приділено достатньої уваги. Отримано формульні вирази стаціонарних імовірнісних для відновлюються одноканальних пристроїв із вбудованим апаратним контролем. Вони дозволяють враховувати реальні характеристики ефективності та надійності засобів контролю, підвищуючи при цьому достовірність одержуваних результатів аналізу систем. Відомо, що надійність транспортного пристрою ця властивість зберігати працездатність на протязі заданого часу із збереженням заданих експлуатаційних характеристик за відповідних технічних умов експлуатації. Ця властивість безпосередньо пов'язана з економічними експлуатаційними параметрами. В кінцевому підсумку, економічні параметри, в сучасних умовах, відіграють вирішальну роль як у виробництві цього пристрою, так і в бізнес-процесах експлуатації. Коротко розглянуте часові показники безпеки та надійності одноканального контрольованого пристрою. Визначено показники тривалості часу між відмовами та окремо між прихованими відмовами, а також часу відновлення та часу простою пристрою.

Ключові слова: модель, відмова, автоматичне керування, роботизовані бортові транспортні системи, функціональна безпека, одноканальні контрольовані пристрої.

Razghonov S. A., Lesnikova I. Yu., Oglih V. V., Shapovalov O. V. About the controlled single-channel transport devices functional safety model

The article considers the functional safety of single-channel transport devices of robotic on-board systems. It is shown that the technical devices currently being developed are mostly covered by built-in control. The safety and reliability of sin-

gle-channel controlled devices have not been given sufficient attention. Thus, in existing regulatory documents on reliability, a comprehensive reliability indicator (the device's readiness coefficient) is determined by the ratio of average work on refusal to the amount of average work on refusal and average recovery time. The values of the readiness coefficient are determined for the operating conditions of the object when the average failure of the refusal and the average duration of recovery remain constant. Such interpretation implies that any refusal of the device is detected and then immediately restored; that is, the built-in control tools are ideal. In real conditions, it is difficult to create controls that provide a complete guarantee of detection. The approach is considered that formalize applied functional safety problems and allows you to find optimal solutions to applied tasks. Technical devices the currently being developed are mostly covered by built-in control. The safety and reliability of single-channel controlled devices have not been given sufficient attention. The formula expressions of stationary probabilistic ones for renewed single-channel devices with built-in hardware have been obtained. They allow for taking into account the real characteristics of the efficiency and reliability of controls, while increasing the accuracy of the results of the analysis of the systems. It is known that the reliability of the transport device is the property to maintain performance for a given time with the preservation of the given performance characteristics under appropriate technical conditions of operation. This property is directly related to economic operational parameters. In the end, economic parameters, in modern conditions, play a crucial role in the production of this device and the business processes of operation. Briefly consider the time indicators of safety and reliability of a single-channel controlled device. The indicators of the duration of time between failures and separately between hidden failures, as well as the recovery time and downtime of the device, are determined.

Key words: model, failure, automatic control, robotic on-board transport systems, functional safety, single-channel controlled devices.

Постановка проблеми. Впровадження технологій автоматичного керування в роботизованих бортових транспортних системах вимагає побудови моделей, що формалізують прикладні проблеми функціональної безпеки та дають змогу знайти оптимальні рішення прикладних завдань.

Функціональна безпека є частиною загальної безпеки у вигляді системи або обладнання, яке залежить від системи або обладнання правильно працюючого у відповідь на його входи, в тому числі безпечного управління ймовірних помилок, збоїв обладнання і змін навколишнього середовища

З одного боку, функціональна безпека безпосередньо пов'язана з надійністю апаратної складової, і тут залишилося трохи не вирішених завдань, електроніка безвідмовно працює роками, а якщо цього недостатньо, то завжди є можливість резервування. Але є ще програмна складова, на яку якраз і покладається управління функціями безпеки. Властивість функціональної безпеки має забезпечити коректне виконання функцій системи управління, а при виникненні відмов перевести об'єкт управління на так званий безпечний стан. Об'єкти, якими управляють комп'ютерні системи, найчастіше створюють ризики для довкілля та людей (різне виробництво, газова та нафтова промисловість, медичні пристрої, залізничний, автомобільний, авіаційний транспорт тощо). Комп'ютерні системи управління такими об'єктами повинні виконувати функції безпеки і мати певні характеристики (резервування, стійкість до відмов, самодіагностика, стійкість до зовнішніх екстремальних впливів тощо). Контроль за розробкою, впровадженням та експлуатацією комп'ютерних систем управління, важливих для безпеки, здійснюється державними органами сертифікації та ліцензування. Таким чином, розробникам систем доводиться знайомитись із вимогами до функціональної безпеки.

Що входить у поняття функціональної безпеки? Очевидно, що це системи контролю та управління. Контроль або моніторинг може бути віднесений до окремого випадку управління, тому називатимемо такі системи просто системами управління. У реальному світі у цьому контурі маємо: керований процес, датчик, контролер та виконавчий механізм. Необов'язковою з погляду управління, проте невід'ємною частиною сьогоденних систем управління є людино-машинний інтерфейс і обробники даних, отриманих в результаті моніторингу. Подібна архітектура реалізується для вбудованих систем, які широко застосовуються в промисловій автоматизації, побутових пристроях, автомобільних системах, медичних пристроях, комунікаційних мережах, роботах, дронах та інше. У сфері стандартизації існує таке поняття, як "umbrella standard", тобто, основний «вертикальний» стандарт верхнього рівня. Під функціональною безпекою мається на увазі коректне функціонування як системи управління, так і керованого нею обладнання. Таким чином, для забезпечення функціональної безпеки необхідно спочатку визначити функції безпеки, необхідні для зниження ризику керованого обладнання, а також для досягнення та збереження цим обладнанням безпечного стану (наприклад, функції протиаварійного захисту). Далі, система управління повинна мати властивість так званої повноти безпеки, що передбачає ймовірність того, що система коректно виконуватиме функції безпеки за всіх заданих умов протягом заданого інтервалу часу.

При забезпеченні повноти безпеки враховуються два типи відмов: випадкові та систематичні. Випадкові відмови викликані виходом з ладу апаратних компонентів та паруються такими методами, як резервування, самодіагностика, фізичний та електричний поділ компонентів, підвищення стійкості до зовнішніх впливів тощо. Систематичні відмови викликані помилками проектування, зокрема, і помилками програмного забезпечення. Усунення систематичних відмов можливе шляхом удосконалення процесів проектування та розробки, тестування, управління конфігурацією, проектного менеджменту тощо. Крім того, оскільки класичне резервування не дозволяє уникнути систематичних відмов, застосовується так зване диверсне

резервування, коли резервні канали розроблені із застосуванням різного програмного та апаратного забезпечення. Дорого, незручно, але інколи допомагає.

Для керуючих систем, до яких належать такі архітектури, як керування одноканальних транспортних пристроїв, вбудовані системи та інтернет речей, основною властивістю є функціональна безпека. Під функціональною безпекою мається на увазі коректне функціонування як системи управління, так і керованого нею обладнання.

Моделювання є найбільш ефективним способом дослідження складних систем різного призначення, – технічних, економічних, екологічних, соціальних, інформаційних – як на етапі їх проектування, так і в процесі експлуатації. Можливості моделювання систем далеко не вичерпані, тому постійно з'являються найновіші методи та технології моделювання.

Створення моделі – кропіткий і творчий процес, що вимагає від дослідника не тільки глибоких теоретичних знань з різних математичних та технічних дисциплін, але й творчого підходу до розв'язання задач, уміння генерувати певні евристичні, що відповідають глибинній суті досліджуваного об'єкта.

Аналіз останніх досліджень і публікацій. Сучасні технології моделювання не тільки полегшили і прискорили процес побудови та дослідження моделі, але й значно наблизили сприйняття інформації спеціаліста з моделювання систем і спеціаліста, що працює у галузі, яка моделюється.

Одноканальні прилади автоматизації є великою групою виробів. Всі вони створені для участі у різних виробничих процесах. Прилади та засоби автоматизації необхідні для проведення вимірювань, контролю за роботою обладнання та забезпечення виробничих процесів. Прилади та системи автоматизації дозволяють зробити виробництво більш ефективним та безпечним. Вони застосовуються на будь-якому устаткуванні, працюють у системах опалення, на видобувних підприємствах. Кожен вид продукції пристосований для того чи іншого виробництва. Це зручно, оскільки завжди можна підібрати продукцію, що підійде для певного виду обладнання. Усі вироби мають відносно просту конструкцію. Їх корпуси виготовлені з міцних сталевих сплавів або ударостійкого пластику. Отже, представлена продукція не вийде з ладу від вібраційних чи механічних впливів. Простота конструкції означає надійність. Всі вироби зможуть опрацювати в безаварійному режимі не лише гарантійний термін, а й багато років після закінчення такого терміну. Головне це проводити поточне обслуговування виробів, їх регулярні перевірки.

Таким чином зазначені прилади характеризуються надійністю, довговічністю та зручністю експлуатації. Вони хороші тим, що будь-яке обладнання працюватиме під контролем. Прилади забезпечать контроль за температурою, тиском, інтенсивністю тиску рідини і так далі.

Будь-яке виробництво передбачає застосування відповідного устаткування. У кожному разі необхідно забезпечити нормальну роботу такого обладнання. Це означає, що треба вимірювати робоче середовище, керувати всіма процесами в автоматичному режимі. Саме для вирішення таких завдань застосовуються системи автоматизації і, зокрема, одноканальні керуючі пристрої.

Технічні пристрої на транспорті, що розробляються в даний час, в більшості своїй охоплені вбудованим контролем. Дослідженням безпеки та надійності одноканальних контрольованих пристроїв не приділено достатньої уваги. Так, у існуючих нормативних документах щодо надійності, наприклад, у стандарті ДСТУ [1], комплексний показник надійності (коефіцієнт готовності пристрою) визначається у вигляді відношення середнього напрацювання на відмову до суми середнього напрацювання на відмову та середнього часу відновлення. Значення коефіцієнта готовності, визначене для умов роботи об'єкта, коли середній параметр потоку відмов і середня тривалість відновлення залишаються сталими.

Таке трактування передбачає, будь-який відмова пристрою виявляється і потім відразу відновлюється, тобто вбудовані засоби контролю ідеальні. У реальних умовах складно створити засоби контролю, що забезпечують повну гарантію виявлення відмови. Це з тим, що ефективність вбудованих засобів апаратного контролю безпосередньо залежить від обсягу їх устаткування. Причому цей зв'язок має нелінійний характер – швидкість зростання обсягу обладнання перевищує швидкість зростання ефективності засобів контролю. Тому в розрахунках надійності контрольованого пристрою необхідно враховувати не ідеальність вбудованих засобів контролю як щодо їхньої ефективності, так і щодо їхньої надійності. Можливість пропуску відмови призводить до появи так званої прихованої відмови пристрою, який може існувати досить довго, до того моменту, коли він буде випадково виявлений позаплатними засобами (візуально або непрямим шляхом). Отже, можливість такої події не можна виключати у розрахунках. Більше того, прихована відмова пристрою з позиції функціональної безпеки є небезпечною відмовою. Тому представляє практичне значення факт дослідження умов, за яких середній час між прихованими відмовами пристрою (середнє напрацювання на приховану відмову) було б максимальним. Бажано, щоб за цих умов середній час простою пристрою було по можливості мінімальним. Такий підхід спрямований на одночасне підвищення надійності та безпеки пристрою. Відомо, що надійність транспортного пристрою ця властивість зберігати працездатність на протязі заданого часу із збереженням заданих експлуатаційних характеристик за відповідних технічних умов експлуатації. Ця властивість безпосередньо пов'язана з економічними експлуатаційними параметрами. В кінцевому підсумку, економічні параметри, в сучасних умовах, відіграють вирішальну роль як у виробництві цього пристрою, так і в бізнес-процесах експлуатації.

Постановка завдання. Розглядається один абстрактний пристрій. Будь-яка природна чи штучна надмірність, у тому числі структурне резервування, відсутня. Транспортний пристрій може бути охоплено однорівневим, дворівневим, n -рівневим контролем.

Під однорівневим контролем розуміється введення до складу пристрою вбудованих засобів контролю, які з ймовірністю p_1 правильно виявляють відмови пристрою. Ймовірність правильного виявлення p_1 – це комплексний показник ефективності засобів контролю, що враховує повноту контролю, безперервність, достовірність результатів контролю.

Якщо об'єм основного обладнання W_0 , а об'єм контрольного обладнання $W_{k0} = f(p_1)$, то результуючий об'єм обладнання $W_y = W_0 + W_{k0}$.

Передбачається, що при виявленні відмови основного пристрою з ймовірністю p_1 пристрій ремонтується. В іншому випадку виникає відмова, яка може існувати деякий (іноді значний) час до виявлення нештатними засобами. Відмова апаратури контролю за прийнятою передумовою не викликає відмови основного пристрою. При однорівневому контролі відмова засобів контролю не виявляється і при подальшій відмові основної апаратури виникає відмова пристрою загалом.

Під дворівневим контролем мається на увазі введення до складу пристрою засобів контролю основного та контрольного обладнання з ймовірностями правильного виявлення p_1 і p_2 відповідно. Це означає, що об'єм контрольного обладнання збільшений: $W_{k2} = W_{k1} + W_{k0}$, де $W_{k0} = f(p_1)$, а $W_{k1} = f(p_2)$. При дворівневому контролі відмова засобів контролю виявляється з ймовірністю p_2 , відновлюється і при відмові основної апаратури відмова може не виникнути. Якщо ж відмовить апаратура контролю другого рівня обсягом W_{k0} , це призведе до переходу від дворівневого до однорівневого контролю.

При n -рівневому контролі обсяг контрольного обладнання збільшено до $W_{kn} = W_{k(n-1)} + \dots + W_{k1} + W_{k0}$, где $W_{k(n-1)} = f(p_{n-1})$, ..., $W_{k(1)} = f(p_2)$, $W_{k(0)} = f(p_1)$.

У роботі [2] запропонована евристична формула оцінки p_i (де $i=1, 2, \dots, n$) залежно від необхідного для реалізації заданої ефективності pi контрольного обладнання $W_{k(n-1)}$:

$$p_i = 1 - \exp(-\delta \cdot \Delta W_{k(n-1)}) \quad (1)$$

де $\delta = 5 \dots 10$ – нормуючий коефіцієнт; $\Delta W_{k(i-1)} = W_{k(i-1)} / (W_0 + W_{k(i-1)})$.

Надалі приймаємо в умовах даної задачі, що потоки відмов, відновлень, а також прихованих відмов основного пристрою є найпростішими з параметрами λ , μ , та γ відповідно. Контроль однорівневий. Інтенсивність відмов контрольного устаткування прямо пропорційне його обсягу.

Завдання полягає в дослідженні стаціонарних ймовірнісних та тимчасових показників безпеки та надійності пристрою з вбудованим апаратним контролем з урахуванням неідеальних характеристик ефективності та надійності засобів контролю, а також можливості виявлення пропущеного засобами контролю відмови (прихованої відмови) позаштатними засобами (візуально або непрямим шляхом). Крім того, має на меті показати ідентичність результатів математичного моделювання даної задачі за допомогою традиційних рівнянь Колмогорова і за допомогою відомого графового методу, що в умовах простого завдання не становить труднощів.

Виклад основного матеріалу.

Графова модель пристрою

Граф станів роботизованого бортового транспортного пристрою з однорівневим контролем показано на рис. 1.

На рис. 1 вершиною «0» показано стан справності основного та контрольного обладнання пристрою. Інтенсивність відмов основного обладнання $\lambda = W_0$, контрольного $\lambda_1 = W_{k1}$. Ймовірність правильного виявлення відмови основного устрою p_1 . Контролюючий пристрій не охоплений власним контролем ($p_2 = p_3 = \dots = p_n = 0$).

Вершиною «1» показано стан відмови контролюючого обладнання, що не впливає на роботу основного пристрою.

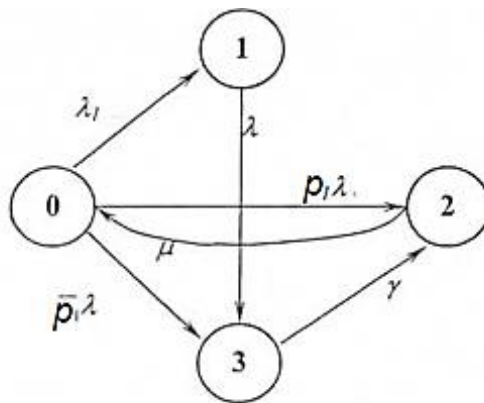


Рис. 1. Граф станів пристрою з однорівневим контролем

Стан «2» – стан відновлення, яке настає або після виявлення відмови основного обладнання з ймовірністю p_1 , або після деякого (зазвичай великого) часу існування прихованої відмови основного обладнання, коли факт цієї відмови якимось чином проявився.

Вершиною «3» показано стан прихованої відмови пристрою. У цей стан пристрій потрапляє або через відмову засобів контролю і подальшої відмови основного обладнання, або через пропуск відмови від засобів контролю. У другому випадку прийнято, що недоцільно враховувати надійність засобів контролю, оскільки вони вже не виконали своєї функції виявлення відмови.

У цьому вся задачі безліч працездатних станів $Sp = (0, 1)$; безліч непрацездатних станів $S'p = (2, 3)$.

Коефіцієнти безпеки та готовності одноканальних контрольованих відновлюваних пристроїв

Вектор початкових ймовірностей станів безпеки та надійності пристрою (рис. 1) має вигляд:

$$P_0(0) = 1; P_1(0) = 0; P_2(0) = 0; P_3(0) = 0.$$

Система диференціальних рівнянь Колмогорова (визначається за графом станів) має вигляд:

$$\frac{dP_0(t)}{dt} = -(\lambda + \lambda_1)P_0(t) + \mu P_2(t);$$

$$\frac{dP_1(t)}{dt} = \lambda_1 P_0(t) - \lambda P_1(t);$$

$$\frac{dP_2(t)}{dt} = p_1 \lambda P_0(t) - \mu P_2(t) + \gamma P_3(t);$$

$$\frac{dP_3(t)}{dt} = \bar{p}_1 \lambda P_0(t) + \lambda P_1(t) - \gamma P_3(t);$$

$$\sum_{i=0}^3 P_i(t) = 1.$$

$$\text{При } t \rightarrow \infty \quad P_i(t) = P_i \text{ и } \frac{dP_i(t)}{dt} = 0, \text{ де } i=0,1,2,3.$$

Система алгебраїчних рівнянь (при $t \rightarrow \infty$) має вигляд:

$$-(\lambda + \lambda_1)P_0 + \mu P_2 = 0;$$

$$\lambda_1 P_0 - \lambda P_1 = 0;$$

$$p_1 \lambda P_0 - \mu P_2 + \gamma P_3 = 0;$$

$$\bar{p}_1 \lambda P_0 + \lambda P_1 - \gamma P_3 = 0;$$

$$\sum_{i=0}^3 P_i = 1.$$

У результаті розв'язання системи алгебраїчних рівнянь знаходимо стаціонарні ймовірності перебування пристрою у всіх станах:

$$P_0 = \frac{\lambda \mu \gamma}{\lambda \mu \gamma + \lambda_1 \mu \gamma + (\lambda + \lambda_1) \lambda \gamma + (\bar{p}_1 \lambda + \lambda_1) \lambda \mu};$$

$$P_1 = \frac{\lambda_1 \mu \gamma}{\lambda \mu \gamma + \lambda_1 \mu \gamma + (\lambda + \lambda_1) \lambda \gamma + (\bar{p}_1 \lambda + \lambda_1) \lambda \mu};$$

$$P_2 = \frac{(\lambda + \lambda_1) \lambda \gamma}{\lambda \mu \gamma + \lambda_1 \mu \gamma + (\lambda + \lambda_1) \lambda \gamma + (\bar{p}_1 \lambda + \lambda_1) \lambda \mu};$$

$$P_3 = \frac{(\bar{p}_1 \lambda + \lambda_1) \lambda \mu}{(\lambda + \lambda_1) \gamma (\lambda + \mu) + (\bar{p}_1 \lambda + \lambda_1) \lambda \mu}.$$

Коефіцієнти безпеки та готовності пристрою в даній задачі збігаються. Вони визначаються сумою ймовірностей перебування системи у безпечних станах «0» і «1»:

$$K_B = K_r = P_0 + P_1 = \frac{(\lambda + \lambda_1)\mu\gamma}{(\lambda + \lambda_1)\gamma(\lambda + \mu) + (\bar{p}_1\lambda + \lambda_1)\lambda\mu}.$$

У свою чергу, коефіцієнт простою пристрою знаходимо за формулою:

$$K_{II} = P_2 + P_3 = 1 - K_r = 1 - P_0 - P_1 = \frac{\lambda[(\lambda + \lambda_1)\gamma + (\bar{p}_1\lambda + \lambda_1)\mu]}{(\lambda + \lambda_1)\gamma(\lambda + \mu) + (\bar{p}_1\lambda + \lambda_1)\lambda\mu}.$$

Визначимо формульні вирази коефіцієнтів безпеки (готовності) та простою аналізованої системи, користуючись алгоритмом реалізації відомих графових напівмарківських методів. З цією метою за графом на рис. 1 виконують такі процедури:

1. Підготовчі процедури:

– знаходять перехідні ймовірності та математичні очікування часу перебування системи у всіх станах:

$$p_{01} = \frac{\lambda_1}{\lambda + \lambda_1}; p_{02} = \frac{\bar{p}_1\lambda}{\lambda + \lambda_1}; p_{03} = \frac{\bar{p}_1\lambda}{\lambda + \lambda_1}; p_{13} = p_{20} = p_{32} = 1; T_0 = \frac{1}{\lambda + \lambda_1}; T_1 = \frac{1}{\lambda}; T_2 = \frac{1}{\mu}; T_3 = \frac{1}{\gamma}.$$

– знаходять ваги шляхів:

$$l_{01} = p_{01}; l_{02} = p_{02} + (p_{01}p_{13} + p_{03})p_{32}; l_{03} = p_{01}p_{13} + p_{03}; l_{13} = p_{13} = 1; l_{20} = p_{20} = 1; l_{32} = p_{32} = 1.$$

– знаходять ваги контурів:

$$C_1 = p_{02}p_{20}; C_2 = p_{03}p_{32}p_{20}; C_3 = p_{01}p_{13}p_{32}p_{20}.$$

2. Розрахункові процедури:

– підставляємо раніше визначені параметри в розрахункову формулу коефіцієнта безпеки (готовності) пристрою.

$$K_B = K_r = P_0 + P_1 = \frac{(\lambda + \lambda_1)\mu\gamma}{(\lambda + \lambda_1)\gamma(\lambda + \mu) + (\bar{p}_1\lambda + \lambda_1)\lambda\mu}.$$

Таким чином, переконалися, що традиційний метод дає добрі результати для нашого завдання. У міру підвищення складності завдання застосування для її вирішення традиційного методу рівнянь Колмогорова стає проблематичним, тоді як можливості розроблених графових методів обмежені лише труднощами побудови графових моделей з тисячами станів.

Проаналізуємо отриманий вираз коефіцієнта безпеки контрольованого пристрою, що відновлюється.

Якщо $\bar{p}_1 = 1$ (відсутня контроль головного пристрою):

$$K_r = \frac{\mu\gamma}{\gamma(\lambda + \mu) + \lambda\mu}. \quad (2)$$

Отримане вираз означає, що за відсутності контролю основного пристрою коефіцієнт готовності залежить не тільки від інтенсивності відмов і відновлень, а й від тривалості прихованої відмови ($\frac{1}{\gamma}$). Якби приховані відмови виявлялися миттєво ($\gamma \rightarrow \infty$), то дана формула перетворювалася б на ідеалізовану відому формулу коефіцієнта готовності:

$$K_r = \frac{\mu}{\lambda + \mu}. \quad (3)$$

Така можливість ($\gamma \rightarrow \infty$) в природі не існує, тому формулу (2) слід розглядати базовою при розрахунках коефіцієнтів готовності неконтрольованих пристроїв роботизованих бортових транспортних системах.

Повернемося до отриманої раніше формули коефіцієнта готовності контрольованого пристрою і врахуємо залежність інтенсивності відмов пристрою контролю від ймовірності p_1 , тобто від ймовірності того, що пристрій правильно виявляє відмови робочого пристрою. З формули (1) при заміні $\frac{W_{k0}}{W_0 + W_{k0}}$ на $\frac{\lambda_1}{\lambda + \lambda_1}$ при прийнятому припущенні, що інтенсивність відмов пристрою прямо пропорційна його обсягу, отримуємо:

$$\lambda_1 = -\frac{\lambda \ln \bar{p}_1}{\delta + \ln \bar{p}_1}.$$

Таким чином, $\lambda_1 = \varphi\lambda$, де $\varphi = \frac{\ln \bar{p}_1}{\delta + \ln \bar{p}_1}$, і формула розрахунку та готовності контролюємого пристрою перетворюється к виду:

$$K_r = \frac{\lambda(1+\varphi)\mu\gamma}{\lambda(1+\varphi)\gamma(\lambda+\mu) + \lambda^2(\bar{p}_1 + \varphi)\mu} = \frac{(1+\varphi)\mu\gamma}{(1+\varphi)\gamma(\lambda+\mu) + (\bar{p}_1 + \varphi)\lambda\mu}.$$

Графік залежності $\varphi = f(\bar{p}_1)$ наведено на рис. 2.

З цього графіка випливає, що обсяг (а, отже, і інтенсивність відмов) контрольної апаратури повинен нелінійно залежати від можливості пропуску відмови основного пристрою. Якщо потрібно досягти того, щоб ймовірність пропуску відмови наближалася до нуля, тобто вірогідність правильного виявлення прагнула одиниці, то, можливо, що потрібний обсяг контрольної апаратури перевищить обсяг основного пристрою ($\varphi > 1$).

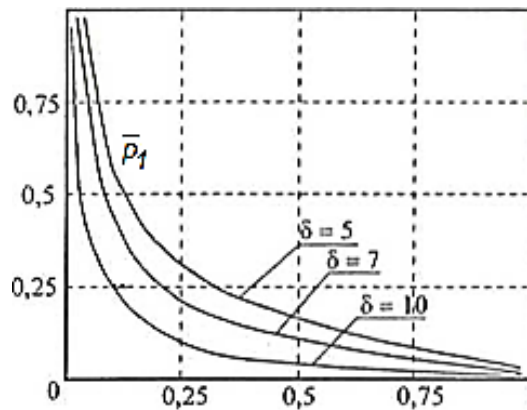


Рис. 2. Графік залежності $\varphi = f(\bar{p}_1)$

Так, наприклад, при $\bar{p}_1 = 1 - p_1 = 0,01$ (тобто 99% відмов основного пристрою правильно виявляються) коефіцієнт $\varphi \approx 2$ і, отже, $W_k \approx 2W_0$. З графіків слід також, що при $\bar{p}_1 \rightarrow 0$ коефіцієнт $\varphi \rightarrow \infty$. Зауважимо, що вплив нормувального коефіцієнта δ на прогнозоване значення інтенсивності відмов апаратури контролю щодо невелике, особливо при реальних значеннях $\bar{p}_1 \geq 0,1$.

Якщо прийняти, що $p_1 = 1$ (при умові $\varphi \rightarrow \infty$) знаходимо, що знову коефіцієнт готовності визначається за ідеалізованою формулою (3).

Таким чином, поширена формула (3) коефіцієнта готовності пристрою є ідеалізованою і представляє собою оцінку одного з двох граничних випадків:

- 1) $p_1 = 1$ при умові $\varphi \rightarrow \infty$,
або
- 2) $\gamma \rightarrow \infty$.

Коротко розглянемо часові показники безпеки та надійності одноканального контрольованого пристрою.

Визначимо показники тривалості часу між відмовами та окремо між прихованими відмовами, а також часу відновлення та часу простою пристрою.

Середні напрацювання часу між відмовами T і прихованими відмовами T_c пристрою знайдемо за формулою, отриманою в роботі [4] для випадкових Марківських процесів, $T = \frac{\sum_{i \in S_p} P_i}{\sum_{i \in S_p} P_i \sum_{j \in \bar{S}_p} \lambda_{ij}}$.

В умовах даної задачі: $\bar{S}_p$ – безліч граничних непрацездатних станів. При визначенні показника T зазначена множина включає стани 2 і 3. Стосовно показника T_c ця множина включає тільки стан 3. В останньому випадку як безліч S_p приймаються стани 0, 1 та 2.

Знайдено залежності відносної зміни середньої тривалості простою пристрою від ефективності контролю та додаткового контрольного обладнання за різних співвідношень між параметрами γ та μ .

Відношення

$$\frac{T_{\text{пр}}}{T_{\text{пр прод}}} = \frac{(1+\varphi)\gamma + (\bar{p} + \varphi_1)\mu}{(1+\varphi)(\gamma + \mu)}$$

дозволяє для різних значень ймовірності не виявлення відмови $\bar{p}_1$, коефіцієнті φ приросту додаткового обладнання, середньої тривалості існування прихованої відмови $\frac{1}{\gamma}$ визначити умови, при яких буде мати місце мінімальний час простою пристрою.

Отримані результати показують, що існують оптимальні значення ймовірності правильного виявлення відмови пристрою $p = 1 - \bar{p}_1$ на рівні 0,7 ... 0,9, при якому спостерігається значне (в 1,5 – 2 рази і більше) скорочення тривалості простою пристрою, якщо тривалість прихованої відмови істотно більша за тривалість відновлення. При цьому обсяг додаткового обладнання для виявлення відмов становить 30...45% від обсягу основної апаратури пристрою. Зауважимо, що аналогічні рекомендовані значення ймовірності p_1 і коефіцієнта ϕ були встановлені при дослідженні середнього часу між прихованими відмовами.

Висновки. Отримано формульні вирази стаціонарних імовірнісних для одноканальних пристроїв, що відновлюються, з вбудованим апаратним контролем. Вони дозволяють враховувати реальні характеристики ефективності та надійності засобів контролю, підвищуючи при цьому достовірність одержуваних результатів аналізу систем.

Показано, що існують оптимальне значення ймовірності правильного виявлення відмови пристрою $p = 1 - \bar{p}_1$ на рівні 0,7...0,9, при якому спостерігається значне (в 1,5-2 рази і більше) скорочення тривалості простою пристрою, якщо тривалість прихованої відмови істотно більша за тривалість відновлення.

Список використаних джерел:

1. Надійність техніки. Терміни та визначення : ДСТУ 2860-94 – [Чинний від 1 січня 1996] – К.: Держспоживстандарт України, 1994. – 75 с. – (Національні стандарти України).
2. Путінцев Н. Д. Апаратний контроль управляючих цифрових обчислювальних машин. / Путінцев Н. Д. – М.:Сов.радіо.1966. -157с.
3. Вентцель Е.С. Теорія випадкових процесів та її інженерне застосування. / Вентцель Е.С., Овчаров Л.А.- М.: Навука. 1991. 384 с. ISBN 5-02-014125-9
4. Надійність технічних систем: Довідник / Беляєв Ю.К., Богатирьов В.А., Болотін В.В. та ін.; За ред. І.А. Ушакова – М.: Радіо та зв'язок.1985. 608с.

References:

1. Reliability of technology. Terms and definitions: DSTU 2860-94 (1996) K.:Derzhspozhyvstandart Ukrainy.
2. Putintsev N. D. Hardware control of controlling digital computers. (1966) M.: Sov.radio.
3. Ventshel E. S., Ovcharov L. A. (1991) Theory of random processes and its engineering application. M.: Navuka. ISBN 5-02-014125-9
4. Reliability of technical systems: Handbook (1985) Belyaev Yu. K., Bogatyrev V. A., Bolotin V. V. etc.; Edited by I.A. Ushakov M.: Radio and Communications.