УДК [519.876.5::519.248]::621.3.061

М.О. Слюсаренко[1], к.т.н.
О.М. Семененко[1], д.військ.н., с.н.с.
О.Ю. Коркін[2]
В.Л. Іванов[3], к.т.н.
М.П. Науменко[3]
[1]*Центральний науково-дослідний інститут Збройних Сил України, м. Київ,*
[2] *Військова академія (м. Одеса), Україна*
[3]*Військова кафедра Національного авіаційного університету, м. Київ, Україна*

МОДЕЛЮВАННЯ БЕЗВІДМОВНОСТІ ЗРАЗКА ТЕХНІКИ З МОСТИКОВОЮ СХЕМОЮ З'ЄДНАННЯ КОМПЛЕКТУЮЧИХ

У статті запропонований варіант моделювання безвідмовності зразка техніки з „мостиковою“ схемою з'єднання комплектуючих. Наведені схеми з'єднання елементів: „зірка", „трикутник“, „мостикова“. Розрахунок безвідмовності „мостикової“ схеми запропоновано проводити за допомогою перетворення схеми „зірка“ у схему „трикутник“. Отримана система рівнянь, яка пов'язує відомі показники надійності із невідомими. На прикладі запропоновано спосіб перетворення складної схеми у просту із подальшим розрахунком її безвідмовності.

Ключові слова: *моделювання безвідмовності, аналіз надійності, „мостикова“ схема з'єднання, імовірність відмови, система рівнянь.*

Будь-який зразок техніки можна розглядати як складну систему, що складається з великої кількості елементів, які мають різноманітні схеми з'єднання. Перед дослідниками завжди постає питання аналізу такої складної системи з точки зору безвідмовності. Також важливим є момент переходу від однієї схеми з'єднання до іншої, спрощення такої схеми, щоб можна було визначати час безвідмовної роботи вузлів, елементів та зразка у цілому. Схеми з'єднань елементів різних технічних систем можуть значно відрізнятися від широко відомих послідовно-паралельних та паралельно-послідовних з'єднань, які аналізуються, зазвичай, методом згортки. Однак цей метод напряму неможливо безпосередньо використовувати для аналізу надійності (безвідмовності) структур, коли елементи з'єднуються між собою за так званою „мостиковою“ схемою з'єднання.

Постановка проблеми

У статті автори розглядають один із можливих варіантів моделювання безвідмовності зразка техніки, у якому елементи з'єднані за допомогою саме „мостикової“ схеми. Тому це дослідження є актуальним.

Аналіз останніх досягнень і публікацій

Аналіз останніх досліджень, публікацій. Одним із важливих завдань проектування є створення такої системи, в якій відмови будь-якого елемента або групи елементів не впливали б на надійність, тобто не призводили до відмови інших елементів системи. Тому доволі часто для розрахунків розглядають випадок, коли відмови елементів вважаються незалежними. Саме такий варіант розглядають автори у [1]. У [2] проводиться обґрунтування потрібного рівня надійності нових розроблень, розглядається необхідний рівень надійності для серійних виробів. У [3] розглядається метод структурних схем для аналізу безвідмовності відносно простих систем. Автори не враховують фізичну природу відмов у системі, а беруть до уваги тільки статистичні характеристики потоку відмов. Навпаки, фізична природа відмов розглядається автором у [4], причому найбільша увага приділяється прикладним інженерним методам. Автори у [5] розглядають системи із послідовним з'єднанням елементів для відновлюваних та невідновлюваних елементів та системи із складною структурою. Методи аналізу надійності технічних систем, структурна схема яких при формалізації не зводиться до послідовно-паралельної схеми, наводяться у [6]. Автор у [7] пропонує варіант застосування методу згортки при моделюванні безвідмовності зразка військової техніки за умови використання різних законів розподілу часу безвідмовної роботи комплектуючих. У даній статті запропонований варіант „мостикової“ схеми з'єднання елементів зразка техніки і розрахунок її безвідмовності.

Постановка задачі та її розв'язання

Зважаючи на зазначене, метою статті є моделювання безвідмовності зразка техніки із використанням „мостикової“ схеми з'єднання його елементів (комплектуючих).

Виклад основного матеріалу дослідження з повним обґрунтуванням отриманих наукових результатів

Як вже відзначалося вище метод згортки неможливо використовувати для аналізу безвідмовності структур, коли елементи з'єднуються між собою „мостиковою“ схемою (рис. 1). З рис. 1 видно, що, наприклад, елементи 1, 3, 5 складають схему „трикутник“, а елементи 1, 2, 3 – схему „зірка“. Перехід від „зірки“ з'єднань до „трикутника“ з'єднань здійснюється згідно схеми, відображеної на рис. 2. Перехід від „трикутника“ з'єднань до „зірки“ з'єднань здійснюється за схемою, що показана на рис. 3.

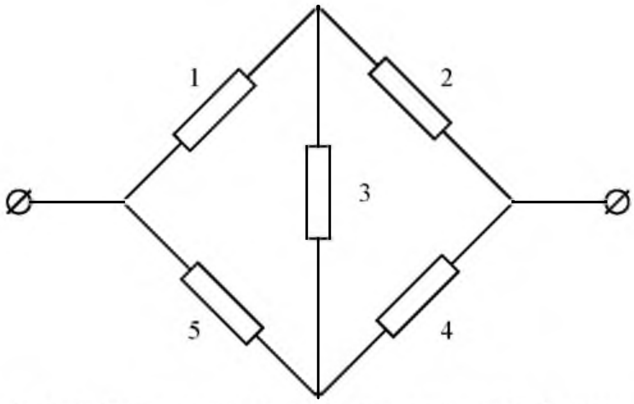

Рис. 1. Мостикова схема з'єднання елементів системи

Перехід від схеми з'єднань „трикутник“ до схеми з'єднань „зірка“ і навпаки, може бути здійснений подібно до способу, який використовується у електротехніці.

При перетворенні „трикутника“ з'єднань у „зірку“ з'єднань чи навпаки з'являється можливість отримання послідовно-паралельної схеми. Тоді розрахунок безвідмовності може здійснюватися методом згортки, сутність якого складається у послідовному перетворенні вихідної структури у більш прості [7]. Для цих спрощених структур досить нескладно отримати аналітичні вирази, що підкреслюють взаємозв'язок елементів систем з відомими параметрами, що використовуються для розрахунку безвідмовності цих систем.

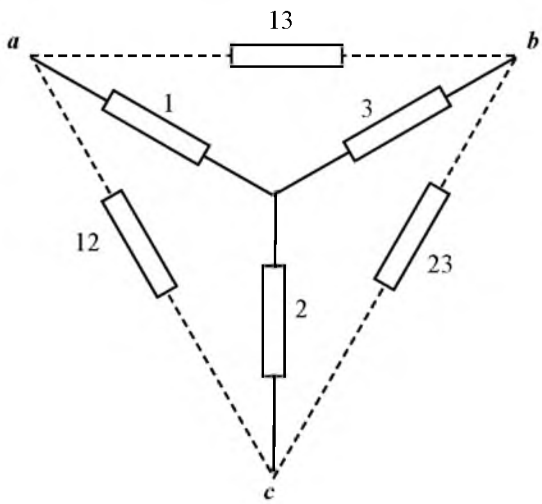

Рис. 2. Перехід від схеми з'єднань „зірка“ до схеми з'єднань „трикутник“

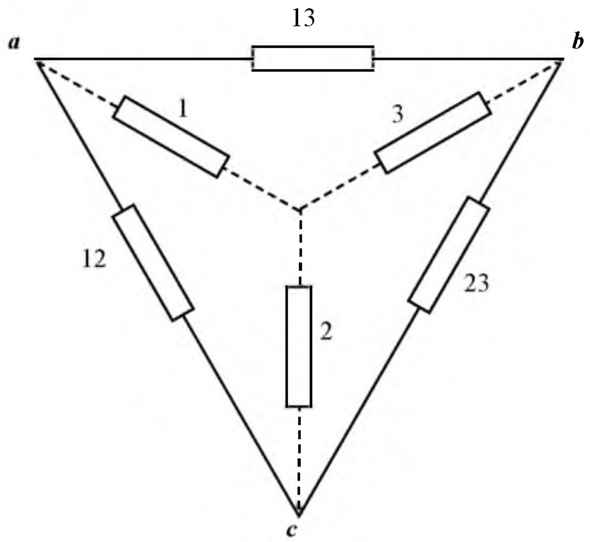

Рис. 3. Перехід від схеми з'єднань „трикутник" до схеми з'єднань „зірка"

При цьому вважається, що при переході від „трикутника" з'єднань у „зірку" з'єднань або навпаки характеристики надійності (безвідмовності) ланцюгів, що з'єднують однотипні точки у різних схемах, повинні бути рівними між собою. Дотримуючись цього правила, роботу всієї схеми з'єднань будемо визначати згідно відомої ймовірності відмов Q_i елементів, що входять до складу цієї системи. Для цього використаємо спосіб коротких замикань. За допомогою такого способу є можливість отримати несуперечливі співвідношення між показниками надійності систем елементів, з'єднаних за схемою „моста".

У цьому випадку при визначенні невідомих елементів 12, 13, 23 схеми „трикутника" будемо виходити, у першу чергу з того, що безвідмовність схеми між парами точок ***a*** та ***c***, ***c*** та ***b***, ***b*** та ***a*** як у схемі „зірки" так і у схемі „трикутника" (рис. 2) у процесі тих або інших перетворень не повинна змінюватися.

Проведемо аналіз надійності „мостикових" систем, за допомогою перетворювання схеми з'єднань „зірка" у схему з'єднань „трикутник" (рис. 2). При цьому будемо вважати, що параметри елементів „зірка" відомі.

а) Так, для розрахунку надійності (імовірності відмови) між точками ***a*** та ***c*** у схемі „зірка" (рис. 2) з'єднаємо накоротко точки ***c*** та ***b***. Тоді отримаємо послідовно-паралельну схему (рис. 4).

Рис. 4. Схема з'єднання елементів системи при закорочених точках *b* та *c*

Імовірність відмови такої схеми між точками ***a*** та ***b***, ***c***, яка складається з елементів 1, 2, 3 схеми „зірка", знаходиться як імовірність суми двох (A_1, та A_2) сумісних подій: одне – з імовірністю $Q(A_1) = Q_1$, інше – з імовірністю $Q(A_2) = Q_2 \cdot Q_3$ [8]:

$$Q = Q(A_1) + Q(A_2) - Q(A_1) \cdot Q(A_2) = Q_1 + Q_2 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 , \quad (1)$$

де Q_1, Q_2, Q_3 – відомі показники надійності (імовірності відмов) елементів 1, 2, 3.

Але для елементів 12, 13 схеми „трикутник“ (рис. 4) імовірність відмови цієї схеми між точками ***a*** та ***b***, ***c*** [8], а також згідно з рівністю $Q(t) = 1 - P(t)$:

$$Q = Q_{12} \cdot Q_{13}, \tag{2}$$

оскільки ці елементи при з'єднання точок ***c*** та ***b*** стають паралельно з'єднаними.

Отже, з урахуванням (1) та (2), можна записати, що

$$Q_1 + Q_2 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 = Q_{12} \cdot Q_{13}. \tag{3}$$

б) З'єднаємо тепер точки ***b*** та ***a*** (рис. 2) та отримаємо теж послідовно-паралельну схему (рис. 5).

У цьому випадку, аналогічно (1), ймовірність відмови такої системи між точками ***c*** та ***a***, ***b***, що складається з елементів 2, 1, 3 схеми „зірка“, знаходиться як імовірність суми двох (A_1, A_2) сумісних подій: одне – з імовірністю $Q(A_1) = Q_2$, інше – з імовірністю $Q(A_2) = Q_1 \cdot Q_3$:

$$Q = Q(A_1) + Q(A_2) - Q(A_1) \cdot Q(A_2) = Q_2 + Q_1 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3, \tag{4}$$

а для елементів 12, 23, схеми „трикутник“ (рис. 5), подібно (2):

$$Q = Q_{12} \cdot Q_{23}, \tag{5}$$

оскільки ці елементи при з'єднанні точок ***a*** та ***b*** стають паралельно з'єднаними. Отже, з урахуванням (4) та (5), можна записати, що:

$$Q_2 + Q_1 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 = Q_{12} \cdot Q_{23}. \tag{6}$$

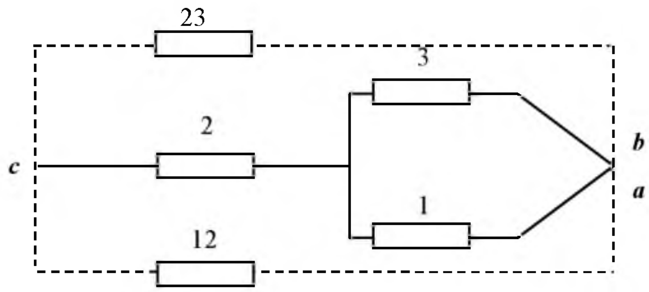

Рис. 5. Схема з'єднання елементів системи при закорочених точках *a* та *b*

в) Наостанок з'єднаємо точки ***a*** та ***c*** (рис. 2). На виході отримаємо схему, яка представлена на рис. 6.

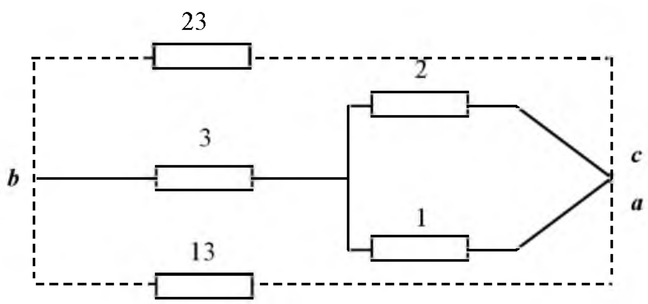

Рис. 6. Схема з'єднання елементів системи при закорочених точках *a* та *c*

У цьому випадку, аналогічно (1), ймовірність відмови такої системи між точками ***b*** та ***a***, ***c***, що складається з елементів 3, 1, 2 схеми „зірка“, знаходиться як імовірність суми двох (A_1, A_2) сумісних подій: одне – з імовірністю $Q(A_1) = Q_3$, інше – з імовірністю $Q(A_2) = Q_1 \cdot Q_2$:

$$Q = Q(A_1) + Q(A_2) - Q(A_1) \cdot Q(A_2) = Q_3 + Q_1 \cdot Q_2 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3, \tag{7}$$

а для елементів 13, 23 схеми „трикутник" на рис. 6 імовірність відмови цієї системи між точками ***b*** та ***a***, ***c***, подібно (2):

$$Q = Q_{13} \cdot Q_{23}, \tag{8}$$

оскільки ці елементи при з'єднанні точок ***a*** та ***c*** стають паралельно з'єднаними.

Отже з урахуванням (7) та (8), можна записати, що:

$$Q_3 + Q_1 \cdot Q_2 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 = Q_{13} \cdot Q_{23}. \tag{9}$$

Таким чином, була отримана система трьох рівнянь (3), (6), (9), яка пов'язує відомі показники надійності елементів 1, 2, 3 схеми „зірки" з трьома невідомими показниками надійності елементів 12, 13, 23 схеми „трикутник":

$$\begin{cases} Q_1 + Q_2 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 = Q_{12} \cdot Q_{13} \\ Q_2 + Q_1 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 = Q_{12} \cdot Q_{23} \\ Q_3 + Q_1 \cdot Q_2 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3 = Q_{13} \cdot Q_{13} \end{cases}$$

Вирішуючи цю систему, знаходимо невідомі показники надійності (імовірності відмов) елементів 12, 13, 23 за умов з'єднання їх у схему „трикутник":

$$Q_{12} = \sqrt{\frac{(Q_1 + Q_2 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3)\cdot(Q_2 + Q_1 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3)}{Q_3 + Q_1 \cdot Q_2 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3}}, \tag{10}$$

$$Q_{13} = \sqrt{\frac{(Q_1 + Q_2 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3)\cdot(Q_3 + Q_1 \cdot Q_2 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3)}{Q_2 + Q_1 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3}}, \tag{11}$$

$$Q_{23} = \sqrt{\frac{(Q_2 + Q_1 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3)\cdot(Q_3 + Q_1 \cdot Q_2 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3)}{Q_1 + Q_2 \cdot Q_3 - Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3}}. \tag{12}$$

Якщо елементи у схемі „зірка" достатньо надійні (це трапляється часто), то величинами ($Q_2 \cdot Q_3$), ($Q_1 \cdot Q_3$) та ($Q_1 \cdot Q_2$), ($Q_1 \cdot Q_2 \cdot Q_3$) можна зневажити, тоді:

$$Q_{12} = \sqrt{\frac{Q_1 \cdot Q_2}{Q_3}}, \tag{13}$$

$$Q_{13} = \sqrt{\frac{Q_1 \cdot Q_3}{Q_2}}, \tag{14}$$

$$Q_{23} = \sqrt{\frac{Q_2 \cdot Q_3}{Q_1}}. \tag{15}$$

Таким чином, отриманий взаємозв'язок між невідомими ймовірностями відмов Q_{12}, Q_{13}, Q_{23} елементів схеми „трикутник" з відомими ймовірностями відмов Q_1, Q_2, Q_3 схеми „зірка". Звідси можуть бути отримані залежності, які пов'язують, на відміну від попередніх, надійність (імовірність відмов) цих відомих елементів (рис. 3) із невідомими (рис. 2) при перетворенні схеми з'єднань „трикутник" у схему з'єднань „зірка". Так, із (13), (14), (15) маємо:

$$Q_{12}^2 = \frac{Q_1 \cdot Q_2}{Q_3}, \text{ звідки}$$

$$Q_1 = \frac{Q_3}{Q_2} \cdot Q_{12}^2; \tag{16}$$

$$Q_{13}^2 = \frac{Q_1 \cdot Q_3}{Q_2}, \text{ звідки}$$

$$Q_3 = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot Q_{13}^2; \tag{17}$$

$$Q_{23}^2 = \frac{Q_2 \cdot Q_3}{Q_1}, \text{ звідки}$$

$$Q_2 = \frac{Q_1}{Q_3} \cdot Q_{23}^2. \tag{18}$$

Тоді, підставляючи у перше рівняння (16) значення $Q_3 = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot Q_{13}^2$, будемо мати:

$$Q_1 = \frac{Q_3}{Q_2} \cdot Q_{12}^2 = \frac{1}{Q_1} \cdot Q_{12}^2 \cdot Q_{13}^2, \text{ звідки}$$

$$Q_1 = Q_{12} \cdot Q_{13}. \tag{19}$$

Аналогічно, підставляючи у друге рівняння (17) знайдене значення $Q_2 = \frac{Q_1}{Q_3} \cdot Q_{23}^2$, матимемо:

$$Q_3 = \frac{Q_2}{Q_1} \cdot Q_{13}^2 = \frac{1}{Q_3} \cdot Q_{13}^2 \cdot Q_{23}^2, \text{ звідки}$$

$$Q_3 = Q_{13} \cdot Q_{23}. \tag{20}$$

Підставляючи у третє рівняння (18) знайдене значення $Q_1 = \frac{Q_3}{Q_2} \cdot Q_{12}^2$, маємо:

$$Q_2 = \frac{Q_1}{Q_3} \cdot Q_{23}^2 = \frac{1}{Q_2} \cdot Q_{12}^2 \cdot Q_{23}^2, \text{ звідки}$$

$$Q_2 = Q_{12} \cdot Q_{23}. \tag{21}$$

Отже, отримані рівняння (19), (20), (21), які відображають зв'язок відомих імовірностей відмов Q_{12}, Q_{13}, Q_{23} (рис. 3) елементів схеми „трикутник“ з відомими ймовірностями відмов Q_1, Q_2, Q_3 схеми „зірка“ (рис. 2) при перетворенні схеми з'єднань „трикутник“ у схему з'єднань „зірка“.

д) Знову розглянемо раніше наведену схему „мостикового“ з'єднання елементів (рис. 1), а також схему на рис. 3, у якій „трикутник“ елементів 12, 13, 23 з відомими показниками надійності (13), (14), (15) перетворюється у схему з'єднань „зірка“ із невідомими поки що показниками надійності

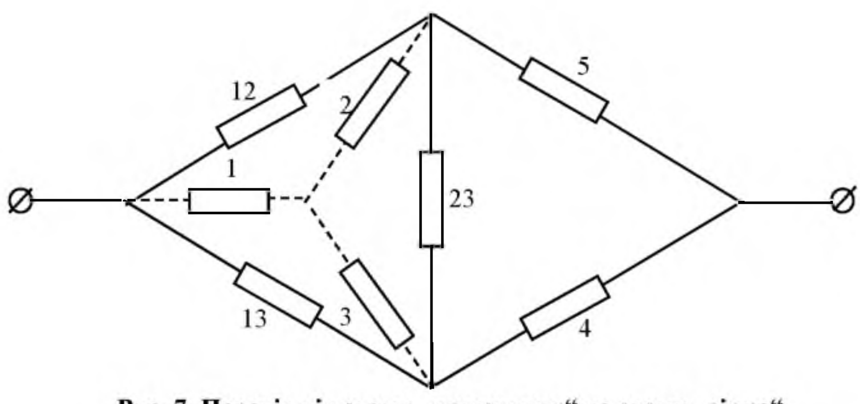

Рис. 7. Перехід від схеми „трикутник“ до схеми „зірка“

елементів 1, 2, 3 (19), (20), (21), як це наведено на рис. 7, із додатковими елементами 4 та 5.

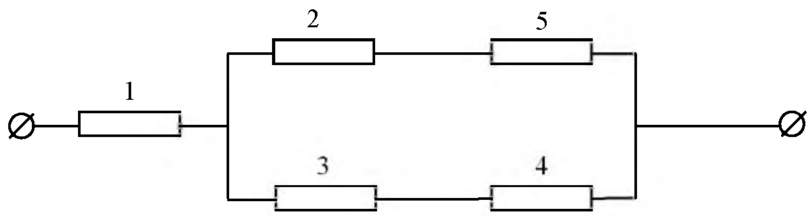

Рис. 8. Послідовно-паралельна схема з'єднання елементів

У результаті такого переходу від схеми „трикутник“ до схеми „зірка“ отримаємо послідовно-паралельну схему рис. 8.

Така схема вже досить легко аналізується методом згортки, у результаті чого отримаємо взаємозв'язок між ймовірностями відмов Q_1, Q_2, Q_3 та Q_4, Q_5.

Висновки

Таким чином можна моделювати безвідмовність зразка техніки із „мостиковою“ схемою з'єднання, перетворюючи схему „зірка“ у схему „трикутник“. Після цього поступово закорочуються кутові точки й отримують послідовно-паралельні схеми. Для кожної такої схеми визначається ймовірність відмови. Отже, складаємо систему з трьох рівнянь, яка поєднує відомі показники надійності елементів схеми „зірки“ з трьома невідомими показниками надійності елементів схеми „трикутник“. Вирішуючи цю систему, визначаються невідомі показники надійності (імовірності відмов) елементів за умов з'єднання їх у схему „трикутник“. Тобто, поступово спрощуючи складну схему, можна отримати послідовно-паралельну схему, яка вирішується методом згортки.

Перспективи подальших досліджень

Предметом подальших досліджень за цим напрямком може бути розрахунок безвідмовності для інших структурних схем із використанням різних законів розподілу часу безвідмовної роботи.

Список використаних джерел

1. Бельчич, Б. И. Надежность и эффективность в технике. Справочник в десяти томах. Т. 5, Проектный анализ надежности [Текст] / Б. И. Бельчич, В. Ф. Грибанов, Э. В. Дворецкий и др. Под ред. В. И. Патрушева, А. И. Рембезы. – М.: Машиностоение, 1988, – 320 с.

2. Дзиркал, Э. В. Задание и проверка требований к надежности сложных изделий [Текст] / Э. В. Дзиркал. – М.: Радио и связь, 1981. – 176 с.

3. Мрыкин, С. В. Метод структурных схем и оценка безотказности системы [Текст] / С. В. Мрыкин, М. И. Вильчек. – С.: СГАУ, 2010. – 29 с.

4. Кубарев, А. И. Надежность в машиностроении [Текст] / А. И. Кубарев. – М.: Издательство стандартов, 1989. – 225 с.

5. Козлов, Б. А. Справочник по расчету надежности [Текст] / Б. А Козлов, И. А. Ушаков. – М.: Сов. радио, 1966. – 431 с.

6. Рябинин, И. А. Логико-вероятностные методы исследования надежности структурно-сложных систем [Текст] / И. А. Рябинин, Г. Н. Черкесов. – М.: Радио и связь, 1981. – 266 с.

7. Слюсаренко М. О. Застосування методу згортки при моделюванні безвідмовності зразка військової техніки [Текст] / М. О. Слюсаренко // Зб. наук. пр. ЦНДІ ОВТ ЗС України. – К., 2017. – №4(16). – С. 73 – 78.

8. Вентцель, Е. С. Теория вероятностей [Текст] : учеб. пос. для вузов / Е. С. Вентцель. – М.: Наука, 1964. – 576 с.

Рецензент: Р.В. Колчін, к.т.н., с.н.с., Військова академія (м. Одеса), Україна

МОДЕЛИРОВАНИЕ БЕЗОТКАЗНОСТИ ОБРАЗЦА ТЕХНИКИ С МОСТИКОВОЙ СХЕМОЙ СОЕДИНЕНИЯ КОМПЛЕКТУЮЩИХ

М. А. Слюсаренко, О. М. Семененко, О.Ю. Коркин, В.Л. Иванов, М.П. Науменко

В статье предложен вариант моделирования безотказности образца техники с „мостиковой“ схемой соединения комплектуючих. Приведены схемы соединения элементов: „звезда“, „треугольник“, „мостиковая“. Расчет безотказности „мостиковой“ схемы предложено проводить с помощью превращения схемы „звезда“ в схему „треугольник“. Получена система уравнений, которая связывает известные показатели надежности с неизвестными. На примере предложен способ превращения сложной системы в простую с последующим расчетом ее безотказности.

Ключевые слова: *моделирование безотказности, анализ надежности, „мостиковая“ схема соединений, вероятность отказа, система уравнений.*

RELIABILITY MODELING OF STANDARTD TECHNIQUE WITH MOSTIKOVOI CHARD OF ELEMENTS CONNECTION

M. Sliusarenko, O. Semenenko, O. Korkin, V. Ivanov, M. Naumenko

In the article a variant of application of „mostikovoi“ chard of elements connection is offered while reliability modeling of standard technique. Charts of connection of elements „star“, „triangle“, „mostikovaya“ are offered. The calculation of reliability of „mostikovoi“ chard is offered by means of transformation the chard „star“ in a chard „triangle“. The system of equation is got that links the known indexes reliability with unknown ones. The proposed example gives a way of transforming a complex system into a simple system with the further calculation of its reliability.

Key words: *modeling of survival, reliability analysis, „mostikova“ shard of connection, failure function, equation of system.*