

С.С. Гнатюк¹, канд. техн. наук, **Л.А. Коротченко**², **Я.Е. Небесна**³

¹ Інститут проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України (Україна, 03164, Київ, вул. Генерала Наумова, 15),

² Військовий інститут телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв Крут (Україна, 01011, Київ, вул. Московська 45/1, тел. 093 3089300; e-mail: shej4uk@ukr.net),

³ Інститут спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», (Україна, 03113, Київ, пр-т Перемоги, 37)

Моделювання надійності об'єктів зі змінною структурою

Розглянуто теоретико-множинні моделі об'єктів, що дозволяють кількісно оцінити потужність підмножин елементів, які використовують у різних режимах роботи для оцінки показників надійності радіоелектронних засобів зв'язку в залежності від структури об'єкта і порядку зміни режимів роботи. Показано, що надійність радіоелектронних засобів зв'язку буде максимальною при мінімальній потужності елементів, які використовуються під час роботи, і навпаки. Отримані результати застосовано для оцінки показників надійності радіостанції, яка працює у режимі прийому або передачі. Проаналізовано надійність радіоелектронних багатофункціональних та багаторежимних засобів, які змінюють структуру під час використання за призначенням. Це дозволяє оцінити значення показників надійності (наробітку на відмову та середнього часу відновлення) залежно від порядку взаємодії підмножин елементів та їх потужності.

К л ю ч о в і с л о в а: теоретико-множинна модель надійності, багаторежимність, об'єкт зі змінною структурою.

Постановка задачі та аналіз деяких публікацій. На даний час існує велика кількість принципів, методів, методик та засобів виявлення і пошуку несправностей радіоелементів під час їх виготовлення та експлуатації, що є основою прогнозування надійності радіоелектронних засобів (РЕЗ) в процесі виробництва. Підвищення надійності РЕЗ на всіх етапах життєвого циклу забезпечується покращенням таких показників, як коефіцієнт готовності, час відновлення працездатного стану, а також ресурс або термін служби та напрацювання на відмову. Тому вирішення задачі моделювання надійності на основі використання теорії множин з метою

© Гнатюк С.С., Коротченко Л.А., Небесна Я.Е., 2020

оцінки показників надійності об'єктів РЕЗ зі змінною структурою є важливим і актуальним.

Сучасні публікації з теорії надійності складних технічних об'єктів свідчать про те, що є необхідність наукового аналізу технічних структур, конфігурація яких змінюється під час використання цих об'єктів за призначенням. В них показано, що в даний час відсутні не тільки практичні, але і теоретичні методи розрахунку ефективності функціонування систем зі змінною структурою, яка може змінюватись випадково або в заданій послідовності через визначений інтервал часу. При цьому зміна структури завжди залежить від зміни функцій, які виконує система [1—5].

У роботі [1] розглянуто особливості розрахунку надійності РЕЗ з урахуванням часу зберігання та використання за призначенням. При цьому інтенсивність відмов елементів під час зберігання зменшується від 10 до 100 разів, ніж під час роботи. У роботах [3, 4] основну увагу приділено дослідженню надійності об'єктів з резервуванням. У роботах [6, 7] розглянуто вплив зміни структури об'єктів на ефективність їх діагностування.

Обґрунтування можливості використання теорії множин для моделювання надійності об'єктів зі змінною структурою. Надійність — це властивість об'єкта зберігати в часі у встановлених межах значення всіх параметрів, що характеризують здатність виконувати необхідні функції в заданих режимах і умовах застосування, технічного обслуговування, ремонтів, зберігання і транспортування. Розширення умов експлуатації, відповідальність за виконувани виробом функції та їх ускладнення призводить до підвищення вимог надійності РЕЗ [8]. Надійність формується з таких складових: безвідмовність, довговічність, відновлюваність та здатність виробу безупинно зберігати працездатний стан протягом заданого часу. Тому найбільш важливим у забезпеченні надійності РЕЗ є підвищення їх безвідмовності [1, 3, 4].

Особливістю проблеми надійності РЕЗ є їх зв'язок з усіма етапами «життєвого циклу» від виготовлення до списання. Під час розрахунку та проектування РЕЗ їх надійність закладається в проект, при виготовленні — забезпечується, а при експлуатації — реалізується [3]. Тому проблема надійності — це комплексна проблема і вирішувати її необхідно на всіх етапах і різними засобами. На етапі проектування РЕЗ визначають їх структуру, проводять вибір або розробку елементної бази, що надасть можливість забезпечити необхідний рівень надійності. Це завдання вирішується за допомогою розрахунку значень показників надійності (в першу чергу — безвідмовності), залежно від структури об'єкта і характеристик його складових частин, з подальшою корекцією при необхідності.

Для аналізу надійності складних систем їх розбивають на елементи (компоненти) і оцінюють кожен елемент окремо. Під елементом розрахунку надійності розуміють складову частину всієї системи, яка може мати самостійні вхідні та вихідні параметри. При дослідженні надійності системи її елементи не розділяються на складові частини, а показники безвідмовності і довговічності відносяться до елемента в цілому. При цьому можливе відновлення працездатності елемента незалежно від інших частин і елементів системи [1—4]. Це є реалізація принципу агрегування [9].

Аналіз надійності складних систем має специфічні особливості. Різні відмови, а також зниження працездатності елементів системи по-різному впливають на надійність всієї системи. Тому підлягають перевірці на надійність лише елементи, відмова яких призводить до відмови системи. Ці елементи і підсистеми виявляються при розгляді структурної надійності.

Структурною надійністю системи (пристрою) називається результуюча надійність системи при заданій структурі і відомих значеннях надійності всіх її частин (блоків, вузлів, компонентів, тобто конструктивів) [1, 3, 10]. Моделі надійності встановлюють зв'язок між підсистемами (або елементами системи) та їх впливом на роботу всієї системи.

Дослідження структури дозволяє виявити «вузькі місця» в конструкції системи відносно її надійності, а на етапі проектування — розробити конструктивні заходи щодо усунення подібних вузьких місць. Наприклад, можна заздалегідь підрахувати, скільки резервних елементів необхідно для забезпечення заданого рівня надійності системи. Після цього можна розрахувати надійність системи, побудованої з елементів з відомою надійністю, або навпаки, зважаючи на вимоги до надійності системи, висунути вимоги до надійності елементів [1, 3, 4].

До надійності РЕЗ ставлять підвищені вимоги, а саме щодо багатofункціональності, багаторежимності і наявності кількох інформаційних виходів, тобто належності до об'єктів з перемінною структурою (рис. 1), надійність яких залежить від їх надлишковості і часу роботи в окремих режимах [3].

Багатofункціональність — властивість об'єкта, яка полягає в здатності задовольнити різні потреби користувача [6, 9].

Багаторежимність — властивість об'єкта, яка полягає в здатності виконання покладених на нього функцій через використання різних сукупностей функціональних елементів, або зміни їх властивостей [6, 9].

Надлишковість — додаткові засоби й можливості, більш ніж необхідні для виконання об'єктом заданих функцій. Розрізняють конструктивну, часову, інформаційну, структурну і функціональну види надлишковості, що присутні в РЕЗ різного призначення [1, 9].

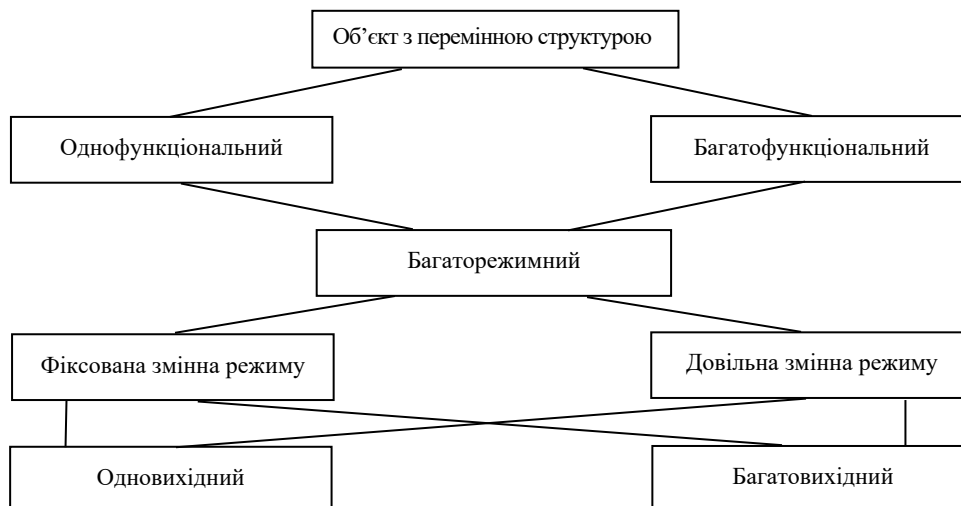


Рис. 1. Класифікація об'єктів з перемінною структурою

У роботах [6,7] розглянуто різноманітні структури об'єктів відносно їх відновлення, а не оцінки надійності, з використанням математичного апарату теорії множин [11]. Аналіз теоретико-множинних моделей об'єктів засвідчує, що їх надійність максимальна при мінімальній потужності елементів, які використовують під час роботи, і навпаки. Якщо багаторежимний об'єкт має ядро (наприклад, підсистема електроживлення), то можливі варіанти без перетину або з перетином підмножин елементів в R_i режимі роботи (рис. 2), що відповідає, наприклад, радіопередавачу, радіоприймачу, радіостанції при різноманітних режимах роботи.

При послідовній зміні режимів потужність надмножини поступово збільшується, при цьому надійність виробу зменшується (рис. 3). Це спостерігається, наприклад, в підсистемах управління функціонуванням радіопередавачів великої потужності. Під час роботи послідовно включається ввід, охолодження, зміщення і висока напруга. В кожному режимі використовують всі елементи, підключені раніше. Отже, їх загальна кількість поступово збільшується. Під час перебування радіопередавача в гарячому резерві на випадок передачі найважливіших повідомлень висока напруга включається дистанційно, тобто елементи підсистеми працюють різну кількість часу, що при традиційній оцінці надійності не враховують.

Розглянемо без'ядерну теоретико-множинну модель об'єктів з довільними змінами режимів роботи (рис. 4):

$$\begin{aligned}
 M'_1 &= M_1 \setminus ((M_1 \cap M_3) \cup (M_1 \cap M_2) \setminus \bigcap_{i=1}^3 M_i), \\
 M'_2 &= M_2 \setminus ((M_1 \cap M_2) \cup (M_3 \cap M_2) \setminus \bigcap_{i=1}^3 M_i), \\
 M'_3 &= M_3 \setminus ((M_2 \cap M_3) \cup (M_1 \cap M_3) \setminus \bigcap_{i=1}^3 M_i).
 \end{aligned}$$

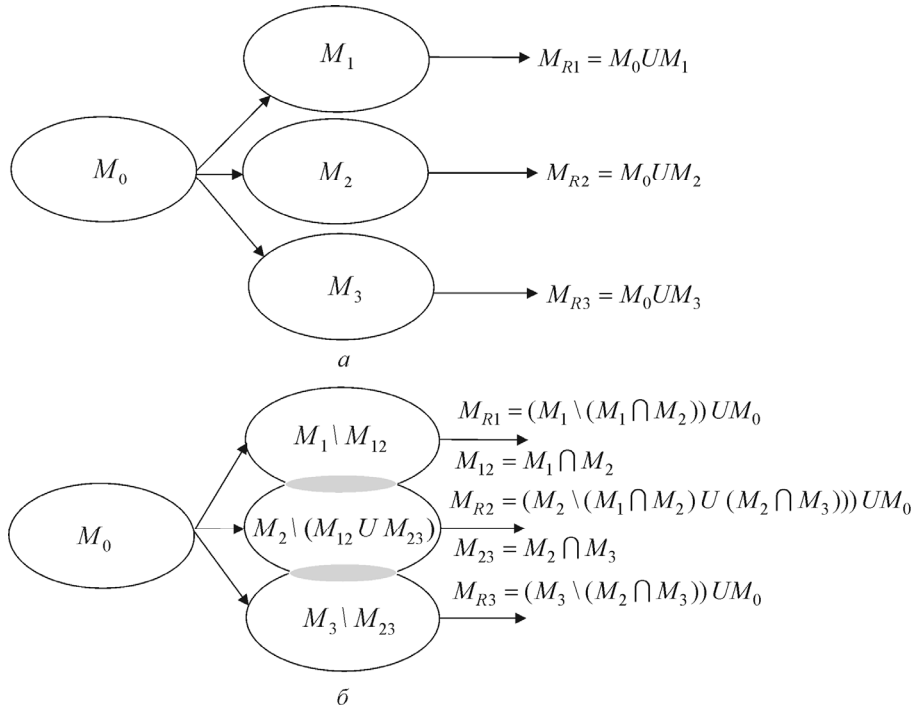


Рис. 2. Теоретико-множинні моделі багаторежимних об'єктів з ядром і довільною зміною режимів роботи: а — без перетину підмножин елементів; б — з перетином підмножин елементів

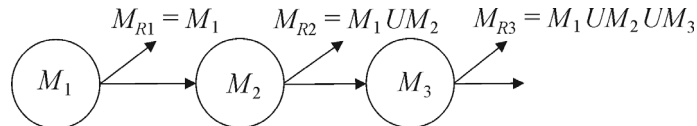


Рис. 3. Теоретико-множинна модель об'єкта з послідовною зміною режимів

Якщо в без'ядерних теоретико-множинних моделях об'єктів використовувати послідовні зміни режимів роботи, то отримаємо теоретико-множинну модель об'єкта, зображену на рис. 5.

За допомогою розглянутих теоретико-множинних моделей об'єктів оцінюємо кількісну потужність підмножин елементів, що використовуються в різних режимах роботи, для подальшої оцінки показників надійності в залежності від структури об'єкта і порядку зміни режимів роботи. Застосуємо отримані результати для оцінки показників надійності радіостанції, яка працює в режимах прийому або передачі, а як ядро в ній використовують блок електроживлення, генератор сигналів і антену. Порядок зміни режимів довільний, але відомо, що час роботи в режимі «прийм» (T_{p2}) значно більший, ніж в режимі «передача» (T_{p3}) (рис. 6).

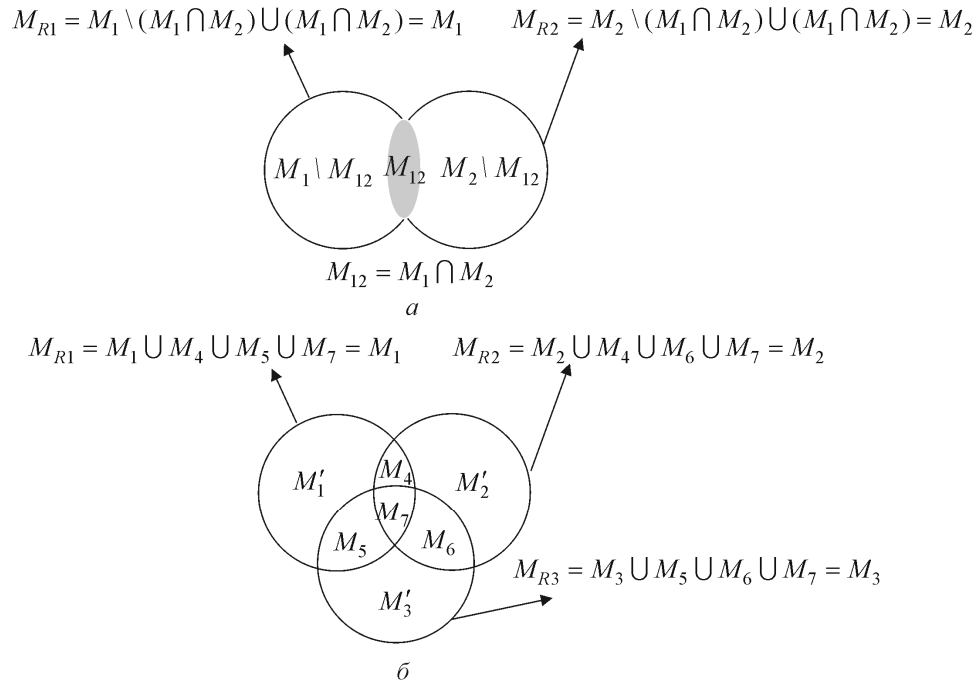


Рис. 4. Теоретико-множинна модель об'єктів без ядер (а) і з ядрами (б) при задовільній зміні режимів роботи

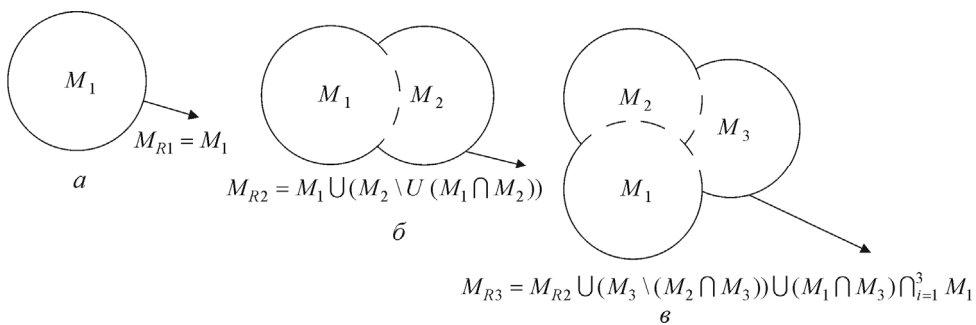


Рис. 5. Теоретико-множинна модель об'єкта без ядра з послідовною змінною режимів роботи: а — один режим роботи; б — два режими роботи; в — три режими роботи

За відомими методиками [1—4], враховуючи потужності підмножин елементів, отримано параметр потоку відмов Z_i ($i = 1,3$), а із технічних характеристик радіостанції відомо, що час роботи у кожному режимі складає $T_{p1} = T_{p2} + T_{p3}$. Тоді коефіцієнти використання підмножин елементів є такими:

$$U_1 = \frac{T_{p1}}{T_{p2} + T_{p3}}; \quad U_2 = \frac{T_{p2}}{T_{p2} + T_{p3}}; \quad U_3 = \frac{T_{p3}}{T_{p2} + T_{p3}}.$$

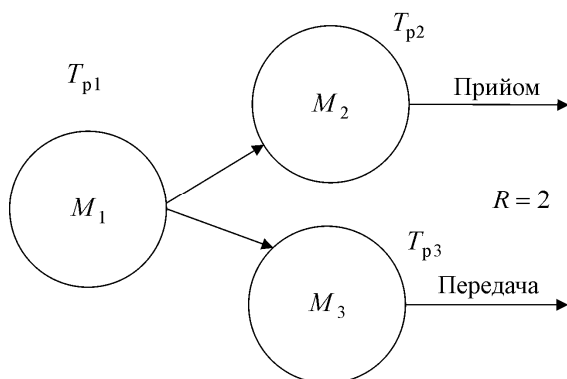


Рис. 6. Теоретико-множинна модель радіостанції

Напрацювання на відмову елементів кожної підмножини визначається параметром потоку відмов [8], що дозволяє оцінити загальну кількість відмов виробу і його напрацювання на відмову в цілому в залежності від значення коефіцієнта використання кожної підмножини елементів. Діагностування радіостанцій доцільно виконувати за порядком зменшення потужностей підмножин елементів з використанням умовних алгоритмів пошуку дефектів [6,7].

Після визначення напрацювання на відмову T і середнього часу відновлення T_b можна кількісно оцінити значення комплексного показника надійності – коефіцієнта готовності [8]: $A = T/(T + T_b)$. Отже, використання теоретико-множинної моделі надійності РЕЗ дозволяє аналізувати їх структуру в можливих режимах роботи і в подальшому кількісно оцінювати значення показників надійності.

Висновки

1. Врахування властивостей багаторежимності РЕЗ з впровадженням теоретико-множинної моделі їх структури дозволяє кількісно оцінити значення показників надійності.

2. Отримані результати доцільно використовувати під час розробки математичної моделі і методів оцінки надійності багаторежимних засобів та систем зв'язку зі змінною структурою.

3. Подальші дослідження слід спрямовувати на формалізацію процесу кількісної оцінки показників надійності об'єктів зі змінною структурою.

СПИСОК ВИКОРИСТАНОЇ ЛІТЕРАТУРИ

1. *Острейковский В.А.* Теория надежности. М.: Высшая школа, 2003, 463 с.
2. *Хабаров Б.П., Куликов Г.В., Пармонов А.А.* Техническая диагностика и ремонт бытовой радиоэлектронной аппаратуры. М.: Горячая линия – Телеком, 2004, 376 с.

3. Половко А.М., Гуров С.В. Основы теории надежности. СПб.: БХВ–Петербург, 2006, 704 с.
4. Бобало Ю.Я., Волочий Б.Ю., Лозинський С.Ю. та ін. Математичні моделі та методи аналізу надійності радіоелектронних, електротехнічних та програмних систем. Львів: Вид-во Львівська політехніка, 2013, 300 с.
5. Сакович Л.М., Небесна Я.Є. Оцінка надійності технічних об'єктів зі змінною структурою// XX всеукраїнська науково-практична конференція. Тези доп. Житомир: ЖВІ ім. С.П. Корольова, 2018, с. 201—203.
6. Ксенз С.П., Волинский А.А., Сакович Л.Н. и др. Теоретические и прикладные задачи диагностирования средств связи и автоматизации. Л.: ВАС, 1990, 336 с.
7. Ксенз С.П., Полтаржицкий Н.И., Алексеев С.П., Минеев В.В. Борьба с диагностическими ошибками при техническом обслуживании и ремонте систем управления, связи и навигации. СПб.: ВАС, 2010, 240 с.
8. ДСТУ 2860–94. Надійність техніки. Терміни та визначення. Чинний від 1996.01.01. Київ: Держстандарт України, 1995, 89 с.
9. Креденцер Б.П., Буточнов О.М., Міночкін А.І., Могилевич Д.І. Надійність систем з надлишковістю. Методи моделі, оптимізація. Київ: Фенікс, 2013, 342 с.
10. Гнатюк С.Є. Показники надійності систем спеціального зв'язку // Спеціальні телекомунікаційні системи та захист інформації. Зб.наук. праць. Вип. 1(25). Київ: Держспецзв'язок, 2014, 73—79 с.
11. Бронштейн И.Н., Симендяев К.А. Справочник по математике. М., Лейпциг: «Наука», «Тойбнер», 1981, 729 с.

Отримано 07.10.19

REFERENCES

1. Ostreykovskiy, V.A. (2003), *Teoriya nadezhnosti* [Theory of Reliability], Vysshaya shkola, Moscow, Russia.
2. Khabarov, B.P., Kulikov, G.V. and Paramonov, A.A. (2004), *Tekhnicheskaya diagnostika i remont bytovoy radioelektronnoy apparatury* [Technical diagnostics and repair of household electronic equipment], Goryachaya liniya – Telekom, Moscow, Russia.
3. Polovko, A.M. and Gurov, S.V. (2006), *Osnovy teorii nadezhnosti* [Fundamentals of reliability theory], BKHV–Peterburg.
4. Bobalo, Yu.Ya., Volochyy, B.Yu. and Lozyns'kyy, S.Yu. (2013), *Matematychni modeli ta metody analizu nadiynosti radioelektronnykh, elektrotekhnichnykh ta prohramnykh system* [Mathematical models and methods of reliability analysis of radioelectronic, electrotechnical and software systems], Vydavnytstvo L'vivs'ka politekhnik, Lviv, Ukraine.
5. Sakovych, L.M. and Nebesna, Ya.E. (2018), *Otsinka nadiynosti tekhnichnykh ob'yektiv zi zminnoyu strukturoyu* [Reliability evaluation of technical objects with variable structure], *Proceeding of the X All-Ukrainian scientific and practical conference, ZHVI im. S.P. Korol'ova*, pp. 201-203.
6. Ksenz, S.P., Volynskiy, A.A. and Sakovich, L.N. (1990), *Teoreticheskiye i prikladnyye zadachi diagnostirovaniya sredstv svyazi i avtomatizatsii* [Theoretical and applied problems of diagnosing communications and automation], VAS.
7. Ksenz, S.P., Poltarzhitskiy, N.I., Alekseyev, S.P. and Mineyev, V.V. (2010), *Bor'ba s diagnosticheskimi oshibkami pri tekhnicheskoy obsluzhivani i remonte sistem upravleniya, svyazi i navigatsii* [The fight against diagnostic errors in the maintenance and repair of control systems, communications and navigation], VAS.
8. (1996), DSTU 2860–94. Nadiynist' tekhniky. Terminy ta vyznachennya, Derzhstandart Ukrayiny.

9. Kredentser, B.P., Butochnov, O.M., Minochkin, A.I. and Mohylevych, D.I. (2013), *Nadiynist' system z nadlyshkovistyuu. Metody modeli, optymizatsiya* [Reliability of systems with redundancy. Modeling methods, optimization], Feniks.
10. Hnatyuk, S.Ye. (2014), "Reliability indicators for special communications systems", *Derzhspetszv"yazok*, no. 1(25), pp. 73-79.
11. Bronshteyn, Y.N. and Symendyayev, K.A. (1981), *Spravochnyk po matematyke* [Handbook of mathematics], Nauka, Toybner.

Received 13.01.20

С.Е. Гнатюк, Л.А. Коротченко, Я.Е. Небесна

МОДЕЛИРОВАНИЕ НАДЕЖНОСТИ ОБЪЕКТОВ С ПЕРЕМЕННОЙ СТРУКТУРОЙ

Рассмотрены теоретико-множественные модели объектов, позволяющие количественно оценить мощность подмножеств элементов, которые используются в разных режимах работы для оценки показателей надежности радиоэлектронных средств в зависимости от структуры объекта и порядка изменения режимов работы. Показано, что надежность радиоэлектронных средств будет максимальной при минимальной мощности элементов, используемых во время работы, и наоборот. Полученные результаты применены для моделирования и оценки показателей надежности радиостанции, работающей в режиме приема или передачи. Проанализирована надежность радиоэлектронных многофункциональных и многорежимных средств, изменяющих структуру при использовании. Это позволяет оценить значения показателей надежности (наработки на отказ и среднего времени восстановления) в зависимости от порядка взаимодействия подмножеств элементов и их мощности.

К л ю ч е в ы е с л о в а: теоретико-множественная модель надежности, многорежимность, объект со сменной структурой.

S. Gnatiuk, L. Korotchenko, Y. Nebesna

MODELING OF RELIABILITY OF OBJECTS WITH VARIABLE STRUCTURE

The article considers the set-theoretic models of objects that allow to quantify the power of subsets of elements that are used in different operating modes in order to evaluate the reliability indicators of electronic equipment depending on the structure of the object and the order of change of operating modes. Using the mathematical apparatus of set theory, the reliability of electronic equipment will be maximum with a minimum power of the elements that are used during operation and vice versa. The results are used to assess the reliability indicators of a radio station operating in reception or transmission modes. The reliability of electronic devices that are multifunctional and multi-mode using the mathematical apparatus of set theory is analyzed. This will allows us to evaluate the values of reliability indicators (MTBF and average recovery time) depending on the order of interaction of the subsets of elements and their power.

К e y w o r d s: mine structure object, multiple theory, multi-mode.

ГНАТЮК Сергій Євгенович, канд. техн. наук, ст. наук. співроб. Інституту проблем моделювання в енергетиці ім. Г.Є. Пухова НАН України. В 1974 р. закінчив Львівський державний університет ім. І. Франка. Область наукових досліджень – надійність програмно керованих засобів спеціального зв'язку.

КОРОТЧЕНКО Людмила Анатоліївна, ад'юнкт Військового інституту телекомунікацій та інформатизації ім. Героїв Крут. В 1999 р. закінчила Військовий інститут управління та зв'язку. Область наукових досліджень – надійність і технічна діагностика цифрових пристроїв, прогнозування надійності радіоелектронних об'єктів.

НЕБЕСНА Яна Едуардівна, аспірантка Інституту спеціального зв'язку та захисту інформації Національного технічного університету України «Київський політехнічний інститут ім. Ігоря Сікорського», котрий закінчила у 2014 р. Область наукових досліджень — технічна надійність засобів спеціального зв'язку.